

PEARSON

通信系统原理

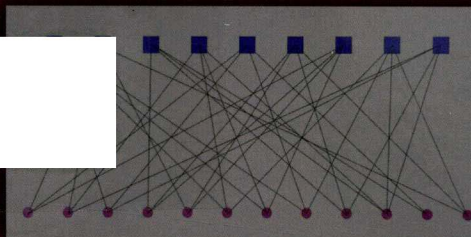
(原书第2版)

[美] 约翰 G. 普罗克斯 (John G. Proakis) 著
马苏德·萨莱希 (Masoud Salehi)

郭宇春 张立军 李磊 译

*Fundamentals of
Communication
Systems
Second Edition*

*Fundamentals of
Communication
Systems* SECOND EDITION



JOHN G. PROAKIS · MASOUD SALEHI



机械工业出版社
China Machine Press

通信系统原理

(原书第2版)

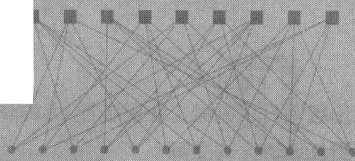
[美] 约翰 G. 普罗克斯 (John G. Proakis) 著
马苏德·萨莱希 (Masoud Salehi)

郭宇春 张立军 李磊 译



*Fundamentals of
Communication
Systems
Second Edition*

*Fundamentals of
Communication
Systems* SECOND EDITION



JOHN G. PROAKIS · MASOUD SALEHI



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目 (CIP) 数据

通信系统原理 (原书第 2 版) / (美) 普罗克斯 (Proakis, J. G.), (美) 萨莱希 (Salehi, M.) 著; 郭宇春, 张立军, 李磊译. —北京: 机械工业出版社, 2015.6

(国外电子与电气工程技术丛书)

书名原文: Fundamentals of Communication Systems, Second Edition

ISBN 978-7-111-50519-8

I. 通… II. ①普… ②萨… ③郭… ④张… ⑤李… III. 通信系统 IV. TN914

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 131627 号

本书版权登记号: 图字: 01-2013-7576

Authorized translation from the English language edition, entitled *Fundamentals of Communication Systems*, 2E, 9780133354850 by John G. Proakis and Masoud Salehi, published by Pearson Education, Inc., Copyright © 2014, 2005.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from Pearson Education, Inc.

Chinese simplified language edition published by Pearson Education Asia Ltd., and China Machine Press Copyright © 2016.

本书中文简体字版由 Pearson Education (培生教育出版集团) 授权机械工业出版社在中华人民共和国境内 (不包括中国台湾地区和香港、澳门特别行政区) 独家出版发行。未经出版者书面许可, 不得以任何方式抄袭、复制或节录本书中的任何部分。

本书封底贴有 Pearson Education (培生教育出版集团) 激光防伪标签, 无标签者不得销售。

本书以数字通信系统为重点讨论了通信系统分析与设计的基本原理, 同时对模拟通信系统和相关数学基础给出了系统的介绍。主要内容包括: 线性系统分析、概率论及随机过程、幅度调制与角度调制两类模拟通信系统及其噪声性能分析、模数转换、AWGN 信道中的数字调制、多维数字调制、限带信道中的数字传输、多载波通信与 OFDM 系统、信息论、纠错编码、衰落多径信道中的数据传输及扩频通信系统。全书提供了许多例题以突出所述理论的工程应用, 各章还配有大量难度不等的习题以及上机习题, 帮助读者检验并巩固所学内容。

本书可作为通信工程、电子工程及相关专业的本科生或研究生教材, 也可以为工程技术人员分析与设计通信系统提供参考。

出版发行: 机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码: 100037)

责任编辑: 刘立卿

责任校对: 董纪丽

印刷: 北京瑞德印刷有限公司

版次: 2016 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

开本: 185mm × 260mm 1/16

印张: 33.5

书号: ISBN 978-7-111-50519-8

定价: 129.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 88378991 88361066

投稿热线: (010) 88379604

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱: hzjsj@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光 / 邹晓东

出版者的话

文艺复兴以来，源远流长的科学精神和逐步形成的学术规范，使西方国家在自然科学的各个领域取得了垄断性的优势；也正是这样的优势，使美国在信息技术发展的六十多年间名家辈出、独领风骚。在商业化的进程中，美国的产业界与教育界越来越紧密地结合，信息学科中的许多泰山北斗同时身处科研和教学的最前线，由此而产生的经典科学著作，不仅擘划了研究的范畴，还揭示了学术的源变，既遵循学术规范，又自有学者个性，其价值并不会因年月的流逝而减退。

近年，在全球信息化大潮的推动下，我国的信息产业发展迅猛，对专业人才的需求日益迫切。这对我国教育界和出版界都既是机遇，也是挑战；而专业教材的建设在教育战略上显得举足轻重。在我国信息技术发展时间较短的现状下，美国等发达国家在其信息科学发展的几十年间积淀和发展的经典教材仍有许多值得借鉴之处。因此，引进一批国外优秀教材将对我国教育事业的发展起到积极的推动作用，也是与世界接轨、建设真正的世界一流大学的必由之路。

