

林成浴 胡玲娜 等著

宽带移动通信系统

——信道估计技术研究及应用

KUANDAI YIDONG TONGXIN XITONG

XINDAO GUJI JISHU YANJIU JI YINGYONG



电子科技大学出版社

KUANDAI YIDONG TONGXIN XITONG
XINDAO GUJI JISHU YANJIU JI YINGYONG

宽带移动通信系统

——信道估计技术研究及应用

林成浴 胡玲娜 杨 峰 钱 良 丁良辉 潘国良 著



电子科技大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

宽带移动通信系统: 信道估计技术研究及应用 / 林

成浴等著. —成都: 电子科技大学出版社, 2012. 6

ISBN 978-7-5647-1178-8

I. ①宽… II. ①林… III. ①移动通信—宽带通信系
统 IV. ①TN929.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 123064 号

内 容 提 要

本书系统介绍了 OFDM 和 MIMO-OFDM 宽带移动通信系统信道估计技术的基本原理, 并总结了本书作者在该领域的最新研究成果及其应用。本书首先介绍了 OFDM 系统和 MIMO-OFDM 系统的基本原理、移动无线信道、参量估计理论和信道估计方法, 然后重点阐述了宽带移动通信系统中信道估计技术的最新研究成果, 并从理论分析和实际验证两个角度说明本书作者的创新性研究成果能够提高系统的性能, 具有显著的理论价值和良好的应用前景。

本书系统完整、内容新颖、条理清楚, 普及性和学术性结合, 具有很高的学术和应用价值, 可作为高等院校通信专业的研究生、通信科研人员和工程技术人员的参考用书。

宽带移动通信系统

——信道估计技术研究及应用

林成浴 胡玲娜 杨 峰 钱 良 丁良辉 潘国良 等著

出 版: 电子科技大学出版社 (成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦 邮编: 610051)
策划编辑: 曾 艺
责任编辑: 袁 野
主 页: www.uestcp.com.cn
电子邮箱: uestcp@uestcp.com.cn
发 行: 新华书店经销
印 刷: 郫县犀浦印刷厂
成品尺寸: 185mm×260mm 印张 11.75 字数 340 千字
版 次: 2012 年 6 月第一版
印 次: 2012 年 6 月第一次印刷
书 号: ISBN 978-7-5647-1178-8
定 价: 36.00 元

■ 版权所有 侵权必究 ■

- ◆ 本社发行部电话: 028-83202463; 本社邮购电话: 028-83201495。
- ◆ 本书如有缺页、破损、装订错误, 请寄回印刷厂调换。

前 言

随着现代社会对移动通信服务需求的日益激增和电磁频谱资源的日趋紧张,大容量、高速率和高频谱效的宽带移动通信系统已成为现代无线通信的发展方向。正交频分复用(OFDM)技术由于其频谱利用率高、成本低、易实现等优点在宽带通信中得到了广泛的应用,多输入多输出(MIMO)技术则利用空间复用和分集增益可以大大提高系统信道容量和频谱利用率。MIMO技术和OFDM技术的结合能够同时提高空间复用技术和OFDM技术的能力,有利于实现高速率数据传输和增加系统容量。随着OFDM和MIMO技术的快速发展,其应用越来越广泛,目前MIMO-OFDM技术已经成新一代移动通信系统下行高速数据传输的核心技术方案。

进入21世纪以来,世界各国的通信专家、学者投入了大量的精力、物力来研究OFDM和MIMO技术,OFDM系统和MIMO-OFDM系统成为通信专业研究的热点。信道估计是OFDM系统和MIMO-OFDM系统的关键技术之一,对移动宽带通信系统的性能具有非常重要的影响。本书作者在上海交通大学参与国家863重大专项“新一代蜂窝移动通信系统无线传输链路技术研究”、国家自然科学基金资助项目“移动宽带视频广播传输及关键技术研究”等相关项目研究中,深入研究了移动OFDM和MIMO-OFDM通信系统信道估计的相关技术和应用,并取得了一些创新性研究成果,部分成果已在国际期刊和国际会议上发表。其后,根据这些研究成果,并参考了国内外相关的专著和文献资料,编写了本书。

本书共分八章。第一章介绍了宽带OFDM和MIMO通信系统的基本原理和关键技术;第二章讨论了移动无线信道的传播模型及典型模型仿真;第三章介绍了参量估计理论;第四章主要研究OFDM系统的相干检测算法,其首先研究了基于导频序列的相干检测,然后提出了一种基于隐藏导频的相干检测算法,该算法提高了性能,节省了带宽;第五章主要研究了在时变信道中OFDM系统载波间干扰消除方法,提出了一种低复杂度的载波间干扰均衡器;第六章讨论了OFDM系统的信道估计准则、最优训练序列以及快衰落信道下的信道估计方法;第七章在研究MIMO-OFDM系统信道估计技术的基础上,提出了两种在快速衰落信道条件下提高宽带MIMO-OFDM系统信道估计性能的方法;第八章主要研究了MIMO-OFDM系统信道估计的最优导频序列。在MIMO-OFDM系统中,利用Jacket矩阵分别推导出了分布在一个和多个OFDM符号上最优导频序列的一般表达式,并提出了一种基于随机相位的低峰均比最优导频序列。

本书第一作者为林成浴,第二作者是胡玲娜,钱良负责全书的修订和定稿。钱良、杨峰、丁良辉,潘国良参与编写部分章节。其中,第一、二、六、七、八章由林成浴编写,第四章由胡玲娜编写,第五章由杨峰、钱良编写,第三章由丁良辉、潘国良编写。

