

国外电子与通信教材系列

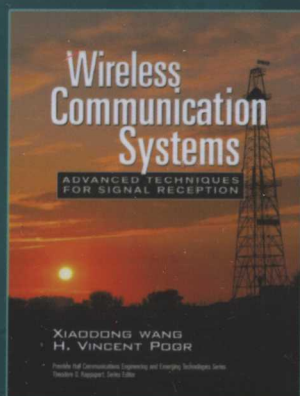


无线通信系统

—— 信号接收与处理的高级技术

Wireless Communication Systems

Advanced Techniques for Signal Reception



[美] Xiaodong Wang 著
H. Vincent Poor 著
郑宝玉 等译



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry
<http://www.phei.com.cn>

内 容 简 介

本书是无线通信领域的一部力作，重点介绍了无线通信接收机设计中各种先进的信号接收与处理技术及其算法。全书共分为10章，主要讲解了盲多用户检测、群-盲多用户检测、空时多用户检测、turbo多用户检测、非高斯信道中的鲁棒性多用户检测、窄带干扰抑制、蒙特卡罗-贝叶斯信号处理、衰落信道中的信号处理以及编码OFDM系统中的高级信号处理技术等。全书内容丰富、取材新颖，作者的讲解系统全面、深入浅出。

本书可以作为通信与电子信息类高年级本科生和研究生的教材或参考书，同样也适合于对无线通信系统有一定了解的设计人员、研究人员使用。

Simplified Chinese edition Copyright © 2005 by PEARSON EDUCATION ASIA LIMITED and Publishing House of Electronics Industry.

Wireless Communication Systems: Advanced Techniques for Signal Reception, ISBN: 0130214353 by Xiaodong Wang and H. Vincent Poor. Copyright © 2004. All Rights Reserved.

Published by arrangement with the original publisher, Pearson Education, Inc., publishing as Prentice Hall PTR.

This edition is authorized for sale only in the People's Republic of China (excluding the Special Administrative Region of Hong Kong and Macau).

本书中文简体字翻译版由电子工业出版社和Pearson Education培生教育出版亚洲有限公司合作出版。未经出版者预先书面许可，不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

本书封面贴有Pearson Education培生教育出版集团激光防伪标签，无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字：01-2003-7694

图书在版编目(CIP)数据

无线通信系统——信号接收与处理的高级技术 / (美) 王晓东等著；郑宝玉等译.

北京：电子工业出版社，2005.9

(国外电子与通信教材系列)

书名原文：Wireless Communication Systems: Advanced Techniques for Signal Reception

ISBN 7-121-00775-4

I. 无... II. ①王... ②郑... III. ①无线电通信-通信系统-信号接收
②无线电通信-通信系统-信号处理 IV. TN92

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第068170号

责任编辑：冯小贝

印 刷：北京市顺义兴华印刷厂

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

经 销：各地新华书店

开 本：787 × 1092 1/16 印张：32 字数：819千字

印 次：2005年9月第1次印刷

定 价：53.00元

凡购买电子工业出版社的图书，如有缺损问题，请向购买书店调换；若书店售缺，请与本社发行部联系。联系电话：(010) 68279077。质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

序

2001年7月间,电子工业出版社的领导同志邀请各高校十几位通信领域方面的老师,商量引进国外教材问题。与会同志对出版社提出的计划十分赞同,大家认为,这对我国通信事业、特别是对高等院校通信学科的教学工作会很有好处。

教材建设是高校教学建设的主要内容之一。编写、出版一本好的教材,意味着开设了一门好的课程,甚至可能预示着一个崭新学科的诞生。20世纪40年代MIT林肯实验室出版的一套28本雷达丛书,对近代电子学科、特别是对雷达技术的推动作用,就是一个很好的例子。


我国领导部门对教材建设一直非常重视。20世纪80年代,在原教委教材编审委员会的领导下,汇集了高等院校几百位富有教学经验的专家,编写、出版了一大批教材;很多院校还根据学校的特点和需要,陆续编写了大量的讲义和参考书。这些教材对高校的教学工作发挥了极好的作用。近年来,随着教学改革不断深入和科学技术的飞速进步,有的教材内容已比较陈旧、落后,难以适应教学的要求,特别是在电子学和通信技术发展神速、可以讲是日新月异的今天,如何适应这种情况,更是一个必须认真考虑的问题。解决这个问题,除了依靠高校的老师 and 专家撰写新的符合要求的教科书外,引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,是会有好处的。

一年多来,电子工业出版社为此做了很多工作。他们成立了一个“国外电子与通信教材系列”项目组,选派了富有经验的业务骨干负责有关工作,收集了230余种通信教材和参考书的详细资料,调来了100余种原版教材样书,依靠由20余位专家组成的出版委员会,从中精选了40多种,内容丰富,覆盖了电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等方面,既可作为通信专业本科生和研究生的教学用书,也可作为有关专业人员的参考材料。此外,这批教材,有的翻译为中文,还有部分教材直接影印出版,以供教师用英语直接授课。希望这些教材的引进和出版对高校通信教学和教材改革能起一定作用。

在这里,我还要感谢参加工作的各位教授、专家、老师与参加翻译、编辑和出版的同志们。各位专家认真负责、严谨细致、不辞辛劳、不怕琐碎和精益求精的态度,充分体现了中国教育工作者和出版工作者的良好美德。

随着我国经济建设的发展和科学技术的不断进步,对高校教学工作会不断提出新的要求和希望。我想,无论如何,要做好引进国外教材的工作,一定要联系我国的实际。教材和学术专著不同,既要注意科学性、学术性,也要重视可读性,要深入浅出,便于读者自学;引进的教材要适应高校教学改革的需要,针对目前一些教材内容较为陈旧的问题,有目的地引进一些先进的和正在发展中的交叉学科的参考书;要与国内出版的教材相配套,安排好出版英文原版教材和翻译教材的比例。我们努力使这套教材能尽量满足上述要求,希望它们能放在学生们的课桌上,发挥一定的作用。

