

国外电子与通信教材系列

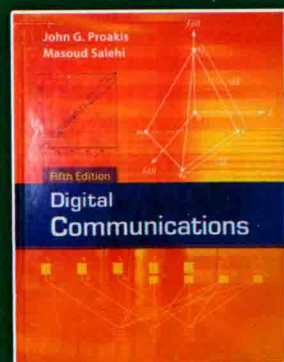
Mc
Graw
Hill
Education

Digital Communications, Fifth Edition

数字通信(第五版)

[美] John G. Proakis 著
Masoud Salehi

张力军 张宗橙 宋荣方 曹士珂 等译



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

国外电子与通信教材系列

内容简介

Digital Communications, Fifth Edition

数字通信 (第五版)

【美】 John G. Proakis 著
Masoud Salehi

张力军 张宗橙 宋荣方 曹士珂 等译

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京•BEIJING

内 容 简 介

本书是数字通信领域的一本优秀教材,既论述了数字通信的基本理论,又对数字通信的新技术进行了比较深入的分析。本书采用信号空间、随机过程的级数展开和等效低通等分析方法,根据最佳接收准则,先后讨论并分析了在加性高斯白噪声(AWGN)信道、带限信道(有符号间干扰和加性噪声)和多径衰落信道三种基本的典型信道条件下的数字信号可靠高效传输及最佳接收问题;从信号传输角度介绍了通信信号、数字调制、自适应均衡、多天线系统和最佳接收等内容;从信息传输角度介绍了信息论基础、信道容量和信道编码等内容。

本书取材新颖,讨论问题系统全面、逐步深入、概念清晰,理论分析严谨、逻辑性强,习题和参考资料丰富,适合作为信息和通信专业的研究生教材。对于相关专业的教师、学生以及科技工作者来说,本书也是一本很好的参考书。

John G. Proakis, Masoud Salehi
Digital Communications, Fifth Edition
9780072957167

Copy right © 2008 by McGraw-Hill Education.

All Rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including without limitation photocopying, recording, taping, or any database, information or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

This authorized Chinese translation edition is jointly published by McGraw-Hill Education and Publishing House of Electronics Industry. This edition is authorized for sale in China Mainland.

Copyright 2019 by McGraw-Hill Education and Publishing House of Electronics Industry.

版权所有。未经出版人事先书面许可,对本出版物的任何部分不得以任何方式或途径复制或传播,包括但不限于复印、录制、录音,或通过任何数据库、信息或可检索的系统。

本授权中文简体字翻译版由麦格劳-希尔(亚洲)教育出版公司和电子工业出版社合作出版。此版本经授权仅限在中国大陆销售。

版权©2019 由麦格劳-希尔(亚洲)教育出版公司与电子工业出版社所有。

本书封面贴有 McGraw-Hill 公司防伪标签,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字:01-2008-3160

图书在版编目(CIP)数据

数字通信:第五版/(美)普罗科斯(John G. Proakis),(美)萨利希(Masoud Salehi)著;张力军等译.

—北京:电子工业出版社,2019.1

书名原文:Digital Communications, Fifth Edition

国外电子与通信教材系列

ISBN 978-7-121-35579-0

I. ①数… II. ①普… ②萨… ③张… III. ①数字通信—高等学校—教材 IV. ①TN914.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第265199号

责任编辑:田宏峰

印 刷:三河市华成印务有限公司

装 订:三河市华成印务有限公司

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:53.25 字数:1363千字

版 次:2001年4月第1版(原书第3版)

2019年1月第3版(原书第5版)

印 次:2019年1月第1次印刷

定 价:168.00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)88254888,88258888。

