

现代 *移动* 通信技术丛书

# 宽带无线通信

## OFDM技术

王文博 郑 侃 编著

 人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS

现代移动通信技术丛书

# 宽带无线通信 OFDM 技术

王文博 郑 侃 编著

人民邮电出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

宽带无线通信 OFDM 技术 / 王文博, 郑侃编著. —北京: 人民邮电出版社, 2003.11  
(现代移动通信技术丛书)

ISBN 7-115-11866-3

I. 宽... II. ①王...②郑... III. 宽带通信系统—无线电通信—通信技术 IV. TN92

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 088188 号

### 内 容 提 要

本书系统地阐释了 OFDM 技术的基本原理、关键技术及与其他一些技术的结合, 重点分析了 OFDM 技术在无线物理层上的一些关键的问题, 并论述了 OFDM 技术在蜂窝移动通信系统中的应用。本书共有 8 章: 第 1 章介绍了 OFDM 技术的历史及其发展过程, 第 2~4 章详细地讲述了 OFDM 技术的基本原理及其关键技术, 第 5~7 章讨论了 OFDM 技术和其他一些技术的结合, 第 8 章对 OFDM 技术应用到蜂窝移动通信中的一些问题进行了简单介绍。

本书适用于从事移动通信系统研究和开发的技术人员, 也可以作为高等院校信息与通信专业师生的参考书。

现代移动通信技术丛书

### 宽带无线通信 OFDM 技术

◆ 编 著 王文博 郑 侃  
责任编辑 徐享华

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号  
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn  
网址 <http://www.ptpress.com.cn>  
读者热线 010-67129258  
北京汉魂图文设计有限公司制作  
北京鸿佳印刷厂印刷  
新华书店总店北京发行所经销

◆ 开本: 787×1092 1/16  
印张: 15.5  
字数: 371 千字 2003 年 11 月北京第 1 版  
印数: 1-4 000 册 2003 年 11 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-115-11866-3/TN · 2212

定价: 27.00 元

本书如有印装质量问题, 请与本社联系 电话: (010) 67129223

# 前 言

自 20 世纪 80 年代以来, 正交频分复用 (OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 技术不但在广播式数字音频和视频领域得到广泛的应用, 而且已经成为无线局域网标准 (例如 IEEE802.11a 和 Hyperlan / 2 等) 的一部分。OFDM 由于其频谱利用率高、成本低等原因越来越受到人们的关注。随着人们对通信数据化、宽带化、个人化和移动化需求的增强, OFDM 技术在综合无线接入领域将会获得越来越广泛的应用。随着 DSP 芯片技术的发展, 人们开始集中越来越多的精力开发 OFDM 技术在移动通信领域的应用, 预计第三代以后的移动通信的主流技术将是 OFDM 技术。

此外, OFDM 还易于结合时空编码、分集、干扰抑制以及智能天线等技术, 最大程度地提高物理层信息传输的可靠性。如果再结合自适应调制、自适应编码、动态子载波分配以及动态比特分配算法等技术, OFDM 系统的性能可得到进一步优化。

作者根据目前的技术发展, 参考了国内外最新的专著和文献资料, 编写了这本专门介绍 OFDM 技术的书籍。

本书的章节内容编排如下:

第 1 章介绍了 OFDM 技术的历史及其发展过程;

第 2~4 章详细地讲述了 OFDM 技术的基本原理及其关键技术, 包括接收机技术和峰均比问题等。

第 5~7 章讨论了 OFDM 技术和其他一些技术的结合, 例如与 CDMA 技术、自适应技术和多天线技术的结合等;

第 8 章对 OFDM 技术应用于蜂窝移动通信时的一些问题进行了简单的介绍。

在本书的编写过程中, 北京邮电大学电信工程学院无线通信中心的曾国燕、周恩、黄琳、黄琳 (小)、毛学伟、陈茅茅、刘阳和赵娟娟同学做了大量的工作, 在此向他们表示衷心的感谢。

由于作者学识有限, 书中错误在所难免, 希望读者不吝赐教。

作者

# 目 录

<b>第 1 章 OFDM 技术简介</b> .....	1
1.1 移动通信的发展状况 .....	1
1.2 OFDM 系统的发展现状 .....	2
1.3 OFDM 系统的优缺点 .....	3
1.4 OFDM 系统的关键技术 .....	4
参考文献 .....	5
<b>第 2 章 OFDM 技术基础</b> .....	7
2.1 OFDM 的基本原理 .....	8
2.1.1 OFDM 的产生和发展 .....	8
2.1.2 串并变换 .....	9
2.1.3 子载波调制 .....	9
2.1.4 DFT 的实现 .....	12
2.1.5 保护间隔、循环前缀和子载波数的选择 .....	12
2.1.6 加窗技术 .....	18
2.1.7 RF 调制 .....	20
2.1.8 OFDM 基本参数的选择 .....	21
2.2 在无线局域网中的应用 .....	22
2.2.1 WLAN IEEE 802.11a .....	23
2.2.2 HiperLAN/2 系统 .....	33
2.3 小结 .....	41
参考文献 .....	41
<b>第 3 章 OFDM 信号检测技术</b> .....	43
3.1 差分解调 .....	43
3.1.1 时域差分 .....	44
3.1.2 频域差分 .....	44
3.2 相干解调 .....	44
3.3 信道估计 .....	46
3.3.1 基本介绍 .....	46
3.3.2 慢衰落信道下的信道估计算法 .....	47
3.4 同步技术 .....	63
3.4.1 频率同步的必要性 .....	63

