

В.А.Галкин

ЦИФРОВАЯ МОБИЛЬНАЯ РАДИОСВЯЗЬ

**2-е издание,
переработанное и дополненное**

*Рекомендовано УМО по образованию
в области телекоммуникаций в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений, обучающихся
по направлению подготовки бакалавров и магистров
«Телекоммуникации» и по направлению подготовки
дипломированных специалистов «Телекоммуникации»*

Москва
Горячая линия - Телеком
2012

УДК 621.396.218

ББК 32.84

Г16

Галкин В. А.

Г16 Цифровая мобильная радиосвязь. Учебное пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Горячая линия–Телеком, 2012. – 592 с., ил.

ISBN 978-5-9912-0185-8.

Рассмотрены основные методы и технические решения построения цифрового радиоканала для мобильных систем радиосвязи, а также общие принципы построения и проектирования мобильных сетей радиосвязи. Первая часть книги посвящена теоретическим основам построения радиоканала. В ней рассмотрены свойства цифровых модулирующих сигналов, классические узкополосные методы модуляции и модулированные сигналы с расширенным спектром, типы фединга при многолучевом распространении радиоволн, методы оптимального приема цифровых модулированных сигналов в условиях белого гауссовского шума и фединга, схемы тактовой синхронизации и алгоритмы восстановления цифрового сообщения, методы синтеза и преобразования частот. Во второй части систематизированы сведения об организации каналов и сетей связи. Рассмотрены методы разделения и коммутации каналов, передача данных по цифровому радиоканалу, доступ абонентов к ограниченным ресурсам сети и разрешение конфликтных ситуаций, транкинг и качество обслуживания, управление обслуживания абонентов при миграции, основы построения сетей сотовой связи, расчет дальности радиосвязи и частотно-территориальное планирование.

Во втором издании исправлены недостатки и неточности, существенно расширены разделы, посвященные особенностям распространения радиоволн в условиях города, оптимального приема и синхронизации.

Для студентов старших курсов, обучающихся по инфокоммуникационным и радиотехническим специальностям, может быть полезна аспирантам и инженерам, работающим в области цифровых сетей радиосвязи.

ББК 32.84

Адрес издательства в Интернет WWW.TECHBOOK.RU

Учебное издание

Галкин Вячеслав Александрович

ЦИФРОВАЯ МОБИЛЬНАЯ РАДИОСВЯЗЬ

Учебное пособие

Компьютерная верстка

Обложка художника В. Г. Ситникова

Подписано в печать 25.11.2010. Печать офсетная. Формат 60×88/16. Уч. изд. л. 37. Тираж 500 экз.

ISBN 978-5-9912-0185-8

© В. А. Галкин, 2012

© Издательство «Горячая линия–Телеком», 2012

Предисловие

В настоящее время мобильные системы радиосвязи являются наиболее быстро развивающимся сегментом рынка радиосредств. Микроминиатюризация аналоговых СВЧ микросхем и внедрение микропроцессоров качественно изменили аппаратуру радиосвязи, она стала не только средством специального и профессионального назначения, но и средством коммуникаций массового потребителя.

Мобильные системы радиосвязи являются сложными комплексами, включающими в себя достаточно самостоятельные компоненты: радиоканал, речепреобразование, помехоустойчивое кодирование и шифрование, частотно-территориальное планирование и т.д.

Основой функционирования современной системы радиосвязи является радиоканал цифровой передачи данных. Метод формирования спектра сигналов, вид модуляции, схема приемника высокочастотных модулированных сигналов, алгоритм восстановления переданного цифрового сообщения определяют основные эксплуатационные характеристики системы радиосвязи: число каналов связи в выделенной полосе частот, скорость передачи информации, достоверность и качество приема информации.

В настоящей книге последовательно изложены основные идеи и технические решения, составляющие основу цифровой передачи данных по радиоканалу, и работа радиоканала как части системы радиосвязи.

Передача данных по радиоканалу начинается с отображения цифрового сообщения на цифровой сигнал и заканчивается восстановлением цифрового сообщения по цифровому сигналу. Соответственно, подробно рассмотрены основные параметры цифрового сигнала с точки зрения его последующего преобразования в передатчике и приемнике: спектральная плотность мощности, энергия и расстояние между символами, ограничение ширины спектра с минимальными межсимвольными искажениями.