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

本书咨询联系方式: tianhf@phei.com.cn。

译者序

人类社会发展到现在,信息技术得到了迅猛的发展并在社会各个领域和部门得到越来越广泛的应用,成为21世纪国际社会和世界经济发展的新的强大动力。信息技术快速发展的动因和显著的特点之一是计算机技术和数字通信技术(特别是宽带移动无线通信技术)的快速发展,计算机网络与通信网(包括移动无线网络)的相互融合使互联网迅速发展,遍布世界各国,延伸到了各个角落,并从有线扩展到了无线,延伸到了个人,各种类型的数字通信网成为互联网的载体。数字通信主要是从网络的物理层上研究数字信号传输机理及其可靠性和有效性,从而为建立可靠和高效的互联网提供坚实的物理基础。

我们翻译的 John G. Proakis 和 Masoud Salehi 著的《数字通信》(第五版)一书是著者多年教学和科研的总结。该书全面系统地论述了数字通信的基本理论,涉及确定性与随机信号分析、数字调制、AWGN 信道的最佳接收、载波和符号同步、信息论基础、线性分组码、基于网格和图的编码、带限信道的数字通信、自适应均衡、多信道和多载波系统、数字通信中的扩频信号、衰落信道的特征与信号传输、衰落信道的容量与编码、多天线系统、多用户通信等方面的内容。

本书从第一版(1983年)、第二版(1989年)、第三版(1995年)到第四版(2001年),陆续增添了不少新的内容,及时反映了数字通信技术发展的新成果。针对近些年来无线通信出现的大量新成果,本书在第四版的基础上,对内容进行了较大的修订,并对结构做了重新调整和组织。一是将第四版的信源编码(第3章)、信道容量和信道编码(第7章)以及分组码和卷积码(第8章)三章内容在第五版中修订调整为第6章、第7章和第8章三章内容,精简了信源编码的内容,加强了信息论基础知识,充实了信道编码的新的研究成果,如 Turbo 码、低密度校验码、带限信道网格码和基于格的编码,以及译码算法。二是将第四版中多径衰落信道中的数字通信(第14章)的内容在第五版中分解为三个专题分别重点论述,即第13章、第14章和第15章,充实了多径衰落信道的容量和编码内容,尤其是单独设立一章专门论述多天线系统,包括 MIMO 信道的模型、容量、检测算法和空时编码等内容,从基本理论上比较系统地论述了近几年无线通信中多天线系统的新的研究成果。

本书既论述了数字通信的基本理论问题,又对数字通信新技术进行了比较深入的分析。本书采用信号空间、随机过程的级数展开和等效低通等分析方法,根据最佳接收准则,先后讨论并分析在加性高斯白噪声(AWGN)信道、带限信道(有符号间干扰和加性噪声),以及多径衰落信道三种基本的典型信道条件下的数字信号可靠高效传输及其最佳接收问题。

本书系统全面、内容逐步深入、概念清晰,理论分析严谨、逻辑性强,习题和参考资料丰富,是一本比较全面、系统、深入论述数字通信理论的经典著作,在学术界有很大的影响,被许多学术论文所引用。同时,本书也是一本优秀的研究生教材,多年来被国内外许多高等院校普遍选为信息和通信专业的研究生教材。对相关专业的教师、学生以及科技工作者来说,本书也是一本很好的参考书。

自从1986年以来,本书一直作为南京邮电大学研究生“数字通信”课程的教材,从教学实践中,我们感到本书作为教材理论性比较强,其性质相当于“高等通信原理”,也就是说,

要求学习本课程的学生应当具备良好的本科“通信原理”基础。通过本书的学习，读者可在通信理论方面打下比较好的基础，为以后的深入研究创造良好的条件。

本书的前言、第1~5、9、10、13、14章由张力军翻译，第6~8章由张宗橙翻译，第11和12章由曹士珂翻译，第15和16章由宋荣方翻译。我们对麦格劳-希尔出版公司及电子工业出版社为本书的出版和提高出版质量的努力表示诚挚的谢意。

限于水平，译文倘有疏漏和不当之处，敬请读者不吝指出。

译者

于南京邮电大学

前 言

很高兴地欢迎 Masoud Salehi 教授作为《数字通信》(第五版)的合作著者。这一新版本进行了较大的修订并重新组织了论题,特别是在信道编码和译码方面,同时还增加了一章关于多天线系统的内容。

