

01010101100  
1010101100

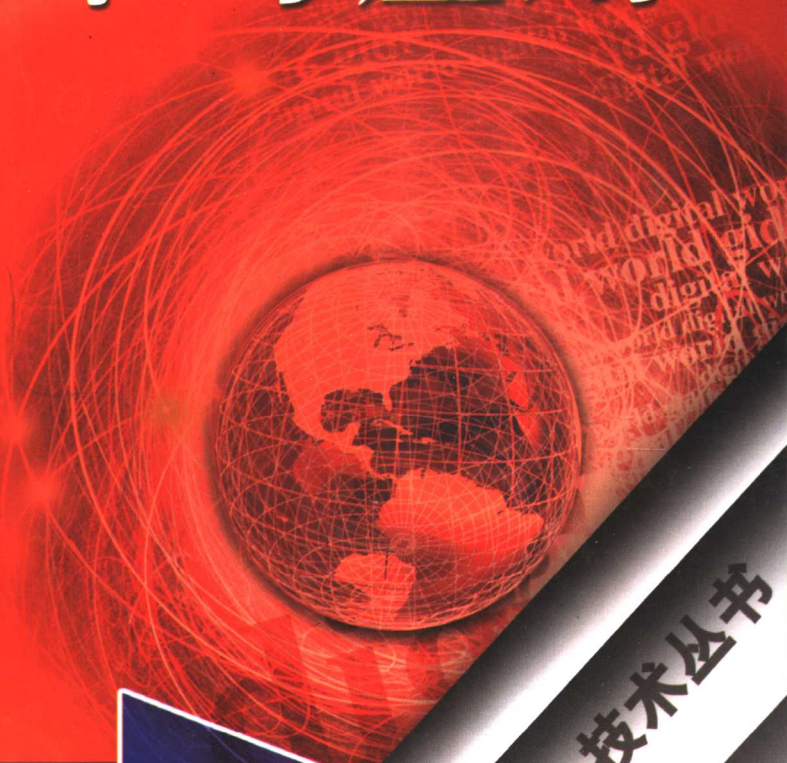
CMP 科技经典  
3G/B3G

核心技术丛书

# OFDM

## 关键技术与应用

汪裕民 编著

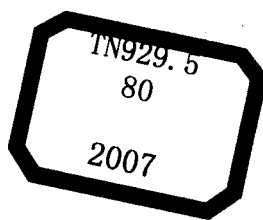


3G/B3G 核心技术丛书



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

3G/B3G 核心技术丛书



# OFDM 关键技术与应用

汪裕民 编著

机械工业出版社

本书介绍了正交频分复用 (OFDM) 技术的原理及其在无线通信领域内的应用。全书共分 10 章。第 1 章简要介绍了移动通信的发展现状、无线的基本知识, 以及 OFDM 系统的整体情况; 第 2 章介绍了 OFDM 技术的基本原理; 第 3 章较为详细的介绍了 OFDM 在不同领域中的应用; 第 4 章对 OFDM 技术的关键技术即同步问题进行了讨论; 第 5 章介绍了 OFDM 技术中的信道估计; 第 6 章叙述了 OFDM 技术中峰均功率比的问题, 并提出了抑制峰值功率的方法; 第 7 章讨论了自适应技术在 OFDM 中的应用; 第 8 章介绍了空时编码以及 MIMO-OFDM 技术的关键技术; 第 9 章讨论了 CDMA 与 OFDM 技术的结合; 第 10 章给出了一个自适应 MIMO-OFDM 的仿真实例以及同步和信道估计的部分关键程序。

本书可作为通信专业本科生、研究生以及技术人员的参考书。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

OFDM 关键技术与应用/汪裕民编著. —北京: 机械工业出版社, 2006.10  
(3G/B3G 核心技术丛书)

ISBN 7-111-20108-6

I. O... II. 汪... III. 无线电通信 IV. TN92

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 124062 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 张俊红 责任编辑: 朱林 版式设计: 霍永明

责任校对: 唐海燕 封面设计: 马精明 责任印制: 杨曦

成都新华印务有限责任公司印刷

2007 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 16.25 印张 · 398 千字

0001 - 4000 册

定价: 29.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68326294

编辑热线电话 (010) 88379768

封面无防伪标均为盗版

## 3G/B3G 核心技术丛书

# 编 委 会

主任委员：袁超伟 姜宇柏

委 员(排名不分先后)：

程宝平 曾春亮 黄 韬 梁守青

贾 宁 赵 鑫 俞一鸣 汪裕民

杨睿哲 李美玲 张 宁 齐伟民

孙昌璐 刘 鸣 王旭莹 蒋建新

# 丛 书 序

目前，3G已成为中国传统电信运营企业转型的关键之一，同时成为中国电信设备制造企业国际化发展的重要机遇。

然而，随着宽带数据和多媒体业务的迅猛发展，第三代移动通信原定目标规定的2Mbit/s的传输速率已经远远不能满足需求，3G技术正在朝着B3G、4G技术方向发展。由于我国至今没有正式颁发3G业务牌照，一方面使得国内很多著名的3G设备制造企业不得不将更多的精力放在国际市场的开拓上；另一方面使得我国可以充分发挥后发优势，在3G网络的建设过程中可以引入各项成熟的新技术，即在我国3G网络中直接应用部分B3G乃至4G的核心技术，提高我国3G网络的业务能力。

