

Программно-конфигурируемое радио набирает обороты

Александр Тумачек, Дмитрий Кругликов (Москва)

Статья посвящена SDR-системам, которые получают всё большее и большее распространение. В профессиональной сфере они используются для военного и специального применения при организации связи в различных сетях (GSM, Tetra, Wi-Fi, Wi-Max), а также для оказания беспроводных услуг, так как позволяют обслуживать большое количество протоколов. Помимо этого, данная технология набирает популярность у радиолюбителей, благодаря появлению на рынке дешёвых и доступных SDR-приёмников (SDR-RTL).

ВВЕДЕНИЕ

Изобретение транзисторов, несколько позже интегральных схем, привело к тому, что во второй половине XX века во всех основных элементах тракта радиоприёмных устройств (РПУ) электронные лампы были заменены полупроводниковыми приборами. Использование новых электронных элементов значительно упростило производство РПУ, в десятки и даже сотни раз уменьшило их массу, габариты и энергопотребление, а также существенно повысило их надёжность.

В это же время развивались методы цифровой обработки сигналов (ЦОС), позволявшие выполнить над сигналом, представленным отсчётами в цифровой форме, практически любые математические операции. Операции фильтрации, экстраполяции, интерполяции, быстрого преобразования Фурье и другие стали легко реализуемыми. Цифровые методы позволяли применять сложные алгоритмы цифровой обработки сигналов, а технология производства интегральных схем с высокой степенью интеграции давала возможность создания дешёвых и надёжных устройств.

В середине 1970-х гг. слова известного английского физика Дж. Бернала «Радиотехника – это экспериментальная математика», сказанные им в 1950-х гг., из яркой фразы превратились в содержательное утверждение [1]. Любой сигнал мог быть представлен отсчётами в цифровом виде, затем обработан в соответствии с реализованным алгоритмом в программе на вычислительном устройстве – процессоре или микроконтроллере.

Так начался новый этап эволюции РПУ: появились цифровые радиопри-

ёмные устройства – по сути, специализированные электронно-вычислительные машины (ЭВМ), в которых аддитивная смесь сигнала и помех на радио или промежуточной частоте подвергалась аналого-цифровому преобразованию (АЦП), а вся последующая обработка (фильтрация, демодуляция, декодирование, оценка параметров сигнала и т.д.) выполнялась в цифровой форме [2]. Новое поколение цифровых устройств было гораздо удобнее и эффективнее систем аналоговой обработки. Они позволяли решать важные практические задачи, которые с трудом реализовывались в аналоговой технике. Стабильность параметров, точность выполнения операций над цифровым сигналом, возможность реконфигурирования схем и унификация узлов обработки стали неоспоримыми преимуществами цифровых устройств перед аналоговой техникой, определив дальнейшее направление развития отрасли.

Бурное развитие телекоммуникационных технологий, техники связи, фирменных технологий и устройств привело к появлению большого количества видов протоколов и стандартов оборудования. Зачастую разные производители выпускали оборудование, работающее по одним и тем же стандартам и протоколам, но не совместимое между собой. Как правило, производители преследовали цель монополизации рынков. Фирменный стандарт требовал фирменного оборудования, и крупные компании продвигали свои стандарты на мировом уровне. Внедрение цифровых технологий обеспечило возможность реконфигурирования имеющегося приёмного оборудования. А при-

менение универсальных цифровых платформ избавляло от необходимости адаптации системы под конкретного производителя. Так появились универсальные модемы, в которых изменением прошивки можно было обеспечить совместимость с тем или иным фирменным протоколом или оборудованием. Модемы обеспечивали не только совместимость оборудования, но и выполняли более сложную функцию – адаптивную коррекцию канальных искажений [3]. Модемы умели адаптироваться под разные каналы передачи данных с различными характеристиками и качеством исполнения. В задачу модемов входило обеспечение гарантированной передачи данных на максимальное расстояние при максимальных скоростях с минимальными затратами энергии, при этом инфраструктура сетей передачи данных была далеко не совершенна. Медная витая пара оставалась основным видом проводной связи ещё с 1900 г. Без адаптивной коррекции искажений в линии связи работа на высоких скоростях в условиях «медной» инфраструктуры была бы просто неосуществима. А настройку под линию нельзя было реализовать без реконфигурируемой приёмной системы.

Термин Software Defined Radio (SDR) был придуман в 1984 г. командой разработчиков подразделения компании E-Systems из города Гарланд, штата Техас (позже компания стала называться Raytheon). Была опубликована статья про цифровой приёмник с реализованными программно-определяемыми блоками компенсации межсимвольной интерференции и демодуляции сигналов, с цифровым фильтром с тысячей отводов в линии задержки (см. рис. 1). Такой приёмник был реализован на массивно-параллельном процессоре с разделяемой памятью [4].

