



普通高等教育“十二五”规划教材

MIMO-OFDM 系统原理、应用及仿真

李莉 编著



免费
电子课件



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”规划教材

MIMO-OFDM 系统原理、 应用及仿真

李 莉 编著



机械工业出版社

本书系统地阐述了下一代宽带移动通信两大核心技术（OFDM、MIMO）及两者联合技术 MIMO-OFDM 的基本原理与关键技术。本书从无线信道与 MIMO 信道模型及 MIMO、MIMO-OFDM 系统容量入手，对 OFDM 系统与 MIMO-OFDM 系统的信道估计、峰值平均功率比（PAPR）、自适应比特及功率分配、同步技术、空时编码技术等进行了详细的阐述。本书中既有系统及相关技术的原理介绍、性能分析，又有生动的应用实例。本书内容新颖、系统性强，适用于通信工程及相关专业的本科生作为教材使用，并可作为相关专业的研究生、工程师和科研人员的参考书。

图书在版编目（CIP）数据

MIMO-OFDM 系统原理、应用及仿真/李莉编著. —北京：
机械工业出版社，2014.2
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-111-45827-2

I. ①M… II. ①李… III. ①移动通信—通信系统—
高等学校—教材 IV. ①TN939.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2014）第 027060 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：徐 凡 责任编辑：徐 凡 王 琪

版式设计：霍永明 责任校对：李锦莉

封面设计：张 静 责任印制：张 楠

北京京丰印刷厂印刷

2014 年 3 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·16 印张·395 千字

标准书号：ISBN 978-7-111-45827-2

定价：32.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服 务 中 心：（010）88361066

教 材 网：<http://www.cmpedu.com>

销 售 一 部：（010）68326294

机工官网：<http://www.cmpbook.com>

销 售 二 部：（010）88379649

机工官博：<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线：（010）88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

2012年1月国际电信联盟正式制定了4G国际标准。我国在上海、杭州等地铺设了4G实验网,并开始4G网试运行。2013年12月4日工信部正式向三大运营商发布4G牌照。显然,我国4G时代已经到来。对于通信工程及相关专业的学生来说,走出校门时,4G技术应是他们的必备知识。

本书编写的目的是引导初学者入门,了解新一代移动通信的关键技术——MIMO技术、OFDM技术及MIMO-OFDM技术。本书按照先易后难、先简单后复杂的思路对MIMO系统相关技术、OFDM系统相关技术、MIMO-OFDM系统相关技术作了详尽的介绍。

OFDM技术起源于20世纪50年代,当时由于受实现技术的限制而未能引起广泛重视。随着DSP芯片技术的发展,大规模集成电路使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。目前OFDM技术已应用于数字音频广播(DAB)、高清晰度数字电视(HDTV)、无线局域网(IEEE802.11, HyperLAN/2)、无线城域网(IEEE802.16)以及3GPP LTE等。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得到越来越广泛的应用。

传统的无线通信系统是利用一个发送天线和一个接收天线的通信系统,即所谓的单输入单输出(SISO)天线系统,SISO天线系统在信道容量上具有一个不可突破的瓶颈——香农容量限制。多输入多输出(MIMO)系统作为未来宽带无线通信的关键技术,是实现充分利用空间资源以提高频谱效率的一个重要手段。它能够在不占有额外频谱带宽的前提下,有效地提高信道容量。基于MIMO的无线通信理论已成为当今研究的热点,MIMO技术和OFDM技术已成为先进无线传输技术的两大基石,MIMO技术和OFDM技术的结合将打开一条实现未来无线数据高速、可靠传输的光明途径。

编写一本适合初学者的门槛较低的教材是作者编著本书的初衷。作者参考了国内外的专著和文献资料,也借助了作者本人多年的在该领域的研究,编写了这本关注4G核心技术的书籍,希望能为广大的MIMO技术和OFDM技术的初学者提供帮助。

在本书的编写过程中,得到了吉林大学通信工程学院通信系数字信号处理课程组和通信原理课程组教师的大力支持与热情帮助,在此特别感谢课程组的各位老师。赵晓晖教授对本书的编写和进一步修改提出了宝贵的指导意见,并对本书进行了审核,在此表示诚挚的感谢。

本书共分10章,第1章介绍移动通信的发展和MIMO、OFDM技术的发展;第2章介绍无线信道与MIMO信道,包括信道建模与常用信道模型;第3章介绍OFDM系统基础知识;第4章介绍MIMO系统、MIMO-OFDM系统的容量;第5章介绍OFDM系统与MIMO-OFDM系统的信道估计问题;第6章介绍OFDM系统与MIMO-OFDM系统的峰值平均功率比问题;

第7章介绍 OFDM 系统自适应功率分配问题；第8章介绍 OFDM 系统同步问题；第9章介绍 MIMO-OFDM 系统的编码技术；第10章介绍 OFDM 系统与 MIMO-OFDM 系统的应用。

