

М. Г. Бакулин, В. Б. Крейнделин,
А. М. Шлома, А. П. Шумов

ТЕХНОЛОГИЯ OFDM

*Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки
11.03.02 и 11.04.02 – «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»
квалификации (степени) «бакалавр» и «магистр»*

**Москва
Горячая линия – Телеком
2017**

УДК 621.396
ББК 32.84
Т38

Рецензенты: профессор кафедры «Радиотехнические системы» МТУСИ, доктор техн. наук, профессор *О. А. Шорин*; профессор кафедры «Вычислительная и прикладная математика» РГРТУ, доктор техн. наук, доцент *Г. В. Овечкин*

Т38 Технология OFDM. Учебное пособие для вузов / М. Г. Бакулин, В. Б. Крейнделин, А. М. Шлома, А. П. Шумов. – Горячая линия – Телеком, 2017. – 352 с., ил.

ISBN 978-5-9912-0549-8.

Рассмотрены принципы построения и алгоритмы формирования и обработки сигналов в системах связи с технологией OFDM (ортогонального частотного мультиплексирования), положенные в основу систем: LTE, LTE-Advanced, WiMax и WiFi. Изложены основы распространения радиоволн в каналах подвижной радиосвязи, проанализированы характеристики каналов с замираниями, рассмотрены системные функции канала, основы статистического описания каналов, основные модели каналов систем подвижной связи. Отдельные разделы посвящены темам, связанным с технологией OFDM, таким как: генерация поднесущих, защитный интервал и циклическое расширение, выбор параметров и обработка OFDM сигналов, искажения и рассогласования в системах с OFDM. Рассмотрены вопросы кодирования и модуляции для систем с OFDM. Уделено внимание задачам синхронизации, оцениванию и выравниванию канала, методам решения проблемы высокой пиковой мощности. Рассмотрены вопросы множественного доступа с ортогональным частотным разделением (OFDMA), совместного использования технологий MIMO и OFDM.

Для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» (бакалавриат, магистратура). Будет полезна студентам и аспирантам других инфокоммуникационных направлений, а также специалистам.

ББК 32.84

Адрес издательства в Интернет WWW.TECHBOOK.RU

Все права защищены.

Любая часть этого издания не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами без письменного разрешения правообладателя

© ООО «Научно-техническое издательство «Горячая линия – Телеком»
www.techbook.ru

© М. Г. Бакулин, В. Б. Крейнделин, А. М. Шлома, А. П. Шумов

Оглавление

Предисловие	3
Введение	5
Глава 1. Мобильные радиоканалы	8
1.1. Основы распространения радиоволн в каналах мобильной связи	9
1.1.1. Пространственные потери и затенение	12
1.1.2. Замирания из-за многолучевости	14
1.2. Замирания малого масштаба	15
1.3. Многолучевое распространение и характеристики канала	16
1.4. Характеристики каналов с замираниями	21
1.4.1. Изменения во времени и доплеровское рассеяние	21
1.4.2. Частотная селективность и рассеяние задержки	27
1.4.3. Каналы, меняющиеся во времени и зависящие от частоты	29
1.5. Детерминированная модель канала с множественными точечными рассеивателями	31
1.6. Системные функции канала	34
1.7. Статистическое описание беспроводного канала	37
1.8. Упрощенное статистическое описание беспроводного канала. Профиль распределения мощности по задержке. Распределение плотности мощности по частоте Доплера	38
1.9. Угловое рассеяние — пространственное рассеяние ...	44
1.10. ММО канал	45
1.11. Модели многолучевого канала связи с релейскими замираниями	46
1.11.1. Стационарная многолучевая модель	46
1.11.2. Нестационарная модель замираний	48
1.11.3. Модели каналов, используемые в стандартах беспроводной связи	49
1.12. Заключение	53
Литература к главе 1	56