最后,预祝“国外电子与通信教材系列”项目取得成功,为我国电子与通信教学和通信产业的发展培土施肥。也恳切希望读者能对这些书籍的不足之处、特别是翻译中存在的问题,提出意见和建议,以便再版时更正。



中国工程院院士、清华大学教授

“国外电子与通信教材系列”出版委员会主任

出版说明

进入 21 世纪以来,我国信息产业在生产和科研方面都大大加快了发展速度,并已成为国民经济发展的支柱产业之一。但是,与世界上其他信息产业发达的国家相比,我国在技术开发、教育培训等方面都还存在着较大的差距。特别是在加入 WTO 后的今天,我国信息产业面临着国外竞争对手的严峻挑战。

作为我国信息产业的专业科技出版社,我们始终关注着全球电子信息技术的发展方向,始终把引进国外优秀电子与通信信息技术教材和专业书籍放在我们工作的重要位置上。在 2000 年至 2001 年间,我社先后从世界著名出版公司引进出版了 40 余种教材,形成了一套“国外计算机科学教材系列”,在全国高校以及科研部门中受到了欢迎和好评,得到了计算机领域的广大教师与科研工作者的充分肯定。

引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,将有助于我国信息产业培养具有国际竞争能力的技术人才,也将有助于我国国内在电子与通信教学工作中掌握和跟踪国际发展水平。根据国内信息产业的现状、教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的指示精神以及高等院校老师们反映的各种意见,我们决定引进“国外电子与通信教材系列”,并随后开展了大量准备工作。此次引进的国外电子与通信教材均来自国际著名出版商,其中影印教材约占一半。教材内容涉及的学科方向包括电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等,其中既有本科专业课程教材,也有研究生课程教材,以适应不同院系、不同专业、不同层次的师生对教材的需求,广大师生可自由选择 and 自由组合使用。我们还将与国外出版商一起,陆续推出一些教材的教学支持资料,为授课教师提供帮助。

此外,“国外电子与通信教材系列”的引进和出版工作得到了教育部高等教育司的大力支持和帮助,其中的部分引进教材已通过“教育部高等学校电子信息科学与工程类专业教学指导委员会”的审核,并得到教育部高等教育司的批准,纳入了“教育部高等教育司推荐——国外优秀信息科学与技术系列教学用书”。

为作好该系列教材的翻译工作,我们聘请了清华大学、北京大学、北京邮电大学、南京邮电大学、东南大学、西安交通大学、天津大学、西安电子科技大学、电子科技大学、中山大学、哈尔滨工业大学、西南交通大学等著名高校的教授和骨干教师参与教材的翻译和审校工作。许多教授在国内电子与通信专业领域享有较高的声望,具有丰富的教学经验,他们的渊博学识从根本上保证了教材的翻译质量和专业学术方面的严格与准确。我们在此对他们的辛勤工作与贡献表示衷心的感谢。此外,对于编辑的选择,我们达到了专业对口;对于从英文原书中发现的错误,我们通过与作者联络、从网上下载勘误表等方式,逐一进行了修订;同时,我们对审校、排版、印制质量进行了严格把关。

今后,我们将进一步加强同各高校教师的密切关系,努力引进更多的国外优秀教材和教学参考书,为我国电子与通信教材达到世界先进水平而努力。由于我们对国内外电子与通信教育的发展仍存在一些认识上的不足,在选题、翻译、出版等方面的工作中还有许多需要改进的地方,恳请广大师生和读者提出批评及建议。

电子工业出版社

教材出版委员会

- | | | |
|-----|-----|--|
| 主任 | 吴佑寿 | 中国工程院院士、清华大学教授 |
| 副主任 | 林金桐 | 北京邮电大学校长、教授、博士生导师 |
| | 杨千里 | 总参通信部副部长，中国电子学会会士、副理事长
中国通信学会常务理事 |
| 委员 | 林孝康 | 清华大学教授、博士生导师、电子工程系副主任、通信与微波研究所所长
教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员 |
| | 徐安士 | 北京大学教授、博士生导师、电子学系主任
教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员 |
| | 樊昌信 | 西安电子科技大学教授、博士生导师
中国通信学会理事、IEEE 会士 |
| | 程时昕 | 东南大学教授、博士生导师、移动通信国家重点实验室主任 |
| | 郁道银 | 天津大学副校长、教授、博士生导师
教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员 |
| | 阮秋琦 | 北京交通大学教授、博士生导师
计算机与信息技术学院院长、信息科学研究所所长 |
| | 张晓林 | 北京航空航天大学教授、博士生导师、电子信息工程学院院长
教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会委员 |
| | 郑宝玉 | 南京邮电大学副校长、教授、博士生导师
教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员 |
| | 朱世华 | 西安交通大学副校长、教授、博士生导师、电子与信息工程学院院长
教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员 |
| | 彭启琮 | 电子科技大学教授、博士生导师、通信与信息工程学院院长
教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会委员 |
| | 毛军发 | 上海交通大学教授、博士生导师、电子信息与电气工程学院副院长
教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员 |
| | 赵尔沅 | 北京邮电大学教授、《中国邮电高校学报（英文版）》编委会主任 |
| | 钟允若 | 原邮电科学研究院副院长、总工程师 |
| | 刘彩 | 中国通信学会副理事长、秘书长 |
| | 杜振民 | 电子工业出版社原副社长 |
| | 王志功 | 东南大学教授、博士生导师、射频与光电集成电路研究所所长
教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会主任委员 |
| | 张中兆 | 哈尔滨工业大学教授、博士生导师、电子与信息技术研究院长 |
| | 范平志 | 西南交通大学教授、博士生导师、计算机与通信工程学院院长 |