由于学识有限，书中不妥之处在所难免，希望读者不吝赐教。

编著者

目 录

前言	
第1章 绪论	1
1.1 移动通信概述	1
1.1.1 移动通信发展历史	1
1.1.2 第三代移动通信系统	3
1.1.3 第四代移动通信系统	4
1.2 MIMO 系统概述	5
1.3 OFDM 系统概述	7
1.4 MIMO-OFDM 系统概述	9
1.5 本书结构	10
第2章 无线信道与 MIMO 信道	12
2.1 引言	12
2.2 无线信道	13
2.2.1 大尺度衰落与阴影衰落	13
2.2.2 多径衰落	14
2.2.3 无线信道的时变性与多普勒频移	16
2.2.4 选择性衰落	18
2.2.5 瑞利分布与莱斯分布	23
2.3 常用多径信道计算机仿真模型	24
2.3.1 指数衰减信道模型	25
2.3.2 滤波白噪声模型	26
2.3.3 频率选择性衰落信道仿真	27
2.4 MIMO 无线信道	29
2.4.1 MIMO 信道模型	30
2.4.2 MIMO 相关信道	31
2.5 仿真实例	33
2.6 本章小结	39
思考题	39
习题	39
第3章 OFDM 系统基本原理	41
3.1 引言	41
3.2 OFDM 系统的基本模型	42
3.2.1 OFDM 系统的调制和解调	42
3.2.2 OFDM 系统的 DFT/FFT 实现	44
3.3 保护间隔和循环前缀	45
3.4 带外功率辐射以及加窗技术	47
3.5 OFDM 系统的参数选择	49
3.6 一个完整的 OFDM 系统	51
3.7 仿真实例	52
3.8 本章小结	62
思考题	63
习题	63
第4章 MIMO-OFDM 系统的容量	64
4.1 引言	64
4.2 非频率选择性信道下 MIMO 系统容量	64
4.2.1 MIMO 系统容量推导	64
4.2.2 发送端未知信道状态信息 MIMO 系统容量	65
4.2.3 发送端已知信道状态信息 MIMO 系统容量	66
4.3 随机 MIMO 信道容量	68
4.4 频率选择性信道下 MIMO 系统容量	71
4.4.1 已知信道状态信息容量	71
4.4.2 未知信道状态信息容量	71
4.5 MIMO-OFDM 系统的容量分析	72
4.5.1 MIMO-OFDM 系统容量推导	72
4.5.2 信道和系统参数对容量的影响	75
4.5.3 仿真	78
4.6 仿真实例	80
4.7 本章小结	87
思考题	88
习题	88
第5章 MIMO-OFDM 系统的信道估计	89
5.1 引言	89
5.2 信道估计算法	89
5.2.1 信道估计分类	89
5.2.2 LS 信道估计算法	92
5.2.3 LMMSE 信道估计算法	93
5.3 OFDM 系统信道估计	95
5.3.1 基于训练序列的 OFDM 系统信道估计	95

5.3.2 基于非块状导频的 OFDM 系统 信道估计	96	7.2.2 自适应 OFDM 系统模型	153
5.3.3 基于 DFT 的信道估计	101	7.2.3 自适应分配的原则	153
5.4 MIMO-OFDM 系统信道估计	104	7.2.4 自适应技术的实现	155
5.4.1 MIMO-OFDM 系统	104	7.3 OFDM 系统自适应算法	156
5.4.2 基于导频的 MIMO-OFDM 系统 信道估计	107	7.3.1 迭代注水功率分配算法 (IWFP)	156
5.4.3 基于训练序列的 MIMO-OFDM 系统信道估计	109	7.3.2 Hughes-Hartogs 算法	157
5.5 仿真实例	111	7.3.3 Chow 算法	158
5.6 本章小结	121	7.3.4 Fischer 算法	159
思考题	122	7.4 多用户自适应比特、调制和功率 联合分配算法	160
习题	122	7.4.1 系统模型	160
第 6 章 MIMO-OFDM 系统峰值平均 功率比	123	7.4.2 多用户子载波和比特分配	161
6.1 引言	123	7.5 仿真实例	164
6.2 峰值平均功率比的定义及分布	123	7.6 本章小结	174
6.2.1 OFDM 信号峰值平均功率比的 定义	123	思考题	174
6.2.2 峰值平均功率比的测量	124	习题	175
6.2.3 过采样对 OFDM 信号峰值平均 功率比的影响	125	第 8 章 OFDM 系统的同步问题	176
6.2.4 信号峰值平均功率比对系统 设计的影响	127	8.1 引言	176
6.3 OFDM 系统降低 PAPR 技术	128	8.2 OFDM 系统同步技术的分类	176
6.3.1 信号预畸变方法	128	8.2.1 符号定时同步	177
6.3.2 编码方法	130	8.2.2 样值定时同步	177
6.3.3 概率类技术	132	8.2.3 样值频率同步	178
6.4 MIMO-OFDM 系统降低 PAPR 技术	138	8.2.4 载波同步	178
6.4.1 MIMO-OFDM 信号 PAPR 定义	138	8.3 同步误差对 OFDM 系统性能的 影响	179
6.4.2 基于 SLM 的 MIMO-OFDM 信号 PAPR 减小技术	138	8.3.1 OFDM 系统中的同步原理	179
6.4.3 基于 PTS 的 MIMO-OFDM 信号 PAPR 减小技术	141	8.3.2 符号定时同步误差对 OFDM 系 统性能的影响	183
6.5 仿真实例	142	8.3.3 样值间隔偏差对 OFDM 系统的 影响	183
6.6 本章小结	149	8.3.4 样值定时偏差对 OFDM 系统的 影响	184
思考题	150	8.3.5 载波频率偏移对 OFDM 系统性 能的影响	184
习题	150	8.4 OFDM 系统中的各种同步算法	185
第 7 章 OFDM 系统自适应技术	151	8.4.1 基于保护间隔的 OFDM 系统同 步方法	185
7.1 引言	151	8.4.2 基于导频的 OFDM 系统同步方 法	189
7.2 自适应技术的理论基础	151	8.4.3 基于 PN 序列的 OFDM 系统同 步方法	191
7.2.1 注水原理	151	8.5 本章小结	194