3.4.2	OFDM 系统同步的实现.....	65
3.5	小结 .....	76
	参考文献 .....	77
<b>第 4 章</b>	<b>OFDM 中的峰均比问题</b> .....	80
4.1	峰均比定义及分布 .....	80
4.2	解决峰均比问题的方法 .....	82
4.2.1	限幅类技术 .....	82
4.2.2	编码类技术 .....	95
4.2.3	概率类技术 .....	100
4.3	小结 .....	112
	参考文献 .....	113
<b>第 5 章</b>	<b>OFDM 多址接入技术</b> .....	116
5.1	OFDM 的多种接入方式.....	116
5.1.1	跳频 OFDMA(FH-OFDMA)方案 .....	118
5.1.2	OFDM-FDMA 基本原理 .....	119
5.1.3	OFDM-TDMA 基本原理.....	121
5.2	多载波 CDMA .....	124
5.2.1	概述 .....	124
5.2.2	多载波 CDMA 方案 .....	125
5.2.3	MC-CDMA 系统描述.....	128
5.2.4	MC-CDMA 系统参数最佳化.....	138
5.2.5	MC-CDMA 性能分析.....	139
5.2.6	MC-CDMA 的扩频序列.....	141
5.2.7	VSF-OFCDM.....	145
5.2.8	高速高容量的宽带无线接入技术 .....	150
5.3	小结 .....	152
	参考文献 .....	152
<b>第 6 章</b>	<b>OFDM 自适应技术</b> .....	155
6.1	自适应策略的根据: 信道状态信息 .....	155
6.2	自适应功率分配 .....	159
6.2.1	基于信道容量最优化的原则 .....	159
6.2.2	基于误比特率性能最优化的原则 .....	160
6.3	自适应调制技术 .....	166
6.3.1	Chow 算法 .....	167
6.3.2	Fischer 算法.....	167
6.3.3	简单分组比特分配算法(SBLA) .....	168

6.4	联合自适应比特、调制和功率分配	170
6.4.1	系统模型	171
6.4.2	单用户比特分配算法	173
6.4.3	多用户子载波和比特分配	174
6.4.4	性能比较	177
6.5	小结	183
	参考文献	183
<b>第7章</b>	<b>MIMO-OFDM 技术</b>	<b>184</b>
7.1	空时码概述	184
7.2	空时分组码	185
7.2.1	STBC 的基本原理	185
7.2.2	STBC 在 3GPP 及 3GPP2 中的应用	188
7.3	空时格码	190
7.3.1	空时格形编码的系统模型	190
7.3.2	独立准平坦衰落情况下的空时编码标准	191
7.3.3	准静态平坦衰落下空时码构建	193
7.4	空间复用技术	197
7.4.1	分层空时编码方案	198
7.4.2	对角分层空时编码的译码与接收	199
7.5	改进的空时处理技术	200
7.5.1	基于 STBC 的技术	200
7.5.2	基于空时格码(STTC)的技术	201
7.5.3	空间复用技术	202
7.6	MIMO 信道建模	202
7.6.1	MIMO 系统的信道容量	203
7.6.2	MIMO 信道的相关性	205
7.6.3	相关矩阵的计算	206
7.7	多输入多输出正交频分复用技术	208
7.7.1	MIMO-OFDM 系统	208
7.7.2	MIMO-OFDM 系统中的空时编码技术	211
7.7.3	MIMO-OFDM 系统中的空时频编码技术	214
7.8	小结	215
	参考文献	215
<b>第8章</b>	<b>OFDM 在蜂窝移动通信系统中的应用</b>	<b>218</b>
8.1	快衰落信道下的信道估计	218
8.1.1	系统等效基带模型	218
8.1.2	信道估计算法	219

8.2 双工模式和多用户复用方式 .....	226
8.2.1 基于 OFDM 的多址接入方式.....	226
8.2.2 TDD 和 FDD .....	227
8.2.3 各种不同的多址接入和双工系统 .....	228
8.3 频率复用策略 .....	233
8.4 小结 .....	235
参考文献 .....	236