特别感谢上海交通大学副校长、长江学者张文军教授在课题研究和本书撰写、出版

过程中给予作者的指导和极大支持！

上海交通大学上海市媒体处理与传输重点实验室的余松煜教授、郑世宝教授、宋文涛教授、支铮副教授和甘小英老师在课题研究中给予了帮助；解放军理工大学通信工程学院的徐友云教授对本书的撰写给予了很多指导性意见；硕士研究生欧阳延婷参与了最后书稿的整理工作，在此一并表示感谢！

感谢海军航空工程学院青岛分院各级领导和同事对本书编写、出版给予的支持！

本书出版得到国家自然科学基金项目“长时延环境网络多址接入关键技术研究（项目号：61102051）”与科技计划支撑项目“宽带无线校园创新实验网体系架构与关键技术（项目号：2010ZX03005-003）”的支持。

由于作者水平有限，时间仓促，书中难免存在错误与不足之处，恳请专家、读者指正！

作 者
2012 年 4 月

目 录

第 1 章 宽带移动通信系统概述	1
1.1 宽带移动通信技术发展	1
1.2 OFDM 技术	2
1.3 MIMO-OFDM 技术	7
1.3.1 MIMO 技术	7
1.3.2 MIMO-OFDM 系统模型	10
1.3.3 空时编码技术	11
1.4 宽带通信系统关键技术	12
第 2 章 移动无线信道	14
2.1 移动无线信道的特征	14
2.2 无线信道的大尺度衰落	15
2.3 无线信道的小尺度衰落	16
2.3.1 连续双选择性衰落信道	19
2.3.2 离散双选择性衰落信道	21
2.4 典型的移动信道模型仿真	22
2.4.1 坦衰落信道仿真	22
2.4.2 频率选择性衰落信道仿真	24
2.5 MIMO 信道	25
2.5.1 信道模型	25
2.5.2 信道相关性	28
第 3 章 参量估计理论	29
3.1 引言	29
3.2 矩法估计	30
3.3 贝叶斯估计	31
3.3.1 最小均方估计	32
3.3.2 条件中位数估计	33
3.4 最大后验概率估计	33
3.5 最大似然估计	34
3.6 估计量的性能	34
3.6.1 性能指标	34

3.6.2	无偏估计量的性能边界	35
3.7	线性最小均方估计	37
3.8	最小二乘估计	38
3.9	波形估计	39
3.9.1	波形估计的概念	39
3.9.2	维纳滤波器	41
第4章	OFDM 相干检测	43
4.1	OFDM 系统模型与实现方法	43
4.2	基于导频符号的相干检测	47
4.2.1	导频信号的插入方式	48
4.2.2	导频位置的信道估计	52
4.2.3	内插滤波器的设计	53
4.3	基于隐藏导频的相干检测算法	58
4.3.1	算法概述	59
4.3.2	算法的 Cramer-Rao 下限	61
4.3.3	算法仿真结果	64
第5章	OFDM 系统均衡	69
5.1	载波间干扰的来源	69
5.1.1	多径时延产生的载波间干扰	69
5.1.2	时变信道产生的载波间干扰	74
5.2	时变信道中载波间干扰消除方法	78
5.2.1	自消除方法	78
5.2.2	加窗方法	86
5.2.3	一种低复杂度的频域 ICI 均衡器	90
第6章	OFDM 系统信道估计技术	104
6.1	OFDM 系统信道估计准则	104
6.1.1	最小二乘法信道估计	104
6.1.2	最小均方误差信道估计	105
6.2	宽带快衰落信道下的 OFDM 信道估计	106
6.2.1	二维信道估计理论	106
6.2.2	基于维纳滤波的信道估计算法	108
6.2.3	基于内插的信道估计算法	111
6.3	OFDM 系统信道估计的最优训练序列	113
6.3.1	时域最优训练序列	113
6.3.2	频域最优训练序列	114

第 7 章 MIMO-OFDM 系统信道估计技术	115
7.1 MIMO-OFDM 信道估计技术	115
7.1.1 系统导频正交方案简介	115
7.1.2 基本信道估计算法	116
7.1.3 简化信道估计算法	117
7.1.4 时域信道估计算法	118
7.1.5 频域信道估计算法	120
7.2 宽带快衰落信道下的信道估计	122
7.2.1 基于虚拟导频的信道估计改进方法	122
7.2.2 基于滑窗的信道估计改进方法	132
7.2.3 性能和复杂度分析	136
第 8 章 MIMO-OFDM 系统信道估计的最优训练序列	139
8.1 时域最优训练序列	139
8.2 基于 Jacket 矩阵的最优导频序列	140
8.2.1 类循环 Jacket 矩阵	140
8.2.2 LS 信道估计的 MSE 分析	142
8.2.3 在一个 OFDM 符号上的最优导频序列	145
8.2.4 在多个 OFDM 符号上的最优导频序列	151
8.3 改进的低峰均比最优导频序列	156
8.3.1 峰均比定义及分布	157
8.3.2 峰均比降低技术	159
8.3.3 原最优导频序列的峰均比分析	163
8.3.4 基于随机相移的低峰均比最优导频序列	164
参考文献	170

