

Галкин В. А.



# **ОСНОВЫ** **ПРОГРАММНО-КОНФИГУРИРУЕМОГО** **РАДИО**

Москва  
Горячая линия - Телеком  
2013

УДК 654.19:621.396.97

ББК 32.884

Г16

**Галкин В. А.**

**Г16** Основы программно-конфигурируемого радио. – М.: Горячая линия–Телеком, 2013. – 372 с., ил.

**ISBN 978-5-9912-0305-0.**

Книга посвящена основам построения радиоканала для программно-конфигурируемого радио. Рассмотрены варианты функциональных схем трансивера, которые потенциально обеспечивают выполнение основных требований программно-конфигурируемого радио – работа в сверхширокой полосе частот вне зависимости от ширины канала, типа модулированного сигнала и скорости передачи информации при условии выполнения требований стандартов электромагнитной совместимости. Изложены основы работы компонентов аппаратной части трансивера для программно-конфигурируемого радио, таких как широкополосный линеаризованный усилитель мощности, модулятор/демодулятор, фильтры, элементы антенно-фидерного тракта. Приведены базовые алгоритмы программной поддержки основных функциональных элементов радиоканала. В заключительной главе показаны результаты аналитических расчетов и цифрового моделирования приемника с однократным преобразованием частоты и нулевой промежуточной частотой, который в наибольшей степени удовлетворяет требованиям программно-конфигурируемого радио.

Для инженеров-разработчиков радиоаппаратуры, может быть полезна магистрам радиотехнических факультетов и аспирантам соответствующих специальностей.

**ББК 32.884**

*Адрес издательства в Интернет [WWW.TECHBOOK.RU](http://WWW.TECHBOOK.RU)*

Научное издание

**Галкин Вячеслав Александрович**

**Основы программно-конфигурируемого радио**

*Монография*

Обложка художника О. Г. Карповой

Подписано в печать 25.04.2013 Печать офсетная. Формат 60×88/16. Изд. № 130305.

Уч. изд. л. 23,25. Тираж 500 экз. (1-й завод 100 экз.)

ISBN 978-5-9912-0305-0

© В. А. Галкин, 2013

© Издательство «Горячая линия–Телеком», 2013

## Предисловие

Наиболее полное и системное описание назначения, структуры и реализации радиооборудования различных поколений приведено на некоммерческом форуме [sdrforum.org](http://sdrforum.org).

В соответствии с принятой форумом классификацией, существующие на сегодняшний день радиостанции и соответствующее им программное обеспечение определяются как программно-управляемое радио (Software Controlled Radio – SCR). В радиостанциях SCR функции физического уровня модели открытых систем связи OSI-7 по фильтрации, модуляции/демодуляции, преобразованию спектра, усилению сигналов и т.д. выполняются аппаратными методами под программным контролем. Процессор управления трансивером устанавливает коэффициент усиления приемника в соответствии с уровнем принимаемого сигнала, параметры передатчика в соответствии с требуемой выходной мощностью, параметры антенны в соответствии с КСВ антенно-фидерного тракта и т.д.

Программно-конфигурируемое радио (Software Defined Radio – SDR) есть радиооборудование, в котором все или большинство функции физического уровня *выполняются в программном виде*, а функции, выполняемые аппаратно, должны оперативно модифицироваться по требованиям рабочего стандарта связи. Программная реализация большинства функций по обработке высокочастотных сигналов и оперативное программное управление аппаратурой обеспечивают кардинальное повышение функциональных возможностей радиостанции путем поддержки работы в различных сервисах, широкой полосе частот и в различных стандартах связи. Технология SDR является ключевой в предполагаемом последующем развитии радиооборудования: адаптивное радио (Adaptive Radio – AR), когнитивное «умное» радио (Cognitive Radio – CR) и интеллектуальное радио (Intelligent Radio – IR).

Adaptive Radio – следующая за SDR ступень развития радиооборудования, в котором имеется возможность контролировать работу и изменять параметры радиооборудования в замкнутой петле автоматического регулирования в сети связи. В результате улучшаются экономические, технические и пользовательские показатели работы радиостанций. Технология AR является естественным развитием программно-конфигурируемого радио, исключая вмешательство пользователя в управление радиооборудованием в стандартных или прогнозируемых ситуациях.

