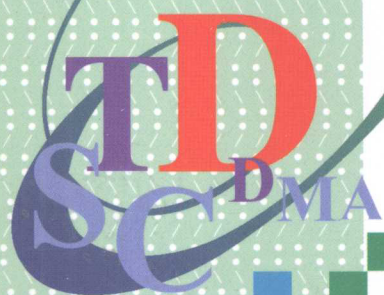


 WILEY

► 21世纪通信网络技术丛书

 TD-SCDMA

移动通信前沿技术系列

多载波通信

Multicarrier Communications

〔英〕 Lie-Liang Yang 著

张有光 潘 鹏 孙玉泉 等译



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

21 世纪通信网络技术丛书
——移动通信前沿技术系列

多 载 波 通 信

Multicarrier Communications

[英] Lie-Liang Yang 著
张有光 潘 鹏 孙玉泉 等译

電 子 工 業 出 版 社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

得益于时域和频域信号处理技术,多载波系统具有频谱效率高、灵活性强以及复杂度低等特点。因此,多载波技术被广泛应用于下一代无线通信系统中。本书全面而深入地介绍了多载波通信原理,提供了关于扩频、多载波 CDMA、多用户检测、多用户发射机预处理、MIMO 空时处理等一系列通信技术的详细分析。本书的特色包括:为 OFDM 和不同多载波 CDMA 系统建立了统一框架,给出了详尽的性能分析方法;并行研究了多用户检测技术和多用户发射机预处理技术,揭示了两者间的关系;系统研究和分析了非相干检测技术在多用户系统中的应用;详细介绍了 MIMO 和空时多载波通信的相关知识。此外,书中包含了大量的图表来说明各类系统的性能。本书适合于通信工程和电子信息相关专业高年级本科生和研究生阅读,同时也适合作为该领域工程技术人员的技术参考书。

Multicarrier Communications, ISBN 978-0-470-72200-8

Lie-Liang Yang

© 2009 John Wiley & Sons Ltd

All rights reserved. This translation published under license. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书简体中文版专有翻译出版权由 John Wiley & Sons Ltd 授予电子工业出版社。未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2009-7360

图书在版编目(CIP)数据

多载波通信/(英)杨列亮著;张有光等译. —北京:电子工业出版社,2010.6

(21 世纪通信网络技术丛书·移动通信前沿技术系列)

书名原文: Multicarrier Communications

ISBN 978-7-121-10963-8

I. ①多… II. ①杨… ②张… III. ①载波通信 IV. ①TN913.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 095557 号

责任编辑:王春宁

印 刷:北京市海淀区四季青印刷厂

装 订:涿州市桃园装订有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:34 字数:859 千字

印 次:2010 年 6 月第 1 次印刷

印 数:3 000 册 定价:79.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

出版说明

通信网络技术是当今发展最快、应用最广和最前沿的通信领域之一。通信技术发展到今天,已经不是传统意义上充满神秘色彩的深奥技术了,它已经与日常的应用密不可分。可以说,网络的出现,使通信技术得以有了广阔的用武之地。正是由于有了固定电话网、移动通信网和 Internet,使通信技术的应用在这些平台上有了用武之地,渗透到我们日常生活的方方面面。

为了促进和推动我国通信产业的发展,电子工业出版社通信分社特策划了一套《21 世纪通信网络技术丛书》。这套丛书根据不同的层面,又细分为三个系列:《移动通信前沿技术系列》、《3GPP LTE 无线通信新技术系列》和《网络通信与工程应用系列》。

《移动通信前沿技术系列》是从移动通信技术(3G 技术)的应用现状与发展情况出发,全面介绍当今移动通信领域涉及的关键技术与热点技术,例如,软件无线电;移动 IP 技术;移动数据通信;WCDMA;TD-SCDMA;cdma2000;移动通信系统网络规划与优化;智能天线技术;认知无线电技术;WiMAX、WiFi、ZigBee 宽带无线接入技术;UWB 技术;UMTS 技术;Ad Hoc 技术等。

《3GPP LTE 无线通信新技术系列》是以 3GPP 中 LTE 标准的关键技术在无线、宽带、高速、资源中的有效管理和利用,以及在 B3G/4G 无线通信领域中的应用为主。LTE 作为 3G 技术的一个重要的长期演进计划,代表了国际无线通信领域的最新发展需求和解决方案,例如,基于 OFDM 的上、下行(HSxPA)的多址接入技术、随机接入技术、多天线 MIMO 技术、多链路自适应技术、多播技术、功率控制技术、宽带无线网络的安全性、可移动性、可管理性、高效信源与信道编码和调制 MQAM 技术等。

《网络通信与工程应用系列》是以技术为先导,以构建网络的体系结构、标准、协议为目标所开展的对现代无线、移动、宽带通信网络的规划与优化,以及结合工程应用的方向所提出来的。例如,无线网状网、WLAN、无线传感器网络、3G/B3G/4G 通信网工程设计与优化、卫星移动通信网、三网融合技术、网络安全新技术与新策略、RFID 应用网络、下一代基于 SIP 的统一通信、光网络与光通信等。

