

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования**

«Воронежский государственный технический университет»

**С. М. Федоров, О. В. Бойко,
Ю. Г. Пастернак, А. А. Пирогов**

СИСТЕМЫ ПОДВИЖНОЙ РАДИОСВЯЗИ

Лабораторный практикум

Воронеж 2019

УДК 621.396.93(075.8)
ББК 32.884я7
С409

Рецензенты:

кафедра основ радиотехники и электроники
Воронежского института
федеральной службы исполнения наказаний России
(начальник кафедры канд. техн. наук, доцент Р. Н. Андреев);
канд. экон. наук А. А. Кулин

Системы подвижной радиосвязи: лабораторный
С409 практикум / С. М. Федоров, О. В. Бойко, Ю. Г. Пастернак,
А. А. Пирогов; ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет». – Воронеж: Изд-во ВГТУ,
2019. – 146 с.

ISBN 978-5-7731-0747-7

Учебное издание содержит необходимые теоретические материалы и задания для проведения лабораторно-практических занятий по дисциплине «Системы подвижной радиосвязи».

Издание соответствует требованиям федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» (специализация «Радиоэлектронные системы передачи информации»), дисциплине «Системы подвижной радиосвязи».

Ил. 103. Табл. 3. Библиогр.: 7 назв.

УДК 621.396.93(075.8)
ББК 32.884я7

*Печатается по решению учебно-методического совета
Воронежского государственного технического университета*

ISBN 978-5-7731-0747-7 © С. М. Федоров, О. В. Бойко,
Ю. Г. Пастернак, А. А. Пирогов, 2019
© ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет», 2019

ВВЕДЕНИЕ

Настоящее учебное издание соответствует программе курса «Системы подвижной радиосвязи» для специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» (специализация «Радиоэлектронные системы передачи информации»).

Лабораторный практикум содержит необходимый теоретический материал, позволяющий студенту успешно освоить изучаемый курс, приобрести исчерпывающие знания в области построения различных типов систем подвижной радиосвязи. Информация представлена в наглядном виде для ее наиболее быстрого усвоения и практического применения в дальнейшем.

Описываются лабораторно-практические занятия, проводимые с применением узкопрофильного научного оборудования, разработанного специально для данной дисциплины (коммерческая платформа программно-определяемого радио RTL-SDR), а также достаточно широкого набора прикладного программного обеспечения, например, математического пакета MathLab, анализатора систем сотовой связи GSM-900 и GSM-1800 RFDSP GSM Scanner, программы анализа и декодирования радиосигналов SDR Sharp, справочной программы анализа радиосигналов Artemis.

При составлении учебного издания авторы постарались выдержать сжатость и доходчивость изложения базовых теоретических сведений и лабораторных практикумов, необходимых для изучения дисциплины и получения студентами практических навыков построения и исследования систем подвижной радиосвязи.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ РАБОТЫ УСТРОЙСТВ НА БАЗЕ ТЕХНОЛОГИИ SDR И ИХ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

1.1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

Целью настоящей работы является:

1. Получение теоретических сведений о принципе работы технологии программно-определяемого радио (SDR) и её практического применения.

2. Исследование радиоэлектронных устройств, построенных на базе технологии SDR, и их функциональных возможностей.

3. Получение практических навыков работы с SDR аппаратурой.

При выполнении домашнего задания студенты должны изучить принцип работы технологии программно-определяемого радио SDR, а также знать её практическое применение в современных радиоэлектронных устройствах.

В процессе выполнения лабораторного задания студенты изучают методику работы с SDR радиоприемником на базе комплекса прикладного программного обеспечения в ОС Windows.

При выполнении работы студенты используют следующее оборудование:

- лабораторный стенд RTL-SDR-R820T2;
- персональный компьютер с ОС Windows версии 7, 8.1 или 10 (сборка не менее номера 1703);
- прикладное программное обеспечение для анализа и декодирования принимаемых радиосигналов SDR Sharp.

1.2. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка содержит РПУ на базе платформы RTL-SDR с интерфейсом подключения к ПК USB 2.0 и разъемом подключения антенны MCX (рис. 1), переходник для подключения антенны MCX М – SMA F, приемную антенну «веерный вибратор» с SMA разъемом, провод-удлиннитель USB 2.0 М – USB 2.0 F, персональный компьютер (ноутбук) с установленной операционной системой не ниже Windows 7 и программным обеспечением для приема, анализа и декодирования радиосигналов SDR Sharp.

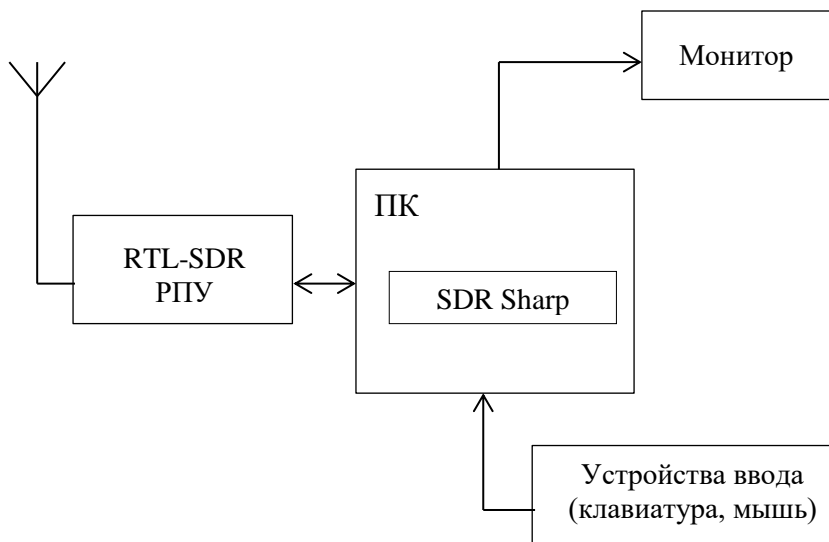


Рис. 1. Структурная схема лабораторной установки

RTL-SDR – это платформа, способная выполнять функцию SDR-приемника. Все они построены на чипсете RTL2832. Это микросхема, содержащая два 8-битных АЦП

с частотой дискретизации до 3,2 МГц и интерфейс USB для связи с компьютером.

Она на входе принимает I- и Q-потoki, которые должны быть получены другой микросхемой. В схеме устройства на антенном входе установлены защитные диоды.



Рис. 2. SDR-ППУ RTL820T2 в корпусе [1]

R820T (T2) и E4000 – это две наиболее удобные для платформы RTL-SDR микросхемы, реализующие радиочастотную часть SDR: усилитель антенны, перестраиваемый фильтр и квадратурный демодулятор с синтезатором частоты. Разница между ними следующая: E4000 работает в диапазоне ~ 52–2200 МГц и имеет немного большую чувствительность на частотах менее 160 МГц. Из-за того, что производитель E4000 обанкротился и микросхема снята с производства, остающиеся тюнеры покупать все труднее, и цены на них растут.

Микросхема R820T2 осуществляет прием радиосигналов в диапазоне 24–1766 МГц, однако диапазон перестройки внутренних фильтров сильно затрудняет работу R820T выше 1200 МГц (что делает невозможным, например, прием GPS). В отличие от старой версии R820T, у модификации T2 получено значительное увеличение отношения сигнал\шум, чувствительности и избирательности.

Для работы такого радиоприемника не нужна отдельная звуковая карта, необходимо вставить его в разъем USB компьютера или планшета, установить драйвера, запустить приемную программу и в дальнейшем осуществлять необходимые операции по анализу сигналов, декодированию и т. д.

Ниже приведены подробные технические характеристики используемого в лабораторной установке РПУ:

- диапазон частот: 24–1750 МГц;
- модуляция: AM, FM, NFM, LSB, USB, CW (ADS-B, D-STAR, AIS и другие виды...);
- полоса обзора: от 250 кГц до 3 МГц;
- чувствительность: 0,22 мКв (на 438 МГц в режиме NFM);
- входное сопротивление приёмника: 50 Ом;
- диапазонные фильтры: только внешние;
- разрядность АЦП: 8 бит;
- динамический диапазон: 50 дБ (в режиме CW);
- задержка принимаемого сигнала: 340 мс;
- интерфейс подключения: USB 2.0;
- минимальные требования к ПК: ОЗУ 2 Гб, двухъядерный процессор Intel/AMD с тактовой частотой не менее 1,4 ГГц, разрешение экрана 1366×768 для комфортной работы с ПО анализаторов, 2 Гб свободного места на HDD/SSD накопителе;
- операционная система: Windows, Linux, Android.


Для синхронной работы SDR РПУ и установленного программного обеспечения на ПК с ОС Windows необходимо установить специальный драйвер.

Rtlsdr.dll требуют все SDR-программы, и зачастую эта DLL уже идет в поставке софта, использующего RTL-SDR.

1.3. ПОДКЛЮЧЕНИЕ RTL-SDR РПУ К ПЕРСОНАЛЬНОМУ КОМПЬЮТЕРУ (НОУТБУКУ). УСТАНОВКА ДРАЙВЕРА RTL-SDR В ОС WINDOWS

Перед установкой драйвера устройства необходимо проверить подключение SDR-РПУ следующим образом:

- индикатор питания SDR-РПУ RTL820T2 должен гореть ярким белым светом;

- в панели задач Windows 10 нажать на пиктограмму поиска , расположенной в левом нижнем углу экрана;
- вводим в строку поиска «Диспетчер устройств», после чего должен отображаться следующий результат:

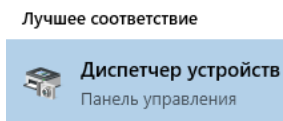


Рис. 3. Результат поиска «Диспетчера устройств» в ОС Windows 10

- нажимаем на результат поиска.

Внимание! В случае неполадок с поиском, что иногда бывает в Windows 10, нажать комбинацию кнопок Win+R и в появившемся меню «Выполнить» набрать `compmgmt.msc` и нажать Enter. Появится окно «Управление компьютером», затем нажимаем на «Диспетчер устройств»:

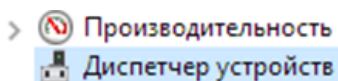


Рис. 4. Результат поиска «Диспетчера устройств» в ОС Windows 7–10 командой `compmgmt.msc`

Данное окно выводит ассортимент всего подключенного к ПК оборудования и различных устройств, наш лабораторный стенд должен отображаться в пункте «Другие устройства» как Bulk-In, Interface. Наличие уведомления до вышеописанных действий при подключении о некорректной установке драйверов является нормальным.

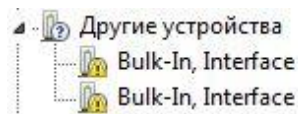


Рис. 5. Идентификация RTL-SDR в ОС Windows до установки драйвера

Производим установку драйвера на ОС Windows версии 7–10 для лабораторного стенда.

Отключаем на время установки драйвера все антивирусные экраны, а также брандмауэр установленного на ПК антивирусного программного обеспечения, в том числе отключаем «Защитник Windows» и «Брандмауэр Windows» на ОС Windows 10 (данные действия требуются для успешной установки драйвера, так как при игнорировании этого пункта возможны проблемы с цифровой подписью драйвера или ложное срабатывание антивирусного ПО).

Запускаем программу установки драйвера Zadig.exe из каталога LR–SRS/driver, кликая по файлу правой кнопкой мыши и выбирая пункт «Запуск от имени администратора»:

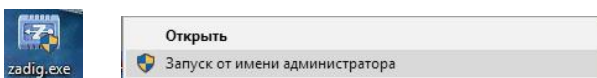


Рис. 6. Запуск программы установки драйвера RTL-SDR Zadig.exe от имени администратора

После запуска видим окно программы установки драйвера для лабораторного стенда (в разных ОС Windows стартовое окно может выглядеть по-разному):

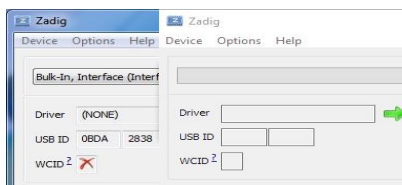


Рис. 7. Стартовое окно программы установки драйвера RTL-SDR Zadig.exe от имени администратора

Для достоверного обнаружения программой установки SDR-РПУ RTL820T2 переходим во вкладку Options, а далее – List all devices:



Рис. 8. Попытка обнаружения подключенного к ПК RTL-SDR ППУ

После поиска всех доступных программе подключенных устройств выбираем в каталоге наш SDR-ППУ RTL820T2, именуемый в программе либо RTL2838UHIDIR, либо Bulk-In Interface (Interface 0) – оба варианта верны, но в Windows 10 и Windows 7 отображаются по-разному:

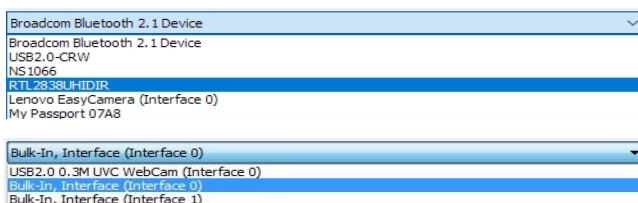


Рис. 9. Выбор подключенного к ПК RTL-SDR ППУ для дальнейшей установки драйвера

После выбора требуемого устройства выбираем версию будущей установки драйвера – WinUSB v.6.1.7600.16385:

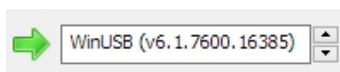


Рис. 10. Выбор устанавливаемой для Windows версии драйвера подключенного к ПК RTL-SDR ППУ

Нажимаем кнопку Install Driver, тем самым запуская процесс установки драйвера устройства RTL-SDR ППУ. При возникновении окна «Безопасность Windows» установить галочку «Всегда доверять программному обеспечению» и нажать кнопку «Установить»:

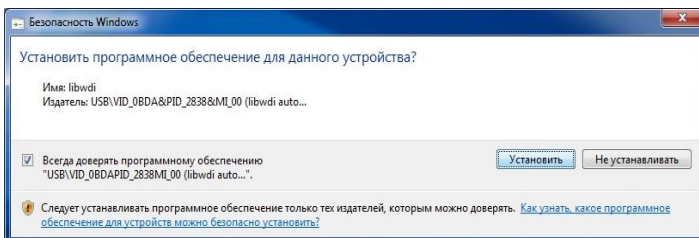


Рис. 11. Подтверждение установки драйвера подключенного к ПК RTL-SDR PPU

После успешной установки устройство будет добавлено в систему:

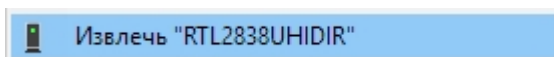


Рис. 12. Верная идентификация подключенного RTL-SDR PPU в ОС Windows

1.4. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СИСТЕМ ПОДВИЖНОЙ РАДИОСВЯЗИ

Цель занятия: изучение физических принципов систем подвижной радиосвязи, в том числе:

- принципов построения систем связи с подвижными объектами;
- классификации средств наземной радиосвязи;
- принципов установления соединений между мобильной и базовой станциями;
- влияния доплеровского эффекта на мобильную связь;
- особенностей распространения радиоволн в городах;
- способов разнесенного приема;
- способов эквалайзинга;
- методов многостанционного доступа.

В процессе подготовки к занятиям следует пользоваться литературой [1–4].

Краткие теоретические сведения

1. Для общего понимания вопроса покажем на рис. 13 простейшую схему радиосвязи:

1 – источник информации (цифровые данные, изображение и т. д.);

2 – преобразователь сообщения служит для преобразования поступающей информации в электрический сигнал;

3 – модулятор с передатчиком.

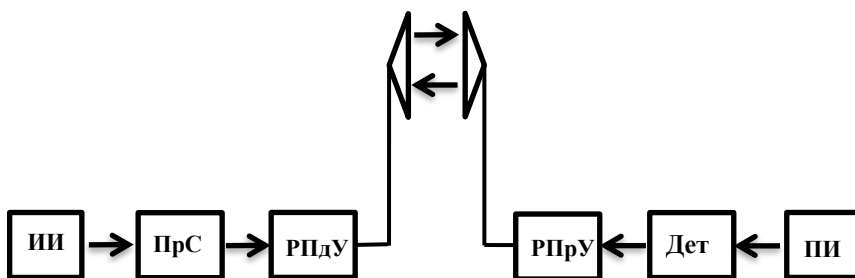


Рис. 13. Схема организации радиосвязи:

ИИ – источник информации; ПрС – преобразователь сообщения; РПДУ – радиопередающее устройство; РПрУ – радиоприемное устройство; Дет – детектор;

ПИ – приемник информации

Необходимость модуляции сигнала связана с тем, что информация, преобразованная в электрический сигнал, имеет относительно низкую частоту, которая, как известно, плохо получается. Модулированные ВЧ колебания, называемые радиосигналом, подаются в передающую антенну и возбуждают в окружающем пространстве электромагнитные волны. Небольшая часть энергии электромагнитных волн от передатчика достигает приемной антенны и создает в ней слабый модулированный ток высокой частоты.

В приемнике ВЧ (РПрУ) модулированные колебания усиливаются, а затем преобразуются в детекторе (Дет) обратно в сигнал такого же вида, как полученный в пункте передачи от преобразователя. Такое преобразование называется детектированием. Далее сигнал поступает в приемник информации (ПИ) – телефон, телевизионную приемную трубку и т. п., после чего принятая информация поступает к получателю.

Комплекс из передатчика, передающей антенны, среды распространения волн, приемной антенны приемника образует радиолинию.

Односторонняя передача используется чаще не в радиосвязи, а в звуковом и ТВ радиовещании, в службах передачи информации для агентов печати, метеорологической информации, сигналов точного времени, точной частоты и др. Чтобы улучшить эффективность использования оборудования и увеличить пропускную способность радиолинии, применяют аппаратуру уплотнения (рис. 14):

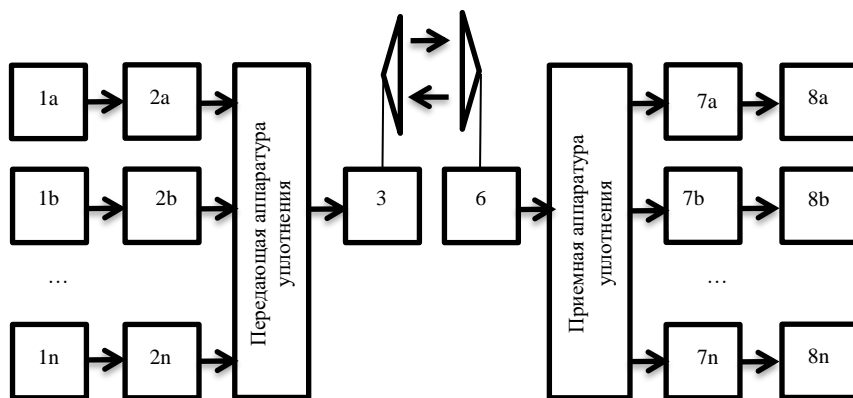


Рис. 14. Схема связи с уплотнением радиолинии

Передающая часть аппаратуры образует из сигналов различных источников информации 1а–1n, измененных преобразователями 2а–2n, единый групповой сигнал.

Приемная часть этой аппаратуры разделяет сигналы, производит их преобразование ($5a-5n$), после чего они поступают к потребителям $6a-6n$. Совокупность технических средств, обеспечивающих передачу сообщения от одного источника информации к получателю, называется каналом радиосвязи. Система радиосвязи с уплотнением радиолинии называется многоканальной радиосвязью. Для обмена информацией между двумя пунктами организуется двусторонняя радиосвязь, которая обеспечивается при помощи двух комплексов оборудования односторонней связи, действующих навстречу друг другу. В каждом конечном пункте двусторонней линии радиосвязи размещаются приемное и передающее оборудования. Источник и получатель информации обычно совмещены, а также передатчик и приемник в некоторых случаях объединяются в единую приемно-передающую радиостанцию. В таком пункте вместо двух антенн может быть одна общая приемно-передающая антенна. Двусторонняя радиосвязь может организовываться по следующим вариантам:

- оба передатчика работают на одной и той же частоте, т. е. и приемники настроены на одну и ту же частоту. В этом случае радиолиния в оба направления одновременно работать не может. Работа производится поочередно в одном из направлений. Такая связь называется симплексной;

- передатчики работают на разных частотах, соответственно, и приемники настроены на разные частоты. В этом случае радиолиния в оба направления может работать одновременно. Такая связь называется дуплексной;

- радиосвязь осуществляется с использованием двух частот (приемной и передающей), но, по сравнению с дуплексом, не одновременно, а поочередно. Сигнал принимается на одной частоте, а передается на другой. В один момент времени абонент может находиться либо в режиме «прием», либо «передача». Такая связь называется полудуплексной (двухчастотный симплекс). Полудуплекс используется в следующих случаях.

Обычно первичной задачей любой системы связи является обеспечение требуемой (очень большой) дальности связи. Однако дальность ограничена из-за того, что планета представляет собой шар, кривизна поверхности которого не позволяет осуществлять связь за пределы горизонта. А это значит, что связь между портативными радиостанциями, на открытой равнинной местности, возможна на расстоянии около 5 км. Если надо больше (99,9 % случаев), то применяют ретрансляторы.

Ретранслятор – это устройство, принимающее радиосигнал и передающее его в эфир. Наибольшую зону охвата будет иметь ретранслятор, установленный на искусственном спутнике Земли в космосе. На Земле для обеспечения заданного охвата устанавливают ретранслятор на искусственном или естественном высотном сооружении (здание, мачта, холм). Практически ни одна современная система связи не обходится без ретранслятора. Из рис. 15 видим необходимость полудуплекса (двухчастотного симплекса). Так как ретранслятор непрерывно передает принятые сигналы (дуплекс), то он не может делать это на одной и той же частоте (сигналы передатчика будут тут же приниматься приемником – замкнутый круг).



Рис. 15. Схема ретрансляции

Таким образом, дуплексный ретранслятор работает на разных частотах, номиналы которых должны отличаться на определенную величину (зависит от оборудования, системы и др.). Соответственно, в абонентских радиостанциях должны использоваться те же частоты, но в «перевернутом» виде (приемная частота ретранслятора должна соответствовать передающей у радиостанций и наоборот). Так как у всех абонентских станций одинаковы передающие и приемные частоты, то прямая связь между ними невозможна. Получается, что ретранслятор непрерывно излучает принимаемый сигнал, а в абонентских радиостанциях режим «прием/передача» должен переключаться. В один момент времени или говорим, или слушаем. Чем выше чувствительность и мощность ретранслятора и выше установлены антенны, тем большую зону можно охватить устойчивой радиосвязью. В том случае если не хватает частот, денег или того и другого (наиболее распространенный случай), то можно обойтись симплексом. В таком случае абонентское оборудование остается тем же, только в нем программируются одинаковые приемные и передающие частоты. А вот в качестве ретранслятора можно использовать обычную абонентскую радиостанцию. Но она не может принимать и передавать одновременно, что, кстати, и не требуется (да и нельзя, как уже рассмотрено выше).

Для работы такого ретранслятора (его обычно называют симплексным) требуется специальное устройство – контроллер симплексного ретранслятора. Устройство представляет собой «цифровой магнитофон», который записывает принимаемое сообщение до тех пор, пока оно присутствует в эфире (или пока не кончится «пленка»). После пропадания сигнала контроллер переключает радиостанцию в режим передачи, и записанное сообщение воспроизводится в эфире. Получается, что достаточно одной частоты и одной (не дуплексной) радиостанции. При всей простоте и относительной дешевизне метода у него есть серьезный

недостаток: абонент должен тратить время на проговаривание сообщения и затем ждать, пока оно воспроизведется в эфире. Таким образом, на радиопереговоры при использовании симплексного ретранслятора потребуется в два раза больше времени, чем при использовании дуплексного.

Если количество денег и радиочастот является определяющим фактором и можно смириться с потерей оперативности, то применение симплексных ретрансляторов (их еще называют «симплексеры», «эхо-репитеры», «кукушки» или «попугаи») будет наиболее рациональным путем решения задачи.

Отметим на основе всего вышесказанного, что дуплекс применяют при непрерывной ретрансляции, а симплекс – в случаях прямой связи (без ретрансляторов) или в случае симплексной ретрансляции; линия радиосвязи может состоять из нескольких или многих отрезков, в пределах которых передача радиосигналов обеспечивается комплектами приемно-передающего оборудования. Сигналы из одного пункта принимаются в другом, усиливаются и передаются далее в третий пункт, там вновь усиливаются и передаются в четвертый пункт и т. д. Такое построение радиолинии называется радиорелейной линией связи (рис. 16), её условное изображение приведено на рис. 17.

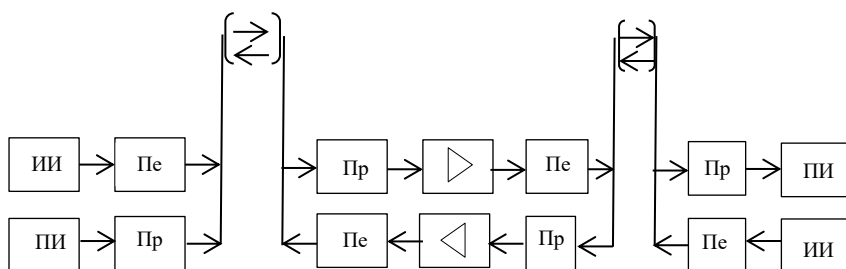


Рис. 16. Структурная схема радиорелейной линии связи

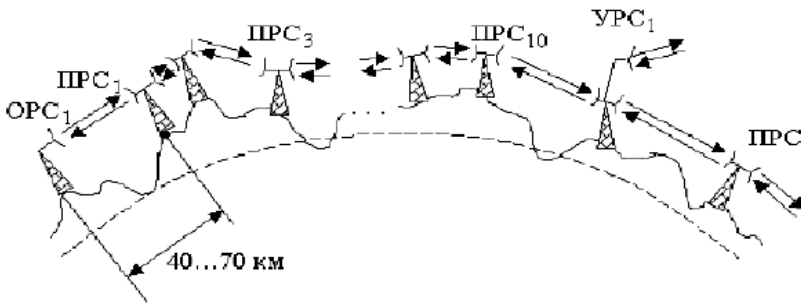


Рис. 17. Общая схема построения радиорелейной линии связи

Аналогичным образом происходит взаимодействие и в спутниковых системах связи (рис. 18). Сигнал с наземного пункта передается на орбиту и принимается искусственным спутником Земли.

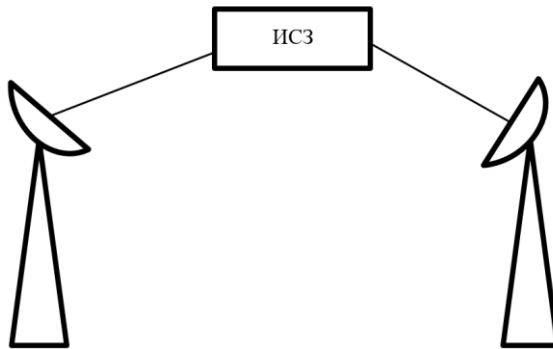


Рис. 18. Общая схема построения спутниковой системы связи

После усиления в аппаратуре космического аппарата сигнал передается на другую наземную станцию, которая значительно удалена от первой на тысячи километров. Важно знать, что радиорелейные линии связи, как и спутниковые,

всегда на конечных пунктах имеют аппаратуру уплотнения, что позволяет передавать достаточно большие объемы информации.

2. Радиосредства наземной радиосвязи разделяют по принадлежности к системе на несистемные средства децентрализованной связи и системные централизованные средства систем наземной радиосвязи (СНР).

При децентрализованной связи абонентские станции связаны конференц-связью с другими абонентскими станциями непосредственно (до 10...20 км) или через ретрансляторы (до 100...200 км). В первом случае связь осуществляется в симплексном режиме на одном частотном канале. При использовании ретранслятора абонентские радиостанции работают в полудуплексном режиме (на двух частотных каналах с переключением на прием и передачу), а ретранслятор – в дуплексном (на двух частотных каналах одновременно на прием и передачу).

В СНР связь абонентских станций обеспечивается с абонентскими станциями через базовые станции (БС) с управляющими контроллерами в автоматизированном режиме.

СНР классифицируют следующим образом:

▪ *по способу доступа к оборудованию и разделению каналов:*

- с частотным доступом и разделением (FDMA);
- временным доступом и разделением (TDMA);
- кодовым доступом и разделением (CDMA).

▪ *по способу организации дуплексных каналов:*

- с частотным дуплексом (FDD);
- временным дуплексом (TDD).

▪ *по территориальному признаку:*

- радиальные однозоновые;
- радиальные многозоновые;
- магистральные многозоновые;
- сотовые (всегда многозоновые).

- *по назначению входящих в состав СНР БС:*
 - с БС – ретранслятором;
 - БС – телефонным интерфейсом или коммутатором;
 - БС – узлом связи.
- *по взаимосвязи БС:*
 - с независимыми БС;
 - связанными БС (выделенными, коммутируемыми, радиорелейными, оптоволоконными и другими линиями связи).
- *по типу каналов связи:*
 - с закрепленными (фиксированными) каналами связи;
 - равнодоступными каналами связи.
- *по принципу управления системой:*
 - с централизованным управлением;
 - управлением со стороны абонентской станции;
 - комбинированным управлением.
- *по классу радиосистемы:*
 - системы беспроводного абонентского доступа (СБАД);
 - микросотовые системы беспроводной телефонии (МСБТ);
 - системы передачи данных (СПД);
 - сотовые системы подвижной радиосвязи (ССПР);
 - профессиональные системы подвижной радиосвязи (ПСПР).