第1章 宽带移动通信系统概述

1.1 宽带移动通信技术发展

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年代移动通信才有了飞跃的发展,第一代(1G)蜂窝模拟移动通信系统诞生并在世界范围迅速推广使用。20世纪80年代末基于数字通信的第二代(2G)移动通信系统开始进入快速发展和成熟时期,但由于2G主要支持话音和低速率数据业务,不能满足人们对多媒体通信业务的服务需求。21世纪初以码分多址接入(Code Division Multiple Access, CDMA)为核心技术的第三代(3G)移动通信系统得到发展并投入使用,但3G系统还没有完全脱离2G系统的核心网结构,所以3G系统被认为是一个从窄带到未来移动通信系统的过渡阶段。

最近十多年的无线通信技术,尤其是宽带移动通信技术,一直以前所未有的速度迅猛发展,已经成为信息技术领域备受关注的研究热点之一。随着用户对各种无线实时多媒体数据业务和无线接入互联网需求的不断增加,对无线移动通信提出了更高的要求:即任何人在任何时间和任何地方都能实现任何形式的相互通信。因此,无线移动通信系统必须能够提供宽带大容量的数据通信能力,支持多速率、高服务质量的多媒体数据业务,并且能动态地跨小区、跨网络运行,最终实现一个多业务、多频段、多模式、多媒体的“全球一网”的“融合的无线环境”,为用户提供优质服务。为了实现这个目标,就必须最大限度地利用频域、时域、码域、空域等各种资源,提高系统容量。目前,各种先进技术的发展为实现上述目标奠定了基础。首先是无线通信领域发展的新技术将大大提高数据传输速率和可靠性,增强系统功能;其次是大规模集成电路(VLSI)技术突飞猛进的发展使得通信系统中各种复杂信号处理算法和编码技术的小面积、低功耗成为现实。因此,新一代移动通信系统(Beyond 3G/4G)的研究随之应运而生,其数据传输速率超过100Mbit/s,能够提供从语音到实时流媒体的高质量业务。

新一代移动通信系统采用了创新的设计观念,从以传统移动电话业务为主的移动通信网络升级为以移动数据为主面向Internet大范围覆盖高速移动通信网络,能够支持更为丰富的移动通信业务,使用户在任何地方可以获得所需任何形式的信息服务。系统采用了宽带接入技术、多天线或分布天线的系统结构及终端形式等多种先进的通信技术,具体包括正交频分复用、多输入多输出、智能天线、空时编码、无线链路增强、软件无线电、高效的调制解调、多用户检测等技术以及高性能的收发信机、分布式网络架构等,提供全新的空中接口。

无线移动通信信道的主要特点是具有多径时延扩展,容易导致接收信号相互重叠,

产生符号间干扰 (Inter-Symbol Interference, ISI), 特别是数据传输速率越高时, 信号的持续时间越短, 相应带宽就越宽。如果信号带宽超过信道相干带宽, 信道的多径时延特性将使接收信号产生频率选择性衰落, 信号会产生严重的衰落和失真, 使通信系统性能下降或恶化, 甚至完全不能通信。另外, 移动终端在运动状态时, 信道的时变特性会引起信号频谱的展宽, 信号由于多普勒 (Doppler) 效应而产生严重的失真, 因此要实现移动宽带数据通信就必须要考虑信道的多径时延扩展和多普勒效应。单载波时分多址接入 (Time Division Multiple Access, TDMA) 技术在实现高速数据业务时会产生严重的符号间干扰 (ISI), 这对单载波 TDMA 系统的均衡器要求非常高, 即抽头要足够多, 训练符号数量要足够大, 训练时间要足够长, 从而使均衡的算法复杂度大大增加, 影响到 TDMA 系统的工程实现。窄带 CDMA 技术存在扩频增益与高速数据之间的矛盾, 在相同带宽的前提下, 高速数据使用的扩频增益就不能太高, 限制了 CDMA 系统抑制噪声的优点, 系统的容量受到影响; 若要保持扩频增益不变, 要实现高速数据传输就必须要提高带宽。因此这两种方法在实现移动宽带数据通信存在着复杂度和性能方面的障碍。由于正交频分复用 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) 技术的优点, 人们开始利用 OFDM 系统来实现高速数据业务传输, 满足宽带的多种多媒体业务要求。

正交频分复用 (OFDM) 技术支持移动无线信道中高速传输数据, 其优点是能有效对抗多径效应、消除符号间干扰、对抗频率选择性衰落, 而且频谱利用率高, 是一种性能优越的移动宽带数据传输技术方案。近十多年来对 OFDM 系统及其相关技术的研究日趋完善, 主要对 OFDM 通信系统的同步、信道估计、功率峰均比以及 OFDM 与空时码、联合发送、联合检测、智能天线、动态分组分配的结合等进行了研究, 这些研究成果极大促进了 OFDM 技术在移动通信领域的应用。OFDM 技术已经成为新一代移动通信和无线宽带接入系统的核心技术。