本书适合作为电子工程系一年级研究生相关课程的教材,也适合作为从事数字通信系统设计工程师的自学课本和参考书。为了更好地阅读本书,读者应具备基本的微积分、线性系统理论,以及概率论和随机过程等背景知识。

第 1 章是本书的导引,包括回顾与展望、信道特征的描述和信道模型。

第 2 章是对确定信号和随机信号分析内容的复习,包括带通信号和低通信号的表示、随机变量尾部概率边界、总和随机变量中心极限定理,以及随机过程。

第 3 章论述数字调制技术和数字调制信号的功率谱。

第 4 章重点分析加性高斯白噪声(AWGN)信道的最佳接收机及其差错概率性能。本章还包括格的入门知识和基于格的信号星座图,以及有线和无线通信系统链路预算分析。

第 5 章专门论述了基于最大似然准则的载波相位估计和定时同步的方法,描述了面向判决和非面向判决两种方法。

第 6 章是信息论基础,包括无损信源编码、有损数据压缩、不同信道模型的信道容量,以及信道可靠性函数。

第 7 章论述线性分组码及其特性,包括循环码、BCH 码、RS 码和级联码,描述了软判决和硬判决两种译码方法,及其在 AWGN 信道中的性能评估。

第 8 章论述基于网格和图形的编码,包括卷积码、Turbo 码、低密度校验码、带限信道网格码和基于格的编码,同时也论述了译码算法,包括维特比算法及其在 AWGN 信道上的性能、Turbo 码的迭代译码 BCJR 算法,以及和-积算法。

第 9 章重点论述带限信道的数字通信,包括带限信道的特征和信号设计,有符号间干扰和 AWGN 信道的最佳接收机,准最佳均衡方法(包括线性均衡、判决反馈均衡和 Turbo 均衡)。

第 10 章论述自适应信道均衡,描述了 LMS 和递归最小二乘算法及其性能特征,还论述了盲均衡算法。

第 11 章论述多信道和多载波调制,包括多信道二进制和 M 元正交信号在 AWGN 信道中的差错概率性能,有 AWGN 非理想线性滤波器信道的容量,OFDM 调制/解调,在 OFDM 系统中的比特和功率分配,降低 OFDM 中峰均功率比的方法。

第 12 章着重论述扩频信号与系统,重点是直接序列和跳频扩频系统及其性能。本章强调在扩频信号设计中编码的获益。

第 13 章论述衰落信道上的数字通信,包括衰落信道的特征,以及多径扩展和多普勒扩展等重要的重要参数,介绍了几种信道衰落的统计模型,重点是瑞利(Rayleigh)衰落、赖斯(Rice)衰落和 Nakagami 衰落,分析了 OFDM 系统中多普勒扩展引起的性能减损,并描述了降低这种性能减损的方法。

第 14 章着重论述衰落信道的容量和编码设计,在介绍了遍历容量和中断容量之后,研究

了衰落信道的编码，对带宽高效的编码和比特交织编码调制进行了分析，推导了在瑞利衰落和莱斯衰落中编码系统的性能。

第 15 章论述多天线系统，通常称为多输入多输出（MIMO）系统，用来实现空间分集和空间复用，包括 MIMO 信道检测算法，在有 AWGN、有或无信号衰落情况下 MIMO 信道的容量，以及空时编码等。

第 16 章论述了多用户通信问题，包括多址接入方法的容量，CDMA 系统上行链路的多用户检测方法，减少多用户广播信道干扰的方法，以及随机接入方法，如 ALOHA 和载波侦听多址（CSMA）。

使用本书授课的教师可以将这 16 章和相关内容灵活地设计成一学期或者两学期的课程。例如，可以将第 3~5 章（提供关于数字调制/解调和检测方法的基本论述），以及第 7~9 章（论述信道编码和译码可与调制/解调）一起作为一学期课程的内容，或者用第 9~12 章取代信道编码和译码；两学期课程内容可以包括衰落信道、多天线系统和多用户通信等。