# 第 1 章 OFDM 技术简介

## 1.1 移动通信的发展状况

移动通信是现代通信系统中不可缺少的组成部分。顾名思义，移动通信就是指通信双方至少有一方在运动状态中进行信息传输。例如移动台(由车辆、船舶、飞机或者行人携带)与固定点之间或者移动台之间的通信都属于移动通信的范畴。另外，还有一种可移动的概念，即通信用户的位置是可变的，但在通信过程中用户不处于运动状态。这类通信也可称为移动通信，但与严格意义的移动通信相比，两者的无线信道特性有较大的差别。

移动通信不但集中了无线通信和有线通信的最新技术成就，而且集中了网络接收和计算机技术的许多成果。目前，移动通信已从模拟通信发展到了数字通信阶段，并且正朝着个人通信这一更高级阶段发展。未来移动通信的目标是，能在任何时间任何地点，向任何人提供快速可靠的通信服务。可以说移动通信从无线电通信发明之日就产生了。1897 年，M.G. 马可尼所完成的无线通信实验就是在固定点与一艘拖船之间进行的，当时的距离为 18 海里(约 33 公里)。现代移动通信技术的发展始于 20 世纪 20 年代，但是一直到 20 世纪 70 年代中期，才迎来了移动通信的蓬勃发展。

1978 年底，美国贝尔实验室研制成功先进移动电话系统(AMPS)，建成了蜂窝状模拟移动通信网，大大提高了系统容量。与此同时，其他发达国家也相继开发出蜂窝式公共移动通信网。这一阶段的特点是蜂窝移动通信网成为实用系统，并在世界各地迅速发展。移动通信得到迅猛发展的原因，除了用户需求迅速增加这一主要推动力之外，还有几方面技术发展所提供的条件。首先，微电子技术在这一时期得到迅速发展，使得通信设备能够实现小型化、微型化。其次，贝尔实验室在 20 世纪 70 年代提出的蜂窝网的概念形成了移动通信新体制。蜂窝网，即所谓的小区制，由于实现了频率再用，大大提高了系统容量。第三方面进展是随着大规模集成电路的发展而出现的微处理器技术日趋成熟以及计算机技术的迅猛发展，为大型通信网的管理与控制提供了技术手段。这一阶段所诞生的移动通信系统一般被称为是第一代移动通信系统。

从 20 世纪 80 年代中期开始，数字移动通信系统进入发展和成熟时期。模拟蜂窝网的容量已不能满足日益增长的移动用户的需求。20 世纪 80 年代中期，欧洲首先推出了全球移动通信系统(GSM, Global System for Mobile)。随后美国和日本也相继指定了各自的数字移动通信体制。20 世纪 90 年代初，美国 Qualcomm 公司推出了窄带码分多址(CDMA, Code-Division Multiple Access)蜂窝移动通信系统，这是移动通信系统发展中的里程碑。从此，码分多址这种新的无线接入技术在移动通信领域占据了越来越重要的地位。这些目前正在广泛使用的数字移动通信系统就是第二代移动通信系统。

第二代移动通信系统主要是为支持话音和低速率的数据业务而设计的。但随着人们对通信业务范围和业务速率要求的不断提高，已有的第二代移动通信网将很难满足新的业务需求。

为了适应新的市场需求,人们正在发展第三代(3G)移动通信系统。但是由于 3G 系统的核心网还没有完全脱离第二代移动通信系统的核心网结构,所以普遍认为 3G 系统仅仅是一个从窄带向未来移动通信系统过渡的阶段。目前,人们已经把目光越来越多地投向超 3G(beyond 3G)的移动通信系统,该系统可以容纳庞大的用户数、改善现有通信质量,达到高速数据传输的要求。从技术层面来看,3G 系统主要是以 CDMA 为核心技术,而在 3G 以后的移动通信系统中正交频分复用(OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing)最受瞩目,有不少专家学者正针对 OFDM 技术在无线通信技术上的应用从事研究。

目前世界范围内存在有多种数字无线通信系统,其中主要包括 GSM 系统、IS-136 TDMA 系统以及 IS-95 CDMA 系统 [1]。其中 GSM 系统占据全球移动通信市场份额的 58%,可以提供 2.4kbit/s~9.6kbit/s 以及 14.4kbit/s 的电路交换语音业务,还可以通过 GPRS 和 EDGE 分别提供 144kbit/s 和 384 kbit/s 的分组交换数据业务。IS-136 系统占有全球市场 9%的份额,它可以提供 9.6kbit/s IS-136 的电路交换语音和传真业务,其最高数据传输速率可达 40kbit/s~60kbit/s。IS-95 系统占有的市场份额是 14%,它能够提供可变速率接入,其峰值速率分别可以达到 9.6kbit/s 和 14.4kbit/s,还可以通过使用蜂窝数字分组数据(CDPD, Cellular Digital Packet Data)网络来提供 19.2kbit/s 的数据业务。显然,基于支持语音业务电路交换模式的第二代移动通信系统不能满足多媒体业务的需要。