Глава 2. Основы OFDM	58
2.1. Что такое OFDM	58
2.2. Концепция OFDM	60
2.3. Генерация поднесущих с использованием ОБПФ	63
2.4. Защитный интервал и циклическое расширение	67
2.5. Оконная обработка OFDM-символа (windowing)	70
2.6. Выбор параметров OFDM	73
2.7. Обработка OFDM-сигналов	75
2.7.1. Демодуляция OFDM-сигналов	75
2.7.2. Блок-схема OFDM-приемопередатчика	76
2.7.3. Передача комплексных и вещественных отсчетов	78
2.8. Дискретная модель системы с OFDM	82
2.9. Частотно-временная интерпретация сигнала OFDM ..	86
2.10. Искажения и рассогласования в системах с OFDM ..	87
2.10.1. Расстройка частоты	88
2.10.2. Расстройка временной синхронизации	91
2.10.3. Фазовый шум несущей	93
2.10.4. Разбалансировка квадратурных составляющих ..	94
2.10.5. Проблемы, вызываемые многолучевостью	94
2.10.6. Пик-фактор	96
2.11. LTE и OFDM	98
2.11.1. Радиоинтерфейс EUTRAN	99
2.11.2. Параметры радиоинтерфейса OFDM в LTE ..	100
Литература к главе 2	102
Глава 3. Кодирование и модуляция	104
3.1. Прямое корректирующее кодирование	105
3.1.1. Блочные коды	105
3.1.2. Сверточные коды	106
3.1.3. Каскадные коды	109
3.2. Перемежение	109
3.3. Квадратурная амплитудная модуляция	111
3.4. Кодированная модуляция	112
Литература к главе 3	120
Глава 4. Синхронизация. Принципы синхронизации в системах OFDM	121
4.1. Чувствительность к фазовому шуму	122
4.2. Чувствительность к расстройке частоты	125
4.3. Чувствительность к ошибкам временной синхронизации	126
4.4. Синхронизация, использующая циклическое расширение	128

4.5. Синхронизация, использующая специальные обучающие символы	133
Литература к главе 4	136
Глава 5. Синхронизация. Режимы, методы и схемы оценки временных и частотных рассогласований...	138
5.1. Обзор схем синхронизации	139
5.1.1. Оценка временного рассогласования	140
5.1.2. Оценка расстройки частоты	141
5.1.3. Режимы захвата и слежения	142
5.2. Оценка временной расстройки	144
5.2.1. Методы, основанные на пилот-сигналах	144
5.2.2. Методы, не использующие пилот-сигналы	148
5.3. Оценка расстройки частоты	153
5.3.1. Методы, основанные на пилот-сигналах	154
5.3.2. Методы, не использующие пилот-сигналы.....	159
5.4. Совместная оценка временной и частотной расстроек	160
5.5. Оценка и коррекция расстройки тактового генератора	162
5.6. Краткие итоги	163
Литература к главе 5	163
Глава 6. Синхронизация. Оценка и компенсация временных рассогласований и частотных расстроек в приемниках OFDM	167
6.1. Проблемы синхронизации	168
6.1.1. Ошибки синхронизации	168
6.1.2. Эффекты от ошибок синхронизации	169
6.1.3. Как оценивать и компенсировать расстройки .	174
6.2. Обнаружение/оценивание ошибок синхронизации ...	176
6.2.1. Определение момента начала символа	176
6.2.2. Оценка расстройки несущей частоты	185
6.2.3. Оценка остаточной расстройки несущей частоты (CFO) и расстройки тактовой частоты (SCO)	190
6.2.4. Оценка фазы несущей	193
6.2.5. Оценка разбаланса IQ	194
6.3. Компенсация ошибок синхронизации	196
6.3.1. Компенсация расстройки несущей	197
6.3.2. Компенсация расстройки тактового генератора	199
6.3.3. Компенсация разбаланса IQ	202
6.4. Краткие итоги	203
Литература к главе 6	204
Глава 7. Оценивание и выравнивание канала	206
7.1. Дифференциальное и когерентное детектирование ..	207
7.2. Обычные методы снижения потерь от замираний ...	209