机械工业出版社华章公司较早意识到“出版要为教育服务”。自1998年开始，我们就将工作重点放在了遴选、移译国外优秀教材上。经过多年的不懈努力，我们与 Pearson、McGraw-Hill、Elsevier、John Wiley & Sons、CRC、Springer 等世界著名出版公司建立了良好的合作关系，从他们现有的数百种教材中甄选出 Thomas L. Floyd、Charles K. Alexander、Behzad Razavi、John G. Proakis、Stephen Brown、Allan R. Hambley、Albert Malvino、Mark I. Montrose、David A. Johns、Peter Wilson、H. Vincent Poor、Dikshitulu K. Kalluri、Bhag Singh Guru、Stephane Mallat 等大师名家的经典教材，以“国外电子与电气工程技术丛书”为总称出版，供读者学习、研究及珍藏。这些书籍在读者中树立了良好的口碑，并被许多高校采用为正式教材和参考书籍。其影印版“经典原版书库”作为姊妹篇也越来越多被实施双语教学的学校所采用。

权威的作者、经典的教材、一流的译者、严格的审校、精细的编辑，这些因素使我们的图书有了质量的保证。随着电气与电子信息学科建设的不断完善和教材改革的逐渐深化，教育界对国外电气与电子信息教材的需求和应用都将步入一个新的阶段，我们的目标是尽善尽美，而反馈的意见正是我们达到这一终极目标的重要帮助。华章公司欢迎老师和读者对我们的工作提出建议或给予指正，我们的联系方式如下：

华章网站：www.hzbook.com

电子邮件：hzsj@hzbook.com

联系电话：(010) 88379604

联系地址：北京市西城区百万庄南街1号

邮政编码：100037



华章科技图书出版中心

译者序

本书是通信系统原理的经典教材之一，是作者多年教学与研究工作的结晶。全书内容系统全面，概念清晰，分析严谨，基础性与先进性并重，知识点组织条理清晰。

本书以数字通信系统为重点讨论了通信系统分析与设计的基本原理，同时也对模拟通信系统和相关数学基础给出了系统的介绍，保证了知识架构的完整性和系统性。本书首先对课程所需要的数学背景知识给出了详细介绍，其中第2章是线性系统分析，重点是频域分析方法和傅里叶方法。第5章讨论概率、随机变量和随机过程，保证了内容的系统性，也便于读者自学。第3、4、6章对传统的模拟通信系统的幅度调制、角度调制和模拟通信系统噪声性能分析方法分别进行了介绍，保证了内容的基础性，便于读者对系统理论的理解。第7~15章重点介绍作为现代通信系统主要内容的数字通信系统，保证了内容的先进性。具体包括模数转换（第7章）、AWGN信道中的数字调制方法（第8章）、多维数字调制（第9章）、限带AWGN信道中的数字传输（第10章）、多载波调制与OFDM系统（第11章）、信息论概述（第12章）、可靠通信的编码（第13章）、衰落多径信道中的数据传输（第14章）及扩频通信系统（第15章）。

本书各章包含大量的实例，用以阐述由理论发展而来的技术在实际中的应用。每章还有大量不同难度的习题与计算机仿真习题，便于读者理解和拓展教材的理论内容。

相比第1版，第2版对内容进行了大量更新和大幅度的结构调整，主要包括：基于信号的几何表示对数字调制技术的内容进行了重新组织，增加了载波相位估计和符号同步、多载波调制与OFDM系统、射频频道的多天线（MIMO）系统、Turbo码的迭代译码和LDPC码以及扩频信号与系统。这些更新加强了本书内容的系统性、先进性和知识点组织的严谨性。

我们很高兴承担了此书的翻译工作。本书第1章及第8~11章由郭宇春翻译，第2~6章由李磊翻译，第7章及第12~15章由张立军翻译。

本书适合作为高年级本科生或一年级研究生学习模拟与数字通信系统原理的教材（建议开设1或2学期的课程），同时也适合电子工程师解决数字通信系统设计中的各种基础问题时参考。

译者

2014年9月

前 言

本书主要是为电气工程专业本科生编写的通信系统原理教材。主要目标是介绍现代通信系统中采用的基本技术，提供系统设计和分析需要的基础工具与方法。本书同时也可作为工程技术人员提供参考，或作为自学材料。

本书的重点是数字通信系统，这些内容具体在第7~15章介绍。现代通信系统，包括新一代无线通信系统、卫星通信系统及数据传输网络，其主干就是这些数字通信系统。第3、4、6章对传统的模拟通信系统进行了适当的介绍。此外，本书以两章的篇幅对课程所需要的背景知识给出了详细介绍，第2章是关于线性系统分析的，重点是频域分析方法和傅里叶方法；第5章讨论概率、随机变量和随机过程。虽然现在这些内容会分别在电气工程专业的不同主干课程中讨论，但作者的经验是学生在在学习通信系统原理之前，往往需要复习这些知识，因此在此对这些相关课程中的背景知识进行简要回顾很重要。学生学习这门课还需要具备微积分、线性代数和电子电路基础的背景知识。