对于高速数据业务来说,单载波时分多址接入(TDMA, Time Division Multiple Access)系统和窄带 CDMA 系统都存在很大的缺陷。由于无线信道存在时延扩展,高速信息流的符号宽度又相对较窄,所以符号之间会存在较严重的符号间干扰(ISI, Inter-Symbol Interference),这对单载波 TDMA 系统中使用的均衡器提出了非常高的要求,即抽头数量要足够大,训练符号要足够多,训练时间要足够长,从而均衡算法的复杂度也会大大增加。对于窄带 CDMA 来说,其主要问题在于扩频增益与高速数据流之间的矛盾。在保证相同带宽的前提下,高速数据流所使用的扩频增益就不能太高,这样就大大限制了 CDMA 系统抵抗噪声的优点,从而使得系统的软容量受到一定的影响,如果保持原来的扩频增益,则必须要相应地提高带宽。此外,CDMA 系统一个非常重要的特点是采用闭环的功率控制,这在电路交换系统中比较容易实现,但对于分组业务来说,对信道进行预测,然后再返回功率控制命令会导致较大的时延,因此对于高速的无线分组业务来说,这种闭环的功率控制问题也存在缺陷。

因此,人们开始关注 OFDM 系统,希望通过这种方法来解决高速信息流在无线信道中的传输问题,从而可以满足带宽要求更高的多种多媒体业务和更快的网络浏览速度。

## 1.2 OFDM 系统的发展现状

OFDM 的提出已有近 40 年的历史 [2],第一个实际应用是军用的无线高频通信链路。但这种多载波传输技术在双向无线数据方面的应用却是近 10 年来的新趋势。经过多年的发展,该技术在广播方式下的音频和视频领域已得到广泛的应用。近年来,由于数字信号处理(DSP, Digital Signal Processing)技术的飞速发展,OFDM 作为一种可以有效对抗 ISI 的高速传输技术,引起了广泛关注。OFDM 技术已经成功地应用于非对称数字用户环路(ADSL, Asymmetric Digital Subscriber Line)、无线本地环路(WLL, Wireless Local Loop)、数字音频广播(DAB, Digital Audio Broadcasting)、高清晰度电视(HDTV, High-definition Television)、无

线局域网(WLAN, Wireless Local Area Network)等系统中, 它可以有效地消除信号多径传播所造成的 ISI 现象, 因此在移动通信中的运用也是大势所趋。1999 年 IEEE802.11a 通过了一个 5GHz 的无线局域网标准, 其中采用了 OFDM 调制技术并将其作为它的物理层标准。欧洲电信标准协会(ETSI)的宽带射频接入网(BRAN, Broad Radio Access Network)的局域网标准也把 OFDM 定为它的标准调制技术。

1999 年 12 月, 包括 Ericsson、Nokia 和 Wi-LAN 在内的 7 家公司发起了国际 OFDM 论坛, 致力于策划一个基于 OFDM 技术的全球性统一标准。现在 OFDM 论坛的成员已增加到 46 个会员, 其中 15 个为主要会员。我国的信息产业部也已参加了 OFDM 论坛, 可见 OFDM 在无线通信的应用已引起国内通信界的重视。2000 年 11 月, OFDM 论坛的固定无线接入工作组向 IEEE802.16.3 的无线城域网委员会提交了一份建议书, 提议采用 OFDM 技术作为 IEEE802.6.3 城域网的物理层(PHY)标准。随着 IEEE802.11a 和 BRANHyperlan / 2 两个标准在局域网的普及应用, OFDM 技术将会进一步在无线数据本地环路的广域网领域做出重大贡献。OFDM 由于其频谱利用率高、成本低等原因越来越受到人们的关注。随着人们对通信数据化、宽带化、个人化和移动化的需求, OFDM 技术在综合无线接入领域将越来越得到广泛的应用。随着 DSP 芯片技术的发展, 傅里叶变换 / 反变换、64 / 128 / 256QAM 的高速 Modem 技术、格状编码技术、软判决技术、信道自适应技术、插入保护时段、减少均衡计算量等成熟技术的逐步引入, 人们开始集中精力开发 OFDM 技术在移动通信领域的应用, 预计 3G 以后移动通信的主流技术将是 OFDM 技术。