译者序

最近十几年,无线通信经历了巨大变化。人们对无线通信容量的需求与日俱增,无线通信业务日益多样化,无线通信领域发表的文献呈爆炸性增长。无线通信及其应用和基础技术已成为当今信息科学技术最活跃的研究领域之一。大量事实无可争议地证明,先进的信号处理技术是使新一代无线系统容量需求和通信业务多样化得以满足与实现的关键。该领域的研究人员为此进行了坚持不懈的努力和卓有成效的工作。本书正是在这些工作的基础上综合大量最新研究成果写成的。该书具有以下三个特点:

- **内容全面,体系结构合理。**该书以多用户检测为主线,在一个统一的框架内,全面讲述了无线通信接收机设计中各种先进的信号处理技术及其算法。本书分为两部分:前六章结合现代无线信号传输环境和信道特性来论述多用户检测(即如何减轻多址干扰问题);后四章论述如何应对诸如窄带同信道干扰、时间选择性衰落、多载波技术等系统处理问题,以及基于蒙特卡罗-贝叶斯方法的接收机信号处理技术。两部分中各章的内容紧密联系,从而构成了一个有机的整体。
- **内容新颖,学术水平高。**该书讲述了无线通信系统中各种先进的信号接收与处理技术,所涉及的理论、方法和应用大都取材于近期国际权威或著名杂志上发表的研究成果,并充分反映了本书作者自己的最新研究结果和创新观点。书中既包括已逐渐为人们所熟知的盲多用户检测、群-盲多用户检测、空时多用户检测、turbo多用户检测等新技术,也包括刚刚出现的蒙特卡罗-贝叶斯信号处理技术,同时还给出了这些新技术在相关系统和衰落信道中的应用。
- **内容实用,针对性强。**无线通信信号处理是实用性很强的信号处理新技术。本书紧紧围绕无线通信信号的最佳接收问题来论述信号处理方法。书中以算法形式对大量的方法进行了总结和归纳。其应用大量出现在相关章节的模拟例子中,还集中体现在第6章有代表性的OFDM典型应用之中,并给出解决这些问题的基本思路和基本方法。这对激发读者运用所学理论和方法解决实际工程问题的兴趣以及提高研究能力,具有举一反三的作用。

这部力作对从事无线接收机设计的工程技术人员具有很好的指导作用,对通信与电子信息类高年级本科生、研究生、教师也具有参考价值。该书中译本的出版,必将对目前我国高校正在进行的面向新世纪课程体系和教学内容的改革起到一定的借鉴作用。

本书由郑宝玉教授主持翻译工作,并负责全书统稿和审校。在本书的翻译过程中,得到多方面的支持和帮助。除主持者外,为本书提供初稿和做出贡献的有张继东博士、倪梁方博士,以及赵贤敬、颜振亚、许文昭、陈梅清、贾孝德、万欢根、王东明、侯晓赟等,在此表示感谢。由于时间仓促,加之译者水平有限,翻译中错误和不妥之处在所难免,敬请读者和同行批评指正。

序 言

无线通信及其应用和基础技术是当今最活跃的科学技术研究领域之一。在信号处理应用中,无论是常规集成电路还是可编程集成电路方面的迅猛发展都无可争议地证明,先进的信号处理技术是实现新一代无线系统容量需求日益增加的引擎(key enabler)。因此,该领域的研究人员为开发出能够满足这种要求的新的信号处理技术进行了坚持不懈的努力。最近几年,无线通信领域发表的学术文献呈爆炸性的增长,因此很难把这些研究结果都综合在一本书中。撰写本书的主要目的是,在一个统一框架内,介绍该领域大量关键的最新研究成果。尽管这些成果主要来自于学术界,但本书的重点是推导、分析和了解新一代无线系统接收机设计中涉及到的大量高级信号处理算法。

本书主要面向设计人员、研究人员以及对无线通信系统有一定了解的研究生。因此,了解 *Wireless Communications: Principles and Practice* [405]^① 和 *Digital Communications* [396]^② 两本著作所提供的无线通信的相关知识,对读者理解本书的内容将是十分有益的。

致谢

感谢美国军事研究实验室(Army Research Laboratory)、美国国家科学基金(National Science Foundation)、新泽西州科学技术委员会(New Jersey Commission on Science and Technology)和美国海军研究室(Office of Naval Research)对本书所述研究项目的大力支持。

① 中译名:《无线通信原理与应用》(Theodore Rappaport 著);已由电子工业出版社出版。

② 中译名:《数字通信》(John Proakis 著);已由电子工业出版社出版。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 本书的写作目的	1
1.2 无线信号传输环境	2
1.3 无线接收机中的基本信号处理技术	8
1.4 本书概要	15
第 2 章 盲多用户检测	18
2.1 引言	18
2.2 同步 CDMA 中的线性接收机	19
2.3 盲多用户检测:直接法	22
2.4 盲多用户检测:子空间法	29
2.5 盲多用户检测器性能	35
2.6 子空间跟踪算法	44
2.7 多径信道中的盲多用户检测	51
2.8 附录	67
第 3 章 群 - 盲多用户检测	80
3.1 引言	80
3.2 同步 CDMA 线性群 - 盲多用户检测	80
3.3 群 - 盲多用户检测器的性能	87
3.4 同步 CDMA 非线性群 - 盲多用户检测	97
3.5 多径信道中的群 - 盲多用户检测	104
3.6 附录	121
第 4 章 非高斯信道中的鲁棒多用户检测	129
4.1 引言	129
4.2 基于鲁棒回归的多用户检测	130
4.3 鲁棒多用户检测的渐近性能	135
4.4 鲁棒多用户检测器的实现	141
4.5 鲁棒盲多用户检测	147
4.6 基于局部似然搜索的鲁棒多用户检测器	151
4.7 鲁棒群 - 盲多用户检测	155
4.8 多径信道中的鲁棒盲多用户检测	158
4.9 稳定噪声中的鲁棒多用户检测	161
4.10 附录	166