Модуляция/демодуляция, которые совместно обеспечивают прохождение сигналов по эфиру, является основной функцией приемника и передатчика. Параметры и структура модулированных сигналов в решающей степени определяют структуру высокочастотной части оборудования, методы формирования и приема сигналов, разделения и управления каналами, допустимую скорость передачи информации, энергетический потенциал и т.д. Приведены базовые функциональные схемы приемников/передатчиков и основные характеристики модулированных сигналов, используемых в современных сетях радиосвязи: узкополосные с амплитудной, фазовой и частотной модуляцией, широкополосные (с прямым расширением спектра DSSS, со скачками частоты FHSS, с линейной внутриимпульсной частотной модуляцией), сверхширокополосные UWB, многомерные OFDM. Единой

методологической базой анализа модулированных сигналов является фундаментальное понятие комплексной огибающей модулированного сигнала.

Построение и анализ функциональных схем классического приемника цифровых и модулированных сигналов в условиях белого гауссова шума производится на основе последовательного применения функции максимального правдоподобия. Показана оптимальная реализация когерентного и некогерентного приема, временной, фазовой и частотной синхронизации, сравнительная достоверность приема информации для различных видов модуляции. Анализ оптимального приемника в идеальных условиях белого гауссова шума дополнен определением влияния на его параметры и функциональную схему реальных условий прием при многолучевом распространении радиоволн в городе (различного типа фединга). В отдельной главе рассматриваются основные положения двух базовых стандартов электромагнитной совместимости на радиоканал цифровой подвижной связи – российский РД45.299-2002 (ГОСТ 12252-86) и европейский ETS-300-113 – предельные значения параметров передатчиков и приемников, функциональные схемы измерений. Указаны основные методы достижения указанных значений параметров при проектировании радиоаппаратуры.

Методологической основой анализа сетей радиосвязи является модель взаимодействия открытых систем OSI-7. В приложении к радиосетям уточняются назначение и выполняемые функции двух нижних уровней модели: физического и канального. Из всех функций канального уровня рассмотрены те, которые имеют отношение к управлению радиоканалом, а именно: организация, разделение и коммутация каналов связи, передача данных в канале, симплексный, дуплексный и полудуплексный режимы работы, сотовая, транкинговая и конвенциональная организация сети, доступ к каналам связи в случайные моменты времени (ALOHA) и определение занятости канала путем прослушивания несущей частоты сторонних радиостанций (CSMA), разрешение конфликтных ситуаций.

Частотно-территориальное планирование сети связи включает определение оптимального расположения и конфигурации сот, мощности передатчиков и диаграмм направленности антенн базовых радиостанций, распределения частот по сотам, количества каналов на основании ожидаемой внутриканальной и межканальной интерференции, загрузки сот и качества обслуживания абонентов.

В заключительной части книги дано краткое описание структуры и основных характеристик радиоканалов наиболее распространенных стандартов наземной мобильной радиосвязи APCO-25, TETRA, GSM, CdmaOne, DMR и беспроводных систем передачи данных.

Оглавление

Предисловие	3
Глава 1. Беспроводные сети связи	5
1.1. Мобильные системы радиосвязи.....	6
1.1.1 Мобильные системы связи первого поколения	6
1.1.2. Мобильные системы связи второго поколения	11
1.1.3. Мобильные системы связи третьего поколения	16
1.2. Общее представление сети мобильной радиосвязи.....	19
1.2.1. Модель OSI-7 для радиосетей	19
1.2.2. Функциональная схема сети радиосвязи.....	28
Глава 2. Цифровые сигналы	33
2.1. Цифровой сигнал во временной и частотной области	34
2.2. Виды и параметры цифровых сигналов.....	40
2.2.1. Виды цифровых сигналов.....	41
2.2.2. Параметры цифровых сигналов	45
2.2.3. Спектральная плотность мощности цифровых сигналов	47
2.3. Ограничение полосы частот цифрового сигнала.....	54
2.3.1. Искажения сигнала в линейных цепях	55
2.3.2. Сигналы без межсимвольной интерференции.....	57
2.3.3. Сигналы с ограниченной межсимвольной интерференцией ..	64
2.3.4. Сигналы с малой межсимвольной интерференцией	66
2.3.5. Цифровые фильтры для ограничения спектра сигнала.....	69
Глава 3. Узкополосные модулированные сигналы	73
3.1. Общие характеристики модулированных сигналов	74
3.1.1. Модулированный сигнал в частотной и временной области .	75
3.1.2. Функциональные схемы модуляторов и демодуляторов.....	78
3.1.3. Ограничение спектра модулированного сигнала	85
3.1.4. Энергия и расстояние между символами модулированного сигнала.....	89
3.2. Амплитудная модуляция	90
3.3. Фазовая модуляция.....	94
3.3.1. Общее представление фазо-модулированного сигнала	94
3.3.2. Бинарная фазовая модуляция	100
3.3.3. Квадратурная фазовая модуляция.....	102
3.3.4. Квадратурная сдвиговая фазовая модуляция.....	107
3.3.5. Дифференциальная бинарная фазовая модуляция	108
3.3.6. Дифференциальная фазовая модуляция $\pi/4$ DQPSK	110
3.4. Квадратурная амплитудная модуляция	115
3.5. Частотная модуляция	120

3.5.1. Частотно-модулированные сигналы с разрывной фазой	121
3.5.2. Частотно-модулированные сигналы с непрерывной фазой..	123
3.5.3. Частотная модуляция минимального фазового сдвига MSK	129
3.5.4. Частотно-модулированные сигналы с уменьшенной шириной спектра	134
3.5.5. Модуляторы и приемники частотно-модулированного сигнала	138
Глава 4. Модулированные сигналы с расширенным спектром	141
4.1. Широкополосные сигналы с непосредственным расширением спектра DSSS	143
4.2. Широкополосные сигналы со скачками частоты FHSS	150
4.3. Широкополосные сигналы с линейным изменением частоты	153
4.4. Сверхширокополосные сигналы UWB	156
4.5. Многомерные сигналы	158
4.5.1. Общие характеристики многомерных сигналов.....	159
4.5.2. Формирование многомерного сигнала	162
4.5.3. Многомерная ортогональная модуляция OFDM	166
Глава 5. Синтез и преобразование частот.....	175
5.1. Функциональная схема фазовой автоподстройки частоты.....	175
5.2. Функциональная схема и компоненты синтезатора частоты	177
5.2.1. Генератор опорной частоты	178
5.2.2. Фазовый детектор.....	184
5.2.3. Фильтр нижних частот.....	189
5.2.4. Генератор, управляемый напряжением	191
5.2.5. Делители частоты	192
5.3. Основное уравнение и параметры синтезатора частоты.....	195
5.3.1. Основное уравнение синтезатора частоты.....	195
5.3.2. Полоса удержания и захвата.....	196
5.3.3. Частотная и фазовая ошибка в установившемся режиме	198
5.3.4. Время установления частоты	199
5.3.5. Шумовые характеристики синтезатора частоты	204
5.3.6. Паразитные комбинационные составляющие	208
5.3.7. Устойчивость синтезатора	209
5.4. Частотный модулятор на основе синтезатора частоты	211
5.5. Преобразование спектра в замкнутой петле ФАПЧ.....	216
Глава 6. Распространение радиоволн в условиях города	220
6.1. Методы анализа распространения радиоволн в городе	221
6.2. Расчет дальности радиосвязи в модели «большого расстояния»..	223
6.2.1. Эмпирическая модель распределения поля	224
6.2.2. Методика расчета дальности радиосвязи.....	227
6.2.3. Расчет дальности радиосвязи по методике МККР	231
6.2.4. Расчет дальности радиосвязи по модели Окамура.....	234

6.2.5. Расчет дальности радиосвязи по методике EUROCAST	235
6.2.6. Расчет теневых зон радиосвязи.....	236
6.2.7. Распространение радиоволн внутри здания.....	237
6.3. Анализ структуры поля в модели «малого расстояния»	239
6.3.1. Типы каналов распространения радиоволн	239
6.3.2. Параметры многолучевого канала распространения радиоволн	246
6.3.3. Плоский фединг.....	249
6.3.4. Частотно-селективный фединг.....	253
6.3.5. Медленный и быстрый фединг	255
6.3.6. Оценка фединга в типовом радиоканале.....	256
6.3.7. Дальность радиосвязи в каналах с замираниями.....	258
Глава 7. Оптимальный приемник цифровых сигналов	263
7.1. Функциональная схема приемника цифровых сигналов	264
7.2. Достоверность прием цифровой информации	269
7.3. Функция максимального правдоподобия	274
7.3.1. Общее определение	274
7.3.2. Функция правдоподобия для квазистационарного канала ...	278
7.3.3. Функция правдоподобия для когерентного и некогерентного приема	279
7.3.4. Функция правдоподобия для радиоканала с белым гауссовым шумом.....	283
7.4. Оптимальный детектор цифровых сигналов.....	285
7.4.1. Оптимальный детектор	287
7.4.2. Согласованная фильтрация	292
7.4.3. Достоверность приема бинарного цифрового сигнала	296
7.5. Последовательный детектор цифровых сигналов	299
7.5.1. Последовательный прием цифровых сигналов с памятью ...	300
7.5.2. Последовательный прием цифровых сигналов с межсимвольной интерференцией.....	303
7.5.3. Алгоритм Витерби.....	307
7.6. Тактовая синхронизация цифровых сигналов	314
7.6.1. Оптимальная тактовая синхронизация и оценка точности...	315
7.6.2. Тактовая синхронизация при известных информационных параметрах.....	317
7.6.3. Тактовая синхронизация при неизвестных информационных параметрах	323
7.6.4. Совместное детектирование и тактовая синхронизация.....	330
Глава 8. Прием модулированных сигналов	333
8.1. Когерентный прием.....	335
8.1.1. Приемник амплитудно-модулированных сигналов	335
8.1.2. Приемник фазо-модулированных сигналов.....	337
8.1.3. Приемник частотно-модулированных сигналов.....	342