На сегодняшний момент под термином SDR понимают программно конфигурируемую (определяемую) систему – радиопередатчик и/или радиоприёмник, позволяющий при помощи программного обеспечения менять рабочие параметры системы: тип модуляции, рабочий диапазон



Рис. 1. Иллюстрация из журнала E-Systems Team 1985 г.

частот, ширину принимаемого/передаваемого спектра сигнала, выходную мощность. Неизменными остаются параметры, заданные производителем согласно архитектуре устройства: разрядность АЦП, предельные полосы и режимы работы цифрового устройства, его предварительные установки.

Эволюция SDR

В самом простом и одновременно идеальном случае SDR-радио имеет в своём составе:

- аналоговую часть, состоящую из антенны, усилителей и фильтров;
- высокоскоростные АЦП и цифроаналоговый преобразователь (ЦАП);
- цифровой процессор обработки сигналов (ЦПОС) и/или вычислительную систему (ЭВМ).

Схема такого радио представлена на рисунке 2.

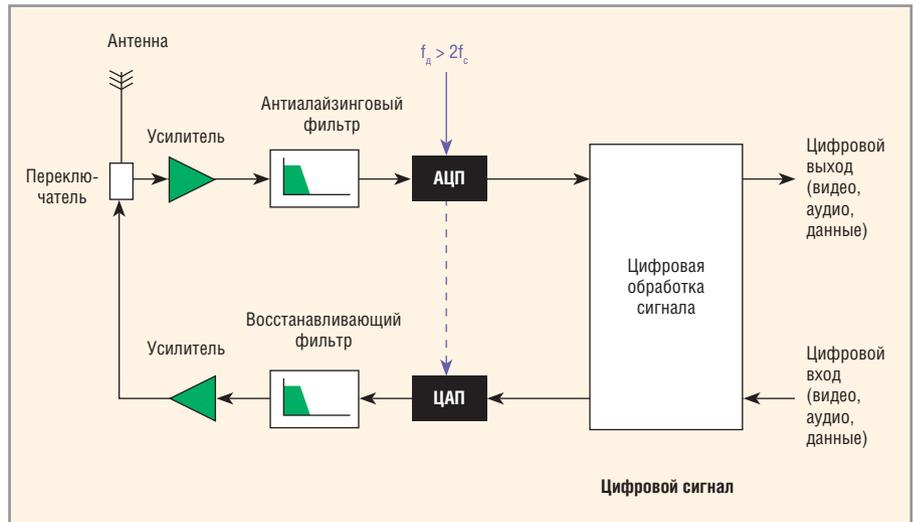


Рис. 2. Структурная схема простейшего идеального SDR-радио

Приёмный тракт, как правило, организован следующим образом: сигнал с выхода антенно-фидерного тракта поступает на усилитель, затем фильтруется в фильтре низкой частоты, далее сигнал оцифровывается на АЦП и следует на сигнальный процессор для конечной обработки.

Передающий тракт организован на основе следующей схемы: цифровой сигнал с сигнального процессора поступает на ЦАП, где преобразуется в аналоговый сигнал, который обрабатывается на восстанавливающем фильтре, после чего сигнал усиливается и поступает в антенно-фидерный тракт.

Рассмотрим три этапа эволюции SDR-приёмников.

Первое поколение SDR-приёмников появилось в начале 1990-х гг. На рисунке 3 представлена его структурная схема. Как видно из рисунка, аналоговая

часть приёмника понижает частоту сигнала с радиочастоты на промежуточную частоту при помощи опорного генератора. Поскольку наиболее выгодной для ЦОС является обработка сигнала на видеочастоте – когда частота дискретизации, и, соответственно, скорость потока данных, поступающих на сигнальный процессор, являются минимально возможными, – используется квадратурная схема обработки сигнала [1]. Для этого при помощи второго опорного генератора и фазовращателя выделяются синфазная и квадратурная составляющие.

Затем видеосигнал оцифровывается на АЦП (скорость не превышает десятков кГц) и поступает на дальнейшую обработку на сигнальный процессор.