思考题	194	10.2.2 DAB 系统使用 OFDM 技术的 原因	217
习题	194	10.2.3 DAB 信号的形成	217
第 9 章 MIMO-OFDM 系统的编码 技术	195	10.3 OFDM 在数字视频广播中的 应用	219
9.1 引言	195	10.3.1 不同的数字电视地面广播 系统	219
9.2 OFDM 系统的编码技术	195	10.3.2 数字视频广播	220
9.2.1 OFDM 系统中的分组编码	195	10.3.3 地面数字多媒体电视广播	221
9.2.2 OFDM 系统中的卷积码	197	10.4 OFDM 在 IEEE 802.11 中的应用	224
9.2.3 OFDM 系统中的交织编码	199	10.4.1 协议与网络结构	225
9.2.4 OFDM 系统中的 Turbo 码	199	10.4.2 物理层参数	226
9.3 空时编码技术	200	10.4.3 系统结构	227
9.3.1 空时码概述	201	10.4.4 帧结构与相关信号处理	228
9.3.2 空时分组码的编码	201	10.5 MB OFDM 系统在 UWB 中的应用	230
9.3.3 空时分组码译码算法	202	10.5.1 MB-OFDM 物理层草案	230
9.4 MIMO-OFDM 系统的编码技术	205	10.5.2 MB-OFDM UWB 发送原理	232
9.4.1 MIMO-OFDM 系统的空时 编码	205	10.5.3 MB-OFDM UWB 接收原理	234
9.4.2 MIMO-OFDM 系统的空频 编码	208	10.6 MIMO-OFDM 在多模光纤中的应 用	235
9.5 本章小结	215	10.6.1 MMF 链路中的光 OFDM	235
思考题	215	10.6.2 应用于中长 MMF 链路的光 OFDM	237
习题	215	10.6.3 基于 MMF 链路的广播 MIMO 光 OFDM	239
第 10 章 MIMO-OFDM 系统的 应用	216	附录 缩略词	245
10.1 引言	216	参考文献	247
10.2 OFDM 在数字音频广播中的 应用	216		
10.2.1 数字音频广播介绍	216		

第 1 章 绪 论

1.1 移动通信概述

1.1.1 移动通信发展历史

当今的社会已经进入了一个信息化的社会，没有信息的交流和传递，人们就无法适应现代化的快节奏的生活和工作。人们期望随时随地、及时可靠地进行信息交流，提高工作效率和经济效益。

移动通信可以说从无线电发明之日就产生了。1897 年，马可尼所完成的无线通信实验就是在固定站与一艘拖船之间进行的。而蜂窝移动通信是在 20 世纪 70 年代中期以后逐步发展起来的。移动通信综合利用了有线、无线的传输方式，为人们提供了一种快速便捷的通信手段。由于电子技术，尤其是半导体、集成电路及计算机技术的发展，以及市场的推动，使物美价廉、轻便可靠、性能优越的移动通信设备成为可能。现代的移动通信发展至今，主要经历了三代，第四代移动通信在 2012 年紧锣密鼓地制定 4G 标准、铺设 4G 试验网并试运行，向三大运营商发牌照后已正式走入人们的生活。

第一阶段是模拟蜂窝移动通信网，时间是 20 世纪 70 年代中期至 80 年代中期。1978 年，美国贝尔实验室研制成功高级移动电话系统（AMPS），建成了蜂窝移动通信系统。而其他工业化国家也相继开发出蜂窝式移动通信网。这一阶段相对于以前的移动通信系统，最重要的突破是贝尔实验室在 20 世纪 70 年代提出的蜂窝网概念。蜂窝网，即小区制，由于实现了频率复用，大大提高了系统容量。

第一代移动通信系统的典型代表是美国的 AMPS 和后来改进型 TACS，以及 NMT 和 NTT 等。AMPS（高级移动电话系统）使用模拟蜂窝传输 800MHz 频带，在北美、南美和部分环太平洋国家广泛使用；TACS（总接入通信系统）使用 900MHz 频带，分 ETACS（欧洲）和 NTACS（日本）两种版本，英国和部分亚州国家（如日本）广泛使用此标准。

第一代移动通信系统的主要特点是采用频分复用，语音信号为模拟调制，每隔 30kHz/25kHz 有一个模拟用户信道。第一代移动通信系统在商业上取得了巨大的成功，但是其弊端也日渐显露出来。第一代移动通信系统的主要缺点是：