1.2 OFDM 技术

最初的无线通信系统是单载波系统, 使用串行传输机制, 将数据串行调制到单一的载波上面, 然后发射到无线信道中。在低数据率的环境下, 由于符号时间远远大于信道的最大时延, 单载波系统可以很好地胜任。但随着人类社会生活对通信的需求越来越高, 需要提供多媒体通信服务、高清晰度音频、视频服务。这些服务都需要很高的数据率, 为此, 单载波系统只能提高调制阶数或者缩短符号周期。提高调制阶数会使得系统容易受到噪声干扰。缩短符号周期以后, 信道的多径时延会引起系统的符号间干扰 (ISI)^[1]。当信道最大的多径时延超过 20% 的符号周期时, ISI 的影响就不能忽略而必须采用均衡器^{[2][3]}, 否则, 系统将出现误码平台。然而, 均衡器的实现非常复杂, 为此, 人们开始考虑使用并行传输机制。其中, 频分复用方式 (FDM) 得到了广泛的关照。其主要思想是: 将信道分成若干子信道, 将高速数据信号转换成并行的低速子数据流, 调制到在每个子信道上进行传输。每个子信道上的信号带宽小于信道的相关带宽, 因此每个子信道上的可以看成平坦性衰落, 从而可以消除符号间干扰。而且由于每个子信道的带宽仅仅是原信道带宽的一小部分, 信道均衡变得相对容易。

正交频分复用 (OFDM) 是一种正交多载波调制技术, 发展至今已有近 40 年的历史。早期的 OFDM 系统结构非常复杂, 需要使用多个调制解调器。1971 年, Weinstein 和 Ebert 提出利用快速傅立叶变换 (Fast Fourier Transform, FFT) 来等效多个调制解调器的功能, 大大简化了系统结构, 使得 OFDM 技术实用化。20 世纪 80 年代以来, 大规模集成电路技术的发展解决了 FFT 的实现问题。随着 DSP 芯片技术的发展, FFT/IFFT、64/128/256QAM 的高速调制、格栅编码 (Trellis Code)、软判决 (Soft Decision) 和信道自适应等技术的应用日益成熟, OFDM 技术开始从理论向实际应用转化。目前, OFDM 技术凭借其固有的有效对抗多径效应和高频谱利用率两大优势迅速成为研究的焦点并被多个国际规范采用, 如欧洲的数字音频广播 (DAB)、数字视频广播 (DVB)、IEEE 的无线局域网标准 802.11a 和 802.16a。OFDM 技术主要的应用还包括: 非对称的数字用户环路 (ADSL)、ETSI 标准的音频广播 (DAB)、数字视频广播 (DVB) 等。1999 年, IEEE802.11a 通过了一个 5GHz 的无线局域网标准, 其中 OFDM 调制技术被采用为它的物理层标准。1997 年, 欧洲 DVB-TCOFDM 系统是欧洲数字电视广播 (DVB) 系列标准中的数字地面电视广播系统标准, 该系统使用 COFDM 调制方式。IEEE 802.11g 标准采用工作于 2.4GHz 频段的 OFDM 技术。

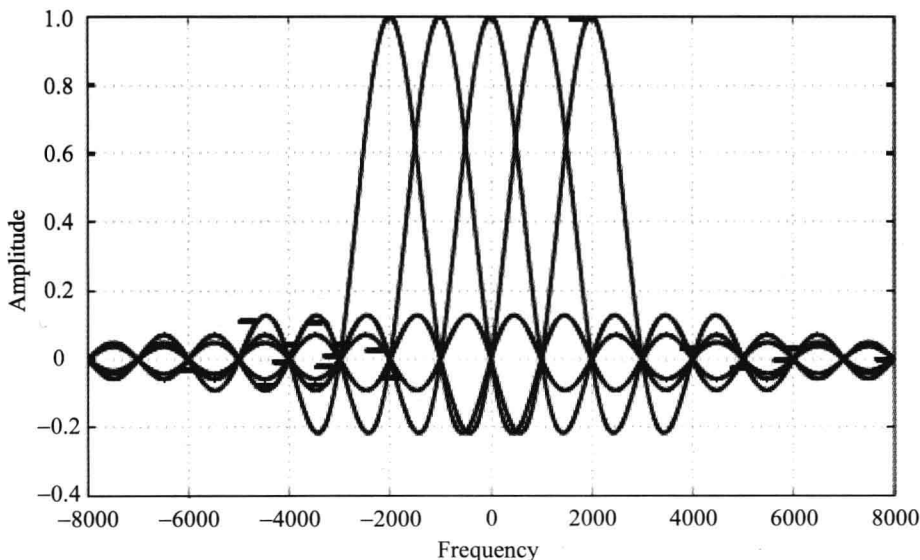


图 1-1 OFDM 子载波频谱

OFDM 技术的基本思想是在频域内将给定的信道分成许多正交子信道 (如图 1-1 所示), 数据流分成若干子数据流后, 以较低的速率通过这些子信道并行传输。在宽带通信系统中, 整个信道通常是非平坦的, 具有频率选择性。当信号带宽小于子信道的相干带宽时, 每个子信道是相对平坦的, 则在每个子信道上进行的是窄带传输, 就可以有效地减小多径时延扩展, 大大减小符号间干扰, 因此 OFDM 能够实现高速数据传输。同时, OFDM 相对于一般的多载波传输的不同之处是它允许子载波频谱部分重叠, 只要满足子载波间相互正交, 就可以从重叠的子载波上分离出数据信号。OFDM 子载波频谱重叠,

其频谱效率大大提高,因而 OFDM 是一种高效的数据传输方式。OFDM 可以利用 FFT/IFFT 来实现调制和解调,系统易于实现且复杂度较低。另外,OFDM 技术同时涉及到时域和频域。因此无线信道的频率选择特性(由信道的多径时延引起)和时间选择特性(由信道的 Doppler 扩散决定)都会影响 OFDM 系统的性能。频率选择特性导致接收信号的幅度、相位和到达时间的剧烈变化,所以在接收机内,为了在最后能够准确的恢复发射端的发送信号,必须要实施信道估计,获得所有子载波上的参考相位和幅度,然后重建信道信息,利用重建的信道信息对接收信号进行均衡。时间选择特性导致 OFDM 系统子载波不再正交,对系统引入载波间干扰(Inter-Carrier Interference, ICI),因此必须对载波间干扰进行补偿,消除 ICI 的影响,然后进行均衡,消除信道的影响。