本套丛书依托各高等院校在通信领域从事科研、教学、工程、管理的具有丰富的理论与实践经验的专家、教授;各研究院所的研究员;国内有一定规模和研发实力的科技公司的研发人员,以及国外知名研究实验室的专家、学者等组成编写和翻译队伍,力求实现内容的先进性、实用性和系统性;力求内容组织循序渐进、深入浅出;理论阐述概念清晰、层次分明;力求很强的可读性和可操作性。

本套丛书的主要读者对象是广大从事通信网络技术工作的各科研院所和公司的广大工程技术人员;各高等院校的专业教师和研究生;刚走上工作岗位的大学毕业生;以及与此相关的其他学科的技术人员。

本套丛书从 2008 年上半年开始陆续推出,希望广大读者能关注它,多对本套丛书提出宝贵意见与建议,欢迎通过电子邮箱 wchn@phei.com.cn 进行探讨、交流和指正,以便今后为广大读者奉献更多、更好的优秀通信技术类图书。

电子工业出版社
通信出版分社

译 者 序

随着移动通信和互联网技术的进一步融合,以多媒体业务为代表的移动互联网正在逐渐渗透到人们的日常生活中。然而,为了能够在无线环境下提供与传统互联网类似的用户体验,特别是高清视频业务,无线通信迫切需要解决频谱资源受限、易受信道衰落影响等多方面的问题。此外,多媒体信息应用的快速发展,使得支持不同数据率业务的需求日益高涨。多载波技术由于其在提高频谱利用率、抵抗频率选择性衰落、支持多种不同业务等方面具有天然的优势,正获得越来越多的关注。目前,以 OFDM 为代表的多载波技术已被广泛应用于欧洲数字音、视频广播(DAB、DVB)、国内数字电视地面传输标准以及 Wi-Fi 和 WiMAX 等领域中。此外,随着 3GPP LTE 标准化的进行,多载波技术已被广泛接纳为下一代移动通信的核心技术之一。从近几年制定的一系列无线通信标准以及标准草案可以看出,多载波技术是未来无线通信的核心技术之一,有着广阔的应用前景。

本书是杨列亮教授 10 多年教学经验和研究成果的结晶。该书全面而深入地介绍了各类多载波系统的原理,以及相应的信号处理技术。全书概念清晰,理论严谨,具有以下几方面的特点:

- 本书既注重基础内容的讲解,也具有一定的理论深度;既照顾了初学者,也适用于具有一定理论基础的研究人员和工程师。
- 本书系统阐述了各类多用户检测和多用户预处理技术在多载波系统中的应用,并对这些技术的共性和特性进行了详细描述,从而使得读者能够在对比分析中深入理解多用户检测和多用户预处理的本质,建立起统一的理论框架。
- 本书首次系统介绍了非相干多用户检测理论。在总结已有非相干多用户检测算法的基础上,以跳时多载波系统为例,详细推导了一系列非相干多用户检测算法。读者可仿照这些推导过程,获得针对其他非相干系统的多用户检测算法。
- 本书提供了大量翔实的性能分析结果,包括各类仿真曲线和结果分析。这些仿真结果除了可以帮助读者更好地理解本书内容外,还可以作为今后研究的重要参考。

除了以上所提及的特点外,在本书译者与作者的交流中获悉,本书的所有数据均是作者亲自通过仿真获得的,并且有部分内容是作者第一次将其公开发表。这进一步表明了作者在著作此书时严谨、认真的态度,以及本书所具有的前沿性。

本书可作为通信及电子信息类高年级本科生和研究生的教材使用,同时对从事无线通信工作的科研人员和工程技术人员也有很好的指导意义。

本书由张有光教授主持翻译,并负责校审。参与本书翻译的人员还有潘鹏、孙玉泉、李国彦、沈一澜、张光山、吴华森、鞠晓杰、张烁等。此外,郭晓亮、徐文杰、吉悦、蔡文龙、康旺、李晓娅、王昭昊、黄茂等也为本书的翻译做出了贡献。电子工业出版社编辑王春宁博士也在本书的翻译和出版中做了大量工作。在此,对所有为本书出版提供帮助的人士表示真挚的感谢。

由于本书涉及矩阵论、代数学、随机过程理论、信息论、最优化理论等多方面的知识,一些术语或专用词汇尚无标准译法,且译者水平有限,加之时间仓促,译文中难免有不妥甚至错误的地方,望读者不吝指正。

前 言

本书系统介绍了基于多载波传输与检测技术的无线通信系统原理与应用,内容涵盖了正交频分复用 (OFDM)、单载波频分复用 (SC-FDMA) 以及多载波码分多址 (CDMA) 系统。针对不同的扩频方式,如时域扩频、频域扩频以及时/频域联合扩频等,本书探讨了多种多样的多载波 CDMA 系统。本书第 1 章介绍了多载波通信系统的背景及基本概念;第 2 章介绍了基本的扩频通信原理,其中包括四种基本扩频技术以及两种混合扩频技术,并重点介绍了基于这些扩频技术的 CDMA 系统原理;从第 3 章起本书全面系统地介绍了多载波通信系统的理论、设计和应用。