Cognitive Radio – радиооборудование, в котором система связи определяет текущие условия работы и состояние оборудования и может принимать решения о методах радиосвязи. В частности, контролируются

условия прохождения радиоволн, географическое расположение абонента, загрузка рабочего участка спектра, анализ текущего трафика. По результатам анализа ситуации возможно изменение несущей частоты, мощности, типа модуляции и т.д. вплоть до перехода в иной стандарт связи. Технология CR может быть реальной базой для совместимости различных стандартов связи, которые в силу условий применения и требований пользователей не могут использовать общие для всех методы модуляции, единые методы разделения каналов, скорость передачи данных и т.д.

На интуитивном уровне программно-конфигурируемое радио определяют как направление развития радиосвязи, призванное объединить на единой аппаратной платформе работу радиостанций различных типов и различных стандартов. Предполагается, что программно-конфигурируемое радио реализует функций радиоприемника и радиопередатчика в программном виде или с помощью программно управляемых аппаратных компонентов, которые в силу своей физической природы не могут быть реализованы программно, как, например, усилитель мощности или антенна.

В терминах концептуальной модели открытых систем связи OSI-7 программно-конфигурируемое радио определяется как радиостанция, в которой все или большинство функций физического уровня выполняются в программном виде и могут быть программно реконфигурированы в соответствии с требованиями стандарта связи и/или изменяться иным программно-управляемым оборудованием.

Институт инженеров по электротехнике и электронике (IEEE) определяет программно-конфигурируемое радио как программно-конфигурируемое оборудование, в котором радиочастотные параметры могут быть установлены или изменены при помощи программного обеспечения и/или оборудования, с помощью которого это достигается. Программное изменение касается диапазона частот, типа модуляции, выходной мощности, но не ограничивается этими параметрами.

Федеральная комиссия связи США определяет программно-конфигурируемое радио как радиооборудование (приемопередатчик), в котором такие параметры режима работы, как диапазон частот, тип модуляции и выходная мощность могут быть изменены при помощи программного обеспечения без изменений в аппаратных компонентах, используемых для излучения и приема радиочастот.

В настоящее время существует значительное количество типов и модификаций систем связи и соответствующего им оборудования (радиостанций). Каждая радиостанция включает аналоговую и цифровую часть, отдельные электрические компоненты и микросхемы высокой степени интеграции, механические компоненты, антенну. В целом радиостанция является высокотехнологичным продуктом, достаточно эффективно выполняющим функции связи посредством электромагнитных волн. Однако взаимодействие типовых радиостанций различных стан-

дартов на сегодняшний день если и не исключено, то является редким случаем, да и то в ограниченной функциональности. Одна из основных задач программно-конфигурируемого радио как раз и заключается в обеспечении предельной гибкости изменения параметров оборудования с целью обеспечить максимальную совместимость радиостанций различных стандартов вне зависимости от метода модуляции, рабочего диапазона частот, метода доступа к каналам и т.п. при сохранении всех функциональных возможностей сети связи. Многомодовый (мульти-стандартный) режим работы радиостанции является одним из основных требований, предъявляемых к оборудованию радиосетей третьего поколения. Согласно определению программы ИМТ-2000 Международного союза электросвязи, сети связи третьего поколения должны формировать единое информационное пространство, обеспечивающее абоненту доступ ко всем информационным ресурсам и базам данных независимо от их географического расположения, сетевого и аппаратного обеспечения.

К основным функциям физического уровня, которые обычно реализуются в аппаратном виде, относятся: усиление, модуляция/демодуляция, канальная селекция в приемнике и подавление побочного излучения в передатчике, преобразование частоты при модуляции/демодуляции на промежуточной частоте. В программно-конфигурируемом радио эти функции, которые сегодня выполняются в аппаратном виде смесителями, фильтрами, усилителями, модуляторами/демодуляторами, детекторами частично реализуются программно, а частично программно-управляемыми аппаратными средствами в соответствии с параметрами модулированных сигналов и методом разделения каналов в различных стандартах связи. В результате программное радио является экономически более выгодным продуктом по сравнению со специализированными устройствами, так как производится для более широкого круга пользователей, а модернизация радиооборудования заключается только в изменении программного обеспечения.

