



# 新一代 无线移动通信系统 关键技术

罗仁泽 编著



北京邮电大学出版社  
[www.buptpress.com](http://www.buptpress.com)

TN929.5/102

2007

# 新一代无线移动通信系统关键技术

罗仁泽 编著

北京邮电大学出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书在讲述 MIMO OFDM 原理和信道模型的基础上,主要介绍了 MIMO OFDM 接收机中的同步、信道估计、信道峰平比以及相位噪声这 4 类关键技术的基本原理、基本方法、数百种主要常规算法技术性能比较、代表性算法介绍等内容。

本书既对于学习和研究 OFDM 无线移动通信系统的初学者起到在短期内快速入门的作用,也对于开发 Beyond 3G/4G、地面数字视频广播、数字音频广播、无线局域网等系统的科研、工程技术人员以及在校高年级大学生和研究生提供有益的参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

新一代无线移动通信系统关键技术/罗仁泽编著. —北京:北京邮电大学出版社,2007

ISBN 978-7-5635-1412-0

I. 新… II. ①罗… III. 无线电通信:移动通信—通信系统 IV. TN929.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 100729 号

---

书 名: 新一代无线移动通信系统关键技术

作 者: 罗仁泽

责任编辑: 李欣一

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号(邮编:100876)

北方营销中心: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578

南方营销中心: 电话: 010-62282902 传真: 010-62282735

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京忠信诚胶印厂

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 11.75

字 数: 243 千字

印 数: 1—3 000 册

版 次: 2007 年 7 月第 1 版 2007 年 7 月第 1 次印刷

---

ISBN 978-7-5635-1412-0/TN·498

定 价: 24.00 元

· 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社营销中心联系 ·

# 序

新一代移动通信将提供高达 100 Mbit/s 甚至更高的数据传输速率,支持从语音到多媒体的业务。Beyond 3G/4G 等系统的研究正在全力推进。在有限的频谱资源上实现高速率和大容量,需要频谱效率极高的技术。OFDM 技术、MIMO 技术充分开发了频谱和空间资源,可以提高信道容量,将二者有效地结合起来已成为新一代移动通信技术的研究热点。而这方面的参考资料分散在各刊物之中,系统参考读物尚不多见。

作者罗仁泽博士广泛收集消化了国内外对于本课题的研究成果,结合他本人对 OFDM 系统的深入研究,在对多种主要常规算法技术性能进行比较的基础上提炼了代表性算法等内容,编著了本书。其中探讨了 MIMO OFDM 系统中同步、信道估计、降低峰平比、相位噪声抑制等关键技术,较为系统地介绍了这些技术的基本原理、基本方法。这些内容对于初学者会是一个很好的引导。同时,本书对于同步、信道估计、降低峰平比、相位噪声抑制等方面国内外的最新研究成果也进行了概述,并指明了今后的研究方向,为从事该领域研究的科研工作人员提供了有益的帮助。

本书对于学习和研究 OFDM 无线移动通信系统的初学者既可起到在短期内快速入门的作用,也对于开发 Beyond 3G/4G、地面数字视频广播、数字音频广播、无线局域网等系统的科研、工程技术人员以及在校高年级大学生和研究生提供有益的参考。我很乐意将他的新作推荐给广大读者。

李乐民

电子科技大学教授  
中国工程院院士

# 前 言

新一代移动通信将可以提供的数据传输速率高达 100 Mbit/s,甚至更高,支持的业务从语音到多媒体业务,包括实时的流媒体业务。数据传输速率可以根据这些业务所需速率的不同动态调整。新一代移动通信的另一个特点是低成本。这样在有限的频谱资源上实现高速率和大容量,需要频谱效率极高的技术。

新一代无线移动通信系统的目标是:适应急剧增加的移动用户数量,实现无所不在的、高质量的、高数据传输速率的、高移动速率的、低功耗的无线移动多媒体传输。此时,正交频分复用(OFDM)技术与码分多址(CDMA)技术相比就显出了其优越性。

OFDM 技术是多载波传输的一种,其多载波之间相互正交,可以高效地利用频谱资源,另外,OFDM 将总带宽分割为若干个窄带子载波可以有效地抵抗频率选择性衰落。MIMO 技术充分开发空间资源,利用多个天线实现多发多收,在不需要增加频谱资源和天线发送功率的情况下,可以成倍地提高信道容量。因此应充分开发这两种技术的潜力,将二者结合起来可以成为新一代移动通信核心技术的解决方案。