ССПР и ПСПР применяют для мобильной связи подвижных абонентов. В них учтены расширение полос сигналов вследствие доплеровского эффекта, а также замирание сигналов при движении в городской застройке в условиях существенной интерференции электромагнитного поля. МСБТ и СБАД обслуживают только стационарных или малоподвижных абонентов. В СПД цифровые данные (текстовые, графические, мультимедийные и др.) передаются между компьютерами (контроллерами).

3. Для общего понимания вопроса, покажем на рис. 19 структурную схему сотовой системы подвижной связи.

Обслуживаемая территория разбивается на ячейки соответствующего размера. Примерно в центре каждой ячейки устанавливается базовая станция, включающая в себя приемопередающее устройство, антенно-фидерное устройство для образования радиоканалов с мобильными станциями и управляющее устройство (контроллер). Контроллер предназначен для обработки соединений мобильной станции с остальной сетью. Мобильная станция может находиться в любом месте обслуживаемой территории. Ядром системы является центр коммутации, к которому подключена каждая базовая станция специальным каналом связи. Центр коммутации также имеет выход на телефонную сеть общего пользования и управляет установлением соединений как между мобильными станциями, так и между стационарными телефонами.

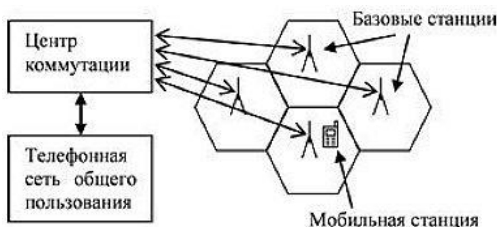


Рис. 19. Обобщенная структурная схема сотовой системы подвижной радиосвязи

В сотовых системах между мобильной станцией и базовой станцией могут быть установлены каналы связи двух типов: каналы управления и информационные каналы. Каналы управления предназначены для обмена информацией, связанной с выполнением заявки на обслуживание, вызовом абонента и установлением соединения между вызывающим и вызываемым абонентом. В свою очередь канал управления

делится на прямой (от базовой станции) и обратный (от мобильной станции). Информационные каналы предназначены для передачи речи или данных между пользователями.

Мобильная станция постоянно работает в режиме дежурного приема на канале вызова. Предварительно (при включении) выполняется инициализация мобильной станции: мобильная станция сканирует прямые каналы управления соседних базовых станций и выбирает канал с самым сильным сигналом (ближайшую базовую станцию). По свободному обратному каналу управления мобильная станция передает в центр коммутации свои персональные данные, которые используются для регистрации мобильной станции. Операции обмена служебной информацией с базовой станцией регулярно повторяются, пока включена мобильная станция. Кроме того, мобильная станция следит за сигналами вызова.

В системах подвижной связи должна быть обеспечена непрерывность связи при перемещении абонента из одной ячейки в другую. Для этого мобильная станция постоянно сканирует каналы управления соседних базовых станций и выбирает канал с самым сильным сигналом. Это позволяет следить за перемещением мобильной станции, и, если мобильная станция входит в другую ячейку, выбирается новая базовая станция. Такая организация связи мобильных станций называется эстафетной передачей, которая выполняется без прерывания сеанса связи, а в современных системах и незаметно для абонентов.

Заявка на сеанс связи от мобильной станции отправляется по свободному каналу управления через базовую станцию на центр коммутации. Центр коммутации по данным регистрации мобильных станций определяет базовую станцию, в зоне действия которой в данный момент находится вызываемая мобильная станция, и направляет ей

номер вызываемого абонента. Базовая станция по прямому каналу управления направляет звонок вызываемому абоненту.

Вызываемая мобильная станция в потоке служебной информации прямого канала управления распознает по номеру адресуемое ему сообщение и направляет ответ базовой станции. По этому ответу центр коммутации устанавливает канал связи между базовыми станциями, обслуживающими вызывающего и вызываемого абонента, а также информационные каналы внутри соты, по которым обмениваются информацией базовая и мобильная станции. Соответствующие сигналы от центра коммутации передаются на базовые станции, а затем на мобильные станции, в результате чего мобильные станции перейдут на выделенные им информационные каналы.

Если во время сеанса связи мобильная станция переходит в зону действия другой базовой станции, то под управлением центра коммутации старый канал заменяется новым без прерывания сеанса связи.

4. Эффект Доплера применяют в медицинской ультразвуковой диагностике и в радиолокации движущихся объектов. В средствах мобильной радиосвязи он приводит к негативным последствиям, что следует учитывать. Средства подвижной радиосвязи используют в условиях движущегося со скоростью от 10 до 500 км/ч современного автомобильного и железнодорожного транспорта. При таких скоростях существенны доплеровские смещения частот взаимно перемещающихся приемников и передатчиков систем связи. Необходимо, чтобы принципы и алгоритмы функционирования систем их учитывали, а работоспособность средств связи от них не зависела. Доплеровское смещение частот определяют так:

$$\Delta f_d = \frac{vf}{c},$$

где Δ и f – длина волны и частота передатчика;

v – скорость перемещения приемника относительно передатчика средств радиосвязи;

$c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость распространения света.

Например, при частоте 2 ГГц и скорости 500 км/ч доплеровское смещение частоты составляет около 1000 Гц. Доплеровские смещения частот в радиоканалах систем связи имеют следующие негативные эффекты:

– несущие колебания могут выходить за пределы полос пропускания приемников средств связи, при этом связь ухудшится;

– возникают спектральные составляющие доплеровских тональных и субтональных частот, это может привести к срабатыванию средств вызывной сигнализации или перескокам частоты с одной на другую частоту сетки;

– неравномерность скорости движения абонентов приводит к непостоянству доплеровских частот и, следовательно, появлению шума случайной частотной модуляции, при этом доплеровский шум, попадая в полосу модулирующих звуковых частот, является помехой и ухудшает соотношение сигнал/шум;

– доплеровские смещения частот приводят к доплеровской временной задержке, которая обратно пропорциональна доплеровскому смещению частоты, т. е.

$$\Delta t = \frac{1}{\Delta f_d}.$$

В системах радиосвязи применяют следующие способы борьбы с проявлениями доплеровского эффекта:

– синхронизация несущих средств системной радиосвязи (в системах с TDMA доступом синхронизация – основной принцип обеспечения правильного функционирования систем и одновременно эффективный способ защиты от эффекта Доплера);

– расширение полосы каналов связи, чтобы они существенно превосходили доплеровские смещения (это реализуется автоматически, например, в системах с TDMA и CDMA доступом).

В сотовых и профессиональных системах подвижной радиосвязи эти способы борьбы с доплеровскими эффектами обязательны, так как системы предназначены для обслуживания подвижных абонентов.

5. Городская застройка, состоящая из железобетонных конструкций, обладает выраженными экранирующими и отражающими свойствами. Используемые в сотовой связи с подвижными объектами (ПО) дециметровые радиоволны слабо огибают препятствия, распространяются в основном по прямой и испытывают многочисленные отражения от строений и подстилающей поверхности (рис. 20).

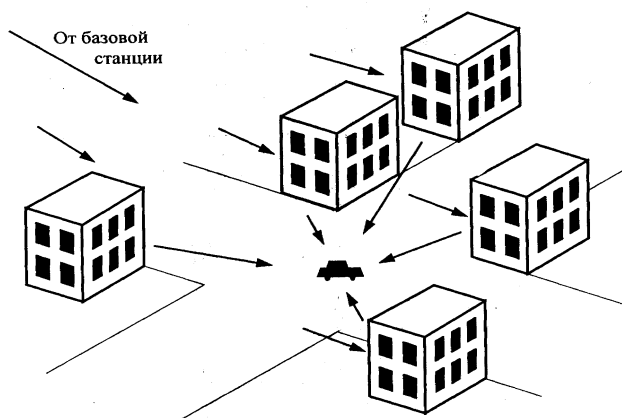


Рис. 20. Особенности распространения радиоволн в городах

Определяющие принципы распространения радиоволн ССПР – дифракция и интерференция. Следствия такого многолучевого распространения – более быстрое, чем в свободном пространстве, убывание интенсивности принимаемого сигнала с расстоянием в «тени» строений

вследствие дифракции и выраженная неравномерность (провалы и подъемы) электромагнитного поля в результате интерференции.

На рис. 21 показана зависимость амплитуды U сигнала от расстояния s и от времени t при перемещении со скоростью v . Эти зависимости имеют одинаковый вид, но разный масштаб по горизонтальной оси, так как $s = vt$. Для сотовых систем стандарта GSM полупериод вариаций амплитуды соответствует перемещению телефона в пространстве на 15 см.

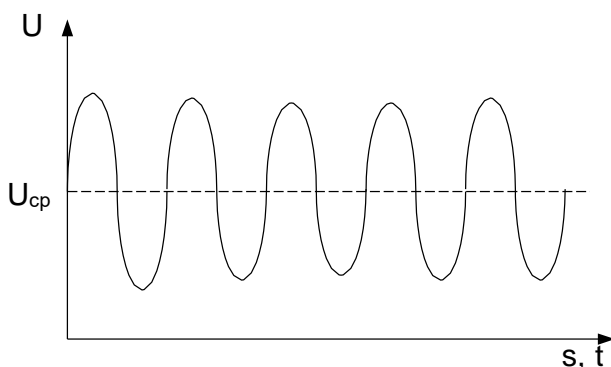


Рис. 21. График зависимости амплитуды U сигнала от расстояния s и от времени t при перемещении со скоростью v

При мобильной связи, т. е. движении абонентского аппарата замирания принимаемого сигнала, практически всегда есть две составляющие – быстрая (вследствие интерференции) и медленная (в результате дифракции).

Диапазон изменений уровня сигнала при быстрых замираниях может достигать 40 дБ, из которых примерно 10 дБ – превышение над средним уровнем и 30 дБ – провалы ниже среднего уровня, причем более глубокие провалы встречаются реже, чем менее глубокие. При неподвижном абонентском аппарате интенсивность принимаемого сигнала, естественно, не меняется. При перемещении подвижной

станции периодичность флуктуации в пространстве составляет около полуволны, т. е. порядка 10...15 см в линейной мере. Период флуктуации во времени зависит от скорости перемещения подвижной станции. Например, при скорости 50 км/ч период флуктуации составляет около 10 мс, а при 100 км/ч – около 5 мс.

Интенсивность медленных флуктуаций не превышает 5...10 дБ, а их периодичность соответствует перемещению подвижной станции на десятки метров. Фактически при перемещении подвижной станции медленные замирания представляют собой изменение среднего уровня сигнала в результате дифракции, на них накладываются быстрые замирания вследствие интерференции сигналов при многолучевом распространении. При этом возникают искажения результирующего сигнала типа межсимвольной интерференции, когда сигналы настолько отличаются по разности хода, что последетекторные символы кода «налезают» на соседние символы.

При связи с подвижными объектами основной вклад вносят быстрые замирания, поскольку они более интенсивные. При этом соотношение сигнал/шум падает настолько сильно, что полезная информация может существенно искажаться шумами вплоть до полной ее потери. Кроме этого, способы борьбы с быстрыми замираниями радиоволн эффективно устраняют и проявления медленных замираний.

Используют следующие способы борьбы с быстрыми замираниями:

- разнесенный прием;
- эквалайзинг.

6. Способы разнесенного приема (англ. diversity – разнесение) заключаются в совместном использовании нескольких сигналов, различающихся (разнесенных) по какому-либо параметру каналов связи. Причем разнесение

нужно выбирать таким образом, чтобы вероятность одновременных замираний всех сигналов была намного меньше, чем какого-либо одного из них.

Иными словами, эффективность разнесенного приема тем выше, чем менее коррелированы замирания в составляющих сигналах.

Возможны пять вариантов разнесенного приема:

– с разнесением во времени (*time diversity*) – применяют сигналы, сдвинутые во времени один относительно другого, при этом временной разнос выбирают близким к полупериоду быстрых замираний (этот метод сравнительно легко реализуем при TDMA, но качество приема улучшается в ущерб пропускной способности канала связи);

– с разнесением по частоте (*frequency diversity*) – применяют сигналы, передаваемые на нескольких частотах со сдвигом более 300 кГц при FDMA, «платой» является расширение используемой полосы частот;

– с разнесением по углу или направлению (*angle diversity* или *direction diversity*) – сигналы принимаются несколькими антеннами с рассогласованными (не полностью перекрывающимися) диаграммами направленности, а сигналы с выходов разных антенн коррелированы тем слабее, чем меньше перекрытие диаграмм направленности, при этом падает эффективность приема, по крайней мере, для всех антенн, кроме одной;

– с разнесением по поляризации (*polarization diversity*) – две антенны принимают сигналы двух взаимно ортогональных поляризаций (практического значения этот вариант не имеет, поскольку в диапазоне СВЧ замирания на разных поляризациях сильно коррелированы);

– с разнесением в пространстве (*space diversity*), т. е. приемом сигналов несколькими пространственно разнесенными антеннами, этот метод наиболее распространен (когда говорят о разнесенном приеме, именно его имеют в виду).

Для метода пространственного разнесения очевидно, что выигрыш тем больше, чем больше число используемых антенн, однако возрастает и сложность технического решения. Поэтому практическое применение находит простейшая система с двумя приемными антеннами базовых станций. В подвижных станциях разнесенный прием не используют. С ростом расстояния между антеннами корреляция между флуктуациями уровня принимаемых ими сигналов падает, чем больше разнос антенн, тем выше эффективность разнесенного приема. При этом возрастает и сложность технической реализации, поэтому практически разнос выбирают минимальным, при котором разнесенный прием уже достаточно эффективен. Реально с учетом как аналитических оценок, так и эмпирических данных разнос обычно составляет около десятка длин волн, т. е. порядка нескольких метров (900 МГц соответствует длине волны 30 см).

Объединение сигналов с выходов двух антенн возможно:

- с использованием одного более сильного из двух сигналов;

- с додетекторным когерентным суммированием обоих сигналов;

- с последетекторным суммированием сигналов с равными весами или взвешиванием, обеспечивающим получение максимума отношения сигнал/шум.

Применение скачков по частоте – это совмещенные частотный и временной способы разнесенного приема, когда недостатки того или другого способа исключаются, так как в каждый конкретный момент осуществляется работа на одной частоте. При этом пропускная способность и частотный ресурс не ухудшаются. Способ скачков по частоте заключается в том, что несущая частота для каждого физического канала периодически изменяется. Поскольку рэлеевские замирания – частотно-селективные, то, если при работе на некоторой частоте имело место замирание, при изменении рабочей частоты до 300 кГц замирания

с большой вероятностью не будет. Следовательно, при достаточно частых изменениях частоты существенно снижается вероятность длительных замираний и групповых ошибок, а с одиночными ошибками можно успешно бороться с помощью помехоустойчивого канального кодирования.

Различают медленные и быстрые скачки по частоте. При медленных скачках период изменения частоты значительно больше длительности символа передаваемого сообщения (в GSM – 277 скачков/с), а при быстрых – намного меньше длительности символа. Изменение частоты в пределах доступного диапазона может быть как регулярным (циклическим), так и нерегулярным (псевдослучайным). Режим работы со скачками по частоте не является обязательным и назначается по команде с центра коммутации радиосистемы при замираниях сигнала.

7. При многолучевом распространении радиоволн наряду с основными кодовыми комбинациями передаваемых данных появляются «эхо-сигналы» (рис. 22), что приводит к межсимвольным искажениям данных.

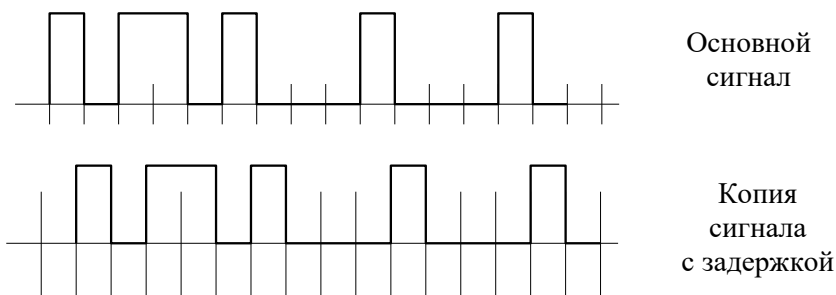


Рис. 22. Появление «эхо-сигналов» при многолучевом распространении радиоволн

В системах радиосвязи для компенсации межсимвольных искажений используют способы эквалайзинга (equalizing – выравнивание).

Эквалайзер – это адаптивный фильтр, настраиваемый таким образом, чтобы сигнал на его выходе был в большей степени очищен от «эхо-сигналов». Простейшая реализация эквалайзера (рис. 23) – трансверсальный фильтр. Такая схема может существенно ослабить межсимвольные искажения. Входной сигнал эквалайзера состоит из основного сигнала – последовательности однобитовых символов и его копии, ослабленной в три раза и сдвинутой во времени на длительность τ одного символа (см. рис. 22).

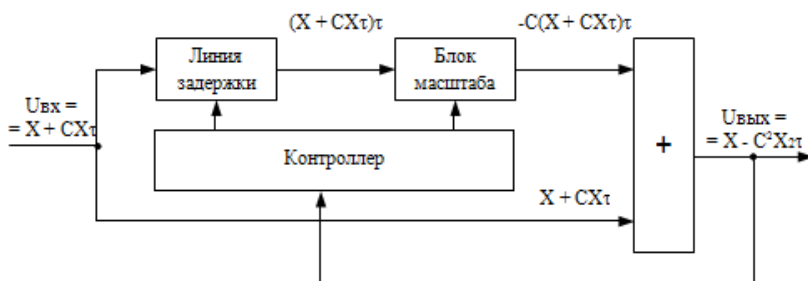


Рис. 23. Схема трансверсального фильтра

Если дискрет линии задержки фильтра равен τ , а значение коэффициента в первом отводе $C_1 = -1/3$, то при сложении входного сигнала и сигнала с первого отвода получим, что основной (первая составляющая входного сигнала) остается без изменений, а вторая составляющая входного сигнала компенсируется первой составляющей, задержанной на τ (сигнала с первого отвода линии задержки); вторая составляющая задержанного сигнала дает копию основного, но ослабленную уже в девять раз, задержанную на 2τ и с обратным знаком. Если во втором отводе линии задержки коэффициент $C_2 = 1/9$, то при сложении входного и двух задержанных сигналов получим неизменный основной сигнал и его копию, задержанную на 3τ и ослабленную в 27 раз. Таким образом, в рассматриваемом примере добавление каждого следующего элемента линии задержки

с соответствующим значением коэффициента C приводит к ослаблению искажающего сигнала в три раза и к дополнительной задержке его во времени на τ .

В реальной ситуации число лучей больше двух, амплитуды составляющих, их число и задержки заранее неизвестны. Кроме того, при перемещении абонентского аппарата картина непрерывно изменяется. Поэтому фильтр следует настраивать адаптивно в соответствии с конкретно складывающейся ситуацией и использованием обучающих последовательностей C и τ , изменяемых по критерию минимальных межсимвольных искажений. При больших уровнях сигналов более эффективны нелинейные эквалайзеры.

8. Многостанционный доступ (МСД) в общий частотный канал является одним из основных способов построения современных систем связи с подвижными объектами, спутниковых систем связи, сотовых систем и ряда других. Такие системы обычно обслуживают множество абонентов I , каждый из которых является источником непрерывной или дискретной информации, преобразуемой в сигналы $s_i(t)$, $i = 1, \dots, I$.

В системах МСД все сигналы $s_j(t)$, $i = 1, \dots, k$, называемые адресными, заранее закрепляются за абонентами или могут быть выделены им только на время сеанса связи, после окончания которого эти сигналы могут быть использованы другими абонентами системы. Естественно, что не все абоненты одновременно участвуют в сеансе связи, а обращаются к системе по мере необходимости. Т. е. системы МСД можно рассматривать как системы массового обслуживания, используя теорию телетрафика. Активность абонента в этом случае характеризуется вероятностью p_a передачи информации в определенный момент времени и, как правило, выполняется условие $p_a \ll 1$ со свободным доступом (неконтролируемые), либо с ограниченным доступом

(контролируемые). В неконтролируемых системах адресные сигналы $s_i(t)$ жестко закрепляются за определенными абонентами, что обеспечивает возможность связи каждой пары абонентов независимо от других. В контролируемых системах МСД сигналы не закреплены жестко за абонентами и, как уже было отмечено, выделяются им по мере необходимости. Существенным преимуществом контролируемых систем является то, что число сигналов $s_k(t)$ может быть гораздо меньше, чем число абонентов, обслуживаемых системой, поскольку в этом случае учитывают статистику выхода на связь абонентов, т. е. их активность. Это преимущество оказывается важным и с точки зрения уменьшения искажений, вызванных взаимным влиянием сигналов абонентов (межстанционных помех) при выделении их из группового сигнала. Естественно, что необходимость введения в систему средств контроля занятости канала и распределения свободных адресных сигналов усложняет ее аппаратную реализацию.

Образуя сеть связи, абоненты системы МСД могут вести обмен информацией либо непосредственно друг с другом (*прямое объединение*), либо через центральную станцию (*радиальное объединение*), где собираются все сигналы абонентов сети. В этом случае связь между абонентами сети происходит по радиусам – от i -го абонента на центральную станцию и от нее к другому абоненту. Радиальное объединение значительно упрощает реализацию контролируемых систем, но вместе с тем требует исключительной надежности функционирования центральной станции.

При МДЧР каждый сигнал земной станции имеет определенный участок общего группового СВЧ спектра частот. Сигналы различных земных станций (ЗС) отличаются несущими частотами и имеют неперекрывающиеся спектры, причем, в зависимости от вида передаваемой информации и вида модуляции, они могут иметь различные полосы частот.

Модуляция несущей обычно осуществляется либо по частоте, либо по фазе. Основное правило при выборе модуляции – обеспечение постоянства огибающей модулированного сигнала. При МДЧР все сигналы ЗС передаются одновременно, а групповой сигнал ствола станции приема, например БРТ спутниковой системы, может быть образован в пределах полосы ствола Δf_p в диапазоне СВЧ (рис. 24). Значения несущих частот и девиации частот сигналов ЗС выбирают таким образом, чтобы между спектрами несущих оставались защитные интервалы Δf_3 для уменьшения взаимного влияния сигналов друг на друга (т. е. уменьшения взаимных помех).

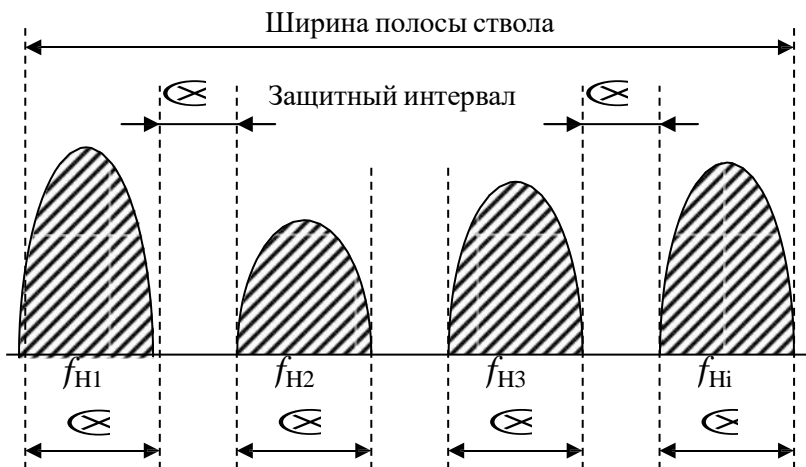


Рис. 24. Многостанционный доступ с частотным разделением сигналов

К достоинствам МДЧР можно отнести простоту реализации и возможность совместимости с другими системами передачи информации, отсутствие необходимости синхронизации работы ЗС, меньшую мощность передатчиков ЗС по сравнению с другими видами многостанционного доступа.

Недостатками МДЧР являются нерациональное использование частотного диапазона при малой активности потребителей, трудность обеспечить работу близко расположенных ЗС без значительных межстанционных помех даже при наличии защитных интервалов, взаимное подавление сигналов МДЧР и возникновение нелинейных помех, обусловленных нелинейностью амплитудной характеристики ретранслятора и наличием АМ–ФМ преобразования сигналов.

Подавление сигналов в ретрансляторах при МДЧР не является одним его недостатком. Нелинейный характер усиления приводит также и к появлению искажений и переходных помех. Основным источником этих искажений, например в БРТ, являются выходные каскады усиления.

Таким образом, при МДЧР энергетика системы используется не полностью. Вместе с тем некоторые недостатки МДЧР можно частично устранить, задействовав центральную станцию (ЦС) и предоставив доступ к системе по требованию, что также приведет к увеличению количества обслуживаемых абонентов. Кроме того, ЦС может регулировать мощность передатчиков ЗС для выравнивания сигналов на входах приемников, тем самым снижая уровень межстанционных помех.

Суть МДВР состоит в том, что каждой земной станции для излучения сигналов выделен свой периодически повторяемый интервал времени, длительность которого определена трафиком станции. Интервалы времени, выделенные станциям, не перекрываются, и при этом излучения ЗС взаимно синхронизированы во времени, чтобы сигналы не перекрывались. Схема конфигурации сети связи с МДВР показана на рис. 25.

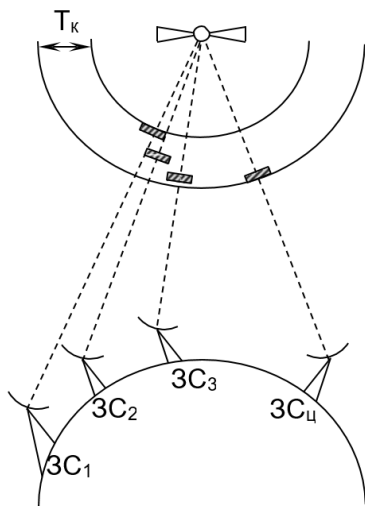


Рис. 25. Схема конфигурации сети связи с МДВР

Здесь интервал времени T , в течение которого все станции сети по одному разу излучают сигнал, образует кадр, а интервал времени излучения каждой ЗС (длительность пакета импульсов) является субкадром. Структура кадра изображена на рис. 26. Каждый кадр МДВР содержит сигнал общей синхронизации, передаваемый центральной станцией (в нашем случае ЗС_ц), который используется всеми остальными ЗС.

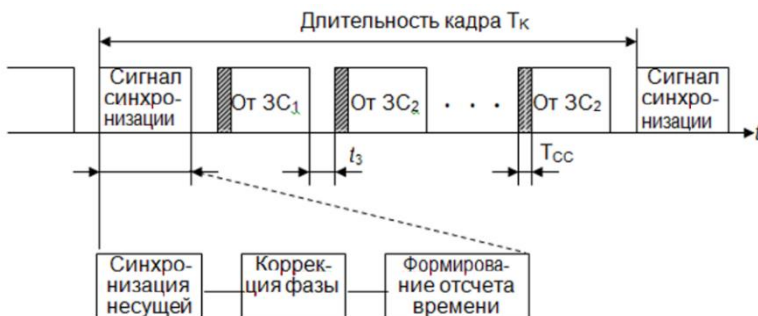


Рис. 26. Структура кадра при МДВР

Субкадр, в свою очередь, состоит из преамбулы и ряда информационных пакетов, предназначенных различным станциям сети. Преамбула включает в себя защитный временной интервал t_3 , сигнал восстановления несущей для синхронизации демодулятора и сигнал начала информационного пакета, показывающий его границы. В преамбуле может содержаться и другая служебная информация.

Эффективность системы связи с МДВР зависит от того, какая доля времени кадра (цикла) отводится на передачу всевозможной служебной информации и организации защитных временных интервалов. Для повышения эффективности необходимо увеличивать длительность кадра, уменьшать длину и число защитных интервалов, повышать точность синхронизации. Уместно, однако, напомнить, что длительность кадров зависит от вида передаваемой информации и, например, для передачи речевой связи на основании теоремы Котельникова длительность кадра определяется максимальной частотой передаваемого сигнала.

Наибольшая проблема при проектировании МДВР связана с необходимостью обеспечения жесткой синхронизации, исключающей взаимное влияние сигналов ЗС на входе ретранслятора и обеспечивающей вхождение ЗС в функционирующую систему.

Обычно различают синхронизацию на прием и на передачу. В первом случае определяются временные интервалы, соответствующие субкадрам. Во втором – удерживается сигнал, излучаемый ЗС в рамках выделенного для этой станции субкадра. Синхронизацию на прием осуществляют детектированием синхросигнала опорной станции, а синхронизацию на передачу выполняют периферийные станции путём изменения фазы собственных сигналов в кадре по сравнению с фазой синхросигналов опорной станции.

В большинстве случаев сигнал синхронизации формируется в виде отдельного специализированного пакета – сигнала выделенной синхронизации. При этом синхросигналы всех ЗС передаются в кадре на фиксированных временных позициях отдельно от информационных, что несколько снижает эффективность системы, так как при этом возникает необходимость передачи синхросигналов и преамбулы демодулятора как в составе синхропакета, так и в составе пакета информации.