В следующем поколении, появившемся в 2000-х гг., процесс оцифровки сигнала стал производиться на про-

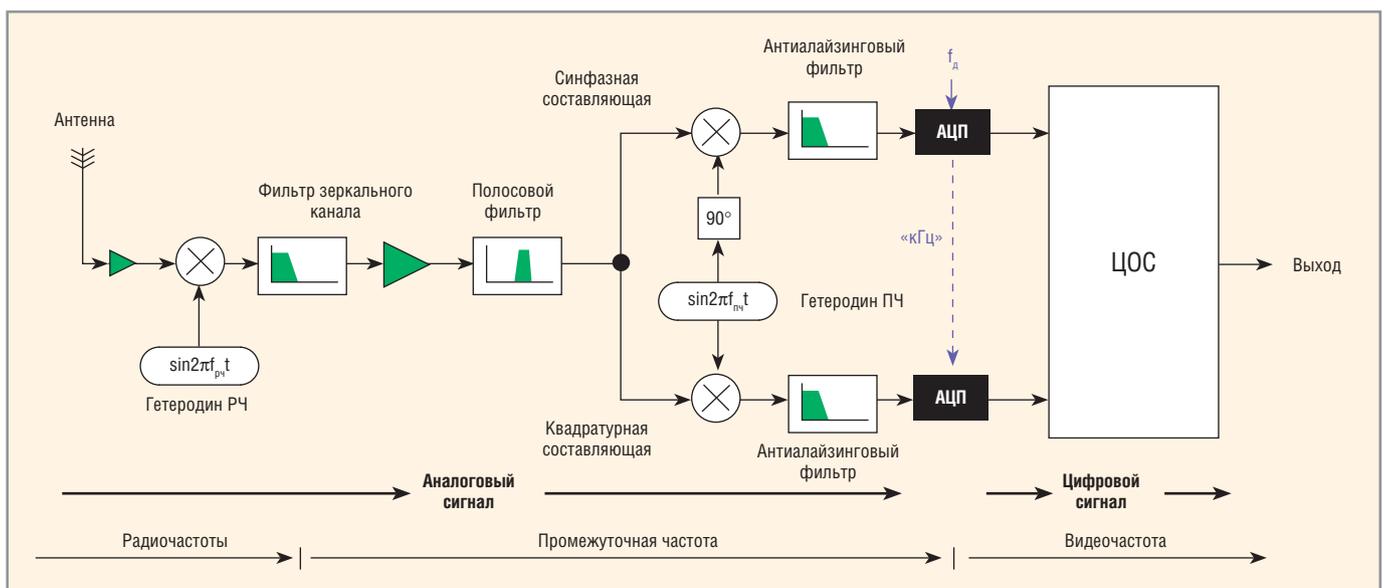


Рис. 3. Структурная схема первого поколения SDR-приёмников

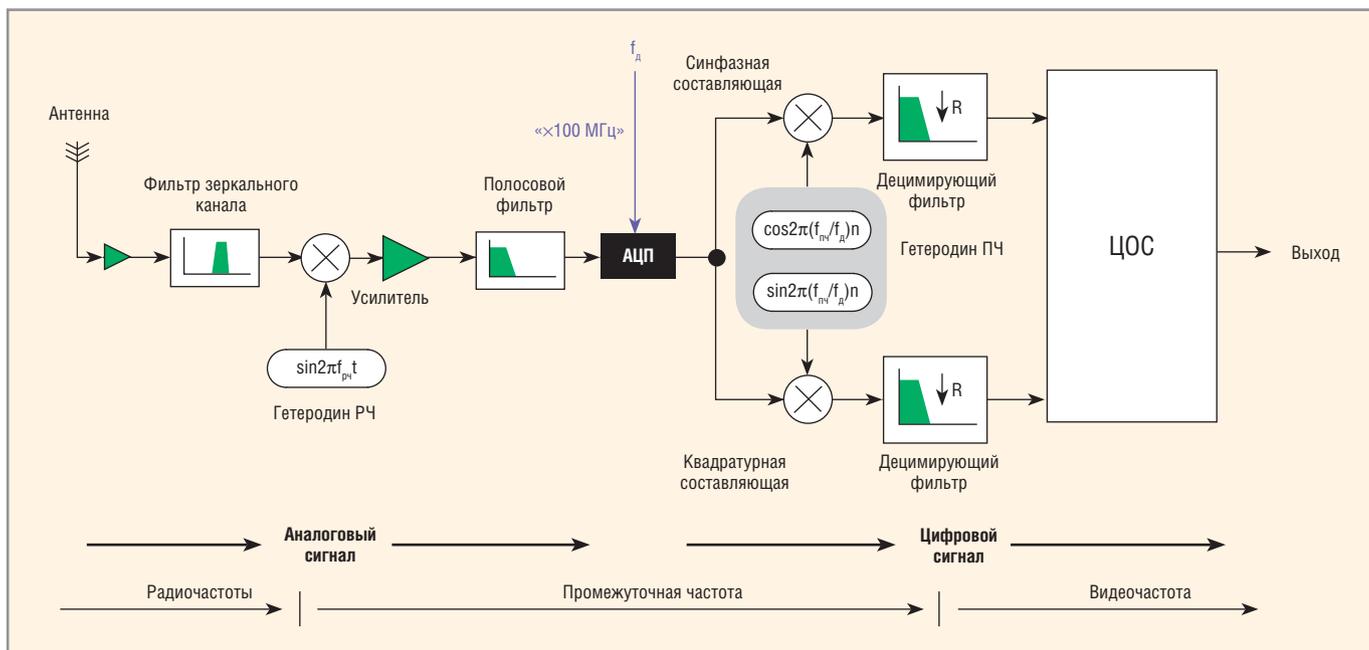


Рис. 4. Структурная схема второго поколения SDR-приёмников

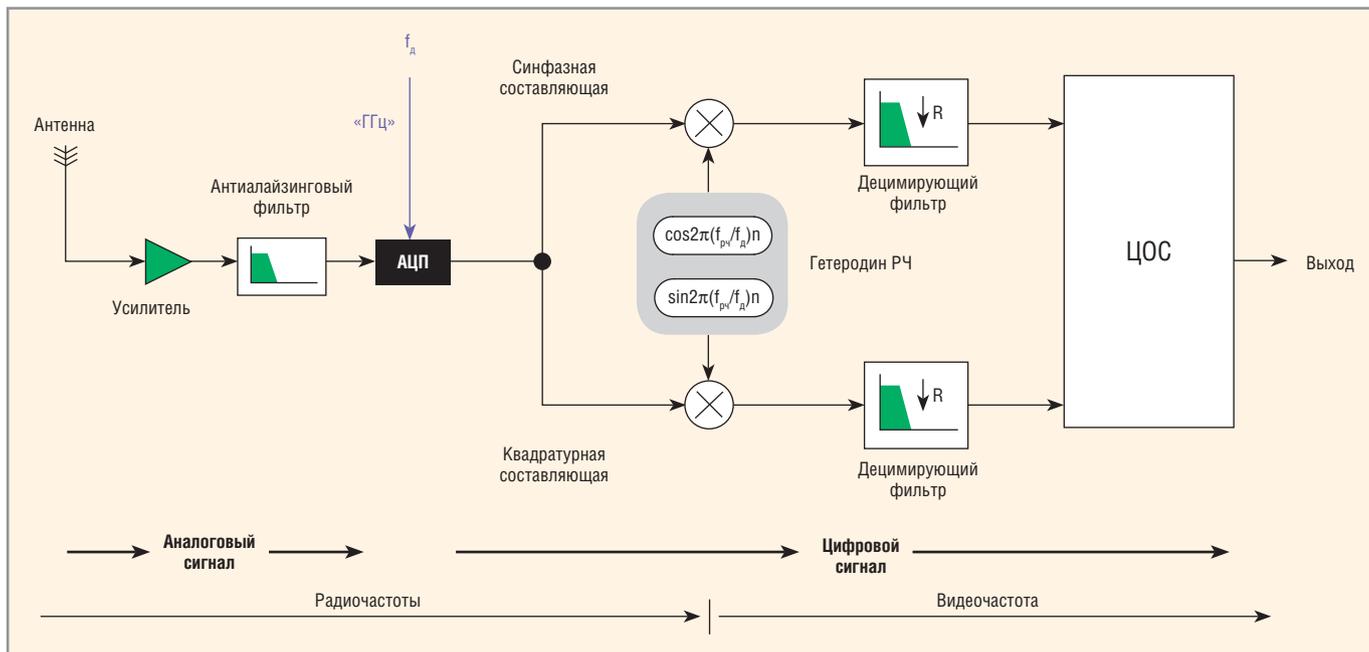


Рис. 5. Структурная схема третьего поколения SDR-приёмников

межуточной частоте. Например, сигнал на промежуточной частоте в 40 МГц может оцифровываться АЦП, работающим на скорости 125 МГц. Схема данного поколения представлена на рисунке 4.

Здесь первая стадия цифровой обработки сигнала включает в себя DDC (Digital Down-Converter), который переносит сигнал на видеочастоту для обработки в дальнейшем на сигнальном процессоре.

В данной архитектуре приёмника, по сравнению с первым поколением, объём преобразований над сигналом, производимых в цифровой форме, больше.

Таким образом, повышается гибкость SDR-приёмника.

В последнем, на данный момент, поколении оцифровка сигнала приблизилась вплотную к антенно-фидерному тракту (см. рис. 5).

В данном случае отсутствует стадия обработки сигнала на промежуточной частоте, снос происходит сразу – с радиочастоты на видеочастоту.

Однако стоит отметить, что такая схема пока что труднореализуема на практике, поскольку столь высокоскоростные АЦП мало распространены вследствие своей сложности в изготовлении и дороговизны.

SDR-ПРИЁМНИК НА БАЗЕ МИКРОСХЕМ REALTEK RTL2832U и RAFAEL Micro R820T

Перейдём к рассмотрению схемотехники и функционирования конкретного SDR-приёмника на базе микросхем Realtek RTL2832U и Rafale Micro R820T.