Работа радиостанции, особенно в городе, происходит в условиях быстро изменяющихся параметров радиоканала – чередовании теневых и освещенных зон, периодически возникающих помех и т.д. Высокое качество передачи информации и надежность поддержки радиоканала в таких условиях требуют оперативного управления основными параметрами радиостанции, такими как излучаемой мощностью передатчика, рабочей частотой, величиной усиления принятого сигнала. Оперативное управление параметрами радиоканала необходимо и при передаче различных типов данных. Передача речи, изображения или текста в режиме реального времени или в режиме электронного письма требуют, в общем случае, различной скорости передачи информации и различных параметров оборудования радиоканала. Оптимизация режима работы передатчика и приемника для конкретного вида связи по-

зволит в среднем уменьшить энергопотребление и увеличить срок работы батарей питания.

Программно-конфигурируемое радио предполагает существенное изменение аппаратной части трансивера и требований, предъявляемых к аппаратной части. Аппаратура программно-конфигурируемого приемника должна, прежде всего, обеспечивать преобразование принятого высокочастотного модулированного сигнала с целью его максимально точного (без потери достоверности приема) представления в цифровом виде с помощью аналого-цифрового преобразователя. Аппаратура передатчика должна обеспечивать прямое формирование модулированного сигнала и усиление мощности. Функции высокочастотной аппаратной части приемопередатчика программно-конфигурируемого радио сводятся к обеспечению энергетического потенциала радиоканала – усилению мощности в передатчике и малому усилению принятого сигнала в приемнике. Для пользователя программно-конфигурируемое радио позволяет реализовать следующие функции:

- оперативное изменение текущей конфигурации радиостанции с минимальными затратами времени и средств;
- оперативное добавление новых функций и возможностей без дорогостоящего изменения аппаратной части;
- удешевление текущего обслуживания аппаратной части, общей для значительного количества радиосредств;
- использование одной и той же радиостанции в различных сетях и для различных применений.

# Оглавление

<b>Предисловие .....</b>	<b>3</b>
<b>Глава 1. Архитектура программно-конфигурируемого радио ....</b>	<b>7</b>
1.1. Радиостанция программно-конфигурируемого радио .....	8
1.1.1. Архитектура радиостанции ПКР .....	8
1.1.2. Параметры радиостанции ПКР .....	14
1.1.3. Идеальная радиостанция ПКР .....	19
1.1.4. Преобразование спектра сигнала .....	22
1.1.5. Комбинационные частоты в преобразовании спектра .....	37
1.1.6. Преобразование спектра внешних шумов .....	43
1.2. Приемник программно-конфигурируемого радио .....	46
1.2.1. Приемник с ненулевой промежуточной частотой .....	47
1.2.2. Приемник с нулевой промежуточной частотой .....	60
1.3. Передатчик программно-конфигурируемого радио .....	66
1.3.1. Передатчик с ненулевой промежуточной частотой .....	67
1.3.2. Передатчик с нулевой промежуточной частотой .....	72
1.3.3. Усилитель мощности .....	77
1.4. Синтезатор частоты .....	88
1.5. Антенно-фидерные устройства .....	93
1.5.1. Широкополосное согласование антенн .....	95
1.5.2. Частотно-независимые антенны .....	97
1.5.3. Дуплексный фильтр (антенный коммутатор) .....	100
1.6. Программная поддержка оборудования радиоканала ПКР .....	101
1.7. Радиостанции программно-конфигурируемого радио .....	105
Список литературы к главе 1 .....	112

<b>Глава 2. Базовые компоненты программно-конфигурируемого радио.....</b>	<b>114</b>
2.1. Операционный усилитель .....	114
2.1.1. Основные параметры и схемы включения .....	114
2.1.2. Шумы и искажения в операционном усилителе .....	121
2.1.3. Операционный усилитель с управляемой .....	
проводимостью .....	129
2.2. Фильтры промежуточной частоты .....	132
2.2.1. Активные фильтры на операционных усилителях .....	133
2.2.2. Активные фильтры на операционных усилителях .....	
с управляемой проводимостью .....	141
2.2.3. Комплексный фильтр .....	143
2.2.4. Полифазный фильтр .....	147