但是,MIMO OFDM 不仅对于同步误差和信道估计误差非常敏感,而且还伴随发射信号高峰平比(PAPR)、高相位噪声等缺点。针对这些缺点,学术界进行了大量研究,取得了很多成果。但是,面对新一代无线移动通信系统提出的新目标,如何有效地在接收机中实现同步、信道估计,并降低 PAPR,抑制相位噪声则是有待解决的新问题。

针对这些问题,在讲述 MIMO OFDM 原理和信道模型的基础上,本书主要讲述了 MIMO OFDM 接收机中的同步、信道估计、PAPR 以及相位噪声这四类关键技术的基本原理、基本方法、数百种主要常规算法技术性能比较、代表性算法介绍等内容。

本书的组成如下:第 1 章是“正交频分复用基本原理”,主要阐述研究背景、OFDM 研究历史、OFDM 基本原理和应用,期望读者能从这章获得 OFDM 基本知识以了解后面章节的概念。第 2 章是“OFDM 无线移动通信系统接收机设计”,首先分析 OFDM 系统理想传输模型、实际传输模型以及非理想传输条件对系统性能的影响,由此引出 OFDM 内接收机结构及其关键技术,让读者从系统角度把握建模、同步、信道估计、PAPR 和相位噪声等关键技术接收机中的作用和意义。第 3 章到第 7 章分别讲述这些关键技术。第 3 章详细讨论了无线信道特性、大尺度衰落信道模型、小尺度衰落信道模型以及 MIMO OFDM 系统信道模型。第 4 章“同步”,详细讨论了同步错误对 MIMO OFDM 系统的影响、OFDM 系统的保护间隔、导频、PN 序列同步方法以及盲同步方法,最后介绍了 MIMO OFDM 系统同步方法;对

于每一类同步方法,均介绍了算法原理、数十种常规算法性能比较以及代表性算法。第5章“信道估计与均衡技术”,首先主要阐述了 OFDM 系统中数据辅助的信道估计方法、基于判决反馈的信道估计方法以及盲信道估计方法;其次介绍了 MIMO OFDM 系统的基于训练序列的信道估计方法和基于导频符号的信道估计方法;最后强调了一类弱能量并行 PN 序列信道估计算法,该算法对于实现新一代无线移动通信系统的新目标很有益。第6章是“降低 PAPR 技术”,首先介绍了 PAPR 定义及 3 种测量 PAPR 的方法、高 PAPR 对系统性能的影响,其次论述了 OFDM 系统降低 PAPR 的 4 类常规方法,最后阐述了 MIMO OFDM 系统降低 PAPR 技术。第7章“相位噪声抑制技术”,首先介绍了相位噪声产生及其数学模型,其次讲述了相位噪声对 OFDM 系统的影响,最后概述了 MIMO OFDM 系统的相位跟踪与抑制技术。

本书在总结作者科研成果的基础上,汇编了清华大学、上海交通大学、北京邮电大学、电子科技大学、西安电子科技大学、东南大学、浙江大学、华中科技大学、大连理工大学等多所国内著名高校的学位论文研究成果,并查阅了大量的国内外参考文献,从系统的角度对 MIMO OFDM 系统关键技术进行了阐述和分析。在内容的安排上,以分析各种算法及其性能为主,并配备丰富的图表以提高本书的可读性,避免过于复杂的理论推导。

本书对于开发 Beyond 3G/4G、地面数字视频广播(DVB-T)、数字音频广播(DAB)、无线局域网(WLAN)、HIPERLAN/2 等系统的科研、工程技术人员以及在校高年级大学生和研究生无疑是非常有益的,尤其是对于学习和研究 OFDM 无线移动通信系统的初学者将达到在短期内快速入门的目的。本书可作为高等院校通信工程及其相关专业研究生、高年级本科生的教材和参考书,也可作为从事通信及其相关领域的工程技术人员的参考书。

本书得到了广东省自然科学基金项目(D06300640)、中山市科技计划基金项目(2006A155)、电子科技大学中山学院青年科技基金项目(2005Y12)的部分资助,在此表示感谢;同时,也非常感谢参考文献中所有作者所做的工作以及其他由于篇幅原因没有完全列出的对本书作出贡献的所有专家。