因此，我们策划了这套“3G/B3G核心技术丛书”，对HSDPA/HSUPA技术、IMS技术、OFDM技术、MIMO技术、智能天线技术、软件无线电技术和WiMAX技术等主流的新技术进行阐述，内容涉及3G/B3G网络的无线接入、核心网、智能天线、频分复用、系统设计等多个方面。

希望通过阅读本套丛书，读者能够比较全面地了解3G/B3G系统的各项核心技术，更希望本套丛书能对我国3G/B3G系统的网络建设和产业发展作出一定的贡献。

由于通信技术发展十分迅速，加上编写时间相对紧张，书中难免存在不足，恳请广大读者和专家批评指正，联系信箱 [buptzjh@163.com](mailto:buptzjh@163.com)。

3G/B3G核心技术丛书编委会

2006年8月

# 前 言

正交频分复用 (OFDM) 是由多载波调制 (MCM) 发展而来的。早在 20 世纪的五六十年代就由美国军方创建了世界上第一个 MCM 系统, 在 1970 年衍生出了采用大规模子载波和频率重叠技术的 OFDM 系统。但在以后相当长的一段时间里, OFDM 理论向实践迈进的脚步放缓了。

随着 DSP 芯片技术的发展, 大规模集成电路让 FFT 技术的实现不再是难以逾越的障碍, 发射机和接收机振荡器的稳定性以及射频功率放大器的线性要求等因素也都得到了解决, 自此, OFDM 走上了通信的舞台, 逐步迈入高速 Modem 和数字移动通信的领域。

正交频分复用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会越来越得到广泛的应用。

OFDM 技术经过多年的发展, 在广播式的音频和视频领域已得到广泛的应用。自 20 世纪 90 年代起, OFDM 技术开始被欧洲和澳大利亚广泛应用于广播信道的宽带数据通信, 数字音频广播 (DAB)、高清晰度数字电视 (HDTV) 等方面。1999 年 12 月, 包括 Ericsson、Nokia 和 Wi-LAN 在内的 7 家公司创建了国际 OFDM 论坛, 致力于策划一个基于 OFDM 技术的全球性单一标准, 目前 OFDM 论坛的成员已增加到 46 个会员, 我国的信息产业部也是重要的一个成员, 可见 OFDM 技术在无线通信中的应用已引起国内通信界的重视。2000 年 11 月, OFDM 论坛提议采用 OFDM 技术作为 IEEE 802.16.3 城域网的物理层 (PHY) 标准, 并向 IEEE 802.16 的无限城域网委员会提交了一份建议书。随着 IEEE 802.11a 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作出重大贡献。

本书在 OFDM 基本原理和应用方面作了深入浅出的讨论, 对 OFDM 通信系统中的关键技术例如抑制峰均功率比的算法、同步技术、信道估计问题、自适应技术、与 MIMO 技术的结合、与 CDMA 的结合等都作了比较详细的介绍和分析, 并在本书的最后部分给出了一个完整的实验过程。

本书主要由汪裕民编写, 另外, 姜宇柏、俞一鸣、赵鑫、黄韬、张凯、姜立冬、齐兆群、张蓬、赵海波、尤晓丽、葛树涛、程显奎、张博、李玉红、刘磊、张学静、李晓凯、吴鹏、张睿、黄志强、刘秀文、张涛、张海涛、渠丽娜完成了全书的资料收集工作, 并完成了全书的文字校对工作和部分章节的编写工作。同时, 作者在写作时还参考了国内外不少专家学者的著作, 在此一并表示感谢!

目前关于 OFDM 技术的专著在国内并不多。而通信专业的学生、科研人员以及业内进行 3G 或 LTE 研究的工程师, 都需要具备 OFDM 基本工作原理和关键技术等方面的知识。希望通过本书, 能给予读者一定的帮助。