8.1.4. Эффективность различных видов модуляции	347
8.1.5. Приемник частотно-модулированных сигналов с непрерывной фазой	351
8.2. Некогерентный прием	359
8.2.1. Оптимальный некогерентный приемник	360
8.2.2. Приемник бинарного амплитудно-модулированного сигнала	364
8.2.3. Приемник бинарного частотно-модулированного сигнала ..	367
8.2.4. Приемник с детектором мгновенной частоты	375
8.2.5. Приемник фазо-модулированного сигнала	378
8.3. Синхронизация модулированных сигналов	381
8.3.1. Тактовая синхронизация	381
8.3.2. Частотная синхронизация	384
8.3.3. Фазовая синхронизация	393
Глава 9. Прием модулированных сигналов в условиях фединга..	400
9.1. Оптимальный прием в широкополосных многолучевых каналах	402
9.1.1. Статистика принимаемых сигналов	402
9.1.2. Оптимальный приемник	406
9.1.3. Достоверность приема информации	407
9.1.4. Разнесенный прием	411
9.2. Оптимальный прием в узкополосных многолучевых каналах	417
9.2.1. Оптимальный приемник	418
9.2.2. Эквалайзер	419
9.2.3. Интерливинг	423
Глава 10. Стандарты радиоканала мобильной цифровой радиосвязи	425
10.1. Параметры аналоговых и цифровых радиостанций	426
10.2. Параметры передатчика и методики измерений	430
10.3. Реализация требований стандартов на параметры передатчика .	440
10.4. Параметры приемника и методики измерений	445
10.5. Реализация требований стандартов на параметры приемника	452
10.6. Вектор ошибок модуляции	457
Глава 11. Организация каналов и сетей связи	462
11.1. Основные характеристики канала связи	463
11.1.1. Методы множественного доступа	463
11.1.2. Типы каналов связи	467
11.1.3. Коммутация каналов связи	469
11.1.4. Управление каналами связи	471
11.2. Методы доступа к каналам связи	472
11.2.1. Алгоритмы случайного доступа ALOHA	473
11.2.2. Алгоритмы прослушивания канала CSMA	476
11.3. Канальное кодирование	478

11.3.1. Принципы помехоустойчивого кодирования	478
11.3.2. Блоковое и сверточное кодирование	480
11.3.3. Автоматическая повторная передача данных	483
11.4. Типы сетей связи	484
11.5. Частотно-территориальное планирование сети связи	489
11.5.1. Модель сотовой сети связи	490
11.5.2. Интерференция частотных каналов	491
11.5.3. Специальные виды сот	496
11.6. Транкинг и качество обслуживания	498
11.7. Управление мобильными абонентами	503
Глава 12. Стандарты мобильных сетей радиосвязи	507
12.1. Стандарт транкинговой сети связи APCO-25	507
12.1.1. Технические характеристики и архитектура	507
12.1.2. Радиоинтерфейс	509
12.1.3. Услуги сети связи	512
12.2. Стандарт транкинговой сети связи TETRA	515
12.2.1. Технические характеристики и архитектура	516
12.2.2. Радиоинтерфейс	521
12.2.3. Услуги сети связи	527
12.3. Стандарт конвенциональной сети связи DMR	529
12.4. Стандарта сотовой сети связи GSM	533
12.4.1. Технические характеристики и архитектура	533
12.4.2. Радиоинтерфейс	538
12.4.3. Установление соединений в сети GSM	545
12.4.4. Расширения стандарта GSM	550
12.5. Стандарт сотовой сети связи CdmaOne	555
12.6. Стандарты беспроводных сетей передачи данных	563
12.6.1. Персональные сети связи	563
12.6.2. Локальные сети связи	567
12.6.3. Региональные сети связи	569
Список сокращений	574
Список условных обозначений	577
Литература	580
Предметный указатель	582