DAB 是在 AM 和 FM 等模拟广播基础上发展起来的, 可以提供与 CD 相媲美的音质以及其他的新型数据业务。1995 年, 由 ETSI 制定了 DAB 标准, 这是第一个使用 OFDM 的标准。接着在 1997 年, 基于 OFDM 的 DVB 标准也开始采用。在 ADSL 应用中, OFDM 被当作典型的离散多音频调制(DMT Modulation 技术), 成功地用于有线环境中, 可以在 1MHz 带宽内提供高达 8Mbit/s 的数据传输速率。1998 年 7 月, 经过多次的修改之后, IEEE802.11 标准组决定选择 OFDM 作为 WLAN(工作于 5GHz 频段)的物理层标准, 目标是提供 6Mbit/s 到 54Mbit/s 数据速率, 这是 OFDM 第一次被应用于分组业务通信系统中。此后, ETSI, BRAN 以及 MMAC 也纷纷采用 OFDM 作为其物理层的标准。

此外, OFDM 还易于结合时空编码、分集、干扰抑制以及智能天线等技术, 最大程度地提高物理层信息传输的可靠性。如果再结合自适应调制, 自适应编码以及动态子载波分配, 动态比特分配等技术, 其性能可以进一步得到提高。

### 1.3 OFDM 系统的优缺点

OFDM 技术有以下优点:

① 把高速率数据流通过串并转换, 使得每个子载波上的数据符号持续长度相对增加, 从而有效地减少由于无线信道的时延弥散所带来的 ISI, 减小了接收机内均衡的复杂度, 有时甚至可以不用均衡器, 而仅仅通过采用插入循环前缀的方法消除 ISI 的不利影响 [3]。

② 传统的频分多路传输方法是将频带分为若干个不相交的子频带来并行传输数据流, 各个子信道之间要保留足够的保护频带。而 OFDM 系统由于各个子载波之间存在正交性, 允许子信道的频谱相互重叠, 因此与常规的频分复用系统相比, OFDM 系统可以最大限度地利用

频谱资源 [4]。当子载波个数很大时,系统的频谱利用率趋于 2Baud/Hz。

③ 各个子信道的正交调制和解调可以通过采用离散傅里叶反变换(IDFT, Inverse Discrete Fourier Transform)和离散傅里叶变换(DFT, Discrete Fourier Transform)的方法来实现。在子载波数很大的系统中,可以通过采用快速傅里叶变换(FFT, Fast Fourier Transform)来实现[5]。而随着大规模集成电路技术与 DSP 技术的发展,快速傅里叶反变换(IFFT, Inverse Fast Fourier Transform)与 FFT 都是非常容易实现的。

④ 无线数据业务一般存在非对称性,即下行链路中的数据传输量要大于上行链路中的数据传输量,这就要求物理层支持非对称高速率数据传输, OFDM 系统可以通过使用不同数量的子信道来实现上行和下行链路中不同的传输速率。

⑤ OFDM 易于和其他多种接入方法结合使用,构成 OFDMA 系统,其中包括多载波码分多址 MC-CDMA [6]、跳频 OFDM 以及 OFDM-TDMA 等等,使得多个用户可以同时利用 OFDM 技术进行信息的传输。

但是 OFDM 系统由于存在多个正交的子载波,而且其输出信号是多个子信道的叠加,因此与单载波系统相比,存在如下缺点:

① 易受频率偏差的影响。由于子信道的频谱相互覆盖,这就对它们之间的正交性提出了严格的要求。由于无线信道的时变性,在传输过程中出现的无线信号频谱偏移或发射机与接收机本地振荡器之间存在的频率偏差,都会使 OFDM 系统子载波之间的正交性遭到破坏,导致子信道间干扰(ICI, Inter-Channel Interference),这种对频率偏差的敏感性是 OFDM 系统的主要缺点之一。

② 存在较高的峰值平均功率比。多载波系统的输出是多个子信道信号的叠加,因此如果多个信号的相位一致时,所得到的叠加信号的瞬时功率就会远远高于信号的平均功率,导致较大的峰值平均功率比(PAPR, Peak-to-Average power Ratio)。这就对发射机内放大器的线性度提出了很高的要求,因此可能带来信号畸变,使信号的频谱发生变化,从而导致各个子信道间的正交性遭到破坏,产生干扰,使系统的性能恶化。

## 1.4 OFDM 系统的关键技术

与下一代移动通信系统有关的 OFDM 系统的关键技术有以下几个方面:

### 1. 时域和频域同步

OFDM 系统对定时和频率偏移敏感,特别是实际应用中与 FDMA、TDMA 和 CDMA 等多址方式结合使用时,时域和频率同步显得尤为重要。与其他数字通信系统一样,同步分为捕获和跟踪两个阶段。在下行链路中,基站向各个移动终端广播发送同步信号,所以,下行链路同步相对简单,较易实现。在上行链路中,来自不同移动终端的信号必须同步到达基站,才能保证子载波间的正交性。基站根据各移动终端发来的子载波携带信息进行时域和频域同步信息的提取,再由基站发回移动终端,以便让移动终端进行同步。具体实现时,同步将分为时域同步和频域同步,也可以时域和频域同时进行同步。