作 者

2006 年 8 月

# 目 录

## 丛书序

## 前言

## 第 I 章 绪论 ..... 1

### 1.1 移动通信的发展现状 ..... 1

#### 1.1.1 第二代移动通信 ..... 1

#### 1.1.2 第三代移动通信 ..... 2

#### 1.1.3 发展第四代移动通信系统的 必要 ..... 3

### 1.2 无线通信信道 ..... 3

#### 1.2.1 无线通信系统 ..... 3

#### 1.2.2 无线通信的传播环境 ..... 3

#### 1.2.3 点对点信道和多址信道 ..... 6

### 1.3 电波传播特性 ..... 6

#### 1.3.1 电波传播的物理机理 ..... 6

#### 1.3.2 多径的成因 ..... 6

#### 1.3.3 大尺度路径损耗模型 ..... 7

#### 1.3.4 小范围路径损耗 ..... 8

#### 1.3.5 数学分析 ..... 9

#### 1.3.6 几个基本定义 ..... 11

### 1.4 无线传输技术 ..... 13

#### 1.4.1 双工复用模式和多址接入方式 ..... 13

#### 1.4.2 数字调制技术 ..... 18

#### 1.4.3 分集技术 ..... 19

#### 1.4.4 信道编码 ..... 20

#### 1.4.5 单载波系统和多载波系统 ..... 22

### 1.5 OFDM 技术综述 ..... 22

#### 1.5.1 OFDM 的发展历程 ..... 22

#### 1.5.2 OFDM 的关键技术 ..... 25

#### 1.5.3 OFDM 的优点与不足 ..... 28

#### 1.5.4 OFDM 与 CDMA 的结合 ..... 29

#### 1.5.5 OFDM 系统与 CDMA 系统 的比较 ..... 29

### 1.6 小结 ..... 31

## 第 2 章 OFDM 基本原理 ..... 33

### 2.1 OFDM 系统的基本结构 ..... 33

#### 2.1.1 OFDM 信号的产生 ..... 33

#### 2.1.2 用 DFT 实现 OFDM ..... 34

#### 2.1.3 保护间隔和循环前缀 ..... 37

#### 2.1.4 加窗技术 ..... 38

### 2.2 OFDM 时间连续系统模型 ..... 42

### 2.3 OFDM 时间离散系统模型 ..... 44

### 2.4 OFDM 信号的频谱特性 ..... 45

### 2.5 OFDM 系统参数的设计 ..... 46

## 第 3 章 OFDM 的应用 ..... 48

### 3.1 简介 ..... 48

### 3.2 OFDM 在数字音频广播中的应用 ..... 48

#### 3.2.1 数字音频广播简介 ..... 48

#### 3.2.2 DAB 系统使用 OFDM 技术的 原因 ..... 49

#### 3.2.3 DAB 信号的形成 ..... 49

### 3.3 OFDM 在数字电视广播中的应用 ..... 51

#### 3.3.1 不同的数字电视地面广播系统 ..... 51

#### 3.3.2 数字视频广播 ..... 52

#### 3.3.3 地面数字多媒体电视广播 ..... 53

### 3.4 OFDM 在无线接入技术中的应用 ..... 56

#### 3.4.1 无线局域网技术及 IEEE 802.11 协议群 ..... 56

#### 3.4.2 无线城域网及 IEEE 802.16 标准 ..... 60

### 3.5 OFDM 在第三代移动通信演进中的 应用 ..... 65

#### 3.5.1 LTE 的提出和主要方案 ..... 65

#### 3.5.2 TD-CDM-OFDM ..... 67

### 3.6 OFDM 技术在低压电力线通信中的 应用 ..... 71

#### 3.6.1 低压电力线上的数字传输特性 ..... 71

#### 3.6.2 低压 PLC 实现方案 ..... 72

### 3.7 小结 ..... 72

## 第 4 章 OFDM 同步技术 ..... 73

### 4.1 简介 ..... 73

### 4.2 OFDM 同步的基本原理 ..... 73

#### 4.2.1 OFDM 系统的 4 种同步 ..... 73

#### 4.2.2 OFDM 同步原理 ..... 74

### 4.3 同步偏差对 OFDM 系统性能的影响 ..... 78

#### 4.3.1 载波同步偏差的影响 ..... 78

4.3.2	样值同步对 OFDM 系统的影响	80	<b>第 7 章 自适应技术</b>	131
4.3.3	OFDM 符号同步对 OFDM 系统性能的影响	82	7.1 概述	131
4.3.4	总结	83	7.1.1 自适应技术的理论基础	131
4.4	OFDM 系统中的各种同步算法	84	7.1.2 自适应技术的实现	132
4.4.1	载波同步算法	84	7.1.3 影响自适应调制 OFDM 系统性能的几个因素	133
4.4.2	符号和帧定时同步算法	89	7.2 采用自适应调制的 OFDM 系统数学模型	134
4.4.3	样值同步算法	91	7.3 数字调制技术基础	135
4.4.4	联合同步算法	92	7.4 各种典型的自适应调制技术	136
4.5	小结	94	7.4.1 Hughes-Hartogs 梯度分配算法	136
<b>第 5 章 OFDM 中的信道估计</b>		95	7.4.2 Chow 算法	136
5.1	简介	95	7.4.3 Fischer 算法	137
5.2	基本概念	95	7.4.4 3 种算法的性能比较	138
5.3	非理想信道估计偏差对 OFDM 系统性能的影响	97	7.5 联合自适应比特、调制和功率分配	138
5.4	导频插入间隔以及导频图样	97	7.5.1 系统模型	138
5.5	信道估计算法	99	7.5.2 单用户比特分配	140
5.5.1	最小二乘估计	99	7.5.3 多用户子载波和比特分配	141
5.5.2	二维信道估计理论	100	7.6 小结	143
5.5.3	一维信道估计算法	103	<b>第 8 章 空时编码和 MIMO-OFDM 技术</b>	144
5.5.4	最大似然估计算法	104	8.1 简介	144
5.5.5	基于滤波器的信道估计算法	106	8.2 空时码概述	145
5.5.6	基于 DFT 的信道估计算法	107	8.3 空时分组码	145
5.6	小结	111	8.3.1 STBC 的基本原理	146
<b>第 6 章 OFDM 峰均功率比的解决方案</b>		112	8.3.2 STBC 在 3GPP 及 3GPP2 中的应用	148
6.1	简介	112	8.4 空时格码	149
6.2	OFDM PAR 的分布函数	113	8.4.1 空时格形编码的系统模型	149
6.3	限幅和峰值加窗技术	114	8.4.2 独立准平坦衰落情况下的空时编码标准	150
6.4	压扩变换	116	8.4.3 准静止平坦衰落下的空时码构建	152
6.5	加扰码减小 PAR 的方法	118	8.5 空间复用技术	153
6.5.1	选择性映射减小 PAR	118	8.5.1 分层空时编码方案	154
6.5.2	部分传输序列方法	119	8.5.2 对角分层空时编码的译码与接收	155
6.5.3	用迭代算法寻找次优辅助信息	121	8.6 MIMO-OFDM 技术综述	156
6.6	编码类技术	122	8.6.1 MIMO-OFDM 系统和信号模型	157
6.6.1	采用编码技术的原理	122	8.6.2 自适应 MIMO-OFDM	159
6.6.2	互补 Golay 序列构造降低信号 PAR 值的码集	124	8.6.3 降低 MIMO-OFDM 技术的峰值功率比的几种方法	161
6.6.3	构造格雷互补序列	126		
6.6.4	互补码的最大似然解码	128		
6.7	冲击整形	128		
6.8	小结	130		