Интересным фактом является то, что изначально данное устройство являлось приёмником цифрового телевидения формата DVB-T. Микросхема RTL2832U выпускается производителем как демодулятор COFDM-сигналов, используемых в цифровом телевидении. Но радиолюбителями был обна-

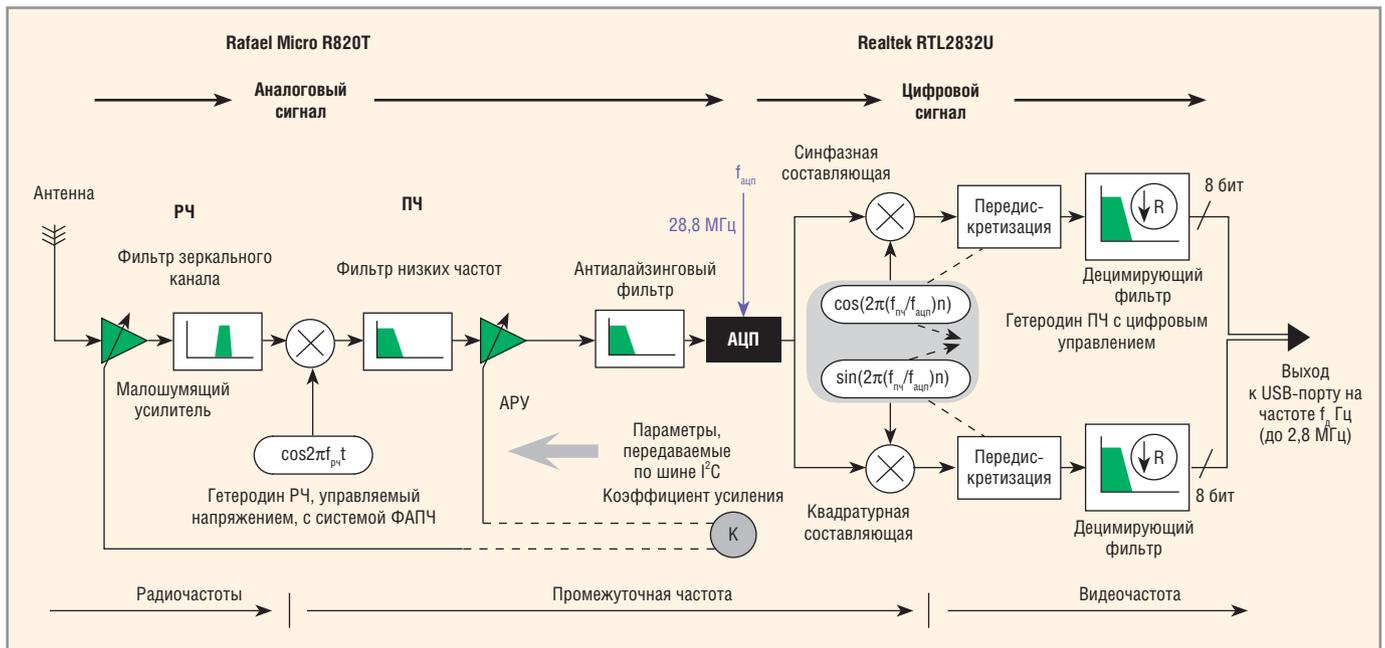


Рис. 6. Структурная схема SDR-приёмника на базе микросхем RTL2832U и R820T



Рис. 7. Приёмный тракт с использованием программно-определяемого радио

ружен недокументированный режим работы микросхемы, при котором стадия демодуляции отключается, а микросхема превращается, по сути, в 8-битный АЦП с квадратурным выходом с частотой дискретизации 28,8 МГц. Таким образом, приёмник цифрового телевидения формата DVB-T превращается в программно-определяемый радиоприёмник.

На рисунке 6 представлена структурная схема исследуемого приёмника.

Радиосигнал из антенно-фидерного тракта попадает на микросхему R820T. Здесь он переносится на промежуточную частоту при помощи гетеродина, управляемого напряжением, которое регулируется микросхемой RTL2832U через шину I²C. После прохождения автоматической регулировки усиления (APU) сигнал на промежуточной частоте должен быть преобразован в видеосигнал. Классическим методом преобразования является пропускание сигнала на промежуточной частоте через ФНЧ, затем его оцифровка на АЦП, далее оцифрованный сигнал переносится

на видеочастоту при помощи квадратурного гетеродина с цифровым управлением. Таким образом, на выходе приёмника имеются синфазная и квадратурная составляющие сигнала разрядностью 8 бит. Максимально возможная полоса сигнала ограничена характеристиками микросхемы R820T и составляет 2,8 МГц.