### 2. 信道估计

在 OFDM 系统中,信道估计器的设计主要有两个问题:一是导频信息的选择。由于无线信道常常是衰落信道,需要不断对信道进行跟踪,因此导频信息也必须不断地传送;二是复

杂度较低和导频跟踪能力良好的信道估计器的设计。在实际设计中，导频信息的选择和最佳估计器的设计通常又是相互关联的，因为估计器的性能与导频信息的传输方式有关。

### 3. 信道编码和交织

为了提高数字通信系统性能，信道编码和交织是普遍采用的方法。对于衰落信道中的随机错误，可以采用信道编码；对于衰落信道中的突发错误，可以采用交织技术。实际应用中，通常同时采用信道编码和交织，进一步改善整个系统的性能。在 OFDM 系统中，如果信道衰落不是太严重，均衡是无法再利用信道的分集特性来改善系统性能的，因为 OFDM 系统自身具有利用信道分集特性的能力，一般的信道特性信息已经被 OFDM 这种调制方式本身所利用了。但是，OFDM 系统的结构却为在子载波间进行编码提供了机会，形成 COFDM 方式。编码可以采用各种码，如分组码、卷积码等，其中卷积码的效果要比分组码好。

### 4. 降低峰值平均功率比

由于 OFDM 信号时域上表现为  $N$  个正交子载波信号的叠加，当这  $N$  个信号恰好均以峰值相加时，OFDM 信号也将产生最大峰值，该峰值功率是平均功率的  $N$  倍。尽管峰值功率出现的概率较低，但为了不失真地传输这些高 PAPR 的 OFDM 信号，发送端对高功率放大器 (HPA) 的线性度要求很高，从而导致发送效率极低，接收端对前端放大器以及 A/D 变换器的线性度要求也很高。因此，高的 PAPR 使得 OFDM 系统的性能大大下降甚至直接影响实际应用。为了解决这一问题，人们提出了基于信号畸变技术、信号扰码技术和基于信号空间扩展等降低 OFDM 系统 PAPR 的方法。

### 5. 均衡

在一般的衰落环境下，OFDM 系统中均衡不是有效改善系统性能的方法。因为均衡的实质是补偿多径信道引起的码间干扰，而 OFDM 技术本身已经利用了多径信道的分集特性，因此在一般情况下，OFDM 系统就不必再做均衡了。在高度散射的信道中，信道记忆长度很长，循环前缀 (CP, Cyclic Prefix) 的长度必须很长，才能够使 ISI 尽量不出现。但是，CP 长度过长必然导致能量大量损失，尤其对于子载波个数不是很大的系统。这时，可以考虑加均衡器以使 CP 的长度适当减小，即通过增加系统的复杂性换取系统频带利用率的提高。

此外，OFDM 与空时编码、智能天线等技术的结合也备受关注，有关这方面在后面的章节有详细论述。

## 参 考 文 献

- 1 J E Padgett, C G Gunther, T Hattori. Overview of wireless personal communications. IEEE Communications Magazine, 1995, (33): 28~41
- 2 R W Chang. Synthesis of band-limited orthogonal signals for multichannel data transmission. Bell Syst. Tech. J, 1996, (45): 1775~1796
- 3 C E Shannon. A mathematical theory of communications: Part II. Bell Syst, Tech. J. , 1978, (27): 623~657
- 4 G R Cooper, R W Netteton . A spread spectrum technique for high capacity mobile communications. IEEE Trans. on Veh, Technol, 1978, (27): 264~275
- 5 J Mikkonen, Jkruys. The Magic WAND-a wireless ATM access system . ACTS mobile Communications summit , Granada, Spain, 1996

- 6 N Yee, J P Linnarz, G Fettweis. Multi-carrier CDMA in indoor wireless radio networks. Proceedings IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Commun. Yokohama, Japan, 1993:109~113

## 第2章 OFDM 技术基础

正交频分复用(OFDM)技术与已经普遍应用的频分复用(FDM, Frequency Division Multiplexing)技术十分相似。与 FDM 基本原理相同, OFDM 把高速的数据流通过串并变换, 分配到速率相对较低的若干个频率子信道中进行传输, 不同的是, OFDM 技术更好地利用了控制方法, 使频谱利用率有所提高。OFDM 与 FDM 的主要差别有以下几方面:

(1) 在常规的广播系统中, 每一个无线基站在不同的频率上发送信号, 有效地运用 FDM 来保证每个站点的分隔, 广播系统中的每一个站点没有任何的同位或同步。但使用 OFDM 传播技术, 譬如 DAB, 从多个无线基站来的信息信号被组合成一个单独的复用数据流, 这些数据是由多个子载波密集打包组成的, 然后将在 OFDM 体系中传输, 在 OFDM 信号内的所有子载波都在时间和频率上同步, 使子载波之间的干扰被严格控制。这些复用的子载波在频域中交错重叠, 但因为调制的正交性且采用循环前缀作为保护间隔, 所以不会发生载波间干扰(ICI, Inter-Carrier Interference)。