第 5 章 空时多用户信号检测	168
5.1 引言	168
5.2 CDMA 系统中的自适应阵列处理	169
5.3 最优空时多用户检测	179
5.4 线性空时多用户检测	184
5.5 同步 CDMA 中自适应空时多用户检测	201
5.6 多径 CDMA 中自适应空时多用户检测	216
第 6 章 turbo 多用户检测	228
6.1 turbo 处理引言	228
6.2 卷积码的 MAP 译码算法	230
6.3 同步 CDMA 中的 turbo 多用户检测	234
6.4 干扰未知的 turbo 多用户检测	246
6.5 多径衰落 CDMA 中的 turbo 多用户检测	255
6.6 turbo 编码的 CDMA 系统中的 turbo 多用户检测	260
6.7 空时块编码系统中的 turbo 多用户检测	269
6.8 空时格栅编码系统中的 turbo 多用户检测	280
6.9 附录	285
第 7 章 窄带干扰抑制	289
7.1 引言	289
7.2 线性预测技术	291
7.3 非线性预测技术	296
7.4 码辅助技术	305
7.5 窄带干扰抑制技术的性能比较	315
7.6 线性 MMSE 检测器对 NBI 和 MAI 的抗远-近效应能力	318
7.7 自适应线性 MMSE 窄带干扰抑制	321
7.8 最大似然码辅助方法	324
7.9 附录:RLS 线性 MMSE 检测器的收敛性	326
第 8 章 蒙特卡罗 - 贝叶斯信号处理	335
8.1 引言	335
8.2 贝叶斯信号处理	336
8.3 马氏链蒙特卡罗信号处理	338
8.4 基于 MCMC 的贝叶斯多用户检测	340
8.5 序贯蒙特卡罗信号处理	360
8.6 MIMO 信道 SMC 盲自适应均衡	366
8.7 附录	371

第 9 章 衰落信道中的信号处理	377
9.1 引言	377
9.2 多径衰落信道统计建模	379
9.3 衰落信道中基于 EM 算法的相干检测	381
9.4 衰落信道中的判决反馈差分检测	386
9.5 平坦衰落信道中的自适应 SMC 接收机	396
9.6 附录	412
第 10 章 编码 OFDM 系统中的高级信号处理技术	413
10.1 引言	413
10.2 OFDM 通信系统	413
10.3 带频率选择性衰落和频偏的编码 OFDM 系统盲 MCMC 接收机	415
10.4 空时块编码的 OFDM 系统中导频符号辅助的 turbo 接收机	428
10.5 基于 LDPC 的空时编码 OFDM 系统	441
10.6 附录	458
缩略词	459
参考文献	462

第 1 章 绪 论

1.1 本书的写作目的

无线通信是当今科学技术发展最活跃的领域之一。从支持话音业务的传输媒介到支持其他业务(如图像、文本、数据、视频等)的传输媒介的转变,极大地促进了无线通信领域的不断发展。如同 20 世纪 90 年代有线传输容量的发展一样,对新的无线传输容量的需求正以飞快的速度迅猛增长。尽管有线通信还存在许多有待解决的技术问题,但有线传输容量问题在很大程度上可由一些专用的基础设施(如光纤、路由器和交换机等)来解决。另一方面,可用来增加无线系统容量的传统资源是无线电带宽和发射机功率。遗憾的是,这两个资源在现代无线网络的发展中受到非常严格的限制:无线电带宽受到无线频谱的限制(因为相对于有用无线频谱,无线电带宽是十分紧缺的),而发射机功率则受到电源功率的限制(由于移动业务和其他便携式业务都要使用电池作为电源)。这两种资源的增长速度无法跟上人们对无线通信参量预期需求的增长速度。另一方面,快速增长的资源是一种有加工处理能力(processing power)的资源。摩尔(Moore)定律断言,微电子芯片的计算能力每 18 个月就会增长 1 倍。该定律在过去的 20 年里已被证明是正确的,而且在未来的一段时间里,该预言仍将有效。在这种情况下,近几年来,人们通过增加无线网络的智能特性,为提高无线传输容量进行了坚持不懈的努力(对于这方面工作的回顾,可参阅文献[145,146,270,376,391])。这些研究活动的一个关键内容是,开发可使无线容量显著增加而又不加大带宽和功率的新颖信号传输技术与高级接收机信号处理方法。编写本书的目的是,在一个统一的框架内介绍接收机信号处理方法的最新研究与进展。

今天,无线通信包含了十分广泛的应用。电信业是目前世界上最大的行业之一,其服务和设备制造的年收入已经超过 1 万亿美元(这个数字可与包括法国、意大利和英国等世界上许多国家的 GDP 相比)。电信业务中最大和最引人注目的业务是电话业务,而最主要的无线业务是移动电话业务(如蜂窝移动通信业务)。最近几年,世界上蜂窝电话增长十分迅速。有关的分析报告表明,蜂窝电话的用户数已经超过了有线(固定)电话的用户数。在撰写这本书的时候(也就是 2003 年),蜂窝电话的用户数已经达到了 12 亿。这个数字说明,蜂窝电话是无线技术发展中的一个强大推动力。在这段时间里,为开发新的移动数据业务(这些业务将在 3G 中提供)所做的努力,对推动新的无线信号处理技术的研究起到了十分重要的作用。然而,蜂窝电话仅仅是十分广泛的无线技术中的一种,其他技术还包括无线 pico 组网(如蓝牙片上无线电)和个域网(PAN)系统(如基于 IEEE 802.15 标准的系统),无线局域网(WLAN)系统(如基于 IEEE 802.11 和 HiperLAN 标准的系统,即所谓的 WiFi 系统)和无线城域网(WMAN)系统(如基于 IEEE 802.16 标准的系统,即所谓的 WiMax 系统),以及其他的无线本地环路(WLL)系统和各种卫星通信系统。这些无线技术为其丰富多彩的应用奠定了基础,这些应用包括本地电话服务、宽带因特网(Internet)接入、高清晰度视频和高质量音频到家服务以及车载视频/音频服务等(这些应用及相关应用请参阅文献[9,41,42,132,159,161,164,166,344,361,362,365,393~395,429,437,449,457,508,558,559])。如同 3G 那样,这些技术引发了人们对无线信号处理技术进行的大量研究工作。