8.6.4 MIMO-OFDM 信道估计技术 .....	164	9.4.2 MC-DS-CDMA .....	184
8.7 小结 .....	166	9.4.3 MT-CDMA .....	184
<b>第 9 章 CDMA 的基本原理及与 OFDM</b>		9.4.4 3 种系统性能比较 .....	185
<b>的结合 .....</b>	<b>167</b>	9.4.5 广义多载波 CDMA .....	186
9.1 CDMA 的发展状况 .....	167	9.5 小结 .....	187
9.1.1 3G 的标准化工作 .....	167	<b>第 10 章 MATLAB 仿真 OFDM 系统</b>	
9.1.2 3G 的演进策略 .....	167	<b>应用 .....</b>	<b>189</b>
9.1.3 CDMA 3 种体制的比较 .....	168	10.1 系统模型 .....	189
9.2 CDMA 的基本原理 .....	170	10.1.1 自适应调制和 MIMO .....	189
9.2.1 多址方式 .....	170	10.1.2 OFDM 系统的细节描述 .....	189
9.2.2 直接序列扩频 .....	170	10.1.3 仿真结果 .....	193
9.3 CDMA 的关键技术 .....	173	10.2 程序功能说明 .....	195
9.3.1 RAKE 接收机 .....	173	10.3 程序 .....	195
9.3.2 多用户检测技术 .....	174	<b>附录 .....</b>	<b>238</b>
9.3.3 功率控制技术 .....	175	附录 A 缩略语 .....	238
9.3.4 软切换 .....	176	附录 B BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM	
9.4 多载波 CDMA .....	180	星座图 .....	241
9.4.1 MC-CDMA .....	181	<b>参考文献 .....</b>	<b>243</b>

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 移动通信的发展现状

无线通信与个人通信在短短的几十年间经历了从模拟通信到数字通信、从 FDMA 到 CDMA 的巨大发展，目前又有新技术的出现，比以 CDMA 为核心的第三代移动通信技术更加完善，我们称之为“第四代移动通信技术”。

纵观移动通信的发展史（见图 1-1），第一代模拟系统仅提供语音服务，不能传输数据；第二代数字移动通信系统的数据传输速率也只有 9.6bit/s，最高可达 32kbit/s；第三代移动通信系统数据传输速率可达到 2Mbit/s；而我们目前所致力研究的第四代移动通信系统的数据传输速率可以达到 10 ~ 20Mbit/s。虽然第三代移动通信可以比现有传输速率快上千倍，但是仍无法满足未来多媒体通信的要求，第四代移动通信系统的提出便是希望能满足提供更大的频宽需求。

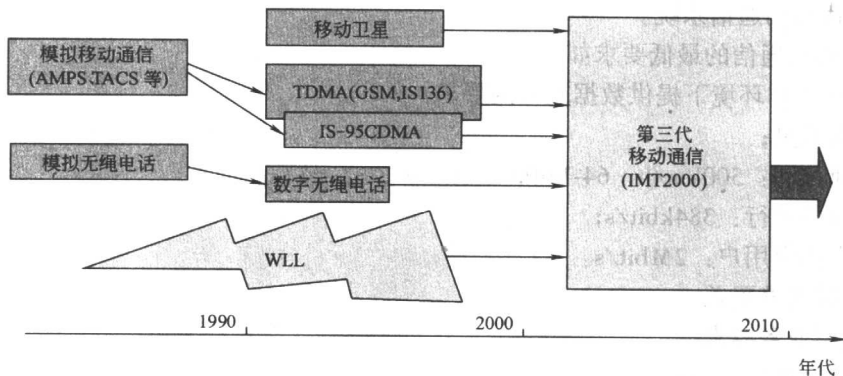


图 1-1 移动通信的演进及发展

第四代移动通信系统计划以 OFDM（正交频分复用）为核心技术提供增值服务，它在宽频领域的应用具有很大的潜力。较之第三代移动通信系统，采用多种新技术的 OFDM 具有更高的频谱利用率和良好的抗多径干扰能力，它不仅可以增加系统容量，更重要的是它能更好地满足多媒体通信要求，将包括语音、数据、影像等大量信息的多媒体业务通过宽频信道高品质地传出去。