- ①频谱利用率低；
- ②业务种类有限；
- ③无高速数据业务；
- ④保密性差、易被窃听和盗号；
- ⑤设备成本高；
- ⑥体积大、重量大。

为了解决模拟系统中存在的上述根本性技术缺陷，数字移动通信技术应运而生，并且发

展起来。这就是以 GSM 和 IS-95 为代表的第二代移动通信系统，时间是从 20 世纪 80 年代中期开始。欧洲首先推出了泛欧数字移动通信网（GSM）的体系。随后，美国和日本也制定了各自的数字移动通信体制。数字移动通信相对于模拟移动通信，提高了频谱利用率，支持多种业务服务，并与 ISDN 等兼容。第二代移动通信系统以传输话音和低速率数据业务为目的，因此，又称为窄带数字通信系统。第二代数字蜂窝移动通信系统的典型代表是欧洲的 GSM 系统、美国的 DAMPS 系统和 IS-95。

（1）GSM（全球移动通信系统）发源于欧洲，它是作为全球数字蜂窝通信的 DMA 标准而设计的，支持 64kbit/s 的数据速率，可与 ISDN 互连。GSM 目前有 3 种不同的频率范围，分别是 GSM900（又称为 GSM），使用 900MHz 频带，为国际最常见的系统；GSM1800（又称为 PCN 或 DCS1800），使用 1800MHz 频带，采用的国家包括法国、德国、英国、俄罗斯等；GSM1900（又称为 PCS、PCS1900 或 DCS1900），采用的国家包括美国、加拿大。GSM 采用 FDD 双工方式和 TDMA 多址方式，每载频支持 8 个信道，信号带宽 200kHz。GSM 标准体制较为完善，技术相对成熟，不足之处是相对于模拟系统容量增加不多，无法和模拟系统兼容。

（2）DAMPS（先进的数字移动电话系统）也称 IS-54（北美数字蜂窝），使用 800MHz 频带，是两种北美数字蜂窝标准中推出较早的一种，指定使用 TDMA 多址方式。

（3）IS-95 是另一种北美数字蜂窝标准，使用 800MHz 或 1900MHz 频带，指定使用 CDMA 多址方式，已成为美国 PCS（个人通信系统）网的首选技术。

表 1-1 列出了常用的第二代移动通信系统的简介。

表 1-1 第二代移动通信系统简介

	cdmaOne IS-95	GSM DCS-1900	NADC IS-54/IS-136	PACS
上行链路频率	824 ~ 849MHz (美国蜂窝系统) 1850 ~ 1910MHz (美国 PCS)	890 ~ 915MHz (欧洲) 1850 ~ 1910MHz (美国 PCS)	824 ~ 849MHz (欧洲蜂窝系统) 1850 ~ 1910MHz (美国 PCS)	1850 ~ 1910MHz (美国 PCS)
下行链路频率	869 ~ 894MHz (美国蜂窝系统) 1930 ~ 1990MHz (美国 PCS)	935 ~ 960MHz (欧洲) 1930 ~ 1990MHz (美国 PCS)	864 ~ 894MHz (欧洲蜂窝系统) 1930 ~ 1990MHz (美国 PCS)	1930 ~ 1990MHz (美国 PCS)
双工方式	FDD	FDD	FDD	FDD
多址方式	CDMA	TDMA	TDMA	TDMA
调制	采用正交扩频 BPSK	GMSK (BT=0.3)	$\pi/4$ DQPSK	$\pi/4$ DQPSK
载波间隔	1.25MHz	200kHz	30kHz	300kHz
信道数据速率	1.2288Mcps	270.833kbit/s	48.6kbit/s	384kbit/s
每载波的语音和控制信道个数	64	8	3	8 (当采用 16kbit/s 声码器时,为 16)
语音编码	码激励线性预测 (CELP)13kbit/s 改进的可变速率编译码器 (EVRC)8kbit/s	残留脉冲激励长期预测 (RPE-LTP) 13kbit/s	矢量求和激励线性预测编码器 (VSELP) 7.95kbit/s	自适应差分脉冲编码调制 (ADPCM) 32kbit/s

由于第二代移动通信以传输话音和低速率数据业务为目的,从1996年开始,为了解决中速数据传输问题,又出现了2.5代的移动通信系统,如GPRS和IS-95B。移动通信现在主要提供的服务仍然是语音服务以及低速率数据服务。由于网络的发展,数据和多媒体通信的发展势头很快,所以,第三代移动通信的目标就是移动宽带多媒体通信。从发展前景看,由于自有的技术优势,CDMA技术已经成为第三代移动通信的核心技术。

1.1.2 第三代移动通信系统

与第一代模拟移动通信和第二代数字移动通信相比,第三代移动通信是覆盖全球的多媒体移动通信。它的主要的特点之一是可实现全球漫游,使任意时间、任意地点、任意人之间的交流成为可能。

国际电信联盟(ITU)在2000年5月确定W-CDMA、CDMA2000和TD-SCDMA三大主流无线接口标准,写入3G技术指导性文件《2000年国际移动通信计划》(简称IMT-2000)。CDMA是Code Division Multiple Access(码分多址)的缩写,是第三代移动通信系统的技术基础。