В отличие от МДЧР и МДВР при многостанционном доступе с кодовым разделением, когда сигналы различных ЗС усиливаются одновременно, но в разных частотных интервалах (на разных частотах) либо на одной частоте, но в разные промежутки времени, усиление сигнала в бортовых ретрансляторах ССС происходит одновременно в одном и том же частотном интервале. Это возможно благодаря тому, что каждая передающая ЗС имеет свой код, позволяющий отличать сигналы друг от друга.

Основными достоинствами МДКР являются:

- низкая спектральная плотность излучаемых сигналов;
- высокая помехоустойчивость (особенно по отношению к узкополосным и импульсным помехам);
- скрытность приемопередачи сообщений благодаря использованию следующих кодов.

Вместе с тем МДКР имеет и ряд недостатков. Одним из них является низкая по сравнению с другими видами доступа эффективность использования полосы частот, так как применение ШПС приводит к существенному расширению полосы частот по сравнению с полосой модулирующего сигнала. Это обуславливает низкую пропускную способность в целом, и в МДКР обычно передают информационные потоки со скоростью не выше чем 9,6...19,2 кбит/с.

Вторым существенным недостатком МДКР является высокий уровень взаимных помех, ограничивающий число одновременно работающих абонентов. Действительно,

качество передаваемой информации (качество разделения символов различных ЗС) определяется так называемыми шумами ортогональности, которые возрастают по мере увеличения числа абонентов. Если в системах МДЧР и МДВР основными шумами являются тепловые шумы, то при МДКР основные источники шумов – излучения различных ЗС, одновременно работающих в одном и том же частотном диапазоне, т. е. каждую другую ЗС можно рассматривать как источник помех для остальных ЗС. Если абоненты равноправны, качество связи может быть улучшено не за счет повышения мощности ШПС, а только за счет увеличения базы сигнала B , что, в свою очередь, приводит к усложнению обработки сигналов на приемной стороне.

На рис. 27 изображены сравнительные характеристики пропускной способности трех методов доступа – МДЧР, МДВР и МДКР в зависимости от числа земных станций N , и, как видно из этого рисунка, относительная величина пропускной способности C наиболее высокая в системах МДВР и наиболее низкая в системах МДКР.

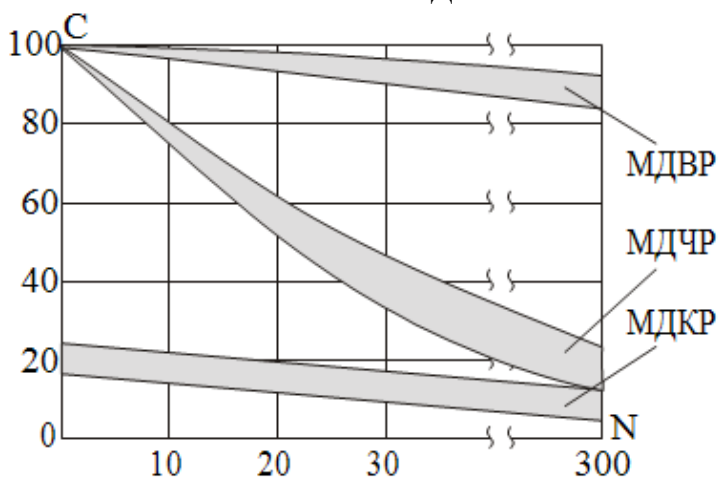


Рис. 27. Сравнительные характеристики пропускной способности МДЧР, МДВР и МДКР

Несмотря на отмеченные недостатки, системы с МДКР в последние годы находят все большее применение, особенно в локальных сетях, системах сотовой и спутниковой связи. Это связано, как уже было отмечено, как с уменьшением пиковой мощности, так и с низкими требованиями к динамике регулирования мощности, что весьма важно для персональной подвижной радиосвязи с терминалом типа «телефонная трубка».

Системы МДКР отличаются режимом «мягкого» переключения абонента при переходе с одного спутника на другой, легче осуществляется разнесенный прием через разные КА с автовыбором лучшего из принимаемых сигналов.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Нарисуйте простейшую схему организации радиосвязи и объясните назначение ее элементов.

2. Подробно поясните отличия симплексной связи от дуплексной.

3. С какой целью в современных системах подвижной радиосвязи используют аппаратуру уплотнения? Поясните это на примере структурной схемы системы связи с уплотнением радиолинии.

4. По каким признакам классифицируются современные средства наземной радиосвязи?

3. Что такое ретранслятор? Объясните принцип действия его работы. Расскажите подробно о применении ретрансляторов в различных системах связи.

5. Опишите подробно классификацию средств наземной радиосвязи, приведите примеры.

6. Нарисуйте обобщенную структурную схему сотовой системы подвижной радиосвязи, что в нее входит?

7. Объясните роль центра коммутации в сотовой системе подвижной радиосвязи.

8. Эффект Доплера – каково его влияние на системы подвижной радиосвязи? Расскажите его особенности и важнейшие негативные влияния.

9. Какие способы борьбы с проявлениями доплеровского эффекта применяют в системах подвижной радиосвязи?

10. Расскажите об особенностях распространения радиоволн в городах.

11. Какие Вы знаете способы разносенного приема? Подробно расскажите о двух из них.

12. Способ скачков по частоте – для чего применяется в системах подвижной радиосвязи?

13. Трансверсальный фильтр – для чего применяется?

14. Что такое многостанционный доступ? Коротко расскажите о его применении. Какие Вы знаете преимущества МСД?

15. Объясните принцип МДЧР. Какие отличительные особенности и недостатки данного метода Вы знаете?

16. МДВР – принцип действия, его особенности и недостатки.

17. Расскажите об особенностях МДКР по сравнению с двумя вышеописанными методами. Какие недостатки он имеет?

18. Какой метод многостанционного доступа отличается большей пропускной способностью по сравнению с двумя другими?

1.5. МЕТОДИКА РАБОТЫ С ПРОГРАММНЫМ ОБЕСПЕЧЕНИЕМ АНАЛИЗА И ДЕКОДИРОВАНИЯ ПРИНИМАЕМЫХ РАДИОСИГНАЛОВ SDR SHARP

Ознакомимся с одной из популярных версий программного обеспечения для RTL-SDR – SDR Sharp. Программа предназначена для анализа и декодирования принимаемых радиосигналов используемым в лабораторной

установке РПУ. Освоим методику работы с программой на простом примере приема и декодирования местного FM радио в г. Воронеже.

Запустим исполняющий файл программы SDRSharp.exe из каталога на CD диске LR-SRS/1_SDR_obzor/SDRSharp, кликая по файлу правой кнопкой мыши и выбирая пункт «Запуск от имени администратора»:

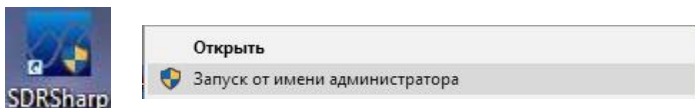


Рис. 28. Запуск программы SDR Sharp от имени администратора

После запуска программы видим основное рабочее окно с устройством:

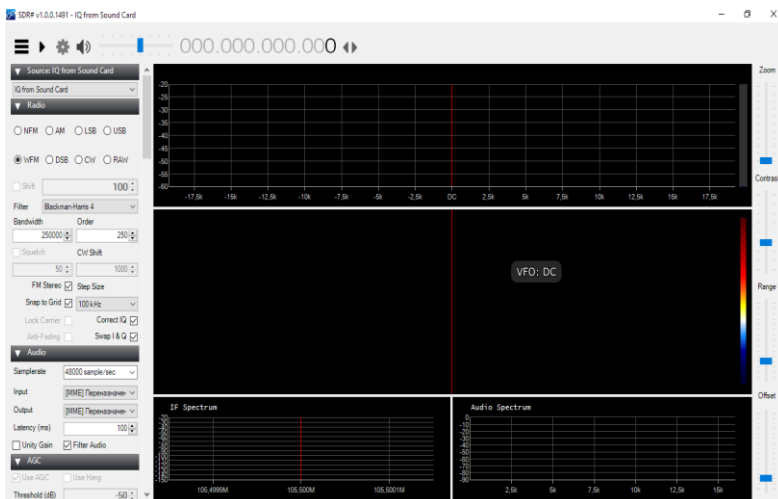


Рис. 29. Основное окно программы SDR Sharp

Выберем программный драйвер подключенного RTL-SDR ППУ в списке доступных в программе драйверов для SDR оборудования:

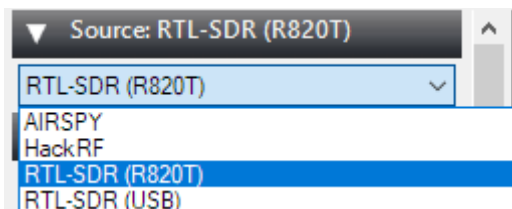


Рис. 30. Выбор модифицированного драйвера для RTL-SDR ППУ

В используемой программе заранее предустановлен модифицированный драйвер для RTL-SDR ППУ, позволяющий значительно расширить возможности устройства, а именно:

- а) прием от 100 кГц;
- б) децимацию в драйвере;
- в) 3 регулировки усиления (LNA, Mixer и VGA);
- г) переключение частоты дискретизации и децимации «на лету» без остановки приема;
- д) частоты дискретизации для приема аналогового ТВ;
- е) более высокую скорость и стабильность работы устройства.

Произведем настройку SDR-ППУ RTL820T2, вызвав окно настройки:



Рис. 31. Вызов окна настройки драйвера для RTL-SDR ППУ

В появившемся окне настройки выставляем значения параметров в соответствии со снимком ниже:

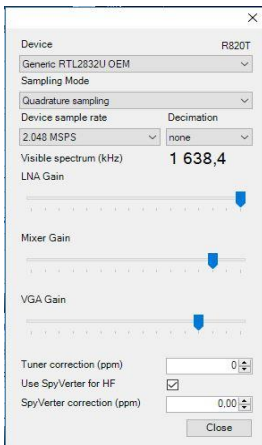


Рис. 32. Окно настройки драйвера для RTL-SDR РПУ

Для проверки работы лабораторного стенда выставим любую частоту приема из диапазона местного FM радио в г. Воронеже.

По нажатию кнопки Close завершаем настройку устройства и запускаем его, нажав кнопку Start на главном окне программы:

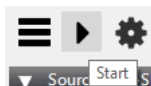


Рис. 33. Запуск RTL-SDR РПУ в программе SDR Sharp

Во вкладке Radio слева от обзорных окон установим режим модуляции WFM:

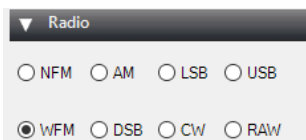


Рис. 34. Настройка демодулятора

При правильном подключении всех составных лабораторного стенда, а также верной установки драйвера устройства SDR-ППУ RTL820T2 и его достоверной настройки в программе видим на экране процесс обработки принимаемого сигнала радиоэфира на определенной частоте: вверху – обзорное окно уровней принимаемых сигналов из радиоэфира, а ниже – их спектрограмма:

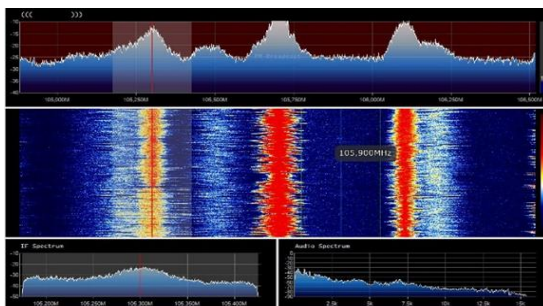


Рис. 35. Прием и декодирование WFM радиосигналов в программе SDR Sharp

1.6. ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ЕГО ВЫПОЛНЕНИЮ

1. Изучить принцип работы технологии программно-определяемого радио ПОР (SDR):

- историю возникновения и развития ПОР;
- назначение ПОР, его особенности и принцип работы радиоэлектронного оборудования на базе технологии SDR;
- практическое применение SDR в современных РЭУ.

2. Нарисовать обобщенную структурную схему SDR архитектуры и SDR приемопередающей радиосистемы, объяснить алгоритм работы и взаимодействие элементов.

Для выполнения домашнего задания в первую очередь проработайте теоретический материал по принципам построения программно-определяемого радио, его назначения

и важных особенностей, используемых для построения современных РПУ и РПДУ. Обратите особое внимание на взаимодействие аппаратной и программной частей технологии.

1.7. ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ

1. Ознакомиться с лабораторной установкой на базе коммерческой платформы RTL-SDR, его антенной системой и необходимым программным обеспечением, входящим в состав лабораторной установки.

2. Подготовить лабораторную установку к работе, проверить комплектность лабораторного стенда.

3. Подключить все части лабораторного стенда, подключить РПУ RTL-SDR к ПК (ноутбуку).

4. Проверить подачу питания на лабораторную установку (индикатор питания RTL-SDR должен гореть ярким белым светом).

5. Выполнить установку драйвера в ОС Windows для используемой лабораторной установки.

6. Запустить программное обеспечение анализа и декодирования радиосигналов SDR Sharp, провести тестирование лабораторной установки на примере приема местного FM радио в г. Воронеже на любых частотах по заданию преподавателя.

7. Провести прием радиосигнала при использовании различных видов модуляции, сделать выводы о полученных результатах.

8. Провести прием радиосигнала при использовании минимального и максимального значений частоты дискретизации, сделать выводы о полученных результатах.

Отчёт о проделанной работе должен содержать:

- выполненное домашнее задание;
- результаты экспериментальных исследований;

- рисунки, поясняющие выполнение домашнего задания;
- краткие выводы по всем этапам исследований.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается суть технологии SDR (ПОР)?
Расскажите причины появления программно-определяемого радио.
2. Поясните особенности технологии SDR по сравнению с традиционными принципами построения РПУ/РПДУ.
3. Расскажите о принципах построения современных РПУ на базе технологии SDR, поясните ее архитектуру.
4. Назначение ПО SDR Sharp, ее возможности.
5. Объясните ключевые настройки программы, выполните настройку оборудования на прием.
6. Прием радиосигнала в ПО SDR Sharp на примере FM радио.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИАПАЗОНА GSM-900. АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ПОКРЫТИЯ БАЗОВЫМИ СТАНЦИЯМИ В ПРЕДЕЛАХ МЕСТОНАХОЖДЕНИЯ

2.1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

Целью настоящей лабораторной работы является:

1. Получение теоретических сведений о принципе работы стандарта системы сотовой связи GSM, его особенностях, топологии сети.

2. Проверка на практике диапазона работы базовых станций системы сотовой подвижной радиосвязи GSM в г. Воронеже.

3. Получение практических навыков анализа покрытия БС в пределах местонахождения абонента операторами сотовой связи в г. Воронеже, оценка качества связи.

При выполнении домашнего задания студенты должны изучить принцип работы стандарта системы сотовой связи GSM, его отличительные особенности, а также топологию сети, диапазон работы базовых станций основных операторов предоставления услуг связи в г. Воронеже.

В процессе выполнения лабораторного исследования студенты изучают методику оценки качества связи и покрытия территории базовыми станциями системы сотовой связи GSM, рабочего частотного диапазона БС операторов сотовой связи в г. Воронеже.

При выполнении работы студенты используют следующее оборудование:

- лабораторный стенд RTL-SDR-R820T2;
- персональный компьютер с ОС Windows версии 7, 8.1 или 10 (сборка не менее номера 1703);
- прикладное программное обеспечение сканирования радиоэфира RTL-SDR Scanner;

- прикладное программное обеспечение сканирования, анализа и идентификации нисходящих каналов GSM-900 RFDSP GSM Scanner.

2.2. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка содержит РПУ на базе платформы RTL-SDR с интерфейсом подключения к ПК USB 2.0 и разъемом подключения антенны MCX (рис. 36), переходник для подключения антенны MCX М – SMA F, приемную антенну «веерный вибратор» с SMA разъемом, провод-удлинитель USB 2.0 М – USB 2.0 F, персональный компьютер (ноутбук) с установленной операционной системой не ниже Windows 7 и программным обеспечением для сканирования радиоэфира RTL-SDR Scanner и сканирования, анализа и идентификации нисходящих каналов GSM-900 RFDSP GSM Scanner.

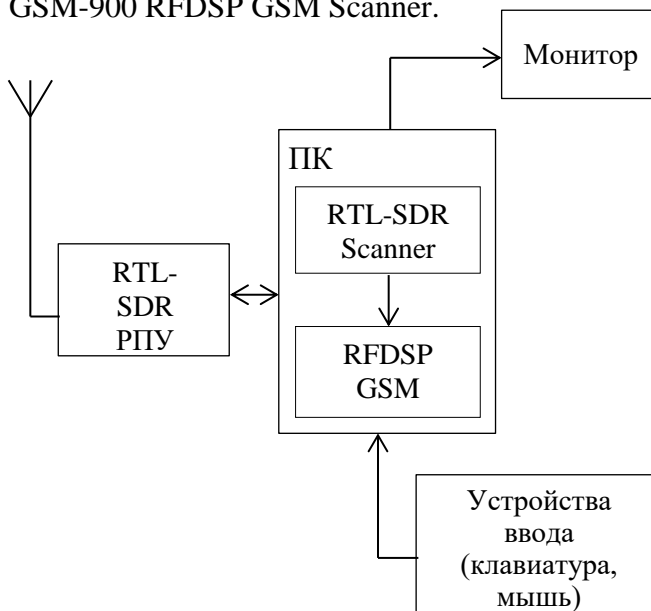


Рис. 36. Структурная схема лабораторной установки

Изначально предполагается, что перед выполнением данной лабораторной работы студент владеет знаниями о технологии SDR, методике подключения RTL-SDR РПУ к персональному компьютеру (ноутбуку) с установленным драйвером RTL-SDR в ОС Windows.

2.3. СОТОВЫЕ СИСТЕМЫ ПОДВИЖНОЙ РАДИОСВЯЗИ. ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В СЕТЯХ ПОДВИЖНОЙ РАДИОСВЯЗИ

Цель занятия: изучение принципов построения сотовых систем подвижной радиосвязи ССПР, в том числе:

- территориальной организации ССПР;
- частотной организации ССПР;
- способов борьбы с системными помехами в ССПР;
- биологической безопасности радиосредств ССПР;
- ССПР стандарта GSM;
- структуры ССПР GSM;
- технических характеристик сигналов стандарта GSM;
- особенностей модуляции GMSK;
- частотно-временной структуры сигнала и канального интервала в стандарте GSM;
- логических и физических каналов ССПР GSM;
- решения Государственной комиссии по радиочастотам при Минкомсвязи России от 1 июля 2016 г. № 16-37-03 «Об использовании радиоэлектронными средствами сухопутной подвижной службы полос радиочастот 890–915 МГц, 935–960 МГц, 1710–1785 МГц и 1805–1880 МГц».

В процессе подготовки к занятиям следует пользоваться литературой [1–4].

Краткие теоретические сведения

1. В ССПР территорию обслуживания разделяют на ячейки (соты, сайты), при этом территориальную организацию реализуют с учетом следующих требований:

– минимальное количество сот (базовых станций и стоимости), но достаточное для обслуживания реального трафика;

– наилучшее покрытие обслуживаемой территории (минимальные зоны отсутствия связи).

Разделить территорию на ячейки можно такими способами:

– на участки одинаковой формы и размера исходя из среднестатистических характеристик распространения радиоволн в регионе действия ССПР;

– на зоны радиовидимости различной формы и размеров, на границах которых имеется одинаковый заданный уровень (порог) напряженности поля.

При реализации первого способа обслуживаемую территорию разделяют на одинаковые по форме зоны и с помощью закона статистической радиофизики определяют их допустимые размеры и расстояния до других зон, в пределах которых выполняются условия допустимого взаимного влияния. Для оптимального деления территории на соты, т. е. без перекрытия или пропусков участков, можно использовать только три геометрические фигуры – треугольник, квадрат и шестиугольник. Наиболее эффективный – шестиугольник, так как при установке в его центре антенны с круговой диаграммой направленности обеспечивается радиодоступ почти ко всем участкам соты (рис. 37).

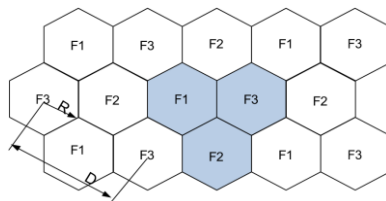


Рис. 37. Разделение территории на соты

Отметим на рисунке, что D – это расстояние между центрами сот, или защитный интервал, а R – радиус сот.

Эти показатели определяют защитный (от системных помех) коэффициент $q = D/R$. При этом чем больше q , тем меньше вероятность помех, создаваемых сигналами удаленных сот, работающих на тех же частотах.

Размеры аппроксимированных сот обычно меньше реальных, интервал между сотами, где используют одинаковые рабочие каналы, меньше требуемого для поддержания взаимных помех на допустимом уровне, а количество сот и базовых станций увеличено.

При реализации второго способа тщательно измеряют или рассчитывают зоны радиовидимости, в которых обеспечивается удовлетворительное обслуживание абонентов, определяют оптимальное расположение базовой станции с учетом рельефа местности, рассматривают для выравнивания зон возможность использования направленных антенн, пассивных ретрансляторов и т. д. Этот способ позволяет иметь минимальное число сот и, следовательно, базовых станций, поэтому он трудоемкий, но более точный и экономически выгодный.

На первых этапах проектирования системы радиосвязи обычно используют первый способ, а на последующих – второй.

2. Частотный план ССПР с тремя наборами F_1, F_2, F_3 частот базовых станций показан на рис. 37. Группа сот с различными наборами частот называется кластером. Например, размерность кластера C равна трем (см. рис. 37).

В общем случае размерность кластера может принимать значения из целых чисел $C \geq 3$, которые определяются соотношением

$$C = i^2 + j^2 + ij,$$

где i, j – натуральные числа и нуль, причем $i \leq j$.

Например, $C = 3$ ($i = 1, j = 1$); $C = 4$ ($i = 0, j = 2$); $C = 7$ ($i = 1, j = 2$); $C = 12$ ($i = 2, j = 2$); $C = 13$ ($i = 1, j = 3$) и т. д. Размерности кластеров современных ССПР – 3, 4, 7, 9, 12 и 21.

Смежные базовые станции образуют кластерную группу станций. Если каждой базовой станции выделяют T каналов с шириной полосы каждого F , то общая ширина полосы, занимаемая кластерной группой станций и ССПР в целом, составит $F_c = FT C$.

Если $T = 1$, т. е. в соте находится один среднестатистический абонент, то $F_c = F_{c_{\min}} = FC$. Поэтому величина C определяет минимально возможное число каналов в системе, ее называют частотным параметром или коэффициентом повторения частот. При уменьшении радиуса сот увеличивается их число, уменьшается количество абонентов в одной соте, что позволяет повысить эффективность использования выделенной полосы частот, увеличить абонентскую емкость системы, уменьшить мощность передатчиков, чувствительность приемников базовых и подвижных станций, улучшить условия электромагнитной совместимости средств сотовой связи с другими радиоэлектронными средствами и системами и повысить безопасность работы абонентов с радиосредствами ССПР.

Если радиус ячейки R уменьшить так, что в соте будет всего один абонент, т. е. $T = 1$, то минимально возможная полоса ССПР $F_{c_{\min}} = 3F$, поскольку наименьший кластер $C = 3$.

Таким образом, полоса частот ССПР с сотнями сот и тысячами абонентов может теоретически иметь полосу частот, превышающую полосу частот системы децентрализованной связи с тремя абонентами только лишь в три раза.

Однако в реальных случаях такой выигрыш не получается, так как из-за миграции абонентов количество

каналов в соте выбирают по числу абонентов $T_{\text{ср}}$ или по максимальному $T_{\text{чнн}}$ в час наибольшей нагрузки (ЧНН).

Известны следующие способы распределения частотных каналов:

– фиксированный – каждой базовой станции назначают определенный набор частотных каналов, соответствующий числу абонентов $T_{\text{ср}}$ в соте;

– динамический – частотные каналы не закрепляют за базовыми станциями, а выдают в зависимости от потребности в количестве, соответствующем $T_{\text{чнн}}$;

– гибридный (смешанный) – часть каналов закрепляют за базовыми станциями, а другие – выдают в зависимости от потребности.

В большинстве современных ССПР используют фиксированное распределение каналов. Номера каналов в каждом секторе антенной системы определяют соотношением

$$n_k = K + imC,$$

где K – номер сектора в кластере;

m – количество секторов в соте;

i – натуральные числа и нуль.

Например, в секторе с номером $K_c = 15$ при $C = 7$ и $m = 3$ должны быть использованы каналы 15, 36, 57, 78

3. Системные помехи абонентской станции – это помехи от абонентских и базовых станций других сот соседних кластерных групп. Первый способ снижения системных помех – построение ССПР в соответствии с их территориально-частотной организацией, когда базовые станции с одинаковыми наборами частот разнесены территориально (находятся не в соседних сотах). Этот разнос определяют (см. рис. 37) такими параметрами: защитный интервал $D = R\sqrt{3C}$ и защитный коэффициент $q = D/R = \sqrt{3C}$. Например, параметр q имеет значения 3; 3,46

и 4,58 для трех-, четырех- и семиэлементного кластера, т. е. увеличивается с ростом размерности кластера. Однако с ростом размера кластера увеличивается и полоса частот $F_c = F_{ТС}$, используемых ССПР.

Второй способ снижения уровня системных помех – использование направленных секторных антенных систем с узкими диаграммами направленности антенн секторов, при этом антенны секторов с одинаковыми наборами частот должны быть направлены в одну и ту же сторону. В этом случае

$$F_c = FNCT_{\text{сект}} ,$$

где N – количество секторов;

$T_{\text{сект}}$ – количество частотных каналов в одном секторе.

Способ повторного использования частот в организованных таким образом сотах основан на применении трехсекторных антенных систем для каждой базовой станции и трех соседних базовых станций с формированием девяти групп частот (рис. 38).

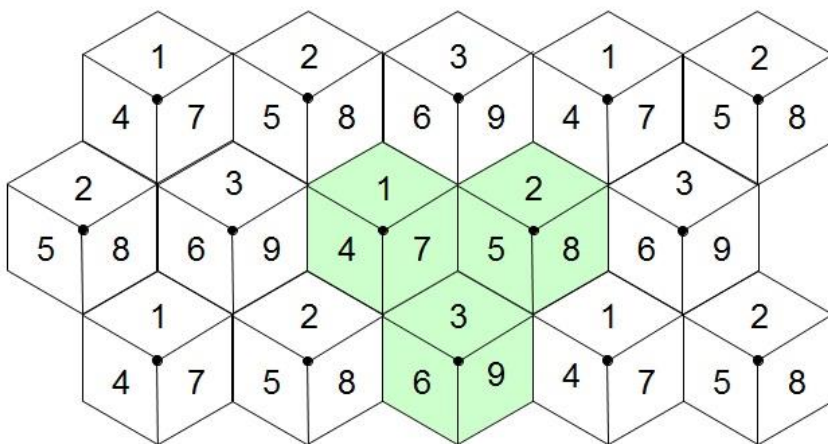


Рис. 38. Способ повторного использования частот

Антенны с шириной диаграммы направленности 120° ; размерности кластера $C = 3$; количества секторов $N = 3$; количества частот одной соты $T = NT_{\text{сект}} = 3T_{\text{сект}}$. В этом случае при минимальном количестве $T_{\text{сект}} = 1$ каналов в одном секторе ширина полосы $F_c = F_{c\text{min}} = 9F$ ССПР в три раза больше, чем при использовании всенаправленных антенн (см. рис. 37).

Применение многосекторных антенн (см. рис. 38) показывает, что обеспечиваемое при этом снижение уровня системных помех достигается вследствие расширения полосы рабочих частот ССПР.

Таким образом, все уже известные способы борьбы с обнаруженными системными помехами приводят к расширению диапазона частот, занимаемого ССПР.

4. Вопрос о безопасности использования средств ССПР – актуальный, так как радиоизлучения этих радиосистем влияют на здоровье их пользователей и на другие радиотехнические системы и устройства.

Осторожность при пользовании средствами радиосвязи необходима в ситуациях, когда, например, излучение радиотелефона может нарушать работу электрокардиостимуляторов и слуховых аппаратов, кардиографов и энцефалографов. Сотовым телефоном нельзя пользоваться в самолетах, в местах проведения взрывных работ и т. д.

Однако под биологической безопасностью средств связи подразумевают в первую очередь влияние электромагнитного излучения телефона на организм здорового человека, так как зачастую радиопередатчик работает непосредственно около уха в нескольких сантиметрах от головного мозга. Обычно нормы безопасности устанавливают предел для плотности потока мощности (ППМ, Вт/см² или мВт/см²) или для коэффициента удельного поглощения (Specific Absorption Rate – SAR, Вт/кг или мВт/г). SAR – это мощность электромагнитного поля, поглощаемого или рассеиваемого единицей массы ткани тела.

Значения SAR для ССПР

Страна или регион (стандарт)	SAR, мВт/г, в области пространственного максимума
США (ANSI/IEEE C95.1-1992)	1,6 (за 30 мин., 300–3000 МГц)
Западная Европа (ENVSO 166-2.1995) Япония	2 (за 6 мин., 300–6000 МГц) 8 (за 6 мин., все радиочастоты)

Из приведенной таблицы следует достаточное соответствие стандартов SAR ведущих в области ССПР стран мира.

SAR оценивают в НИИ и соответствующих службах охраны труда с помощью моделей тела человека – математических и физических. Эти модели достаточно детально воспроизводят тело человека с учетом составляющих его тканей (мышц, костей, мозга, крови, печени и т. п.) и характерных их параметров (диэлектрической проницаемости, проводимости).