当然,也非常感谢我的博士生导师电子科技大学朱维乐教授对我的谆谆教诲和中国工程院院士李乐民教授在百忙中为本书作序并鼎力推荐;最后,对出版社的工作也表示真诚的谢意。

由于时间紧迫,知识有限,编写过程中难免存在不妥之处,恳请读者批评指正。

作者

# 主要符号表

$\mathbf{A}^*$	矩阵 $\mathbf{A}$ 的共轭
$\mathbf{A}^T$	矩阵 $\mathbf{A}$ 的转置
$\mathbf{A}^H$	矩阵 $\mathbf{A}$ 的共轭转置
$*$	线性卷积
$\otimes$	圆周卷积
$E(x)$	随机变量 $x$ 的数学期望值
$\delta^2$	方差
$N_c$	子载波数
$N_u$	有用子载波数
$\arg \max_{\theta} g(\theta)$	求使 $g(\theta)$ 最大时 $\theta$ 的值
$\delta(t)$	Kronecker 冲激函数
$\text{Re}[\cdot]$	实部
$\text{Im}[\cdot]$	虚部
$p(\cdot)$	概率密度函数
$h(\cdot)$	信道冲激响应函数

## 缩略语及专用术语表

3G	Third Generation	第三代移动通信
4G	Fourth Generation	第四代移动通信
ADSL	Asymmetrical Digital Subscriber Line	非对称数字用户环路
AWGN	Additive White Gaussian Noise	加性白高斯噪声
BER	Bit Error Rate	比特误码率
CDMA	Code Division Multiplexing Access	码分复用
CSI	Channel Status Information	信道状态信息
DAB	Digital Audio Broadcasting	数字音频广播系统
DVB-T	Terrestrial Digital Video Broadcasting	地面数字视频广播系统
DFT	Discrete Fourier Transform	离散傅里叶变换
DMT	Discrete Multitone Multitone	离散多音频
FDMA	Frequency Division Multiplexing Access	频分复用
GSM	Global Mobile Phone Services	全球移动通信系统
ISI	Inter-symbol-interference	符号间干扰
ICI	Inter-carrier-interference	载波间干扰
LS	Least Square	最小二乘法
LOS	Line-of-sight	直视环境
MAP	Maximum A Prior Probability	最大后验概率
MIMO	Multiple Input Multiple Output	多输入多输出
MLE	Maximuim Likelihood Estimator	最大似然估计
MMSEE	Minimum Mean Square Error Estimator	最小均方误差估计
MSE	Mean Square Error	均方误差
Non-LOS	Non-line-of-Sight	非直视环境
OBS	Obstruction	障碍环境
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiple	正交频分复用
PAPR	Peak-to-Average Power Ratio	峰平比
PSAM	Pilot Symbol Assisted Modulation	基于导频的调制方法



---

PN	Pseudo Noise	伪噪声
PTS	Partial Transmit Sequence	部分传输序列
P/S	Parallel to Series convertor	并串转换
S/P	Series to Parallel convertor	串并转换
SFN	Signal Frequency Network	单频网
SLM	Selective Mapping	选择性映射
SMCC	Synchroniztion Multicrriers CDMA	同步多载波 CDMA 系统
SNR	Signal and Noise Ratio	信噪比
SVD	Singular Value Decomposition	奇异值分解
TDMA	Time Division Multiplexing Access	时分复用
VDSL	Very-High-Speed Digital Subscriber Line	甚高速数字用户环路
WCDMA	Wide-band CDMA	宽带码分复用
WLAN	Wireless Local Area Network	无线局域网