W-CDMA是欧洲提出的宽带CDMA技术,这套系统能够架设在现有的GSM网络上,对于系统提供商而言可以较轻易地过渡,而GSM系统相当普及的亚洲对这套技术的接受度也相当高。该标准提出了GSM(2G)→GPRS→EDGE→WCDMA的演进策略。

CDMA2000是由窄带CDMA技术发展而来的宽带CDMA技术,也称CDMA Multi-Carrier。这套系统是从窄频CDMAOne数字标准衍生出来的,可以从原有的CDMAOne结构直接升级到3G,建设成本低廉。但目前使用CDMA的地区只有中国、日本、韩国和北美国家,所以CDMA2000的支持者不如W-CDMA多。该标准提出了从CDMA IS95(2G)→CDMA 20001×→CDMA20003×(3G)的演进策略。CDMA20003×与CDMA20001×的主要区别在于应用了多路载波技术,通过采用三载波使带宽提高。

TD-SCDMA,全称为Time Division-Synchronous CDMA(时分同步CDMA),是由中国大陆独自制定的3G标准。1999年6月29日,中国原邮电部电信科学技术研究院(大唐电信)向国际电信联盟提出。该标准将智能无线、同步CDMA和软件无线电等当今国际领先技术融于其中,在频谱利用率、对业务支持具有灵活性及成本低等的独特优势。该标准提出不经过2.5G的中间环节,直接向3G过渡,非常适用于GSM系统向3G升级。

2007年10月19日,由国际电信联盟在日内瓦举行的无线通信全体会议上,经过多数国家的投票通过,WiMAX正式被批准成为继WCDMA、CDMA2000和TD-SCDMA之后的第四个全球3G标准。WiMAX的全名是微波存取全球互通(Wouldwide Interoperability for Microwave Access),又称为802.16无线局域网,是一种为企业和家庭用户提供“最后一英里”的宽带无线连接方案。将此技术与需要授权或免授权的微波设备相结合之后,由于成本较低,将扩大宽带无线市场,提高企业与服务供应商的认知度。

表1-2给出了三种3G标准的主要技术特性。

表1-2 三种3G标准的主要技术特性

三种3G标准	WCDMA	CDMA 2000	TD-SCDMA
主要技术特性			
信道间隔	5MHz	1.25MHz	1.6MHz

(续)

三种 3G 标准 主要技术特性	WCDMA	CDMA 2000	TD-SCDMA
接入方式	单载波带宽直接序列扩频 CDMA 多址接入	单载波直接序列扩频 CDMA 多址接入	时分同步 + CDMA 多址接入
双工方式	FDD	FDD	TDD
码片数率	3.84 Mcps	1.2288 Mcps	1.28 Mcps
基站同步方式	异步 (不需 GPS) 同步为可选择	同步 (需 GPS)	同步 (主从同步, 需 GPS)
调制方式	QPSK (向前) BPSK (向后)	QPSK (向前) BPSK (向后)	QPSK (向前) BPSK (向后)
帧长	10ms	20ms	10ms
切换	软切换、频间切换, 与 GSM 间的切换	软切换、频间切换, 与 IS-95B 间切换	接力切换、频间切换, 与 GSM 间的切换
语音编码	自适应多速率	可变速率	可变速率
功率控制	内环、外环, 速率 1500Hz	内环、外环, 速率为 800Hz	内环、外环
可变数据速率	最高为 2.048 Mbit/s	1 × 最高 308 kbit/s, 1 × EV 可支持 2.4 Mbit/s	最高为 2.048 Mbit/s
业务特性	适合于对称业务, 如语音、交互式实时数据业务	适合于对称业务, 如语音、交互式实时数据业务	尤其适合不对称业务

1.1.3 第四代移动通信系统

就在 3G 通信技术正处于酝酿之中时, 更高的技术应用已经在实验室进行研发。因此在人们期待第三代移动通信系统所带来的优质服务的同时, 第四代移动通信系统的最新技术也在实验室悄然进行当中。随着全球范围内第三代移动通信系统逐步进入实际应用阶段, 第四代移动通信系统的发展及演进问题以及其在发展过程中可能面临的困难和挑战已成为当前研究的热点。

经 ITU 认可的 3G 标准有 WCDMA、CDMA2000 和 TD-SCDMA。虽然 3G 和 2G 相比, 有很多优点, 但是 3G 还是存在着很多不尽人意的地方, 如 3G 缺乏全球统一的标准, 3G 所采用的语音交换架构仍承袭了 2G 系统的电路交换, 而不是纯 IP 的方式, 3G 的业务提供和业务管理不够灵活, 流媒体、视频的应用不尽如人意, 3G 的高速数据传输不成熟, 接入速率有限, 安全方面存在算法过多、认证协议容易被攻击等安全缺陷。伴随着无线技术的种类越来越多, 迫切需要将无线技术整合到一个统一的网络环境中去, 这就是正在形成的超三代移动通信系统 (B3G 通信系统) 和未来的 4G 通信系统。B3G 和 4G 通信系统将是未来提供宽带接入、全球无缝漫游和无处不在的数据、语音业务等方面的最合适和最好的技术。

2012 年 1 月 18 日, 国际电信联盟在 2012 年无线电通信全会上, 正式审议通过将 LTE-Advanced 和 WirelessMAN-Advanced (802.16m) 技术规范确立为 IMT-Advanced (俗称“4G”) 国际标准, 中国主导制定的 TD-LTE-Advanced 和 FDD-LTE-Advanced 同时并列成为 4G 国际标准。