本书主要特点包括以下几个方面。广泛而系统地介绍了扩频通信和多载波通信原理;对多载波通信系统在高斯信道和衰落信道下的性能分析方法进行了详细的描述;详细分析了包括 OFDM 在内的各种多载波通信系统中调制与解调的实现方法。为了阐明发射机最优化和接收机最优化之间的共性,以及体现接收机线性多用户检测和发射机线性多用户预处理最优化之间的对等关系,本书将接收机多用户检测理论和发射机多用户预处理理论以一种并行的方式进行阐述。本书系统地介绍了非相干多用户检测理论,并详尽地阐述了一系列非相干多用户检测和非相干干扰抑制技术。书中还介绍了多输入多输出 (MIMO) 和空时处理理论,以及在频率选择性衰落和时间选择性衰落环境下这些理论在多载波通信中的应用。此外,本书还讨论了单载波 DS-CDMA 系统和多载波 CDMA 系统之间的等价性,以及基于空时编码和空时扩频等天线分集技术的一体化。

本书部分内容来源于作者在英国南安普顿大学为高年级本科生和研究生的无线通信课程的讲稿。它适用于高年级本科生(书中的第 1~3 章及其他章节开头的一部分)、硕士和博士研究生,以及有一定通信和信号处理相关知识的研究人员和工程师。本书在总体架构上是由基本理论到高级主题。在那些处理高级主题的章节中,内容安排也是由浅入深,从简单概念到复杂分析。

我要感谢在本书撰写过程中给予帮助的许多人。首先,我要感谢我的同事 L. Hanzo 教授,他在我的整个职业生涯中从许多方面给予我的不断支持,我有幸与他合作完成了第 2 章内容的编写,他还对第 3 章的部分章节提出了修改与建议;我要感谢同事 S. Chen 教授、S. X. Ng 博士和 R. G. Maunder 博士的帮助、合作以及富有启发性的讨论;我还要感谢我所有的在读和已毕业的博士与硕士同学,他们都在完成本书的准备过程中直接或间接地做出了许多贡献。我还要感谢那些审校者们提出的建设性的意见、建议和批评。我更要感谢 Wiley 出版社的 Mark Hammond, Katharine Unwin 和 Sarah Tilley 在本书制作过程中所提供的帮助。最后,我要诚挚地感谢那些在无线通信,特别是多载波通信、多用户通信、空时处理等领域内做出杰出贡献的研究人员们,是他们使得写作本书成为可能。

杨列亮

作者简历

杨列亮 1988 年在上海铁道大学通信工程专业获得工学学士学位，其后分别于 1991 年和 1997 年在北方交通大学（现北京交通大学）获得硕士和博士学位，并于 2005 年在英国南安普敦大学获得教育学研究生证书。从 1997 年 6 月到 1997 年 12 月，他作为访问学者在捷克共和国科学院无线电电子工程研究所工作。从 1997 年 12 月至今，杨列亮博士在英国南安普顿大学电子与计算机科学学院通信研究组从事教学和科研工作。曾担任的教学和研究职务包括博士后（1997 年 12 月至 1998 年 12 月）、研究员（1999 年 1 月至 2001 年 9 月）、高级研究员（2001 年 10 月至 2002 年 8 月）、讲师（2002 年 9 月至 2006 年 2 月）。目前，杨列亮博士是英国南安普顿大学副教授，同时也是北京交通大学兼职教授。

杨列亮博士的研究范围包括无线通信、无线网络和信号处理中的诸多领域。目前已发表论文 230 余篇，其中包括 80 多篇 IEEE 等国际期刊论文和 150 多篇国际学术会议论文。此外，与他人合作出版专著 2 本，并撰写了其他一些专著的部分章节。杨列亮博士分别在 1997 年和 1998 年获得英国皇家学会中英基金和英国工程与自然研究理事会（EPSRC）的科研基金资助。他现在英国工程技术学会（IET）会员和美国电气和电子工程师学会（IEEE）的高级会员，并担任通信与网络期刊（Journal of Communications and Networks, JCN）、通信期刊（Journal of Communications, JCM）副主编。

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 扩频	(1)
1.2 正交频分复用	(5)
1.3 多址	(6)
1.4 双工	(8)
1.4.1 时分双工 (TDD)	(9)
1.4.2 频分双工 (FDD)	(9)
1.4.3 多载波双工 (MDD)	(10)
1.4.4 码分双工 (CDD)	(11)
1.5 无线通信中的分集技术	(11)
1.6 本书结构	(14)
第 2 章 码分多址通信原理	(16)
2.1 直序扩频	(16)
2.1.1 发射信号	(18)
2.1.2 DS-SS 信号检测	(19)
2.1.3 DS-SS 系统抗干扰特性	(22)
2.1.4 直序码分多址	(24)
2.2 多载波扩频通信	(25)
2.2.1 发射信号	(25)
2.2.2 多载波扩频信号检测	(27)
2.2.3 多载波码分多址	(28)
2.3 跳频扩频通信	(29)
2.3.1 M 进制频移键控	(30)
2.3.2 基于 M 进制频移键控的慢跳频	(31)
2.3.3 基于 M 进制频移键控的快跳频	(33)
2.3.4 FH/MFSK 信号的检测	(35)
2.3.5 跳频多址	(38)
2.4 跳时扩频通信	(41)
2.4.1 慢跳时 M 进制脉冲位置调制	(42)
2.4.2 快跳时 M 进制脉冲位置调制	(44)
2.4.3 慢跳时信号的检测	(45)
2.4.4 快跳时信号的检测	(48)
2.4.5 跳时多址	(50)
2.5 混合直序/跳频多址接入	(55)
2.5.1 混合 DS/SFH 信号	(55)
2.5.2 混合 DS/FFH 信号	(58)