# 目 录

## 主要符号表

## 缩略语及专用术语表

<b>第 1 章 正交频分复用基本原理</b> .....	1
1.1 研究背景和意义 .....	1
1.2 OFDM 研究历史 .....	2
1.3 OFDM 基本原理 .....	3
1.3.1 OFDM 卷积 .....	3
1.3.2 OFDM 信号 .....	4
1.3.3 保护时间和循环扩展 .....	7
1.3.4 加窗 .....	8
1.3.5 OFDM 系统设计 .....	9
1.3.6 OFDM 系统模块 .....	10
1.3.7 OFDM 系统优点 .....	11
1.3.8 OFDM 系统主要缺点 .....	12
1.4 OFDM 应用 .....	13
1.5 本章小结 .....	15
<b>第 2 章 OFDM 无线移动通信系统接收机设计</b> .....	16
2.1 OFDM 系统理想传输模型 .....	16
2.1.1 OFDM 基本原理和数学模型 .....	17
2.1.2 基带信号模型 .....	18
2.1.3 块传输模型 .....	21
2.2 OFDM 系统实际传输模型 .....	22
2.2.1 通用通信系统接收机设计模型 .....	22
2.2.2 OFDM 系统接收机设计模型 .....	23
2.3 非理想传输条件对系统性能的影响 .....	24
2.3.1 时间同步错误的影响 .....	24
2.3.2 载波频率偏移的影响 .....	24
2.3.3 载波相位噪声的影响 .....	25
2.3.4 采样时钟频率偏移的影响 .....	25
2.3.5 非理想信道估计的影响 .....	26

2.3.6 时变信道的影响 .....	26
2.3.7 发射机放大器非线性的影响 .....	26
2.4 OFDM 内接收机及关键技术 .....	27
2.5 本章小结 .....	27
<b>第 3 章 无线移动通信信道建模技术 .....</b>	<b>28</b>
3.1 无线信道特性 .....	29
3.1.1 多径和衰落 .....	30
3.1.2 移动多径信道的参数 .....	32
3.1.3 移动多径信道的衰落效应 .....	33
3.1.4 慢衰落和快衰落 .....	33
3.1.5 选择性衰落 .....	35
3.1.6 干扰 .....	39
3.2 SISO OFDM 无线移动通信大尺度衰落信道模型 .....	41
3.2.1 自由空间无线传播信道模型 .....	41
3.2.2 室外无线传播信道模型 .....	42
3.2.3 室内无线传播信道模型 .....	43
3.3 SISO OFDM 无线移动通信小尺度衰落信道模型 .....	44
3.3.1 小尺度衰落信道包络统计模型 .....	44
3.3.2 小尺度衰落信道模型建立及仿真 .....	45
3.4 MIMO OFDM 系统信号模型与信道模型 .....	46
3.4.1 MIMO OFDM 系统信号模型 .....	47
3.4.2 基于统计数据非物理 MIMO 信道模型 .....	50
3.4.3 基于物理传播的 MIMO 信道模型 .....	50
3.5 本章小结 .....	50
<b>第 4 章 同步技术 .....</b>	<b>51</b>
4.1 同步错误产生原因及对 SISO OFDM 系统性能的影响 .....	52
4.1.1 定时同步错误产生原因以及对系统性能的影响 .....	53
4.1.2 载波频率偏移产生原因以及对系统性能的影响 .....	54
4.2 同步误差对 MIMO OFDM 系统性能的影响 .....	57
4.3 基于保护间隔的 SISO OFDM 系统同步方法 .....	58
4.3.1 算法原理 .....	58
4.3.2 常规算法 .....	59
4.3.3 代表算法 .....	60
4.4 基于导频的 SISO OFDM 系统同步方法 .....	63
4.4.1 常规算法 .....	63
4.4.2 代表算法 .....	64

4.5 基于 PN 序列的 SISO OFDM 系统同步方法 .....	66
4.5.1 算法原理 .....	66
4.5.2 串行 PN 序列同步算法 .....	69
4.5.3 并行 PN 序列同步算法 .....	70
4.5.4 代表算法 .....	71
4.6 SISO OFDM 系统盲同步方法 .....	80
4.6.1 常规算法 .....	80
4.6.2 代表算法 .....	81
4.7 MIMO OFDM 系统同步方法 .....	82
4.7.1 常规算法 .....	82
4.7.2 代表算法 .....	83
4.8 本章小结 .....	87
<b>第 5 章 信道估计与均衡技术</b> .....	<b>88</b>
5.1 引言 .....	88
5.2 数据辅助的 SISO OFDM 系统信道估计方法 .....	89
5.2.1 算法原理 .....	89
5.2.2 常规算法 .....	94
5.2.3 代表算法 .....	97
5.2.4 信道插值 .....	101
5.2.5 小结 .....	102
5.3 基于判决反馈的 SISO OFDM 系统信道估计方法 .....	102
5.4 SISO OFDM 系统盲信道估计方法 .....	103
5.5 MIMO OFDM 系统信道估计方法 .....	104
5.5.1 基于训练序列的信道估计 .....	106
5.5.2 基于导频符号的信道估计 .....	108
5.6 弱能量并行 PN 序列信道估计方法 .....	111
5.7 本章小结 .....	115
<b>第 6 章 降低峰平比技术</b> .....	<b>116</b>
6.1 信号峰平比及描述 .....	116
6.1.1 信号峰平比定义 .....	116
6.1.2 信号峰平比概率分布 .....	119
6.2 PAPR 的测量 .....	123
6.2.1 传统测量方法 .....	123
6.2.2 统计测量方法 .....	123
6.2.3 利用 CCDF 曲线描述信号 PAPR .....	123
6.3 信号峰平比对系统设计的影响 .....	124