这些技术由大量的传输和信道分配技术支持,包括时分多址(TDMA)技术、码分多址(CDMA)技术、其他扩频技术、正交频分复用(OFDM)和其他多载波技术,以及高速率单载波系统。选择这些技术主要用来处理无线信道的物理特性变化(最突出的变化包括多径衰落、色散和干扰等)。除了这些时域传输技术之外,还有空域技术(如波束形成和空时编码)。这些空域技术可用于发射机,以便利用无线信道的空间分集和角度分集。为了从这些传输技术中获得最大收益,也为了利用无线信道分集特性及减轻无线信道损伤,很有必要研究高级接收机中的信号处理技术。这些信号处理技术包括用来抗色散的信道均衡技术,用于解决多径效应的RAKE合并技术,用来减轻多址干扰的多用户检测技术,用来抑制同信道干扰的方法,用来利用空间分集的波束形成技术,以及联合利用信号传输环境下时间和空间特性的空时处理技术。这些技术将在后面的章节中进行阐述。

1.2 无线信号传输环境

1.2.1 单用户调制技术

为了讨论接收机中的信号处理方法,首先必须为接收信号建立一个模型。为此,我们考虑一发射机通过无线信道发射一符号序列 $\{b[0], b[1], \dots, b[M-1]\}$ 的情况。这些符号是二进制的(取1或-1),或者它们是带有更多信息的复数字序列。此处,我们仅仅考虑线性调制。此时符号序列被线性调制为一个发送信号波形,以便产生如下形式的发送信号:

$$x(t) = \sum_{i=0}^{M-1} b[i]w_i(t) \quad (1.1)$$

其中 $w_i(\cdot)$ 是与第 i 个符号相对应的调制波形。在上述表达式中,这种波形是非常普遍的。例如,一个载频为 ω_c 、基带脉冲波形为 $p(\cdot)$ 、取样率为 $1/T$ 的单载波调制系统:

$$w_i(t) = Ap(t - iT)e^{j(\omega_c t + \phi)} \quad (1.2)$$

其中幅度 $A > 0$,相位偏移 $\phi \in (-\pi, \pi)$ 。基带信号波形可以是持续时间为 T 的单位能量矩形脉冲:

$$p(t) = p_T(t) \triangleq \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{T}}, & 0 \leq t < T \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1.3)$$

也可以是一个升余弦脉冲或带限脉冲等。类似地,一个直接序列扩频系统将选择式(1.2)的波形作为调制波形,选择基带信号脉冲形状作为扩频波形:

$$p(t) = \sum_{j=0}^{N-1} c_j \psi(t - jT_c) \quad (1.4)$$

其中 N 为扩频增益, c_0, c_1, \dots, c_{N-1} 是伪随机扩频码(通常 $c_j \in \{+1, -1\}$), $\psi(\cdot)$ 是码片波形, $T_c \triangleq T/N$ 是码片间隔。码片波形可以是持续时间为 T_c 的单位能量矩形脉冲:

$$\psi(t) = p_{T_c}(t) \quad (1.5)$$

也可以选择其他的码片波形,从而降低码片带宽。因为同一扩频码在每个符号间隔内重复,因

此在使用式(1.2)时,式(1.4)的扩频波形是周期性的。由于长扩频码的周期比一个符号间隔要大,一些系统(如蜂窝电话的 CDMA)只对长扩频码起作用。这种情况可用式(1.1)建模,即可通过用式(1.4)的 $p(t)$ 代替式(1.2)中的 $p(t)$,其中扩频码从一个符号变化为另一符号,即

$$p_i(t) = \sum_{j=0}^{N-1} c_j^{(i)} \psi(t - j T_c) \quad (1.6)$$

扩频调制亦可采用跳频的方式。在这种模式中,式(1.2)中的载频是随伪随机模式的变化而变化的。特别是当载频改变的速率比符号改变的速率低很多时,就是通常所说的慢跳频。然而,载频也可能在一个符号间隔内变化,这种情况称为快跳频。单载波系统,包括两种扩频系统,已被广泛应用于蜂窝标准、无线 LAN、蓝牙系统和其他无线系统(参阅文献[42, 131, 150, 163, 178, 247, 338, 361, 362, 392, 394, 407, 408, 449, 523, 589])。

通过选择具有不同频率的发送信号波形 $w_i\{\cdot\}$,多载波系统同样可以用式(1.1)来表示。而且,式(1.2)可用下式代替:

$$w_i(t) = A p(t) e^{j(\omega_i t + \phi_i)} \quad (1.7)$$

式(1.7)中的频率和相位由第 i 个符号决定,而所有符号与基带脉冲 $p(\cdot)$ 同时发送。我们也能够看出,式(1.2)与这种情况十分相似,只是时间和频率反转(当然,多个符号通过时间序列沿多载波系统的每个载波发送)。各个载波也可以被直接扩频,其使用的基带脉冲波形由第 i 个符号决定(例如,后一种情况用于多载波 CDMA 系统中,此时扩频码跨载波频率使用)。式(1.7)的一个特殊情况是 OFDM。此时,基带脉冲波形是一个单位脉冲 p_T ,载波的相互间隔为 $1/T$,而且选择适当的相位使这些载波在该间隔上正交(这是维持正交性的最小间隔)。OFDM 被认为是无线宽带应用中最有效的技术之一,而且是 IEEE 802.11a 高速无线 LAN 标准的基础(关于多载波系统的更详细讨论,请参阅文献[354])。