Антенно-фидерный тракт

В ходе эксперимента был построен классический антенно-фидерный тракт, имеющий в своём составе ТВ-антенну типа «волновой канал», ТВ-усилитель GALAMP-102 и коаксиальный кабель марки RG-58/U длиной 30 м (см. рис. 7).

Перспективы

Качественным скачком для повышения эффективности использования приёмника может стать переход от классического аналогового антенно-фидерного тракта к цифровому. Одним из наиболее простых и доступных способов реализации цифро-

вого тракта является использование активных преобразователей USB-8P8C (в России часто именуется как RJ-45) и обратно, а также, соответственно, использование кабеля типа «витая пара» вместо обычного коаксиального кабеля (см. рис. 8). Из достоинств данного способа стоит отметить невосприимчивость к аналоговым помехам, так как сигнал передаётся от антенны до приёмника в цифровом виде. Важно заметить, что не все преобразователи пропускают сигнал с полосой 3,2 МГц. Представленный на рисунке 8 преобразователь с трудом обеспечивает пропускание сигнала с полосой в 1 МГц × 2 канала × 8 бит = 16 Мбит/с, хотя у производителя оборудования заявлены иные показатели.

Ещё более качественный тракт можно получить при использовании преобразователей USB-интерфейса в оптический сигнал с применением оптоволокна. Но данный вариант тракта будет дорогим в исполнении вследствие высокой цены оптических преобразователей сигнала.



Рис. 8. Преобразователи USB-8P8C для реализации цифрового тракта



Рис. 9. Когерентный двухканальный приёмник на основе двух SDR-приёмников

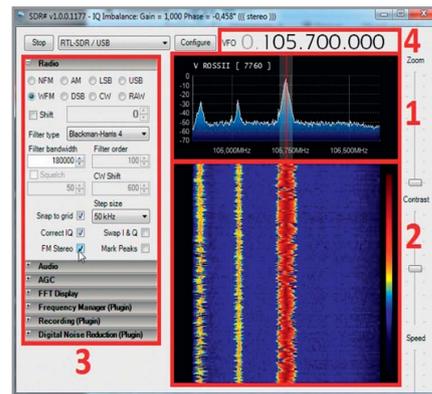


Рис. 10. Основное окно СПО SDR#

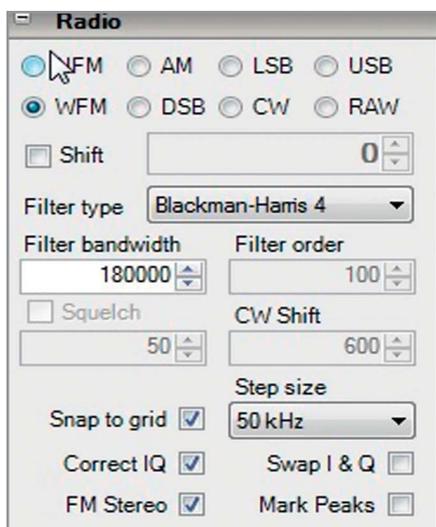


Рис. 11. Блок Radio

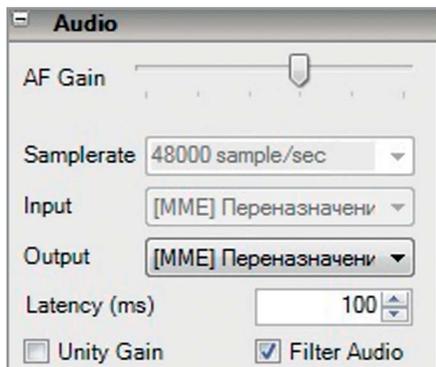


Рис. 12. Блок Audio

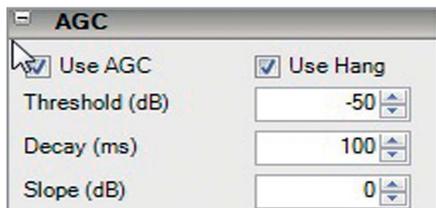


Рис. 13. Блок AGC

выпасть из одного приёмника «кварц» и затем соединить проводом освобожденные контакты с кварцем второго приёмника (см. рис. 9). Таким образом обеспечивается когерентность приёма. Однако стоит отметить, что реализация данной схемы потребует, помимо установки второй приёмной антенны и организации второго антенно-фидерного тракта, использования сложных алгоритмов многоканальной (в данном случае двухканальной) обработки сигнала. Это повлечёт за собой разработку собственного программного обеспечения.

Программное обеспечение

Существует большое количество разнообразного специализированного программного обеспечения (СПО), предназначенного для работы с SDR-приёмниками. Рассмотрим одно из самых популярных и удобных приложений – SDR# [5].