新版更新内容

下面是本书第2版的主要更新内容：

- 基于信号的几何表示对数字调制技术的内容进行了大幅度的重新组织。
- 增加了对载波相位估计和符号同步的讨论。
- 增加了第7章“多载波调制与OFDM”。
- 增加并扩展了Turbo码的迭代译码及LDPC码的内容。
- 增加了14.4节“多天线系统”。
- 增加了第15章“扩频通信系统”。

本书的结构安排

本书第1章首先给出通信系统的简要概述，第2章接着描述时域及频域的信号表示和系统分析方法，重点是信号的傅里叶级数和傅里叶变换表示，以及线性系统分析中变换的运用。

第3章和第4章介绍模拟信号的调制与解调。第3章讨论幅度调制(AM)。第4章讨论频率调制(FM)和相位调制(PM)。这两章也讨论AM和FM无线电广播。

第5章讨论概率和随机过程的基本定义和概念。重点分析可以对加性噪声分布数学建模的高斯随机过程，并且讨论时域及频域的随机信号表示。

第6章分析调幅、调角(调频和调相)模拟信号解调过程中加性噪声的影响，根据信噪比性能对比这些模拟信号调制技术。并且给出模拟通信系统中热噪声的特征和传输损耗的影响。

第7章介绍模拟数字转换。首先介绍抽样定理和量化技术，接着讨论包括PCM、DPCM和DM在内的波形编码技术。这一章最后简要讨论LPC语音编码技术和JPEG图像压缩标准。

第8章介绍基本数字调制技术及其在AWGN信道中的性能。讨论二进制对极和正交信号、 M 进制脉冲幅度调制(PAM)、相移键控(PSK)和正交幅度调制(QAM)技术。这些类型的数字信号都可以用几何表示方法描述。这些技术的最佳解调方法基于最大后验准则和最大似然准则。此外，还描述利用锁相环(PLL)进行载波相位估计的方法和符号同步方法。

第9章基于信号的几何表示讨论多维数字调制信号,以及这些信号在 AWGN 信道中的传输性能。考虑的信号类型包括正交信号、双正交信号、单纯形信号、二进制编码信号和频移键控 (FSK) 信号。对连续相位 FSK (CPFSK) 信号及其频谱特征也进行讨论。

第10章讨论限带 AWGN 信道中的数字信号传输。说明信道失真对传输信号的影响导致了符号间干扰 (ISI) 现象。接着描述消除或抑制符号间干扰的信号设计技术。最后讨论在信道失真的接收信号中消除或抑制 ISI 的自适应均衡器的设计方法。

第11章主要讨论多载波调制和正交频分复用 (OFDM) 的数字信号传输。给出了基于 FFT 算法的 OFDM 调制器和解调器的实现。此外还讨论 OFDM 信号的频域特征和 OFDM 信号中峰均功率比 (PAR) 的降低方法。最后给出 OFDM 在当前数字通信系统中的几个应用。

第12章给出信息通信的基本限制,包括无记忆源的信息量、信源输出的有效编码和 AWGN 信道容量。描述两种常用的数字信源输出编码技术,即霍夫曼 (Huffman) 编码算法和 Lempel-Ziv 算法。

第13章讨论信道编码和译码。描述在 AWGN 信道中增强数字通信系统性能的线性分组码和卷积码。讨论分组码和卷积码的硬判决和软判决译码。也讨论限带信道的编码 (栅格编码调制)、Turbo 码、低密度奇偶校验码 (LDPC)。

第14章讨论无线物理信道的特征和时变衰落多径信道数学模型的构建。确定瑞利 (Rayleigh) 衰落信道中的二进制调制性能,分析信号多样性对抗信号衰落的优势。描述 RAKE 解调器及其在频率选择性信道中的性能。介绍在无线通信系统中获得信号多样性的多发送及多接收天线的作用。介绍数字信号到多天线传输的映射方法,包括分组编码技术,例如 Alamouti 码和网格 (trellis) 码。最后讨论无线信道链路预算分析。

本书最后一章介绍扩频数字通信技术及其在抗干扰方面的应用,包括有意识 (扰码) 和无意识两类,后者来自信道的其他用户。具体介绍直接序列 (DS) 扩频和跳频 (FH) 技术及其在有干扰环境下的性能。另外还讨论实现传输信号扩频的伪随机序列的产生方法。最后描述在第 2、3 和 4 代 (2G、3G、4G) 数字蜂窝系统中扩频技术的应用。

本书贯穿很多实例,用以阐述根据理论所发展出来的技术在实际中的应用。在每章后面有大量难度各异的习题以及上机习题,上机习题通常使用 MATLAB 仿真实现利用该章知识的相关算法。MATLAB 习题的答案在 www.pearsonhighered.com 网站提供。