6.4 OFDM 系统降低 PAPR 技术 .....	125
6.4.1 信号预畸变方法 .....	125
6.4.2 信号扰码方法 .....	128
6.4.3 编码方法 .....	130
6.4.4 虚载波方法 .....	130
6.5 MIMO OFDM 系统降低 PAPR 技术 .....	131
6.6 本章小结 .....	132
<b>第 7 章 相位噪声抑制技术</b> .....	<b>133</b>
7.1 相位噪声的产生及建模 .....	133
7.1.1 相位噪声的产生 .....	133
7.1.2 相位噪声模型 .....	134
7.2 相位噪声对 OFDM 系统的影响 .....	135
7.2.1 相位噪声对 OFDM 信号的影响 .....	135
7.2.2 相位噪声对 OFDM 系统性能的影响 .....	137
7.3 相位噪声跟踪与抑制技术 .....	137
7.3.1 相位噪声跟踪与抑制常规技术 .....	138
7.3.2 代表算法 .....	139
7.4 MIMO OFDM 系统相位噪声抑制技术 .....	142
7.4.1 相位噪声对 MIMO OFDM 系统性能的影响 .....	143
7.4.2 共同相位噪声误差估计 .....	144
7.5 本章小结 .....	147
<b>参考文献</b> .....	<b>148</b>

# 第 1 章

## 正交频分复用基本原理

新的世纪,新一代的无线移动通信。新的无线通信网络将是基于 IPv6 包交换的,峰值传输速率超过 100 Mbit/s,并能支持用户在各种无线通信网中无缝漫游的全新网络。目前学术界和工业界已达成共识,正交频分复用(OFDM)和多输入多输出(MIMO)是新一代无线移动通信系统的最有前途的核心技术。

### 1.1 研究背景和意义

当 Marconi 在一个世纪前展示无线电报时就预示了工业的重大转折点的产生。一百多年来,无线传输技术允许人们可以不使用任何物理连接进行通信。半导体技术的进步让许多在各地的公众同时通话成为了现实。现在,移动用户的数量急剧增加,数据通信和多媒体业务也随之增加,这些都呼唤新技术的出现以提高数据传输率。

移动通信系统按照所提供的业务可分为不同的发展阶段。第一代采用频分多址(FDMA)模拟调制方式,这种系统主要包括 NMT(Nordic Mobile Telephone system)和 AMPS(Advanced Mobile Phone Services),其主要缺点是频谱利用率低,信令干扰话音业务。第二代蜂窝系统包括最先的采用时分多址(TDMA)的 GSM(Global Mobile Phone Services)、D-AMPS(Digital AMPS)、PDC(Pacific Digital Cellular)系统和采用码分多址(CDMA)的 IS-95 系统。第二代蜂窝系统主要提供了语音通信,但是数据通信传输速率仍然非常低,而且不同的网络之间也无法实现资源共享。第三代数字蜂窝移动通信系统的三大主要候选方案分别是北美的 CDMA2000 系统、欧洲和日本的 WCDMA 系统以及中国的 TD-SCDMA 系统。这些以 CDMA 为标志的第三代数字蜂窝移动通信系统协议已经出台,其主要特征是:支持多媒体业务,其数据传输速率至少为 384 kbit/s,可全球漫游,接口开放,能与不同的网络互联,终端多样化以及能从第二代平稳过渡等。然而,如果要求数据传输速率再进一步提高,3G 中使用简单的 CDMA 技术已经不能满足要求。于是,以 OFDM 调制技术为标志的第四代移动通信系统开始走入人们视野,并成为目前的研究热点。

