

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](http://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](http://www.techbook.ru)

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

# Оглавление

Предисловие .....	3
Введение .....	5
<b>Глава 1. Мобильные радиоканалы .....</b>	<b>8</b>
1.1. Основы распространения радиоволн в каналах мобиль- ной 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 ка- нала .....	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 множественны- ми 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 задерж- ке. 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 релеевскими за- мираниями .....	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

<b>Глава 2. Основы OFDM</b> .....	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 отсче- тов .....	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
<b>Глава 3. Кодирование и модуляция</b> .....	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
<b>Глава 4. Синхронизация. Принципы синхронизации в системах OFDM</b> .....	121
4.1. Чувствительность к фазовому шуму .....	122
4.2. Чувствительность к расстройке частоты .....	125
4.3. Чувствительность к ошибкам временной синхрониза- ции .....	126
4.4. Синхронизация, использующая циклическое расшире- ние .....	128

4.5. Синхронизация, использующая специальные обучающие символы .....	133
Литература к главе 4 .....	136
<b>Глава 5. Синхронизация. Режимы, методы и схемы оценки временных и частотных рассогласований...</b>	<b>138</b>
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
<b>Глава 6. Синхронизация. Оценка и компенсация временных рассогласований и частотных расстроек в приемниках OFDM .....</b>	<b>167</b>
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
<b>Глава 7. Оценивание и выравнивание канала .....</b>	<b>206</b>
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
<b>Глава 8. Проблема пиковой мощности .....</b>	<b>250</b>
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

<b>Глава 9. Модель канала с учетом эффектов электроники передатчика и приемника</b> .....	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
<b>Глава 10. Множественный доступ с ортогональным частотным разделением</b> .....	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
<b>Глава 11. Технология MIMO-OFDM</b> .....	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