2.6	混合直序/跳时多址接入	(64)
2.6.1	混合 DS/STH 信号	(65)
2.6.2	混合 DS/FTH 信号	(67)
2.7	总结与讨论	(71)
第 3 章	多载波通信的基本原理	(73)
3.1	引言	(73)
3.2	正交频分复用	(74)
3.2.1	调制器	(74)
3.2.2	调制参数	(76)
3.2.3	解调器	(76)
3.2.4	多载波调制与解调的实现	(77)
3.3	频域扩频多载波 CDMA	(81)
3.3.1	发射信号	(81)
3.3.2	调制参数	(82)
3.3.3	相关接收机	(84)
3.4	单载波频分多址	(86)
3.5	正交多载波 DS-CDMA	(92)
3.5.1	发射信号	(92)
3.5.2	调制参数	(93)
3.5.3	相关接收机	(95)
3.6	多音 DS-CDMA	(97)
3.6.1	发射信号	(97)
3.6.2	调制参数	(98)
3.6.3	相关接收机	(99)
3.7	广义多载波 DS-CDMA	(101)
3.7.1	发射信号	(103)
3.7.2	调制参数	(103)
3.7.3	相关接收机	(105)
3.8	跳时多载波 CDMA	(106)
3.8.1	发射信号	(106)
3.8.2	调制参数	(108)
3.8.3	接收机模型	(109)
3.9	时/频域扩频多载波 DS-CDMA	(111)
3.9.1	发射信号	(111)
3.9.2	接收机模型	(112)
3.10	总结与讨论	(114)
第 4 章	高斯信道下多载波系统性能	(116)
4.1	简介	(116)
4.2	正交频分多址的性能	(117)
4.3	单用户频域扩频多载波 CDMA 性能	(120)
4.4	单用户多载波 DS-CDMA 性能	(121)

4.5	单用户跳时多载波 CDMA 的性能	(129)
4.5.1	TH/MC-CDMA 信号功率谱密度	(129)
4.5.2	TH/MC-CDMA 系统的差错概率	(132)
4.6	支持多用户的时/频域扩频多载波 DS-CDMA 性能	(135)
4.6.1	发射信号	(136)
4.6.2	功率谱密度	(137)
4.6.3	接收信号表述	(139)
4.6.4	单用户检测和分析	(142)
4.6.5	误比特率性能分析	(146)
4.6.6	误比特率性能结果	(148)
4.7	单载波 DS-CDMA 与多载波 CDMA 的等价性	(149)
4.8	总结与讨论	(152)
附录 4.A	标准高斯近似	(153)
第 5 章	频率选择性衰落信道下的多载波系统性能	(155)
5.1	概述	(155)
5.2	多载波系统中的频率选择性衰落	(156)
5.3	码间干扰的抑制: 循环前缀和补零	(161)
5.4	多载波信号的衰落统计特性	(164)
5.5	正交频分复用的性能	(165)
5.6	单用户频域扩频多载波 CDMA 系统的性能分析	(167)
5.6.1	接收信号的表述	(167)
5.6.2	最大比合并检测和性能分析	(167)
5.6.3	性能结果	(170)
5.7	单载波频分复用性能	(173)
5.8	单载波 DS-CDMA 中的频域均衡	(178)
5.9	单用户多载波 DS-CDMA 系统的性能	(180)
5.9.1	接收信号表述	(181)
5.9.2	最大比合并检测与性能分析	(183)
5.9.3	MC DS-CDMA 系统中的比特间与载波间干扰: 一个例子	(186)
5.10	单用户跳时多载波 CDMA 系统的性能	(190)
5.10.1	判决变量及其统计特性	(190)
5.10.2	差错概率分析	(192)
5.10.3	性能结果	(194)
5.11	支持多用户的时/频域扩频多载波 DS-CDMA 系统的性能	(196)
5.11.1	接收信号表述	(196)
5.11.2	单用户检测与分析	(198)
5.11.3	统计分析	(200)
5.11.4	误比特率分析	(202)
5.11.5	性能结果	(205)
5.12	总结与讨论	(208)
附录 5.A	$\int_0^{\infty} Q(\sqrt{2\gamma})f(\gamma)d\gamma$	(209)