致谢

我们希望感谢本书第1版和第2版的审阅者 (密歇根州立大学的 Selin Aviyente, 得克萨斯农工大学的 Costas Georghiades, 马萨诸塞大学的 Dennis Goeckel, 维拉诺瓦大学的 Bijan Mobasseri, 圣何塞州立大学的 Robert Morelos-Zaragoza, 弗吉尼亚理工学院的 Ahmad Safaai-Jazi, 中佛罗里达大学的 Lei Wei, 以及弗吉尼亚大学的 Stephen Wilson), 感谢他们的评价和建议。他们的意见对本书各部分内容的提高有重要帮助。

John G. Proakis

加州大学圣地亚哥分校兼职教授, 美国东北大学荣誉教授

Masoud Salehi

美国东北大学

出版者的话	
译者序	
前言	
第 1 章 引言	1
1.1 历史回顾	1
1.2 电气通信系统的组成	3
1.3 通信信道及其特征	7
1.4 通信信道的数学模型	11
1.5 小结及深入阅读	12
第 2 章 信号与线性系统	13
2.1 基本概念	13
2.2 傅里叶级数	25
2.3 傅里叶变换	34
2.4 滤波器设计	48
2.5 功率和能量	51
2.6 希尔伯特变换及其性质	55
2.7 低通和带通信号	56
2.8 小结及深入阅读	58
习题	58
上机习题	63
第 3 章 幅度调制	65
3.1 调制简介	65
3.2 幅度调制	66
3.3 幅度调制器和解调器的实现	77
3.4 信号多路复用	80
3.5 调幅无线电广播	82
3.6 小结及深入阅读	83
附录 3A: SSB 调幅信号表达式 的推导	83
习题	84
上机习题	88
第 4 章 角度调制	90
4.1 FM 信号和 PM 信号的 表示形式	90
4.2 调角信号的频谱特征	92
4.3 角度调制器和解调器的实现	96
4.4 调频无线电广播	101
4.5 小结及深入阅读	102
习题	102
上机习题	105
第 5 章 概率论与随机过程	106
5.1 概率与随机变量回顾	106
5.2 随机过程的基本概念	118
5.3 高斯过程和白过程	128
5.4 小结及深入阅读	134
习题	134
上机习题	139
第 6 章 模拟通信系统中噪声 的影响	142
6.1 噪声对幅度调制系统的影响	142
6.2 噪声对角度调制系统的影响	147
6.3 模拟调制系统的比较	156
6.4 模拟通信系统中传输损耗和 噪声的影响	157
6.5 小结及深入阅读	162
习题	162
上机习题	164
第 7 章 模数转换	166
7.1 信号抽样和由抽样重构信号	166
7.2 量化	169
7.3 编码	175
7.4 波形编码	176
7.5 分析-合成技术	182
7.6 数字音频传输及记录	184
7.7 JPEG 图像编码标准	188
7.8 小结及深入阅读	190
习题	191
上机习题	195

第 8 章 加性高斯白噪声信道中的数字调制方法	196	第 11 章 多载波调制与 OFDM	353
8.1 信号波形的几何表示	196	11.1 正交频分复用	353
8.2 二进制调制方式	199	11.2 OFDM 系统中的调制与解调	353
8.3 AWGN 下的二进制调制信号的最佳接收机	204	11.3 采用 FFT 算法实现 OFDM 系统	355
8.4 M 进制数字调制	218	11.4 OFDM 信号的频谱特性	358
8.5 M 进制脉冲幅度调制	226	11.5 OFDM 系统的峰均功率比	359
8.6 相移键控	231	11.6 OFDM 系统的应用	360
8.7 正交幅度调制数字信号	239	11.7 小结及深入阅读	362
8.8 载波相位估计	245	习题	363
8.9 符号同步	255	上机习题	364
8.10 再生中继器	262	第 12 章 信息论概述	365
8.11 小结及深入阅读	262	12.1 信源的数学建模	365
习题	263	12.2 信源编码定理	372
上机习题	269	12.3 信源编码算法	373
第 9 章 多维数字调制	274	12.4 通信信道建模	378
9.1 M 进制正交信号	274	12.5 信道容量	379
9.2 双正交信号	278	12.6 通信的容限	383
9.3 单纯形信号	281	12.7 小结及深入阅读	385
9.4 二进制编码信号	282	习题	385
9.5 频移键控	284	上机习题	390
9.6 有记忆的调制系统	291	第 13 章 可靠通信的编码	392
9.7 调制方法比较	299	13.1 编码的优点	392
9.8 小结及深入阅读	302	13.2 线性分组码	395
习题	303	13.3 卷积码	405
上机习题	305	13.4 基于组合码的优良编码	413
第 10 章 限带 AWGN 信道中的数字传输	308	13.5 Turbo 码及迭代译码	415
10.1 限带信道的特征与信号失真	308	13.6 低密度奇偶校验码	422
10.2 数字调制信号的功率谱	313	13.7 带宽受限信道的编码	426
10.3 限带信道的信号设计	315	13.8 编码的应用实例	432
10.4 部分响应信号的检测	322	13.9 小结及深入阅读	434
10.5 存在信道失真的系统设计	329	习题	435
10.6 小结及深入阅读	343	上机习题	437
附录 10A: 调制信号的功率谱	344	第 14 章 衰落多径信道中的数据	438
习题	345	14.1 无线信道的物理特性	438
上机习题	350	14.2 时变多径信道模型	439