与传统的单载波和 CDMA 系统相比,OFDM 系统具有如下优点<sup>[1]</sup>。

●对于单蜂窝和多蜂窝环境,OFDM性能远优于CDMA<sup>[1]</sup>。在单蜂窝环境下,OFDM可允许同时通话的用户数为CDMA的2~10倍。对于多蜂窝环境,OFDM可允许同时通话的用户数为CDMA的0.7~4倍。OFDM和CDMA在用户容量上的差异主要在于是否使用了蜂窝分区(cell sectorization)和语音激活检测技术(voice activity detection)。如:用1.25 MHz的带宽和19.5 kbit/s的用户数据率时,CDMA在单蜂窝系统中性能较差,在每个蜂窝(cell)中仅允许7~16个用户同时通话,而对于OFDM系统则可达到128个用户。这种CDMA的低蜂窝容量(low cell capacity)是由于在反向传输链接中使用非正交码导致了较高的用户间干扰造成的。

●OFDM可容忍较大的多径时延扩展。事实上,多径信号在进行RAKE接收机处理后将导致接收信号加强。对应于30 km的多径反射、低于100 μs的时延扩展都是可以忍受的。

●OFDM信号峰值的截除(Clipping)不会对系统性能产生较大影响。在错误率较高时,信号的峰值功率可以被截除6~9 dB。这将减少对OFDM发射端输出阶段的动态范围要求。

●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。

●OFDM系统可以有效对抗窄带干扰,因为这种干扰仅仅影响系统的一小分子载波。

所以,对于高容量、高移动速度的无线移动通信系统而言,OFDM是一个很好的调制技术,并且在今后的无线移动通信网络发展中将扮演越来越重要的角色。

## 1.2 OFDM研究历史

OFDM的研究经历了一百多年曲折的发展,现在已经应用到不同的领域中。然而,面对移动用户、移动速度、传输数据量的急剧增加,在高速移动环境下的OFDM无线移动通信系统关键技术仍是人们关注的热点和研究的难点。

OFDM可以看成是一种特殊的频分复用(Frequency Division Multiplexing, FDM)形式。它的发展经历了以下5个阶段。

第1阶段:极低频谱效率的FDM技术阶段。该技术在一个世纪前就开始使用。许多不同载频的低速信号在同一个宽带信道中进行并行传输,但是,为了在接收端分离出这些信号,传统多载波系统中各载波频率要分隔开来,并在子信道之间利用保护频带使各载波信号互不干扰,所以它的系统频谱效率很低。

第2阶段:最早的高频谱效率的多载波通信系统阶段。该系统是在1957年出现的Collins Kineplex系统<sup>[2]</sup>,该系统能在严重多径衰落效应的高频无线信道中实现无线传输。为了提高频谱利用率,可使用相互交错的正交幅度调制技术,在3 dB处载波频谱重叠,其复合谱是平坦的,子带的正交性通过交错同相或正交子带的数据得到(即将数据偏移半个周

期),此时频谱利用率可以提高,但子载波总数有限。由于该系统仍使用传统的多载波实现方式,各子信道两边的保护频带仍浪费了宝贵的带宽,降低了系统频谱利用率。

第3阶段:多载波理论发展阶段。1966年,Chang在他的文章中提出了传输信号通过一个带宽受限的信道时无ISI和ICI的原理<sup>[3]</sup>。1967年,Saltzberg经过性能分析认为:设计一个有效的系统主要应该集中考虑如何降低邻信道间干扰,而不是仅考虑每个独立的子信道情况,这是因为引起信号失真的主要原因是信道间串扰<sup>[4]</sup>。这是一个很重要的结论。

第4阶段:OFDM无线移动通信系统理论形成阶段。各个子载波之间有1/2的重叠,但保持相互正交,在接收端通过相关解调技术分离出来,避免使用滤波器组,同时使用频谱效率提高近1倍。为了减少多载波系统的复杂度,1971年S. B. Weinstein和P. M. Ebert提出了几个思想<sup>[5]</sup>:①每个子载波的频谱在没有经过滤波时,其频谱形状为sinc函数且为非带限的;②离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transform, DFT)可以完成多载波基带的调制和解调;③各符号间可以采用空白时隙作为保护间隔以消除ISI。1980年,A. Peled和A. Ruiz将空白时隙改为了循环前缀以满足色散信道时各载波的正交性<sup>[6]</sup>。1985年,Cimini将OFDM思想运用到蜂窝移动通信系统中<sup>[7]</sup>,从此奠定了OFDM无线移动通信系统的理论基础。