При использовании математической модели SAR оценивают расчетным путем, в результате чего получается картина пространственного распределения SAR, по которой находят участки с максимумами, а также среднее значение SAR для тела в целом.

В физической модели, создаваемой из материалов с определенными характеристиками и воспроизводящей тело человека или его часть в натуральную величину, напряженность электрического поля измеряют в малой полости, которую создают в выбранном месте модели и куда помещают датчик измерительного прибора. В таких экспериментах применяют реальные абонентские аппараты,

работающие в обычном режиме и размещаемые в нужном ракурсе непосредственно около уха модели.

В настоящее время имеющиеся данные позволяют утверждать, что радиосредства ССПР практически безопасны для здоровья человека. Это подтверждают следующие обстоятельства:

– за все годы эксплуатации сотовой связи в Америке, Японии, Европе и других регионах не зарегистрировано юридически ни одного случая ущерба здоровью, связанного с использованием сотовых телефонов;

– результаты специальных исследований показывают, что излучения современных серийно выпускаемых радиотелефонов на один-три порядка меньше допустимых норм безопасности этих излучений.

5. GSM (от названия группы Groupe Spécial Mobile, позже переименован в Global System for Mobile Communications) (русс. СПС-900) – глобальный стандарт цифровой мобильной сотовой связи с разделением каналов по времени (TDMA) и частоте (FDMA). Разработан под эгидой Европейского института стандартизации электросвязи (ETSI) в конце 1980-х гг.

GSM относится к сетям второго поколения (2 Generation) (1G – аналоговая сотовая связь, 2G – цифровая сотовая связь, 3G – широкополосная цифровая сотовая связь, коммутируемая многоцелевыми компьютерными сетями, в том числе Интернет). Мобильные телефоны выпускаются с поддержкой четырех частот: 850 МГц, 900 МГц, 1800 МГц, 1900 МГц.

Выделим основные преимущества стандарта GSM:

– меньшие, по сравнению с аналоговыми стандартами (NMT-450, AMPS-800), размеры и вес телефонных аппаратов при большем времени работы без подзарядки аккумулятора. Это достигается в основном за счёт аппаратуры базовой станции, которая постоянно анализирует уровень сигнала,

принимаемого от аппарата абонента. В тех случаях, когда он выше требуемого, на сотовый телефон автоматически подаётся команда снизить излучаемую мощность;

- хорошее качество связи при достаточной плотности размещения базовых станций;

- большая ёмкость сети, возможность большого числа одновременных соединений;

- низкий уровень индустриальных помех в данных частотных диапазонах;

- улучшенная (по сравнению с аналоговыми системами) защита от подслушивания и нелегального использования, что достигается путём применения алгоритмов шифрования с разделяемым ключом;

- эффективное кодирование (сжатие) речи. EFR-технология была разработана фирмой Nokia и впоследствии стала промышленным стандартом кодирования/декодирования для технологии GSM (см. GSM-FR, GSM-HR и GSM-EFR);

- широкое распространение, особенно в Европе, большой выбор оборудования;

- возможность роуминга. Это означает, что абонент одной из сетей GSM может пользоваться сотовым телефонным номером не только у себя «дома», но и перемещаться по всему миру, переходя из одной сети в другую, не расставаясь со своим абонентским номером. Процесс перехода из сети в сеть происходит автоматически, и пользователю телефона GSM нет необходимости заранее уведомлять оператора (в сетях некоторых операторов могут действовать ограничения на предоставление роуминга своим абонентам, более детальную информацию можно получить, обратившись непосредственно к своему GSM-оператору).

Однако, как и любая другая ССПР, GSM имеет свои недостатки:

- искажение речи при цифровой обработке и передаче;

- связь возможна на расстоянии не более 120 км от ближайшей базовой станции даже при использовании

усилителей и направленных антенн. Поэтому для покрытия определённой площади необходимо большее количество передатчиков, чем в NMT-450 и AMPS.

GSM-900 – цифровой стандарт мобильной связи в диапазоне частот от 890 до 915 МГц (от телефона к базовой станции) и от 935 до 960 МГц (от базовой станции к телефону). Количество реальных каналов связи гораздо больше, чем написано выше в табл. 1, так как присутствует еще и временное разделение каналов TDMA, т. е. на одной и той же частоте могут работать несколько абонентов с разделением во времени.

В некоторых странах диапазон частот GSM-900 был расширен до 880–915 МГц (MS → BTS) и 925–960 МГц (MS ← BTS), благодаря чему максимальное количество каналов связи увеличилось на 50. Такая модификация была названа E-GSM (extended GSM).

GSM-1800 – модификация стандарта GSM-900, цифровой стандарт мобильной связи в диапазоне частот от 1710 до 1880 МГц. Выделим главные особенности модифицированной ССПР:

- максимальная излучаемая мощность мобильных телефонов стандарта GSM-1800 – 1 Вт, для сравнения у GSM-900 – 2 Вт. Больше время непрерывной работы без подзарядки аккумулятора и снижение уровня радиоизлучения;
- высокая ёмкость сети, что важно для крупных городов;
- возможность использования телефонных аппаратов; работающих в стандартах GSM-900 и GSM-1800 одновременно. Такой аппарат функционирует в сети GSM-900, но, попадая в зону GSM-1800, переключается – вручную или автоматически. Это позволяет оператору рациональнее использовать частотный ресурс, а клиентам – экономить деньги за счёт низких тарифов. В обеих сетях абонент пользуется одним номером. Но использование аппарата в двух сетях возможно только в тех случаях, когда эти сети принадлежат одной компании или между компаниями,

работающими в разных диапазонах, заключено соглашение о роуминге.

Дальность связи в GSM лимитирована задержкой сигнала Timing advance и составляет до 35 км. При использовании режима extended cell возрастает до 75 км.

Таблица 2
GSM 900/1800 МГц (Европа, Азия)

Характеристики	GSM-900	GSM-1800
Частоты передачи MS и приёма BTS (uplink), МГц	890–915	1710–1785
Частоты приёма MS и передачи BTS (downlink), МГц	935–960	1805–1880
Дуплексный разнос частот приёма и передачи, МГц	45	95
Количество частотных каналов связи с шириной 1 канала связи в 200 кГц	124	374
Ширина полосы канала связи, кГц	200	200

Таблица 3
GSM 850/1900 МГц (США, Канада, Латинская Америка и Африка)

Характеристики	GSM-850	GSM-1900
Частоты передачи MS и приёма BTS, МГц	824–849	1850–1910
Частоты приёма MS и передачи BTS, МГц	869–894	1930–1990
Дуплексный разнос частот приёма и передачи, МГц	45	80

6. Система GSM состоит из трёх основных подсистем (рис. 39):

- подсистемы базовых станций (BSS – Base Station Subsystem);
- подсистемы коммутации (NSS – Network Switching Subsystem);
- центра технического обслуживания (OMC – Operation and Maintenance Centre).

В отдельный класс оборудования GSM выделены терминальные устройства – подвижные станции (MS – Mobile Station), также известные как мобильные (сотовые) телефоны.

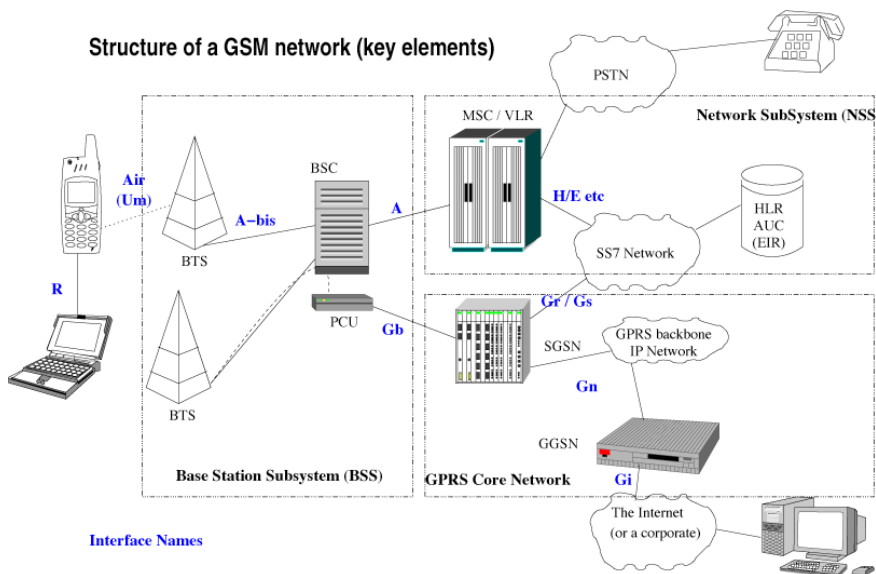


Рис. 39. Структурная схема системы сотовой связи GSM

Подсистема базовых станций

BSS состоит из собственно базовых станций (BTS – Base Transceiver Station) и контроллеров базовых станций (BSC – Base Station Controller). Область, накрываемая сетью GSM, разбита на условные шестиугольники, называемые сотами,

или ячейками. Диаметр каждой шестиугольной ячейки может быть разным – от 400 м до 50 км. Максимальный теоретический радиус ячейки составляет 120 км, что обусловлено ограниченной возможностью системы синхронизации к компенсации времени задержки сигнала. Каждая ячейка покрывается находящейся в её центре одной базовой станцией, при этом ячейки частично перекрывают друг друга, таким образом сохраняется возможность передачи обслуживания без разрыва соединения при перемещении абонента из одной соты в другую.

Естественно, что на самом деле сигнал от каждой станции распространяется, покрывая площадь в виде круга, а не шестиугольника, последний же является лишь упрощением представления зоны покрытия. Каждая базовая станция имеет шесть соседних в связи с тем, что в задачи планирования размещения станций входила минимизация стоимости системы. Меньшее количество соседних базовых станций приводило бы к большему перехлёсту зон покрытия с целью избегания «мёртвых зон», что в свою очередь потребовало бы более плотного расположения базовых станций. Большое количество соседних базовых станций приводило бы к излишним расходам на дополнительные станции, в то время как выигрыш от уменьшения зон перехлёста был бы уже весьма незначительным.

Базовая станция (BTS) обеспечивает приём/передачу сигнала между MS и контроллером базовых станций. BTS является автономной и строится по модульному принципу. Направленные антенны базовых станций могут располагаться на вышках, крышах зданий и т. д.

Контроллер базовых станций (BSC) координирует соединения между BTS и подсистемой коммутации. В его полномочия также входит управление очередностью соединений, скоростью передачи данных, распределение радиоканалов, сбор статистики, контроль различных

радиоизмерений, назначение и управление процедурой Handover.

Подсистема коммутации

Приведем перечень компонентов, входящих в состав NSS, и опишем далее подробно каждый из них.

Центр коммутации (MSC – Mobile Switching Center) контролирует определённую географическую зону с расположенными на ней BTS и BSC. Осуществляет установку соединения к абоненту и от него внутри сети GSM, обеспечивает интерфейс между GSM и ТфОП, другими сетями радиосвязи, сетями передачи данных. Также выполняет функции маршрутизации вызовов, управления вызовами, эстафетной передачи обслуживания при перемещении MS из одной ячейки в другую. После завершения вызова MSC обрабатывает данные по нему и передаёт их в центр расчётов для формирования счета за предоставленные услуги, собирает статистические данные. MSC также постоянно следит за положением MS, используя данные из HLR и VLR, что необходимо для быстрого нахождения и установления соединения с MS в случае её вызова.

Домашний регистр местоположения (HLR – Home Location Registry) содержит базу данных абонентов, приписанных к нему. Здесь имеется информация о предоставляемых данному абоненту услугах, сведения о состоянии каждого абонента, необходимые в случае его вызова, а также Международный Идентификатор Мобильного Абонента (IMSI – International Mobile Subscriber Identity), который используется для аутентификации абонента (при помощи AUC). Каждый абонент приписан к одному HLR. К данным HLR имеют доступ все MSC и VLR в данной GSM-сети, а в случае межсетевых роуминга – и MSC других сетей.

Гостевой регистр местоположения (VLR – Visitor Location Registry) обеспечивает мониторинг передвижения MS

из одной зоны в другую и содержит базу данных о перемещающихся абонентах, находящихся в данный момент в этой зоне, в том числе абонентах других систем GSM – так называемых роумерах. Данные об абоненте удаляются из VLR в том случае, если абонент переместился в другую зону. Такая схема позволяет сократить количество запросов на HLR данного абонента и, следовательно, время обслуживания вызова.

Регистр идентификации оборудования (EIR – Equipment Identification Registry) содержит базу данных, необходимую для установления подлинности MS по IMEI (International Mobile Equipment Identity). Формирует три списка: белый (MS, допущенные к использованию), серый (некоторые проблемы с идентификацией MS) и чёрный (MS, запрещённые к применению). У российских операторов (и большей части операторов стран СНГ) используются только белые списки, что не позволяет раз и навсегда решить проблему кражи мобильных телефонов.

Центр аутентификации (AUC – Authentication Center) – здесь производится аутентификация абонента, а точнее – SIM (Subscriber Identity Module). Доступ к сети разрешается только после прохождения SIM процедуры проверки подлинности, в процессе которой с AUC на MS приходит случайное число RAND, после чего на AUC и MS параллельно происходит шифрование числа RAND ключом K_i для данной SIM при помощи специального алгоритма. Затем с MS и AUC на MSC возвращаются «подписанные отклики» – SRES (Signed Response), являющиеся результатом данного шифрования. На MSC отклики сравниваются, и в случае их совпадения аутентификация считается успешной.

Подсистема OMC (Operations and Maintenance Center) соединена с остальными компонентами сети и обеспечивает контроль качества работы и управление всей сетью. Обработывает аварийные сигналы, при которых требуется

вмешательство персонала. Обеспечивает проверку состояния сети, возможность прохождения вызова. Производит обновление программного обеспечения на всех элементах сети и ряд других функций.

7. Приведем основные характеристики радиосигнала стандарта GSM:

- частоты передачи подвижной станции приема базовой станции: 890–915 МГц;

- частоты приема подвижной станции и передачи базовой станции: 935–960 МГц;

- дуплексный разнос частот приема и передачи – 45 МГц;

- скорость передачи сообщений в радиоканале – 270, 833 кбит/с;

- скорость преобразования речевого кодека – 13 кбит/с;

- ширина полосы канала связи – 200 кГц;

- максимальное количество каналов связи – 124;

- максимальное количество каналов, организуемых в базовой станции – 16-20;

- вид модуляции – GMSK;

- индекс модуляции B_T – 0,3;

- ширина полосы предмодуляционного гауссовского фильтра – 81,2 кГц;

- количество скачков по частоте в секунду – 217;

- временное разнесение в интервалах TDMA кадра (передача/прием) для подвижной станции – 2;

- вид речевого кодека RPE/LTP;

- максимальный радиус соты – до 35 км;

- схема организации каналов комбинированная TDMA/FDMA.

GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying) – это гауссовская двухпозиционная частотная манипуляция с минимальным сдвигом, обладающая двумя особенностями, одна из которых – «минимальный сдвиг», другая –

гауссовская фильтрация. Обе особенности направлены на сужение полосы частот, занимаемой GMSK-сигналом. Использование GMSK в системе сотовой радиосвязи GSM регламентируется стандартом ETSI (Европейский институт стандартов связи).

Следует отметить ряд важных ее преимуществ:

- достаточно высокая спектральная эффективность (эффективность использования полосы частот), равная: $270,883 / 200 = 1,354$ (бит/с) / Гц, обусловленная использованием ГФНЧ с ВТв = 0,3;

- низкий уровень помех по соседним частотным каналам; приемлемая для практики помехоустойчивость: вероятность ошибки на бит P_c а 10^{-3} при отношении несущая/шум $C/N = 30$ дБ;

- возможность использования когерентной и некогерентной демодуляции;

- высокий коэффициент полезного действия усилителя мощности передатчика (благодаря использованию нелинейного усилителя НЛУ).

Сужения полосы занимаемых частот удалось достигнуть за счет предварительной фильтрации модулирующего сигнала фильтром низкой частоты с гауссовской импульсной характеристикой. Ширина спектра сигнала GMSK определяется произведением длительности передаваемого символа на полосу пропускания гауссовского фильтра ВТ. Именно полосой пропускания В и отличаются различные виды GMSK друг от друга.

Форма этого сигнала определяется напряжением на выходе гауссовского фильтра, а значение девиации – индексом модуляции m . Для GMSK индекс модуляции $m = 0,5$. Соответственно, для выбранной в качестве примера скорости передачи 19,2 кБод девиация частоты будет равна $\pm 4,8$ кГц. Частота передачи нуля в этом сигнале будет отличаться от частоты передачи единицы на 9,6 кГц – в два раза меньше скорости передачи символов.

Чем меньше полоса пропускания гауссовского фильтра, тем уже полоса радиосигнала, но при этом возрастают межсимвольные искажения в GMSK радиосигнале.

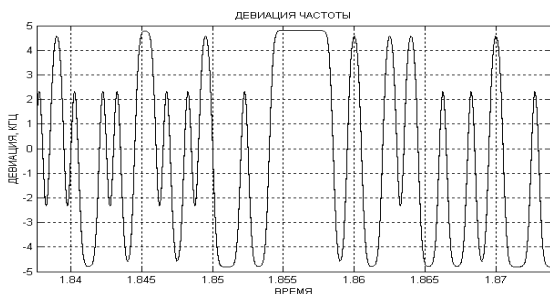


Рис. 40. Девиация частоты сигнала GMSK с $V_T = 0,3$

На рис. 40 отчетливо видно, что девиации 4,8 кГц сигнал GMSK достигает только при передаче не менее трех одинаковых символов. При передаче последовательности нулей и единиц девиация сигнала не успевает достигнуть номинального значения. На приведенном графике видно, что девиация в этом случае получается чуть больше 2 кГц. При передаче двух нулей или двух единиц девиация только немного не достигает значения 4,8 кГц.

Межсимвольные искажения обычно устраняются эквалайзером или сверточным декодером на приемном конце радиотракта. Преимуществом использования GMSK модуляции является постоянный уровень радиосигнала, что позволяет использовать в радиопередатчике нелинейный усилитель мощности.

Спектр сигнала GMSK приведен на рис. 41. Для сравнения на этом же рисунке приведены спектры сигналов частотной модуляции с минимальным разносом частот MSK и четырехпозиционной фазовой модуляции. Спектр четырехпозиционной фазовой модуляции показан для случая, когда исходный модулирующий сигнал не подвергался предварительной обработке фильтром Найквиста.

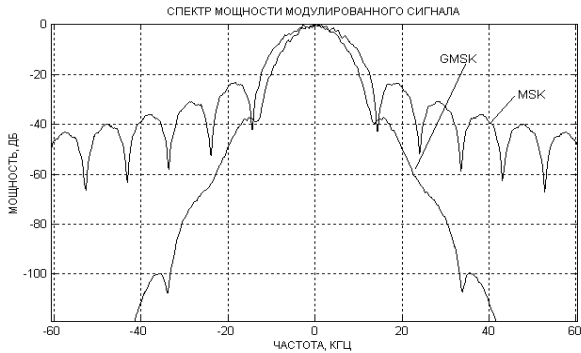


Рис. 41. График спектра модуляции GMSK в сравнении со спектром частотной модуляции с минимальным сдвигом частот MSK

К сожалению, в точках взятия отсчетов сигнал GMSK зависит от предыдущих значений передаваемого сигнала. Это вызвано действием гауссовского фильтра, формирующего спектр сигнала GMSK. В результате помехоустойчивость сигнала GMSK ниже по сравнению даже с помехоустойчивостью сигнала MSK. Конкретное значение помехоустойчивости сигналов GMSK сильно зависит от произведения ВТ.

При исследовании и анализе GMSK сигнала в системе сотовой связи GSM на практике он выглядит в виде осциллограммы мощности (рис. 42).

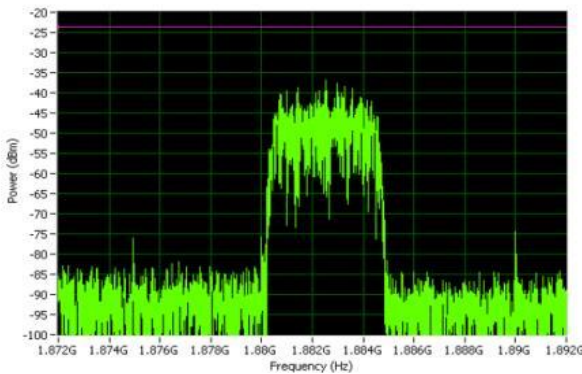


Рис. 42. График осциллограммы сигнала GMSK в GSM

8. Каналы связи разделяют на физические и логические. В стандарте GSM данные группируются и объединяются в логические каналы двух типов – каналы связи TCH (Traffic Channel) для передачи речи или данных и каналы управления CCH (Control Channel) для передачи сигналов управления.

Различают логические каналы связи двух основных видов:

1) TCH/F (Traffic Channel Full) – канал передачи сообщений с полной скоростью (другое обозначение – V_m);

2) TCH/H (Traffic Channel Half) – канал передачи сообщений с половинной скоростью (другое обозначение – L_m).

Для передачи кодированной речи и данных предназначены каналы связи следующих типов:

– TCH/FS (Traffic Channel Full Speech) – канал для передачи речи с полной скоростью;

– TCH/HS (Traffic Channel Half Speech) – канал для передачи речи с половинной скоростью;

– TCH/F9,6 (Traffic Channel Full 9,6 кбит/с) – канал передачи данных с полной скоростью 9,6 кбит/с;

– TCH/F4,8 (Traffic Channel Full 4,8 кбит/с) – канал передачи данных с полной скоростью 4,8 кбит/с;

– TCH/F2,4 (Traffic Channel Full 2,4 кбит/с) – канал передачи данных с полной скоростью 2,4 кбит/с;

– TCH/H4,8 (Traffic Channel Half 4,8 кбит/с) – канал передачи данных с половинной скоростью 4,8 кбит/с;

– TCH/H2,4 (Traffic Channel Half 2,4 кбит/с) – канал передачи данных с половинной скоростью 2,4 кбит/с.

Различают четыре вида каналов управления:

1) BCCH (Broadcast Control Channel) – широкоэмитательные каналы передачи сигналов управления;

2) CCCH (Common Control Channel) – общие каналы управления;

3) SDCCN (Standalone Dedicated Control Channel) – индивидуальные, или выделенные, закрепленные каналы управления;

4) ACCH (Associated Control Channel) – совмещенные каналы управления.

Физические каналы характеризуются частотными, энергетическими, временными и другими показателями.

Мощность базовой станции может достигать 55 Вт, при удалении на 10 м плотность потока мощности (ППМ) не превышает допустимую ППМ = 1 мкВт/см².

В ССПР GSM применяют абонентские станции первого-пятого классов с выходной мощностью 20, 8, 5, 2, 0,8 Вт. Станции первого-третьего классов устанавливаются на транспортных средствах, а четвертого и пятого – представляют собой носимые модели.

В стандарте GSM восемь физических каналов для передачи трафика и управления, реализованных в восьми временных окнах (слотах) TDMA-кадра. При этом каждый физический канал использует одно и то же временное окно в каждом временном TDMA-кадре. Кадры TDMA объединяются в мультикадры. Для одного физического канала трафика TCH или сигнализации SACCH в каждом TDMA-кадре используют 114 битов (два пакета ED, содержащие 57 + 57 битов). Длительность мультикадра – 120 мс.

Полная скорость передачи данных в объединенном TCH + SACCH канале в обоих случаях составляет $22,8 + 0,950 + 0,950 = 24,7$ кбит/с (для полускоростной и полноскоростной передачи данных).

В стандарте GSM используют медленные скачки по частоте SFH (Slow Frequency Hopping, 277 скачков в секунду), назначение которых – повышение качества связи в радиоканалах, функционирующих в условиях многолучевого распространения радиоволн, а также эффективности кодирования.

9. Заслушав сообщение Федеральной службы по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций об использовании радиоэлектронными средствами сухопутной подвижной службы полос радиочастот 890–915 МГц, 935–960 МГц, 1710–1785 МГц и 1805–1880 МГц, Государственная комиссия по радиочастотам (ГКРЧ) отмечает.

В настоящее время использование радиоэлектронных средств стандарта GSM в полосах радиочастот 890–915 МГц, 935–960 МГц, 1710–1785 МГц и 1805–1880 МГц осуществляется на основании отдельных решений ГКРЧ, выданных операторам связи. При этом указанные решения ГКРЧ имеют различный срок использования полос радиочастот (в том числе и не установленный), а также условия их использования.

Кроме того, большое количество данных отдельных решений ГКРЧ затрудняет процедуру контроля выполнения условий использования полос радиочастот и в целом приводит к значительным трудностям в регулировании использования радиочастотного ресурса в полосах радиочастот 890–915 МГц, 935–960 МГц, 1710–1785 МГц и 1805–1880 МГц.

С целью унификации условий использования полос радиочастот для применения РЭС стандарта GSM, а также для упрощения процедуры контроля использования радиочастотного ресурса в указанных полосах радиочастот ГКРЧ решила:

1. Выделить полосы радиочастот 890–915 МГц, 935–960 МГц, 1710–1785 МГц и 1805–1880 МГц для применения РЭС сухопутной подвижной радиосвязи стандарта GSM операторами связи на территории субъектов Российской Федерации в соответствии с приложениями № 1 и № 2 к настоящему решению ГКРЧ.

2. Использование выделенных пунктом 1 настоящего решения ГКРЧ полос радиочастот должно осуществляться при выполнении следующих условий:

– соответствие технических характеристик РЭС основным техническим характеристикам, указанным в приложении № 3 к настоящему решению ГКРЧ;

– получение в установленном в Российской Федерации порядке разрешений на использование радиочастот или радиочастотных каналов;

– выполнение условий по оказанию услуг связи, установленных решением ГКРЧ от 11 декабря 2013 г. № 13-22-01;

– регистрация РЭС в установленном в Российской Федерации порядке.

3. Выделить гражданам Российской Федерации и российским юридическим лицам полосы радиочастот 890–915 МГц, 935–960 МГц, 1710–1785 МГц и 1805–1880 МГц для разработки, производства и модернизации РЭС стандарта GSM при условии, что основные технические характеристики разрабатываемых, производимых и модернизируемых РЭС соответствуют основным техническим характеристикам, указанным в приложении № 3 к настоящему решению ГКРЧ.

4. Использование полос радиочастот 890–915 МГц, 935–960 МГц, 1710–1785 МГц и 1805–1880 МГц для применения РЭС стандартов UMTS, LTE и последующих их модификаций, в том числе при совместном использовании, в соответствии с решениями ГКРЧ от 11 декабря 2013 г. № 13-22-02, от 22 июля 2014 г. № 14-26-07 и от 30 июня 2015 г. № 15-33-06-2 осуществляется на основании настоящего решения ГКРЧ и в соответствии с распределениями полос радиочастот на территории Российской Федерации, приведенными в приложениях № 1 и № 2 к настоящему решению ГКРЧ.

5. В соответствии с ранее принятыми решениями ГКРЧ установить, что доступный для оказания услуг связи радиочастотный спектр в полосах радиочастот 890–915 МГц, 935–960 МГц, 1710–1785 МГц и 1805–1880 МГц ограничивает

возможное количество операторов сетей подвижной радиотелефонной связи стандарта GSM на территории Российской Федерации. При этом минимально необходимый радиочастотный спектр для создания и развития сетей подвижной радиотелефонной связи стандарта GSM на территории субъекта Российской Федерации или на территории административно-территориальных образований с особым статусом составляет два участка по 4,8 МГц в полосах радиочастот 890–915 МГц и 935–960 МГц или два участка по 10 МГц в полосах радиочастот 1710–1785 МГц и 1805–1880 МГц.

6. Признать утратившими силу решения ГКРЧ, указанные в приложении № 4 к настоящему решению ГКРЧ.

7. Операторы связи, имеющие соответствующие разрешительные документы на использование радиочастотного ресурса в полосах радиочастот 890–915 МГц, 935–960 МГц, 1710–1785 МГц и 1805–1880 МГц радиоэлектронными средствами стандарта GSM, UMTS, LTE и последующих его модификаций, полученные на основании решений ГКРЧ указанных в приложении № 4 к настоящему решению ГКРЧ, могут продолжать его использование на условиях, изложенных в указанных разрешительных документах, до окончания срока действия данных разрешительных документов, но не позднее 30 июня 2026 г.

8. Ввоз на территорию Российской Федерации РЭС должен осуществляться в установленном в Российской Федерации порядке.

9. Настоящее решение ГКРЧ вступает в силу с 1 августа 2016 г.

10. Установить срок действия настоящего решения ГКРЧ десять лет со дня его принятия.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Как происходит разделение обслуживаемой территории для организации на ней ССПР? Какие требования предъявляются к процессу?

2. Почему метод шестиугольника при разделении территории для ССПР является наиболее эффективным?

3. Как происходит частотное планирование в ССПР? Объясните данный процесс в общих чертах.

4. Какие способы распределения частотных каналов Вы знаете?

5. Что такое системные помехи в ССПР и как они возникают?

6. Какие способы борьбы с системными помехами в ССПР Вы знаете?

7. В чем заключается биологическая безопасность радиосредств ССПР? Что такое SAR?

8. Что такое GSM? Назовите основные его преимущества и недостатки.

9. Дайте сравнительную характеристику стандартам ССПР GSM-900 и GSM-1800. Какие дополнительные модификации стандарта GSM существуют и где используются?

10. Расскажите в общих чертах о структуре ССПР GSM.

11. Подсистема базовых станций – дайте подробное описание.

12. Подсистема коммутации – дайте подробное описание.

13. Назовите основные характеристики радиосигнала стандарта GSM.

14. Почему в стандарте ССПР GSM используется гауссовская двухпозиционная частотная манипуляция с минимальным сдвигом?

15. Расскажите подробно о физических каналах связи в стандарте ССПР GSM.

16. Расскажите подробно о логических каналах связи в стандарте ССПР GSM.

17. Какие полосы радиочастот для стандарта сотовой подвижной радиосвязи GSM выделены в Российской Федерации?

18. Какие условия должны выполняться оператором сети сотовой связи GSM при использовании выделенных полос радиочастот?

2.4. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ МОНИТОРИНГА И ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА СВЯЗИ, ПОКРЫТИЯ АБОНЕНТА БАЗОВЫМИ СТАНЦИЯМИ С ПОМОЩЬЮ КОММЕРЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ RTL-SDR

Ознакомимся и научимся работать с программой-сканером радиодиапазона RTL-SDR Scanner. С помощью данного программного обеспечения оценим загруженность радиодиапазона стандарта системы сотовой связи GSM.

Запустить исполняемый файл Rtlldr scanner.exe из каталога на CD диске LR-SRS/2_SDR_GSM/Rtlldr scanner, кликая по файлу правой кнопкой мыши и выбирая пункт «Запуск от имени администратора»:

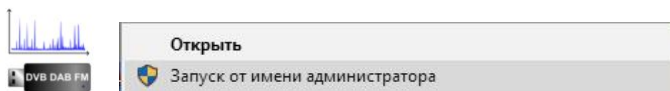


Рис. 43. Запуск программы RTL-SDR Scanner от имени администратора

При запуске откроется консольное окно поиска тюнера RTL-SDR R820T2, при успешном его обнаружении видим:



Рис. 44. Успешное обнаружение подключенного к программе RTL-SDR оборудования

После запуска программы видим основное рабочее окно с устройством:

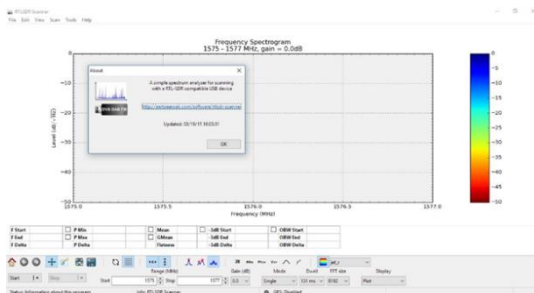


Рис. 45. Главное окно программы RTL-SDR Scanner

Проведем сканирование одного из диапазонов частот, предназначенного для системы сотовой связи GSM: 926 МГц – 960 МГц. В поле Start введем значение 926, в поле Stop – 960. Уровень усиления (Gain) – 25.4, поле Mode – Single, поле Dwell – 131 ms, поле FFT size – 2048. Результаты сканирования выведем в виде графика уровней сигналов, для этого в поле Display выберем режим Plot. После завершения настроек будущего процесса сканирования нажимаем кнопку Start. Процесс сканирования визуально отображается зеленым прогресс-баром в правом нижнем углу, общее время сканирования зависит от производительности аппаратной части ПК. В завершение видим полученный график уровней сигналов в заданном нами ранее диапазоне GSM:

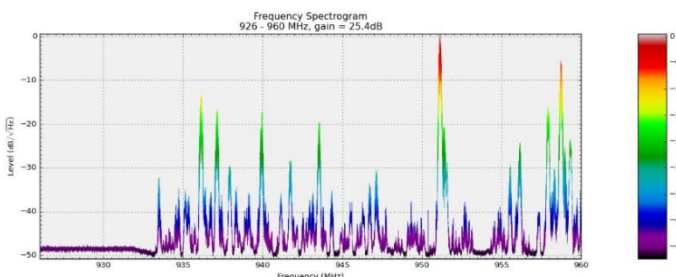


Рис. 46. Результаты сканирования и определения загруженности диапазона GSM-900 в программе RTL-SDR Scanner

Разберем подробнее возможности визуального представления загруженности диапазона частот GSM. Для этого в поле Display выберем режим Spectrogram:

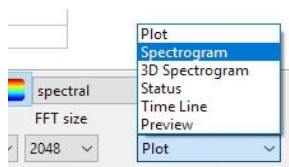


Рис. 47. Выбор режима показа спектрограммы

Пронаблюдаем представление уровней сигналов в виде спектрограммы:

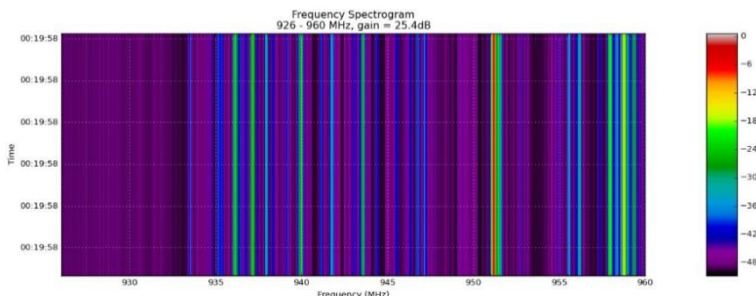


Рис. 48. Представление результатов сканирования диапазона GSM-900 в виде спектрограммы

Выберем другой режим представления загруженности диапазона частот GSM 3D Spectrogram и получим визуальное наблюдение в более объективном масштабе (после выбора данного режима некоторое время программа может не отвечать из-за трудоемкого процесса построения 3D спектрограммы):

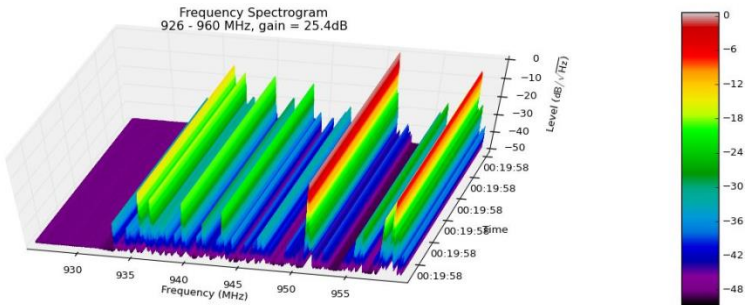


Рис. 49. Представление результатов сканирования диапазона GSM-900 в виде 3D спектрограммы

Освоим работу с программой RF DSP GSM SCANNER RTL-SDR для проверки диапазона частот работы базовых станций сотовых операторов (согласно «Решению Государственной комиссии по радиочастотам при Минкомсвязи России от 1 июля 2016 г. №16-37-03 “Об использовании радиоэлектронными средствами сухопутной подвижной службы полос радиочастот”»), технических параметров базовых станций, а также анализа покрытия соты для обеспечения качественной связи между абонентскими терминалами.

Запустить исполняемый файл gmscan.exe из каталога LR-SRS/2_SDR_GSM/gmscan, кликая по файлу правой кнопкой мыши и выбирая пункт «Запуск от имени администратора»:

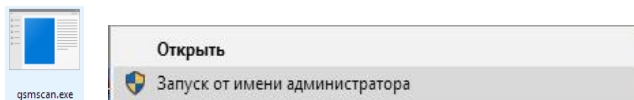


Рис. 50. Запуск программы RF DSP GSM SCANNER RTL-SDR от имени администратора

После запуска программы видим основное рабочее окно сканирования и обнаружения принадлежности базовых станций к сотовым операторам (рис. 51). Процесс сканирования в реальном времени запускается автоматически:

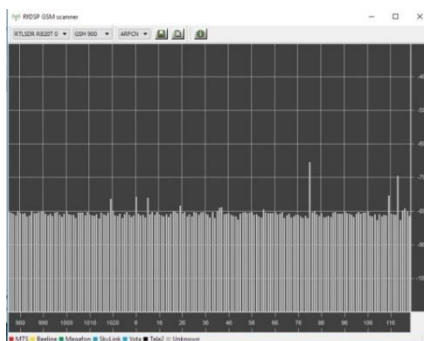


Рис. 51. Главное окно программы

Переключитесь из канального режима обзора работы базовых станций в частотный:



Рис. 52. Переключение в режим отображения источников по частотам

Проведем мониторинг БС в заданной полосе частот ССПР GSM-900, а также проидентифицируем каждый источник по принадлежности его к определенному оператору предоставления услуг сотовой связи. Процесс наиболее полного сканирования и анализа базовых станций занимает около 5 мин. По истечении указанного времени работы программы получаем наиболее достоверные результаты:

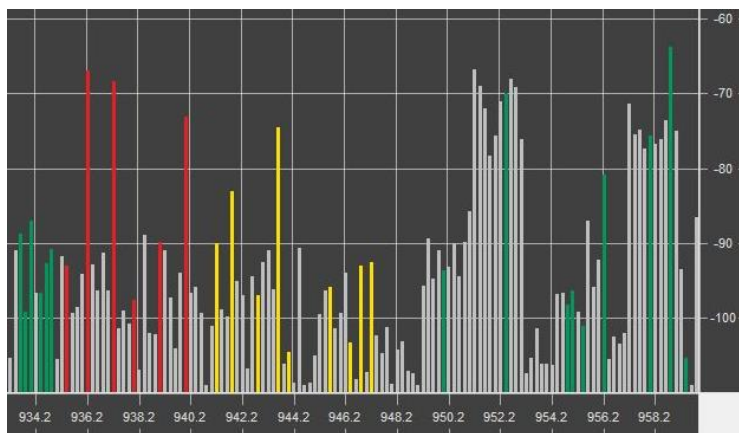


Рис. 53. Идентификация радиосигналов
ССПР GSM-900 в нисходящем канале

Исходя из полученных результатов, видим, что зеленым цветом в программе обозначены БС, принадлежащие оператору сотовой связи ПАО «Мегафон», желтым – ПАО «ВымпелКом» (Билайн) и красным цветом – ПАО «МТС». Идентифицировать БС остальных операторов не удалось по причине возможного отсутствия сигнала в пределах местонахождения абонентского терминала. Для примера отметим, что БС «Мегафона» работают на частотах 933–935 МГц, а также 950 МГц, 952 МГц, 955 МГц и 958–959 МГц. В процессе выполнения лабораторных исследований у каждого студента, в зависимости от его местоположения, результаты могут отличаться.

Теперь проанализируем качество связи абонентского терминала (в данном случае его эмулирует наш RTL-SDR) с БС операторов сотовой связи. Найдем в окне сканера БС с самым сильным сигналом от каждого оператора и вычислим общее количество БС от каждого оператора сотовой связи, а также сравним качество связи между «большой тройкой» в пределах местонахождения студента. Для примера возьмем оператора ПАО «МТС»: общее количество БС в зоне

равняется 6 с самым сильным сигналом примерно –67 дБм и –68 дБм. В сравнении с БС от ПАО «Мегафон» с самым сигналом примерно одинаковой мощности, как и у МТС, у второго в зоне местоположения абонента количество БС на порядок выше – 15.

Программа имеет возможность сохранения полученных результатов сканирования в виде технических параметров каждой достоверно определенной БС. Сохраним полученные нами результаты в отчетный txt файл по нажатию кнопки SaveReport. Файл отчетности автоматически появляется в папке с программой под определенным именем, например GSM_scan_20_апр_2018_21_47_12.

При открытии файла с помощью встроенной в ОС Windows стандартной утилиты «Блокнот» получаем следующие технические данные обо всех успешно идентифицированных БС российских операторов ССПР GSM-900 в северной части г. Воронежа (представлен фрагмент на рис. 54) В дальнейшем, на основании представленных данных, имеется возможность легко определить местоположение каждой БС с помощью специальных навигационных программ.

ARFCN	MHz	dBm	MCC	MNC	LAC	CI	Type	BCCH
1017	933.6	-82.4	250	2	3601	40171	BCCH+TCH	
1018	933.8	-104.2	250	2	3601	40171	TCH only	1017
1019	934.0	-104.1	---	---	-----	-----		

Рис. 54. Итоговый файл отчета идентификации базовых станций ССПР GSM-900

2.5. ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ЕГО ВЫПОЛНЕНИЮ

1. Изучить стандарт системы сотовой связи GSM:

- общие сведения;
- предоставляемые услуги;
- преимущества и недостатки;
- стандарты и радиointерфейс;
- структура GSM.

2. Изучить «Решение Государственной комиссии по радиочастотам при Минкомсвязи России от 1 июля 2016 г. № 16-37-03 “Об использовании радиоэлектронными средствами сухопутной подвижной службы полос радиочастот 890–915 МГц, 935–960 МГц, 1710–1785 МГц и 1805–1880 МГц”» для получения сведений об используемых диапазонах частот в системе сотовой связи GSM на территории Российской Федерации, а также по Воронежской области.

Для выполнения домашнего задания в первую очередь проработайте теоретический материал по структуре системы сотовой связи стандарта GSM и его радиointерфейс. Обратите особое внимание на взаимодействие всех составляющих в ССПР GSM.

2.6. ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ

1. Ознакомиться с лабораторной установкой на базе коммерческой платформы RTL-SDR, его антенной системой и необходимым программным обеспечением, входящим в состав лабораторной установки.

2. Подготовить лабораторную установку к работе, проверить комплектность лабораторного стенда.

3. Подключить все части лабораторного стенда, подключить РПУ RTL-SDR к ПК (ноутбуку).

4. Проверить подачу питания на лабораторную установку (индикатор питания RTL-SDR должен гореть ярким белым светом).

5. Выполнить установку драйвера в ОС Windows для лабораторной установки, если на используемом для лабораторных исследований ПК он ранее не был установлен.

6. Запустить программное обеспечение сканера радиодиапазона RTL-SDR Scanner, провести оценку загруженности радиодиапазона стандарта системы сотовой связи GSM, сделать выводы о полученных результатах.

7. Запустить программное обеспечение анализатора ССПР GSM-900 и GSM-1800 RFDSP GSM Scanner, провести мониторинг и оценку качества связи, покрытия абонента базовыми станциями, сформировать выводы о полученных результатах исследований.

Отчёт о проделанной работе должен содержать:

- выполненное домашнее задание;
- результаты экспериментальных исследований;
- рисунки, поясняющие выполнение методики проведения мониторинга и оценки качества связи, покрытия абонента базовыми станциями с помощью коммерческой платформы RTL-SDR;

- подробные выводы по всем этапам исследований.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Поясните принцип работы стандарта системы сотовой подвижной радиосвязи GSM.

2. Дайте сравнительную характеристику стандартам ССПР GSM-900 и GSM-1800. Какие дополнительные модификации стандарта GSM существуют и где используются?

3. Подсистема базовых станций – дайте подробное описание.

4. Подсистема коммутации – дайте подробное описание.

5. Какие полосы радиочастот для стандарта сотовой подвижной радиосвязи GSM выделены в Российской Федерации?

6. Как проводятся мониторинг и оценка качества связи, покрытия абонента базовыми станциями с помощью коммерческой платформы RTL-SDR?

7. Какую служебную информацию об обнаруженных базовых станциях можно извлечь из итогового отчета программы RFDSP GSM Scanner? Как Вы думаете, возможно ли определить местоположение каждой из них с помощью используемых сведений?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ И ТЕХНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАДИОСИГНАЛОВ СТАНДАРТА GSM

3.1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

Целью настоящей работы является:

1. Повторение теоретических сведений о принципе работы стандарта системы сотовой связи GSM, его особенностях, топологии сети.

2. Визуальное обнаружение, проведение технического анализа и исследования радиосигналов в системе сотовой подвижной радиосвязи GSM на базе лабораторного стенда RTL-SDR-R820T2.

При выполнении домашнего задания студенты должны восстановить в памяти принцип работы стандарта системы сотовой связи GSM, его отличительные особенности, а также топологию сети, проработать теоретический материал по техническим характеристикам и структуре сигнала в системе сотовой связи GSM.

В процессе выполнения лабораторного исследования студенты изучают методику проведения технического анализа принимаемых радиосигналов ССПР GSM.

При выполнении работы студенты используют следующее оборудование:

- лабораторный стенд RTL-SDR-R820T2;
- персональный компьютер с ОС Windows версии 7, 8.1 или 10 (сборка не менее номера 1703);
- пакет исследовательского математического прикладного программного обеспечения MathLab версии не ниже R2017a с установленным плагином поддержки System Toolbox для коммерческой платформы RTL-SDR;
- прикладное программное обеспечение для анализа и декодирования принимаемых радиосигналов SDR Sharp.

3.2. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка содержит РПУ на базе платформы RTL-SDR с интерфейсом подключения к ПК USB 2.0 и разъемом подключения антенны MCX (рис. 55), переходник для подключения антенны MCX М – SMA F, приемную антенну «веерный вибратор» с SMA разъемом, провод-удлиннитель USB 2.0 М – USB 2.0 F, персональный компьютер (ноутбук) с установленной операционной системой не ниже Windows 7, а также программным обеспечением для сканирования радиозэфира RTL-SDR Scanner и сканирования, анализа и идентификации нисходящих каналов GSM-900 RFDSP GSM Scanner.

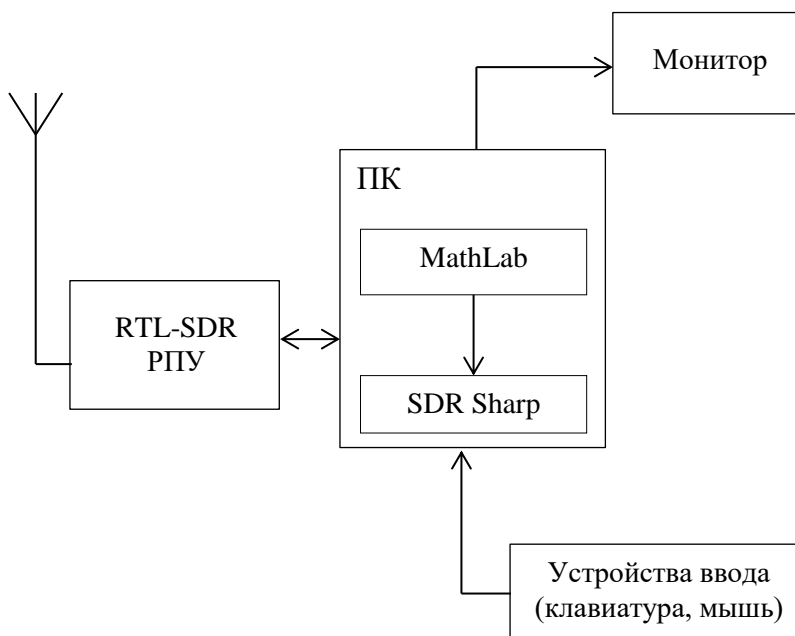


Рис. 55. Структурная схема лабораторной установки

Предполагается, что перед выполнением данной лабораторной работы студент владеет знаниями о технологии SDR, методике подключения RTL-SDR ППУ к персональному компьютеру (ноутбуку) с установленным драйвером RTL-SDR в ОС Windows.

3.3. ПРОГРАММНО-ОПРЕДЕЛЯЕМАЯ СИСТЕМА ПОДВИЖНОЙ РАДИОСВЯЗИ

Цель занятия: изучение физических основ программно-определяемых систем подвижной радиосвязи, в том числе:

- общих сведений технологии SDR;
- причин появления SDR;
- преимуществ SDR по сравнению с классическими средствами передачи и приема информации;
- принципа построения и архитектуры SDR радиосистем;
- популярных примеров SDR аппаратуры;
- примеров программного обеспечения для удобства работы с SDR аппаратурой в операционных системах Windows и Linux;
- методики проведения мониторинга и оценки качества связи, покрытия абонента базовыми станциями с помощью коммерческой платформы RTL-SDR;
- методики исследования радиосигналов ССПР GSM с помощью коммерческой платформы RTL-SDR.

В процессе подготовки к занятиям следует пользоваться литературой [1–4].

Краткие теоретические сведения

1. Программно-определяемая радиосистема (SDR) – это общий термин, который относится к радиосистемам, в которых почти все функциональные возможности,

связанные с физическим уровнем (PHY), реализованы в программном обеспечении с использованием алгоритмов цифровой обработки сигналов (DSP). Любая демодуляция, синхронизация, декодирование или дешифрование, необходимые для восстановления информации, содержащейся в принятом сигнале, будут выполняться в программном обеспечении, которое выполняется на сверхбыстром специализированном устройстве обработки.

Целью такой схемы является радиоприемник или радиопередатчик произвольных радиосистем, изменяемый путём программной переконфигурации. Благодаря программной настройке один приёмопередатчик может быть приспособлен под множество различных форм сигнала. В результате такие элементы, как усилители, детекторы, модуляторы и демодуляторы становятся не нужны. В то же время мы получаем многофункциональную платформу, имеющую множество режимов работы и набор диапазонов частот, переключение между которыми осуществляется автоматически и динамически в технической части удалённым способом.

Если говорить о радиолюбителях, то они уже давно применяют персональные компьютеры в различных аспектах своего хобби – и в радиосвязи, и при конструировании аппаратуры, и для подготовки технической документации, и т. д. Однако до недавнего времени персональный компьютер играл хотя и важную, но все же вспомогательную роль на любительской радиостанции. Так было до появления software defined radio (SDR) – системы радиосвязи, в которой программное обеспечение используется как для модуляции, так и для демодуляции радиосигналов. SDR меняет приоритеты, и персональный компьютер становится ядром любительской радиостанции.

2. Побуждающих причин перехода к цифровой обработке несколько, и одна из важнейших – желание

в рамках одной аппаратной платформы создать набор устройств, получаемых изменением встроенного программного обеспечения. Но проблем здесь немало, поскольку современные системы передачи данных работают в диапазонах свыше 1 ГГц, с частотными полосами от единиц до десятков мегагерц, используя достаточно сложные схемы модуляции. Все это предъявляет особые требования к производительности систем цифровой обработки. Проблема быстрой перенастройки средств связи и их взаимодействия привела к тому, что многие ведущие мировые бренды (фирмы-производители) телекоммуникационного оборудования стали создавать специальные устройства, позволяющие очень быстро перестраивать не только алгоритмы аутентификации и криптозащиты, но и протоколы работы в радиосети, включая выбор частотных диапазонов.

3. Основным форматом вещания радиосигнала в начале 80-х гг. прошлого века была амплитудная модуляция (АМ). Качество принятого сигнала было невысоким из-за затухания в канале, искажений и шумов. Частично эти эффекты удалось устранить с переходом на частотную модуляцию. В дальнейшем, в начале 2000-х гг., ведущие компании в области наземного вещания также стали осваивать технологию цифрового радио, и этому способствовали две причины. Во-первых, они понимали, что эра аналогового радио подходит к концу, весь мир переходит на более качественное цифровое вещание. Во-вторых, частотный спектр становится дефицитным, а цифровые методы обработки позволяют сжать данные, разместив больше информации на отведенной полосе. Цифровой способ вещания обеспечивает более чистый сигнал, большую зону покрытия, возможность упаковки большего объема информации на выделенной полосе. Кроме того, пользователи получают больше возможностей для доступа к прослушиванию программ. С развитием цифровых

технологий все большее внимание уделяется построению радиоприемных трактов с применением цифровой обработки сигналов (ЦОС), называемых в литературе SDR – software defined radio. В зависимости от частоты и ширины спектра принимаемого сигнала цифровая обработка в приемнике может использоваться как по радиочастоте (рис. 56), так и после переноса сигнала на фиксированную промежуточную частоту – обработка по ПЧ (рис. 57).

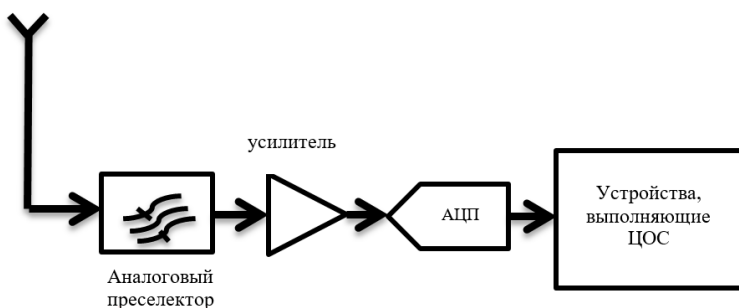


Рис. 56. Структурная схема приёмника с ЦОС по радиочастоте

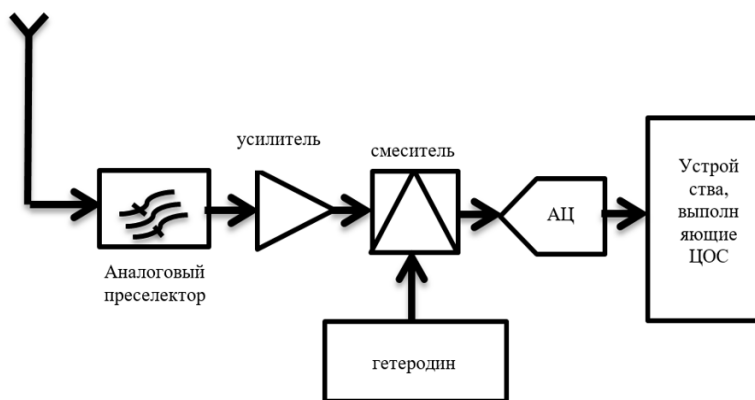


Рис. 57. Структурная схема приёмника с ЦОС по промежуточной частоте

Радиоприемники с цифровой обработкой сигнала по ПЧ относятся к супергетеродинному типу и имеют ряд преимуществ перед приемниками прямого преобразования – возможность работы в большом диапазоне частот, хорошую селективность и чувствительность во всём диапазоне. Приемники такого типа используются в профессиональной связной аппаратуре, к которой предъявляются жесткие технические требования. В числе недостатков супергетеродинных приемников – относительно высокое энергопотребление и большие размеры из-за использования аналоговых элементов.

К преимуществам приемников прямого преобразования относятся малое энергопотребление и возможность размещения всех элементов в небольшом портативном устройстве (в идеале – в корпусе одной микросхемы), однако по избирательности, чувствительности и динамическому диапазону эти устройства уступают супергетеродинным приемникам.

Цифровые устройства в радиоприемнике решают следующие задачи: выделение требуемого канала, перенос спектра сигнала на низкую частоту и декодирование содержащихся в сигнале данных или детектирование. Для решения этих задач могут применяться различные устройства и их сочетания. Первичную, неинтеллектуальную обработку, включающую канальную фильтрацию, гетеродинирование, понижение частоты дискретизации (децимацию), чаще всего выполняют либо при помощи быстродействующей программируемой логики (FPGA), либо в специализированных микросхемах – цифровых приемниках (digital down converter – DDC).

В идеализированной схеме SDR-систем отсутствуют блоки аналоговой обработки (рис. 58). Однако, учитывая частотные диапазоны и ширину полос многих современных систем связи, полностью реализовать эту концепцию затруднительно.

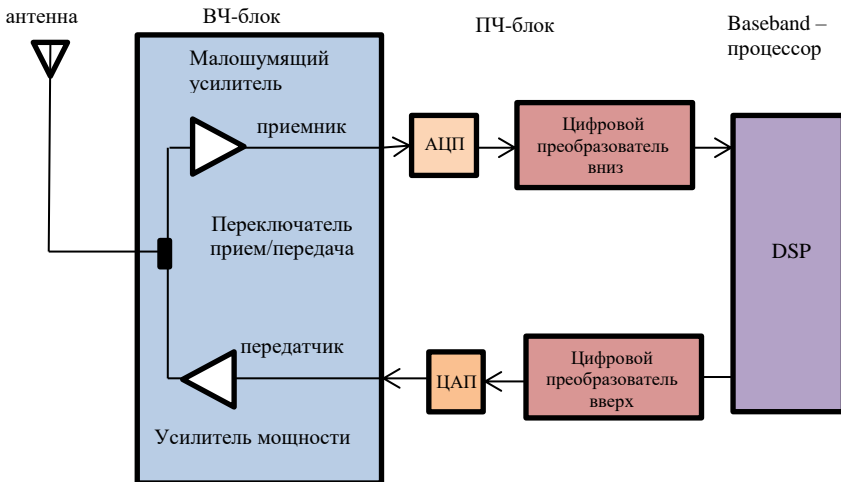


Рис. 58. Идеализированная схема SDR-системы

4. В традиционном супергетеродинном приёмнике обработка сигнала полностью производится электронными схемами (рис. 59). Частота сигнала понижается до промежуточной частоты (ПЧ), после чего производится обработка.

В первых SDR-приёмниках вместо демодулятора использовался АЦП. Демодуляция и частично фильтрация сигнала производилась в сигнальном процессоре. Современные АЦП намного быстрее, поэтому DSP может выполнять больше функций. Для работы DSP необходимо знать амплитуду и фазу сигналов.

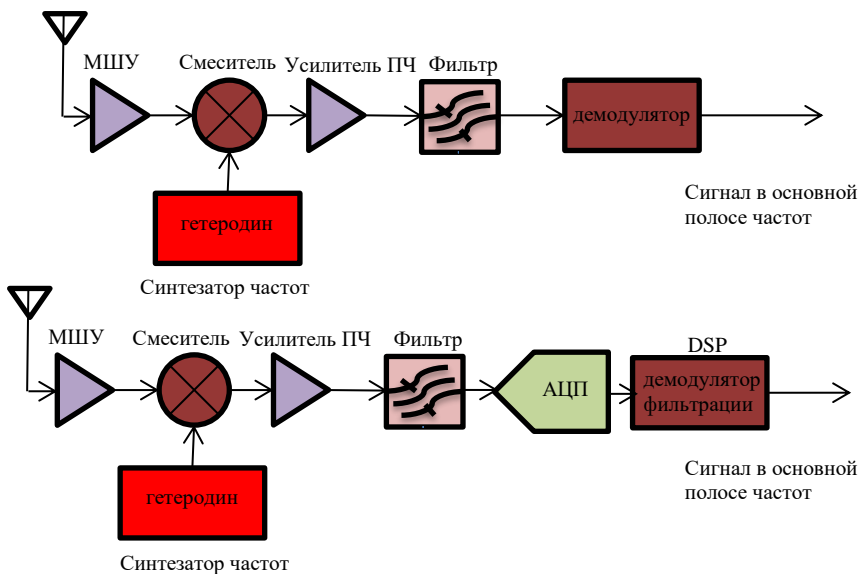


Рис. 59. Структурная схема супергетеродинного приёмника и первых SDR

Схема современного SDR-приёмника показана на рис. 60. Входной сигнал усиливается малошумящим усилителем и делится на компоненты I и Q путём смешивания с сигналом гетеродина из синтезатора частот в ФАПЧ (для получения квадратурной компоненты он смещается на 90°). Частота гетеродина подстраивается под частоту сигнала, чтобы разность выходных сигналов смесителей была равна нулю в отсутствие модуляции. Для модулированного сигнала она равна сигналу основной полосы или исходному модулированному сигналу. Эта архитектура получила название «прямое преобразование» или «преобразование с нулевой промежуточной частотой».

После фильтрации сигналов основной полосы в ФНЧ они оцифровываются в паре АЦП. Далее в цифровом

преобразователе частота сигнала понижается до рабочего диапазона сигнального процессора.

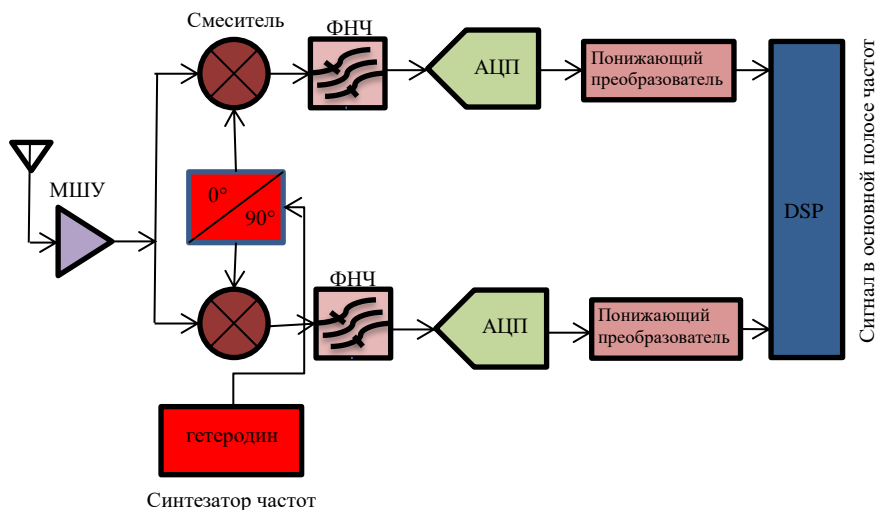


Рис. 60. Схема современного SDR-приёмника

В современных передатчиках DSP-модулятор разделяет передаваемые на I и Q компоненты и передаёт их на повышающий преобразователь (рис. 61) и ЦАП. Сигнал фильтруется и поступает в смеситель для повышения частоты до частоты передачи. Затем сигнал проходит через усилитель и подаётся на антенну. По мере увеличения быстродействия преобразователей схема упрощается. Самые последние модели представляют собой фильтр и МШУ (рис. 62). Коммерческие приёмники используют полосу до 30 МГц. Цифровым методом выполняются следующие функции: фильтрация (НЧ, ВЧ, полосовые и заграждающие фильтры), модуляция (AM, FM, QAM, OFDM, др.), демодуляция, выравнивание, сжатие и восстановление, анализ спектра, предсказание.

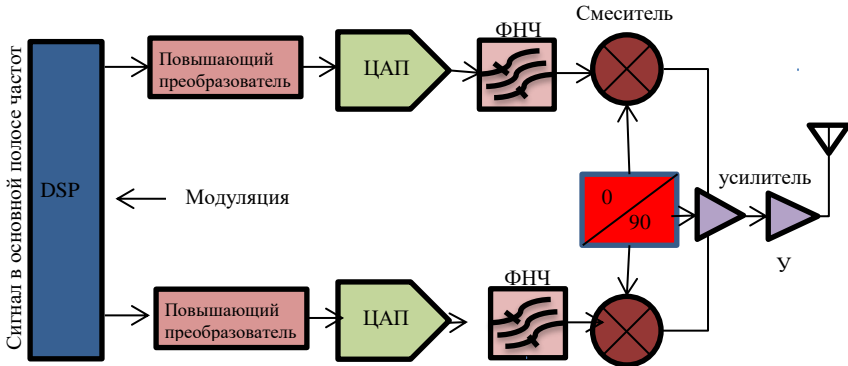


Рис. 61. Схема современного SDR-передатчика

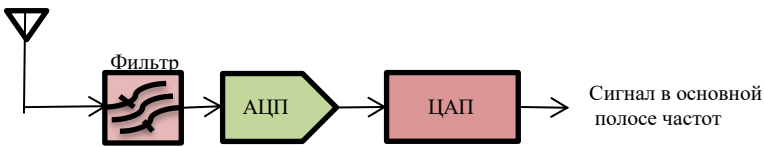


Рис. 62. Схема простой аппаратной реализации SDR

Новые типы модуляции и связанные с ними процедуры имеют общий термин «форма сигнала» (waveform). Изменив программное обеспечение, радио перестраивается на другую частоту и протокол передачи. Достоинство SDR заключается в простоте аппаратной части. Стандартные радиочастотные схемы сокращаются до минимума, их стоимость снижается.

Сигнальный процессор берёт на себя большую часть функций, которые раньше выполнялись в аналоговых схемах. Этот подход очень удачен, учитывая гибкость программной реализации и возможность компенсации некоторых нежелательных эффектов, которые возникают в аппаратной части. Более того, программная реализация позволяет устранять непрерывности, изменять и дополнять функционал

устройства и улучшать его характеристики с минимальными затратами. В частности, SDR позволяет быстро добавлять новые типы модуляции, протоколы передачи и т. д. В случае аппаратной реализации это потребовало бы изготовление новой схемы.

Недостатки у SDR тоже есть. Во-первых, это сложность программного обеспечения, затраты на разработку, в том числе временные, большее энергопотребление и в некоторых случаях ограниченный частотный диапазон.

Основные элементы SDR – АЦП, ЦАП и сигнальные процессоры DSP. Частота выборки преобразователя постоянно повышается, преодолев уже гигагерцевый рубеж. Например, преобразователь ADC12Dxx00RF Texas Instruments имеет частоту выборки до 3,6 млрд выб/с. Наряду со скоростью преобразования важным фактором является быстродействие процессора, который должен успевать обрабатывать данные. По большому счету вместо сигнального процессора можно использовать процессор общего назначения. Однако не всегда его использование будет оптимально, поскольку встречаются алгоритмы, для реализации которых требуются специализированные функции. Другой подход – использовать заказной сигнальный процессор, имеющий специальную архитектуру, встроенную память и набор арифметико-логических инструкций, благодаря которым его быстродействие будет максимально высоким.

Все чаще DSP реализуются на матрицах FPGA. Такие функции, как быстрое преобразование Фурье, могут быть выполнены с помощью цифровых логических схем и легко реализованы на FPGA. Поскольку стоимость матрицы постоянно снижается, они приобретают все большую привлекательность в качестве замены сигнальным процессорам. Еще один вариант – логические элементы с жесткими соединениями, которые можно использовать для реализации функций, не требующих гибкости

программирования, таких как протоколы связи. Логические схемы имеют высокое быстродействие и малое потребление, занимают немного места на кристалле. Такие логические блоки часто называют аппаратными ускорителями.

Основная мысль SDR-системы – это максимальный перенос операций в цифровую форму. В идеале АЦП должен стоять непосредственно после приемной антенны. Во многом именно по этой причине развитие SDR задерживалось (хотя стоит признать, военные начали использовать данную архитектуру достаточно давно).

Характеристики АЦП во многом будут обеспечивать возможности применения всего SDR-приемника. Цифровую обработку сигнала можно производить посредством цифрового сигнального процессора (ЦСП), программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) или микросхемы ASIC, которые представляют собой микросхему, заточенную под определенную цель. Наибольшую гибкость системе предоставляют ЦСП, а наибольшую производительность – ASIC. Характеристики ПЛИС и по гибкости, и по производительности находятся примерно посередине, но микросхемы ASIC финансово невыгодно использовать. Разработка устройства будет происходить слева-направо, от антенны, поэтому выбирать ПЛИС стоит тогда, когда знаете, что получите на выходе АЦП. Теперь, когда мы имеем общее представление о SDR-системе, можно представить, какие преимущества они нам дают по сравнению с традиционными системами:

- уменьшение массы, габаритов изделия и потребляемой мощности;
- упрощение конструкции;
- уменьшение стоимости (при учете использования недорогих АЦП, стоит отметить, что в целом АЦП становятся лучше и дешевле);
- масштабируемость решения.

5. Универсальная программируемая радиопериферия (USRP) – это открытая аппаратура, разработанная Мэттом Эттасом, которую можно заказать через его компанию Ettus Research. Это передатчик, который может быть подключен к компьютеру и приспособлен к определённым частотам за счёт дополнения платами расширения. USRP содержит программируемый FPGA (ПЛИС), который может быть использован для выполнения некоторых видов обработки сигналов. В стандартной конфигурации USRP создаёт 16-битные I и Q сэмплы при приёме заданной частоты. Эти комплексные сэмплы с реальной частью (Q) описывают косинус сигнала, а мнимая часть (I) описывает синус сигнала плюс 90 градусов. Таким образом, один сэмпл занимает 32 бита и может быть послан на хост-компьютер через коммуникационный порт для дальнейшей обработки.

На данный момент существует два типа оборудования: USRP и USRP2. USRP (или USRP1) может принимать сигналы в диапазоне шириной 32 MHz и передавать в диапазоне шириной 64 MHz. Он передаёт сэмплы на хост-компьютер через соединение USB2.0, которое имеет практически максимальную пропускную способность 32 Мб/с. USRP2 может принимать на диапазоне шириной 50MHz и передавать на диапазоне шириной 200MHz. В сравнении с USRP1, USRP2 также содержит более быструю FPGA (ПЛИС) и гигабитный ethernet вместо USB-соединения.

USRP2 (рис. 63) содержит внутренний генератор частоты 64 MHz (кристаллический clock-осциллятор), в то время как большинство GSM-телефонов имеет символьный clock-генератор со значительно большей степенью точности. Разумеется, 64 MHz сэмплы могут быть пересэмплированы на 13 MHz, однако это внесёт дополнительные вычислительные затраты. При этом USRP-осцилляторы значительно менее аккуратны и могут показывать значительный дрейф по отношению к системным часам GSM, что приводит к плохим результатам приёма. Использование более точных внешних

часов позволяет получить импульсы (составные) 13 МГц, которые решают эту проблему.



Рис. 63. Внешний вид USRP2 [1]

Выделим наиболее популярные области применения USRP:

- имитация радиointерфейсов;
- создание системы локального позиционирования;
- эмулятор базовой станции (OpenBTS) системы GSM;
- радиолокационные приложения;
- системы контроля за использование спектра;
- пеленгация;
- спуфинг;
- приёмопередатчик на основе SDR;
- разработка новых алгоритмов связи и передачи данных;
- проектирование беспроводных стандартов связи;
- исследовательские и образовательные комплексы радиосвязи;
- когерентные многоканальные приёмо-передающие системы;
- цифровая обработка и формирование ВЧ сигналов в реальном времени;
- перехват сигналов GSM с использованием GNU Radio.

Рассмотрим следующую из наиболее популярных SDR радиосистем – HackRF One от Ggreat Scott Gadgets (рис. 64).

Это программно-определяемое радио, способное передавать или принимать радиосигналы на частотах от 1 МГц до 6 ГГц. Созданная для тестирования и разработки современных и будущих (next-gen) радио-технологий, HackRF One представляет собой открытую аппаратную платформу, которая может быть использована как USB периферийное устройство или же запрограммирована на автономную работу. HackRF One – это оборудование для тестирования радиочастотных систем.



Рис. 64. Внешний вид HackRF One [2]

Особенности данного оборудования можно выделить следующие: частота дискретизации до 20 миллионов сэмплов в секунду (20 МГц), 8 бит квадратурное сэмплирование (8 бит на синфазную часть и 8 бит на квадратурную часть), программно-управляемый полосовой фильтр на прием и передачу, программно-контролируемое питание антенного порта (до 50 мА при 3,3 В).

Большой популярностью также пользуется коммерческая платформа программно-определяемого радио RTL-SDR на базе двух чипов – контроллера Realtek RTL2832U и тюнера R820T2. Чипсет RTL2832U – это микросхема, содержащая два 8-битных АЦП с частотой дискретизации до 3,2 МГц, принимающей на входе I- и Q-поток, которые должны быть получены другой микросхемой

R820T2, реализующей радиочастотную часть SDR: усилитель антенны, перестраиваемый фильтр и квадратурный демодулятор с синтезатором частоты. Платформа работает в диапазоне частот 24–1750 МГц, обрабатывает широкий спектр различных видов модуляции (AM, FM, NFM, LSB, USB, CW, ADS-B, D-STAR, AIS и др.); панорамный обзор сигналов возможен в полосе от 250 кГц до 3 МГц. Чувствительность приемника достигает значения 3 мкВ (на 438 МГц в режиме NFM), задержка принимаемого сигнала 340 мс, динамический диапазон 50 дБ (в режиме CW), входное сопротивление 50 Ом. Первичную обработку сигнала в устройстве выполняет 8-битный АЦП, в дальнейшем после обработки сигнала цифровым сигнальным процессором (DSP) данные поступают в программное обеспечение через интерфейс USB 2.0 для визуального представления результатов. Предложенная реализация платформы программно-определяемого радио разработана фирмой Foxwey (рис. 65).



Рис. 65. Внешний вид коммерческой платформы RTL-SDR фирмы Foxwey [2]

6. SDR Sharp – популярное программное обеспечение для анализа и декодирования принимаемых радиосигналов от подключенного SDR-оборудования, работающее под операционной системой Windows 7. Свободная лицензия программы и открытость её исходного кода позволяет

работать ей с достаточно большим количеством SDR радиосистем – от профессиональных до любительских (HackRF One, RTL-SDR и др.). Важной особенностью и одновременно преимуществом вышеописанного ПО является его модульность, т. е. расширение функционала программы с помощью подключаемых сторонних дополнений, так называемых «плагинов».

Достоинством SDR Sharp является достаточно простой интерфейс управления программой; практически все настройки функционала ПО выведены в левой части программы, и, как уже отмечалось выше, возможно увеличение программных возможностей при работе с SDR аппаратурой.

Разберем подробнее управление программой и изучим все ее настройки, необходимые для качественного приема радиосигналов в широком диапазоне частот и выполнения различных операций по его обработке.

На рис. 66 изображено основное окно программы, в котором осуществляется панорамный анализ принимаемого радиосигнала. Вверху по центру видим панель перестройки частоты, слева от нее – уровень усиления звука, кнопка настроек драйвера, определенного SDR устройства, запуск работы SDR тюнера и самая левая – кнопка скрытия панели настройки оборудования в процессе работы с ним. Снизу слева от вышеописанных кнопок расположена панель выбора необходимого устройства как источника радиосигнала, а следовательно, и автоматического подключения программного драйвера, который при запуске непосредственной работы синхронизируется с SDR тюнером через модифицированный системный драйвер.

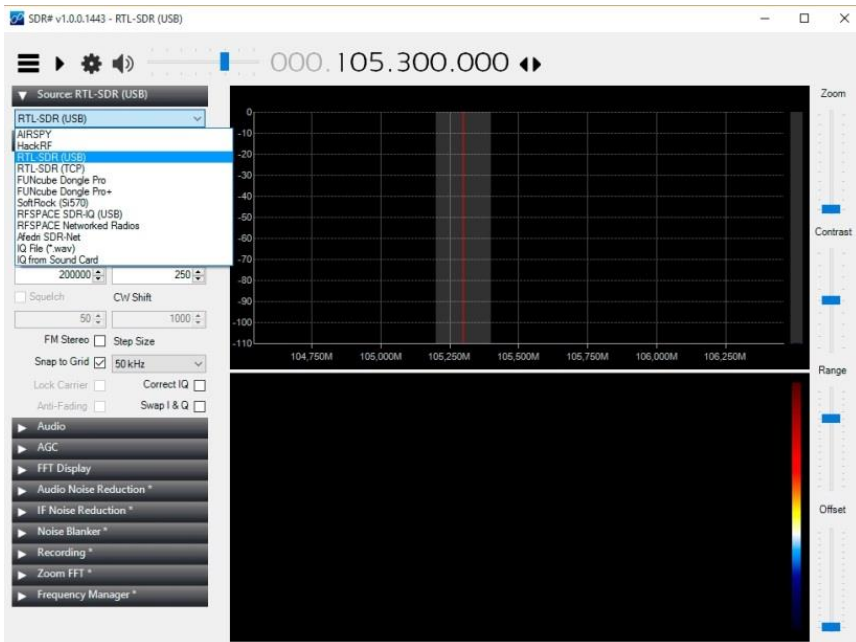


Рис. 66. Главное окно программы SDR Sharp

Справа от панели настроек SDR тюнера в процессе приема и обработки радиосигнала расположены окна анализатора спектра (верхнее) и визуального представления сигнала в виде «водопада» (нижнее). В процессе работы программы видим вышеописанные визуальные представления радиосигнала, изображенные на рис. 67.

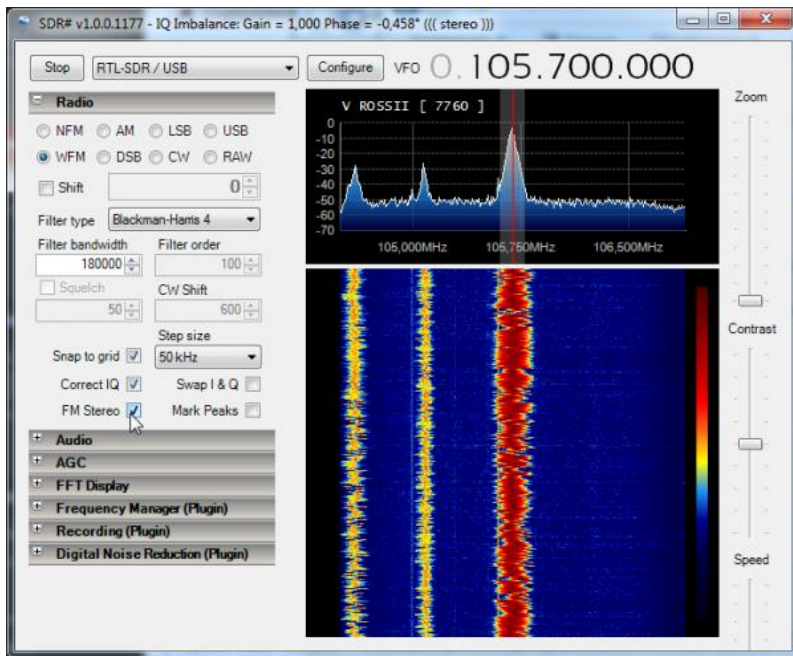


Рис. 67. Работа программы SDR Sharp

Теперь подробно разберем каждый элемент настроек и управления программой. Начнем с элементов настройки программного драйвера на примере RTL-SDR R820T:

- [Device] – в этой строке ваше RTL устройство и чип тюнера;

- [Sample Rate] – (частота дискретизации) – ширина полосы приемника, 2048 MSPS – это 2,048 МГц. Полосу можно менять от 0,25 МГц до 3,2 МГц. Чем больше полоса, тем больше нагрузка на процессор. Не на каждом компьютере можно нормально работать с максимальной полосой. Для начала поставьте 1024 для одноядерных процессоров и 2048 для многоядерных. Потом экспериментальным путем определите максимум для вашей системы;

– [Sampling Mode] – режим работы RTL устройства. Для работы необходим режим квадратурного приема. Он установлен по умолчанию. Есть ещё режимы оцифровки I-канала или Q-канала. Это специфические режимы, и в обычных условиях надобности в них нет;

– [Offset Tuning] – это полезная опция для владельцев тюнера E4000. Переключает режим работы входа RTL с нулевой частоты на промежуточную ненулевую. Установка этой галочки позволяет полностью избавиться от палки посередине экрана. Для 820 тюнеров эта опция безразлична и игнорируется в коде драйвера;

– [RTL AGC] – автоматическая регулировка усиления на участке «Смеситель тюнера – АЦП RTL2832». Установите эту галочку при первом запуске;

– [Tuner AGC] – автоматическая регулировка усиления на участке «Вход приемника – МШУ – Смеситель». Данная АРУ работает не очень хорошо, многое зависит от антенны, условий приема и диапазона, который вы принимаете. Лучше пока оставить эту галку выключенной;

– [RFGain] – ручная регулировка усиления тюнера. Позволяет самостоятельно менять усиление входного тракта тюнера при отключенной [Tuner AGC]. Для первого запуска поставьте этот регулятор 25–36 дБ;

– [Frequency correction PPM] – коррекция частоты опорного генератора тюнера. Не меняйте настройку в этом поле, если RTL-SDR работает корректно.

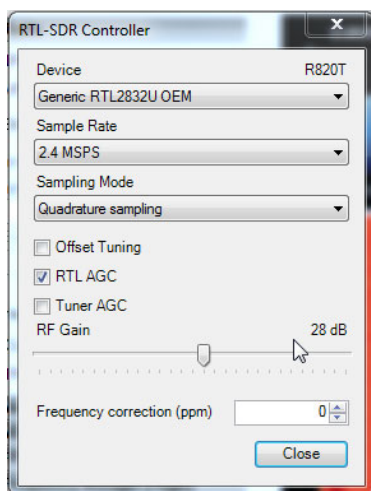


Рис. 68. Окно настроек драйвера RTL-SDR R820T

Теперь программа настроена на работу с вашим SDR устройством. Нажимаем кнопку [PLAY].

Настройтесь на какую-либо вещательную FM станцию. Во вкладке Radio включите вид модуляции WFM. Установите галку Correct IQ во вкладке Radio. Это улучшит подавление зеркального канала и уберет палку в центре спектра. Установите галку Filter Audio во вкладке Audio. Звук станет приятнее, уйдут высокочастотный шум и треск. Отрегулируйте ползунок Range во вкладке FFT Display. Динамический диапазон RTL-SDR невелик. Минимума анализатора спектра в -70 дБ вполне достаточно.

Галку Snap to Grid лучше пока убрать. Для начала надо откалибровать частоту приемника. В дальнейшем на практике разберетесь, с какими настройками у вас будет оптимальный результат, для первого раза такие подойдут в большинстве случаев. Если звук прерывается, возможно, вы выбрали слишком широкую полосу приемника и ваш процессор не справляется. Нажмите кнопку [Configure] и попробуйте разные настройки AGC и RF Gain.

Далее разберемся с элементами настройки и управления непосредственно самого SDR:

– [VFO] – отображение частоты приёма. Мышкой, курсорными клавишами или цифровыми клавишами можно менять частоту приёма непосредственно в этом поле;

– ползунок [Zoom] – изменение масштаба отображения анализатора спектра и водопада;

– ползунок [Contrast] – смещение палитры водопада;

– ползунок [Speed] – изменение частоты обновления водопада и анализатора спектра.

▪ **Вкладка Radio:**

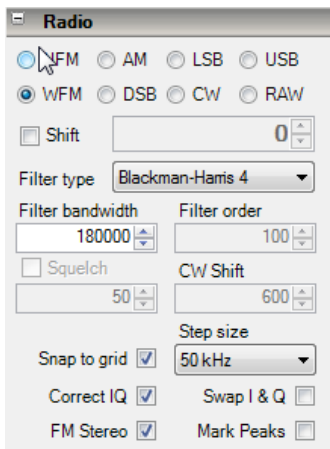


Рис. 69. Вкладка Radio

– [NFM AM LSB USB WFM DSB CW RAW] – переключение видов модуляции принимаемого сигнала. RAW – прием без демодуляции сигнала;

– [Shift] – смещение индикации частоты приема. Галочка включает, а цифровое поле задаёт смещение. Используется в основном с конвертерами для индикации точной частоты приёма;

- [Filter type] – выбор оконного фильтра. Относится к теории цифровой обработки сигналов. Практической пользы от смены фильтров не заметно;
- [Filter bandwidth] – полоса фильтра принимаемого сигнала;
- [Filter order] – добротность фильтра. Влияет практически на все фильтры в программе, пропускающие принимаемый сигнал;
- [Squelch] – шумоподаватель. Галочка включает, цифровое поле – настройка чувствительности;
- [Snap to grid] – привязка изменения частоты к сетке с шагом, указанным в цифровом поле [Step size];
- [Correct IQ] – автокоррекция дисбаланса фазы и уровня IQ сигнала. Очень полезная функция. Улучшает подавление зеркального канала и убирает палку в середине спектра на 0 частоте (видно на первом рисунке);
- [Swap I & Q] – меняет местами I и Q составляющие сигнала. Для RTL устройств функция не используется, у них всё на своих местах;
- [FM stereo] – разрешает стереодекодер для WFM приема;
- [Marks Peak] – Маркировать пики сигнала. На спектре рисует много кружков в пиках сигналов.

▪ **Вкладка Audio:**

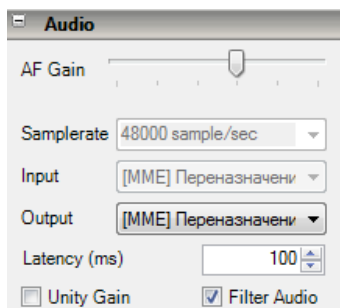


Рис. 70. Вкладка Audio

- [AF Gain] – громкость;
- [Samplerate] – частота дискретизации звукового потока на выходе;
- [Input] – выбор звукового входа;
- [Output] – выбор устройства для воспроизведения звука;
- [Latency] – размер буфера накопления сигнала в миллисекундах;
- [Filter audio] – включение звукового фильтра на выходе. Фильтр не настраиваемый. Полоса пропускания для NFM и AM равна половине полосы, установленной в параметре [Filter Bandwidth]. Для WFM 20–20000 Гц.

▪ **Вкладка FFT Display:**

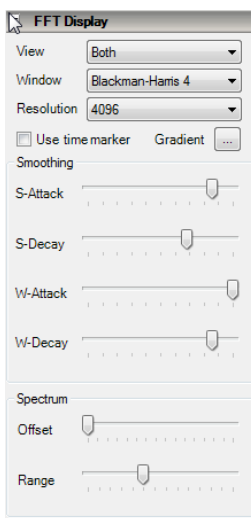


Рис. 71. Вкладка FFT Display

- [View] – выбор отображения анализатора спектра, водопада или обоих одновременно;
- [Window] – выбор оконной функции для анализатора и водопада. Оказывает некоторое влияние на отображение;

- [Resolution] – количество точек преобразования Фурье входного IQ сигнала. Чем больше точек, тем чётче картинка спектра и больше нагрузка на процессор;
- [Use time marker] – вывод на «водопад» информации о времени и дате;
- [Gradient ...] – настройка палитры водопада;
- [Smoothing] – набор регуляторов – в переводе на русский означает «сглаживание». Влияет на отображение спектра и водопада;
- [Offset] – смещение максимума анализатора спектра;
- [Range] – (диапазон) смещение минимума анализатора спектра. Очень полезный регулятор. Для RTL-тюнеров достаточно поставить $-70-80$ dB.

Программное обеспечение анализа и декодирования принимаемых радиосигналов SDR Sharp способно обрабатывать следующие виды модуляции:

- NFM – узкополосная частотная модуляция. С такой модуляцией, как правило, работает большинство УКВ трансиверов;
- WFM – широкополосная частотная модуляция. С ней обычно вещают FM-станции;
- AM – амплитудная модуляция. С таким видом модуляции слушаем авиadiaпазон;
- DSB – амплитудная модуляция с подавлением несущей;
- LSB/USB – модуляция с нижней/верхней боковой полосой;
- CW – телеграф;
- RAW – чистый сигнал без демодуляции.

GNU Radio – это бесплатный инструментарий для разработки программного обеспечения с открытым исходным кодом, который обеспечивает блоки обработки сигналов для реализации программных радиостанций, работает под управлением операционной системы Linux (Debian, Ubuntu, Kali и др.). Может использоваться с легкодоступным

недорогим внешним радиочастотным оборудованием для создания программных радиостанций или без аппаратного обеспечения в симуляционной среде. Он широко используется в исследовательских, отраслевых, академических, правительственных и хоббистских средах для поддержки как исследований в области беспроводной связи, так и реальных радиосистем. Программа выполняет всю обработку сигнала. Вы можете использовать его с целью создания приложений для приема и передачи данных с помощью радиооборудования или для создания полностью приложений на основе симуляции.

Комплекс ПО имеет фильтры, каналные коды, элементы синхронизации, эквалайзеры, демодуляторы, вокодеры, декодеры и многие другие типы блоков, которые обычно встречаются в системах обработки сигналов. Что еще более важно, он включает в себя метод подключения этих блоков, а затем управляет передачей данных из одного блока в другой. Расширение функциональных возможностей также довольно легко – если вы обнаружите определенный блок, который отсутствует, вы можете быстро его создать и добавить.

Приложения GNU Radio могут быть написаны на языке программирования C++ или Python. Это позволяет разработчику реализовывать в режиме реального времени высокопроизводительные радиосистемы в простой в использовании среде быстрого развертывания приложений.

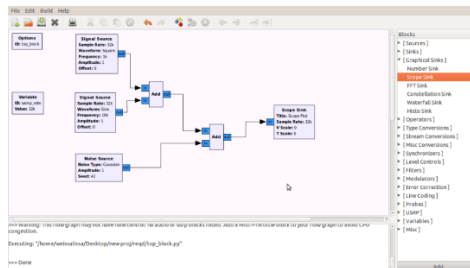


Рис. 72. Главное окно программы GNU Radio

7. Широкий спектр использования SDR радиосистем не исключает и возможности построения комплекса исследования стандарта системы сотовой подвижной радиосвязи GSM. Предложим разработанную нами методику мониторинга и оценки качества связи, а также покрытия абонента базовыми станциями ССПР GSM-900 в Российской Федерации популярными операторами (МТС, Мегафон, Билайн и Теле2). Процедура базируется на основе коммерческой платформы RTL-SDR. Рассмотрим используемое программное обеспечение для поставленной цели.

Сканер радиодиапазона RTL-SDR Scanner – это кросс-платформенный графический интерфейс сканирования частот, работающий под ОС Windows 7 и написанный на Python, который использует библиотеку OsmoSDR RTL-SDR. Программа позволяет оценить общую загруженность спектра (в данном случае диапазона ССПР GSM 900). Сканер пытается преодолеть частотный отклик путем усреднения сканирования от обоих положительных и отрицательных смещений частоты данных основной полосы (рис. 73).

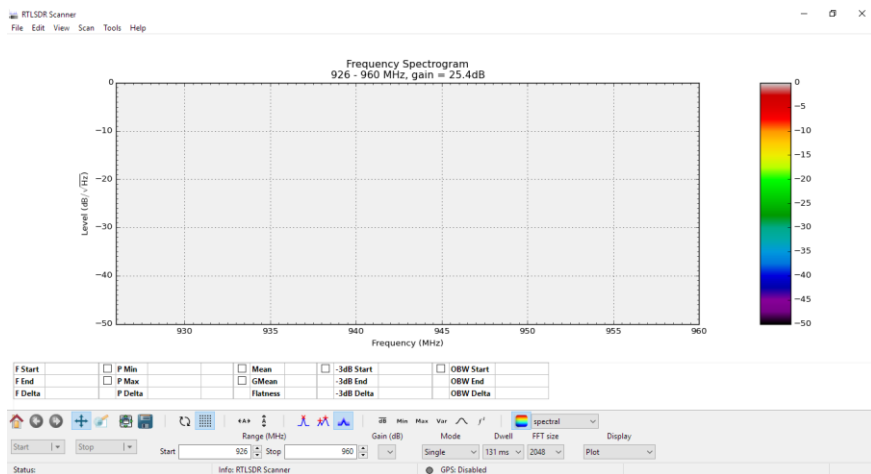


Рис. 73. Окно сканера RTL-SDR Scanner

Чтобы запустить сканирование, просто введите диапазон в нижней части окна и нажмите «Пуск» (Start), через некоторое время отобразится график сильных сигналов.

Dwell – контролирует, как долго выполняется выбор каждого шага, более длительное время приведет к усреднению сигнала.

Continuous update – обновляет отображение на каждом шаге. Предостережение следует использовать только с небольшим сканированием и низким временем выдержки, иначе оно станет отвечать на запросы.

Программа сканирует частоту, указанную для самого сильного сигнала, и затем вычисляет исправление ошибок ключа. Чтобы получить максимальную отдачу от этого, вам нужен непрерывный пик сигнала, который выделяется из фонового шума.

Разберем подробнее элементы главного окна сканера:

- Start – частота начала сканирования;
- Stop – частота остановки сканирования;
- Mode – синхронное или непрерывное сканирование;
- Dwell – время выборки, затраченное на каждый шаг;
- FFT Size – размер FFT, более высокие значения приводят к более высокой точности анализа (при более высоких размерах выдержки должны быть увеличены);
- Live update – обновление отображения на каждом шаге (осторожно, оно может быть медленным и непредсказуемым);
- Grid – отображение сетки при сканировании;
- Display – изменение типа графика.

Меню «File» представляет собой набор следующих пунктов:

- Open – открыть сохраненное сканирование;
- Save As – сохранить сканирование;
- Export – экспорт сканирования в файл CSV;
- Properties – информация о сканировании.

В меню Edit выделим пункт Preferences – данная функция позволяет установить усиление ключа, калибровку,

а также локальный генератор (положительное смещение для преобразователей с повышающим преобразователем) и диапазоны выборки.

Меню Scan состоит из пунктов:

– Start – запуск сканирования;

– Stop – остановка сканирования;

– Stop at End-Stop – остановить сканирование, когда текущая развертка завершена (только в непрерывном режиме).

Не менее важным является меню Tools на главном окне программы. Функции, которые оно предоставляет, следующие:

– Compare – сравнить два ранее сохраненных сканирования;

– Auto Calibration – выполняется грубая калибровка ключа до известного сигнала (это должен быть непрерывный, непоколебимый сигнал).

Анализатор ССПР GSM-900 и GSM-1800 RFDSP GSM Scanner – это программа сканирования, анализа и идентификации нисходящих каналов GSM, написанная на Qt. Сканер работает под ОС Windows не ниже 7 версии на базе цифрового тюнера RTL-SDR. Формирование сигнала в нисходящем канале предусматривает организацию передачи его от базовой станции к абоненту (рис. 74).

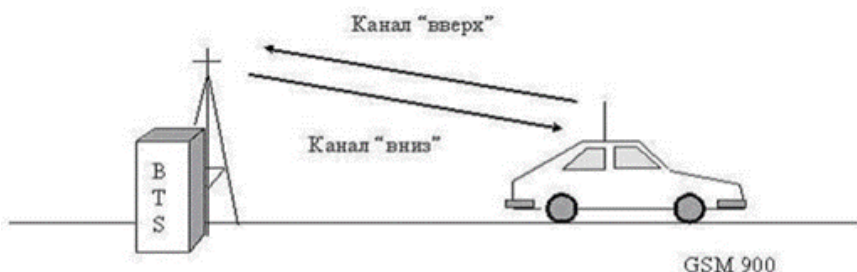


Рис. 74. Организация связи в ССПР GSM

Программа отображает информацию об уровне сигнала каждого канала, а также определяет его принадлежность

к перечню российских операторов сотовой связи (МТС, Билайн, Мегафон, Теле2, SkyLink и Yota). После завершения работы в программе имеется возможность сформировать итоговый отчет в виде технических (служебных) параметров каждой базовой станции для более детального анализа работы каждого источника. Информация, входящая в упомянутые отчетные данные, содержит следующие сведения:

- MCC (Mobile Country Code) – код, определяющий страну, в которой находится оператор мобильной связи. Например, для России он равен 250, США – 310, Венгрия – 216, Китай – 460, Украина – 255, Белоруссия – 257;

- MNC (Mobile Network Code) – код, присваиваемый оператору мобильной связи. Уникален для каждого оператора в конкретной стране;

- LAC (Location Area Code) – код локальной зоны. В двух словах LAC – это объединение некоторого количества базовых станций, которые обслуживаются одним контроллером базовых станций (BSC). Этот параметр может быть представлен как в десятичном, так и в шестнадцатеричном виде;

- CellID (CID) – «идентификатор соты» – тот самый сектор базовой станции. Этот параметр также может быть представлен в десятичном и шестнадцатеричном виде.

GSM сканер может быть использован для оценки уровня GSM сигнала, сравнения качества сигнала разных операторов, оценки радиопокрытия, при принятии решения об установке усилителей сигналов сотовой связи и регулировке их параметров, в образовательных целях и др. Основные характеристики сканера определяются параметрами используемой для анализа коммерческой платформы RTL-SDR. Безусловно, представленное ПО не является заменой нормального измерительного оборудования. Программа распространяется на основе лицензии свободного программного обеспечения и, как следствие, является полностью бесплатной и с открытым исходным кодом.

Текущая версия поддерживает диапазон GSM 900 и не поддерживает GSM 1800 в связи с тем, что рабочая частота RTL-SDR с тюнером R820T2 ограничена значением 1760 МГц.

Однако применение нового экспериментального драйвера для данного SDR-оборудования может позволить реализовать работу в диапазоне 1800 МГц. Рассмотрим более детально главное окно программы (рис. 75).

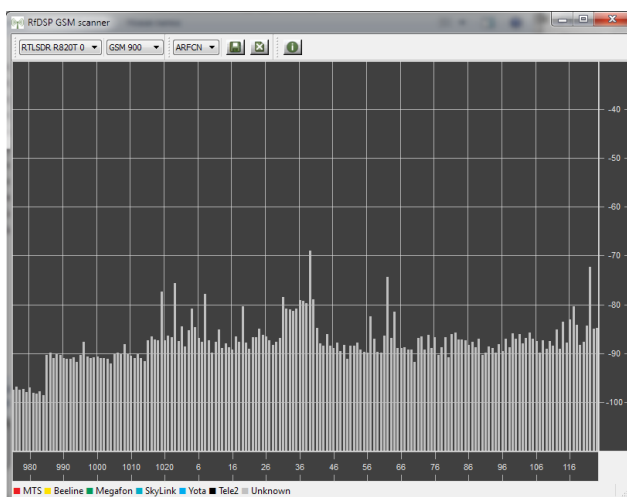


Рис. 75. Главное окно RFDSP GSM Scanner при запуске

Видим из представленного выше рисунка, что процесс анализа и идентификации радиосигнала ССПР GSM в нисходящем канале происходит непосредственно с момента запуска программы. Изначально наблюдаем смесь неизвестных сигналов.

По горизонтальной оси откладывается номер канала GSM в виде ARFCN или в МГц, по вертикальной – уровень сигнала в дБм. Высота линии – это уровень сигнала. Если идентификаторы БС были декодированы успешно и они

соответствуют идентификаторам основных операторов связи, линии окрашиваются в соответствующие цвета.

Выпадающие списки в верхней части экрана позволяют выбирать SDR-приемник, если их подключено несколько, а также диапазон работы GSM-900 или GSM-1800, единицы измерения по горизонтальной оси в ARFCN или МГц. Две кнопки позволяют сохранить отчет о работе сканера или же очистить результаты декодирования БС и получить информацию о программе.

В процессе работы программа сканирует рабочий диапазон частот с шагом 2,0 МГц (10 каналов GSM) и оцифровывает сигнал с частотой дискретизации 2,4 МГц. Процесс сканирования состоит из быстрого прохода всего диапазона для измерения мощности сигнала и медленного прохода для декодирования идентификаторов БС. Один шаг декодирования выполняется после прохода всего диапазона для измерения мощности. Таким образом, в диапазоне GSM 900, уровень сигнала обновляется приблизительно раз в 2 с, а полный проход декодирования занимает около 1 мин.

Флуктуации уровня сигнала в результате многолучевого распространения также снижают вероятность декодирования системной информации. По этим причинам, для получения идентификаторов БС необходимо чтобы сканер накапливал информацию в течение 5 мин. В процессе работы сканер добавляет системную информацию о новых декодированных каналах в общий массив информации по каналам. Но информация о декодированных ранее каналах не стирается при невозможности декодирования системной информации на данном шаге и остается в массиве. Для очистки этой информации служит кнопка очистки результатов декодирования БС.

По истечении некоторого времени (3-5 мин.) получаем результаты работы (рис. 76).

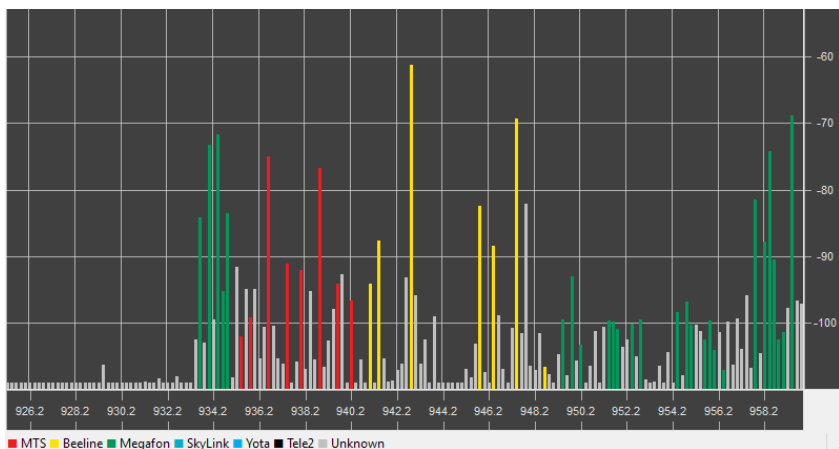


Рис. 76. Идентификация радиосигналов ССПР GSM в нисходящем канале

Следовательно, в результате проведения мониторинга диапазона ССПР GSM 900 в Левобережном районе города Воронежа удалось: идентифицировать принадлежность БС к сетям «Билайн», «МТС», «Мегафон», а также определить их рабочие частоты, оценить силу сигнала каждого из источников, общее количество базовых станций каждого оператора, обслуживающих определенную соту местонахождения абонентского терминала; не удалось идентифицировать (возможно, нет покрытия в точке наблюдения) принадлежность БС к SkyLink, Yota.

При нажатии на кнопку сохранения отчета накопленные результаты сохраняются в текстовый файл с названием, составленным из названия программы, даты и времени сохранения данных. Ниже для примера приведена часть файла отчета (рис. 77).

ARFCN	Mhz	dBm	MCC	MNC	LAC	CI	Type	BCCH
.....								
14	937.8	-96.1	250	1	435	15042	TCH only	20
15	938.0	-99.0	---	---	-----	-----		
16	938.2	-106.9	250	1	435	15042	TCH only	20
17	938.4	-97.6	---	---	-----	-----		
18	938.6	-109.0	250	1	435	1432	TCH only	1
19	938.8	-107.0	---	---	-----	-----		
20	939.0	-82.4	250	1	435	15042	BCCH+TCH	
21	939.2	-105.6	250	1	435	16062	TCH only	86

Рис. 77. Итоговый файл отчета идентификации радиосигналов ССПР GSM 900 в нисходящем канале

Таким образом, предложенная методика мониторинга и оценки качества связи ССПР GSM 900 позволяет достоверно исследовать загруженность диапазона GSM в регионе, проверить правильность установки базовой станции(-ий) исходя из условий местности обслуживаемой территории, не превышает ли излучение радиосигналов от БС допустимых норм при организации связи на определенной территории (соте). Качество предоставляемых услуг связи каждым из операторов оценивается количеством базовых станций, обслуживающих соту местонахождения абонентских терминалов пользователей, а также излучаемой ими силой сигнала.

Например, исходя из ранее представленных результатов мониторинга в Левобережном районе города Воронежа, можно сделать вывод, что лучшее покрытие для обеспечения качественной мобильной сотовой связи предоставляет оператор ПАО «Мегафон», где стоит отметить достаточно большое количество обслуживающих БС в соте местонахождения, а также сравнительно хороший уровень принимаемого сигнала (от -85 дБм до -69 дБм). Кроме этого,

важно сказать о весьма плотной загруженности используемого диапазона исследуемой системы сотовой связи.

8. SDR радиосистемы являются одним из наиболее популярных типов радиоэлектронного оборудования для исследования технических параметров различных видов радиосигналов. Технический анализ сигналов диапазона ССПР GSM 900 также не является исключением. Рассмотрим детально предложенную нами методику исследования радиосигналов ССПР GSM с помощью коммерческой платформы RTL-SDR.

С помощью пакета поддержки System Toolbox для RTL-SDR (рис. 78 и рис. 79) вы можете использовать MATLAB и Simulink для проектирования и прототипов систем, которые обрабатывают сигналы беспроводной сети в реальном времени. Например, вы можете получать и обрабатывать беспроводные сигналы, такие как FM-радио, сигналы наблюдения за самолетами (ADS-B) и др. Вы можете развернуть свою систему на недорогом одноплатном компьютере, таком как Raspberry Pi, к которому прилагается RTL-SDR. Инженеры-специалисты беспроводной связи, студенты и любители могут принимать и декодировать радиосигналы в режиме реального времени с использованием аппаратных средств Communication System Toolbox и RTL-SDR.



Рис. 78. Пакет для RTL-SDR System Toolbox в MATLAB (Simulink) [7]

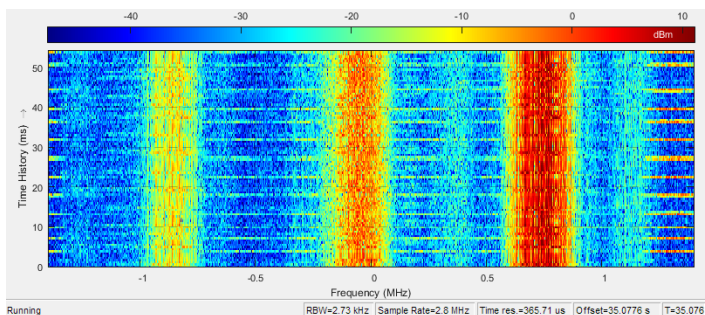


Рис. 79. Представление радиосигнала GSM в увеличенном масштабе в пакете для RTL-SDR System Toolbox в MATLAB (Simulink)

Данная программа также позволяет провести технический анализ GSM сигнала, но не настолько тонко, как это возможно в предыдущем ПО. Вторая программа выводит на экран спектр принимаемого радиосигнала, позволяет оценить ширину его спектра и прослушать в чистом (немодулированном) виде. Визуальное представление сигнала ССПР GSM представлено ниже (рис. 80).

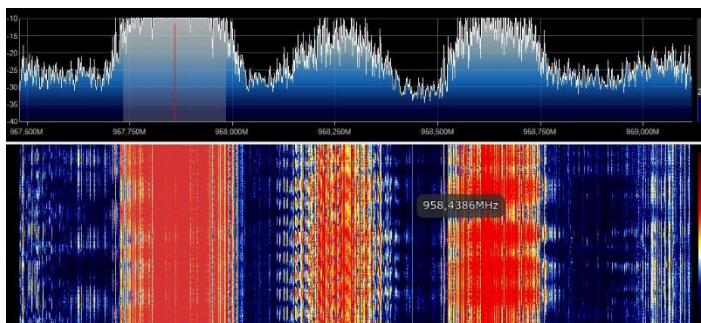


Рис. 80. Общий вид спектра сигнала ССПР GSM

Немаловажным моментом при исследовании любых радиосигналов является использование наиболее современной и детальной справочной базы. Выделим сравнительно новое, но в то же время и достаточно мощное справочное программное обеспечение анализа радиосигналов Artemis.

Оно вышло в свет в 2015 г. и уже завоевало популярность у большого количества как радиолюбителей, так и профессиональных специалистов в области телекоммуникаций и других сфер, связанных с радиоэлектроникой.

Artemis является своеобразной локальной базой данных очень широкого спектра радиосигналов, в том числе наиболее современных. Для удобства работы с вышеупомянутой базой сигналов была создана данная программа. Ранее база данных была доступна лишь при условии синхронизации программы с сервером в сети Интернет, теперь же с новыми версиями данного ПО появилась возможность локального использования БД в программе. Данное ПО находится в открытом доступе и распространяется на основе свободной лицензии. Программа является портативной и не требует установки.

Она обладает достаточно мощными возможностями предоставления подробной информации о каждом радиосигнале, является полезным помощником не только для радиолюбителей: позволяет сравнивать спектры реального времени (например, от SDR-спектрограммы) с найденными в базе данных путем сравнения свойств (таких как частота, пропускная способность, модуляция и т. д.) и проверять его через образец изображения. Различные фильтры позволяют сузить поиск, облегчая идентификацию неизвестных сигналов.

Каждый сигнал описывается скриншотом «водопада» (спектрограммы), аудиофайлом (кнопка Play), диапазоном частот, полосой, модуляцией, локацией, кратким описанием. Для просмотра страницы сигнала на сайте sigidwiki.com нажмите кнопку More Info. Во вкладке Filters можно задать обширные критерии поиска по различным параметрам.

На примере радиосигнала системы сотовой связи стандарта GSM рассмотрим на практике основные возможности ПО Artemis. При запуске исполняющего файла

Artemis.exe видим приветственное окно программы и ее загрузку (рис. 81).



Рис. 81. Приветственное окно Artemis при запуске

Программное обеспечение поддерживает только английскую локализацию, однако знания технического английского языка будет вполне достаточно для ее понимания и успешного взаимодействия при работе с программой. После завершения запуска видим рабочее окно программы (рис. 82). Сначала для подключения локальной базы данных к программе (каталог Data в папке с исполняемым файлом программы) нажимаем кнопку Load DB.

При наличии доступа к сети Интернет рекомендуется как можно чаще проверять обновления базы данных для ПО Artemis по нажатию кнопки Update → Check Updates. В данном случае версия базы данных является актуальной, а значит, обновление не требуется (рис. 83).

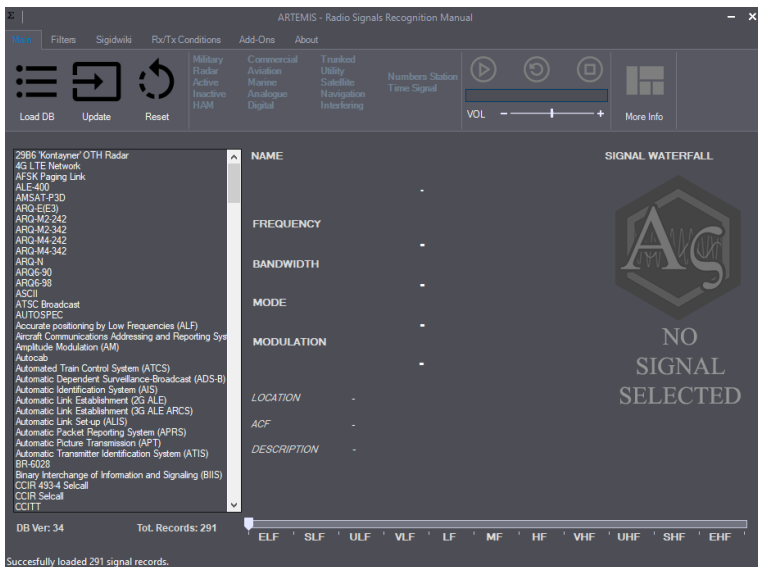


Рис. 82. Главное окно Artemis с загруженной базой данных радиосигналов

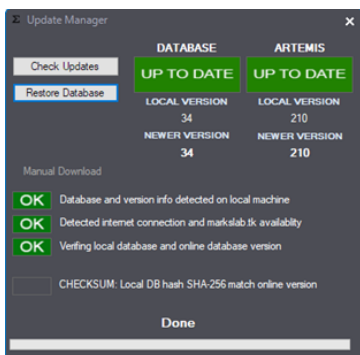


Рис. 83. Окно обновления базы данных радиосигналов для ПО Artemis

В каталоге радиосигналов найдем пункт Global System for Mobile Communication – это и есть эталон нашего сигнала стандарта системы сотовой связи GSM (рис. 84).

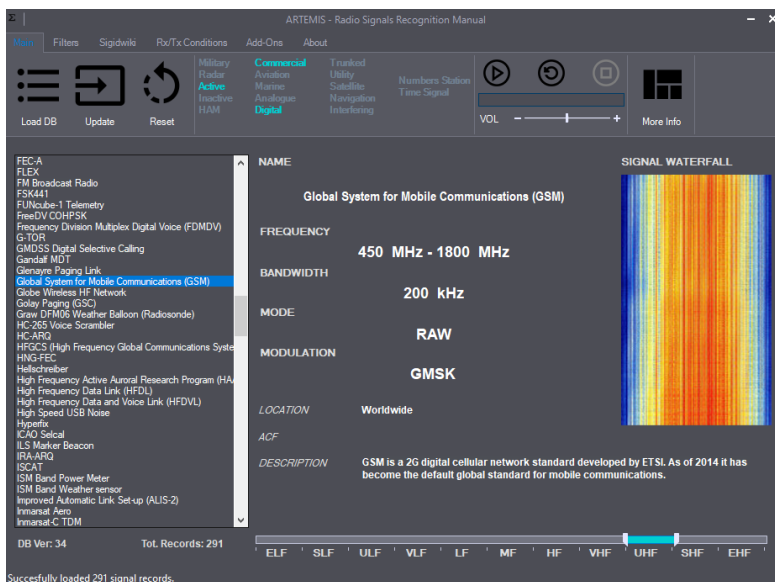


Рис. 84. Эталонные технические характеристики радиосигнала стандарта системы сотовой связи GSM

Видим, что на примере необходимого нам сигнала по каждому предоставляется информация о его спектре, международном названии, используемом частотном диапазоне, ширине спектра сигнала, используемом типе модуляции (манипуляции), регионе применения данного вида радиосигнала. Также выводится на экран краткая аннотация по сигналу: кем применяется, какими структурами, его вид (цифровой или аналоговый).

Таким образом, предложенная методика позволяет в полной мере провести тщательный технический анализ любого радиосигнала, в частности сигнала ССПР GSM. Имеется возможность визуально наблюдать его спектр,

а следовательно, и определять вид модуляции (манипуляции), цифровой это сигнал или же аналоговый, масштабировать спектр для более детального исследования сигнала, определять его ширину, центральную частоту, прослушивать радиосигнал в чистом виде (без модуляции), а также определять множество других параметров.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Что представляет собой программно-определяемая радиосистема в общих чертах?

2. Расскажите о причинах появления технологии SDR.

3. Что мешает достигнуть идеализированной схемы SDR-систем? Объясните подробно принцип работы программно-определяемой радиосистемы. Что является ее «сердцем»?

4. Расскажите об основных преимуществах и недостатках технологии SDR.

5. Что необходимо учитывать при разработке любой программно-определяемой радиосистемы? Как происходит процесс разработки SDR-системы?

6. Дайте сравнительную характеристику примеров SDR-систем, о которых Вы узнали. Можно ли с помощью коммерческой платформы RTL-SDR принять и декодировать сигнал GSM и сигнал DVB-T2? Если нет, то какие технические характеристики SDR-системы требуются для выполнения данных операций?

7. Расскажите о функциональных возможностях ПО SDR Sharp. В чем главная особенность данного программного обеспечения в плане функциональности?

8. Расскажите в общих чертах о возможностях ПО GNU Radio.

9. Как проводятся мониторинг и оценка качества связи, покрытия абонента базовыми станциями с помощью коммерческой платформы RTL-SDR?

10. Какую служебную информацию об обнаруженных базовых станциях можно извлечь из итогового отчета программы RF DSP GSM Scanner? Как Вы думаете, возможно ли определить местоположение каждой из них с помощью используемых сведений?

11. Как проводится исследование радиосигналов ССПР GSM с помощью коммерческой платформы RTL-SDR?

12. Какими техническими характеристиками обладает радиосигнал системы сотовой подвижной радиосвязи GSM?

3.4. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПРИНИМАЕМЫХ РАДИОСИГНАЛОВ СИСТЕМЫ СОТОВОЙ ПОДВИЖНОЙ РАДИОСВЯЗИ GSM

Изучим возможности технического анализа сигналов системы сотовой связи стандарта GSM с помощью прикладного математического пакета программ MathLab. При разработке предложенной методики вышеупомянутый процесс проводился в версии R2017a.

Обратите внимание на то, что разработчиком данного ПО, а в особенности специального встраиваемого дополнения для коммерческой платформы RTL-SDR и Simulink, рекомендуются следующие параметры: ОЗУ 4 Гб, операционная система Windows 10 сборки не ниже 1703, четырехъядерный процессор Intel/AMD с тактовой частотой не ниже 1,5 ГГц, 4-7 Гб свободного места на HDD/SSD накопителе, объем видеопамати графического адаптера 1 Гб.

Установить ПО MathLab R2017a на используемый для лабораторных исследований ПК и открыть исполняемый файл matlab.exe (ярлык программы) на рабочем столе вашей ОС

Windows либо по пути C:\Program Files\MATLAB\R2017a\bin, запустив его от имени администратора:

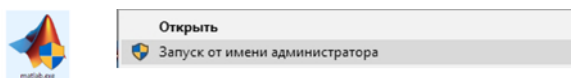


Рис. 85. Запуск программы от имени администратора MathLab R2017a

После запуска наблюдаем приветственное окно программы и основное рабочее окно:

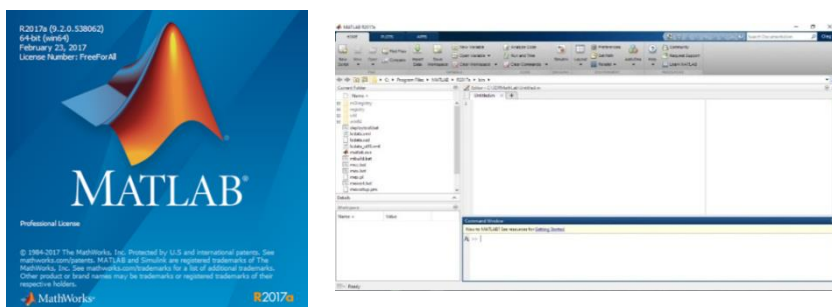


Рис. 86. Приветственное и главное окно программы MathLab R2017a

Приступим к установке в MathLab специального дополнения (плагина) для SDR-оборудования RTL-SDR R820T2. Данный плагин обеспечивает полноценную работу с нашим SDR-оборудованием в среде MathLab и Simulink, позволяя выполнять очень широкий спектр разнообразных операций с ним на основе построения программных структурных блок-схем, большинство отдельных частей из которых содержится в вышеописанном дополнении. Плагин дает возможность построения достаточно мощных программно-определяемых систем для технического анализа принимаемых радиосигналов, их демодуляции, декодирования и дальнейшего извлечения всевозможной информации.

Для начала загрузим требуемое дополнение с помощью встроенного в MathLab менеджера дополнений. Вызовем его, нажав кнопку Add-Ons → Get Add-Ons:

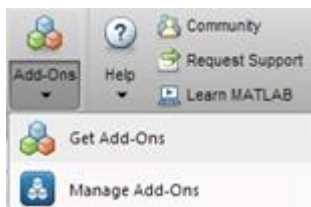


Рис. 87. Вход в онлайн каталог бесплатных дополнений (плагинов) для MathLab R2017a

После выполнения вышеописанных действий, программа соединится с сервером в сети Интернет для получения списка всех доступных для MathLab R2017a дополнений. Как видим, ассортимент достаточно разнообразен, представлены различные дополнения для широкого спектра операций и исследований:

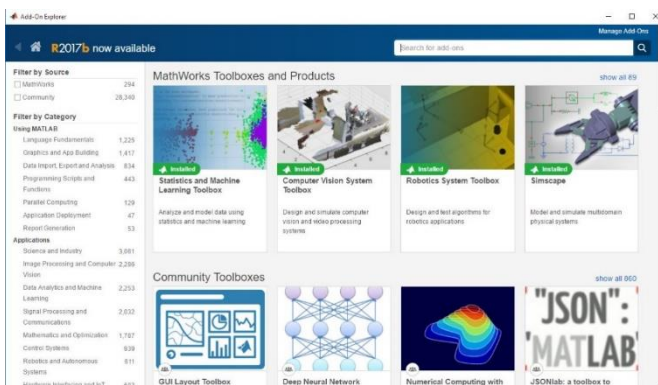


Рис. 88. Каталог бесплатных дополнений для MathLab R2017a

В строке поиска, расположенной в правом верхнем углу экрана, вводим ключевые слова RTL-SDR, впоследствии

получаем результат – найдено дополнение Communications System Toolbox Support Package for RTL-SDR Radio:

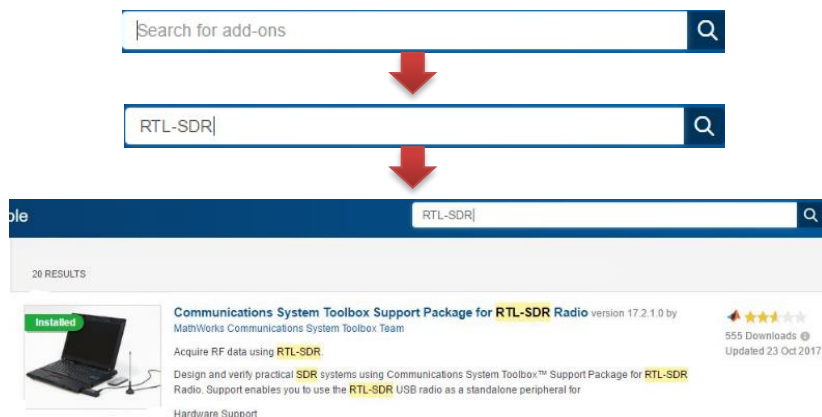


Рис. 89. Успешный результат поиска дополнения Communications System Toolbox Support Package for RTL-SDR Radio для MathLab R2017a

Нажимаем на кнопку Install, запуская процесс скачивания и дальнейшей установки требуемого плагина. Установка дополнения практически не отличается от стандартной установки любой программы в ОС Windows, но в процессе запрашивает дополнительную установку драйвера для RTL-SDR R820T2. Это тот же самый драйвер, который уже был установлен ранее, поэтому его установку можем смело пропускать. После завершения установки дополнения Communications System Toolbox Support Package for RTL-SDR Radio рекомендуется перезапустить ПО MathLab.

После перезапуска программы закрываем пустой файл скрипта:

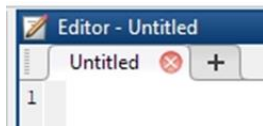


Рис. 90. Открытый пустой файл для написания скрипта в MathLab R2017a

Открывается окно консоли ввода команд для MathLab. В данном окне проверим правильность установки дополнения для тюнера RTL-SDR R820T2. Для этого в строку ввода «>>» введем команду `my_rtlsdr = sdrinfo`:

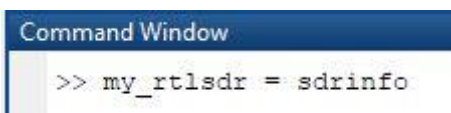


Рис. 91. Консоль ввода команд в MathLab R2017a

При правильной установке дополнения в программу, а также после успешного поиска в системе подключенного SDR-оборудования RTL-SDR R820T2 консоль MathLab выдаст результаты в виде некоторых параметров SDR-оборудования:

```
RadioName: 'Generic RTL2832U OEM'  
RadioAddress: '0'  
RadioIsOpen: 0  
TunerName: 'R820T'  
Manufacturer: 'Realtek'  
Product: 'RTL2838UHIDIR'  
GainValues: [29x1 double]  
RTLCrystalFrequency: 28800000  
TunerCrystalFrequency: 28800000  
SamplingMode: 'Quadrature'  
OffsetTuning: 'Disabled'
```

Рис. 92. Параметры подключенного оборудования RTL-SDR в MathLab R2017a

Теперь достоверно убедились, что установка дополнения и необходимого SDR-оборудования завершилась успешно, далее приступим к непосредственному процессу технического анализа принимаемого радиосигнала системы сотовой подвижной радиосвязи стандарта GSM. В ходе подготовительного этапа скопируем в каталог используемой программы C:\Program Files\MATLAB\R2017a\toolbox папку rtlcdr_book_library из каталога на CD диске LR-SRS/3_SDR_GSM_analys/MathLab-Simulink, а в корень системного диска (диск C:\) – папку «MathLab-Simulink» из каталога LR-SRS/3_SDR_GSM_analys.

Добавим библиотеку схем SDR в Simulink. Для этого в панели Home, справа нажимаем кнопку Set Path.

Выводится каталог всех «тулбоксов», подключенных к MathLab. Добавляем требуемую библиотеку по нажатию кнопки Add Folder, далее программа предложит выбрать каталог с необходимыми пользователю данными для установленного дополнения коммерческой платформы RTL-SDR – выбираем необходимый для работы каталог C:\ProgramFiles\MATLAB\R2017a\toolbox\rtlsdr_book_library и нажимаем кнопку ОК, после закрытия окна выбора установленная библиотека отобразится в общем списке. Нажимаем кнопку Save для сохранения и обновления списка библиотек, затем Close для закрытия окна.

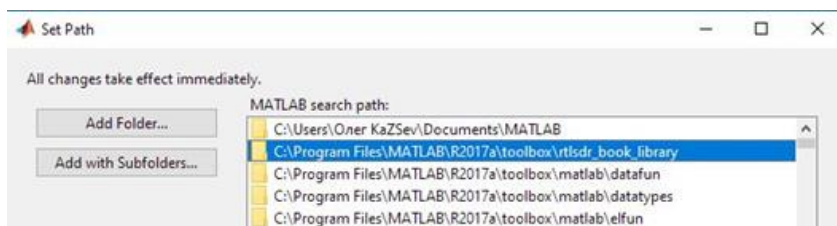


Рис. 93. Успешно установленная библиотека для дополнения к RTL-SDR в MathLab R2017a

В левом окне выбора каталога работы с файлами выбираем путь C:\MathLab-Simulink. При правильном выборе откроется папка с необходимыми схемами для Simulink:

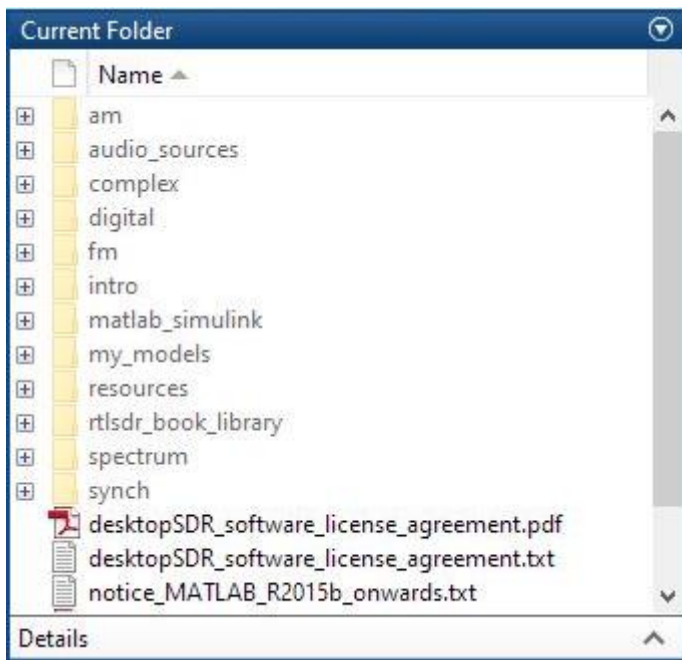


Рис. 94. Каталог необходимых данных и схем для Simulink

Подготовительная часть дальнейших работ в ПО MathLab завершена приступаем непосредственно к основной цели лабораторного задания. Переходим в папку intro и запускаем файл rtl_sdr_rx_startup_simulink.slx, кликая по нему правой кнопкой мыши и нажимая кнопку Open.

Через некоторое время (в зависимости от мощности аппаратной части ПК) появится окно блок-схемы анализа принимаемых радиосигналов, а также окна осциллограммы уровней сигналов и их спектрограммы в заданном диапазоне приема:

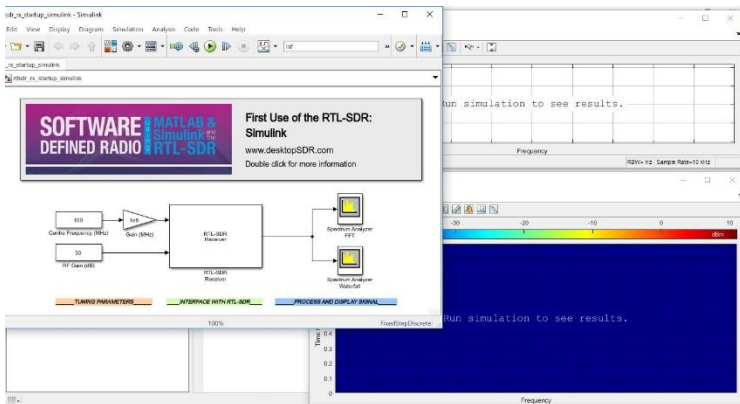


Рис. 95. Программно-определяемая радиосистема анализа радиосигналов для RTL-SDR в Simulink

Для начала проверим работоспособность данной схемы с лабораторным SDR-оборудованием RTL-SDR R820T2 на примере приема FM радио. Для этого в окне блок-схемы кликнем два раза мышкой по блоку Centre Frequency, что вызовет окно его настроек. Выставляем частоту приема 105,3 (105,3 МГц) в поле Constant value и нажимаем кнопку ОК.

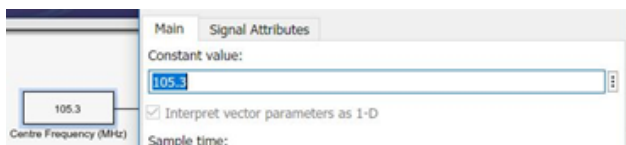


Рис. 96. Изменение частоты приема RTL-SDR в Simulink

Проверим настройки основной части схемы-блока RTL-SDR Receiver, кликая по нему два раза левой кнопкой мыши в окне блок-схемы. В поле Sampling Rate выставляем значение частоты дискретизации 2.8e6, в поле Frequency Correction – значение 0, в Output data type выбираем тип double, в поле Samples per frame – значение 8192. После всех вышеописанных манипуляций нажимаем кнопку Apply

(программа может зависнуть на очень короткое время для ввода новых параметров после нажатия), затем ОК.

После завершения настроек основных компонентов требуемой блок-схемы запускаем ее по нажатии кнопки Run.



Рис. 97. Запуск программно-определяемой радиосистемы анализа радиосигналов для RTL-SDR в Simulink

После запуска выводится окно о невалидности используемого дополнения для работы с RTL-SDR оборудованием. Данный программный недочет присутствует, когда нет доступа к сети Интернет, но его можно легко исправить, нажав на кнопку Fix Support Package, после чего закрывается вышеописанное окно, а также все открытые окна в Simulink.

Открываем заново вышеописанную схему и запускаем ее. Через некоторое время (зависит от мощности аппаратной части ПК) запустится процесс приема радиосигналов, и мы сможем визуалью наблюдать уровни сигналов FM радио в верхнем окне, а также спектрограмму голосов в нижнем окне.



Рис. 98. Осциллограмма сигнала FM радио

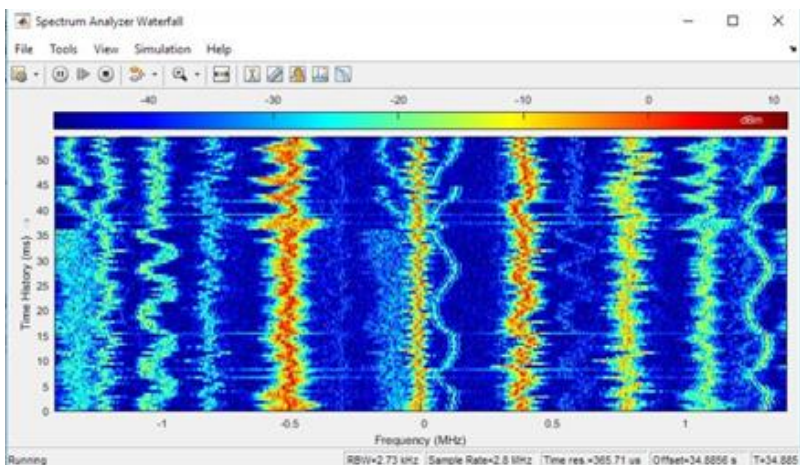


Рис. 99. Спектр сигнала FM радио

Приступим к основной части лабораторного исследования. В настройках блока RF Gain выставим значение уровня сигнала 50 в поле Constant value и нажмём кнопку ОК.

Обратимся к результатам предыдущей лабораторной работы «Исследование диапазона GSM-900. Анализ качества покрытия базовыми станциями в пределах местонахождения». Как Вы помните, в ней мы исследовали частоты работы базовых станций «большой тройки» операторов системы сотовой связи GSM в пределах местонахождения абонента. Проанализируем принимаемый RTL-SDR радиосигнал, выбрав одну из БС по желанию студента на основе результатов сканирования и определения принадлежности БС к оператору предоставления услуг.

Для примера выберем базовую станцию оператора сотовой связи ПАО «Мегафон», работающую на частоте 958 МГц. В настройках блока Centre Frequency, в поле Constant value, выставляем частоту приема 958 (958 МГц) и нажимаем кнопку ОК. Запускаем процесс приема радиосигнала на требуемой частоте.

Радиосигнал от выбранной базовой станции имеет следующий вид, показанный на спектрограмме ниже. Наблюдаем достаточно крупный масштаб спектрограммы радиосигнала GSM (по сравнению с его эталоном в справочной программе Artemis), его многоканальность, сильную уплотненность и узкополосность каждого канала.

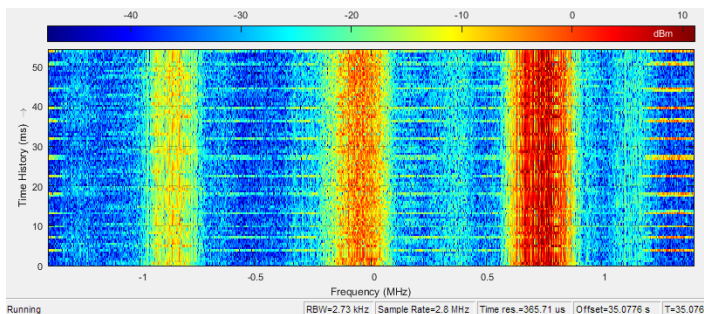


Рис. 100. Осциллограмма сигнала ССПР GSM в крупном масштабе

Далее проанализируем радиосигнал GSM в более мелком масштабе с помощью уже известного нам прикладного программного обеспечения для анализа, демодуляции и декодирования принимаемых радиосигналов SDR Sharp.

Запустите исполняемый файл SDRSharp.exe из каталога на CD диске LR-SRS/3_SDR_GSM_analys/SDR Sharp, кликнув по файлу правой кнопкой мыши и выбрав пункт «Запуск от имени администратора».

Произведем настройку SDR-ППУ RTL820T2, вызвав окно настройки. Выставляем значения параметров в соответствии со снимком ниже (рис. 101).

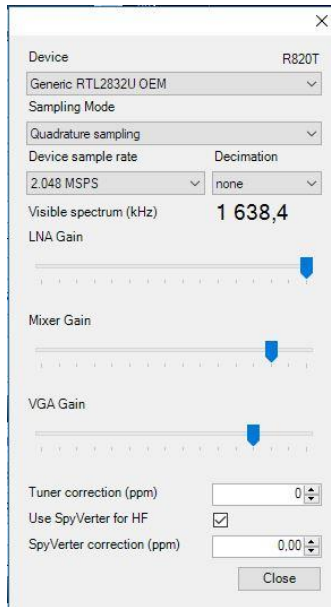


Рис. 101. Настройка параметров RTL-SDR для анализа радиосигналов ССПР GSM

После нажатия кнопки Close завершаем настройку устройства и запускаем его, нажав кнопку Start на главном окне программы. Во вкладке Radio, слева от обзорных окон, установить режим RAW (немодулированный режим), а также частоту приема 958 МГц. Наблюдаем прием радиосигнала ССПР GSM-900 от ранее обнаруженной базовой станции (рис. 102). Рассмотрим его более подробно. Как видно из спектрограммы, данный сигнал похож на эталонный в справочной программе Artemis (рис. 103) и действительно является радиосигналом системы сотовой связи GSM с шириной спектра 250 кГц, многоканальностью, а также частотным и временным уплотнением каналов.

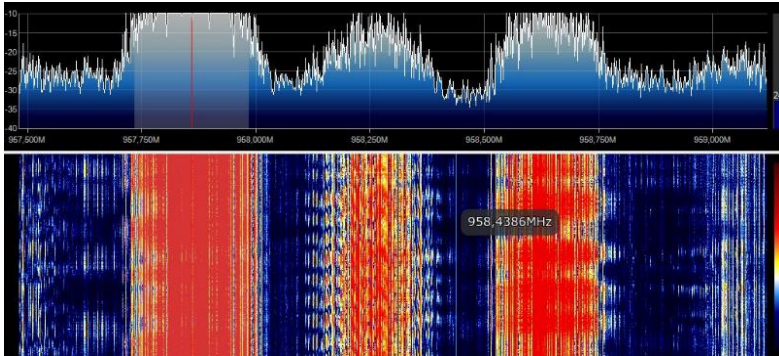


Рис. 102. Спектр радиосигнала ССПР GSM-900 от базовой станции ПАО «Мегафон»

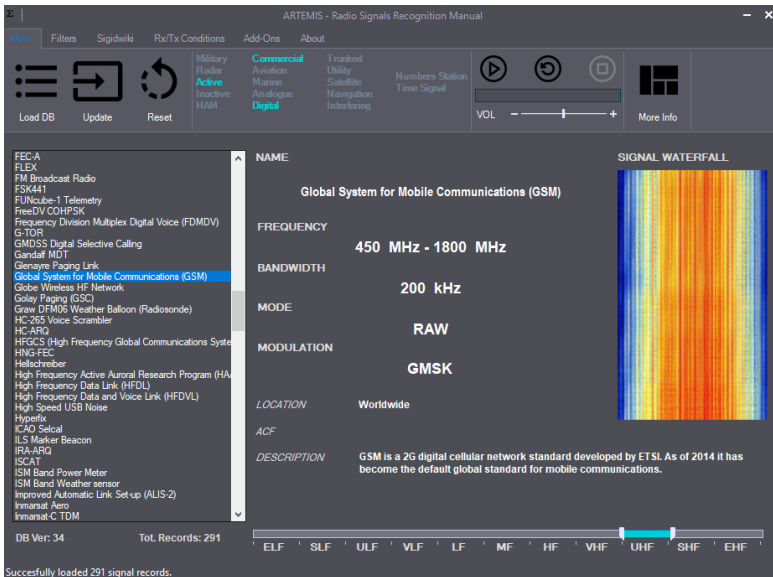


Рис. 103. Эталонные технические характеристики радиосигнала стандарта системы сотовой связи GSM-900 в справочной программе Artemis

3.5. ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ЕГО ВЫПОЛНЕНИЮ

1. Изучить стандарт системы сотовой связи GSM:

- общие сведения;
- предоставляемые услуги;
- преимущества и недостатки;
- стандарты и радиointерфейс;
- структура сети GSM.

2. Изучить «Решение Государственной комиссии по радиочастотам при Минкомсвязи России от 1 июля 2016 г. № 16-37-03 “Об использовании радиоэлектронными средствами сухопутной подвижной службы полос радиочастот 890–915 МГц, 935–960 МГц, 1710–1785 МГц и 1805–1880 МГц”» для получения сведений об используемых диапазонах частот в системе сотовой связи GSM на территории Российской Федерации, а также по Воронежской области.

3. Изучить теоретический материал по техническим характеристикам сигналов системы сотовой связи GSM, а также его структуру и особенности с помощью прикладной справочной программы радиосигналов Artemis.

Для выполнения домашнего задания в первую очередь проработайте теоретический материал по техническим характеристикам радиосигналов стандарта GSM. При изучении его структуры обратите внимание на форму и слышимость кодированного радиосигнала.

3.6. ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ

1. Ознакомиться с лабораторной установкой на базе коммерческой платформы RTL-SDR, его антенной системой и необходимым программным обеспечением, входящим в состав лабораторной установки.

2. Подготовить лабораторную установку к работе, проверить комплектность лабораторного стенда.

3. Подключить все части лабораторного стенда, подключить РПУ RTL-SDR к ПК (ноутбуку).

4. Проверить подачу питания на лабораторную установку (индикатор питания RTL-SDR должен гореть ярким белым светом).

5. Выполнить установку драйвера в ОС Windows для лабораторной установки, если на используемом для лабораторных исследований ПК он ранее не был установлен.

6. Запустить пакет исследовательского математического прикладного программного обеспечения MathLab и произвести в нем установку специального дополнения Communications System Toolbox Support Package for RTL-SDR Radio. Оценить новые возможности используемой программы, изучив руководство к плагину.

7. Провести технический анализ принимаемых радиосигналов ССПР GSM-900 в нисходящем канале по предложенной авторами методике. В процессе выполнения лабораторных исследований по их завершении сделать подробные выводы о проведенной работе.

Отчёт о проделанной работе должен содержать:

- выполненное домашнее задание;
- результаты экспериментальных исследований;
- рисунки, поясняющие выполнение методики проведения технического анализа принимаемых радиосигналов системы сотовой подвижной радиосвязи GSM с помощью коммерческой платформы RTL-SDR;
- подробные выводы по всем этапам исследований.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Поясните принцип работы стандарта системы сотовой подвижной радиосвязи GSM.
2. Подсистема базовых станций – дайте подробное описание.
3. Как проводится исследование радиосигналов ССПР GSM с помощью коммерческой платформы RTL-SDR?
4. Какими техническими характеристиками обладает радиосигнал системы сотовой подвижной радиосвязи GSM?
5. Чем отличаются возможности используемых в лабораторной работе пакетов прикладного программного обеспечения для исследования радиосигналов ССПР GSM? Какой из них является более специализированным и можно ли расширить возможности исследований?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем учебном пособии в сжатом виде рассмотрены принципы и методы построения систем подвижной радиосвязи. Приведен необходимый теоретический материал, представлен список вопросов самоконтроля обучающихся, а также комплекс лабораторно-практических занятий, направленный на получение студентами практических навыков построения и исследования систем подвижной радиосвязи.

Обучающиеся, желающие в дальнейшем углубить свои знания в области изучаемой дисциплины, имеют возможность воспользоваться литературой, приведенной авторами издания в библиографическом списке.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кравченко В. М. Разбираемся с RTL-SDR на основе RTL2832 + R820T [Электронный ресурс] / В. М. Кравченко – URL: <http://blog.kvv213.com/2016/02/razbiraemsa-s-RTL-SDR-na-osnove-rtl2832-r820t/>.

2. Laufer C. The Hobbyist's Guide to the RTL-SDR: Really Cheap Software Defined Radio / C. Laufer // RTLSDR. com. – 2014. – Т. 4. – 274 p.

3. Brannon B. Software defined radio / B. Brannon. – Analog devices, Inc., 2014. – 36 p.

4. Решение Государственной комиссии по радиочастотам при Минкомсвязи России от 1 июля 2016 г. № 16-37-03 «Об использовании радиоэлектронными средствами сухопутной подвижной службы полос радиочастот 890–915 МГц, 935–960 МГц, 1710–1785 МГц и 1805–1880 МГц» [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71348266/>.

5. Бойко О. В. Исследование возможности построения системы мониторинга 2G–5G сетей на основе коммерческой SDR платформы / О. В. Бойко, Д. В. Журавлев, И. А. Сафонов // Радиолокация, навигация, связь : сборник трудов XXIV Международной научно-технической конференции (17–19 апреля 2018 г.). Т. 5. – Воронеж: ООО «Вэлборн», 2018. – С. 37–45.

6. Бойко О. В. Система мониторинга подвижной радиосвязи 2G–4G сетей / О. В. Бойко, Д. В. Журавлев, И. А. Сафонов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – № 4 (август 2018 г.).

7. RTL-SDR and Computer Hardware Requirements [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.desktopsdr.com/hardware>.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1. Лабораторная работа № 1. Исследование принципов работы устройств на базе технологии SDR и их практического применения	4
1.1. Общие указания по выполнению работы.....	4
1.2. Описание лабораторной установки	5
1.3. Подключение RTL-SDR РПУ к персональному компьютеру (ноутбуку). Установка драйвера RTL-SDR в ОС WINDOWS	7
1.4. Физические основы систем подвижной радиосвязи.....	11
Краткие теоретические сведения.....	12
Вопросы для самоконтроля.....	40
1.5. Методика работы с программным обеспечением анализа и декодирования принимаемых радиосигналов SDR SHARP	41
1.6. Домашнее задание и методические указания по его выполнению.....	45
1.7. Лабораторное задание	46
Контрольные вопросы	47
2. Лабораторная работа № 2. Исследование диапазона GSM-900. Анализ качества покрытия базовыми станциями в пределах местонахождения	48
2.1. Общие указания по выполнению работы.....	48
2.2. Описание лабораторной установки.....	49
2.3. Сотовые системы подвижной радиосвязи. Организация передачи данных в сетях подвижной радиосвязи.....	50
Краткие теоретические сведения.....	51
Вопросы для самоконтроля.....	75

2.4. Методика проведения мониторинга и оценки качества связи, покрытия абонента базовыми станциями с помощью коммерческой платформы RTL-SDR	76
2.5. Домашнее задание и методические указания по его выполнению	83
2.6. Лабораторное задание	83
Контрольные вопросы	84

3. Лабораторная работа № 3. Исследование и технический анализ радиосигналов стандарта GSM	86
3.1. Общие указания по выполнению работы	86
3.2. Описание лабораторной установки	87
3.3. Программно-определяемая система подвижной радиосвязи	88
Краткие теоретические сведения	88
Вопросы для самоконтроля	127
3.4. Методика проведения технического анализа принимаемых радиосигналов системы сотовой подвижной радиосвязи GSM	128
3.5. Домашнее задание и методические указания по его выполнению	141
3.6. Лабораторное задание	141
Контрольные вопросы	143
Заключение	143
Библиографический список	144

Учебное издание

Федоров Сергей Михайлович
Бойко Олег Валерьевич
Пастернак Юрий Геннадиевич
Пирогов Александр Александрович

СИСТЕМЫ ПОДВИЖНОЙ РАДИОСВЯЗИ

Лабораторный практикум

Компьютерный набор О. В. Бойко, Н. Н. Ермакова,
М. А. Сиваш

Редактор Сахарова Д. О.

Подписано в печать 02.04.2019.

Формат 60×84/16. Бумага для множительных аппаратов.
Усл. печ. л. 9,2. Тираж 350 экз. Заказ № 34.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет»
394026 Воронеж, Московский проспект, 14

Участок оперативной полиграфии издательства ВГТУ
394026 Воронеж, Московский проспект, 14