一个新的无线调制方法是超宽带(UWB)调制。在这种调制中,利用非常短的脉冲而不是载波来发送数据。对于这些脉冲,既可用其定时(timing)又可用其振幅来承载信息。典型的 UWB 系统涉及到同一符号的重复传输,可能涉及到直接序列扩频码的应用(关于 UWB 系统的详细描述,可参阅文献[569])。

上述调制波形的进一步讨论及其特性将在后续章节中详细介绍。

1.2.2 多址技术

上一节我们讨论了与单用户有关的符号流传输的方法。许多无线信道,特别是新近出现的系统中的无线信道,往往作为多址系统运行。此时,多用户将分享同一无线资源。

可以通过多种方式使无线资源让多个用户共享。这些方式可看成是按频率、空间和时间把资源分配给各个用户,如图 1.1 所示。例如,一个典型的多址技术是频分多址(FDMA)技术。在 FDMA 系统中,某一给定业务的可用带宽被分成若干个子频带(子带),每个子带对应一个需要使用该业务的用户。在通信过程中,每一个用户独占性地占用子带,而不允许该子带传送其他子带的信号。FDMA 是用于无线广播、电视广播和第一代(模拟语音)蜂窝系统(如 AMPS 和 NMT)的主要复用方法。FDMA 是 20 世纪 70 年代和 20 世纪 80 年代发展起来的多址技术(参阅文献[458])。FDMA 也以某种形式与其他多址技术结合用于现有的其他蜂窝系统,以便给多个用户分配子带。

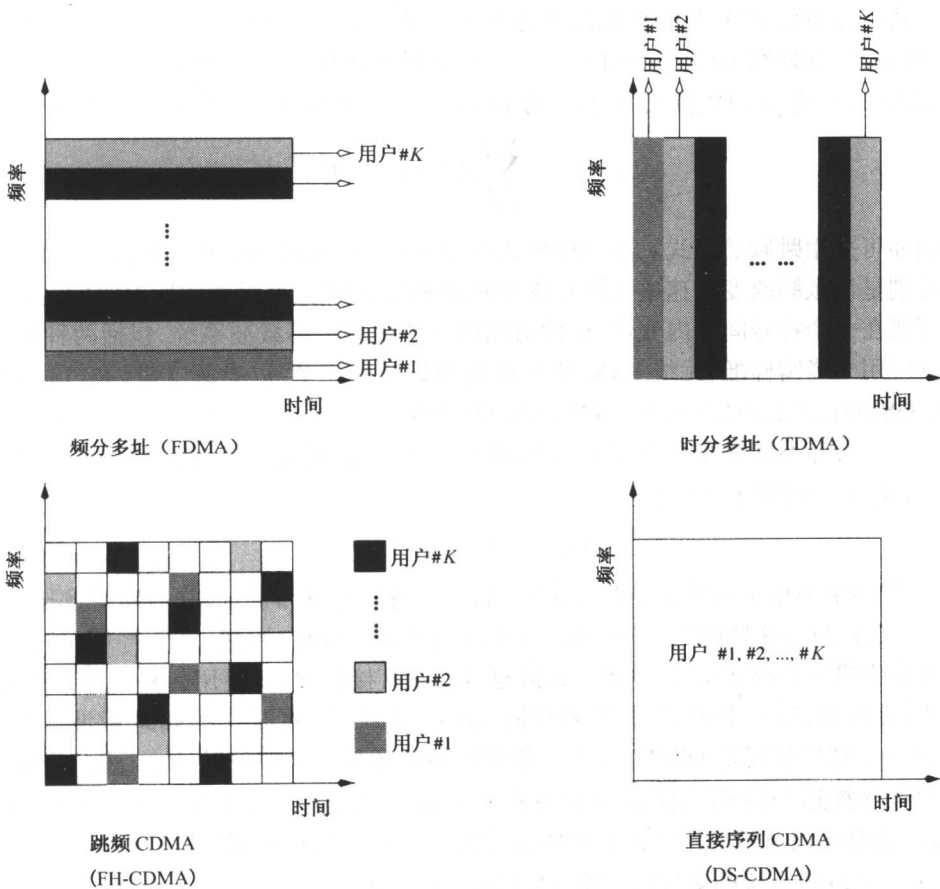


图 1.1 多址方案

类似地,用户能够以时分多址(TDMA)技术为基础共享信道。在 TDMA 中,时间被分成等长的若干个间隔,每一间隔进一步被分成等长的数个子间隔或时隙。在每个间隔给定的时隙内,允许每个用户使用整个频段来传送信号,而这个信号不允许利用发送其他用户的时隙来传送。这样,FDMA 允许用户在所有时间使用部分频段;而 TDMA 正好相反,它允许用户在部分时间使用整个频段。这种信道的分割方法在无线应用领域被广泛使用,特别是第二代蜂窝系统(如数字语音),包括广泛使用的 GSM 系统[178,407,408]和 IEEE 802.16 无线 MAN 标准等。TDMA 也用在蓝牙网络中,其中一个蓝牙设备起着网络控制器的作用,以便按时间顺序查询其他蓝牙设备。

FDMA 和 TDMA 系统试图通过给每个用户分配一段可用带宽或一段传送时间,从而将正交信道分配给所有激活用户。这些信道是正交的,因为在原理上用户间的干扰并不是来源于分配方法(尽管这种干扰实际上是存在的,正如下面进一步要讨论的)。码分多址(CDMA)通过将不同的模式或码分配给每个用户,从而允许每个用户同时占用所有时间和带宽资源。特别是 CDMA 可以通过扩频调制的方式实现。这种扩频是通过伪随机码来实现的。这个伪随机码决定了直接序列下的扩频序列和跳频方式下的跳频模式。在这些系统中,信道的特性是由伪随机码决定的,每个用户通过分配一个伪随机码而分配到一个信道。第二代蜂窝标准 IS-95