第5阶段:从理论到实用阶段。近十年来,大规模集成电路技术高速发展,高速大点数FFT芯片的实现已经不难,从而促进了OFDM理论的广泛应用。

## 1.3 OFDM基本原理

### 1.3.1 OFDM卷积

OFDM思想起源于FDM。在FDM中,所有低速率用户信号被独立的载波调制并进行并行传输。因此,用户之间在频域是独立的。为了更容易地解调出每个用户信号,子载波之间保留了足够的间隔。另外,在相邻两个载波之间有保护带以便设计相应的滤波器。因此,谱效率是非常低的。

上述思想可以很容易地延伸到高速率数据流的单用户通信系统。该数据流可以被分成 $N$ 路低速的数据流,采用 $N$ 个子载波进行调制并在信道中传输。在表1-1中,将一个单独的高速数据流传输与并行传输相比较。

表 1-1 串行与并行传输方案比较

传输方法	并 行	串 行
符号周期	$T_s$	$T_s/N$
传输速率	$1/T_s$	$N/T_s$
所需要的整个带宽	$2N/T_s + 0.1N/T_s$ (假设保护带宽度 $=0.1/T_s$ )	$2N/T_s$
对符号间干扰的敏感性	低	高



特别值得注意的是:在均衡器之前,并行传输方法是一种在色散信道获得高速数据率的方法,尽管其代价高而且相对带宽效率低。

从表 1-1 可知,并行传输方法的主要缺点是它的带宽效率低且需要多个调制解调模块。在 OFDM 中,该问题可通过如下方法克服:

- 采用正交子载波代替间距宽的子载波;
- 采用 IFFT 和 FFT 算法来进行调制和解调。

### 1.3.2 OFDM 信号

OFDM 中  $N$  个子载波之间相互正交并且 OFDM 符号延迟为  $T_s$ ,其余都与 FDM 技术是相似的。由于载波之间相互正交,因此,载波频率满足式(1-1),即

$$f_k = f_0 + \frac{k}{T_s}, \quad k = 1, 2, \dots, N-1 \quad (1-1)$$

该条件在时域中的意思就是载波频率必须是每个载波延迟  $1/T_s$  的整数倍,如图 1-1 所示。

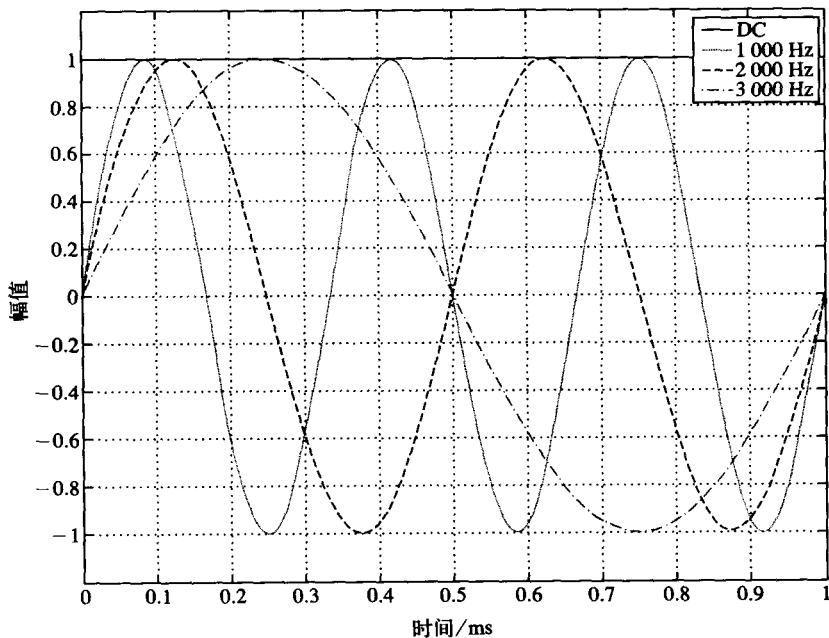


图 1-1 时域 OFDM 符号之间的子载波

从式(1-1)和图 1-2 可以看出:在频域中,载波满足著名的“在时域中无符号间干扰的奈奎斯特(Nyquist)采样定理”。因此,可以得到如下结论:在 OFDM 系统中没有载波间干扰。