2.3. Смеситель .....	150
2.3.1. Общее представление .....	150
2.3.2. Пассивный смеситель .....	156
2.3.3. Активный смеситель .....	163
2.3.4. Смеситель с подавлением зеркальной частоты .....	170
2.3.5. Смеситель на гармониках гетеродина .....	175
2.4. Квадратурный модулятор .....	177
2.4.1. Формирование модулированного сигнала .....	178
2.4.2. Искажения в квадратурном модуляторе .....	180
2.4.3. Оптимизация квадратурного модулятора .....	184
2.5. Квадратурный демодулятор .....	187
2.5.1. Типовые квадратурные демодуляторы .....	188
2.5.2. Квадратурный демодулятор для приемника с нулевой промежуточной частотой .....	191
Список литературы к главе 2 .....	197

### **Глава 3. Цифровое представление модулированного сигнала 199**

3.1. Аналого-цифровой преобразователь .....	199
3.1.1. Дискретизация непрерывного сигнала .....	199
3.1.2. Квантование непрерывного сигнала .....	208
3.1.3. Основные параметры АЦП .....	212
3.1.4. Базовая архитектура микросхем АЦП .....	218
3.2. Цифро-аналоговый преобразователь .....	226
3.2.1. Общее представление .....	226
3.2.2. Параметры и архитектура ЦАП .....	229
Список литературы к главе 3 .....	232

### **Глава 4. Радиочастотные модули программно- конфигурируемого радио .....233**

4.1. Малошумящий усилитель и фильтр-преселектор .....	233
4.2. Синтезатор частот .....	238
4.2.1. Синтезатор с узкой полосой пропускания ФАПЧ .....	238
4.2.2. Синтезатор с широкой полосой пропускания ФАПЧ .....	244
4.3. Линеаризованный усилитель мощности .....	246
4.3.1. Нелинейные искажения в усилителе .....	247
4.3.2. Линеаризация режима работы транзистора .....	253
4.3.3. Усилитель в замкнутой петле автоматического регулирования .....	259
4.3.4. Усилитель с линеаризацией по огибающей высокочастотного модулированного сигнала .....	262
4.3.5. Передатчик с предискажениями в baseband-диапазоне .....	268
4.3.6. Передатчик с картезианской петлей обратной связи .....	271
4.4. Широкополосный усилитель мощности .....	282



4.4.1. Предельное согласование импедансов .....	283
4.4.2. Согласование элементами с сосредоточенными параметрами .....	285
4.4.3. Широкополосные трансформаторы .....	289
4.5. Широкополосные антенны .....	295
Список литературы к главе 4 .....	300

## **Глава 5. Приемник с нулевой промежуточной частотой .....302**

5.1. Коэффициент шума приемника .....	304
5.1.1. Коэффициент шума в радиочастотном диапазоне .....	304
5.1.2. Коэффициент шума в baseband-диапазоне .....	307
5.1.3. Коэффициент шума линейной части приемника .....	310
5.2. Основные параметры приемника .....	313
5.3. Постоянная составляющая сигнала в приемнике .....	323
5.3.1. Источники постоянной составляющей .....	323
5.3.2. Подавление постоянной составляющей и фликкер-шумов .....	327
5.4. Моделирование приемника с нулевой промежуточной частотой .....	336
5.4.1. Модель радиоканала .....	336
5.4.2. Достоверность приема .....	340
5.5. Программное обеспечение приемника .....	357
5.5.1. Автоматическая регулировка усиления .....	357
5.5.2. Коррекция асимметрии каналов приемника .....	359
5.5.3. Оптимальный некогерентный частотный детектор .....	361
5.5.4. Оптимальный некогерентный фазовый детектор .....	364
5.5.5. Тактовая синхронизация .....	365
Список литературы к главе 5 .....	368