

国外电子与通信教材系列

通信系统工程

(第二版)

Communication Systems Engineering
Second Edition

[美] John G. Proakis 著
Masoud Salehi
叶芝慧 赵新胜 等译
沈连丰 审校

Prentice
Hall



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry
www.phei.com.cn

国外电子与通信教材系列

通信系统工程

(第二版)

Communication Systems Engineering
Second Edition

[美] John G. Proakis 著
Masoud Salehi

叶芝慧 赵新胜 等译

沈连丰 审校

电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书以通信系统及其发展为线索,系统、深入地介绍了通信技术的基本原理及其应用,着重论述了数字通信原理,但对模拟通信也进行了丰富的介绍,对有关的数学基础进行了讨论。本书内容丰富、范围广泛,并且概念清晰、事例翔实、取材新颖,既对通信系统的基本原理做了详尽的论述,又充分反映了近年来的新技术和新理论,同时还简要回顾了通信系统的发展历史。书中列举了许多例题,在每一章后面都给出了相关的参考文献,并附有大量富有特色的习题。

本书可以作为高等院校通信类、信息类、电子类专业高年级本科生或低年级研究生的教材,也可以作为相关技术、科研和管理人员的参考书。

Simplified Chinese edition Copyright ©2002 by PEARSON EDUCATION NORTH ASIA LIMITED and Publishing House of Electronics Industry.

Communication Systems Engineering, Second Edition by John G.Proakis, Masoud Salehi. Copyright ©2002.

All Rights Reserved.

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

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培生教育出版北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:01-2001-5088

图书在版编目(CIP)数据

通信系统工程(第二版)/(美)普埃克(Proakis,J.G.)等著;叶芝慧等译.-北京:电子工业出版社,2002.7
(国外电子与通信教材系列)

书名原文:Communication Systems Engineering, Second Edition

ISBN 7-5053-7663-2

I.通... II.①普... ②叶... III.通信系统 IV.TN914

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第051758号

责任编辑:冯小贝

印刷者:北京市增富印刷有限责任公司

出版发行:电子工业出版社 <http://www.phei.com.cn>

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:40 字数:1024千字

版 次:2002年7月第1版 2002年7月第1次印刷

定 价:59.00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

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”。

为做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、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委员会委员
	徐安士	北京大学教授、博士生导师、电子学系副主任 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委员会委员
	阮秋琦	北方交通大学教授、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、电子工程系主任 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导委员会委员
	郑宝玉	南京邮电学院副院长、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委员会委员
	徐重阳	华中科技大学教授、博士生导师、电子科学与技术系主任 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导委员会委员
	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、教材建设委员会主任
	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	电子工业出版社副社长

译者序

随着科学技术的发展和工艺水平的提高,无线通信尤其是移动通信技术取得了令人瞩目的成就,而因特网也逐渐成为全球信息传输的崭新平台,二者的结合构成了无线因特网,使人们随时随地进行信息交换的夙愿正在得以实现,而这一切都建立在信息传输的基础上。目前,个人通信系统和超高速通信网络迅猛发展,推动了信息科学的进一步发展,并成为 21 世纪国际社会的强大推动力。

通信技术日新月异,学习通信专业知识不但需要扎实的基础,而且需要学习和了解更多的现代通信技术和理论,特别是数字通信方面的原理以及通信系统工程方面的知识。从有线通信到无线通信,从固定设备间的通信到移动通信,从移动通信到无线因特网,随着新一代通信系统的推出,无线数据传输速率将越来越高,未来的通信将为人们提供全方位以及无缝的移动性接入,最终实现任何人在任何地方、任何时间进行任何方式的通信,使得通信技术持续发展并呈现经久不衰的势头。

John G. Proakis 和 Masoud Salehi 所著的《通信系统工程(第二版)》是作者多年教学和科研的总结,本书全面、深入、系统地论述了通信系统工程的基本理论,分析和讨论了现代通信领域的新技术和新成果,列举了许多通信系统工程的应用实例。书中的内容包括通信系统的基本概念、信号和系统的频域分析、模拟信号的发送和接收、模拟调制、模拟通信系统中的噪声影响、随机过程、信源与信源编码、加性高斯白噪声信道上的数字传输、带限加性高斯白噪声信道上的数字传输、信道容量及编码、衰落多径信道上的数字通信、载波相位连续调制、扩频通信系统、数字蜂窝通信系统等。本书的覆盖面广,对问题的论述系统全面,内容深入浅出、概念清晰、逻辑严谨,理论分析推导过程严格,应用举例题材新颖,习题内容丰富,并且给出了许多参考文献。这是一本优秀的教材,国外的许多高等院校采用它作为电子、信息、通信等专业的高年级本科生或低年级研究生相关课程的教材,通过学习,读者可以掌握通信系统分析和设计中的基本原理。本书是一本通信系统工程方面的理论著作,在学术界较有影响,曾被许多学术论文引用,因此,对通信技术人员、科研人员以及相关专业的教师和学生而言,称得上是一本很好的参考书。我们乐意接受翻译的任务并将其视为学习的过程,现将译著推荐给广大读者,相信本书对教学一定会起到积极作用。我们也注意到,使用本书的学生对线性系统理论应有基本的了解,对傅里叶级数和傅里叶变换的知识应有所掌握,并且应该已学习过概率论的入门课程。

本书从前言至第 7 章由叶芝慧负责翻译及初校,其余由赵新胜负责翻译及初校,全书由沈连丰负责协调和审校,杨茂彬、鲍淑娣、朱慧芬、张宏泽、吴浩、周玮宁、周衍江等分别协助翻译了相关章节,徐平平、宋铁成、沈克勤、高严、刘彤、沈忠良、钱小勇也为本书的翻译做出了贡献。因此,本书的翻译出版是集体智慧的结晶,在此,对所有为这本书的出版提供了帮助的人们表示诚挚的感谢!

由于译者水平有限,加之时间仓促,译文中难免有不妥之处,敬请读者不吝指正。

前 言

本书的目的是介绍通信系统分析和设计中的基本原理,可以将其作为通信入门课程的教材,也可以作为本科高年级和研究生一年级的教材。

论述范围广泛

虽然我们十分强调数字通信,但是对重要的数学基本课题也进行了概括,并对模拟通信进行了内容丰富的介绍。涵盖的主要论题有:

- 对信号和系统的频域分析及随机过程的特征进行了复习概述(第1章和第4章)
- 介绍模拟信号的发送和接收(第3章和第5章)
- 介绍数字通信(第6章到第10章)

着重强调数字通信

我们强调数字通信的原因是基于过去五十年来技术的发展历程。如今,数字通信系统已经广为使用,并且在各种通信媒介中,如有线电话信道、微波无线电、光纤信道和卫星信道上承担着大量的日常信息传输的任务。正如我们亲眼所见,当前个人通信系统和超高速通信网络迅猛发展,这些都是基于信息的数字传输,而无论这些信息是语音、图像还是视频信号。我们期望在不久的将来能够亲眼见证,现在的模拟 AM 和 FM 无线电以及电视广播被数字传输系统所取代。

不再昂贵的高速集成电路(IC)和可编程数字信号处理芯片的发展,加速了复杂的高速数字通信系统的发展。微电子 IC 制作技术的进步使得高速、高精度的 A/D 转换器、功能强大的纠错编码器/译码器、复杂的数字调制技术等等的实现成为可能。所有这些技术的发展都体现了同一个趋势,即作为信息传输的一种手段的数字通信,其应用正在日益增长。

本书概述

我们假定使用本书的学生对线性系统理论(无论是连续的还是离散的)有一个基本的了解,并且有相当程度的傅里叶序列和傅里叶变换技术的知识。第2章对信号和系统的基本知识进行了复习,并建立起后面章节要用到的基本概念。本书还假定学生已经掌握了概率论的入门课程。这些课程在许多电子工程和计算机工程专业中都是必需的。第4章对通信入门课程所必需的关于概率和随机过程的知识进行了概括复习。

第3章讨论模拟信号的调制和解调。包括振幅调制(AM)、频率调制(FM)和相位调制(PM)。无线电和电视广播及移动无线蜂窝系统将作为模拟通信系统的例子予以讨论。第5章继续讨论模拟通信系统,并且分析了加性噪声对 AM、FM 和 PM 信号解调的影响。第5章对在模拟和数字通信系统中用做载波相位估计的锁相环进行了讨论,在这一章的结束部分讨论了通信系统中对传输损耗的影响的处理,并对噪声源的特性进行了描述。

信源特性和信源编码是数字通信系统分析和设计的入门,第6章即关注于这一主题。在这一章我们将为读者介绍离散和连续(模拟)信源的数学模型、熵和交互信息的基本数学概念。对于离散源的信源编码,本章的讨论包括霍夫曼编码算法和 Lempel-Ziv 算法。对于模拟源,本章对标量量化和矢量量化都进行了讨论,并且描述了常用波形编码技术,即 PCM、DPCM 和 DM。这一章还阐述了基于 LPC 的信源建模方法。在这一章中我们引用了电话设备中的语音传输系统、光盘(CD)播放机的语音记录系统和 JPEG 图像编码标准,并将它们作为信源编码的实际例子。

关于数字调制和解调的描述见第7章。在信号的几何描述基础上,对二进制和非二进制调制技术进行了讨论,并对其误码率性能进行了评估和比较。本章还描述了数字通信系统中码元同步的方法。

第8章对带限 AWGN 信道上的数字传输进行分析。在这一章中推导了线性调制基带信号的功率谱密度,并分析了带限信道的信号设计问题。分析的结果表明,信道失真的影响是引入了码间干扰(ISI),而通过适当的信号设计可以消除或最小化这一影响。使用线性和非线性自适应均衡器的目的是降低 ISI 的影响,对此本章也进行了描述。

第9章分析的主题是信道编码和译码。首先定义了通信信道的容量,并确定了高斯信道的容量。在这一章中对线性分组码和卷积码进行了介绍,并对恰当的译码算法做了描述。这一章还描述了编码处理对带宽受限信道所带来的好处。本章的最后一节描述了编码的三个实际应用。

本书的最后一章讨论的主题是无线通信。本章首先考虑了衰落多径信道的特征,并讨论这种信道对无线数字通信系统的影响。信号设计能够有效地减小这种类型的信道失真。本章随后描述了相位连续调制信号,这种信号尤其适合无线信道的数字通信。最后分析了扩频信号,这种信号适用于多用户无线通信系统。

例题和习题

本书选用了大量经过精心挑选的例题和习题。书中包含超过 180 个已解答的例题和超过 480 道的习题。例题和习题的范围覆盖了简单的练习到富有挑战性的习题。解答手册有纸质的手册和光盘两种形式。习题解答手册不向学生出售,从而方便教师以适当的形式给出解答。

课程选择

本书可以用于一至两个学期的通信系统课程。课程设计中要考虑的一个重要因素是,学生是否学过概率论和随机过程等先期课程。是否涉及模拟调制和解调则是另一个要考虑的重要因素。对此本书给出三种应用方式,其他方式当然也是可行的。

1. 模拟与数字通信的一个学期的课程:第2章的部分概括性章节,第3章、第5章、第7章、第8章的全部,第6章、第9章和第10章中的部分内容。
2. 数字通信的一个学期的课程:第2章、第4章的部分概括性章节,第6章到第10章。
3. 两个学期的课程,模拟与数字通信:
 - (a)第2章到第6章为第一学期课程;
 - (b)第7章到第10章为第二学期课程。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 历史回顾	1
1.2 电通信系统的基本组成	3
1.2.1 数字通信系统	5
1.2.2 数字通信的早期工作	7
1.3 通信信道及其特征	8
1.4 通信信道的数学模型	13
1.5 本书的结构	15
1.6 深入学习	16
第 2 章 信号和系统的频域分析	17
2.1 傅里叶级数	17
2.1.1 实信号的傅里叶级数;三角傅里叶级数	21
2.2 傅里叶变换	23
2.2.1 实信号、偶信号和奇信号的傅里叶变换	26
2.2.2 傅里叶变换的基本性质	27
2.2.3 周期信号的傅里叶变换	29
2.3 功率和能量	30
2.3.1 能量型信号	31
2.3.2 功率型信号	31
2.4 带宽受限信号的抽样	34
2.5 带通信号	37
2.6 深入学习	44
习题	44
第 3 章 模拟信号的发送和接收	55
3.1 调制简介	55
3.2 振幅调制(AM)	56
3.2.1 双边带抑制载波 AM	56
3.2.2 常规振幅调制	61
3.2.3 单边带 AM	64
3.2.4 残留边带 AM	67
3.2.5 AM 调制器和解调器的实现	69
3.2.6 信号多路复用	74
3.3 角度调制	75

3.3.1	FM 信号和 PM 信号的表示形式	76
3.3.2	角度调制信号的频谱特性	79
3.3.3	角度调制器和解调器的实现	84
3.4	无线电广播和电视广播	91
3.4.1	AM 无线电广播	91
3.4.2	FM 无线电广播	93
3.4.3	电视广播	95
3.5	移动无线电系统	102
3.6	深入学习	103
	习题	103
第 4 章	随机过程	114
4.1	概率及随机变量	114
4.2	随机过程:基本概念	127
4.2.1	随机过程的描述	128
4.2.2	统计平均	130
4.2.3	平稳过程	133
4.2.4	随机过程与线性系统	139
4.3	频域中的随机过程	141
4.3.1	随机过程的功率谱	141
4.3.2	线性时不变系统的传输	146
4.4	高斯过程及白过程	148
4.4.1	高斯过程	149
4.4.2	白过程	150
4.5	带限过程及抽样	153
4.6	带通过程	155
4.7	深入学习	162
	习题	162
第 5 章	模拟通信系统中的噪声影响	174
5.1	噪声对线性调制系统的影响	174
5.1.1	噪声对基带系统的影响	174
5.1.2	噪声对 DSB-SC AM 的影响	174
5.1.3	噪声对 SSB AM 的影响	176
5.1.4	噪声对常规调幅的影响	177
5.2	使用锁相环(PLL)进行载频相位估计	181
5.2.1	锁相环	181
5.2.2	加性噪声对相位估计的影响	184
5.3	噪声对角度调制的影响	188
5.3.1	角度调制的门限效应	196

5.3.2 预加重和去加重滤波	199
5.4 模拟调制系统的比较	202
5.5 模拟通信系统中传输损耗和噪声的影响	203
5.5.1 热噪声源的特征	204
5.5.2 噪声温度效应及噪声系数	205
5.5.3 传输损耗	207
5.5.4 信号传输中继器	208
5.6 深入学习	210
习题	211
第 6 章 信源与信源编码	215
6.1 信源的数学模型	215
6.1.1 信息的度量	216
6.1.2 联合熵与条件熵	218
6.2 信源编码理论	219
6.3 信源编码算法	221
6.3.1 霍夫曼信源编码算法	221
6.3.2 Lempel-Ziv 信源编码算法	225
6.4 率失真理论	226
6.4.1 互信息量	227
6.4.2 微分熵	228
6.4.3 率失真函数	229
6.5 量化	233
6.5.1 标量量化	233
6.5.2 矢量量化	241
6.6 波形编码	243
6.6.1 脉冲编码调制(PCM)	243
6.6.2 差分脉冲编码调制(DPCM)	247
6.6.3 增量调制(ΔM)	249
6.7 分析-合成技术	251
6.8 数字音频传输和数字音频记录	254
6.8.1 电话传输系统中的数字音频信号	254
6.8.2 数字音频录制	256
6.9 JPEG 图像编码标准	259
6.10 深入学习	262
习题	262
第 7 章 加性高斯白噪声信道中的数字传输	272
7.1 信号波形的几何表示	272
7.2 脉冲振幅调制	275

7.3	二维信号波形	280
7.3.1	基带信号	280
7.3.2	二维带通信号——载波相位调制	282
7.3.3	二维带通信号——正交振幅调制	285
7.4	多维信号波形	287
7.4.1	正交信号波形	287
7.4.2	双正交信号波形	291
7.4.3	单纯信号波形	292
7.4.4	二进制编码的信号波形	293
7.5	加性高斯白噪声信道中数字已调信号的最佳接收机	295
7.5.1	相关型解调器	296
7.5.2	匹配滤波器型解调器	299
7.5.3	最佳检测器	305
7.5.4	载波振幅已调信号的解调和检测	309
7.5.5	载波相位已调信号的解调和检测	311
7.5.6	正交振幅已调信号的解调和检测	316
7.5.7	频率已调信号的解调和检测	318
7.6	加性高斯白噪声中信号检测的错误概率	323
7.6.1	二进制调制的错误概率	323
7.6.2	M 进制 PAM 的错误概率	326
7.6.3	相位相干 PSK 调制的错误概率	329
7.6.4	DPSK 的系统错误概率	333
7.6.5	QAM 的错误概率	334
7.6.6	M 进制正交信号的错误概率	338
7.6.7	M 进制双正交信号的错误概率	341
7.6.8	M 进制单纯信号的错误概率	343
7.6.9	FSK 的非相干检测的错误概率	343
7.6.10	调制方式的比较	345
7.7	有线和无线通信信道的性能分析	348
7.7.1	再生中继器	348
7.7.2	无线信道中的链路预算分析	350
7.8	码元同步	353
7.8.1	超前-滞后门同步法	353
7.8.2	最小均方误差法	355
7.8.3	最大似然准则法	357
7.8.4	频谱线法	358
7.8.5	载波已调信号的码元同步	360
7.9	深入学习	360
	习题	361

第 8 章 通过带限 AWGN 信道的数字传输	377
8.1 通过带限信道的数字传输	377
8.1.1 带限基带信道上的数字 PAM 传输	380
8.1.2 带限带通信道上的数字传输	382
8.2 数字已调信号的功率谱	383
8.2.1 基带信号的功率谱	383
8.2.2 载波已调信号的功率谱	388
8.3 带限信道的信号设计	389
8.3.1 无码间干扰的带限信号的设计——奈奎斯特准则	390
8.3.2 具有可控 ISI 的带限信号	395
8.4 检测数字 PAM 的错误概率	397
8.4.1 具有零 ISI 的 PAM 检测的错误概率	397
8.4.2 可控 ISI 的逐码元数据检测	398
8.4.3 部分响应信号检测的错误概率	400
8.5 与记忆有关的数字调制信号	403
8.5.1 有记忆的调制编码与调制信号	403
8.5.2 最大似然序列检测器	415
8.5.3 部分响应信号的最大似然序列检测	417
8.5.4 有记忆数字信号的功率谱	421
8.6 存在信道失真的系统设计	424
8.6.1 已知信道的发送和接收滤波器的设计	426
8.6.2 信道均衡	428
8.7 多载波调制和 OFDM	442
8.7.1 FFT 算法实现的 OFDM 系统	443
8.8 深入学习	445
习题	446
第 9 章 信道容量与信道编码	457
9.1 信道模型	457
9.2 信道容量	459
9.2.1 高斯信道容量	462
9.3 通信的容限	464
9.3.1 模拟信号的 PCM 传输	467
9.4 可靠通信的编码	469
9.4.1 正交信号错误概率的紧界	469
9.4.2 编码的原则	472
9.5 线性分组码	477
9.5.1 线性分组码的译码及其性能	481
9.5.2 突发错误纠错编码	487
9.6 循环码	488

9.6.1 循环码的结构	488
9.7 卷积码	495
9.7.1 卷积码的基本性质	496
9.7.2 卷积码的最佳译码——维特比算法	499
9.7.3 卷积码的其他译码算法	503
9.7.4 卷积码的错误概率界限	503
9.8 复合编码	506
9.8.1 乘积码	506
9.8.2 链接码	507
9.8.3 Turbo 码	508
9.8.4 BCJR 算法	509
9.8.5 Turbo 码的性能	510
9.9 带限信道的编码	512
9.9.1 编码与调制的结合	512
9.9.2 网格编码调制	514
9.10 信道编码的实际应用	519
9.10.1 深层空间通信的编码	519
9.10.2 电话线路调制解调器的编码	520
9.10.3 光盘编码	522
9.11 深入学习	523
习题	523
第 10 章 无线通信	533
10.1 衰落多径信道上的数字传输	533
10.1.1 时变多径信道的信道模型	534
10.1.2 衰落多径信道的信号设计	540
10.1.3 频率非选择性瑞利衰落信道上的二进制调制性能	541
10.1.4 通过信号分集提高系统性能	544
10.1.5 频率选择性信道的调制和解调——RAKE 解调器	548
10.1.6 多天线系统和空时编码	550
10.2 连续载波相位调制	553
10.2.1 连续相位 FSK(CPFSK)	554
10.2.2 连续相位调制(CPM)	560
10.2.3 CPFSK 和 CPM 的频谱特性	563
10.2.4 CPM 信号的解调和检测	567
10.2.5 CPM 在 AWGN 信道和瑞利衰落信道中的性能	571
10.3 扩频通信系统	573
10.3.1 扩频数字通信系统的模型	574
10.3.2 直接序列扩频系统	575
10.3.3 直接序列扩频信号的应用	584

10.3.4 脉冲干扰和衰落的影响	586
10.3.5 PN 序列的生成	588
10.3.6 跳频扩频	591
10.3.7 扩频系统的同步	596
10.4 数字蜂窝通信系统	601
10.4.1 GSM 系统	601
10.4.2 基于 IS-95 的 CDMA 系统	604
10.5 深入学习	607
习题	608
附录 A 多信道二进制信号接收时的错误概率	613
参考文献	615

第 1 章 绪 论

在日常的工作和生活中,人们每天都要接触和使用大量的现代通信系统和通信媒介,其中最常见的是电话、无线电广播、电视和因特网。通过这些媒介,生活在全球各地的人们可以随时进行通信、处理日常事务、通晓天下大事、了解世界发展。而电子邮件和传真则使得文字信息的远距离快速传递成为现实。

你能想像这世界没有电话、无线电广播和电视的情景吗?当然,在我们遥想这种情景的时候,绝大多数的现代通信系统已经发明出来,并在上一个世纪得到了很大发展。在此,我们简要回顾一下最近 200 年来在现代通信系统的发展中发挥重大作用的技术。

1.1 历史回顾

电报和电话。对通信具有重大意义的最早发明是 Alessandro Volta 在 1799 年发明的电池,这项发明导致了塞缪尔·摩尔斯(Samuel Morse)在 1837 年研究出电报系统并且进行了演示。连接华盛顿和巴尔的摩的第一条电报线在 1844 年 5 月投入运行。表 1.1 给出了摩尔斯设计的可变长度二进制码,利用这种编码,英文字母表中的字母都可以用一个由点和划线(码字)组成的序列表示。在这种二进制码中,频繁出现的字母用短的码字表示,出现频率较低的字母则用长的码字表示。

表 1.1 摩尔斯码

A	·—	N	—·		
B	—···	O	— — —		
C	— · — ·	P	· — · —		
D	— · ·	Q	— — — ·		
E	·	R	· — ·		
F	· · — ·	S	· · ·		
G	— — ·	T	—		
H	· · ·	U	· · —		
I	· ·	V	· · — ·		
J	· — — —	W	· — —		
K	— · —	X	— · — ·		
L	· — ·	Y	— · — —		
M	— —	Z	— — · ·		

(a)字母		(b)数字	
1	· — — — —	1	· — — — —
2	· · — — —	2	· · — — —
3	· · · — —	3	· · · — —
4	· · · · —	4	· · · · —
5	· · · · ·	5	· · · · ·
6	· — — — —	6	· — — — —
7	· — — — ·	7	· — — — ·
8	· — — — ·	8	· — — — ·
9	· — — — ·	9	· — — — ·
0	· — — — ·	0	· — — — ·

句点(.)	· — · — · —	等待符号(AS)	· — · — ·
逗号(,)	— — — · — —	双划线(破折号)	— — — — —
问号(?)	· — — — ·	错误符号	· — — — ·
引号(")	· — · — ·	斜杠(/)	· — · — ·
冒号(:)	— — — · —	消息结束(AR)	· — · — ·
分号(;))	— · — · — ·	发送结束(SR)	· — · — ·
括号()	— · — — · —		

(c)标点符号和特殊字符