附录 5.B 相关 Nakagami- m 衰落中的 $E[\exp(-\sum_{j=1}^N \gamma_j / \sin^2 \theta)]$	(210)
附录 5.C Ψ 的方差推导	(211)
第 6 章 相干多用户检测	(213)
6.1 引言	(213)
6.2 频域扩频多载波 CDMA 中的多用户检测	(214)
6.2.1 解相关	(216)
6.2.2 最小方差无失真响应 (MVDR)	(220)
6.2.3 最小均方误差 (MMSE)	(223)
6.2.4 最大信干比 (MSINR)	(226)
6.2.5 最小功率无失真响应 (MPDR)	(228)
6.2.6 子空间多用户检测	(229)
6.2.7 判决反馈多用户检测	(237)
6.2.8 最大后验概率多用户检测	(248)
6.2.9 最大似然判决多用户检测	(255)
6.2.10 最小差错概率线性多用户检测	(257)
6.3 多载波 DS-CDMA 中的多用户检测	(266)
6.3.1 迫零多用户检测	(269)
6.3.2 最小均方误差多用户检测	(274)
6.3.3 最大似然判决多用户检测	(279)
6.4 时/频域扩频多载波 DS-CDMA 中的多用户检测	(280)
6.4.1 时/频域迫零多用户检测	(283)
6.4.2 时/频域 MMSE 多用户检测	(288)
6.4.3 混合时/频域 ZF-MMSE 多用户检测	(293)
6.4.4 最大似然判决多用户检测	(296)
6.5 总结与讨论	(296)
附录 6.A 关于复矢量和矩阵的推导	(298)
附录 6.B 矩阵求逆	(300)
附录 6.C 最大似然判决的多用户检测次优算法	(301)
6.C.1 搜索算法	(302)
6.C.2 非搜索算法	(309)
第 7 章 非相干多用户检测	(315)
7.1 离散 TH/MC-CDMA 信号表示法	(315)
7.2 非相干单用户检测	(320)
7.3 最优“前”非相干多用户检测	(322)
7.4 “前”非相干解相关多用户检测	(325)
7.5 “前”非相干 MMSE 多用户检测	(330)
7.6 最优“后”非相干多用户检测	(334)
7.6.1 无噪声瑞利衰落信道下的最优后“非”相干多用户检测	(336)
7.6.2 有噪声瑞利衰落信道下的最优“后”非相干多用户检测	(339)
7.7 瑞利衰落信道下的次优“后”非相干多用户检测	(341)

7.8	“后”非相干干扰消除	(344)
7.8.1	传统单用户“后”非相干检测	(344)
7.8.2	基于最小距离译码的干扰消除	(351)
7.8.3	迭代“后”干扰消除	(354)
7.8.4	“后”多级干扰消除	(360)
7.9	总结与讨论	(364)
附录 7.A	M 进制正交信号的非相干分集合并方案	(365)
附录 7.B	$P_{NC}(i)$ 的推导	(367)
第 8 章	多用户发射机预处理	(369)
8.1	发射机预处理原理：一个例子	(370)
8.2	频域扩频 MC-CDMA 发射机预处理	(372)
8.2.1	发射信号	(372)
8.2.2	接收信号的表示法	(374)
8.2.3	发射机匹配滤波单用户预处理器	(375)
8.2.4	迫零多用户发射机预处理	(379)
8.2.5	最小均方误差 (MMSE) 多用户发射机预处理	(384)
8.2.6	最大信干比 (MSINR) 多用户发射机预处理	(388)
8.2.7	最小方差无失真响应 (MVDR) 多用户发射机预处理	(389)
8.2.8	最小功率无失真响应 (MPDR) 多用户发射机预处理	(391)
8.2.9	基于特征空间的多用户发射机预处理	(393)
8.2.10	最小误比特率 (MBER) 多用户发射机预处理	(396)
8.2.11	最大互信息量多用户发射机预处理	(400)
8.2.12	发射机多用户干扰消除	(408)
8.3	频域扩频 MC DS-CDMA 系统中的发射机预处理	(413)
8.3.1	发送信号	(413)
8.3.2	接收信号的表示	(417)
8.3.3	最小均方误差多用户发射机预处理	(421)
8.3.4	最大互信息量多用户发射机预处理	(429)
8.3.5	发射功率分配	(433)
8.4	线性多用户发射和线性多用户检测的关系	(435)
8.5	多载波 CDMA 系统中用于发射机预处理的信道信息的提取	(438)
8.5.1	时分双工 (TDD)	(438)
8.5.2	频分双工 (FDD)	(439)
8.5.3	多载波双工 (MDD)	(440)
8.6	总结与讨论	(451)
第 9 章	多天线多载波 CDMA	(452)
9.1	多输入多输出通信	(452)
9.1.1	多输入多输出系统模型	(452)
9.1.2	多输入多输出信道容量	(453)
9.2	空间分集	(464)
9.2.1	接收分集	(464)

9.2.2	发射分集	(465)
9.2.3	MIMO 分集	(476)
9.3	空分多址	(477)
9.4	空时编码的多载波 CDMA 性能	(479)
9.4.1	发送方案	(479)
9.4.2	接收方案	(481)
9.4.3	差错概率分析	(483)
9.4.4	性能结果	(486)
9.5	时/频域空时扩频多载波 DS-CDMA	(488)
9.5.1	发送方案	(489)
9.5.2	接收方案	(490)
9.5.3	差错概率分析	(492)
9.6	空时多载波 DS-CDMA 通过快时变衰落信道	(494)
9.6.1	系统模型	(495)
9.6.2	检测方案	(500)
9.6.3	单用户误比特率分析	(502)
9.6.4	性能结果	(505)
9.6.5	结论	(509)
9.7	总结与讨论	(509)
参考文献		(511)