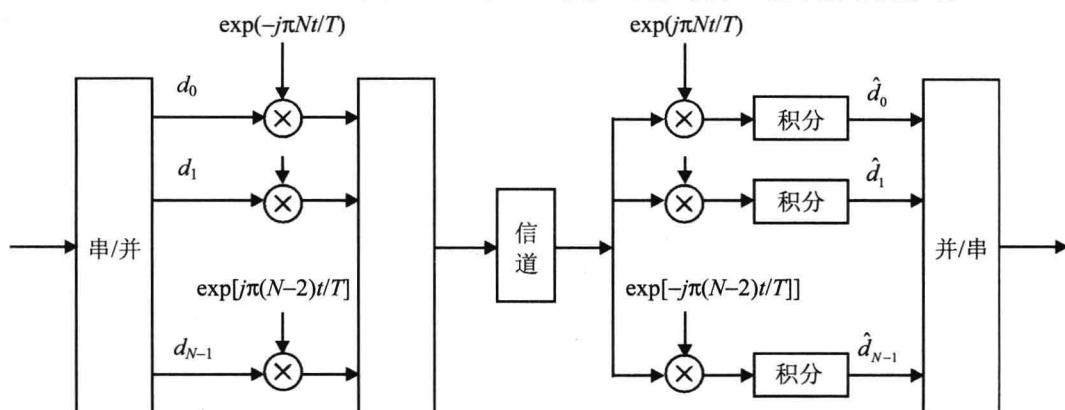


图 1-2 OFDM 系统的调制和解调原理图

OFDM 系统的调制和解调原理如图 1-2 所示。在发送端,输入的串行数据流串/并变换后,经过在各个子载波上调制成为可以传输的 OFDM 符号,其中每个子载波上的调制模式是自适应可变化的。假定 $d_i (i=0,1,\dots,N-1)$ 分别表示给定 N 个子信道上的信号,OFDM 符号可以用各个子载波信号之和来表示,即

$$s(t) = \text{Re} \left\{ \sum_{i=-N/2}^{N/2-1} d_{i+N/2} \exp \left[j2\pi \left(f_c - \frac{i+0.5}{T} \right) t \right] \right\} \quad (1-1)$$

其中, N 表示子载波的个数, T 表示一个 OFDM 符号的持续时间, $0 \leq t \leq T$, f_c 是载波频率。可以用等效基带信号来描述 OFDM 系统的输出信号

$$s(t) = \sum_{i=-N/2}^{N/2-1} d_{i+N/2} \exp \left(j2\pi \frac{i}{T} t \right) \quad (1-2)$$

式中, $s(t)$ 的实部和虚部分别对应于 OFDM 符号的同相(In-phase)和正交(Quadrature-phase)分量,在实际系统中可以分别与相应子载波的余弦和正弦分量相乘,得到经过子载波调制的子信道信号,从而最终合成 OFDM 符号,完成发送端的信号调制。

在接收端,对第 k 路子载波信号的解调过程如下:先把接收信号与第 k 路的解调子载波 $\exp[-j2\pi(k-N/2)t/T]$ 相乘,再对得到的结果在 OFDM 符号持续时间 T 内进行积分,可解调出发送信号 $\hat{d}_k$,即

$$\begin{aligned}\hat{d}_k &= \frac{1}{T} \int_0^T \exp\left(-j2\pi \frac{k-N/2}{T} t\right) \sum_{i=-N/2}^{N/2-1} d_{i+N/2} \exp\left(j2\pi \frac{i}{T} t\right) dt \\ &= \frac{1}{T} \sum_{i=-N/2}^{N/2-1} d_{i+N/2} \int_0^T \exp\left(-j2\pi \frac{k-N/2}{T} t\right) dt = d_k\end{aligned}\quad (1-3)$$

在实际系统发送端, 式 (2) 中的 OFDM 复等效基带信号可以采用离散傅立叶逆变换 (IDFT) 来实现, 令 $t = kT/N (k=0, 1, \dots, N-1)$, 可得

$$s(k) = s(kT/N) = \sum_{i=0}^{N-1} d_i \exp(j \frac{2\pi k i}{N}) \quad (1-4)$$

其中, $0 \leq k \leq N-1$ 。从上式可以看出, $s(k)$ 是 d_i 的 IDFT 运算。在接收端, 对 $s(k)$ 进行离散傅立叶变换 (DFT), 便可解调出发送的数据符号 d_i , 即

$$d_i = \sum_{k=0}^{N-1} s(k) \exp(-j \frac{2\pi k i}{N}) \quad (1-5)$$

其中, $0 \leq i \leq N-1$ 。

因此, OFDM 系统的调制和解调可以分别由 IDFT 和 DFT 来实现。在发送端, 通过 N 点 IDFT 运算把频域数据符号 d_i 变换为时域数据符号 $s(k)$, 经过载波调制之后发送出去; 在接收端, 将接收信号进行相干解调, 然后将基带信号进行 N 点 DFT 运算得到发送的数据符号 d_i 。在实际的 OFDM 系统中, 通常采用更加方便快捷的快速傅立叶变换 (IFFT/FFT) 来实现信号的调制和解调^[4,5]。