На рисунке 10 представлено изображение основного окна СПО SDR#. Цифрой 1 обозначена область отображения спектра принимаемого сигнала, в соответствии с возможностями приёмника его максимальная ширина составляет 3 МГц. Цифрой 2 обозначена область отображения спектрограммы сигнала. Цифрой 3 – область, в которой находятся блоки управления параметрами обработки сигнала. Цифрой 4 обозначена область настройки частоты.

Рассмотрим подробнее блоки управления параметрами обработки сигнала.

Блок Radio (см. рис. 11). В данном блоке имеется управление типом модуляции сигнала, возможность коррекции значения частоты (флажок Shift и поле ввода значения коррекции справа от флажка). Помимо этого, можно выбрать используемый фильтр из выпадающего списка, задать его ширину полосы пропускания и порядок.

Блок Audio (см. рис. 12) содержит регулятор управления громкостью, выпадающий список выбора выходной частоты дискретизации, а также выпадающие списки входных и выходных устройств, присутствующих в операционной системе.

Блок AGC, представленный на рисунке 13, управляет системой APY AGC. Флажком UseAGC можно выбрать, использовать или не использовать систему APY, и задать в поле Threshold порог срабатывания системы регулировки.

Блок FFT Display (см. рис. 14) управляет отображением спектра и спектрограммы сигналов.

В выпадающем списке View можно выбрать, отображать ли только спектр, только спектрограмму или и то и другое вместе.

В выпадающем списке Window можно задать используемую оконную функцию.

В выпадающем списке Resolution можно задать размер блока БПФ.

В областях Smoothing и Spectrum возможно провести дополнительную настройку отображения спектрограммы и спектра соответственно.

Из достоинств данного СПО стоит отметить его модульность: в область блоков управления параметрами обработки сигнала можно добавлять блоки, выполняющие ту или иную дополнительную обработку сигнала. Эти блоки могут быть доступны для скачивания из Интернета в виде готовых решений или написаны при помощи языка программирования C# самим пользователем.

Вторым рассматриваемым СПО является мощный программный инструментарий – GNU Radio [6]. GNU Radio предоставляет разработчикам программно-определяемых радиосистем «строительные блоки», реализующие огромный набор функций по цифровой обработке сигналов: от простейших математических операций

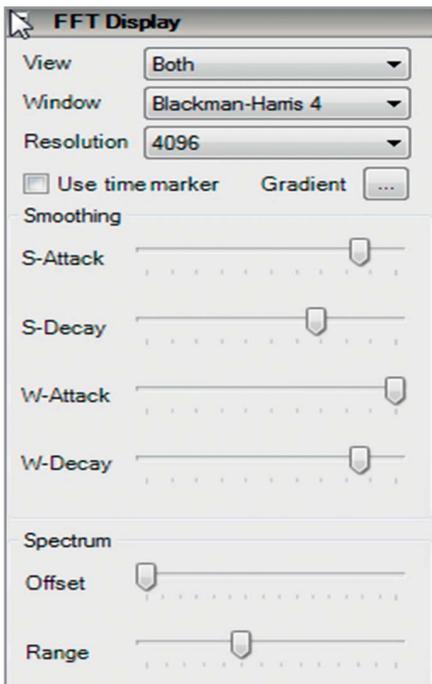


Рис. 14. Блок FFT Display

до обработки сложных современных стандартов связи, таких как DVB-T, LTE, IEEE 802.11. Программы, создаваемые средствами GNU Radio, представлены как графы потока управления и могут использоваться с внешними устройствами или для создания программных симуляторов.

GNU Radio способно работать со множеством различных SDR-приёмников, в том числе и с приёмниками на основе микросхемы RTL2832U. На рисунке 15 приведён простейший проект для работы с SDR-приёмником в среде GNU Radio. Как уже упоминалось, сценарий для работы с приёмником строится из отдельных блоков, отвечающих за выполнение конкретной задачи. Например, блок «RTL-SDR Source», как следует из названия, отвечает за передачу цифрового потока непосредственно от SDR-приёмника. Блок «Throttle» ограничивает скорость цифрового потока в соответствии с параметром «Sample Rate» и служит для предотвращения нештатных ситуаций, когда данные от источника идут со слишком высокой скоростью и перегружают центральный процессор, что приводит к «зависанию» компьютера. Блоки «QT GUI Frequency Sink» и «QT GUI Waterfall Sink» служат для графического отображения спектра и сонограммы соответственно. Практически все блоки имеют параметры, которые могут быть настроены в соответствии с желаниями пользователя.