14.3	瑞利衰落信道的二进制 调制性能	445	15.3	直接序列扩频信号的应用	474
14.4	多天线系统	452	15.4	PN 序列的生成	477
14.5	无线信道的链路预算分析	461	15.5	跳频扩频	479
14.6	小结及深入阅读	463	15.6	扩频系统的同步	482
	习题	464	15.7	数字蜂窝通信系统	487
	上机习题	466	15.8	小结及深入阅读	493
第 15 章	扩频通信系统	468		习题	494
15.1	扩频数字通信系统模型	468		上机习题	496
15.2	直接序列扩频系统	469	参考文献		498
			索引		506

第 1 章 引 言

我们在每天的生活中和工作中，都在使用和接触各种现代通信系统和通信媒介，最常用的是电话、广播和电视。通过这些媒介，我们几乎能够即时地与世界各地的人们通信，处理日常商务，获取世界各地各种事态进展和值得关注事件的信息。电子邮件和传真使我们能够快速完成远距离的文字消息传递。

你能否想象没有电话、广播和电视的世界？然而，当你思考这个问题的时候，大多数的现代通信系统都是在 20 世纪发明的。我们在此简要回顾一下过去 200 年在现代通信系统技术发展史上占有重要位置的主要技术。

1.1 历史回顾

电报与电话。通信最早的重要发明之一是亚力山德罗·伏特(Alessandro Volta)在 1799 年发明的电池。这项发明使塞缪尔·莫尔斯(Samuel Morse)在 1837 年发明电报(telegraph)成为可能。第一条电报线连接了华盛顿(Washington)与巴尔的摩(Baltimore)，于 1844 年 5 月投入运营。莫尔斯设计了如表 1-1 所示的变长二进制码，其中英文字母表中的每个字母采用一串点(“·”)和画(“—”)的组合(码字)表示。在这个码中，频繁出现的字母用短码表示，不经常出现的字母用较长的码字表示。

表 1-1 莫尔斯码

A .—	N —·	
B —···	O ———	
C —·—·	P ·—·—·	
D —···	Q ———·—	1 ·————
E ·	R ·—·	2 ..———
F ..—·	S ...	3 ...——
G ———·	T —	4—
H	U ..—	5
I ..	V ...—	6 —.....
J .———	W .——	7 ———·
K —·—	X —··—	8 ———·
L ·—··	Y —·—·—	9 ———·
M ——	Z —···	0 ————

a) 字母

b) 数字

句号 (.)	·—·—·—	等待符 (AS)	·—·—·
逗号 (,)	——·—·—	双划线(破折号)	——·—·—
问号 (?)	··—·—·	错误符号	·····
引号 (")	·—·—·	斜线 (/)	——·—·
冒号 (:)	——·—·	消息结束 (AR)	·—·—·
分号 (;)	——·—·	传输结束 (SK)	··—·—·
括号 ()	——·—·		

c) 标点符号及特殊字符

莫尔斯码(Morse code)是变长信源编码方法的先驱,这种编码方法将在第12章介绍。值得注意的是,莫尔斯发明的最早的电子通信形式——电报,是一种二进制的数字通信系统,在此系统中采用两种符号将英文字母有效地编码成可变长码字。

将近40年后,1875年埃米尔·博多(Emile Baudot)设计了一种定长的二进制编码,每个码字的长度为5。在博多码(Baudot code)中,二进制码元长度相等,并且采用传号和空号表示。

电报通信中的一个重要的里程碑是1858年美国 and 欧洲之间首条跨大西洋电缆的敷设。这条电缆在运营4周后失效。几年后敷设了第二条电缆,并于1866年7月投入运营。

随着19世纪70年代电话的发明,电话学(telephony)出现了。亚历山大·格拉汉姆·贝尔(Alexander Graham Bell)在1876年申请了电话发明专利,于1877年成立了贝尔电话公司。早期的电话系统相对简单,只能在几百英里内提供服务。二十世纪的前二十年,炭精送话器和感应线圈的发明使得电话服务的质量和范围有了巨大飞跃。

1906年,李·德富雷斯特(Lee DeForst)发明了三极管放大器,使得电话通信系统中的引入信号放大成为可能,从而使电话信号的传输范围明显扩大。例如,1915年,横跨美国大陆的长途电话开始运营。