### 1.1.1 第二代移动通信

#### 1. 主要制式

GSM

IS-95CDMA

IS136

TDMA/CDMA 数字无绳电话和 WLL。

## 2. 继续发展的可能性

基本满足了语音通信的要求；都将提供低速数据（64kbit/s）业务；成本和价格能被市场所接受；在频率资源允许时，在 2010 年前将继续发展。

## 3. 网络

MAP 和 IS-41 是第三代移动通信必须考虑的基础。

GSM 是世界上最大、最成功的第二代移动通信网，它标准化程度最好，设备价格能被运营商和用户所接受，DCS1800 提供更多频率资源。但是使用的技术相对落后。GSM 是向第三代移动通信发展的主要起点和网络基础（MAP），并在 2010 年前将继续获得发展。

IS-95 开辟了将 CDMA 使用于商用移动通信系统的前景，使主要第三代移动通信都选用 CDMA 技术。已提出了从 CDMAOne 到 CDMA2000 的和从第二代到第三代移动通信的演进方案。与 GSM 相比使用了多项新技术。它存在的主要问题有知识产权被垄断，进入市场的时间太晚，现有市场份额太小以及标准化程度较差。

### 1.1.2 第三代移动通信

第二代移动通信主要是为了满足语音业务和低速数据业务，但是为了支持视频、互联网等更高速的数据业务，第二代移动通信就不能满足这些需求。于是人们就开始研究基于 CDMA 的第三代移动通信系统。

第三代移动通信的最低要求如下：

(1) 4 种工作环境下提供数据业务的要求

- 1) 移动卫星；
- 2) 高速移动：500km/h，64-144kbit/s；
- 3) 室内外步行：384kbit/s；
- 4) 室内固定用户：2Mbit/s。

(2) 全球无缝覆盖

(3) 主要业务要求

- 1) 提供高质量语音；
- 2) 电路交换和包交换数据的高质量传输 ( $BER < 1 * 10^{-6}$ )；
- 3) 提供增值业务和智能网业务。

(4) 和第二代移动通信系统兼容

第三代移动通信的主要特点有以下 3 点：

- 1) 它是从现有第二代移动通信演进和发展而来，而不是完全重新建设的一个移动通信网；
- 2) 初期主要业务仍然是语音业务，数据业务将逐渐增加；
- 3) 数据业务将主要是 Internet 所需要的不对称的、基于包交换（IP）的业务。

第三代移动通信最主要是达到如下目标：

- 1) 全球漫游；
- 2) 高频谱利用率（解决全世界存在的系统容量问题）；
- 3) 低价格（设备和服务）；
- 4) 满足通信个人化的需求。

第三代移动通信在发展中遇到了以下一些技术问题：

#### 1) 知识产权 (IPR) 问题

WCDMA 和 CDMA2000 都属于 CDMA 技术，其基本专利在原理上是重叠的，可认为是基于 CDMA 核心专利的扩展，比如正交码扩频、PN 码加扰、多径合并、闭环功控、软切换等。

3G 标准中的核心技术被部分公司的专利垄断，使得我们在 WCDMA 以及 CDMA2000 中的专利不具备任何优势，同样更不具备交叉使用的任何余地。

大唐集团自 1999 年开始与西门子合作开发 TD-SCDMA 系统产品，双方在知识产权上已经达成了一致意见，即：双方合作以前的技术归各自所有，双方合作开发的技术由双方共有。高通公司声称也拥有 TD-SCDMA 的基本专利。

#### 2) 核心芯片问题

微电子、光电子、材料等基础产业技术薄弱、发展严重滞后。核心芯片设计和开发和商用化方面投入大、风险高、企业必须具有较高的风险承受力。

### 1.1.3 发展第四代移动通信系统的必要

对于目前高速数据业务来说，单载波通信系统包括 TDMA 和窄带的 CDMA 系统都存在很大的缺陷，由于无线信道存在时延扩展，而且高速信息流的符号宽度又很小，所以符号之间会存在比较严重的 ISI (码间干扰)，由此，对单载波 TDMA 系统中所使用的均衡器提出非常高的要求，包括要有足够多的抽头数量和训练符号等，而均衡算法的复杂度也大大增加。而对于窄带 CDMA 系统，主要问题在于扩频增益和高速数据流之间的矛盾。保持相同带宽的前提下，高速数据流所使用的扩频增益就要较低速数据流所使用的扩频增益小，从而限制了 CDMA 抗噪声的能力。因此，人们开始关注 OFDM 系统，希望通过这种方法来提供更高速度更快捷的无线业务。