На рисунке 16 приведено окно параметров блока графического отобра-

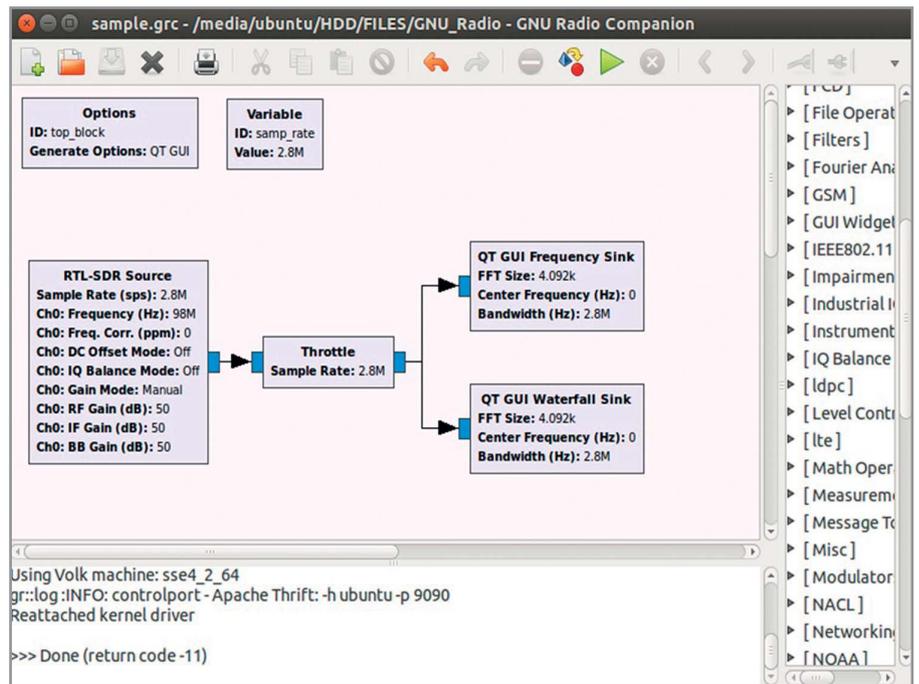


Рис. 15. Интерфейс графической среды пакета GNU Radio – GNU Radio Companion

жения спектра сигнала. Здесь можно настроить тип входных данных (Complex, Float и др.), размер блока БПФ, выбрать оконную функцию (Blackman-harris, Hamming, Hanning, и др.), настроить усреднение, автомасштаб и многие другие параметры.

Выводы

В результате можно сказать, что программно-конфигурируемая система является наиболее перспективной структурой современного радио. Она обеспечивает инвариантность к типу связного оборудования и видам протоколов, реализует сложные алгоритмы обработки сигналов для разных каналов передачи данных. Такая система может быть легко усовершенствована за счёт обновления программного обеспечения. А программное обеспечение может быть легко перенесено на новую более современную аппаратную платформу. Подобная унификация и простота перехода к новым версиям оборудования существенно снижает бюджет эксплуатации приёмных/передающих систем, расширяет ресурс и возможности сложившейся инфраструктуры. В будущем универсальные программно-конфигурируемые системы определяют стандарты сотовой и беспроводной связи. В них воплотятся возможности одновременной работы в различных сетях связи при использовании единого радиointерфейса. При массовом внедрении

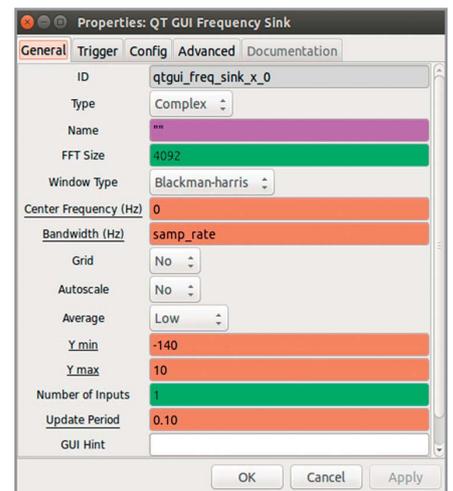


Рис. 16. Параметры блока «QT GUI Frequency Sink»

подобной техники стоимость её будет существенно снижена. Но уже сегодня неплохие приёмные системы доступны по цене от 300–700 рублей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Быховский М. А. Развитие телекоммуникаций. На пути к информационному обществу: развитие спутниковых телекоммуникационных систем. М. Горячая линия-Телеком. 2014. С. 440.
2. www.ru.wikipedia.org.
3. Qureshi S.U.H. Adaptive Equalization. Proceedings of the IEEE. 1985. Vol. 73. №9. Pp. 1349–1387. IEEE Press. New York.
4. Johnson P. New Research Lab Leads to Unique Radio Receiver. E-Systems Team. 1985. May. Vol. 5. №4. Pp 6–7.
5. www.rtl-sdr.ru.
6. www.gnuradio.ru.