OFDM 技术的突出优势之一是能够有效地对抗多径时延扩展, 大大降低因多径时延造成的符号间干扰 (ISI)。同时, 为了进一步消除符号间干扰, 在相邻 OFDM 符号之间要插入保护间隔 (GI), 当保护间隔的持续时间 T_g 大于无线信道的最大多径时延扩展 $\tau_{\max}$ 时, 每个 OFDM 符号在经过信道时产生的多径分量就不会对下一个符号造成干扰, 因此通常选择保护间隔时要满足 $T_g \geq \tau_{\max}$ 。在插入保护间隔时, 为了消除由于多径传播造成的子载波间干扰 (ICI), 通常将持续时间为 T 的时域 OFDM 符号进行周期扩展, 用扩展信号作为保护间隔^[6], 如图 1-3 所示。

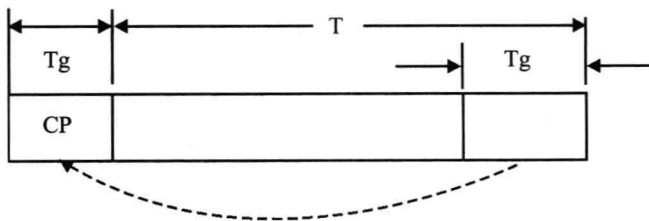


图 1-3 具有循环前缀的 OFDM 符号示意图

具体做法是: OFDM 符号经过 IFFT 变换后成为时域信号, 在时域内将 OFDM 符号尾部长度为 T_g 的部分作为循环前缀 (Cyclic Prefix, CP), 在相邻 OFDM 符号之间加入循环前缀能够使 OFDM 符号的时延副本所包含的波形周期个数在一个 FFT 周期内也是整数, 因此, 当 $T_g \geq \tau_{\max}$ 就不会在解调过程中产生载波间干扰 (ICI)。在实际系统中, OFDM 符号在发送端要进行 IFFT 变换以后加入循环前缀作为保护间隔; 接收端将每个接收符号

开始的长度为 T_g 的部分去掉后进行 FFT 变换, 解调出发送的数据符号。

OFDM 系统收发信机的典型结构如图 1-4 所示,

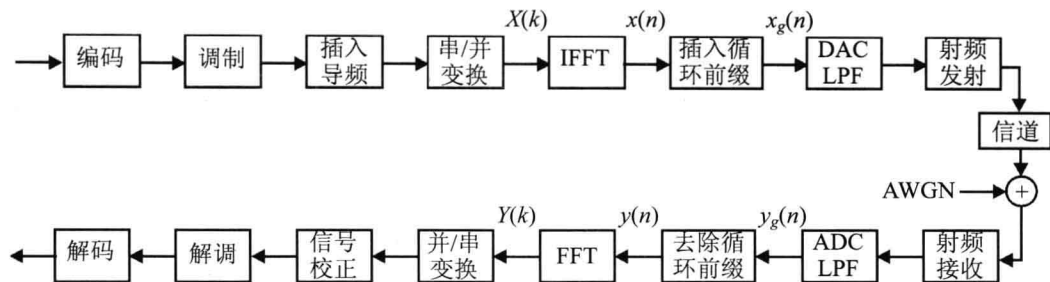


图 1-4 OFDM 收发信机框图

假定 $X(k)$ 是在第 k 个子载波上调制的数据, 经过 IDFT 变换后可得时域信号^[7]

$$\begin{aligned} x(n) &= \text{IDFT}\{X(k)\} \\ &= \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{j2\pi kn/N} \quad n=0,1,\dots,N-1 \end{aligned} \quad (1-6)$$

$x(n)$ 加入循环前缀后可得到

$$x_g(n) = \begin{cases} x(N+n), & n=-N_g, -N_g+1, \dots, -1 \\ x(n), & n=0, 1, \dots, N-1 \end{cases} \quad (1-7)$$

其中, N_g 是保护间隔的时间长度。当发送信号经过频率选择性多径衰落信道后, 接收到的信号可以表示成

$$y_g(n) = x_g(n) * h(n) + w(n) \quad (1-8)$$

其中, $h(n)$ 是信道的冲激响应, $w(n)$ 是时域加性高斯白噪声。从 $y_g(n)$ 中除去保护间隔的信号得到 $y(n)$, $y(n)$ 经过 DFT 变换后得

$$\begin{aligned} Y(k) &= \text{DFT}\{y(n)\} \\ &= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y(n) e^{-j2\pi kn/N} \quad k=0,1,\dots,N-1 \end{aligned} \quad (1-9)$$

假定保护间隔的长度大于信道冲激响应, 则在 OFDM 符号间没有 ISI, $Y(k)$ 可以表示成

$$Y(k) = X(k)H(k) + W(k) \quad (1-10)$$

其中, $k=0,1,\dots,N-1$, $W(k)$ 是 $w(n)$ 的 DFT 变换。

根据 OFDM 技术的原理分析, 可以得到 OFDM 技术有如下优点^[8]:

(1) 抗多径衰落。OFDM 系统把高速的数据流通过串/并变换, 使得每个子载波上数据符号的持续时间长度增加, 大大降低了符号的传输速率, 再通过加入循环前缀作为保护间隔, 从而最大限度地消除了多径时延造成的符号间干扰。同时, OFDM 系统将数据宽带传输转化为很多子载波上的数据窄带传输, 每个子载波上的信道可以看成平坦衰落信道, 能够很好地对抗频率选择性衰落和窄带干扰。

