

国外电子与通信教材系列

WILEY

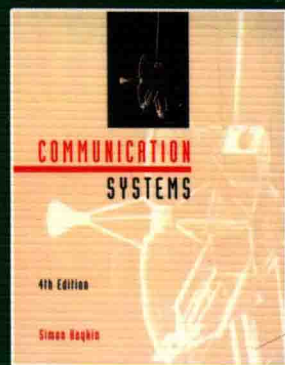
西蒙·赫金

Communication Systems, Fourth Edition

通信系统 (第四版)

[加] Simon Haykin 著

宋铁成 徐平平 徐智勇 等译
沈连丰 审校



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>

内容简介

国外电子与通信教材系列

通信系统

(第四版)

Communication Systems

Fourth Edition

[加] Simon Haykin 著

宋铁成 徐平平 徐智勇 等译

沈连丰 审校



电子工业出版社

Publishi

Industry

内 容 简 介

本书对通信系统的基础理论和关键环节进行了深入分析,力图让学生在讨论中领会通信的精髓。全书首先给出通信系统的梗概及需要研究的关键技术,接着分章详细讨论了随机过程、连续波调制、脉冲调制、基带脉冲传输、信号空间分析、通带数据传输、扩频调制、多用户无线通信、信息论基础,以及差错控制编码等。各章都附有大量习题,便于学生实践掌握。全书强调通信理论的统计基础,并给出了用 MATLAB 模拟的 8 个计算机实验,这些实验几乎覆盖了各章节的主要内容,形成了独特的通信理论“软件实验室”。

本书可作为高等院校通信类、信息类、电子类、计算机类等专业高年级本科生的教材,也可供有关的科研和管理人员参考。

Simon Haykin: Communication Systems, Fourth Edition

ISBN: 9780471178699

Copyright © 2001 John Wiley & Sons, Inc. All Rights Reserved.

AUTHORIZED TRANSLATION OF THE EDITION PUBLISHED BY JOHN WILEY & SONS, New York, Chichester, Brisbane, Singapore AND Toronto. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of John Wiley & Sons, Inc.

Simplified Chinese translation edition copyrights © 2018 by Publishing House of Electronics Industry.

本书中文简体字版专有翻译出版权经由 John Wiley & Sons, Inc. 授予电子工业出版社,中文版权属于 John Wiley & Sons, Inc. 和电子工业出版社共有。未经许可,不得以任何手段和形式复制或抄袭本书内容。

版权贸易合同登记号 图字:01-2002-5887

图书在版编目(CIP)数据

通信系统:第四版/(加)西蒙·赫金(Simon Haykin)著;宋铁成等译. —北京:电子工业出版社,2018.8
书名原文:Communication Systems, Fourth Edition
国外电子与通信教材系列

ISBN 978-7-121-34472-5

I. ①通… II. ①西… ②宋… III. ①通信系统—高等学校—教材 IV. ①TN914

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 121959 号

策划编辑:马 岚

责任编辑:马 岚 特约编辑:马爱文

印 刷:三河市良远印务有限公司

装 订:三河市良远印务有限公司

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:39.25 字数:1055 千字

版 次:2018 年 8 月第 1 版(原著第 4 版)

印 次:2018 年 8 月第 1 次印刷

定 价:109.00 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 zlts@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:classic-series-info@phei.com.cn。

再 版 序

Simon Haykin 所著的 *Communication Systems, Fourth Edition* 自 2001 年出版以来受到普遍好评, 国际范围内众多高等院校将其作为本科生或研究生教材。我们于 2003 年接受电子工业出版社之约所译的版本, 亦受我国师生青睐, 很多学校或选为教材, 或选为双语教学参考书。电子工业出版社也出版了这本书的英文影印版, 被我国多所大学选为双语教学教材。可以说, 本书的翻译版和影印版对于推进我国信息与通信工程及其相关学科的教学改革、提高教学质量均起到了积极作用。

在译文出版发行后的十多年里, 阅读过本书的通信业同行和学生们给出了不少很有教益的反馈意见, 所指出的译文疏漏之处, 已在每次印刷时予以更正。这次付印的版本, 在排版形式上进行了优化, 并对每章所包含的“注释与参考”一节根据句意进行了叙述上的大幅修改, 也对少数没能体现原文语言风格及疏漏之处进行了重译。出版社马岚编辑字斟句酌地与审校者反复沟通讨论, 我们力图奉献一个更忠于原文的译本给老师、同学及广大读者, 以期能对诸如“通信原理”“数字通信”“通信系统”“通信系统工程”等学位课或学科主干课的课程建设有所帮助, 对提高教学质量有所裨益。

由于译审者水平所限, 这次再版的译文难免仍有不妥之处, 殷切期望使用本书的同仁和广大读者不吝指正。

沈连军

2018 年 8 月

于东南大学移动通信国家重点实验室

前 言

电子工程教育在过去的 20 年里发生了一些根本性的变化,预计这种情况仍将继续下去。现在的电子工程专业的本科教学计划包括下面两门基础课程:

- **信号与系统。**这门课讲述信号和系统的连续时间和离散时间形式,对傅里叶变换的不同形式、拉普拉斯变换和 z 变换进行了详细讲述。通常,这门课还包括对通信系统的初步论述。
- **概率论和随机过程。**这门课先使学生对离散和连续的随机变量有一个直观的理解,然后介绍了随机过程的概念及性质。

通常,在这两门预备课程之后会引入关于通信系统的高级课程。

本书的第四版就是在这种背景下并以此为主要目的写成的。简而言之,本书所提供的对通信系统的论述内容,适用于一到两个学期的本科高年级课程。本书的重点在于通信理论及其应用的统计学基础。

本书注重逻辑性并配有大量例题加以说明,其目的就是通过讨论帮助学生直观地掌握理论知识。除了“背景与预览”这一章,其他每章的结尾都附有大量的习题,这些习题不仅能够帮助学生测试他们对本章所涵盖内容的理解程度,同时也能促使他们拓展对这些内容的思考。每章均有注释与参考,为进一步阅读提供了建议。不影响连贯性而可以绕开的章节由脚注加以标识。

本书的一个特色就是包含 8 个基于 MATLAB 的计算机实验。这组实验构成了“软件实验室”的基础,每一个实验均设计了用来扩充相关章节知识的内容。更为重要的是,这些实验开发了 MATLAB 独特的教育功能。

“背景与预览”这一章提供了预备内容和激发学习兴趣的材料,为在接下来的 10 章中全面论述通信系统做了铺垫。这些章节的内容是按以下顺序组织的。

第 1 章详细讲述了随机过程,重点是随机过程的部分性质(如二阶统计)。实际上,讨论仅局限于广义平稳过程。本章对随机过程的相关性和功率谱进行了详细论述。高斯过程和窄带噪声在通信系统的研究中起着重要作用,因此本章的后半部分对其进行了论述,论述将涉及通信环境中经常出现的瑞利分布和莱斯分布。

第 2 章总体讲述了连续波调制(如模拟通信)及其不同形式,简述如下。

(i) 幅度调制,可以是以下几种形式(根据已调载波频谱特性的不同来区分)之一:

- 标准幅度调制
- 抑制载波的双边带调制
- 正交幅度调制
- 单边带调制
- 残留边带调制

(ii) 角度调制,可以假设是以下两种相关联形式之一:

- 相位调制
- 频率调制

本章还对这些波形的时域和频谱特性、调制和解调方法,以及信道噪声对性能的影响进行了讨论。

第3章讲述脉冲调制,同时也讨论了抽样、量化和编码过程,这是模拟信号数字化传输的基础。本章也可以看成模拟通信向数字通信的过渡。特别对以下几种脉冲调制方式进行了讨论。

(i) 模拟脉冲调制(这里只将时间用离散形式表示)包括以下几种特殊形式:

- 脉冲幅度调制
- 脉冲宽度(持续时间)调制
- 脉冲位置调制

因为脉冲幅度调制是其他模拟或数字调制方式的基础,所以对它的性质进行了详细讨论。

(ii) 数字脉冲调制(同时将时间和信号幅度用离散形式表示)包括以下几种特殊形式:

- 脉冲编码调制
- 增量调制
- 差分脉冲编码调制

在增量调制中,为简化系统的实现,其抽样率要远高于脉冲编码调制。在差分脉冲编码调制中,则通过采用一个预编码器来减小抽样率。这个预编码器利用了信息承载信号的相关特性。

(iii) MPEG1 音频编码标准,包括一个作为编码器设计关键的心理声学模型。

第4章涵盖了基带脉冲传输。基带脉冲传输就是用基带形式的脉冲幅度调制信号来进行传输。主要讨论了以下两个要点:信道噪声和有限的信道带宽对数字通信系统性能的影响。假设信道噪声是加性白噪声,则可采用匹配滤波器从而使噪声的影响最小。匹配滤波器是设计通信接收机的基础。由于是有限信道带宽,因此会出现码间干扰现象。为了克服这种信号相关干扰的不良影响,通常采用脉冲成形滤波器或相关编码器/译码器,本章对这两种方法都进行了讨论。本章还对用于用户和因特网服务提供商之间直接通信的数字用户线路进行了讨论。接着对为克服信道噪声和码间干扰组合影响而采用的最佳线性接收机进行了推导,进而介绍了自适应均衡。

第5章讨论加性高斯白噪声信道的信号空间分析。尤其是建立了能量有限信号的几何表示基础,进而衍生出相干接收机,并证明了它和匹配滤波器是等效的,本章以差错概率及其近似计算的讨论作为结束。

第6章讨论通带数据传输,这里用正弦信号来简化数字调制信号在带通道中的传输。本章建立在第5章提到的信号的几何表示基础之上。特别地,对于以下几种调制技术,估算了信道噪声对数字通信产生的影响:

1. 相移键控,这是和相位调制相对应的数字调制方式,即用载波的相位来表示一组给定的离散量。
2. 混合幅度/相位调制,包括正交幅度调制和无载波幅度/相位调制。
3. 频移键控,这是和频率调制相对应的数字调制方式,即用载波的频率来表示一组给定的离散量。
4. 多信道调制类,紧随离散多音之后,已经成为非对称数字用户线路的标准。

在数字通信系统中,定时非常重要,这意味着接收机必须与发射机同步,本书提及的接收机包括相干的和非相干的。相干接收机需要恢复载波相位和符号定时,而非相干接收机只需要恢复符号定时而不必恢复载波相位,采用这种策略是基于对随机载波相位恢复成本的考虑。本章的后半部分讨论了同步技术,尤其偏重于离散时间信号的同步。

第7章介绍扩频调制,这种调制方式与前面几章讨论的传统调制方式不同,它通过牺牲信道带宽来获得好的安全性并保护信号免受干扰。这里讨论了直接序列扩频和跳频两种扩频方式。

第8章论述多用户无线通信。多用户无线通信就是多个用户能接入一个普通的无线信道,这种通信信道常用于卫星和无线通信系统中,这里对这两种系统都进行了讨论。本章还介绍了链路预算分析,主要偏重于介绍相关的天线和传播的概念,以及噪声的计算。

第9章讲述信息论的一些基本原理,其中包括用于无失真数据压缩、数据压缩和数据传输的香农理论。这些理论为信源和通信信道界定了性能上限。形成这些理论的两个基本概念是:(1)信源的熵(类似于热力学中熵的定义);(2)信道容量。

第10章论述差错控制编码,围绕着为了在噪声信道中进行稳定传输而对数字数据进行编码的各种技术进行展开。讨论了以下4种差错控制编码:

1. 线性分组码,是一组线性无关的码字,每组码字均由信息比特和校验比特组成。校验比特用于差错控制。
2. 循环码,是线性分组码的一种。
3. 卷积码,对连续消息序列用串行方式进行卷积操作。
4. Turbo 码,用物理上可实现的方式,建立了一种接近香农信道容量的新的编码构成方法。

第10章对上述码的编码和译码方法均进行了讨论。

本书还包括如下6个附录作为补充内容:

- 附录1是对概率论的复习。
- 附录2是对信号与系统的简述,回顾了傅里叶变换及其性质、各种带宽的定义、希尔伯特变换和窄带信号与系统的低通等价模型。
- 附录3介绍贝塞尔函数及其修正形式,贝塞尔函数用于研究频率调制、噪声环境下信号的非相干检测和符号定时同步。
- 附录4介绍汇合型超几何函数,用于噪声环境下幅度调制信号的包络检波。
- 附录5介绍密码学,这是通信安全的基础。
- 附录6包括12个有用的表格。

如前所述,本书的主要目的就是为高年级本科生提供适合一到两个学期教学的现代通信系统教材。课程内容的组织自然也由采用此书的学生们的背景和教师的兴趣决定。本书的内容既有深度又有广度,能满足各种背景和兴趣的读者,这为本书内容的取舍提供了相当的灵活性。授课教师可获得书中所有习题的详细解答、教学用PPT资料,以及一些实例的M文件^①。

致谢

我要对以下同仁表示深切的谢意:Gregory J. Pottie 博士(加利福尼亚大学洛杉矶分校), Santosh Venkatesh 博士(宾夕法尼亚大学), Stephen G. Wilson 博士(弗吉尼亚大学), Gordon

^① 采用本书作为教材的授课教师,可联系 te_service@phei.com.cn 获取相关教辅资料。——编者注

Stüber 博士(佐治亚理工学院), Venugopal Veeraralli 博士(康奈尔大学), Granville E. Ott 博士(得克萨斯大学奥斯汀分校)。他们审阅了先前版本的草稿,对成书提供了大量的建议。第2章中讨论的噪声对包络检波的影响基于 Santosh Venkatesh 博士为我们提供的课程笔记,对此我要表示谢意。我还要感谢 Gordon Stüber 博士同意我引用图 6.32。

我要感谢 Michael Moher 博士(加拿大渥太华通信研究中心),他审阅了先前版本草稿中的5章,并对 Turbo 码提出了很多建设性意见。同样还要感谢 Brendan Frey 博士(加拿大滑铁卢大学)在提炼 Turbo 码内容方面提供的极为宝贵的帮助,他还为讲述低密度奇偶校验码提供了制图 9.18 的软件,并允许我引用图 10.27 和图 10.33。我要感谢 David Conn 博士(加拿大 McMaster 大学)审阅了“背景与预览”一章,并为如何改进此章内容的表述提供了建议。

我还要对下述人员致谢: Jean-Jacque Werner 博士(朗讯科技), James Mazo(朗讯科技), Andrew Viterbi 博士(高通), Radford Neal 博士(多伦多大学), Yitzhak(Irwin) Kalet 博士(Technion), Walter Chen 博士(摩托罗拉), John Cioffi 博士(斯坦福大学), Jon Mark 博士(滑铁卢大学)和 Robert Dony 博士(Guelph 大学)。他们为本书所选内容提出了很多宝贵的建议,谨此表示深切的谢意。同时也对 Donald Wunsch II 博士(密苏里大学)的校阅和建议表示感谢。

感谢我的研究生 Mathini Sellathurai (McMaster 大学),他完成了本书的计算机实验部分; Hugh Pasika (McMaster 大学),他对“背景与预览”一章提出了很多有用的建议,并对本书的一些插图进行了计算。也非常感谢 Mathini Sellathurai 和 Alpesh Patel 校对了全书。

我尤其要感谢 Wiley 公司的编辑 Bill Zobrist 在本书整个写作过程中的大力支持和帮助;感谢 Wiley 的高级编辑 Monique Calello 在写作的各个阶段对本书质量不知疲倦的监督;感谢 Katherine Hepburn 为本书所做的广告宣传和市场推广;感谢 Karen Tongish 仔细编辑抄写了本书草稿;感谢 Katrina Avery 认真校对了每一页;感谢 Kristen Maus 组织了本书的索引。

我同时还要向我的技术协调人 Lola Brooks 致谢,感谢她为输入本书手稿所付出的不知疲倦的努力。我也很高兴在这里感谢 McMaster 大学图书馆的助理馆员 Brigitte Maier 和资料管理员 Regina Bendig 多次为我查找参考书目中的文献资料提供帮助。

Simon Haykin

目 录

背景与预览	1
第1章 随机过程	23
1.1 简介	23
1.2 随机过程的数学定义	23
1.3 平稳过程	24
1.4 均值、相关函数和协方差函数	26
1.4.1 自相关函数的特性	27
1.4.2 互相关函数	29
1.5 遍历过程	30
1.6 随机过程通过一个线性时不变滤波器	31
1.7 功率谱密度	32
1.7.1 功率谱密度的特性	33
1.7.2 输入和输出随机过程功率谱密度的关系	36
1.7.3 样本函数的功率谱密度与幅度谱的关系	36
1.7.4 互功率谱密度	37
1.8 高斯过程	39
1.8.1 中心极限定理	40
1.8.2 高斯过程的性质	40
1.9 噪声	42
1.9.1 散弹噪声	43
1.9.2 热噪声	43
1.9.3 白噪声	44
1.10 窄带噪声	46
1.11 基于同相和正交分量的窄带噪声表示法	47
1.12 基于包络和相位分量的窄带噪声表示法	48
1.13 正弦信号加窄带噪声	50
1.14 计算机实验: 平衰落信道	52
1.14.1 实验1: 高斯分布	53
1.14.2 实验2: 瑞利分布	53
1.15 总结与讨论	55
注释与参考	56
习题	57
第2章 连续波调制	64
2.1 引言	64
2.2 幅度调制	65
2.2.1 幅度调制的优缺点	67
2.3 线性调制方案	67

2.3.1	DSB-SC 调制	68
2.3.2	相干检测	69
2.3.3	科斯塔接收机	70
2.3.4	正交载波复用	71
2.3.5	SSB 调制	72
2.3.6	VSF 调制	73
2.3.7	电视信号	74
2.4	频率搬移	75
2.5	频分复用	76
2.6	角度调制	78
2.6.1	基本定义	78
2.7	频率调制	79
2.7.1	窄带 FM	80
2.7.2	宽带 FM	82
2.7.3	FM 信号的传输带宽	85
2.7.4	FM 信号的产生	87
2.7.5	FM 信号的解调	88
2.7.6	FM 立体声复用	90
2.8	调频系统中的非线性影响	92
2.9	超外差接收机	93
2.10	连续波调制系统中的噪声	94
2.10.1	信噪比: 基本定义	95
2.11	相干检测线性接收机中的噪声	96
2.12	包络检波调幅接收机的噪声	98
2.12.1	阈值效应	100
2.12.2	包络检波中 $(\text{SNR})_0$ 的通式	100
2.13	调频接收机中的噪声	104
2.13.1	捕获效应	108
2.13.2	FM 阈值效应	109
2.13.3	FM 阈值的降低	111
2.13.4	FM 系统中的预加重和去加重	112
2.14	计算机实验: 锁相环	114
2.14.1	锁相环的模型	115
2.14.2	实验 1: 捕获模型	117
2.14.3	实验 2: 相位平面图	117
2.15	总结与讨论	118
2.15.1	幅度调制	118
2.15.2	角度调制	119
2.15.3	噪声分析	119
	注释与参考	120
	习题	121
第 3 章	脉冲调制	134
3.1	引言	134

3.2	抽样过程	134
3.3	脉冲幅度调制	138
3.4	其他脉冲调制形式	140
3.5	带宽-噪声权衡	141
3.6	量化过程	142
3.6.1	量化噪声	143
3.6.2	标量量化器最优化的条件	145
3.7	脉冲编码调制	147
3.7.1	抽样	147
3.7.2	量化	148
3.7.3	编码	149
3.7.4	线路码	150
3.7.5	差分编码	152
3.7.6	再生	153
3.7.7	译码	153
3.7.8	滤波	153
3.8	脉冲编码调制系统中的噪声	153
3.8.1	差错阈值	154
3.9	时分复用	155
3.9.1	同步	156
3.10	数字复接器	157
3.11	脉冲编码调制的优点、局限性和改进	160
3.12	增量调制	161
3.12.1	增量-总和调制	163
3.13	线性预测	164
3.13.1	线性自适应预测	166
3.14	差分脉冲编码调制	167
3.14.1	处理增益	169
3.15	自适应差分脉冲编码调制	169
3.16	计算机实验: 自适应增量调制	171
3.17	MPEG 音频编码标准	173
3.18	总结与讨论	175
	注释与参考	176
	习题	177
第4章	基带脉冲传输	184
4.1	引言	184
4.2	匹配滤波器	184
4.2.1	匹配滤波器的性质	187
4.3	噪声引起的差错率	189
4.4	码间干扰	193
4.5	无失真基带二进制传输的奈奎斯特准则	195
4.5.1	理想奈奎斯特信道	196
4.5.2	升余弦频谱	198

4.6	相关电平编码	200
4.6.1	双二进制信号	200
4.6.2	改进的双二进制信号	204
4.6.3	相关电平编码的一般形式(部分响应信号)	206
4.7	基带 M 进制 PAM 传输	207
4.8	数字用户线	209
4.8.1	用于 DSL 的线路码	211
4.8.2	非对称数字用户线	212
4.9	最佳线性接收机	213
4.9.1	实际考虑	216
4.10	自适应均衡	217
4.10.1	LMS 算法(回顾)	217
4.10.2	均衡器的工作	219
4.10.3	判决反馈均衡器	220
4.11	计算机实验: 眼图	221
4.11.1	实验 1: 信道噪声的影响	222
4.11.2	实验 2: 带宽限制的影响	224
4.12	总结与讨论	225
	注释与参考	226
	习题	228
第 5 章	信号空间分析	235
5.1	引言	235
5.2	信号的几何表示	236
5.2.1	Gram-Schmidt 正交过程	240
5.3	连续 AWGN 信道到矢量信道的变换	242
5.3.1	相关器输出的统计特性	243
5.4	似然函数	245
5.5	噪声中信号的相干检测: 最大似然译码	246
5.6	相干接收机	248
5.6.1	相干接收机与匹配滤波接收机的等价	249
5.7	差错概率	250
5.7.1	差错概率的旋转不变性和平移不变性	250
5.7.2	最小能量信号	253
5.7.3	差错概率的联合边界	253
5.7.4	误比特率与符号差错概率	256
5.8	总结与讨论	257
	注释与参考	257
	习题	258
第 6 章	通带数据传输	263
6.1	引言	263
6.1.1	数字调制技术系列	264
6.1.2	差错概率	265
6.1.3	功率谱	265

6.1.4	带宽效率	266
6.2	通带传输模型	266
6.3	相干 PSK	267
6.3.1	二进制 PSK	267
6.3.2	二进制 PSK 的差错概率	268
6.3.3	相干二进制 PSK 信号的产生和检测	269
6.3.4	二进制 PSK 信号的功率谱	270
6.3.5	QPSK	271
6.3.6	QPSK 的信号空间图	271
6.3.7	QPSK 的差错概率	273
6.3.8	相干 QPSK 信号的产生和检测	275
6.3.9	QPSK 信号的功率谱密度	276
6.3.10	偏移 QPSK	277
6.3.11	$\pi/4$ 移相 QPSK	278
6.3.12	$\pi/4$ 移相 DQPSK 信号的检测	279
6.3.13	M 进制 PSK	280
6.3.14	M 进制 PSK 信号的功率谱密度	282
6.3.15	M 进制 PSK 信号的带宽效率	282
6.4	幅度/相位混合调制方案	283
6.4.1	M 进制 QAM	283
6.4.2	QAM 正方形星座图	284
6.4.3	QAM 十字形星座图	286
6.4.4	CAP	286
6.4.5	通带同相和正交脉冲的性质	288
6.4.6	CAP 发射机基本结构	290
6.4.7	CAP 接收机的数字实现	291
6.4.8	CAP 的一种应用	292
6.5	相干 FSK	292
6.5.1	二进制 FSK	292
6.5.2	二进制 FSK 的差错概率	293
6.5.3	相干二进制 FSK 信号的产生和检测	295
6.5.4	二进制 FSK 信号的功率谱	296
6.5.5	MSK	297
6.5.6	相位网格图	298
6.5.7	MSK 的信号空间图	299
6.5.8	MSK 的差错概率	303
6.5.9	MSK 信号的产生和检测	304
6.5.10	MSK 信号的功率谱密度	305
6.5.11	高斯滤波 MSK	305
6.5.12	M 进制 FSK	308
6.5.13	M 进制 FSK 信号的功率谱	309
6.5.14	M 进制 FSK 信号的带宽效率	310
6.6	未知相位信号的检测	310

6.6.1	最佳二次接收机	311
6.6.2	二次接收机的两种等价形式	312
6.7	非相干正交调制	314
6.7.1	式(6.163)的推导	316
6.8	非相干二进制 FSK	318
6.9	差分相移键控	319
6.9.1	DPSK 的产生和检测	320
6.10	单载波数字调制方式的比较	322
6.10.1	差错概率	322
6.10.2	M 进制数字调制技术的带宽效率	323
6.11	语音频带调制解调器	324
6.11.1	调制解调器的对称配置	324
6.11.2	调制解调器的非对称配置	328
6.11.3	数字调制解调器	328
6.11.4	数字调制解调器的一种实现	329
6.11.5	数字调制解调器的另一种实现	330
6.11.6	模拟调制解调器	331
6.11.7	V.90 调制解调器	332
6.12	多信道调制	332
6.12.1	加性高斯白噪声信道的容量	333
6.12.2	连续时间信道分割	333
6.12.3	几何信噪比	336
6.12.4	多信道传输系统的加载	337
6.12.5	优化问题的注水解释	337
6.13	离散多音	339
6.13.1	离散傅里叶变换	341
6.13.2	信道的频域描述	342
6.13.3	基于 DFT 的 DMT 系统	342
6.13.4	DMT 的应用	344
6.13.5	DSL 与音频调制解调器之间的比较	344
6.13.6	OFDM 技术	345
6.14	同步	346
6.14.1	相位恢复的直接判决递归算法	347
6.14.2	对载波相位进行最大似然估计的递归算法	350
6.14.3	符号定时的无数据辅助递归算法	351
6.15	计算机实验: 载波恢复与符号定时	354
6.15.1	实验 1: 载波相位恢复	354
6.15.2	实验 2: 符号定时恢复	358
6.16	总结与讨论	359
	注释与参考	359
	习题	362
第 7 章	扩频调制	371
7.1	引言	371

7.2 伪噪声序列	372
7.2.1 m 序列的性质	373
7.2.2 选择 m 序列	374
7.3 扩频的概念	377
7.4 相干二进制 PSK 的直接序列扩频	378
7.4.1 分析模型	380
7.4.2 同步	380
7.5 信号空间的维度和处理增益	381
7.6 差错概率	384
7.6.1 抗干扰特性	384
7.7 跳频扩频	385
7.7.1 慢跳频	386
7.7.2 快跳频	388
7.8 计算机实验: 最大长度码和 Gold 码	389
7.8.1 实验 1: PN 序列的相关性	390
7.8.2 实验 2: Gold 序列的相关特性	391
7.9 总结与讨论	392
注释与参考	393
习题	393
第 8 章 多用户无线通信	396
8.1 引言	396
8.2 多址技术	396
8.3 卫星通信	398
8.4 无线链路分析	399
8.4.1 自由空间传播模型	400
8.4.2 方向增益、方向性和功率增益	401
8.4.3 有效孔径	402
8.4.4 Friis 自由空间公式	403
8.4.5 噪声系数	404
8.4.6 等价噪声温度	405
8.4.7 双端网络的级联	406
8.5 无线通信	409
8.5.1 传播影响	410
8.6 多径信道的统计特性	412
8.6.1 时延扩展和多普勒扩展	415
8.6.2 多径信道的分类	417
8.7 瑞利衰落信道上的二进制信号	417
8.7.1 分集技术	419
8.8 TDMA 和 CDMA 无线通信系统	421
8.8.1 RAKE 接收机	422
8.9 无线通信中的语音信源编码	424
8.9.1 多脉冲激励 LPC	424
8.9.2 码激励 LPC	425

8.10 无线通信中的自适应天线阵列	426
8.10.1 自适应天线阵列	428
8.11 总结与讨论	430
注释与参考	431
习题	432
第9章 信息论基础	437
9.1 引言	437
9.2 不确定性、信息和熵	437
9.2.1 熵的一些性质	439
9.2.2 离散无记忆信源的扩展	440
9.3 信源编码定理	441
9.4 无失真数据压缩	442
9.4.1 前缀码	442
9.4.2 霍夫曼编码	444
9.4.3 Lempel-Ziv 编码	446
9.5 离散无记忆信道	447
9.6 互信息	449
9.6.1 互信息的性质	449
9.7 信道容量	452
9.8 信道编码定理	453
9.8.1 信道编码定理在二进制对称信道中的应用	454
9.9 连续信号的相对熵和互信息	456
9.9.1 互信息	458
9.10 信息容量定理	458
9.10.1 球体打包	460
9.11 信息容量定理的含义	461
9.12 有色噪声信道的信息容量	467
9.12.1 信息容量定理的注水解释	469
9.13 率失真定理	470
9.13.1 率失真函数	470
9.14 数据压缩	472
9.15 总结与讨论	473
注释与参考	474
习题	475
第10章 差错控制编码	481
10.1 引言	481
10.1.1 自动重发请求	482
10.2 离散无记忆信道	483
10.2.1 信道编码定理回顾	484
10.2.2 模2运算	484
10.3 线性分组码	485
10.3.1 校正子: 定义和性质	488
10.3.2 最小距离的考虑	489

10.3.3	校正子译码	490
10.3.4	对偶码	492
10.4	循环码	493
10.4.1	生成多项式	494
10.4.2	奇偶校验多项式	495
10.4.3	生成矩阵和奇偶校验矩阵	495
10.4.4	循环码编码器	496
10.4.5	校正子的计算	496
10.4.6	其他循环码	501
10.5	卷积码	503
10.5.1	码树、网格图和状态图	505
10.6	卷积码的最大似然译码	508
10.6.1	维特比算法	509
10.6.2	卷积码的自由距离	512
10.6.3	渐近编码增益	513
10.7	网格编码调制	514
10.7.1	8-PSK 的翁格博克码	516
10.7.2	渐近编码增益	517
10.8	Turbo 码	519
10.8.1	Turbo 码的编码	519
10.8.2	Turbo 码的性能	521
10.8.3	Turbo 码的译码	522
10.8.4	BCJR 算法	524
10.9	计算机实验: Turbo 码的译码	525
10.10	低密度奇偶校验码	526
10.10.1	LDPC 码的构造	527
10.10.2	LDPC 码的最小码距	530
10.10.3	LDPC 的概率译码	531
10.11	不规则码	532
10.12	总结与讨论	534
	注释与参考	534
	习题	536
附录 1	概率论	542
附录 2	信号与系统简述	551
附录 3	贝塞尔函数	566
附录 4	汇合型超几何函数	570
附录 5	密码学	572
附录 6	表格	587
	术语表	593
	参考文献	599