著者和麦格劳-希尔教育出版公司感谢以下评阅人对第五版手稿有关章节提出了宝贵建议：

印第安那大学（Indiana University）、普渡大学（Purdue University）的 Paul Salama，多伦多大学（University of Toronto）的 Dimitrios Hatzinakos 和加利福尼亚大学欧文分校（University of California, Irvine）的 Ender Ayanoglu。

最后，第一著者感谢 Gloria Doukakis 打印了部分手稿，同时也感谢 Patrick Amihoud 准备了第 15 章和第 16 章的一些插图，以及 Apostolos Rizos 和 Kostas Stamatiou 准备了部分习题解答。

目 录

第1章 绪论	(1)
1.1 数字通信系统的基本组成部分	(1)
1.2 通信信道及其特征	(2)
1.3 通信信道的数学模型	(7)
1.4 数字通信发展的回顾与展望	(8)
1.5 本书概貌	(11)
1.6 文献注释与参考资料	(11)
第2章 确定信号与随机信号分析	(12)
2.1 带通信号与低通信号的表示	(13)
2.1.1 带通信号与低通信号	(13)
2.1.2 带通信号的等效低通	(15)
2.1.3 能量考虑	(17)
2.1.4 带通系统的等效低通	(19)
2.2 波形的信号空间表示	(19)
2.2.1 矢量空间概念	(20)
2.2.2 信号空间概念	(21)
2.2.3 信号的正交展开	(22)
2.2.4 格拉姆-施密特 (Gram-Schmidt) 过程	(23)
2.3 常用的随机变量	(29)
2.4 尾部概率的边界	(41)
2.5 随机变量和的极限定理	(47)
2.6 复随机变量	(47)
2.7 随机过程	(49)
2.7.1 广义平稳随机过程	(50)
2.7.2 循环平稳随机过程	(52)
2.7.3 本征与环随机过程	(53)
2.7.4 马尔可夫链	(53)
2.8 随机过程的级数展开	(55)
2.8.1 带限随机过程的抽样定理	(56)
2.8.2 K-L (Karhunen-Loève) 展开式	(57)
2.9 带通和低通随机过程	(59)
2.10 文献注释与参考资料	(61)
习题	(61)

第3章 数字调制方法	(71)
3.1 数字调制信号的表示	(71)
3.2 无记忆调制方法	(73)
3.2.1 脉冲幅度调制 (PAM)	(73)
3.2.2 相位调制	(76)
3.2.3 正交幅度调制	(77)
3.2.4 多维信号传输	(80)
3.3 有记忆信号传输方式	(84)
3.3.1 连续相位频移键控 (CPFSK)	(86)
3.3.2 连续相位调制 (CPM)	(87)
3.4 数字调制信号的功率谱	(95)
3.4.1 有记忆数字调制信号的功率谱密度	(96)
3.4.2 线性调制信号的功率谱密度	(97)
3.4.3 有限记忆数字调制信号的功率谱密度	(99)
3.4.4 马尔可夫结构调制方式的功率谱密度	(99)
3.4.5 CPFSK 和 CPM 信号的功率谱密度	(101)
3.5 文献注释与参考资料	(107)
习题	(108)
第4章 AWGN 信道的最佳接收机	(116)
4.1 波形与矢量信道的模型	(116)
4.2 波形与矢量 AWGN 信道	(121)
4.2.1 矢量 AWGN 信道的最佳检测	(123)
4.2.2 AWGN 信道最佳接收机的实现	(127)
4.2.3 最大似然检测差错概率的一致边界	(131)
4.3 带限信号的最佳检测和差错概率	(135)
4.3.1 ASK 或 PAM 信号的最佳检测和差错概率	(135)
4.3.2 PSK 信号的最佳检测和差错概率	(136)
4.3.3 QAM 信号的最佳检测和差错概率	(140)
4.3.4 解调与检测	(144)
4.4 功限信号的最佳检测和差错概率	(146)
4.4.1 正交信号的最佳检测和差错概率	(146)
4.4.2 双正交信号的最佳检测和差错概率	(149)
4.4.3 单纯信号的最佳检测和差错概率	(150)
4.5 不确定情况下的最佳检测: 非相干检测	(150)
4.5.1 载波调制信号的非相干检测	(152)
4.5.2 FSK 调制信号的最佳非相干检测	(154)
4.5.3 正交信号非相干检测的差错概率	(154)
4.5.4 相关二进制信号包络检测的差错概率	(157)
4.5.5 差分 PSK (DPSK)	(158)