(2) 频谱效率高。OFDM 系统中各子载波相互正交、重叠, 理论上可以接近奈奎斯

特极限,不但减少了子载波间的相互干扰,还大大提高了频谱利用效率。

(3) 带宽扩展性强。由于 OFDM 系统的信号带宽取决于使用的子载波的数量,因此 OFDM 系统具有很好的带宽扩展性。小到几百 KHz,大到几百 MHz,都很容易实现。尤其是随着移动通信宽带化,OFDM 系统对大带宽的有效支持远远超过 CDMA。

(4) OFDM 系统通过各个子载波的联合编码以及自适应技术,具有很强的抗衰落能力。OFDM 技术本身已经利用了信道的频率分集,如果衰落不是特别严重,就没有必要再加时域均衡器。通过将各个信道联合编码和自适应技术,则可以使系统性能得到提高。

(5) 复杂度较低。OFDM 系统的复杂度主要取决于 IFFT/FFT 的计算,随着大规模集成电路和 DSP 技术的发展,IFFT/FFT 很容易实现。

综上所述,OFDM 技术所具有的这些优点使其成为新一代移动通信系统的核心技术。

但由于 OFDM 系统各个子载波间相互正交且频谱相互重叠,因此与单载波相比有如下缺点^[8]:

(1) 对频率偏差影响敏感。无线信道具有时变性,传输信号频谱偏移或收发机本地振荡器之间存在频率偏差,都会导致 OFDM 子载波之间正交性遭到破坏,导致子载波间干扰 (ICI),使系统性能下降、恶化。

(2) 峰值平均功率比高。多个 OFDM 子载波信号在相位一致时,所得到的叠加信号瞬时功率就会远远高于信号的平均功率,使峰值平均功率比 (Peak-to-Average Power Ratio, PAPR) 较高,这对发射机的功率放大器的要求很高,容易使信号发生畸变、频谱发生变化,从而破坏子载波的正交性,产生干扰,影响系统性能。

目前针对 OFDM 系统的上述缺点进行了广泛和深入的研究,提出了许多解决问题的有效方法和途径,在实际工程中能运用适当的方法进行防范和消除。

1.3 MIMO-OFDM 技术

MIMO-OFDM 技术是正交频分复用 (OFDM) 和多输入多输出 (Multiple-Input Multiple-Output, MIMO) 技术结合形成的新技术,通过空间复用技术可以提供更高的数据传输速率,又可以通过空时分集和正交频分复用达到很强的可靠性和频谱利用率。MIMO-OFDM 技术的提出无疑是无线通信领域的重大技术突破,其频谱利用率高、信号传输稳定、高传输速率等基本特性能够满足宽带移动通信的发展要求,因此,MIMO-OFDM 技术已经成为新一代移动通信系统的主要技术方案。

1.3.1 MIMO 技术

多输入多输出 (MIMO) 技术是无线移动通信领域智能天线技术的重大突破。MIMO 技术是指在发射端和接收端分别使用多个天线,使信号通过发射端与接收端的多个天线传送和接收,这样能实现空间复用。MIMO 系统通过多个天线实现多发多收,在不增加频谱资源和天线发射功率的情况下,可以成倍提高通信系统的信道容量和频谱利用率。

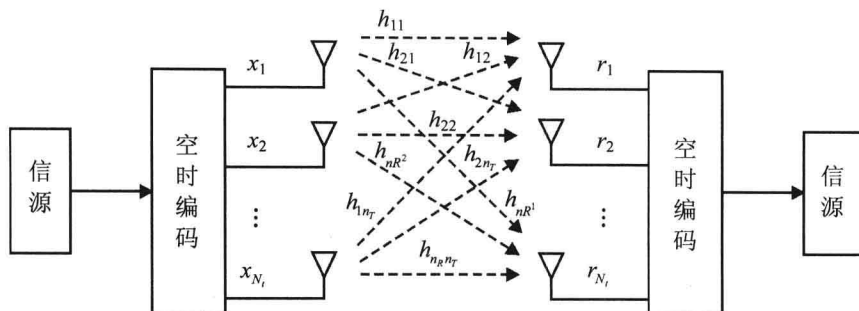


图 1-5 MIMO 系统框图

MIMO 系统结构框图如图 1-5 所示, MIMO 系统有 N_t 个发射天线和 N_r 个接收天线。在发送端,需要传输的信息流经过空时编码形成 N_t 个信息子流 x_j ($j=1, \dots, N_t$), 分别从 N_t 个天线发射出去, 经过空间信道传送后, 接收端在 N_r 个接收天线上接收到 N_r 个信号 r_i ($i=1, \dots, N_r$), 利用空时解码技术进行处理后恢复出发送的数据信息。 N_t 个发射天线的发射信号可以写成 $N_t \times 1$ 列矢量

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_{N_t})^T \quad (1-11)$$

信道可以用 $N_r \times N_t$ 的信道矩阵 $\mathbf{H}$ 来表示, 在某一时刻, 信道矩阵可以表示为

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1N_t} \\ h_{21} & h_{22} & \cdots & h_{2N_t} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_r 1} & h_{N_r 2} & \cdots & h_{N_r N_t} \end{bmatrix} \quad (1-12)$$

