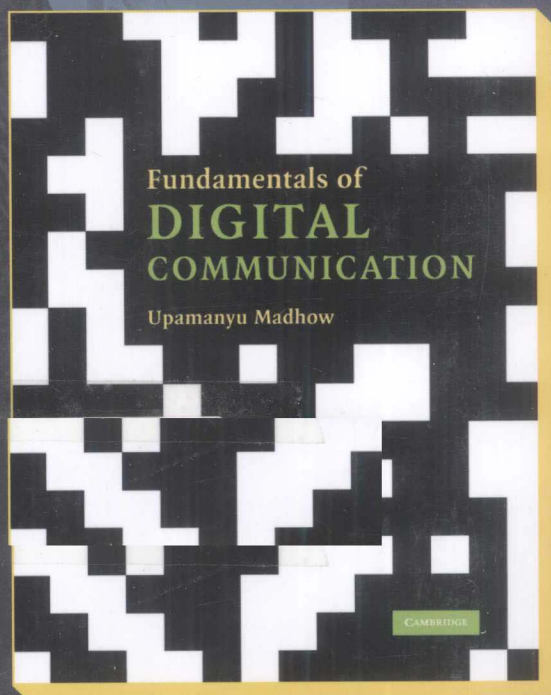


数字通信基础

Fundamentals of Digital Communication

[美] Upamanyu Madhow 著
赵志超 罗志年 陈威兵 等译



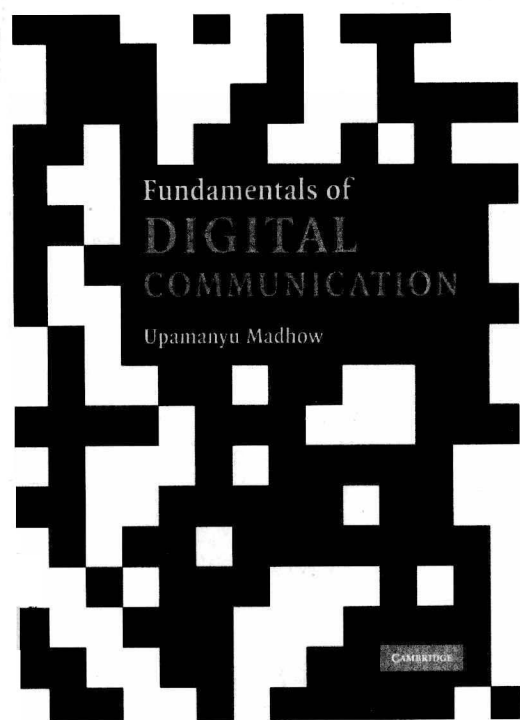
TURING

图灵电子与电气工程丛书

数字通信基础

Fundamentals of Digital Communication

[美] Upamanyu Madhow 著
赵志超 罗志年 陈威兵 等译



人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (CIP) 数据

数字通信基础 / (美) 麦德豪 (Madhow, U.) 著; 赵志超等译. — 北京: 人民邮电出版社, 2010.8

(图灵电子与电气工程丛书)

书名原文: Fundamentals of Digital Communication

ISBN 978-7-115-23123-9

I. ①数… II. ①麦… ②赵… III. ①数字通信
IV. ① TN914.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 118830 号

内 容 提 要

本书是数字通信领域内的一本优秀教材, 系统介绍了调制、解调、非相干通信、信道均衡、信息论、信道编码、无线通信等内容。本书内容新颖, 结构完整, 每章后都附有大量习题, 便于读者进一步学习和研究。

本书适合作为电气与计算机工程专业高年级本科生和研究生教材, 对于通信业工程技术人员, 本书也极具参考价值。

图灵电子与电气工程丛书

数字通信基础

-
- ◆ 著 [美] Upamanyu Madhow
 - 译 赵志超 罗志年 陈威兵 等
 - 责任编辑 王军花
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
 - 邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
 - 网址 <http://www.ptpress.com.cn>
 - 三河市海波印务有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
 - 印张: 23
 - 字数: 649 千字 2010 年 8 月第 1 版
 - 印数: 1-3 000 册 2010 年 8 月河北第 1 次印刷
- 著作权合同登记号 图字: 01-2009-7279 号

ISBN 978-7-115-23123-9

定价: 59.00 元

读者服务热线: (010) 51095186 印装质量热线: (010) 67129223

反盗版热线: (010) 67171154

版 权 声 明

Fundamentals of Digital Communication, 1st Edition (978-0-521-87414-4) by Upamanyu Madhow, first published by Cambridge University Press 2008.

All rights reserved.

This simplified Chinese edition for the People's Republic of China is published by arrangement with the Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom.

© Cambridge University Press & POSTS & TELECOM Press 2010.

This book is in copyright. No reproduction of any part may take place without the written permission of Cambridge University Press and POSTS & TELECOM Press .

This edition is for sale in the People's Republic of China (excluding Hong Kong SAR, Macao SAR and Taiwan Province) only.

此版本仅限在中华人民共和国境内（不包括香港、澳门特别行政区及台湾地区）销售。

译 者 序

在过去的几十年间，数字通信技术迅猛发展，在社会生活的各个领域得到了广泛应用。尤其是近 10 年来，数字通信技术已经融入到我们日常生活的每个角落，比如宽带上网、手机、无线局域网、数字电视等，它们都是数字通信技术的典型应用。

本书是著者多年教学和科研经验的总结，论述了设计现代数字通信系统所需的基本理论，特别是对如 turbo 码和 LDPC 码等数字通信新技术进行了较为深入的研究。本书讨论问题系统、全面，内容逐步深入，概念清晰，理论分析严谨，逻辑性强，例题和习题丰富，是数字通信领域的一本不可多得的优秀教材。

本书前 6 章及前言、附录由赵志超博士翻译。第 8 章由罗志年副教授翻译和校对。第 7 章由陈威兵副教授翻译了初稿，赵志超博士进行了修改和校对。参与本书翻译的还有闫志强、岳虹、张波涛、刘齐军、林龙信、李晋文、肖枫涛、张聪、韩智文、马蓉、焦贤龙、邝祝芳、奚丹、刘志忠、陈钢、宋锐、陈威兵、唐玲艳、唐扬斌、叶俊、杨明军、颜炯、薄建禄、肖国尊。在翻译过程中，我们参照作者在网站上提供的勘误表对书中的疏漏之处进行了更正。感谢人民邮电出版社在组织出版和编辑工作中所给予的支持。Be Flying 工作室负责人肖国尊先生在本书的翻译和出版中做了大量协调和规范工作，在此表示衷心感谢。

由于译者水平有限，书中难免会有一些错误或不当之处，敬请读者批评指正。欢迎广大读者到 Be Flying 工作室博客 (http://blog.csdn.net/be_flying) 进行讨论，也可将有关本书的意见和建议发送到主译者邮箱 (zhchzhao@gmail.com)。最后，向所有为本书出版提供帮助的人们表示诚挚的感谢！

前 言

过去几十年间，数字通信领域发展迅速，有关有线通信网（如数字用户线、电缆、光纤）、无线通信（如蜂窝电话和无线局域网）以及存储介质（如光盘、硬盘）的商业应用蓬勃展开。受这些应用的驱使，大量本科生和研究生投身数字通信领域，但是他们常常被理解通信理论所必需的数学背景所吓倒。数字通信领域的优秀教师可以通过实例讲解来减轻学生的这种恐惧，并且仅涉及直接与应用领域相关的概念。本书的目的就是提供一本讲稿式的数字通信教材，在保持严谨的同时，还要使读者容易理解。它也适合作为希望复习基本概念的工程师的自学参考。

本书是数字通信课程的基础教材，既可以用一门课讲授，也可以用两门连续的课程讲授。本书涵盖了下列专题：信号和噪声的复基带表示（以及与现代收发机实现的关系）；调制（重点是线性调制）；解调（从检测理论基础开始）；色散信道上的通信，包括均衡和多载波调制；利用信息论的性能基准计算；现代编码策略基础（包括卷积码和turbo类码）；以及有关无线通信的介绍。虽然对内容的选择反映了我的个人偏好，但是本书所涉及的概念涵盖了大量本行业的知识。如果学生掌握了这些内容，那么他就具备了通信系统的基础知识，可以利用研究论文和标准文档等资源继续进行深入研究。

本书组织

第1章简要介绍了数字通信的概念。第2章和第3章分别介绍了调制和解调技术，并且包含了我认为有助于理解现代数字通信系统的基础材料。另外，第2章还介绍了有关信号与系统的适当背景知识，重点讲解了通带信号和系统的复基带表示。把重点放在复基带上，是因为它是现代数字收发机算法设计和实现的关键。在研究生阶段中，很多同学可能已经对数字通信有了一定了解，老师可以选择只在课堂上讲述一些关键概念并让同学们自学本章内容。第3章重点介绍了检测和估计理论的应用以推出AWGN（Additive White Gaussian Noise，加性高斯白噪声）信道的最佳接收机，并将不同调制策略的性能描述为 E_b/N_0 的函数形式。同时，还简要介绍了软判决和链路预算分析。

一旦同学们牢固掌握了第2章和第3章的内容，余下的章节或多或少都是自成体系的。第4章以AWGN中信号的似然比推导为开端，建立了对延时和相位等参数进行估计的框架。基于此框架，推导了最优非相干接收机。第5章描述了信道均衡中用到的关键思想，包括维特比算法中用到的MLSE（Maximum Likelihood Sequence Estimation，最大似然序列估计）、线性均衡和判决反馈均衡等。第6章简要介绍了信息论，重点描述了性能基准的计算。由于turbo类码为各种信道模型提供了一个逼近信息论极限的框架，所以对于通信系统设计者而言，性能基准的计算显得越来越重要。第7章介绍了信道编码，重点是让读者理解turbo类码的基本结构和迭代译码算法。本章内容包括卷积码、串行级联turbo码和并行级联turbo码、LDPC（Low Density Parity Check，低密度奇偶校验）码。最后，第8章介绍了无线通信，讨论了信道模型、衰落、分集以及无线系统中常用的调制样式，如正交频分复用、扩谱、连续相位调制、多天线或空时通信等。无线通信这个话题涉及的内容很多，适用领域也很广，所有通信类的书都会介绍，所以本章的目标仅限于介绍部分现有和新兴无线系统链路设计概念。希望这种管中窥豹式的介绍能够激发读者深入探索的兴趣。

如何使用本书

本书各章之间的关系如图 1 所示，用本书进行课程设计或自学时可以此为参考。当然，教师在使用本书时也可以忽略其中的某些依赖关系，尤其是那些画虚线的依赖性较弱的部分。例如，第 7 章（信道编码）和第 8 章（无线通信）的大部分内容都不需要以第 6 章（信息论极限及其计算）作为基础。

以我本人在加州大学圣巴巴拉分校（University of California, Santa Barbara, UCSB）教学的经验而言，在研究生的数字通信介绍性课程中，我用半个学期讲述第 2 章、第 3 章、第 4 章、第 5 章内容，由于大部分学生对第 2 章内容已有所了解，所以我在课堂上对第 2 章内容通常是一带而过。有时，根据课程的进度，我也会简要介绍一下第 6 章和第 7 章。在接下来的研究生课程中，我会详细讲述第 6 章、第 7 章、第 8 章内容。通常这时的进度比较快，只用半个学期就把这些内容讲完了。当然，在标准进度下，也可以加深深度，把同样的内容花两个学期来讲。

还有另一种更具吸引力的课程结构，那就是在介绍性的研究生课程中讲述第 2 章、第 3 章、第 6 章以及第 7 章的一部分，在后续课程中讲述剩下的部分。这种结构尤其适合用于系统介绍基本原理。

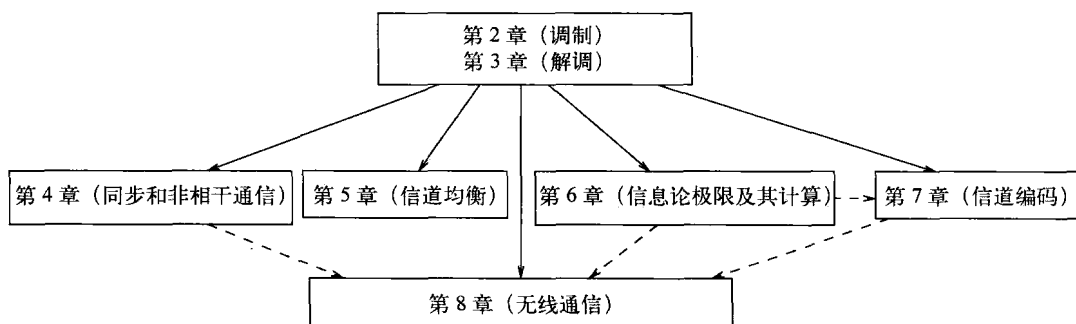


图 1 不同章节间的依赖关系。虚线表示依赖性较弱

致 谢

本书基于我在加州大学圣巴巴拉分校 (UCSB) 以及伊利诺伊大学尚佩恩分校 (UIUC) 讲授的研究生高级数字通信课程整理而成。我要感谢过去 10 年来在这两所学校选修过该课程的学生们, 在我课程设计的诸多尝试中, 他们都曾经是受试者。本书与我在通信系统方面的研究紧密相关, 在此向曾经资助过本项研究的基金机构表示感谢, 它们是美国国家科学基金、美国海军研究办公室、美国陆军研究办公室、摩托罗拉公司、加州大学产学研合作研究计划。

大量研究生为本书做出了贡献, 包括提供数值解和画图, 对初稿提出建设性的反馈, 帮助写习题解答等。特别地, 我要感谢研究小组的下列成员: Bharath Ananthasubramaniam、Noah Jacobsen、Raghu Mudumbai、Sandeep Ponnuru、Jaspreet Singh、Sumit Singh、Eric Torkildson 以及 Sriram Venkateswaran。我也要感谢 Ibrahim El-Khalil、Jim Kleban、Michael Sander 以及 Sheng-Luen Wei 指出了初稿中的拼写错误。我还要感谢一些已经毕业的博士生, 他们的研究成果已部分体现在本书中, 他们是 (按毕业顺序): Dilip Warriar、Eugene Visotsky、Rong-Rong Chen、Gwen Barriac 和 Noah Jacobsen。

我还要借此机会感谢 UIUC 的支持和激励, 我在这里攻读研究生, 后来又成为这里的终身教授。在 UIUC, 对我的研究生生涯影响较大的老师有: 我的导师 Mike Pursley 教授 (现任职于克莱姆森大学)、Bruce Hajek 教授、Vince Poor 教授 (现任职于普林斯顿大学) 以及 Dilip Sarwate 教授。另外, 作为 UIUC 的一员, 在与其他同事的技术交流中, 我受益匪浅, 他们是 Dick Blahut 教授、Ralf Koetter 教授、Muriel Medard 教授和 Andy Singer 教授。在我的 UCSB 同事中, 我要感谢 Ken Rose 教授, 他对第 6 章提了不少有益的意见, 我也要感谢 Mark Rodwell 教授在电子学领域与我的合作, 这使我了解了不少关于通信系统在实现中要考虑的事项。我过去的合作者 Mike Honig 教授和 Sergio Verdu 教授也对本书产生了直接影响。

感谢剑桥大学出版社的 Phil Meyler 博士, 是他督促我完成本书。同时也感谢 UIUC 的 Venu Veeravalli 教授和马里兰大学的 Prakash Narayan 教授, 他们对我提交给剑桥大学出版社的提纲提出了积极有益的反馈意见。

最后, 还要感谢我的家人, 他们使我在繁杂的工作之余得以享受家庭的乐趣。

目 录

第 1 章 绪论	1	3.9.1 高斯基础	94
1.1 数字通信系统的组成	1	3.9.2 假设检验基础	96
1.2 本书结构	3	3.9.3 AWGN 信道的接收机 设计和性能分析	97
1.3 深入阅读	3	3.9.4 链路预算分析	105
第 2 章 调制	5	3.9.5 一些数学推导	105
2.1 预备知识	5	第 4 章 同步与非相干通信	108
2.2 复基带表示	12	4.1 接收机设计需求	109
2.3 随机过程的频谱描述	21	4.2 参数估计基础	111
2.4 调制自由度	27	4.3 同步参数估计	115
2.5 线性调制	29	4.4 非相干通信	119
2.5.1 线性调制的例子	29	4.4.1 复合假设检验	119
2.5.2 线性调制信号占用的频谱	31	4.4.2 最优非相干解调	120
2.5.3 奈奎斯特准则: 带宽与 符号率的关系	33	4.4.3 差分调制和解调	121
2.5.4 以线性调制为基本模块	36	4.5 非相干通信的性能	122
2.6 正交调制和双正交调制	37	4.5.1 正则复高斯	123
2.7 差分调制	39	4.5.2 二进制非相干通信的性能	126
2.8 深入阅读	40	4.5.3 M 进制非相干正交信号的 性能	130
2.9 习题	41	4.5.4 DPSK 的性能	131
2.9.1 信号与系统	41	4.5.5 分组非相干解调	131
2.9.2 复基带表示	42	4.6 深入阅读	132
2.9.3 随机过程	44	4.7 习题	133
2.9.4 调制	45	第 5 章 信道均衡	140
第 3 章 解调	51	5.1 信道模型	140
3.1 高斯基础	52	5.2 接收机前端	141
3.2 假设检验基础	60	5.3 眼图	143
3.3 信号空间概念	64	5.4 MLSE	143
3.4 AWGN 下的最佳接收	70	5.5 次优均衡器设计的几何模型	149
3.4.1 ML 判决准则的几何结构	72	5.6 线性均衡	151
3.4.2 软判决	73	5.6.1 自适应实现	157
3.5 ML 接收的性能分析	75	5.6.2 性能分析	159
3.5.1 二进制信号的性能	75	5.7 判决反馈均衡	160
3.5.2 M 进制信号的性能	78	5.8 MLSE 的性能分析	163
3.6 比特级解调	88	5.8.1 联合界	163
3.7 链路预算分析元素	92	5.8.2 转移函数界	166
3.8 深入阅读	94	5.9 均衡技术的数值比较	169
3.9 习题	94		

5.10	深入阅读	170	7.3.4	消息传递及密度进化	246
5.11	习题	170	7.3.5	置信传播	248
第 6 章	信息论极限及其计算	178	7.3.6	高斯近似	250
6.1	AWGN 信道的容量: 建模与几何	178	7.4	带宽有效编码调制	252
6.1.1	从连续时间到离散时间	180	7.4.1	BICM	253
6.1.2	离散时间 AWGN 信道的 容量	181	7.4.2	TCM	254
6.1.3	从离散时间到连续时间	183	7.5	代数码	257
6.1.4	离散时间 AWGN 模型的 总结	184	7.6	深入阅读	259
6.2	香农理论基础	185	7.7	习题	260
6.2.1	熵、互信息和散度	186	第 8 章	无线通信	267
6.2.2	信道编码理论	190	8.1	信道建模	268
6.3	一些容量计算	191	8.2	衰落与分集	272
6.3.1	标准星座的容量	191	8.2.1	瑞利衰落的影响	272
6.3.2	并行高斯信道和注水原理	195	8.2.2	编码与交织实现分集	275
6.4	输入分布优化	197	8.2.3	接收分集技术	276
6.4.1	凸优化	198	8.3	正交频分复用	280
6.4.2	最优输入分布的表征	199	8.4	直接序列扩频技术	285
6.4.3	计算最优输入分布	200	8.4.1	Rake 接收机	287
6.5	深入阅读	202	8.4.2	扩频序列选择	290
6.6	习题	203	8.4.3	CDMA 系统传统接收 性能	292
第 7 章	信道编码	207	8.4.4	DS-CDMA 系统多用户 检测技术	293
7.1	二进制卷积码	207	8.5	跳频扩频	299
7.1.1	非递归非系统编码	208	8.6	连续相位调制	300
7.1.2	递归系统编码	209	8.6.1	GMSK	304
7.1.3	最大似然译码	210	8.6.2	劳伦特扩展与接收机设计	305
7.1.4	ML 译码性能分析	213	8.7	空时通信	309
7.1.5	量化观测的性能分析	217	8.7.1	空时信道建模	310
7.2	turbo 码及迭代译码	219	8.7.2	信息论极限	312
7.2.1	BCJR 算法: 软入/软出 译码	219	8.7.3	空间复用	315
7.2.2	对数 BCJR 算法	225	8.7.4	空时编码	315
7.2.3	源自卷积码的 turbo 结构	229	8.7.5	发射波束形成	318
7.2.4	turbo 码的 BER 性能	231	8.8	深入阅读	318
7.2.5	外部信息转移图	232	8.9	习题	319
7.2.6	turbo 码码重枚举	237	附录 A	概率、随机变量和随机过程	334
7.3	LDPC 码	241	附录 B	Chernoff 界	340
7.3.1	编码理论的一些术语	242	附录 C	詹森不等式	343
7.3.2	规则 LDPC 码	243	参考文献	345	
7.3.3	非规则 LDPC 码	245	索引	351	

第 1 章 绪 论

我们把通信定义为信息在不同时间或空间点的传输，这里所谓的信息涵盖了我们所熟悉的标准格式，如语音、音频、视频、数据文件、网页等。在空间上，两点间通信的例子包括电话交谈，从家里或办公室的计算机访问因特网，收看电视或收听广播电台。在时间上，两点间通信的例子包括访问存储设备，如磁带、CD、DVD 或硬盘。上述例子中，传输的信息直接供人们所用。然而，还有许多其他类型的通信系统，虽然我们看不见摸不着，但却构成了我们日常生活所依赖的基础设施的重要部分，例如因特网路由器间的高速包传输，集成电路的片内或片间通信，计算机和计算机外围设备（如键盘和打印机）之间的通信，以及通信网内的控制信号等。

模拟信息取值是连续的，与之相反，数字信息取值是离散的。数字通信中，传输的信息用数字形式表示，通常是二进制数字，又称为比特。目前用于传输信息的大部分通信系统要么是数字系统，要么正在进行从模拟到数字的改造。最近进行的一些直接影响人们生活的数字化改造项目包括：移动电话（从模拟 FM 到几个互相竞争的数字标准）、音频存储（从乙烯唱片到 CD）、视频存储（从录像带到 DVD）。然而，我们通常接触的是模拟形式的信息，如读书或看计算机屏幕、听谈话或音乐。那么，为什么世界会变得越来越数字化呢？在回答这个问题之前，我们先了解一下典型数字通信系统的组成。

1

1.1 数字通信系统的组成

考虑如图 1-1 所示的数字通信链路框图。先简要介绍各个模块的功能。

信源编码器 由信息论可知，任何信息都可以以任意精度有效表示为数字形式，所需的比特数由信息的逼真度要求决定。信源编码器的任务是在实际的设置下完成信息的数字化，并根据终端用户的需求减少原始信息中的冗余。例如，语音通常在电话线上以 64kbit/s 的速率传输，但在带宽严格受限的情况下，也可以将其编码为 4kbit/s 的比特流。类似地，音频编码速率也可以在一个很宽的范围内变化。例如，消费类电子产品 MP3 播放器通常采用的比特率为 128kbit/s，而高端数字音频演播室设备需要的比特率可能要比这高约 10 倍。前面讲的都是有损信源编码（编码时以可控的方式丢弃了少量信息）的例子，对数据文件进行无损压缩同样也可以显著减少传输的数据量。

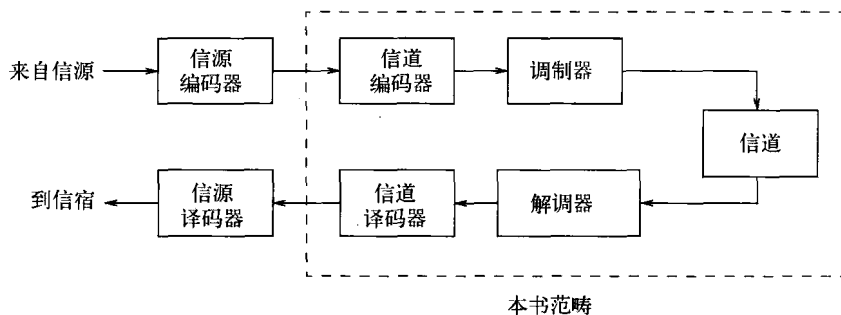


图 1-1 数字通信链路框图

信道编码器与调制器 信源编码器消除了发送信息中不必要的冗余，信道编码器则以受控的方式引入冗余信息，来纠正由于信道不理想或噪声所引起的传输错误。信道编码器的输出是信道码的码字，而信道码则是根据预期的信道特性和上一级网络层的需求而设计的。例如，有的应用对延时不敏感，信道码可能重在检错，出错后请求重传即可。反之，对于不能重传的实时应用，信道码则可能重在纠错。通常使用的信道码既有检错又有纠错功能。调制器将信道编码后的离散符号转换为模拟波形，以在物理信道上传输。以基于 802.11b 标准的无线局域网链路为例，其物理信道带宽为 20MHz，载频约为 2.4GHz。本例中，调制器以 1Mbit/s、2Mbit/s、5.5Mbit/s 或 11Mbit/s（传输速率随信道状况变化）的速率将比特流转换成适合指定的 20MHz 带宽的波形。

信道 通信信道的物理特性千差万别，良好的信道模型对于设计高效的通信系统是至关重要的。虽然接收机热噪声对大多数通信系统都有损害，但是由信道引起的发射波形的失真程度在不同设置下有显著区别。有线通信信道可以很好地建模为一个线性时不变系统，因为在链路建立阶段可以从接收机得到反馈信息，所以通常假设发射机端已知调制器工作频带的传递函数。例如，在双绞线上的高速 DSL（Digital Subscriber Line，数字用户线）系统中，利用了信道反馈选择信道增益高的频率以发送更多信息。另一方面，对于无线移动通信，由于发射机和接收机的相对运动，信道是时刻变化的，这对发射机设计和接收机设计都会造成影响。（对于发射机来说，无法得到准确的信道反馈；对于接收机来说，要么必须估计信道特性，要么必须使用不需要准确估计信道特性的设计方案。）此外，由于无线信道是一个广播媒介，必须避免由于同时传送信息所引起的多址干扰。避免多址干扰的方法有两种：一是选择恰当的资源共享机制，二是设计干扰条件下性能健壮的发信信号波形和接收机。

解调器和信道译码器 解调器处理的是发射波形失真并叠加了噪声后到达接收机的模拟波形。解调器的一个关键任务是同步：必须考虑到信道可能产生相位、频率和时间偏移的实际情况，并且发射机和接收机的时钟或晶振有可能事先没有进行同步校准。解调器的另一个任务可能是信道均衡，也就是补偿色散信道引起的 ISI（InterSymbol Interference，码间干扰）。解调器的最终目标是对传输给信道译码器的符号进行尝试性的判决。判决可能是“硬”判决（例如，解调器将某个特定比特判为 0 或 1），也可能是“软”判决（例如，解调器估计某个特定比特的概率）。信道译码器利用信道编码中的冗余信息来改善解调器输出码元序列的质量，最终目标是重构输入给信道编码器的原始信息符号序列。在传统的接收机设计中，解调器和译码器是独立工作的，然而最近的编码和通信理论研究表明，解调器和译码器之间的反复信息交换可显著提升接收机的性能。

信源译码器 信源译码器将信道译码器输出的估计信息比特转换为终端用户可用的形式。译码结果可能与信源编码器输入的原始信息相同，也可能不同。例如，原始信源编码器可能先把语音转换成文字，再编码为比特流，信源译码器可能直接将文本显示给终端用户，而不必将其恢复为原始语音。

现在我们就来解释为什么世界正在变得越来越数字化。数字通信研究为信息传输和存储介质的设计带来了如下两个主要优点。

信源独立设计 一旦用信源编码器将信息转换为比特，信息就可以不做解释而无差别地存储或传输：只要恢复比特数据，就可以将其中蕴含的信息无失真地重构回来。这意味着存储和通信媒介可以独立于信源特性，因此，多种信源可以共享同一通信媒介。不管是对于个人通信链路设计还是对于如因特网等包含诸多链路的通信网设计，信道与信源的独立性都带来了显著的规模经济效益。实际上，当信息在通信网中必须经过多个通信链路传输时，图 1-1 所示的信源编码和信源译码只在两端进行，信源编码器输出的信息比特在通信网内传输时无需解释。

信道优化设计 对于每一个通信链路，信道编码器、信道译码器、调制器和解调器都可以

根据特定的信道特性进行优化。由于在每条链路上都可以对传输的比特进行再生，所以没有“噪声积累”。

上述框架基于信源编码和信道编码的分离进行设计。分离原理带来了上述的实际好处，信息论的信源-信道分离理论还可以证明：对于点到点链路，分离原理是理论上最优的（在温和条件下）。虽然分离研究对取得推动数字通信系统发展的规模经济效应起到了关键作用，但是我们还是要顺便指出，在某些特定设置下（例如，多址信道和广播信道，或者具有延时或复杂约束的应用），信源和信道联合编码可以在理论和实际中带来更优良的性能。

图 1-1 已经给出了本书的研究范畴：调制、解调、信道编码、信道译码和信道建模。信源编码和信源译码不在本书研究内容之列。因此，这意味着我们的研究仅限于基于分离原理的通信系统。

4

1.2 本书结构

本书的目标是阐述对现代数字通信链路设计原理的理解。第 2 章介绍了调制技术（即，如何把比特转换为可在信道上传输的形式），强调了通带信号的复基带表示在发射机和接收机设计中所起的重要作用，介绍了一些常用的调制方式，讨论了特定调制方式所需带宽的计算方法。第 3 章介绍了经典的 AWGN 信道下的解调技术。（即，如何从被噪声污染的接收信号估计出发送的比特数据）。我们以假设检验理论为起点，重点阐述了解调的几何表示法（最初由 Wozencraft 和 Jacobs 的经典教科书而获得推广），此外还介绍了软判决的概念，并简要介绍了链路预算分析（系统设计者依此来确定天线增益、发射功率等参数）。熟练掌握第 2 章和第 3 章内容是学习本书其他部分的前提，余下的章节本质上都是自成体系的。第 4 章从 AWGN 中信号的似然比推导开始介绍，给出了一个估计延时和相位等参数的框架。基于此框架，推导了最优非相干接收机的设计。第 5 章阐述了信道均衡的基本原理，包括使用维特比算法的 MLSE（Maximum Likelihood Sequence Estimation，最大似然序列估计）、线性均衡、判决反馈均衡。第 6 章简要介绍了信息论，重点关注性能基准的计算。由于 turbo 类码提供了一个几乎可用于任何信道模型的逼近信息论极限的框架，因此性能基准计算对于通信系统设计者越来越重要。第 7 章介绍了纠错编码，包括卷积码、串行级联 turbo 码和并行级联 turbo 码、LDPC（Low Density Parity Check，低密度奇偶校验）码。此外还简要讨论了如何使代数码（编码理论教科书中有详细介绍）适合现代通信链路设计的问题，重点介绍了 Reed-Solomon 码。最后，第 8 章是关于无线通信的，包括信道建模、衰落影响，并介绍了一些第 2 章中没有涉及而无线信道中常用的调制方法，包括 OFDM（Orthogonal Frequency Division Multiplexing，正交频分复用）、扩谱通信、连续相位调制和空时（又称多天）通信。

5

1.3 深入阅读

如果想快速了解通信系统的诸多专题，Gibson 编著的 *The Communications Handbook*^[1] 和 *The Mobile Communications Handbook*^[2] 是个不错的选择。通信系统标准可以从 IEEE（Institute of Electrical and Electronics Engineers，电器电子工程师学会）的网站获得。最近出版的研究生层次的数字通信教科书包括 Proakis 的著作^[3]、Benedetto 和 Biglieri 的著作^[4] 以及 Barry、Lee 和 Messerschmitt 的著作^[5] 等。大学生的通信教科书包括 Haykin 的著作^[6]、Proakis 和 Salehi 的著作^[7]、Pursley 的著作^[8] 以及 Ziemer 和 Tranter 的著作^[9] 等。下面列出的是一些永不过时的经典教科书，包括：Wozencraft 和 Jacobs 的著作^[10]，这可能是第一本介绍信号空间设计技术的教科书；Viterbi 的著作^[11]，书中对解调和同步技术做了详细的性能分析；Viterbi 和 Omura 的著作^[12]，对调制和编码进行了严格的论述；Blahut 的著作^[13]，从一个极好的角度介绍了数字通信系统的基本概念。

本书不涉及信源编码。Cover 和 Thomas 的著作^[14]从信息论角度介绍了信源编码，Sayood 的著作^[15]则详细介绍了压缩算法。

最后，虽然本书介绍的是单个通信链路的设计问题，但是只有把它们连在一起，形成通信网（如因特网、有线电话网、无线蜂窝通信网），其真正价值才得以体现。Bertsekas 和 Gallager 的著作^[16]以及 Walrand 和 Varaiya 的著作^[17]等是有关通信网的两本有用的参考书。Friedman 的著作^[18]则从非技术角度做了一个有趣的讨论，介绍了通信网发展对全球经济的巨大影响。

第2章 调制

调制是指把数字信息表示为模拟波形的形式，以在物理信道上传输。在图 2-1 中，一个比特序列被转换成波形，这是调制的一个简单例子。原始信息由取值为 0 或 1 的比特组成，通过一个比特-符号映射表，将比特转换为对应的符号。本例中的比特-符号映射表只是简单地将比特 0 转换为符号+1，将比特 1 转换为符号-1。然后用这些符号乘以发射波形（本例中是一个矩形脉冲），这样就把符号映射成了模拟波形。这是线性调制（linear modulation）的一个例子，有关线性调制的内容将在 2.5 节中详细介绍。对于上述的比特-符号映射表，产生如图 2-1 所示模拟波形所用的比特流为 01100010100。

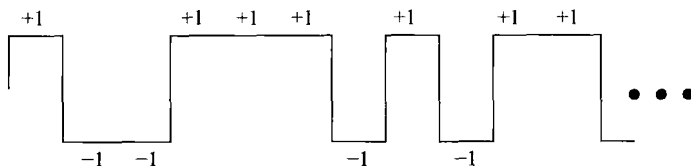


图 2-1 一个二进制调制的简单例子

虽然图 2-1 的示例中使用的是矩形时限发射波形，但在实际调制中使用的模拟波形通常是频域受限的。这种限制可能来自于通信媒介的物理特性，也可能来自如政府的频谱管制等外界因素。因此，我们一般将信道和信道上传输的信号按它们所占用的频带进行分类。本章中，我们先复习信号与系统中有关频域特性的基本概念，然后介绍一些重要的调制技术。在数字通信的介绍性教材中，一般都有对本章内容的详细论述，这里我们只是着重介绍一些特定的知识点。其中之一就是通带信号的复基带表示法，它是理解和实现现代通信系统的一个非常重要的工具。因此，即便是熟悉本章内容的读者，我还是建议你再浏览一下本章。

本章导读 2.1 节首先回顾了信号的频域表示，信号的内积以及基带信号和通带信号等基本概念。虽然电路中的电流和电压总是实数值，但是如果允许基带信号取复数值，那么我们就可以用一个统一的框架来描述基带信号和通带信号。2.2 节详细介绍了通带信号的复基带表示法，同时指出复基带信号处理是现代收发器的一个必要组成部分。前面描述的模型都是基于能量有限的确定信号的，而数字通信中的信号和噪声模型主要是基于功率有限的随机过程的。因此，在 2.3 节讨论了随机过程的频域描述，这将为学习本章调制这个主题补充所需的背景知识。2.4 节简要讨论了调制可用的自由度，并介绍了带宽效率的概念。2.5 节阐述了使用二维星座图的线性调制，在理论上，这种方法可利用带限信道所有可用的自由度。本节还讨论了用于避免 ISI 的奈奎斯特准则，该准则建立了带宽与比特率之间的联系。2.6 节讨论了正交调制和双正交调制，它们都是为提高功率效率而进行了优化的非线性调制方式。最后，2.7 节讨论了一种对抗相位不确定性的方法——差分调制，并以此结束了本章对调制的介绍。此外，第 8 章在介绍无线通信中常用的调制技术时，也讨论了几种其他的调制方式。

2.1 预备知识

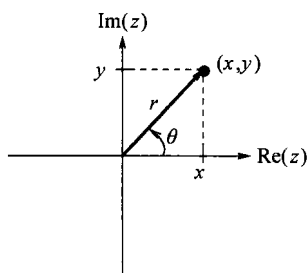
本节涵盖了学习本书所必需的一些信号与系统方面的基础知识，包括内积、信号的范数与能量、卷积、傅里叶变换、基带信号和通带信号等概念的定义。

8

复数 复数 z 可以写成 $z = x + jy$ 的形式, 其中 x 和 y 都是实数, $j = \sqrt{-1}$ 。称 $x = \text{Re}(z)$ 为 z 的实部, $y = \text{Im}(z)$ 为 z 的虚部。为了表述方便, 常把复数 z 看做一个二维实矢量, 如图 2-2 所示, z 的直角坐标形式为 $(x, y) = (\text{Re}(z), \text{Im}(z))$, 极坐标形式为

$$r = |z| = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$\theta = \arg(z) = \tan^{-1} \frac{y}{x}$$

图 2-2 复数 z 在二维实平面内的表示

欧拉恒等式 利用欧拉恒等式将复指数分解为如下实值正弦曲线的形式:

$$e^{j\theta} = \cos \theta + j \sin \theta \quad (2-1)$$

信号间的相对几何关系是通信理论的重要基础之一, 它由信号与信号的内积决定。仿照有限维矢量空间中矢量内积的定义, 我们可以定义连续时间信号的内积。

内积 两个 $m \times 1$ 维复矢量 $s = (s[1], \dots, s[m])^T$ 和 $r = (r[1], \dots, r[m])^T$ 的内积为

$$\langle s, r \rangle = \sum_{i=1}^m s[i] r^*[i] = r^H s \quad (2-2)$$

类似地, 定义两个信号 (可能为复数值) $s(t)$ 和 $r(t)$ 的内积如下:

$$\langle s, r \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) r^*(t) dt \quad (2-3)$$

内积运算满足下面的线性性质:

$$\langle a_1 s_1 + a_2 s_2, r \rangle = a_1 \langle s_1, r \rangle + a_2 \langle s_2, r \rangle$$

$$\langle s, a_1 r_1 + a_2 r_2 \rangle = a_1^* \langle s, r_1 \rangle + a_2^* \langle s, r_2 \rangle$$

其中 a_1, a_2 是复值常量, s, s_1, s_2, r, r_1, r_2 是信号 (或矢量)。需要注意的是, 在计算复信号的内积时, 如果将内积第二项中的常量提取出来, 则应该替换为它的复共轭。

9

能量和范数 信号 s 的能量 E_s 定义为它与自身的内积:

$$E_s = \|s\|^2 = \langle s, s \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} |s(t)|^2 dt \quad (2-4)$$

其中 $\|s\|$ 表示 s 的范数 (norm)。如果 s 的能量为 0, 则 s 必然是几乎处处为零 (例如, 不论间隔长短, 间断处 $s(t)$ 必为零)。对于连续时间信号, 我们认为这等价于处处为零。在此条件下, $\|s\| = 0$ 意味着 s 等于零, 这是有限维矢量空间范数的一个性质。

柯西-施瓦茨不等式 内积运算满足下面的柯西-施瓦茨不等式:

$$|\langle s, r \rangle| \leq \|s\| \|r\| \quad (2-5)$$

当且仅当存在复数常量 a , 使得 $s(t) = ar(t)$ 或 $r(t) = as(t)$ 几乎处处成立时, 上式取等号。也就是

说, 当且仅当两个信号成比例时, 上式才能取等号。习题 2.4 给出了该不等式的证明。

卷积 两个信号 s 和 r 的卷积为

$$q(t) = (s * r)(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s(u)r(t-u)du$$

这里, 卷积是 t 的函数, u 只是一个临时变量。有时为了简便起见, 常用 $q(t) = s(t) * r(t)$ 表示 s 和 r 的卷积。例如, 这就使我们可以把下面的 LTI (Linear Time Invariance, 线性时不变) 性质写成紧凑的形式:

$$(a_1 s_1(t-t_1) + a_2 s_2(t-t_2)) * r(t) = a_1 (s_1 * r)(t-t_1) + a_2 (s_2 * r)(t-t_2)$$

上式对任意的复增益 a_1 、 a_2 和延时 t_1 、 t_2 成立。

delta 函数 delta 函数 $\delta(t)$ 通过下面的“筛选”性质定义: 对于任意能量有限信号 $s(t)$, 有

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t-t_0)s(t)dt = s(t_0) \quad (2-6)$$

而且, 这意味着信号与 delta 函数的时移的卷积等于信号的时移:

$$\delta(t-t_0) * s(t) = s(t-t_0) \quad (2-7)$$

式(2-6)表明 $\delta(0) = \infty$, 且对于所有不为零的 t , 恒有 $\delta(t) = 0$ 。因此, delta 函数只是为了表达方便而抽象出来的一个信号, 在物理上它是不可实现的。

从下面的几个例子中可以看出, 卷积在通信系统建模和收发器实现中都起着非常重要的作用。

例 2.1.1 (多径信道建模) 发射机和接收机之间的信道常被建模为一个 LTI 系统, 接收信号 y 由下式给出

$$y(t) = (s * h)(t) + n(t)$$

其中 s 是发射波形, h 是信道的冲激响应, $n(t)$ 是接收机热噪声和干扰。假设信道冲激响应为

$$h(t) = \sum_{i=1}^M a_i \delta(t-t_i)$$

忽略噪声的影响, 信号 $s(t)$ 通过信道后的输出为

$$y(t) = (s * h)(t) = \sum_{i=1}^M a_i s(t-t_i)$$

这可能对应一个无线多径 (multipath) 信道, 发射信号被一群散射体反射后产生多个具有不同延时和增益的信号副本, 如图 2-3 所示。一般情况下, 利用电波传播研究结果就可以得到一个多径成分数量为 M , 延时为 $\{t_i\}$, 增益为 $\{a_i\}$ 的统计模型。

例 2.1.2 (匹配滤波器) 对于一个复值信号 $s(t)$, 将冲激响应为 $s_{MF}(t) = s^*(-t)$ 的滤波器定义为它的匹配滤波器。图 2-4 是一个匹配滤波器的例子。注意 $S_{MF}(f) = S^*(f)$, 如果匹配滤波器的输入为 $x(t)$, 则输出为

$$y(t) = (x * s_{MF})(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(u)s_{MF}(t-u)du = \int_{-\infty}^{\infty} x(u)s^*(u-t)du \quad (2-8)$$

因此, 匹配滤波器计算输入 x 与波形 s 的所有可能时移的内积, 这一过程可以看做是“模板匹配”。并且, 内积 $\langle x, s \rangle$ 等于匹配滤波器在 0 时刻的输出。习题 2.5 中介绍了匹配滤波器的一些性质。例如, 如果 $x(t) = s(t-t_0)$ (即, 输入是 s 的时移), 那么如习题 2.5 所示, 匹配滤波器的输出在 $t = t_0$ 时取最大值。显然, 匹配滤波器是很有用的, 例如可以使用“峰值检测”进行延时估计。在后续章节中, 将系统地介绍匹配滤波器在数字通信接收机中的关键作用。