就使用了 CDMA。它使用直接序列 CDMA(DS-CDMA),以便分配整个蜂窝频带中带宽为 1.25 MHz 的子信道。CDMA 也用于跳频方式的 GSM 系统中,以便进行邻近蜂窝用户间的隔离。用于无线 LAN 系统的扩频技术也是 CDMA 的一种方式,它允许在略微相同的无线频谱稳定部分中同时运行大量这样的系统。CDMA 也是 3G 标准的基础(参阅文献[130,361,362,407])。

对于这里讨论的任意一种多址技术,可将其解析地建模为形如式(1.1)的多路发送信号形式。特别是对于一个 K 用户的系统,可以把每个用户的发送信号写为

$$x_k(t) = \sum_{i=0}^{M-1} b_k[i] w_{i,k}(t), \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (1.8)$$

其中 $x_k(\cdot)$ 、 $\{b_k[0], b_k[1], \dots, b_k[M-1]\}$ 和 $w_{i,k}(\cdot)$ 分别表示发送的信号、符号流和第 k 个用户的第 i 个调制波形。也就是说,在多址系统中,每个用户使用同样的方式建模。同单用户系统相比,区别仅在于调制波形不同(当然,符号流也不一样)。假设波形 $\{w_{i,k}(\cdot)\}$ 具有式(1.2)的形式,但具有不同的载频 $\{\omega_k\}$,我们就说这是一个 FDMA 系统;如果它仍为式(1.2)的形式,但具有时隙的幅度脉冲 $\{p_k(\cdot)\}$,则为 TDMA 系统;如果它是该形式的扩频信号,但具有不同的伪随机码或者跳频模式,则为 CDMA 系统。这些多址模型的相关细节将在后面讨论。

1.2.3 无线信道

从技术角度来看,无线通信和有线通信的最大区别在于无线信道的物理特性。这些物理特性可以通过几种现象来描述,如周围的噪声、传播损耗、多径效应、干扰和使用多天线所带来的特性。这里,我们仅大概地介绍一下这些现象,进一步的讨论请参阅文献[38,46,148,216,405,450,458,465]。

类似于所有实际的通信信道,无线信道也受到周围噪声的干扰。这些噪声来自天线和接收机的电子热运动所带来的噪声,也来自周围放射源所引起的干扰。这些噪声具有如下特性:带宽非常大(比信道中任何有用信号的带宽要宽得多),并且没有特定的结构(结构噪声可作为干扰单独处理)。这种噪声的一个常见模型是加性高斯白噪声(AWGN),这个名字意味着它是作为加性信号附加到接收机中,AWGN 具有平坦的功率谱密度,而且它在其所加入的线性滤波器的输出端引入一个服从高斯概率分布的噪声。一些无线信道中也同样存在脉冲噪声,这种噪声同样具有很宽的带宽,但是它在线性滤波器的输出端所引入的噪声的幅度不服从高斯分布。脉冲噪声的具体模型将在第 4 章讨论。

传播损耗也是无线信道的一个重要问题。传播损耗的基本类型有两种:散射损耗(diffusive loss)和阴影衰落(shadow fading)。散射损耗来自无线信道的开放特性,例如从自由空间的一个点(信号源)发出的能量离开该信号源传播时,将沿不断扩展的球面散播。这意味着在一定接收范围内的天线将会收集到一定的能量,而且该能量的大小与接收天线和发射源之间距离的平方成反比。在大多数陆地的无线信道中,由于地波传播和植被损耗等的影响,散射所引起的衰落实际上将更加严重。例如,在蜂窝电话系统中,散射损耗与蜂窝基站天线塔可见范围内距离的平方成反比,并且当距离较远时,以其高次幂(3次幂或4次幂)下降。阴影衰落的出现是由于发射机与接收机之间存在建筑物、墙体等物体。阴影衰落利用信号幅度的衰减来建模,它服从对数正态分布。阴影衰落的变化由信号幅度衰减的对数值来规定。

多径(multipath)是指发射机与接收机间出现多个无线通道所引起的接收机中收到多个发送信号副本的现象。这种多径现象是信号在无线信道的传播途中受到物体反射而造成的。已经证明,在通信接收机中存在几种形式的多径效应,这取决于与传播波长有关的路径差程度(degree of path difference)、与传送信号速率有关的路径差程度以及发射机与接收机之间的相对运动。相距很近的散射引起的多径效应会导致接收信号幅度的随机变化。由于中心极限(central-limit)的影响,结果产生的接收信号的幅度经常被建模成复高斯随机变量。其包络服从瑞利(Rayleigh)分布,这种现象也称为瑞利衰落。此外,还存在由物理构造所产生的其他衰落分布(参阅文献[396])。当散射被隔开以至于相应的路径长与载波波长相比是有一定意义的时候,沿不同路径到达接收机的信号能被建设性或破坏性地叠加在一起。此时产生的衰落同发射信号的波长(或者等效的频率)有关,这称为频率选择性衰落(frequency-selective fading)。当发射机和接收机之间存在相对运动时,这种形式的衰落也与时间有关,因为路径长度是无线电几何形状的函数。这导致了时间选择性衰落(time-selective fading),并且出现了由于多普勒(Doppler)效应所引起的信号失真。当路径长度之差使得沿不同路径到达信号的时延相对于符号间隔是有一定意义的时候,将发生如下现象:发送信号出现色散,从而引起符号间干扰(ISI),即多个符号在同一时间到达接收机。

人们已经开发出用于无线系统的许多先进的信号传输和处理方法,以用来对抗多径效应。例如,诸如扩展频谱的宽带传送信号技术通常用来应对频率选择性衰落。这既使深度频率定位的衰落最小化,也使同一信号多个副本的可解决性(resolvability)和相继相干合并变得更加便利。类似地,OFDM通过把高速率的信号分解成许多并行的低速率信号,从而减轻了高速率信号的色散影响。此外,高速率单载波系统在接收机中使用信道均衡技术来抵消色散的影响。关于这些问题的进一步讨论请参见1.3节。