LTE-Advanced 是 LTE (Long Term Evolution) 的演进, 它满足 ITU-R 的 IMT-Advanced 技术征集的需求, 不仅是 3GPP 形成欧洲 IMT-Advanced 技术提案的一个重要来源, 还是一个后向兼容的技术, 完全兼容 LTE。LTE 项目是 3G 的演进, 它改进并增强了 3G 的空中接入技术, 采用 OFDM 和 MIMO 作为其无线网络演进的唯一标准。主要特点是在 20MHz 频谱带宽下能够提供下行 100Mbit/s 与上行 50Mbit/s 的峰值速率, 相对于 3G 网络大大地提高了小区的容量, 同时将网络延迟大大降低。严格地讲, LTE 为 3.9G 移动互联网技术, 由 LTE 演进而来的 LTE-Advanced 为 4G 标准。LTE-Advanced 包含 TDD 和 FDD 两种制式, 其中 TD-SCDMA 能够进化到 TDD 制式, 而 WCDMA 网络能够进化到 FDD 制式。LTE-Advanced 的相关特性如下:

- ①带宽为 100MHz;
- ②峰值速率为下行 1Gbit/s, 上行 500Mbit/s;
- ③峰值频谱效率为下行 30bit/s/Hz, 上行 15bit/s/Hz;
- ④针对室内环境进行优化;
- ⑤有效支持新频段和大带宽应用;
- ⑥峰值速率大幅提高, 频谱效率有限的改进。

WirelessMAN-Advanced 是 WiMAX 的升级版 (即 IEEE 802.16m 标准); 最高可以提供 1Gbit/s 无线传输速率, 还将兼容未来的 4G 无线网络。在漫游模式或高效率/强信号模式下提供 1Gbit/s 的下行速率。该标准还支持高移动模式, 能够提供 1Gbit/s 速率。WirelessMAN-Advanced 的优势如下:

- ①提高网络覆盖, 改建链路预算;
- ②提高频谱效率;
- ③提高数据和 VOIP 容量;
- ④低时延并且 QoS 增强;
- ⑤节省功耗。

第四代移动通信系统是多功能集成的宽带移动通信系统, 在业务上、功能上、频带上都与第三代系统不同, 会在不同的固定和无线平台及跨越不同频带的网络运行中提供无线服务, 比第三代移动通信更接近于个人通信。第四代移动通信技术可把上网速度提高到超过第三代移动技术 50 倍, 可实现三维图像高质量传输。4G 移动通信技术的信息传输级数要比 3G 移动通信技术的信息传输级数高一个等级。第四代移动电话不仅音质清晰, 而且能进行高清晰度的图像传输, 用途会十分广泛。在容量方面, 4G 可在 FDMA、TDMA、CDMA 的基础上引入空分多址接入 (SDMA), 容量达到 3G 的 5~10 倍。

1.2 MIMO 系统概述

传统的无线通信系统是采用一个发送天线和一个接收天线的通信系统, 即所谓的单输入单输出 (SISO) 天线系统。SISO 天线系统在信道容量上具有一个通信上不可突破的瓶颈——香农容量限制。不管采用哪种调制技术、编码策略或其他方法, 无线信道总是给无线通信工程带来了一个实际的物理限制。在单天线系统中, 提高信道容量的方法有 4 种: 一是设置更多的基站, 二是拓宽带宽; 三是加大系统的发射功率, 四是采用分集技术。增设基站意

意味着采用更多的蜂窝，虽然可以大大提高系统的容量，但是代价昂贵；加大频带宽度可能带来现行系统非常大的兼容性问题；加大系统发射功率可能引起人的健康状况的变化，在硬件设计上也带来了很大的难度；近年来，为了提高系统容量，主要通过在接收端使用多元天线来获得接收分集，其发送天线仍然采用一个阵元，这就是单输入多输出（SIMO 系统）。为减少接收端特别是移动终端的处理复杂度和体积，也将把接收分集处理技术平移发送到发送端，发送天线采用阵列结构而接收天线采用单天线结构，这就是等价的多输入单输出（MISO）系统。进而，收发两端同时采用阵列天线的系统就是多输入多输出（MIMO）系统。

MIMO 系统能够充分利用信号的所有空时频域的特性，具有如下特点。

（1）利用或减轻多径衰落。MIMO 技术能够充分采用多径的各种发射/合成技术，提高通信系统的性能。

（2）消除共道干扰。MIMO 系统能够采用自适应波束形成技术或多用户检测技术对共道干扰进行有效抑制或消除。

（3）提高频谱利用率、提高发射效率、减小发射功率、减小空间电磁干扰及增大系统容量。由于阵列天线可以降低共道干扰和多径衰落的影响，因而在一定的 SINR（信号与干扰加噪声比，简称信干噪比）条件下可以降低误码率，或者在一定的误码率下可以降低检测所需要的信干噪比。MIMO 系统能够抑制或消除共道干扰以及码间干扰（ISI），同时利用分集技术提高接收信号的信干噪比，因此基站和移动终端的发射功率可以得到一定程度的降低，同时减小空间电磁干扰的影响、延长移动终端电池使用时间、减小对生态环境的影响、降低系统对功率控制精度和器件要求。