两次世界大战和20世纪30年代的经济大萧条阻碍了跨大西洋电话业务的开展。直到1953年第一条跨大西洋电缆敷设后,美国与欧洲之间的越洋电话才投入应用。

自动交换系统的出现是电话学的另一个重要进展。1897年史瑞乔(Strowger)设计实现的第一个自动交换机是一种机电式步进制交换机,这种交换机使用了几十年。随着晶体管的发明,电子(数字)交换技术的成本大大下降。贝尔电话公司经过几年的开发研制,于1960年6月研发第一台数字交换机,并在伊利诺伊投入使用。

在过去的50年,电话通信技术有很多重要进展。光缆迅速取代电话通信中使用的铜线,电子交换机也取代了机电式交换机。

无线通信。无线通信的发展需要从奥斯特(Oersted)、法拉第(Faraday)、高斯(Gauss)、麦克斯韦(Maxwell)以及赫兹(Hertz)的工作说起。1820年,奥斯特证明了电流产生磁场。1831年8月29日,迈克尔·法拉第(Michael Faraday)演示了在一个导体附近移动一个磁体可以产生感应电流,后来,他进一步证明了变化的磁场产生电场。以这些早期工作为背景,麦克斯韦在1864年预言了电磁辐射的存在,并且建立了相关的基础理论,这一理论已被运用了一个多世纪。1887年赫兹验证了麦克斯韦的理论。

1894年,奥利弗·洛奇(Oliver Lodge)为了能在英国牛津演示150码距离范围的无线通信,发明了一种能够灵敏地检测出无线信号的器件,洛奇称之为检波器(coherer)。古列尔莫·马可尼(Guglielmo Marconi)被视为无线电波的发明者。1895年,马可尼演示了2公里距离的无线信号传输。两年后,他申请了无线电波系统的专利,并且建立了无线电报与信号公司。1901年12月12日,马可尼在纽芬兰(Newfoundland)的信号山(Signal Hill)收到了从1700英里之外的英国康威尔(Cornwall)市发来的无线信号。

真空管的发明对无线通信系统的发展有着特别重要的作用。1904年弗莱明(Fleming)发明了真空二极管放大器,1906年德富雷斯特发明了真空三极管放大器。在20世纪早期,三极管的发明使得无线广播成为可能。1920年,匹兹堡(Pittsburgh)的KDKA无线广播电台提供AM(调幅, amplitude modulation)无线广播服务。从此,AM广播在美国和世界范围迅速普及。我们今天所熟知的超外差调幅无线接收机(superheterodyne AM radio receiver)是埃德温·阿姆斯特朗(Edwin Armstrong)在第一次世界大战期间发明的。无线通信另一个重要进展是同样由阿姆斯特朗发明的FM(frequency modulation, 调频)技术。1933年,阿姆斯特朗建立并展示了第一个FM通信系统。不过FM的应用相比AM的广

播的发展慢得多,直到二次世界大战后期才得到重视和商用。

1929年,美国的佐利金(V. K. Zworykin)建立并演示了第一个电视系统。1936年英国广播公司(BBC)在伦敦开始了商用电视广播。五年后,联邦通信委员会(FCC)批准了美国电视广播运营。

过去60年。过去60年通信服务取得了显著发展。重大成就包括沃尔特·布拉顿(Walter Brattain),约翰·巴丁(John Bardeen),和威廉姆肖克利(William Shockley)1947年发明的晶体管;杰克·基尔比(Jack Kilby)和罗伯特·诺伊斯(Robert Noyce)1958年发明的集成电路;汤斯(Townes)和肖洛(Schawlow)1958年发明的激光。这些发明使得需要的小尺寸、低功率、轻量且高速的电子电路的开发成为可能。这些电路后来被广泛用于卫星通信系统、宽带微波无线系统、蜂窝通信系统以及利用光缆的光波通信系统中。1962年发射了一颗名为Telstar I的卫星,专用于在欧洲与美国之间进行电视信号的中继传输。1965年,随着一颗名为Early Bird卫星的发射,商用卫星通信服务开展起来。

目前,大多数的有线通信系统都被光缆所取代,能够提供极高的带宽,传输包括声音、数据和视频在内的多种信息源的信号。蜂窝无线通信系统可以为乘坐轿车、公交车或者火车的人提供电话服务。高速通信网络可以将世界范围内的计算机及各种外围设备联系起来。

今天,我们见证了包括语音、数据和视频传输等个人通信服务的开展,卫星和光纤网络也可以提供高速全球范围的通信服务,现代通信时代的曙光已经到来!