4.6	数字信号调制方法的比较	(161)
4.7	格和基于格的星座图	(163)
4.7.1	格的介绍	(164)
4.7.2	基于格的信号星座图	(169)
4.8	有记忆信号的检测	(172)
4.9	CPM 信号的最佳接收机	(175)
4.9.1	CPM 信号的最佳解调和检测	(175)
4.9.2	CPM 信号的性能	(178)
4.9.3	CPM 信号的次最佳解调和检测	(184)
4.10	有线通信系统和无线通信系统的性能分析	(184)
4.10.1	再生中继器	(184)
4.10.2	无线通信系统中链路预算分析	(185)
4.11	文献注释与参考资料	(188)
	习题	(188)
第5章	载波和符号同步	(207)
5.1	信号参数估计	(207)
5.1.1	似然函数	(208)
5.1.2	信号解调中的载波恢复与符号同步	(209)
5.2	载波相位估计	(211)
5.2.1	最大似然载波相位估计	(212)
5.2.2	锁相环	(213)
5.2.3	加性噪声对相位估计的影响	(215)
5.2.4	面向判决环	(216)
5.2.5	非面向判决环	(220)
5.3	符号定时估计	(225)
5.3.1	最大似然定时估计	(226)
5.3.2	非面向判决定时估计	(227)
5.4	载波相位和符号定时的联合估计	(229)
5.5	最大似然估计器的性能特征	(231)
5.6	文献注释与参考资料	(233)
	习题	(234)
第6章	信息论基础	(237)
6.1	信源的数学模型	(237)
6.2	信息的对数度量	(238)
6.3	信源的无损编码	(241)
6.3.1	无损信源编码定理	(241)
6.3.2	无损编码算法	(243)
6.4	有损数据压缩	(250)
6.4.1	连续随机变量的熵和互信息	(250)

6.4.2	率失真函数	(251)
6.5	信道模型和信道容量	(254)
6.5.1	信道模型	(255)
6.5.2	信道容量	(258)
6.6	用正交信号集获取信道容量	(264)
6.7	信道可靠性函数	(265)
6.8	信道截止速率	(267)
6.8.1	Bhattacharyya 界和 Chernov 界	(267)
6.8.2	随机编码	(269)
6.9	文献注释与参考资料	(272)
	习题	(273)
第 7 章	线性分组码	(287)
7.1	基本定义	(288)
7.1.1	有限域的结构	(289)
7.1.2	矢量空间	(295)
7.2	线性分组码的一般性质	(295)
7.2.1	生成矩阵和校验矩阵	(296)
7.2.2	线性分组码的重量与距离特性	(297)
7.2.3	重量分布多项式	(298)
7.2.4	线性分组码的差错概率	(299)
7.3	一些特殊的线性分组码	(301)
7.3.1	重复码	(301)
7.3.2	汉明码	(301)
7.3.3	最大长度码	(302)
7.3.4	Reed-Muller 码	(302)
7.3.5	哈达玛码	(303)
7.3.6	高莱码	(304)
7.4	线性分组码的最佳软判决译码	(304)
7.5	线性分组码的硬判决译码	(308)
7.5.1	分组码的检错和纠错能力	(310)
7.5.2	硬判决译码的码组和比特差错概率	(311)
7.6	硬判决译码与软判决译码的性能比较	(313)
7.7	线性分组码最小距离的边界	(316)
7.7.1	辛格尔顿界	(316)
7.7.2	汉明界	(317)
7.7.3	普洛特金界	(318)
7.7.4	埃利斯界	(318)
7.7.5	McEliece-Rodemich-Rumsey-Welch (MRRW) 界	(318)
7.7.6	乌沙莫夫-吉尔伯特界	(319)