第1章 绪 论

未来无线通信系统将朝着宽带 (Wideband) 和超宽带 (Ultrawide Bandwidth, UWB) 方向发展。这些系统将采用当前最先进的无线通信技术来获取尽可能高的频谱效率 (Spectral Efficiency), 进而满足人们日益增长的对高速无线服务的需求。然而, 在无线通信系统, 特别是在商用系统的设计中, 如何在复杂度、灵活性、性能 [诸如数据率、服务质量 (Quality-of-Service, QoS) 等] 以及成本等多个要素间获得较好折中, 通常是一个重要的考虑因素。近些年来, 得益于微电子、信号处理和计算机等技术的飞速发展, 在现代无线通信中, 增加复杂度是提高灵活性和性能的有效途径。本书将介绍一系列无线通信技术的原理与应用, 这些技术已应用或可能应用于具有高频谱效率和高度灵活性的无线通信系统中。下面, 将简要介绍本书中所涉及的无线通信的几个问题, 包括被广泛关注的扩频、正交频分复用、多址、双工以及分集等技术。

1.1 扩 频

近几十年来, “扩频”已经成为无线通信领域中的常用术语。扩频技术的研究和应用源于 20 世纪 50 年代对隐蔽通信 (Covert Communications) 的需求, 时至今日已步入成熟阶段, 并几乎在无线通信的每一个领域都能发现其应用。目前, 扩频技术不仅仅广泛应用于抗干扰 (Anti-Jamming) 和抗截获 (Anti-Detection) 通信中。与此同时, 在军事和民用通信中, 该技术还应用于支持多用户通信以及高效利用无线资源上。扩频技术如此广泛的应用, 导致“扩频”这个术语几乎无处不在。

扩频实际上是一种调制技术。该技术在称为“伪随机 (Pseudo-Random)”或“伪噪声 (Pseudo-Noise, PN)”序列的扩频序列控制下, 将信号能量扩展分布到比原始信号带宽宽很多的频带。一般而言, 扩频技术可分为四种基本类型: 时域直接序列扩频 (DS-SS); 频域直接序列扩频, 或称多载波扩频 (MC-SS); 跳频扩频 (FH-SS) 以及跳时扩频 (TH-SS)。尽管这四种基本扩频方案的扩频机理互不相同, 但是它们具有一个共同特征, 即发射信号的功率谱密度 (Power Spectral Density, PSD) 通常很低, 且分布在很宽的带宽内, 与高斯噪声 (Gaussian Noise) 的功率谱密度类似。

下面我们详细介绍这四类基本扩频方案的原理。假设需要发送一个二进制序列, 例如 $\{-1, +1, +1, -1\}$ 4 个比特。未经扩频时, 传统窄带通信系统发射信号的功率谱密度-时间-频率 (PTF) 关系如图 1.1 所示。图中, T_b 表示比特持续时间, f_b 表示信号的传输带宽, P_D 表示相应的发射功率谱密度。注意在图 1.1 中, 方块的高度代表了所发射的功率谱密度, 方块在水平面上表示 +1 被传输, 反之则表示 -1 被传输。在 (二进制) 数字调制中, 所需的传输带宽通常是一个二进制比特持续时间的倒数。因此, 在图 1.1 中有 $f_b = 1/T_b$ 。此外, 传输 4 个比特所需的总能量取决于 4 个方块的体积。

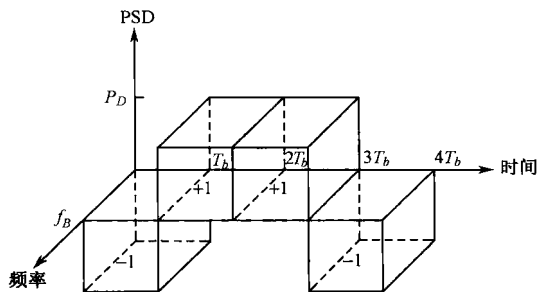


图 1.1 传统窄带信号 PTF 关系

DS-SS 信号通过以下扩频操作形成,即让 $\{-1,+1,+1,-1\}$ 中的每一个数据比特乘上一个 PN 序列,例如 $\{+1,-1,-1,+1,-1\}$, 从而产生一个二进制序列:

$$\underbrace{-1,+1,+1,-1,+1}_{\text{bit 1 } (-1)}; \underbrace{+1,-1,-1,+1,-1}_{\text{bit 2 } (+1)}; \underbrace{+1,-1,-1,+1,-1}_{\text{bit 3 } (+1)}; \underbrace{-1,+1,+1,-1,+1}_{\text{bit 4 } (-1)} \quad (1.1)$$

其中的每一个二进制数称为一个码片 (Chip)。然后这一 $\{+1,-1\}$ 码片序列在 $4T_b$ 时间间隔内被传输。正如式 (1.1) 所示,经过扩频后,在 $4T_b$ 的时间间隔内需要发送 20 个码片,因此发送每个码片所需要的持续时间为

$$T_c = \frac{4T_b}{20} = \frac{T_b}{5} \quad (1.2)$$

其中, T_c 表示码片持续时间,只有比特持续时间 T_b 的 $1/5$ 。因此,DS-SS 信号的带宽为 $f_s = 1/T_c = 5/T_b = 5f_B$, 它是没有经过扩频的传统窄带信号带宽的 5 倍,如图 1.1 所示。在 DS-SS 系统中,我们通常用扩频因子来衡量带宽的扩展情况,并定义为扩频前后信号带宽的比值。在本例中,扩频因子为 $N = 5f_B / f_B = T_b / T_c = 5$ 。