干扰同样也是许多无线信道的一个重要问题,它包括多址干扰(MAI)和同信道干扰。MAI是与感兴趣信号相同的网络中其他信号所产生的干扰。例如,在蜂窝电话系统中,当来自多个移动发射机的信号相互不正交时,会在基站产生MAI。CDMA设计本身就会产生这种现象,这种现象也会发生在FDMA和TDMA中,后者是由诸如多径或非理想系统特性(如非理想信道化滤波器)等信道特性引起的。同信道干扰(CCI)是指来自不同网络但与感兴趣信号运行在相同频带的信号所产生的干扰。一个例子是蜂窝电话系统中来自相邻蜂窝的干扰。这个问题是蜂窝系统中使用FDMA的主要限制,也是第二代系统中不使用FDMA的主要原因。另一个例子是来自运行在与感兴趣信号相同的不稳定(unregulated)频谱部分的其他设备的干扰,例如与IEEE 802.11无线局域网运行在相同频带(2.4 GHz ISM)的蓝牙设备的干扰。在为无线系统设计传输技术(如前面提到的从蜂窝系统中移走FDMA)和先进信号处理系统时,减少干扰是需要考虑的一个主要因素,我们将在后面进行讨论。

上面讨论的现象可具体化为一般的无线多址信道模型。一个无线系统的信号模型如图1.2所示。我们可以把接收机接收的信号写为如下形式:

$$r(t) = \sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^{M-1} b_k[i] \int_{-\infty}^{\infty} g_k(t, u) w_{i,k}(u) du + i(t) + n(t), \quad -\infty < t < \infty \quad (1.9)$$

其中 $g_k(t, u)$ 表示第 k 个发射机和接收机之间线性系统的脉冲响应。 $i(\cdot)$ 表示信道间干扰, $n(\cdot)$ 表示周围环境噪声。把无线信道看成一个线性系统模型刚好与这种信道中所观测到的

特性相一致,一般 $g_k(\cdot, \cdot)$ 、 $i(\cdot)$ 和 $n(\cdot)$ 均为随机过程。正如前面提到的,周围环境噪声可以看成是具有很少附加结构的白噪声过程。然而,同信道干扰和信道脉冲响应是典型的已被参数化的结构化过程。

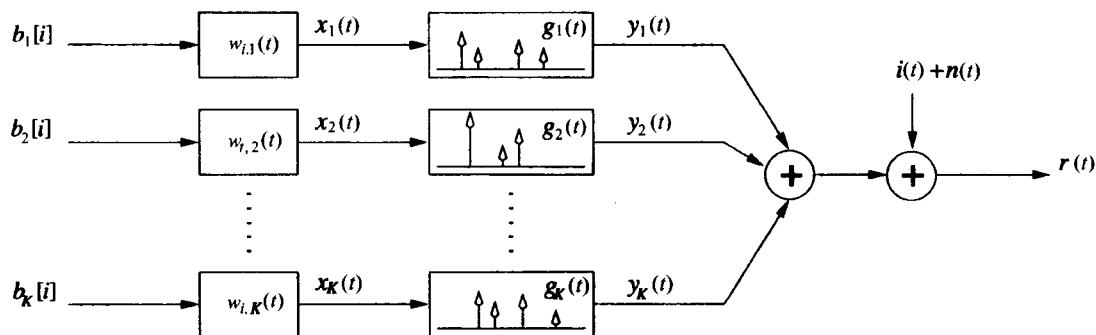


图 1.2 无线系统信号模型

一个重要的特例是理想的多径信道,其脉冲响应可表示为

$$g_k(t, u) = \sum_{\ell=1}^{L_k} \alpha_{\ell,k} \delta(t - u - \tau_{\ell,k}) \quad (1.10)$$

其中 L_k 是用户 k 和接收机之间的路径数, $\alpha_{\ell,k}$ 和 $\tau_{\ell,k}$ 分别表示第 ℓ 条路径和第 k 个用户之间的增益和延迟。 $\delta(\cdot)$ 表示狄拉克 (Dirac) 函数。正如图 1.2 所示,我们把时不变脉冲响应写为 $g_k(t) \equiv g_k(t, 0)$ 。这个模型是多径信道实际特性的一个理想化表示。尽管该模型实际上并没有如此陡峭的脉冲响应,但它可作为信号处理器设计和分析的有用模型。还应注意,该模型将会产生频率选择性衰落,因为相关时延将在接收机中引入与传播信号波长有关的建设性和破坏性的干扰。通常假设该时延 $\{\tau_{\ell,k}\}$ 对接收机来说要么是已知的,要么以所传送信号波形的基带 (bulk) 带宽的倒数而等间隔分布。路径增益 $\{\alpha_{\ell,k}\}$ 的一个典型模型是产生瑞利衰落的独立复高斯随机变量。

一般来说,从接收机中可看到与符号有关的合成调制波形:

$$f_{i,k}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} g_k(t, u) w_{i,k}(u) du \quad (1.11)$$

如果这些波形对于 i 的不同值是不正交的,就会产生 ISI。例如,我们考虑式 (1.10) 所示的、传送信号波形为

$$w_{i,k}(t) = A_k s_k(t - iT) \quad (1.12)$$

的理想多径信道,其中 $s_k(\cdot)$ 是归一化的传送信号波形 ($\int |s_k(t)|^2 dt = 1$), A_k 为复数幅度, T 是单用户符号率的倒数。在这种情况下,合成调制波形为

$$f_{i,k}(t) = f_k(t - iT) \quad (1.13)$$

和

$$f_k(t) = A_k \sum_{\ell=1}^{L_k} \alpha_{\ell,k} s_k(t - \tau_{\ell,k}) \quad (1.14)$$