MIMO 技术的主要优点可以概括成以下几点。

（1）频谱效率高。MIMO 技术能够在不增加额外功率或者带宽的前提下增加容量，即提供空分复用增益。通过在不同的发射天线上传输不同的数据流，在特定信道条件下，使系统容量与 $\min\{M, N\}$ 呈线性增长。

（2）覆盖范围广。对所有天线阵元上的接收信号进行相干合并，可以获得天线阵元或者波束成型增益，它正比于接收天线的数量。通过增加接收端的信噪比，MIMO 技术可以扩大 WLAN 的覆盖范围。

（3）功耗低。采用发射波束成型等方法可以获得较低的功率消耗。

（4）链路可靠性高。采用多天线可以增加空间分集以对抗多径衰落。发射分集技术，如空时编码技术、发射波束成型等是对抗信道衰落和提高系统容量及链路可靠性的新技术之一。

从 1998 年开始，随着 Telatar、Foschini 以及 Rayleigh 等人的脚步，国内外著名的通信研究机构和学者对 MIMO 技术开始了大量的深入研究。很多电子与通信领域的国际学术刊物出版了关于 MIMO 无线通信的专辑等。此外，在近几年的国际通信与信号处理相关领域的学术会议将 MIMO 无线通信列为一个重要的主题。总结近几年来关于 MIMO 技术的研究可以发现，MIMO 技术研究的内容主要包括 4 个方面：

- ① MIMO 衰落信道的测量和建模方法；
- ② MIMO 信道容量的分析；
- ③ 基于 MIMO 的接收机的空时编/译码方法；
- ④ 基于 MIMO 的接收机关键技术，如信道估计、均衡、多用户检测等。

目前 ITU 和 3GPP 已制定了在 3G 和 B3G 移动通信中使用 MIMO 技术的有关标准。3G 标准中的 WCDMA 和 CDMA2000 方案均使用了 MIMO 技术,例如 WCDMA 方案中,各信道都可使用基于空时编码的开环发送分集技术 (TSTD)。而专用物理信道 (DPCH) 和下行共享信道 (PDSCH) 可利用闭环 TSTD 技术。CDMA2000 方案中,通过空时扩频和正交发射分集可获得更大的空时分集增益,基站还可根据移动台的反馈信息来选择信道条件较好的天线发送信息。对于 3G, MIMO 及其相关的技术可以看成是用于提高数据流量、系统性能和频谱效率方面的有力补充,目前在移动通信产业界具有很强的吸引力。与此相关的技术包括自适应调制和编码、混合 ARQ (自动重发请求) 和快速蜂窝选择等。由于 MIMO 技术能够在不增加带宽的情况下成倍提高通信系统的容量和频谱利用率,因此,无论哪种 B3G 方案基本上都采用了 MIMO 的设计理念,从而可大大提高通信系统的传输性能。

由于 MIMO 技术在通信距离、吞吐量和可靠性方面较单天线技术具有明显的优势,因此,无线局域网、无线城域网和移动电话的制造商都乐于在设备中采用 MIMO 技术。目前 MIMO 技术在支持 IEEE802.11n 标准的无线局域网中已得到了具体应用。在无线城域网方面,IEEE 与 1999 年成立了 IEEE802.16 工作组,基于 MIMO 和 OFDM (正交频分复用) 技术,先后发布了 802.16、802.16a、802.16d、802.16e 等系列标准。目前 IEEE802.16 系列芯片已全部推出,通信距离可达 50km,数据传输速率最高可到 75Mbit/s,基本能满足城域网的性能需求。

1.3 OFDM 系统概述

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, 正交频分复用) 是一种特殊的多载波传输方案,可以看作是一种调制技术,也可以看作是一种复用技术。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,用这样低的比特速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。和传统的频分复用 (FDM) 多载波调制技术相比,OFDM 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。

OFDM 技术得到广泛应用的主要原因在于:

(1) OFDM 可以有效地对抗多径传播所造成的符号间干扰 (ISI),其实现复杂度比采用均衡器的单载波系统小很多。OFDM 技术的主要思想就是在频域内将所给信道分成多个正交子信道,将待传的数据分到各个子信道并行传输,这样,尽管总信道是非平坦的 (具有频率选择性),但是每个子信道是相对平坦的,因此就可以有效地对抗频率选择性衰落,大大消除符号间干扰。另外,OFDM 可由 IFFT、FFT 来实现,因此其复杂度不大。

(2) 在变化相对较慢的信道上,OFDM 系统可以根据每个子载波的信噪比 (SNR) 来优化分配每个子载波上传送的信息比特,从而大大提高系统传输信息的容量。

(3) OFDM 系统可以有效对抗窄带干扰,因为这种干扰仅仅影响 OFDM 系统的一小部分子载波。

与传统的单载波传输系统相比,OFDM 系统的主要缺点在于:

(1) OFDM 对于载波频率偏移和定时误差的敏感程度比单载波系统要高。

对于无线通信来说,无线信道存在时变性。无线信道时变性的具体体现之一就是多普勒频移,多普勒频移与载波频率以及移动台的移动速度都呈正比。多普勒扩展会导致频率发生弥散,使信号发生畸变。从频域上看,信号失真会随发送信道的多普勒展宽的增加而加剧。因而传输中存在的频率偏移会使 OFDM 系统子载波之间的正交性遭到破坏。然而,对于要求子载波严格同步的 OFDM 系统来说,载波的频率偏移所带来的影响会更加严重,如果不采取措施对这种信道间干扰(ICI)加以克服,系统的性能很难得到改善。

(2) OFDM 系统中的信号存在较高的峰值平均功率比(Peak to Average Power Ratio, PAPR),使得它对放大器的线性要求很高。

多载波传输系统的输出是多个子信道信号的叠加,因此当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 PAPR。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。

目前,OFDM 系统研究的主要内容包括以下几方面。

1. 时域和频率同步

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,同步分为捕捉和跟踪两个阶段。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

采用信道编码和交织是提高数字通信系统性能的常用方法。对于衰落信道中随机错误,可采用信道编码;对于突发错误,可采用交织技术。通常同时采用这两种技术,以进一步改善整个系统性能。在 OFDM 系统中,其结构特性为在子载波间进行编码创造了机会,形成 COFDM 方式。编码方式可以是分组码、卷积码等多种,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 信号是由一系列子信道叠加起来的,所以很容易造成较大的 PAPR。峰值平均功率比较大的 OFDM 信号通过功率放大器时会有很大的频谱扩展和带内失真。但是由于出现大的 PAPR 的概率并不大,可以把具有大的 PAPR 值的 OFDM 信号去掉。但是把具有大的 PAPR 值的 OFDM 信号去掉会影响信号的性能,所以采用的技术必须保证这样的影响尽量小。一般通过以下技术可以减小 PAPR。

(1) 信号失真技术。采用剪切技术、峰值窗口去除技术或峰值删除技术使峰值振幅简单地去除。

(2) 编码技术。采用专门的前向纠错码会使产生非常大的 PAPR 的 OFDM 符号去除。

(3) 扰码技术。采用扰码技术, 使生成的 OFDM 的互相关性尽量为零, 从而使 OFDM 的 PAPR 减小。扰码技术可以对生成的 OFDM 信号的相位进行重置, 典型的有部分传输序列 (PTS) 和选择性映射 (SLM)。

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 ISI, 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 系统就不必在做均衡了。在高度散射的信道中, 信道记忆长度很长, 循环前缀 (Cyclic Prefix, CP) 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, 尤其对子载波数量不是很大的系统。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度换取系统频带利用率的提高。

OFDM 最早起源于 20 世纪 50 年代中期, 在 60 年代就形成了使用并行数据传输和频分复用的概念。1970 年 1 月首次公开发表了有关 OFDM 的专利。1971 年, Weinstein 和 Ebert 把离散傅里叶变换 (DFT) 应用到并行传输系统中, 作为调制和解调过程的一部分。这样就不再利用带通滤波器, 而是经过基带处理就可以实现 FDM。而且, 在完成 FDM 的过程中, 不再要求使用子载波振荡器组以及相干解调器, 可以完全依靠执行快速傅里叶变换 (FFT) 的硬件来实施。

自从 20 世纪 80 年代以来, OFDM 已经在数字音频广播 (DAB)、数字视频广播 (DVB)、基于 IEEE802.11 标准的无线本地局域网 (WLAN) 以及有线电话网上基于现有铜双绞线的非对称高比特率数字用户线技术 (如 ADSL) 中得到应用。其中大都利用了 OFDM 可以有效地消除信号多径传播所造成 ISI 的这一特征。

此外, OFDM 还易于结合空时编码、分集、干扰 (包括 ISI 和 ICI) 抑制以及智能天线等技术, 最大限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、动态比特分配算法等技术, 可以使其性能进一步得到优化。

1.4 MIMO-OFDM 系统概述

MIMO 和 OFDM 技术能够解决带宽效率和多径衰落。OFDM 通过将频率选择性多径衰落信道在频域内转换为平坦信道, 减小了多径衰落的影响, 而 MIMO 技术能够在空间中产生独立的并行信道同时传输多路数据流, 在不增加系统带宽的情况下增加频谱效率, 有效地提高了系统的传输速率。这样, 将 MIMO 和 OFDM 两种技术相结合, 就能达到两种效果: 一种是实现很高的数据传输速率, 另一种是通过分集实现很强的可靠性。

从理论上来说, 作为高速无线局域网核心的 OFDM 技术, 只要适当选择各载波的带宽和采用纠错编码技术, 多径衰落对系统的影响可以完全消除。因此如果没有功率和带宽的限制, 可以用 OFDM 技术实现任何传输速率, 而其他技术就不具备这种特性。如采用其他技术, 当数据传输速率增加到某一数值时, 信道的频率选择性衰落会占据主导地位, 此时无论怎样增加发射功率, 也得不到改善, 这正是 OFDM 技术适用于高速无线局域网的原因。而 MIMO 系统虽然在一定程度上可以利用传播中的多径分量 (也就是说 MIMO 可以抗多径衰落), 但是对于频率选择性深衰落, MIMO 系统依然是无能为力。而 MIMO 和 OFDM 技术的