在过去一个世纪中,关于无线电和电信发展的文献很多,我们主要引用了McMahon所著的《The Making of a Profession—A Century of Electrical Engineering In America》(IEEE Press, 1984),Ryder和Fink的著作《Engineers and Electronics》(IEEE Press, 1984),以及S. Millman主编的《A History of Engineering and Science in the Bell System—Communication Sciences(1925—1980)》(AT&T Bell Laboratories, 1984)。

1.2 电气通信系统的组成

电气通信系统的作用,是将信源产生的消息或信息发送到一个或多个目的地。一般来讲,一个通信系统可以表示成图1-1所示的功能框图。信源产生的信息可以是声音(语音源)、图像(图像源)或者某种语言的文本,比如,英语、日语、德语或者法语。任一产生信息的信源,都有一个本质特征,即它的输出是以概率来描述的。也就是说,信源是不确定的,否则就没有传输这个消息的必要性。

变换器通常是将信源的输出转换成为一种电信号,以便进行传输。例如,话筒作为变换器,可以将声波形式的话音信号转换成电信号,摄像机则可以将图像转换为电信号。在信宿方需要一个相似的变换器,将电信号还原为适合用户的形式,比如声波信号或者图像。

通信系统的核心是由3个部分组成,即发送机、信道和接收机。下面介绍这3个基本组成部分的功能。

发送机。发送机将电信号转换为适于在物理信道或者传输介质中传输的形式。例如,在无线广播和电视广播中,联邦通信委员会(FCC)规定了每个发射台所使用的频率范围。因此,发送机就必须将输出的信息信号转换到适当的频率范围,以匹配发射台允许使用的

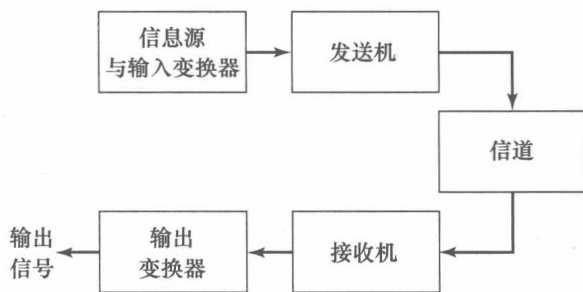


图 1-1 通信系统的功能框图

频率。这样，不同的电台所发送的信号彼此就不会相互干扰。电话通信系统也有相似的功能，这样不同用户的语音电信号才可以在同一线路中同时传输。

一般来讲，发送机通过一个名为调制的过程实现消息信号与信道的匹配。通常，调制指利用信息信号系统地改变一个正弦载波的幅度、频率或相位。例如，AM 无线电广播中，信息信号就是通过正弦载波信号的幅度变化来承载的，载波的频率就是分配给电台的频段的中心频率。这就是一个幅度调制(amplitude modulation)的例子。在 FM 无线电广播中，以正弦载波的频率变化来承载的信息信号，这就是一个频率调制(frequency modulation)的例子。相位调制(phase modulation, PM)是将信息信号反映在正弦载波上的第三种调制方法。

5

如上所述，包括 AM、FM 和 PM 在内的载波调制是在发送机中完成的，将信息信号转换成匹配信道特征的信号形式的过程。因此，通过调制的过程，信息信号被变换到信道所分配的频段上。调制方式的选择依赖几个因素：如所分配的带宽、信号在信道传输中所遇到的噪声和干扰类型、传输之前放大信号所使用的电子器件等。总之，调制过程可以使得多个用户的不同消息在同一个物理信道中传输。

除了调制以外，在发送机中实现的其他功能还包括信息承载信号的过滤、已调信号的放大，以及无线传输条件下利用发射天线完成的信号辐射等。

信道。通信信道是一种物理媒介，用以将信号从发送机传输到接收机。在无线传输中，信道通常是大气层(自由空间)。电话信道则可以采用多种物理介质，包括电缆、光缆和无线(微波)。无论信号传输采用哪种物理介质，都会受到各种因素的随机性的损伤。最常见的信号降质来源于接收机前端信号放大器产生的加性噪声，这种噪声称为热噪声。无线通信中，加性噪声来源于接收机天线收到的人为噪声和大气噪声。例如，汽车点火噪声就是一种人为噪声，雷电释放的电光则是一种大气噪声。信道中其他用户产生的干扰属于另一种形式的加性噪声，这种噪声在有线和无线信道中都经常出现。

在一些无线通信信道中，例如用于长距离短波无线传输的电离层信道，多径传播导致另一种形式的信号降质。这种信号失真非线性的，导致信号幅度随时间变化，一般称为衰落。对这一现象将在 1.3 节详细描述。

加性和非加性信号失真通常都被刻画为随机现象，采用统计特征描述。在通信系统的设计中，必须考虑这些信号失真的影响。

在设计通信系统时，一般采用能够刻画物理信道上的信号失真的统计特性的数学模型。通常，数学模型中采用的统计特性，是通过在信道上进行的传输实验而实际测量获得的经验值。这种情况下，需对数学模型需要进行物理修正。另一方面，在某些通信系统的设计中，信道的统计特性可能随时间显著变化。这时，设计者需要设计一种能够抵抗各种信号失真的通信系统，以对信号失真具有鲁棒性(robust)。通过使系统参数能够适应信号失真而自动调整，就可以实现这种系统。

6

接收机。接收机的作用就是恢复接收信号中所包含的消息信号。如果消息信号是采用载波调制进行传输，接收机就要实现载波解调，从正弦载波中提取消息。由于接收信号中存在加性噪声和其他可能的信号干扰，信号解调是在有失真的情况下进行的，解调后的消息信号一般会有某种程度的失真。我们将会在后面的分析中看到，接收消息信号的保真度是调制方式和加性噪声强度的函数。