## 1.2 无线通信信道

### 1.2.1 无线通信系统

无线通信系统的组成部分如图 1-2 所示。

基带单元主要完成的功能有：发送端：加扰码，交织，调制，基带成形；接收端：去扰码，均衡，解调。如图 1-3 所示。

中频单元将基带复矢量与发端中频本振相乘，再经中频放大滤波输出。接收端作相反操作，如图 1-4 所示。

射频单元将信号调制到发射频率上，具体功能如图 1-5 所示。

天线单元用于发送和接收信号，如图 1-6 所示。

### 1.2.2 无线通信的传播环境

无线传播环境的复杂，可分为天波（电离层、对流层），其中对流层传播距离为几百公里，电离层传播距离可达几千公里；地波（直射、反射、绕射）。

无线传播可分为带宽受限信道和功率受限信道，色散信道和非色散信道（时间和频率），

恒参信道和变参信道，点对点信道和多址信道。

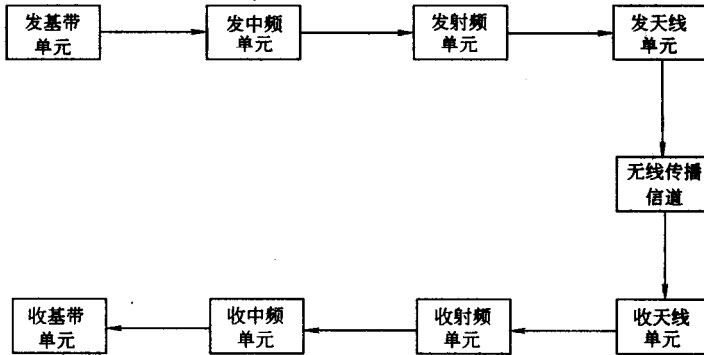


图 1-2 无线通信系统组成框图

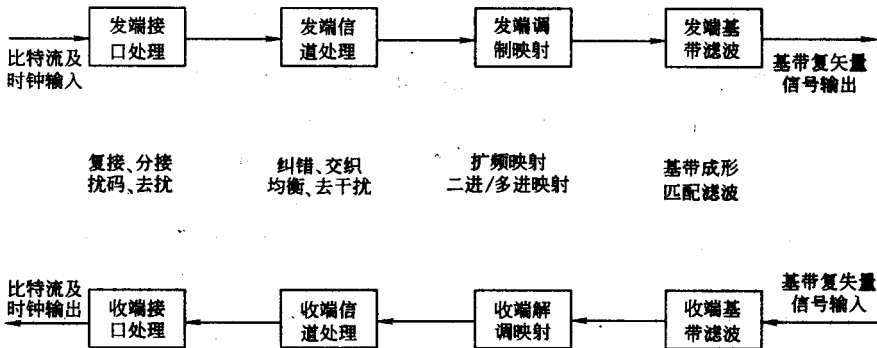


图 1-3 基带单元框图

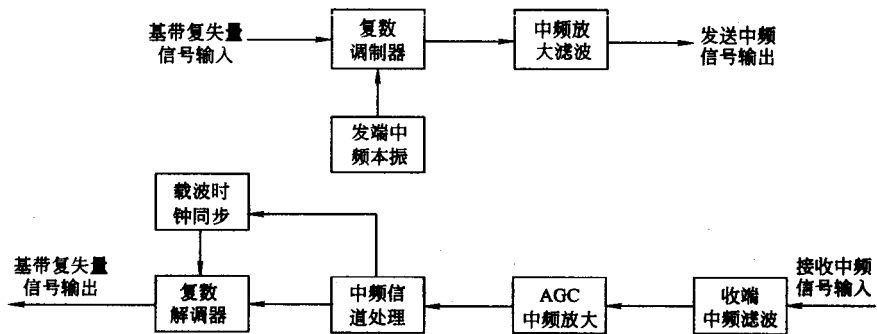


图 1-4 中频单元框图

### 1. 带宽受限信道和功率受限信道

加性高斯白噪声信道上的仙农定理

$$C = W \log_2(1 + S/N)$$

$$\text{令: } S/N = E_b/N_0 \cdot C/W$$

则仙农定理就可以写成：

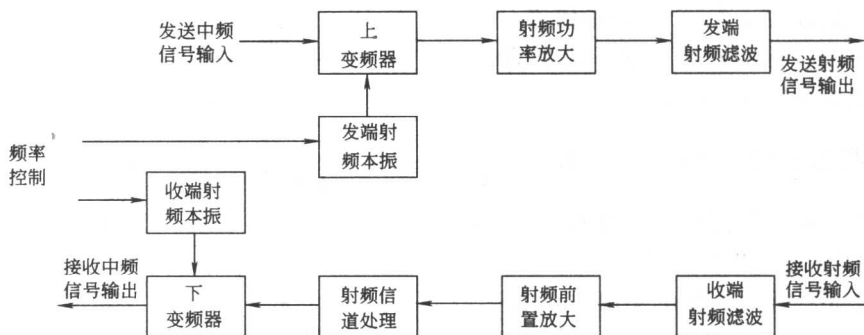


图 1-5 射频单元框图

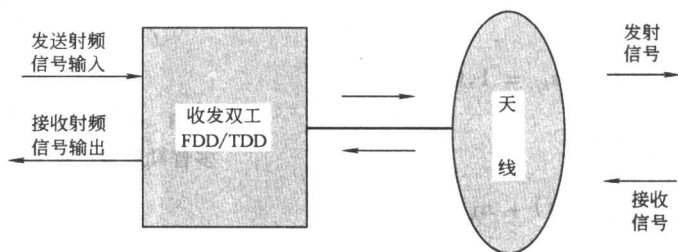


图 1-6 天线单元框图

$$E_b/N_0 = (2^{C/W} - 1) / (C/W)$$

所谓的带宽受限信道就是：

$$E_b/N_0 \uparrow \rightarrow C/W \uparrow \rightarrow W \downarrow \text{无限}$$

功率可以换取带宽。

所谓的功率受限信道就是：

$$W \uparrow \rightarrow C/W \downarrow \rightarrow E_b/N_0 \downarrow \text{有限}$$