7.2.1. Замирания сигналов во времени	209
7.2.2. Частотно-селективные замирания	209
7.3. Выравнивание канала при OFDM	211
7.4. Пилотные оценщики канала	214
7.4.1. Схемы расположения пилотов	215
7.4.2. Расстояние между пилот-символами во временном и частотном направлениях	216
7.4.3. Пилотное оценивание канала	217
7.4.4. Двумерная винеровская интерполяция	218
7.4.5. Каскадированные одномерные интерполирующие фильтры	220
7.4.6. Пример построения винеровского оценщика для OFDM	223
7.5. Каскадированные одномерные полиномиальные интерполяторы	234
7.6. Методы слепой и полуслепой оценки каналов	238
7.6.1. Методы, основанные на подпространствах	239
7.6.2. Оценивание канала на основе усреднения и максимизации	242
7.7. Сравнительный анализ методов оценивания канала .	246
Литература к главе 7	248
Глава 8. Проблема пиковой мощности	250
8.1. Отношение пиковой мощности сигнала к его средней мощности	251
8.2. Распределение отношения пиковой мощности сигнала к его средней мощности	252
8.3. Ограничение и оконная обработка пиков	254
8.3.1. Требуемые отступы при неидеальном усилителе мощности	257
8.3.2. Кодирование и скремблирование	259
8.4. Подавление пиков	261
8.5. Коды, снижающие PAPR	265
8.5.1. Формирование комплементарных кодов	267
8.5.2. Минимальное расстояние комплементарных кодов	270
8.5.3. Максимально правдоподобное декодирование комплементарных кодов	271
8.5.4. Квазиоптимальное декодирование комплементарных кодов	274
8.5.5. Большие длины кода	276
8.6. Скремблирование символов	276
Литература к главе 8	278

Глава 9. Модель канала с учетом эффектов электроники передатчика и приемника	280
9.1. Эффекты связной электроники	280
9.1.1. Расстройка несущей частоты	280
9.1.2. Расстройка тактового генератора	281
9.1.3. Фазовый шум	281
9.1.4. Разбаланс IQ и дрейф нуля	282
9.1.5. Нелинейность усилителя мощности	285
9.2. Модель канала с учетом эффектов электроники	287
9.2.1. Эквивалентная низкочастотная модель канала связи	287
9.2.2. Характеристики и параметры элементов модели	287
Литература к главе 9	289
Глава 10. Множественный доступ с ортогональным частотным разделением	291
10.1. Система OFDMA с переключением частоты	292
10.2. Различия между системами OFDMA и MC-CDMA ..	293
10.3. Описание примера системы OFDMA	296
10.3.1. Канальное кодирование	299
10.3.2. Модуляция	299
10.3.3. Временная и частотная синхронизация	299
10.3.4. Начальная временная синхронизация	300
10.3.5. Начальная оценка частотной расстройки	300
10.3.6. Точность синхронизации	301
10.3.7. Управление мощностью	302
10.3.8. Работа в режиме случайного переключения частот	303
10.3.9. Динамическое назначение каналов	303
10.3.10. Упрощенное динамическое назначение каналов	306
10.3.11. Емкость OFDMA	306
10.4. Выводы	306
Литература к главе 10	307
Глава 11. Технология MIMO-OFDM	308
11.1. Технология MIMO	308
11.1.1. Основы технологий MIMO	310
11.2. Технология MIMO-OFDM	314
11.2.1. Схемы расположения пилот-сигналов для систем MIMO-OFDM	316
11.2.2. Синхронизация в системах MIMO-OFDM	319
11.2.3. Оценка MIMO-OFDM канала	323
11.3. Кодирование и детектирование для систем MIMO ..	326

11.3.1. Пространственно-временные блочные коды . .	326
11.3.2. Пространственное мультиплексирование	329
11.3.3. Пространственная декорреляция	336
Литература к главе 11	338
Послесловие	340
Основные сокращения	341