7.8 修改的线性分组码	(320)
7.8.1 缩短和伸长	(320)
7.8.2 删余和扩展	(321)
7.8.3 删信和增广	(321)
7.9 循环码	(321)
7.9.1 循环码定义和基本性质	(321)
7.9.2 系统循环码	(326)
7.9.3 循环码编码器	(328)
7.9.4 循环码的译码	(330)
7.9.5 循环码实例	(331)
7.10 BCH 码	(334)
7.10.1 BCH 码的结构	(334)
7.10.2 BCH 码译码	(337)
7.11 里德-所罗门码	(339)
7.12 突发差错信道的编码	(342)
7.13 组合码	(343)
7.13.1 乘积码	(344)
7.13.2 级联码	(345)
7.14 文献注释与参考资料	(347)
习题	(347)
第8章 基于网格和图形的编码	(354)
8.1 卷积码的结构	(354)
8.1.1 树图、网格图和状态图	(357)
8.1.2 卷积码的转移函数	(360)
8.1.3 系统卷积码、非递归卷积码和递归卷积码	(363)
8.1.4 卷积码编码器的逆与恶性码	(365)
8.2 卷积码的译码	(366)
8.2.1 卷积码的最大似然译码——维特比算法	(366)
8.2.2 卷积码最大似然译码的差错概率	(368)
8.3 二进制卷积码的距离特性	(370)
8.4 删余卷积码	(373)
8.5 卷积码的其他译码算法	(377)
8.6 卷积码应用的实际考虑	(383)
8.7 非二进制的双 k 码和级联码	(386)
8.8 卷积码的最大后验概率译码——BCJR 算法	(389)
8.9 Turbo 码和迭代译码	(394)
8.9.1 Turbo 码的性能边界	(395)
8.9.2 Turbo 码的迭代译码	(397)
8.9.3 迭代译码的 EXIT 图研究	(399)

8.10	因子图与和-积算法	(401)
8.10.1	Tanner 图	(401)
8.10.2	因子图	(403)
8.10.3	和-积算法	(405)
8.10.4	利用和-积算法的 MAP 译码	(407)
8.11	低密度奇偶校验码	(408)
8.12	带限信道的编码——网格编码调制 TCM	(410)
8.12.1	格和网格编码调制	(419)
8.12.2	Turbo 码的高带宽效率调制	(421)
8.13	文献注释与参考资料	(423)
	习题	(424)
第 9 章	通过带限信道的数字通信	(430)
9.1	带限信道的特征	(430)
9.2	带限信道的信号设计	(433)
9.2.1	无符号间干扰的带限信号的设计——奈奎斯特准则	(435)
9.2.2	具有受控 ISI 的带限信号设计——部分响应信号	(439)
9.2.3	受控 ISI 的数据检测	(442)
9.2.4	失真信道的信号设计	(446)
9.3	ISI 和 AWGN 信道的最佳接收机	(449)
9.3.1	最佳最大似然接收机	(449)
9.3.2	ISI 信道的离散时间模型	(451)
9.3.3	离散时间白噪声滤波器模型的维特比算法	(453)
9.3.4	ISI 信道的 MLSE 性能	(456)
9.4	线性均衡	(462)
9.4.1	峰值失真准则	(463)
9.4.2	均方误差 (MSE) 准则	(467)
9.4.3	MSE 均衡器的性能特征	(470)
9.4.4	分数间隔均衡器	(474)
9.4.5	基带和带通线性均衡器	(476)
9.5	判决反馈均衡器	(478)
9.5.1	判决反馈均衡器系数最佳化	(479)
9.5.2	判决反馈均衡器的性能特征	(479)
9.5.3	预测判决反馈均衡器	(482)
9.5.4	发送机的均衡——Tomlinson-Harashima 预编码	(484)
9.6	降低复杂性的 ML 检测器	(485)
9.7	迭代均衡和译码——Turbo 码均衡	(486)
9.8	文献注释与参考资料	(488)
	习题	(489)