当  $W \rightarrow \infty$ ,  $E_b/N_0 \rightarrow -1.6\text{dB}$ , 即为仙农极限, 带宽不能无限制地换取功率。

仙农信道容量曲线如图 1-7 所示。

### 2. 色散与非色散信道、恒参与变参信道

信道响应为  $C(\tau; t)$ , 其中  $\tau$  代表响应时间,  $t$  代表信号时刻。

输入信号为时域冲击函数, 检验是色散信道还是非色散信道。其中  $T_m$  为多径扩散, 其倒数  $\Delta f_c$  为相干带宽。

输入信号为频域冲击函数, 检验是恒参信道还是变参信道。其中  $B_d$  为多普勒展宽, 其倒数  $\Delta t_c$  为相干时间。

当信号带宽  $B > \Delta f_c$ , 为色散信道;

当信号带宽  $B < \Delta f_c$ , 为非色散信道;

当码元周期  $T > \Delta t_c$ , 为变参信道;

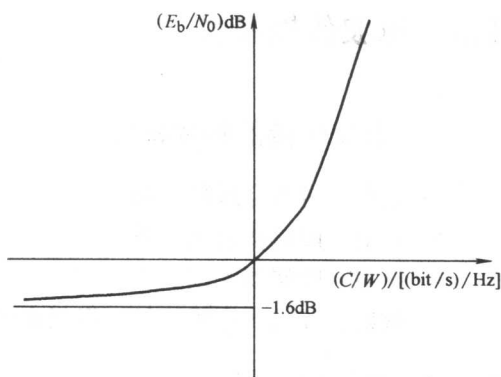


图 1-7 仙农容量曲线

当码元周期  $T < \Delta t_c$ ，为恒参信道。

相关带宽，多径扩散，多普勒展宽，相干时间关系如图 1-8 所示。

### 1.2.3 点对点信道和多址信道

点对点信道：和有线信道类似，体现不出无线的特点。如图 1-9 所示。

多址信道：无线传输的突出优点之一是能实现多址接入（见图 1-10）。设：有  $N$  个用户地址，第  $k$  个地址发送的信号为

$$S_k(t) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^N a_{kj} S_{kj}(t), a_{kj} = 1, 0$$

第  $k$  个地址接收的信号为

$$R(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N L_{ik} a_{ij} S_{ij}(t) + n_k(t)$$

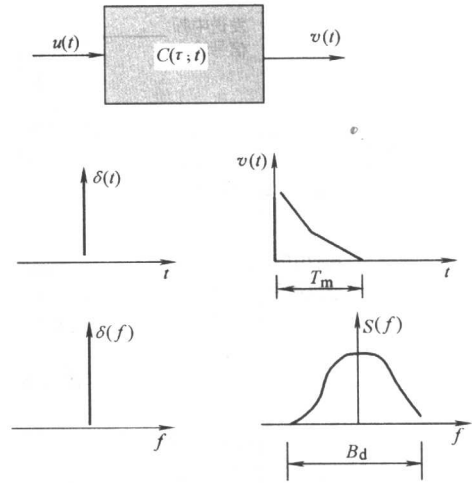


图 1-8 相关带宽，多径扩散，多普勒展宽，相干时间关系

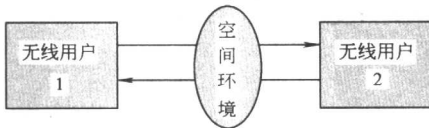


图 1-9 点对点通信

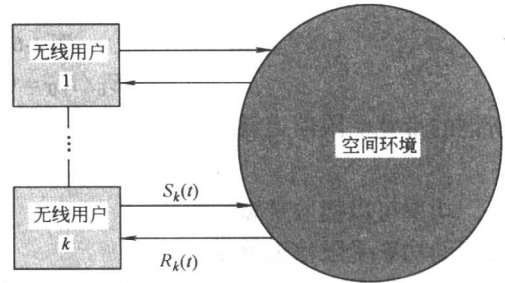


图 1-10 多址通信信道

## 1.3 电波传播特性

### 1.3.1 电波传播的物理机理

- 1) 透射：电波穿过障碍物；
- 2) 反射：障碍物远大于波长时；
- 3) 绕射：障碍物和波长相当时；
- 4) 散射：障碍物小于波长，但很多时反射物表面不平整。

### 1.3.2 多径的成因

由于透射，反射，衍射和散射等的原因，同一天线发出的信号通过不同路径到达接收天线，会造成以下 3 个结果：不同路径到达的波束相位随机；叠加后结果可能是相互增强，可

能是相互抵销，分别对应上衰落和下衰落；接收天线和发射天线相对运动导致了多径的变化，衰落状况也会变化。

### 1.3.3 大尺度路径损耗模型

大尺度路径损耗传播模型描述发射机和接收机之间长距离上平均场强的变化，用于预测平均场强并估计无线覆盖范围。

#### 1. 自由空间传播模型

自由空间传播是指在理想的、均匀的、各向同性的介质中传播，不发生反射、折射、散射和吸收现象，只存在电磁波能量扩散而引起的传播损耗的空间。卫星通信链路和微波视距传输链路是典型的自由空间传播。