(2) 对传统的 FDM 系统而言, 传输的信号需要在两个信道之间存在较大的频率间隔即保护带宽来防止干扰, 这降低了全部的频谱利用率。然而应用 OFDM 的子载波正交复用技术大大减少了保护带宽, 提高了频谱利用率, 如图 2-1 所示。在早期的 OFDM 系统中, 各子载波采用正交滤波器将信道分成多个子信道, 但要用很多的滤波器, 尤其是当路数增多的时候。1971 年, Weinstein 及 Ebert 等将 DFT 应用在多载波传输系统中, 从而很方便地实现了多路信号的复合和解解[2]。OFDM 系统的一个重要优点就是可以利用快速傅里叶变换实现调制和解调, 从而大大简化系统实现的复杂度。

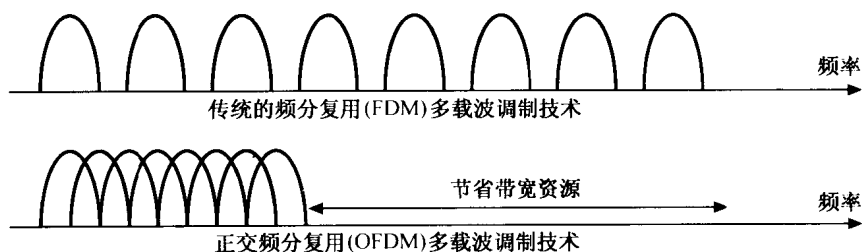


图 2-1 FDM 与 OFDM 带宽利用率的比较

OFDM 是一种特殊的多载波传输方案, 它可以被看作是一种调制技术, 也可以被当作一种复用技术。多载波传输把数据流分解成若干子比特流, 这样每个子数据流将具有低得多的比特速率, 用这样的低比特率形成的低速率多状态符号再去调制相应的子载波, 就构成多个低速率符号并行发送的传输系统。正交频分复用是对多载波调制(MCM, Multi-Carrier Modulation)的一种改进。它的特点是各子载波相互正交, 所以扩频调制后的频谱可以相互重叠, 不但减小了子载波间的相互干扰, 还大大提高了频谱利用率。选择 OFDM 的一个主要原因在于该系统能够很好地对抗频率选择性衰落和窄带干扰。在单载波系统中, 一次衰落或者

干扰会导致整个链路失效，但是在多载波系统中，某一时刻只会有少部分的子信道受到深衰落的影响。

本章从 OFDM 的基本原理着手，详细介绍了搭建 OFDM 系统的各种核心技术，包括串并变换、子载波调制、DFT 实现、保护间隔与循环前缀和 OFDM 基本参数的选择等等，另外，还着重于无线局域网的应用方面，介绍了 OFDM 在 WLAN IEEE 802.11a 协议和 HiperLAN/2 协议中的典型应用。

## 2.1 OFDM 的基本原理

### 2.1.1 OFDM 的产生和发展

OFDM 的思想早在 20 世纪 60 年代[1]就已经提出，由于使用模拟滤波器实现起来的系统复杂度较高，所以一直没有发展起来。在 20 世纪 70 年代，S.B.Weinstein 提出用离散傅里叶变换(DFT)实现多载波调制，为 OFDM 的实用化奠定了理论基础[2]；在 80 年代，L.J.Cimini 首先分析了 OFDM 在移动通信应用中存在的问题和解决方法[3]，从此以后，OFDM 在移动通信中的应用得到了迅猛的发展。

OFDM 系统收发机的典型框图[5]如图 2-2 所示。发送端将被传输的数字信号转换成子载波幅度和相位的映射，并进行离散傅里叶反变换(IDFT)将数据的频谱表达式变到时域上。IFFT 变换与 IDFT 变换的作用相同，只是有更高的计算效率，所以适用于所有的应用系统。其中，上半部分对应于发射机链路，下半部分对应于接收机链路。由于 FFT 操作类似于 IFFT，因此发射机和接收机可以使用同一硬件设备。当然，这种复杂性的节约则意味着该收发机不能同时进行发送和接收操作。