其中, h_{ij} 表示从第 j 个发射天线到第 i 个接收天线之间的信道衰落系数。

在接收端, 每个天线接收到的信号是 N_t 个发射天线的发射信号经过信道衰减后的叠加, 第 i ($i=1, 2, \dots, N_r$) 个接收天线上的接收信号可以表示为

$$r_i = \sum_{j=1}^{N_t} h_{ij} \cdot x_j + n_i$$

其中, n_i 是第 i 个接收天线的噪声分量, 是功率谱密度为 $N_0/2$ 的零均值复高斯随机变量。用 $N_r \times 1$ 列矢量表示 N_r 个接收天线上的接收信号

$$\mathbf{r} = (r_1, r_2, \dots, r_{N_r})^T \quad (1-13)$$

因此, 接收信号可以表示为

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (1-14)$$

其中, $\mathbf{n} = (n_1, n_2, \dots, n_{N_r})^T$ 为接收天线上的噪声矢量。

在工作过程中, N_t 个子流同时发送到信道, 各发射天线上的信号使用同一频带, 并未增加带宽。若各发射、接收天线间的信道响应独立, 即信道完全不相干, 则 MIMO 系统可以创造多个并行空间信道。通过这些并行空间信道独立地传输信息, 必然可以提高数据传输速率。根据 Foschini^[9]和 Telatar^[10]的理论研究, 在理想传播条件下, MIMO 信道容量随着天线数量的增大而线性增大。MIMO 信道容量可表示为:

$$\begin{aligned}
 C_{MIMO} &= B \log_2 [\det(\mathbf{I} + \frac{\rho}{T} \mathbf{H} \mathbf{H}^H)] \\
 &= B \log_2 [\det(\mathbf{I} + \frac{\rho}{T} \Lambda)] \\
 &= B \sum_{i=1}^M \log_2 (1 + \frac{\rho}{T} \lambda_i) \text{ bit/s/Hz}
 \end{aligned} \quad (1-15)$$

其中, $\rho = S/n$ 是信道中的信噪比, n 是加性高斯白噪声的功率, S 是信号的功率, B 为信号的带宽, $\mathbf{I}$ 是 $N_r \times N_r$ 的单位矩阵, $(\cdot)^H$ 表示矩阵的复共轭运算, $\det(\cdot)$ 表示矩阵的行列式运算, M 是信道矩阵的秩, Λ 表示 $\mathbf{H} \mathbf{H}^H$ 的 M 个特征值 λ_i 组成的对角阵。

假设发射天线和接收天线个数相同, 当发射天线和接收天线为单天线、2 个天线、4 个天线、8 个天线, 且 $\mathbf{H} = \mathbf{I}_{n_r}$ 时, MIMO 系统容量如图 1-6 所示, 从图中可以看出, 系统的容量随着天线的数量增加而增加。

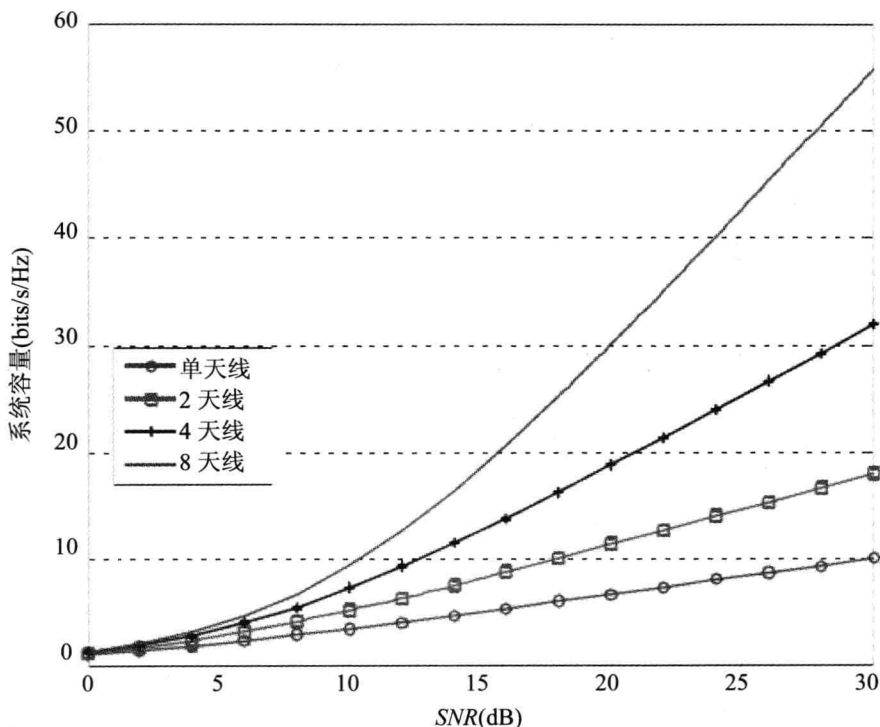


图 1-6 MIMO 系统容量比较

上述讨论的 MIMO 系统采用了不相关信道模型, 即一个发射天线到一个接收天线之间的信道与另外一个发射天线到接收天线之间的信道完全不相关, 此时空间复用增益为最大。但实际 MIMO 系统中不同天线之间信道的相关性通常是存在的, 其对空间复用的效益影响非常大。如果相关系数比较高, 发射分集或空间复用的增益就会明显降低, 当相关系数为 1 时, 则完全没有增益。在 MIMO 系统中, 如果恰当配置发射天线和接收天线, 相关系数能够降到比较低的水平, 以保证足够的空间复用增益。