第 10 章 自适应均衡	(501)
10.1 自适应线性均衡	(501)
10.1.1 迫零算法	(501)
10.1.2 LMS 算法	(503)
10.1.3 LMS 算法的收敛特性	(505)
10.1.4 有噪梯度估计值引起的过剩 MSE	(506)
10.1.5 加速 LMS 算法的初始收敛速率	(508)
10.1.6 自适应分数间隔均衡器——抽头泄漏算法	(510)
10.1.7 用于 ML 序列检测的自适应信道估计器	(511)
10.2 自适应判决反馈均衡器	(513)
10.3 网格编码信号的自适应均衡	(514)
10.4 自适应均衡的递推最小二乘法	(516)
10.4.1 递推最小二乘(卡尔曼)算法	(517)
10.4.2 线性预测器和格型滤波器	(520)
10.5 自恢复(盲)均衡	(524)
10.5.1 基于最大似然准则的盲均衡	(524)
10.5.2 随机梯度算法	(527)
10.5.3 基于二阶和高阶信号统计量的盲均衡算法	(531)
10.6 文献注释与参考资料	(532)
习题	(533)
第 11 章 多信道和多载波系统	(536)
11.1 AWGN 信道中的多信道数字通信	(536)
11.1.1 二进制信号	(538)
11.1.2 M 元正交信号	(539)
11.2 多载波通信	(541)
11.2.1 单载波和多载波调制	(541)
11.2.2 非理想线性滤波器信道的容量	(541)
11.2.3 正交频分复用(OFDM)	(542)
11.2.4 OFDM 系统的调制和解调	(544)
11.2.5 OFDM 系统的 FFT 算法实现	(545)
11.2.6 多载波信号的谱特征	(547)
11.2.7 多载波调制中的比特和功率的分配	(549)
11.2.8 多载波调制中的峰均比	(551)
11.2.9 多载波调制中的信道编码的一些思考	(552)
11.3 文献注释与参考资料	(553)
习题	(553)
第 12 章 用于数字通信的扩频信号	(555)
12.1 扩频数字通信系统的模型	(556)
12.2 直接序列扩频信号	(557)

12.2.1	译码器的差错概率性能	(559)
12.2.2	DS 扩频信号的一些应用	(566)
12.2.3	脉冲干扰对 DS 扩频系统的影响	(570)
12.2.4	DS 扩频系统中窄带干扰的删除	(574)
12.2.5	PN 序列的生成	(579)
12.3	跳频扩频信号	(582)
12.3.1	AWGN 信道中的 FH 扩频信号的性能	(584)
12.3.2	部分频带干扰下 FH 扩频信号的性能	(586)
12.3.3	基于 FH 扩频信号的 CDMA 系统	(590)
12.4	其他类型的扩频信号	(591)
12.5	扩频系统的同步	(592)
12.6	文献注释与参考资料	(598)
	习题	(598)
第 13 章	衰落信道 I: 信道特征与信号传输	(603)
13.1	多径衰落信道的特征	(603)
13.1.1	信道相关函数和功率谱	(605)
13.1.2	衰落信道的统计模型	(610)
13.2	信号特征对信道模型选择的影响	(612)
13.3	频率非选择性慢衰落信道	(614)
13.4	多径衰落信道的分集技术	(617)
13.4.1	二进制信号	(617)
13.4.2	多相信号	(623)
13.4.3	M 元正交信号	(624)
13.5	频率选择性慢衰落信道中的信号传输: RAKE 解调器	(628)
13.5.1	抽头延迟线信道模型	(629)
13.5.2	RAKE 解调器	(630)
13.5.3	RAKE 解调器的性能	(632)
13.5.4	符号间干扰信道的接收机结构	(638)
13.6	多载波调制 (OFDM)	(639)
13.6.1	多普勒扩展引起的 OFDM 系统性能的减损	(640)
13.6.2	OFDM 系统中 ICI 的抑制	(643)
13.7	文献注释与参考资料	(644)
	习题	(644)
第 14 章	衰落信道 II: 容量与编码	(651)
14.1	衰落信道的容量	(652)
14.2	遍历与中断容量	(655)
14.2.1	瑞利衰落信道的遍历容量	(657)
14.2.2	瑞利衰落信道的中断容量	(662)
14.3	衰落信道的编码	(664)

14.4	衰落信道中编码系统的性能	(666)
14.5	衰落信道的网格编码调制	(672)
14.5.1	衰落信道的 TCM 系统	(673)
14.5.2	多重网格编码调制 (MTCM)	(675)
14.6	比特交织编码调制	(677)
14.7	频率域编码	(682)
14.7.1	线性二进制分组码软判决译码的差错概率	(682)
14.7.2	线性分组码硬判决译码的差错概率	(684)
14.7.3	用于瑞利衰落信道的卷积码性能的上边界	(684)
14.7.4	衰落信道中恒重码和级联码的应用	(685)
14.8	衰落信道的信道截止速率	(691)
14.9	文献注释与参考资料	(694)
	习题	(695)
第 15 章	多天线系统	(698)
15.1	多天线系统的信道模型	(698)
15.1.1	慢衰落频率非选择性 MIMO 信道中的信号传输	(699)
15.1.2	MIMO 系统中数据符号检测	(700)
15.1.3	通过慢衰落频率选择性 MIMO 信道的信号传输	(704)
15.2	MIMO 信道的容量	(709)
15.2.1	数学准备知识	(709)
15.2.2	频率非选择性确定性 MIMO 信道的容量	(710)
15.2.3	频率非选择性遍历随机 MIMO 信道的容量	(711)
15.2.4	中断容量	(713)
15.2.5	发射机知道信道矩阵时 MIMO 信道的容量	(715)
15.3	扩频信号与多码传输	(716)
15.3.1	正交扩频序列	(717)
15.3.2	复用增益与分集增益	(719)
15.3.3	多码 MIMO 系统	(720)
15.4	MIMO 信道的编码	(723)
15.4.1	瑞利衰落信道中时间编码 SISO 系统的性能	(723)
15.4.2	MIMO 信道的比特交织时间编码	(725)
15.4.3	MIMO 信道的空时分组码	(727)
15.4.4	空时码的成对差错概率	(733)
15.4.5	MIMO 信道的空时网格码	(734)
15.4.6	级联空时码和 Turbo 码	(737)
15.5	文献注释与参考资料	(738)
	习题	(738)
第 16 章	多用户通信	(743)
16.1	多址技术	(743)

16.2	多址方式的容量	(745)
16.3	CDMA 系统的多用户检测	(749)
16.3.1	CDMA 信号与信道模型	(749)
16.3.2	最佳多用户接收机	(750)
16.3.3	次最佳检测器	(753)
16.3.4	连续干扰抵消	(757)
16.3.5	其他类型的多用户检测器	(758)
16.3.6	检测器的性能特征	(759)
16.4	广播信道的多用户 MIMO 系统	(761)
16.4.1	发射信号的线性预编码	(762)
16.4.2	发射信号的非线性预编码——QR 分解	(765)
16.4.3	非线性矢量预编码	(769)
16.4.4	预编码的格压缩技术	(770)
16.5	随机接入方式	(772)
16.5.1	ALOHA 系统和协议	(773)
16.5.2	载波侦听系统和协议	(776)
16.6	文献注释和参考资料	(779)
	习题	(780)
附录 A	矩阵	(785)
附录 B	多信道二进制信号的差错概率	(789)
附录 C	M 相信号自适应接收的差错概率	(793)
附录 D	平方根分解	(802)
	参考文献与资料	(804)