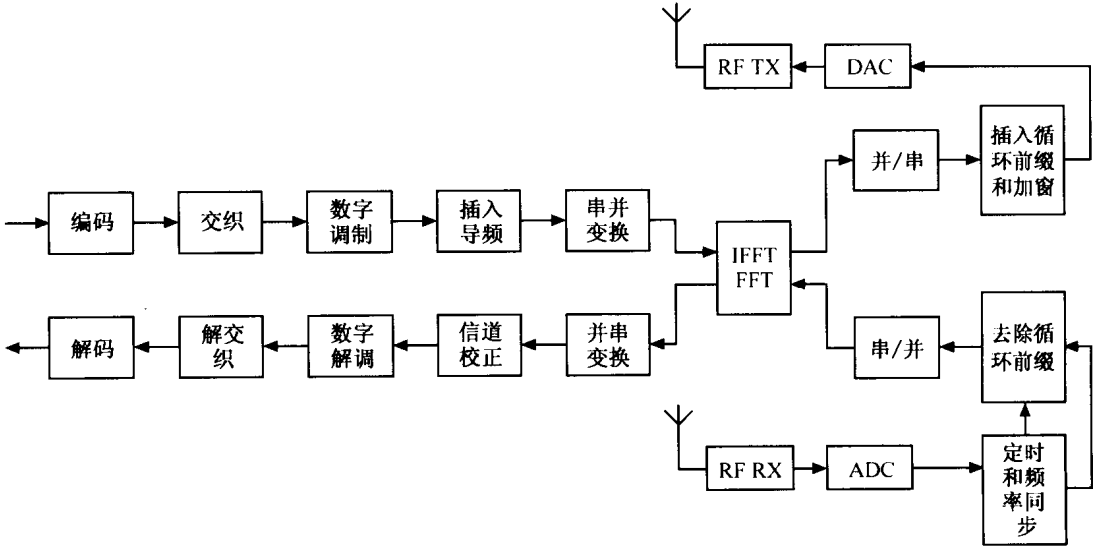


图 2-2 OFDM 收发机框图

接收端进行发送端相反的操作，将射频(RF, Radio Frequency)信号与基带信号进行混频处理，并用 FFT 变换分解频域信号，子载波的幅度和相位被采集出来并转换回数字信号。IFFT



和 FFT 互为反变换, 选择适当的变换将信号接收或发送。当信号独立于系统时, FFT 变换和 IFFT 变换可以被交替使用。

### 2.1.2 串并变换

数据传输的典型形式是串行数据流, 符号被连续传输, 每一个数据符号的频谱可占据整个可利用的带宽。但在并行数据传输系统中, 许多符号被同时传输, 减少了那些在串行系统中出现的问题。

在 OFDM 系统中, 每个传输符号速率的大小大约在几十 bit/s 到几十 kbit/s 之间, 所以必须进行串并变换, 将输入串行比特流转换为可以传输的 OFDM 符号。由于调制模式可以自适应调节, 所以每个子载波的调制模式是可变化的, 因而每个子载波可传输的比特数也是可变化的, 所以串并变换需要分配给每个子载波数据段的长度是不一样的。在接收端执行相反的过程, 从各个子载波处来的数据被转换回原始的串行数据[17]。

当一个 OFDM 符号在多径无线信道中传输时, 频率选择性衰落会导致某几组子载波受到相当大的衰减, 从而引起比特错误。这些在信道频率响应上的零点会造成在邻近的子载波上发射的信息受到破坏, 导致在每个符号中出现一连串的比特错误。与一大串错误连续出现的情况相比较, 大多数前向纠错编码(FEC, Forward Error Correction)在错误分布均匀的情况下会工作得更有效。所以, 为了提高系统的性能, 大多数系统采用数据加扰作为串并转换工作的一部分。这可以通过把每个连续的数据比特随机地分配到各个子载波上来实现。在接收机端, 进行一个对应的逆过程解出信号。这样, 不仅可以还原出数据比特原来的顺序, 同时还可以分散由于信道衰落引起的连串的比特错误使其在时间上近似均匀分布。这种将比特错误位置的随机化可以提高前向纠错编码 FEC 的性能, 并且系统的总的性能也得到改进。

表 2-1 列出了单载波和多载波传输方式在符号时间、速率、频带带宽和对 ISI 敏感度等几方面的比较。其中,  $N$  为子载波个数,  $T_s$  为一个 OFDM 符号的持续时间。

表 2-1 单载波和多载波传输方式的比较

系统参数 \ 传输方式	单载波	多载波
符号时间	$T_s/N$	$T_s$
速率	$N/T_s$	$1/T_s$
总频带带宽	$2 \times N/T_s$	$2 \times N/T_s + N \times 0.5/T_s$ (假设保护带宽=0.5/T <sub>s</sub> )
ISI 敏感度	较敏感	较不敏感

### 2.1.3 子载波调制

一个 OFDM 符号之内包含多个经过相移键控(PSK)或者正交幅度调制(QAM)的子载波。其中,  $N$  表示子载波的个数,  $T$  表示 OFDM 符号的持续时间(周期),  $d_i (i=0,1,2,\dots,N-1)$  是分配给每个子信道的数据符号,  $f_i$  是第  $i$  个子载波的载波频率, 矩形函数  $\text{rect}(t)=1, |t| \leq T/2$ , 则从  $t=t_0$  开始的 OFDM 符号可以表示为: