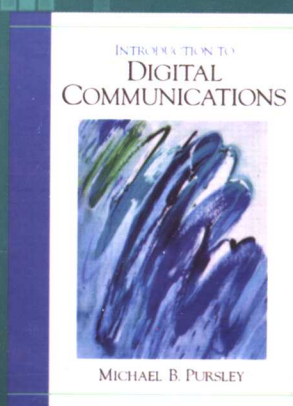


国外电子与通信教材系列



数字通信导论

Introduction to Digital Communications



[美] Michael B. Pursley 著

叶芝慧 胡静 宋铁成 等译

沈连丰 审校



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

数字通信导论

Introduction to Digital Communications

[美] Michael B. Pursley 著

叶芝慧 胡 静 宋铁成 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

本书论述数字通信的基本原理、主要技术和典型应用,重点阐述各种数字调制和解调。全书共分9章,前4章给出在数字通信系统分析和设计中常用的基础知识,包括概率和随机变量、随机过程、随机过程的线性滤波和线性系统中随机过程的频域分析。接下来的3章详细讨论了二进制数据的基带传输、各种相干和非相干通信技术。第8章分析码间串扰,描述了数字通信中的自干扰和信道特性。第9章介绍扩频通信并给出了大量的最新研究成果。

本书可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,也可作为有关技术、科研和管理人员或继续教育的参考书。

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

Introduction to Digital Communications, ISBN: 0201184931 by Michael B. Pursley. Copyright © 2005.

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:01-2005-0325

图书在版编目(CIP)数据

数字通信导论/(美)珀斯利(Pursley, M. B.)著;叶芝慧等译.-北京:电子工业出版社,2005.12
(国外电子与通信教材系列)

书名原文:Introduction to Digital Communications

ISBN 7-121-01868-3

I. 数... II. ①珀... ②叶... III. 数字通信-教材 IV. TN914.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第123198号

责任编辑:许菊芳

印 刷:北京燕南印刷厂

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:33.25 字数:852千字

印 次:2005年月12月第1次印刷

定 价:48.00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zltz@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、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 杨千里	北京邮电大学校长、教授、博士生导师 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

受电子工业出版社之托,我们翻译了由 Michael B. Pursley 撰写的 *Introduction to Digital Communications* 一书。正如作者在前言中所说,没有哪本书能够涵盖数字通信的所有方面。和其他数字通信题材的书相比,本书在内容的取舍上颇具特色,它把有关信息论基础、信源编码、信道编码以及与通信网有关的内容几乎全部去掉,而将重点放在调制和解调上,这种安排和目前我国许多学校的课程体系非常吻合,因为我国大多数学校,通常是将“通信原理”、“数字通信”、“信息论与编码”(或“信息论基础”、“编码理论”)、“通信网理论与技术”等内容分别开课的,因此本书作为“通信原理”或“数字通信”等课程的教科书颇为合适,作为双语教学的教材更佳。

本书的9章内容中,基础知识占4章,调制和解调占2章,基带传输、码间串扰和扩频通信各占1章。其中调制和解调的内容在“相干通信”和“非相干通信”两章中均有介绍,篇幅较大,在全书中是重点和精彩内容。码间串扰问题是关于自干扰和信道特性问题的很好的描述,扩频通信则代表了通信制式方面所用到的重要技术,因此本书的9章内容自成体系,重点突出。另外,本书虽然是“导论”性质,但全书基本仍是以数学语言来描述的,理论上有一定深度,叙述上比较严谨,内容上注重先进性。对我们而言,整个翻译过程也是一个学习过程,深感这是一本很有特色的好书。

本书的翻译由叶芝慧、胡静和宋铁成负责,刘彤、朱晓荣、丁卉、鲁侃、朱志坚、周磊等协助翻译了相关章节。全书先由胡静负责初校,然后由叶芝慧负责统稿和校对,最后由沈连丰负责审校。电子工业出版社的编辑为本书的出版进行了辛勤的工作并对翻译工作给予了许多指导。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!

译稿对原书中的错误和遗漏之处做了更正和注释。由于译审者水平所限,译文中难免有不妥之处,敬请读者不吝指正。

译者

2005年

于东南大学移动通信国家重点实验室

前 言

本书介绍了数字通信的基本概念,面向没有或很少接触过数字或模拟通信的学生,旨在帮助学生深刻理解数字通信系统工程,以期掌握未来数字通信系统的系统级设计和分析方法,因此本书重点强调数字通信理论和技术的的基本原理而非特定的实现技术。

没有哪本书能够涵盖数字通信的所有方面。本书侧重于调制和解调,而对于数字通信中的其他重要内容,如纠错编码和同步技术等仅做简要讨论,因为传统上这些内容适合在学过数字通信初级课程后的更高级课程中讲授。

本书适合作为电气及计算机工程专业的高年级本科生或低年级研究生的教材,要求学生具有良好的线性系统的基础知识,包括线性系统分析中卷积和傅里叶变换的用法。此外还要求学生先修课程中已经很好地掌握了概率论和随机变量的知识。第1章简要回顾概率论和随机变量,这部分内容主要是为理解随机变量的一些基本性质提供方便的参考,并简单介绍后续章节所用的符号。充分理解这些概念大约需要25到30课时,可以参考诸如 Sheldon Ross 的 *A First Course in Probability* 或者 Richard Scheaffer 的 *Introduction to Probability and Its Applications* 等教材。

第2章到第4章介绍二阶随机过程,重点在于相关函数、谱密度及其在分析线性系统的随机过程中的作用,必须很好地理解这部分内容才能掌握后续章节中的数字通信的原理。某些大学要求以随机过程作为通信系统初级课程的先修课程,因此,如果已经学习过随机过程,则本书第2章、第3章及第4章部分内容可以仅做复习或者完全跳过。第4章后半部分的章节通常不包括在概率论及随机过程课程中,因此这些章节需要在本课程开始时讲授,或在第6章和第7章需要用到这些内容时讲授。

第5章到第7章介绍数字通信基本原理,涉及基带通信、相干射频通信和非相干射频通信。在数字通信的任何入门课程中它们都是核心内容,也是学习数字通信后续课程的基础。最后两章介绍一些更深入和更专业的内容,在本课程中需要哪些内容可由讲授者自行决定。

本书从基带通信开始讲授数字通信理论,因为它不涉及射频通信中由正弦载波引起的复杂性。第5章在对基带通信做简单介绍的基础上,分析匹配滤波、最佳相关接收机以及统计判决理论的基本原理。在这一章中给通信接收机赋予了特定的结构,并推导出这种接收机的最佳构成。第6章证明这种接收机结构的最优性,并学习如何由傅里叶级数推导出二进制相移键控的最佳接收机结构,它是相干通信中最常用的二进制调制方式,推导过程限制在正弦信号集上,以避免通常所需的正交扩展,同时有助于为学生提供理解更通用的推导所需的基本概念。附录D提供一种直观的方法,能避免使用正交扩展。第5章的一个重要特色是对通信接收机中非最佳滤波器的分析方法的透彻阐述,本章还介绍了判决理论,并且讨论了最小最大准则、贝叶斯准则和最大似然判决准则等。

第6章讨论相位参考的提取以及不理想的相位参考所引起的衰减问题。在研究相干通信接收机之后,给出了二相及四相键控、最小频移键控、正交幅度调制和非二进制正交信号集的性能分析,本章还介绍了各种调制技术的频谱效率。

第7章的主要内容是非相干通信,再次利用学生所熟悉的傅里叶级数来推导二进制频移键控中的最佳非相干接收机,并分析了最佳和非最佳接收机。本章还讨论了差分编码的二进制相移键控调制的非相干解调法,并推导出了非相干接收的非二进制正交信号传输的性能。

第8章的主要内容是码间串扰及其对数字通信系统性能的影响,还介绍了已知传输特性时的信道均衡。第9章的主题是扩频通信。汉明(Hamming)码和里德-索罗门(Reed-Solomon)码的基本特性在附录A和附录B中分别介绍,附录C介绍通信信号的复数表示,用于推导最佳接收机的抽样法在附录D中介绍,在附录E中推导了一种针对编码信号的替代接收机结构。

本书也适合于工程师和低年级研究生自学,通过充分详细的推导和讨论使读者熟练掌握书中所介绍的概念和技术的应用。例题和给出解答的练习可以用来检查读者学习过程中的理解程度,每一章都有较多的习题,它们既能够检验和巩固读者对书中内容的理解程度,同时也是对正文中某些内容的进一步扩充。

在此衷心感谢每一位使用过本书初稿并提出过批评建议的教师,特别要对 Illinois 大学的 Dilip Sarwate 和 Bruce Hajek 教授、Purdue 大学的 James Lehnert 教授以及 Clemson 大学的 John Komo 和 Daniel Noneaker 教授表达最诚挚的谢意。他们讲授过书稿的一个或多个版本,并提供了大量的反馈意见,使本书得以改进。对那些为书稿进行了无数次修订并给出勘误表的同学们,我同样要表达感激之情。最后要感谢 Thomas Royster 为校样工作提供的帮助。

Michael B. Pursley

目 录

第 0 章 概述	1
0.1 数字通信系统的作用	1
0.2 数字通信系统的调制与解调	2
第 1 章 概率论与随机变量:基本概念回顾	5
1.1 本章目的	5
1.2 概率空间	5
1.3 随机变量	5
1.3.1 随机变量的分布函数和密度函数	7
1.3.2 均值、方差和矩	9
1.3.3 一些不等式	10
1.4 多元随机变量的概率和矩	11
1.4.1 相关性与协方差	12
1.4.2 随机变量的和与序列	13
1.5 高斯随机变量	15
1.6 习题	18
第 2 章 随机过程简介	21
2.1 电子系统中的随机过程溯源	21
2.2 随机过程举例	21
2.3 定义和基本概念	25
2.3.1 随机过程的分布函数和密度函数	29
2.3.2 高斯随机过程	32
2.3.3 随机过程的条件概率密度	33
2.4 均值、自相关及自协方差	34
2.4.1 定义和基本性质	34
2.4.2 自相关函数的性质推导	41
2.5 平稳随机过程	43
2.5.1 宽平稳和协方差平稳过程	44
2.5.2 宽平稳过程的自相关函数举例	47
2.6 互相关和互协方差函数	49
2.7 白噪声	51
2.8 平稳高斯随机过程	52
2.9 习题	53

第 3 章 随机过程中的线性滤波	56
3.1 随机过程中滤波的必要性	56
3.2 离散时间线性系统和连续时间线性系统	56
3.3 随机过程的线性运算	60
3.4 线性系统中二阶矩随机过程的时域分析	63
3.4.1 线性系统输出的均值	65
3.4.2 线性系统的输出的自相关函数	69
3.5 线性系统中的高斯随机过程	83
3.6 相关函数的确定	92
3.6.1 泊松过程的自相关函数	92
3.6.2 各态遍历随机过程均值和相关函数的实验确定	94
3.7 应用	97
3.8 习题	103
第 4 章 线性系统中随机过程的频域分析	107
4.1 傅里叶变换技术的应用	107
4.2 宽平稳随机过程的谱密度	107
4.3 线性系统中随机过程的谱分析	112
4.4 性质 3 和性质 4 的推导	114
4.5 调幅信号的频谱	117
4.6 带通频率函数	123
4.6.1 频率函数带宽的另一种定义	123
4.6.2 理想带通频率函数的时域描述	125
4.7 带通随机过程	132
4.8 习题	137
第 5 章 二进制数据的基带传输	142
5.1 二进制数据传输信号集	142
5.2 线性接收机分析	145
5.2.1 一个特例	145
5.2.2 通用模型	151
5.3 门限值优化	160
5.3.1 最小最大准则	162
5.3.2 贝叶斯准则	171
5.4 普通信道的通用判决准则	178
5.5 AWGN 信道的匹配滤波器	186
5.5.1 施瓦兹不等式	189
5.5.2 匹配滤波器	194
5.5.3 匹配滤波器的频域分析	201
5.5.4 匹配滤波器的另一种实现方法	204

5.5.5	使用匹配滤波器的接收机的最佳门限	207
5.5.6	信号设计	208
5.6	AGN 信道的最佳滤波器	211
5.7	AWGN 信道下二进制通信的信号空间概念	214
5.7.1	二进制信号的几何表示	214
5.7.2	最小最大差错概率	217
5.8	习题	218
第 6 章	相干通信	225
6.1	二进制相干通信的最佳接收机	226
6.1.1	二进制相移键控	226
6.1.2	BPSK 的匹配滤波器和相干接收机	227
6.1.3	AWGN 信道和 BPSK 信号下的差错概率	228
6.1.4	BPSK 相关接收机的最优性	229
6.2	具有不精确参考相位的二进制相移键控	234
6.2.1	作为相位误差的函数的差错概率	234
6.2.2	BPSK 信号的相位估计	240
6.3	用于相干通信的一维信号	242
6.3.1	BPSK 信号	242
6.3.2	二进制 ASK 的最佳接收机	243
6.3.3	倍频分量分析	244
6.3.4	二进制 ASK 的差错概率	246
6.3.5	M 进制幅移键控	247
6.3.6	M -ASK 接收机	250
6.4	M 进制通信系统的最佳判决	251
6.4.1	M 进制信号的判决准则	251
6.4.2	M -ASK 的应用	254
6.4.3	M -ASK 的几何表示和符号差错概率表达式	259
6.5	相干通信的二维调制	261
6.5.1	二维信号集	261
6.5.2	2-ASK 与 QASK 的带宽效率比较	265
6.5.3	非二进制相位调制	266
6.5.4	4-QASK 的比特差错概率	268
6.5.5	总结:一维调制和二维调制	270
6.5.6	QASK 接收机的判决区域	271
6.5.7	QASK 接收机的符号差错概率	278
6.5.8	QASK 接收机的比特差错概率	284
6.6	M 进制正交信号的相干解调	286
6.6.1	M 进制正交信号	286
6.6.2	M 进制正交信号的最佳相干接收机	291

6.6.3	M 进制正交信号的差错概率	292
6.7	二维信号调制偏移	298
6.8	二维调制的带宽比较	303
6.9	连续相位频率调制	306
6.9.1	连续相位频移键控调制	308
6.9.2	最小频移键控调制	309
6.9.3	常规频率脉冲的连续相位调制	312
6.10	习题	314
第 7 章	非相干通信	325
7.1	二进制非相干通信的最佳接收机	325
7.2	二进制频移键控(BFSK)	330
7.3	二进制非相干相关接收机的次最佳相关器	335
7.4	二进制非相干通信最佳判决准则的推导	340
7.5	LS 判决准则的差错概率	345
7.5.1	差错概率的推导	345
7.5.2	特定系统的应用	350
7.5.3	总结	351
7.6	差分相干 BPSK	352
7.6.1	差分编码 BPSK 信号格式	352
7.6.2	DBPSK 接收机和相应差错概率	354
7.6.3	另一种 DBPSK 接收机	357
7.7	M 进制非相干相关接收机	360
7.8	非相干接收机包络检波器的实现	366
7.9	非选择性衰落的非相干通信	372
7.10	习题	380
第 8 章	码间串扰	388
8.1	数字通信中的码间串扰分量	388
8.2	二进制数字通信的码间串扰影响	394
8.2.1	单一样本分析	395
8.2.2	具有码间串扰的系统的差错概率	395
8.2.3	码间串扰的界值	401
8.2.4	眼图	403
8.2.5	输出信噪比	406
8.3	无码间串扰的数字通信系统	408
8.4	线性均衡简介	420
8.5	习题	425
第 9 章	扩频通信	431
9.1	扩频信号的随机信号模型	431

9.1.1	多址能力	433
9.1.2	抗干扰能力	434
9.1.3	抗多径能力	435
9.1.4	解扩的时域和频域阐述	435
9.1.5	线性系统的识别	435
9.2	直接序列扩频信号	437
9.3	序列及其周期相关函数	443
9.4	DS 扩频多址通信	452
9.5	直接序列扩频多址通信的性能评估	465
9.6	跳频扩频	471
9.7	习题	477
附录 A	汉明码	483
附录 B	Reed-Solomon 码	489
附录 C	信号和系统的复数表示	493
附录 D	通用信号集的最佳接收机	498
附录 E	编码信号的另一种接收机结构	502
附录 F	常用公式	506
索引	508

第0章 概 述

在本书中,“通信系统”这一术语是指将信息从信源传送到信宿的电子系统。信息的形式可以是数字消息或模拟消息,数字消息由有限个变量组成,通常称为符号,每个符号的值都取自一个公共的有限集合,称为消息字符表;模拟消息中有无限多个变量。数字消息通常是一个幅度离散、时间离散的序列,而典型的模拟消息则是一个时间连续的波形。

从科技发展的最新动态可以清楚地看出,数字通信系统代表着通信系统的未来。目前的许多应用都要求通信系统处理的消息本身就是数字的,计算机文件的传输就是一例。在其他应用中,原始信号不是数字的,例如以模拟格式记录的语音信号,然而把消息转换成数字格式并且采用数字通信系统有其优越性。数字格式更适于信宿端的存储,可以进行编码以保护私密性,最重要的是,可以进行编码以抑制通信信道中不可避免的噪声。

数字通信系统应用的一个很好实例是两台计算机之间的通信,描述数字通信系统功能的一个很好场景则是将文件从一台计算机传送到另一台计算机。通过连接两台计算机的可用通信信道,数字信息从源计算机发送到目的计算机,这个可用信道可以是光纤、电话线、无线连接或者上述媒介的组合。假设信息由二进制数据构成,即信息的取值是两个可能值之一的变量序列,通信系统的功能就是在信宿端再生由信源端提供的这些二进制数据。在源计算机上,必须将这些二进制数据转换成适合通信信道传输的信号。所有的通信信道都存在噪声,这使得信道输出端不能完全再现输入端的数据。在信宿端,也即信道输出端,将混杂了噪声的传输信号转换成供信宿计算机使用的二进制数据。由于噪声和失真的影响,转换过程中可能会产生错误。系统设计者的目标就是在成本、功耗和复杂度受限的情况下,设计和构建出一个出错频率尽可能低的数字通信系统。

0.1 数字通信系统的作用

现在回到一般的情况,给出数字通信系统功能的稍微详细的描述。数字消息是一个变量序列,在一个公共的有限集合上取值。前面提到的用于两台计算机之间通信的二进制数据序列就是一种数字消息,其公共的有限集合中只有两种取值。数字通信系统在信源端接收数字消息并作为系统的输入,在信宿端产生数字消息作为输出。信源端的通信子系统称为发信机,信宿端的通信子系统称为接收机,这两个数字通信子系统由通信信道相连接。信道特性如失真、噪声或干扰使得输出端有别于输入端,这种差别通常是随机的并且是难以预测的。对于传送到输出端的消息中的某个特定符号,当它不同于信源端原始信号中的相应符号时,称此符号的接收产生了差错,并称接收到的符号是错误的。数字通信系统的目的是在信宿端尽可能可靠地复制消息,对某个特定的复制消息的可靠性的度量,通常与消息中总的差错数量或对应的差错频度有关,由此可以将复制消息中符号的差错概率作为衡量数字通信系统性能指标之一。

由于篇幅所限,任何一本书都不可能包揽数字通信系统的每个部分。本书侧重于研究调制与解调。调制与解调过程具有共同的目标,因此它们必须是一致的,尽管物理上它们几乎总是分离的,甚至通常相隔很远,但是在设计时通常将它们作为一个子系统。调制器和解调器合称调制解调器。

0.2 数字通信系统的调制与解调

调制是将数字消息转换成适合通信信道传输的连续时间信号的过程,解调是将接收到的连续时间信号波形转换成数字数据序列的过程,其中接收波形通常包括信号和噪声。人们希望解调器输出端的数字消息与调制器输入端的数字消息相同,即实现无差错通信,但是在实际的通信信道中,无差错通信是不可能的,只能尽可能地使解调器输出端的数据符号与调制器输入端的相应数据符号一致。

如图 0.1 所示,调制过程在发信机中完成,诸如编码和滤波之类的其他功能也在此执行。将数据序列转换成哪一种类型的信号取决于可用的通信信道。例如,如果通信信道是电话线,则已调制信号可以是频率低于几千赫兹(kHz)的基带信号。采用基带调制的通信系统称为基带传输系统。另一方面,如果通信信道是移动射频信道,则已调制信号可以是中心频率在几百兆赫兹(MHz)、带宽在几赫兹到几兆赫兹之间的带通信号,称为射频信号,相应的通信系统称为射频通信系统。第 5 章将介绍基带数字信号传输,第 6 章和第 7 章将介绍射频数字通信系统。

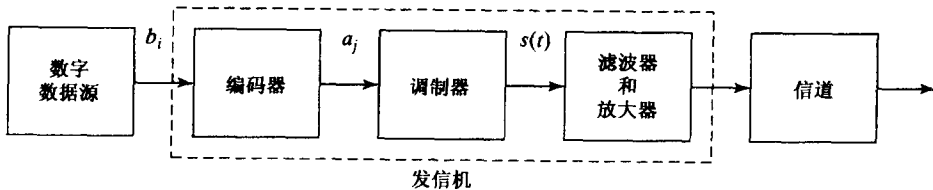


图 0.1 数字通信系统发信机

图 0.1 中的编码器和调制器不必对单个符号进行操作。在无纠错编码的最简单的通信系统中,编码器将各个信源输出映射成各个符号,调制器再将这些符号映射成波形。对于更复杂一些的系统,可能需要将信源输出的分组 $\mathbf{b} = (b_1, b_2, \dots, b_k)$ 映射成消息字符集中的符号分组 $\mathbf{a} = (a_1, a_2, \dots, a_n)$,这两个分组的长度可能不同,这一过程多次重复,直到将所有的信源输出映射成数字消息。然后调制器将消息序列映射成波形序列,产生信号 $s(t)$ 。由于发信机中的滤波器和放大器的作用通常可以忽略,并且所有不可忽略的影响都已包含在信道模型中,因此在数字通信系统中通常将调制器的输出 $s(t)$ 称为发送信号。

再次考虑二进制数据传输的例子。二进制数据的基本单元是二进制数字,1 个二进制数字称为 1 比特,数字消息可以由二进制数据通过不同的方式构成。极端情况下,每一个比特可以看成是一个单独的符号,每个符号被映射成一个单独的波形,这就是第 5 章所采用的方法。另一方面,将几个比特合成一组来构成符号更有好处。在后一种情况下,数字消息由符号序列组成,每个符号表示一组比特,这种方法在第 6 章和第 7 章中采用。

在此简要说明一下滤波信号和参数估计值的符号问题。如果 $v(t)$ 表示一个确定性信号, $\theta(t)$ 表示经过线性滤波后的信号, 则随机过程同样有效: 如果 $X(t)$ 是一个适当的随机过程, $\hat{X}(t)$ 表示当 $X(t)$ 作为线性滤波器输入时的输出。如果 θ 是一个确定的常数, $\hat{\theta}$ 表示此常数的估计值, 假设 Θ 是一个随机变量, $\hat{\Theta}$ 表示它的估计值。在通信系统中, 常数或者随机变量可以用来表示所传输信号的某一参数, 它对于接收端来说可能是未知的。正弦信号的相角就是一个典型的例子。在射频通信信号的解调中可能就要用到这个相角估计, 其中通信信号是由消息信号调制到正弦载波上构成的。

如图 0.2 所示, 解调过程在接收机一侧实现, 接收机中的其他运算还包括子系统的同步, 即抽取接收信号中的定时信息以及其他特定参数的信息。对于具有加性噪声的线性信道, 解调器输入为

$$Y(t) = \hat{s}(t) + X(t)$$

这就是接收信号。 $\hat{s}(t)$ 表示经过滤波后的发送信号, $X(t)$ 是表示噪声的一个随机过程, 包括接收机自身产生的热噪声。在绝大多数的数字通信系统中, 热噪声的主要来源是接收机的前端, 例如图 0.2 中的预放大器和滤波器。用于建模噪声的随机过程称为噪声过程。在同步子系统的辅助下, 解调器的任务就是产生消息流 a_1, a_2, a_3, \dots 的可靠估计 $\hat{a}_1, \hat{a}_2, \hat{a}_3, \dots$ 。接收机中的滤波运算改变了噪声的特性, 而这些特性影响解调器的性能。第 2 章将讨论随机过程的数学描述, 第 3 章和第 4 章将介绍线性滤波对随机过程的影响。

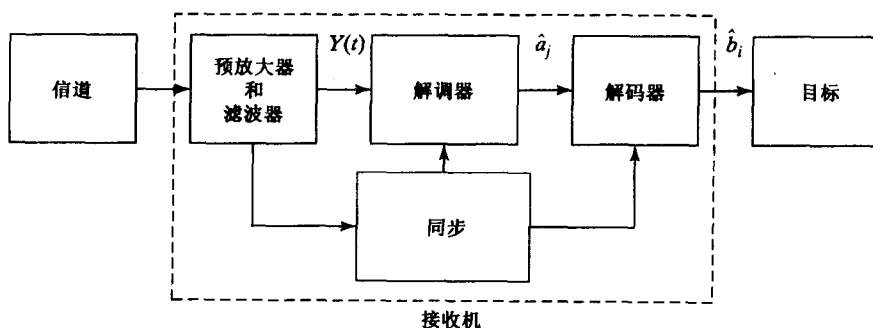


图 0.2 数字通信系统接收机

可以将图 0.1 和图 0.2 合并成一个框图, 如图 0.3 所示, 图中包括调制解调过程所需的基本单元。图 0.3 对于本书所涉及的大部分内容都是足够的, 在这个简化的原理图中, 输入是一个数字消息, 输出则是另一个数字消息; 编码、解码和同步子系统都没有考虑。所有的滤波和放大都被归并到信道内, 并且信道也被看做是噪声源。事实上, 将发信机的滤波器和放大器、物理信道、接收机的滤波器和放大器合并成单个框图, 统称为信道。最常见的信道模型是假设忽略信道滤波的影响, 并且假设噪声过程是一个高斯随机过程。第 5~7 章将采用这个模型, 但是在第 8 章中, 由于要描述和评估信道滤波引起的信号失真的影响, 所以不采用这个模型。