图 1.2 从概念上阐明了 DS-SS 信号的 PTF 关系。将图 1.2 与图 1.1 进行对比,我们能够发现 DS-SS 信号的带宽是传统窄带信号带宽的 5 倍。与之对应,DS-SS 信号的功率谱密度则是图 1.1 中传统窄带信号功率谱密度的五分之一。值得注意的是,当给定每个比特的传输能量时,图 1.2 中 20 个方块的体积应与图 1.1 中 4 个方块的体积一致。

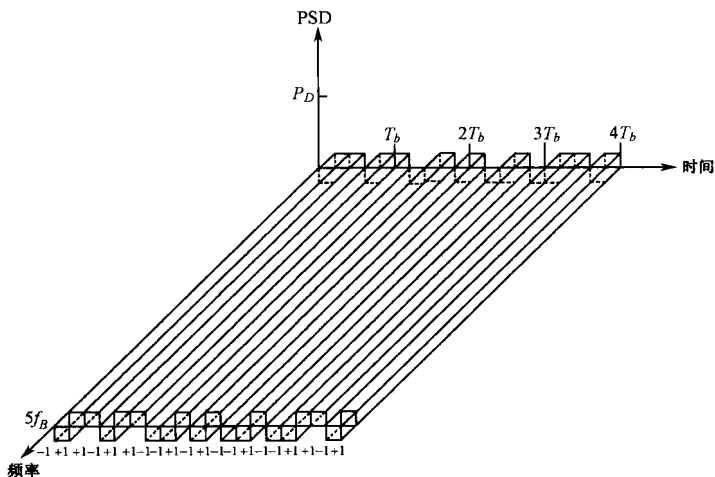


图 1.2 DS-SS 信号 PTF 关系

MC-SS 信号也是由以下扩频操作形成的, 将每一个二进制数据比特, 如 $\{-1, +1, +1, -1\}$, 乘以一个 PN 序列, 如 $\{+1, -1, -1, +1, -1\}$, 从而产生如式 (1.1) 所示的二进制序列。然后每个码片在一个比特持续时间内经过 f_B 的带宽被发送。图 1.3 从概念上阐明了 MC-SS 信号的 PTF 关系。

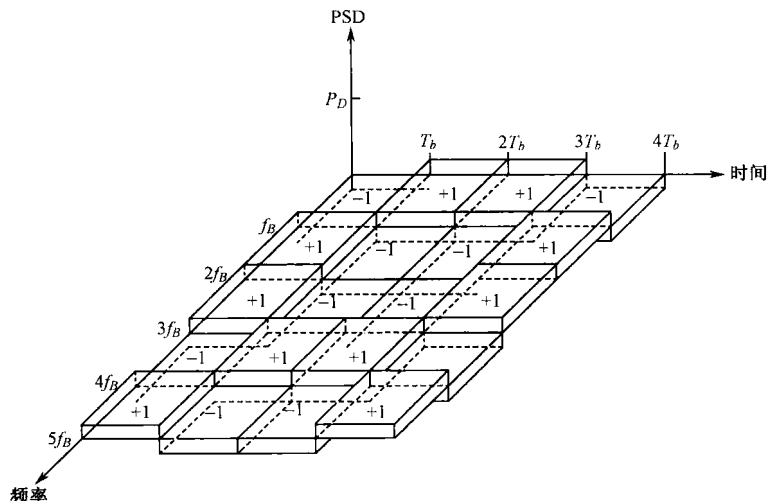


图 1.3 MC-SS 信号的 PTF 关系

正如图 1.2 所示, 在 DS-SS 方案中, 每一个比特持续时间被均分为 5 个码片持续时间, 每个码片在一个码片持续时间内被发送, 且占用 $5f_B$ 的带宽。相比之下, 在 MC-SS 方案中, 传输频带被划分为 5 个带宽为 f_B 的子频带, 每个码片在 1 个子频带内发送, 且传输的持续时间是 T_b , 如图 1.3 所示。此外, 对于给定的每比特传输能量, 在图 1.3 中所示的功率谱密度与图 1.2 中所示的功率谱密度相同, 都是图 1.1 中发射功率谱密度 P_D 的五分之一。

借助于图 1.4, 我们可以较好地理解 FH-SS 基本原理。在 FH-SS 方案中, 总的频带仍然被分为若干个子频带。与图 1.3 所示的 MC-SS 信号占用所有频带不同, 在 FH-SS 方案中, 发射信号在任意时间内只占用一个子频带。传输子频带在所谓的跳频图案 (FH Pattern) 控制下被激活, 这些跳频图案通常是随机或伪随机生成的。在图 1.4 中, 跳频图案假定为 $\{5, 1, 3, 2\}$, 因而在第 1、第 2、第 3、第 4 时隙内分别激活第 5、第 1、第 3 和第 2 个子频带。

通过与图 1.1 比较, 我们能看到在 FH-SS 方案中, 发射信号在每个比特持续时间内是一个窄带信号, 这与图 1.1 中的窄带信号相同。在 FH-SS 方案中, 频谱的扩展是通过跳频方式获得的。

在图 1.4 所示的 FH-SS 中, 跳频的速率与比特 (符号) 率相同。此外, 跳频速率可以低于比特 (符号) 速率, 即意味着多个比特 (符号) 被传输后才进行一次频率跳变。这种跳频方式称之为慢跳频 (SFH)。同时, 跳频速率也可以被设计成高于比特 (符号) 速率, 即一个比特 (符号) 在发送时需要调用多个子频带, 此类跳频相应地被称为快跳频 (FFH)。

最后, 在 TH-SS 方案中, 时间轴被划分为若干时间片或时隙, 信号只在特定的时隙内被传输。例如在图 1.5 中, 每个比特持续时间被划分为 5 个时隙, 而这 5 个时隙中只有一个被用于信号传输。如果说 FH-SS 方案原理上可以被认为是在跳频图案控制下发送频域脉冲, 则 TH-SS 可以被认为是在跳时图案控制下发送时域脉冲的一种扩频方案。在图 1.5 中, 跳时图

案被设定为 {5,1,3,2}。因此，4 个时域脉冲在第 1 到第 4 个比特持续时间内分别占用第 5、第 1、第 3 和第 2 个时隙。正如图 1.5 所示，每一个时域脉冲的宽度只有比特持续时间 T_b 的五分之一，因此，每个脉冲展开的带宽是 $5f_B$ 。

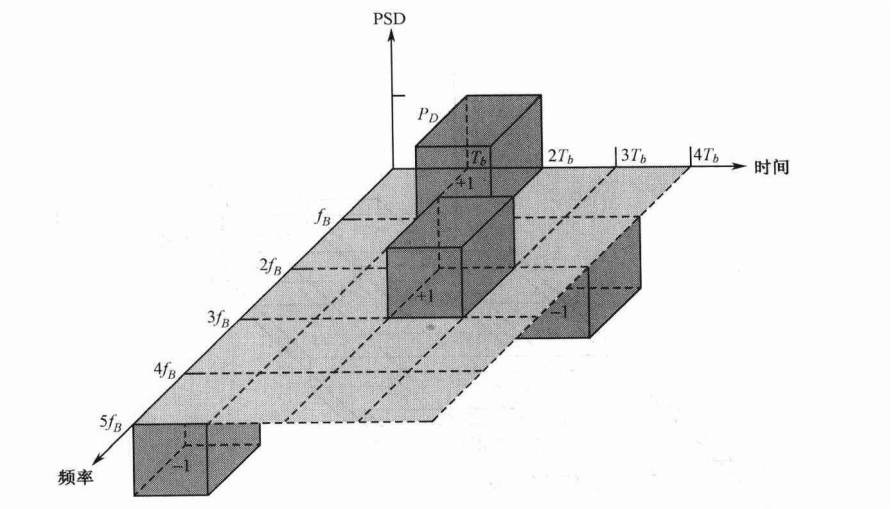


图 1.4 FH-SS 信号的 PTF 关系

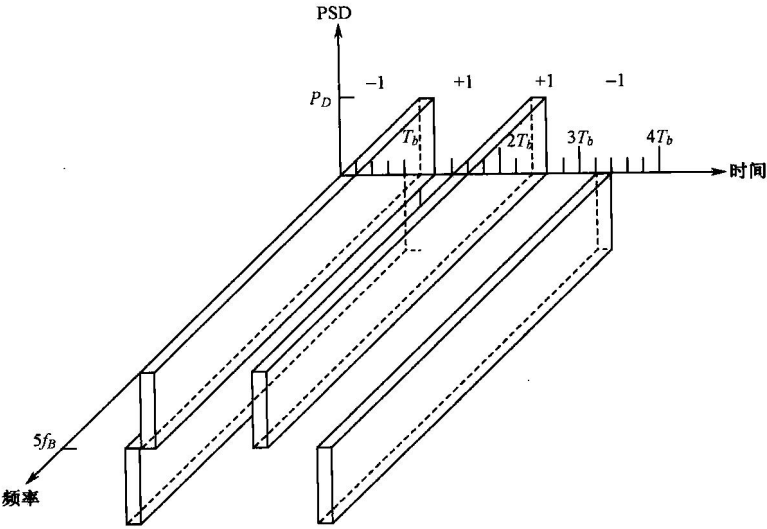


图 1.5 TH-SS 信号的 PTF 关系

此外，与 FH-SS 方案中的 SFH 和 FFH 类似，在 TH-SS 方案中也可以实现慢跳时（STH）或快跳时（FTH）。

除上述 4 种基本扩频方案外，正如本书中第 2 章将提到的，还存在诸多混合扩频方案，它们通过将 2 种或多种基本扩频方案组合而成。如果设计得好，这些混合方案可以综合利用各类基本扩频方案的优点，同时克服它们各自的缺点。

与传统的窄带通信相比，扩频通信具有很多优点，已经被广泛应用于军事和民用无线通信中。可以说扩频通信方案的诸多优点源于其固有的宽带和类似于噪声的信号形式。首先，