在自由空间中，若发射点处以球面波辐射，则接收处的接收功率为

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L}$$

式中  $P_r(d)$ ——接收机入口功率；

$P_t$ ——发射机出口功率；

$G_t$ ——发射天线增益；

$G_r$ ——接收天线增益；

$d$ ——收发天线之间距离；

$L$ ——损耗因子，和路径无关，例如馈线损耗。

#### 2. 两径传播模型

移动通信中，基站和移动台都很低，地面反射影响很明显，两径模型是一个基本模型。如图 1-11 所示。反射的基本关系有：入射角等于反射角，良导体上，入射场强等于反射场强，相位差  $180^\circ$ 。

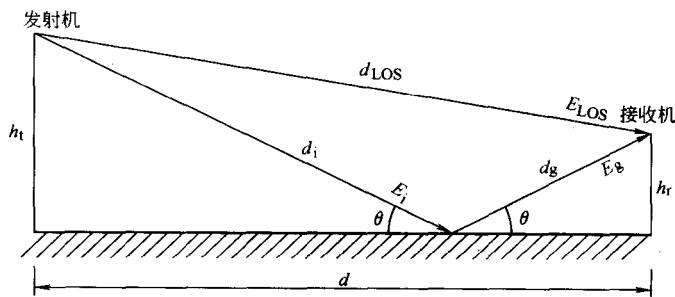


图 1-11 两径模型

$$|E_{TOT}| = |E_{LOS} + E_g|, \frac{|E_{LOS}|}{|E_g|} \approx 1$$

$$\Delta = d_i + d_g - d_{LOS} \approx \frac{2h_t h_r}{d}$$

$$\theta_\Delta = \frac{2\pi\Delta}{\lambda} + \pi$$



$$|E_{\text{TOT}}| \approx |E_{\text{LOS}}|(1 + \cos\theta_{\Delta}) \approx 2|E_{\text{LOS}}|\sin\frac{\theta_{\Delta}}{2}$$

$$P_r = \left(\frac{4\pi h_t h_r}{d\lambda}\right)^2 P_{\text{LOS}} = P_t G_t G_r \frac{h_t^2 h_r^2}{d^4}$$

两径模型的特点：基站和移动台的高度相对于它们之间的距离非常小；反射角很小；由地面反射而产生的径。假设发生了全反射； $P_r$  随距离 4 次方衰减；天线越高路径损耗越小，并且  $P_r$  与高度的平方成正比。

由以上两部分可知自由空间损耗为 2 次方率，而两径模型损耗为 4 次方率。经大量统计实验结果，平均接收信号场强和距离成  $-N$  次方关系，其中  $N$  从 2~6，并且  $N$  和地形有密切关系。

### 3. 对数正态模型

对数正态模型用于描述阴影衰落，路径损耗取对数后是正态随机变量，均值是服从  $N$  次方率，方差是环境决定的常数。

#### 1.3.4 小范围路径损耗

小范围路径损耗的特点是变化快、频率扩展、时延扩展。主要的影响因素：多径、移动速度，包括收发设备的移动速度及景物的移动速度、信号的带宽。

##### 1. 多普勒 (Doppler) 频移

当移动体在  $x$  轴上以速度  $v$  移动时引起多普勒 (Doppler) 频率漂移。用一个平面波表示稳定扩散事件，如图 1-12 所示， $\theta'$  表示经历  $\Delta t$  时，运动方向和电磁波的夹角。

多普勒效应引起的多普勒频移表示为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi v \Delta t}{\lambda} \cos\theta$$

$$f = \frac{v}{\lambda} \cos\theta$$

式中  $v$  —— 运动速度；

$\lambda$  —— 波长；

$\theta$  —— 运动方向和电磁波的夹角。

##### 2. 瑞利衰落

瑞利衰落是指没有直射路径，同相和正交为独立同分布的高斯信号，是由无穷多相位随机的相互独立的多径信号叠加而成的，其幅度为瑞利分布。瑞利分布的概率密度函数如图 1-13 所示。

$$P(r) = \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) & 0 \leq r \leq \infty \\ 0 & r < 0 \end{cases}$$

##### 3. 莱斯衰落

莱斯衰落是指有直射路径或有一条强信号路径，式中  $A$  是主径的强度，其概率密度函数如图 1-14 所示。

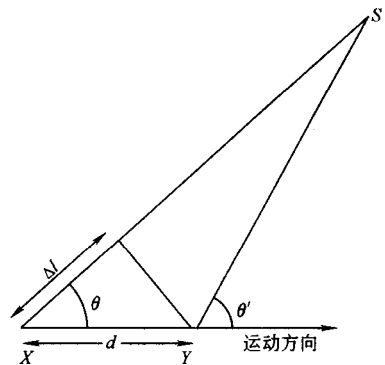


图 1-12 多普勒频移