

М. С. Костин, А. Д. Ярлыков

**АРХИТЕКТУРНО-КОНФИГУРИРУЕМЫЕ SDR-ТЕХНОЛОГИИ
РАДИОМОНИТОРИНГА И ТЕЛЕМЕТРИИ**

Учебное пособие

Москва Вологда
«Инфра-Инженерия»
2021

УДК 621.398+621.396+004.383.3

ББК 32.884+32.973+32.842

К72

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиоэлектронных систем и комплексов РТУ МИРЭА *Куликов Геннадий Валентинович*;

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий теоретическим отделом ИОФ РАН *Гусейн-заде Намик Гусейнага оглы*

Костин, М. С.

К72 Архитектурно-конфигурируемые SDR-технологии радиомониторинга и телеметрии : учебное пособие / М. С. Костин, А. Д. Ярлыков. – Москва ; Вологда, Инфра-Инженерия, 2021. – 148 с.
ISBN 978-5-9729-0599-7

Даны ключевые понятия, термины и определения, радиотехнические характеристики и параметры средств радиосвязи. Рассматриваются практические решения архитектурного проектирования и моделирования SDR-систем посредством визуального программирования в среде GNU Radio. Приведены типовые задания по созданию проектов SDR-систем в программном обеспечении SDRSharp и GNU Radio с примерами решений и ответами.

Для студентов и аспирантов, изучающих программный радиомониторинг, радиотехнику и программно-конфигурируемые системы радиосвязи. Может быть использовано студентами смежных направлений подготовки в рамках изучения курса радиомониторинга и телеметрии.

УДК 621.398+621.396+004.383.3

ББК 32.884+32.973+32.842

ISBN 978-5-9729-0599-7

© Костин М. С., Ярлыков А. Д., 2021

© Издательство «Инфра-Инженерия», 2021

© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2021

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. SDR-ТЕХНОЛОГИИ И ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА РАДИОСИГНАЛОВ	7
1.1. Ключевые понятия, термины и определения, радиотехнические характеристики и параметры радиосвязи	7
1.2. Классификация и описание модулированных радиосигналов	17
1.3. Аналого-цифровое преобразование, цифровая обработка и фильтрация сигналов	21
1.4. SDR-архитектура. Программно-определяемый радиосканер USB RTL-SDR на базе тюнера RTL2832 и его характеристики.....	27
2. ИНТЕРАКТИВНЫЙ РАДИОМОНИТОРИНГ И СПЕКТРАЛЬНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ РАДИОВЕЩАНИЯ В ПРОГРАММНО-ОПРЕДЕЛЯЕМОЙ СРЕДЕ SDRSHARP	35
2.1. Инсталляция и знакомство с программно-определяемой средой SDRSharp	35
2.2. Регистрация и анализ данных SDR-устройств в программной среде SDRSharp.....	44
2.3. Программный радиомониторинг, анализ и радиочастотные измерения каналов эфирного радиовещания в программно-определяемой среде SDRSharp	47
3. АРХИТЕКТУРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ SDR-СИСТЕМ ПОСРЕДСТВОМ ВИЗУАЛЬНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ В СРЕДЕ GNU RADIO.....	53
3.1. Знакомство со средой визуального программирования программно-определяемых SDR-систем GNU Radio	53
3.2. Управление и настройка параметров SDR-модулей (блоков) в среде GNU Radio	56
3.3. Правила архитектурного проектирования, создание, компиляция, сохранение проекта в среде GNU Radio, а также трансляция проекта в программный листинг на языке Python.....	71

3.4. Визуальное программирование и моделирование радиотехнических блок-схем в среде GNU Radio	73
3.5. Настройка режимов моделирования регистрации сигналов в среде GNU Radio	80
3.6. Архитектурное проектирование и анализ программно-определяемого ЧМ- и АМ-приемника на базе тюнера RTL2832 в среде GNU Radio	83
4. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ	89
ПРИЛОЖЕНИЕ. ЧАСТОТНАЯ СЕТКА УКВ РАДИОВЕЩАНИЯ.....	142
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	144
СЕТЕВЫЕ ИНФОРМАЦИОННО-СПРАВОЧНЫЕ РЕСУРСЫ.....	144

ВВЕДЕНИЕ

Программно-определяемые радиотехнологии (Software Defined Radio – SDR) – IT направление в радиотехнике, позволяющее на уровне программного проектирования создавать архитектуру и управлять параметрами и настройками радиочастотных устройств при помощи средств программирования.

Сегодня программно-определяемые радиотехнологии вызывают большой интерес у исследователей и разработчиков современных устройств радиосвязи, радиомониторинга и телеметрии. Такие устройства отличаются возможностью реализации функций радиофизического уровня программным способом, что обеспечивает осуществление обработки различных типов сигналов без изменения аппаратной схмотехнической части радиоэлектронного изделия. С появлением доступных и гибких в управлении радиоприемных устройств интерес к SDR-технологии возрос еще больше, поскольку она позволяет создать SDR-системы, работающие в широкополосном радиочастотном диапазоне.

Не менее важным при проектировании и моделировании SDR-устройств является выбор и практическое освоение специализированного программного обеспечения, позволяющего создавать проекты программно-конфигурируемых средств радиомониторинга и телеметрии.

Учебное пособие имеет профильную направленность, ориентированную на формирование у обучающегося необходимых знаний и умений для успешного развития в направлении дальнейшей деятельности в области программного радиомониторинга и архитектурного проектирования SDR-систем посредством визуального (блочного) программирования USB RTL-SDR тюнера RTL2832 – цифрового приемника.

Пособие состоит из трех тематических разделов, а также приложения практических заданий с примерами решений и ответами.

В первом разделе сформулированы ключевые понятия, термины и определения, радиотехнические характеристики и параметры средств радиосвязи. Приведены основные сведения о параметрах и характеристиках USB RTL-SDR радиосканера на базе тюнера RTL2832.

Второй раздел посвящен интерактивному радиомониторингу и спектральной визуализации каналов эфирного радиовещания в программно определяемой среде SDRSharp с использованием RTL-SDR радиосканера.

В третьем разделе рассматриваются практические решения архитектурного проектирования и моделирования SDR-систем посредством визуального программирования в среде GNU Radio на базе RTL-SDR радиосканера.

В приложении учебного пособия приведены типовые задания по созданию проектов SDR-систем в программном обеспечении SDRSharp и GNU Radio с примерами решений и ответами.

1. SDR-ТЕХНОЛОГИИ И ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА РАДИОСИГНАЛОВ

1.1. Ключевые понятия, термины и определения, радиотехнические характеристики и параметры радиосвязи

Радиотехника – область радиоэлектроники, изучающая методы и средства передачи, преобразования и получения информации с помощью радиоволн.

Радиоволна – возмущенное электромагнитное поле (электромагнитное колебание), распространяющиеся в пространстве со скоростью света c , равной 300 000 км/сек. Радиоволны охватывают волновой диапазон от 1 мм до 100 км или же эквивалентный частотный диапазон от 3 кГц до 300 ГГц (рис. 1).

Наиболее известное практическое применение радиоволн – средства телерадиовещания, радиосвязи, навигации и радиолокации.

Радиосвязь – технология беспроводной передачи информации (радиосигналов), где в качестве информационного носителя используются радиоволны, которые могут свободно распространяться в пространстве.

Радиосигнал – радиоволна, преобразованная при помощи радиотехнических решений для передачи информации на расстояние в воздушном пространстве.

Радиоволны характеризуются тремя основными радиотехническими параметрами: длина волны λ , радиочастота f и мощность переносимой энергии W .

Длина радиоволны λ – расстояние, которое проходит электромагнитное колебание за время одного периода, распространяясь со скоростью света c . Единица измерения длины радиоволн – [мм, см, дм, м, км].

Однако в радиотехнике наиболее удобнее оперировать радиочастотой f – числом колебаний радиоволны за единицу времени, поскольку длина радиоволны, также, как и ее фазовая скорость v_{ϕ} , является величиной, зависящей от параметров среды (магнитная и диэлектрическая проницаемость), в которой она распространяется. В то же время радиочастота не зависит от свойств среды, поскольку нивелируется отношением фазовой скорости радиоволны к ее длине $-f = v_{\phi} / \lambda$. Единица измерения радиочастоты – [кГц, МГц, ГГц].

Мощность переносимой энергии W – мощность радиосигнала, передаваемая антенной в радиоэфир. Единица измерения мощности – [кВт, Вт, мВт, мкВт]. Мощность измеряется также в относительных величинах – [дБ, дБм].

Шкала радиоволн перекрывается радиодиапазонами (полосами) и приведена на рис. 1 и в таблице 1.

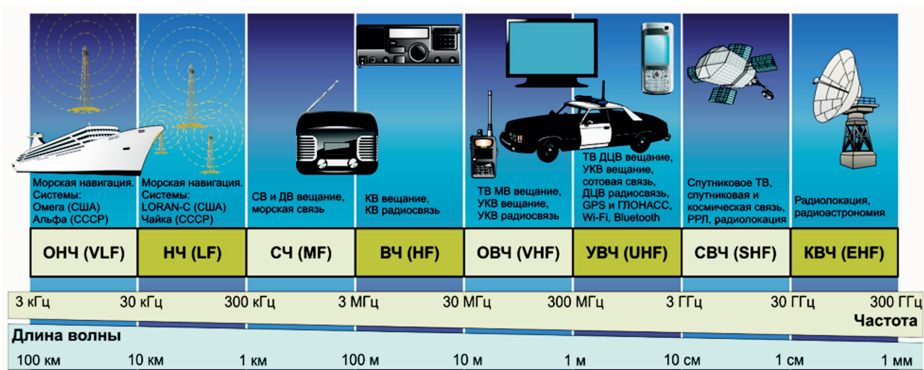


Рис. 1. Радиидиапазоны и области их применения

Радиодиапазоны и области их применения

№ полосы	Полоса частот*	Название полосы частот	Диапазон длин волн	Название диапазона	Основные области применения
4	3...30 кГц	Очень низкие (ОНЧ, VLF)	100...10 км	Мириаметровые	Служба точного времени, радиосвязь с подводными лодками
5	30...300 кГц	Низкие (НЧ, LF)	10...1 км	Километровые	Радиовещание, радиосвязь земной волной, навигация
6	300...3000 кГц	Средние (СЧ, MF)	1000...100 м	Гектометровые	Радиовещание и радиосвязь земной волной и ионосферная
7	3...30 МГц	Высокие (ВЧ, HF)	100...10 м	Декаметровые	Радиовещание и радиосвязь ионосферная, загоризонтная радиолокация, радиостанции, радиомониторинг
8	30...300 МГц	Очень высокие (ОВЧ, VHF)	10...1 м	Метровые	Телевидение, радиовещание, радиосвязь тропосферная и прямой волной, радиостанции, радиомониторинг
9	300...3000 МГц	Ультра-высокие (УВЧ, UHF)	10...1 дм	Дециметровые	Телевидение, радиосвязь тропосферная и прямой волной, мобильная телефония, радиостанции, медицина, микроволновые печи, спутниковая навигация, радиосенсорная телеметрия, радиомониторинг, технологии беспроводной связи

№ полосы	Полоса частот*	Название полосы частот	Диапазон длин волн	Название диапазона	Основные области применения
10	3...30 ГГц	Сверх-высокие (СВЧ, SHF)	10...1 см	Сантиметровые	Радиолокация, интернет, спутниковое телевидение, спутниковая- и радиосвязь прямой волной, беспроводные компьютерные сети, радиовидение, радиосенсорная телеметрия, радиомониторинг
11	30...300 ГГц	Крайне высокие (КВЧ. EHF)	10...1 мм	Миллиметровые	Радиоастрономия, высокоскоростная радиорелейная связь, радиолокация (метеорологическая, управление вооружением), медицина, спутниковая радиосвязь, радиовидение, радиосенсорная телеметрия
12	300...3000 ГГц	Гипер-высокие (ГВЧ, THF)	1...0,1 мм	Децимиллиметровые	Высокоточное тепловидение
*Полосы частот включают наибольшую и исключают наименьшую частоту, а диапазоны длин волн включают наименьшую длину и исключают наибольшую.					

Радиочастотный диапазон – это граничная область радиочастот, имеющая конкретное полосовое радиочастотное разделение по применению, а также электродинамическим условиям распространения радиоволн (рис. 2). При этом полосы частот включают наибольшую и исключают наименьшую частоту.

Применительно к радиосвязи и телерадиовещанию отдельно выделяют:

- длинноволновый (ДВ)-диапазон (30...300 кГц);
- средневолновый (СВ)-диапазон (300 кГц...3 МГц);

- коротковолновый (КВ)-диапазон (3...50 МГц);
- ультракоротковолновый (УКВ)-диапазон (64...108 МГц);
- дециметровый (ДМВ)-диапазон (0,3...3,0 ГГц);
- диапазон цифровых стандартов связи (400...30 ГГц).

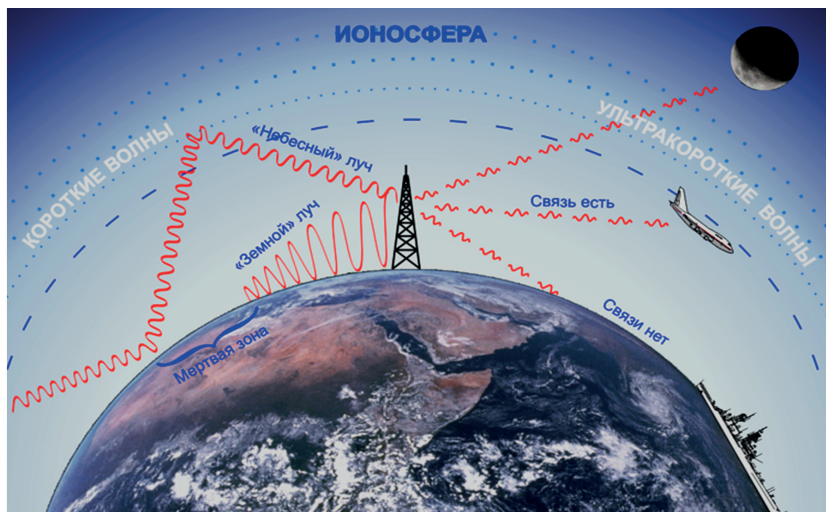


Рис. 2. Электродинамические условия распространения радиоволн

В зависимости от типа диапазона радиоволны имеют свои особенности и законы распространения:

- Радиоволны ДВ-диапазона сильно поглощаются ионосферой, основное значение имеют приземные волны, которые распространяются, огибая землю. Их интенсивность по мере удаления от передатчика уменьшается сравнительно быстро.
- Радиоволны СВ-диапазона сильно поглощаются ионосферой днем, и район действия СВ определяется приземной волной, вечером хорошо отражаются от ионосферы и район действия определяется отраженной волной.

- Радиоволны КВ-диапазона распространяются исключительно посредством отражения ионосферой, поэтому вокруг передатчика существует зона радиомолчания. Днем лучше распространяются более короткие волны (30 МГц), ночью – более длинные (3 МГц). Короткие волны могут распространяться на большие расстояния при малой мощности передатчика.
- Радиоволны УКВ-диапазона распространяются прямолинейно и, как правило, не отражаются ионосферой, однако при определенных условиях способны огибать земной шар из-за разности плотностей воздуха в разных слоях атмосферы. Легко огибают препятствия и имеют высокую проникающую способность, находят активное применение во всех видах наземной радиосвязи.
- Радиоволны ДМВ-диапазона и сантиметрового диапазона не огибают препятствия, распространяются в пределах прямой видимости. Используются в цифровых стандартах радиосвязи, как, например, GSM, WiFi, LTE, WiMax, UWB, Bluetooth, 4G, а также в системах спутниковой связи, в том числе в системах ГЛОНАСС, GPS, Galileo и т. д.

Принцип формирования радиосвязи следующий: выбирается несущая радиочастота из конкретного радиочастотного диапазона в зависимости от заданных условий возможного распространения радиоволн, которая служит основой для передачи информации (голосовой речи, музыки, изображения, текстового сообщения и т. д.), а затем на нее накладывается сам передаваемый сигнал при помощи модуляции.

Модуляция – видоизменение заданных радиотехнических параметров (одного или нескольких) сигнала несущей радиочастоты при воздействии на него сигнала передаваемой информации. Таким образом, радиосигнал несущей частоты принято называть модулируемым сигналом, а сигнал информации – модулирующим сигналом.

Необходимость формирования радиосигнала высокой несущей частоты и его последующая модуляция обусловлена тем, что в системах радиосвязи сиг-

налы передаются и принимаются антеннами. При этом минимальные геометрические размеры антенны зависят от длины, принимаемой или передаваемой радиоволны. Именно поэтому невозможно передавать, например, звуковую речь по радиоканалу, преобразованную в радиосигнал без наложения ее на высокочастотное колебание, поскольку в этом случае размеры антенны были бы слишком велики.

Антенна – это радиотехническое устройство, необходимое для обеспечения возможности передачи радиоволн в свободное пространство (в радиоэфир), а также регистрации радиоволн в радиоэфирном вещании. Конструкции антенн разнообразны и каждый тип рассматриваемой конструкции антенны (штыревые, мачтовые, ферритовые, директорные, зеркальные, рупорные, микрополосковые, антенные решетки и т. д.) с конкретными геометрическими размерами определяет ее рабочий радиочастотный диапазон. Так, для каждого радиочастотного диапазона (см. таблицу 1) применяются свои типы и соответствующие размеры конструкций антенн (ДВ-антенны, КВ-антенны, УКВ-антенны, спутниковые антенны и т. д.).

Принцип радиотехнического формирования системы радиосвязи показан на рис. 3.

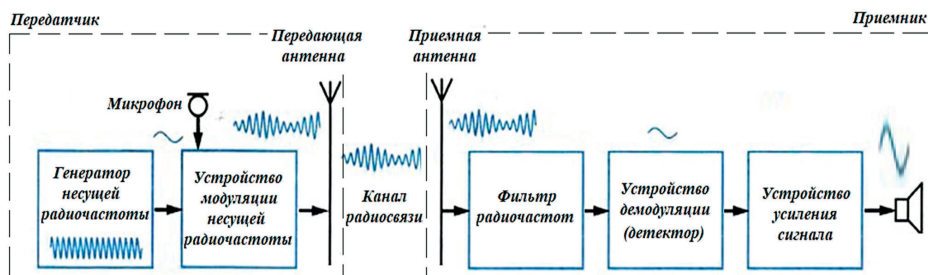


Рис. 3. Принцип формирования системы радиосвязи

Системы связи классифицируются по видам, а также режимам передачи и приема информации, от чего будут зависеть их конструктивные особенности:

- симплексная связь – это односторонняя связь между двумя абонентами, в которой направление осуществляется в одну сторону и по одному и тому же каналу связи. Т. е. при симплексной связи второй абонент, которому направлено сообщение или послание, не может ни ответить, ни подтвердить ничего, а только слушать. Такая связь используется в радио-, теле- и спутниковом вещании, поскольку нет необходимости передавать какие-либо данные обратно на радиопередающую станцию. Также примером симплексной связи является однонаправленная связь между пусковой установкой и ракетой с радиокомандным управлением, когда команды передаются ракете, но прием информации от ракеты не предусмотрен;
- дуплексная связь – это двусторонняя связь, которая может осуществляться одновременно. Передача и прием ведутся устройством одновременно по двум физически разделенным каналам связи на прием и на передачу информации. Примером такой связи являются системы телефонной связи и видеомост;
- частным случаем дуплексной связи является полудуплексная связь, когда устройство связи в один момент времени может либо передавать, либо принимать информацию. Пример полудуплексной связи – разговор по радиации: каждый из абонентов в один момент времени либо говорит, либо слушает. Для обозначения конца передачи и перехода в режим приема абонент произносит слово «прием».

Радиосигналы классифицируются:

- по типу генерации во времени: стационарные и финитные.

Стационарный сигнал – сигнал, не изменяющий свои параметры во времени (неограниченный во времени).

Финитный сигнал – сигнал, ограниченный во времени, например, импульс.

- По однозначности параметров сигналов: детерминированные и случайные (стохастические или шумоподобные).