除了进行信号解调，接收机还实现很多外围的功能，包括信号滤波和噪声抑制。

1.2.1 数字通信系统

现在我们已经描述了一个广义的电通信系统，隐含的假设条件是消息信号是连续时变波形。我们将这种连续时变信号波形称为模拟信号，相应地将产生这种信号的信号源称为

模拟信源。模拟信号可以经载波调制直接在通信信道中传输，在接收机进行相应的解调。我们将这样的通信系统称为模拟通信系统。

另一方面，模拟信源输出也可以转换为数字形式，然后经过数字调制和接收机的解调实现传输。采用数字调制传输模拟信号具有一些潜在的优势，最重要的一点是数字传输相比模拟传输有更好的信号保真度。具体来说，采用数字传输，在长距离传输中可以进行数字信号再生，在每个再生点可以消除噪声累积的影响。相反，在模拟传输的长距离传输中，因为每隔一定距离需要引入放大器来放大信号，因而叠加到信号中的噪声也被放大并逐次累积。对模拟信号采用数字传输的另一个原因是模拟信号可能是高度冗余的，通过数字处理，可以在调制之前消除冗余，从而压缩信道带宽。第三个可能的原因就是数字通信系统的实现成本较低。

在某些应用中，需要传输的信息本身就是数字的，比如英文文本内容和计算机数据。这种情况下，产生这种数据的信源就称为离散(数字)信源。

在数字通信系统中，发送机和接收机的功能还必须包括发送机中模拟信号的离散化和接收机的消息信号的合成或内插。附加的功能还包括消除冗余以及信道编码和译码。

图 1-2 给出了数字通信系统的功能框图和基本组成。信源输出可以是模拟信号(例如音频或视频信号)，也可以是数字信号(例如计算机的输出)，这种信号在时间上离散，且输出符号有限。在数字通信系统中，信源产生的消息通常转换为二进制数字序列。理想的目标是用尽可能少的二进制符号表示信源输出(消息)。也就是，希望找到一种有效的信源输出的表示方式，能够没有或者几乎没有冗余。将模拟或者数字信源的输出转换成二进制序列的过程称为信源编码或数据压缩。我们将在第 12 章描述信源编码方法。

7

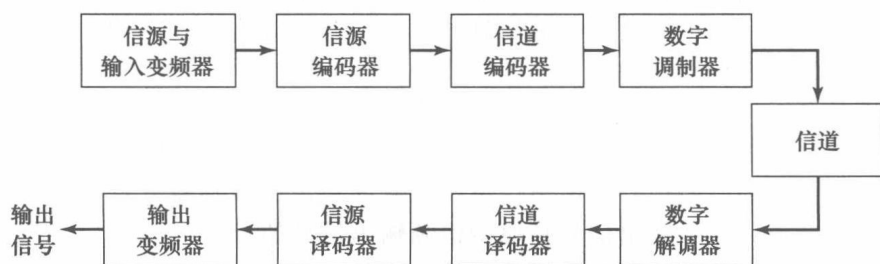


图 1-2 数字通信系统基本组成

信源编码器输出的二进制数字序列，称为信息序列，被进一步送入信道编码器中。信道编码器的作用是，以受控的方式在二进制信息序列中引入某种冗余，使接收机可以克服信道传输中噪声和信道干扰对信号造成的失真影响。这种引入的冗余能够提高接收数据的可靠性，改善信号的保真度。实际上，信息序列中的冗余还有助于接收机对信息序列的正确译码。例如，对于二进制信息序列的一种(平凡)编码方案就是将每个二进制比特重复 m 次，其中 m 是正整数。(复杂一些的编码方案是将每 k 个信息比特的序列映射成一个唯一的 n 比特的序列，称为码字。)在这种编码过程中引入的冗余量以比值 n/k 表示，其倒数，即 k/n ，称为码字效率或者简称码率。信道编码将在第 13 章介绍。

信道编码器输出的二进制序列输入到数字调制器中，后者充当了与通信信道的接口。实际上几乎所有的通信信道都能够传输电信号(波形)，因此，数字调制器的主要功能就是将二进制信息序列映射成信号波形。为了说明这一点，假设编码后的信息序列以 R bit/s 的速率逐个比特匀速传输，数字调制器可以将二进制的 0 比特映射为波形 $s_0(t)$ ，将二进制的 1 比特映射为波形 $s_1(t)$ 。这种方式下，信道编码器输出的每个比特可以分别传输，称为二进制调制。此外，数字调制也可以将每 k 个编码比特的序列映射为一个信号波形，一共采用 $M=2^k$ 种不同的波形 $s_i(t)$ ， $i=0, 1, \dots, M-1$ 。这种数字调制称为 M 进制调制

8

($M > 2$)。注意, 每 k/R 秒一个新的 k 比特序列输入到调制器中, 因此, 给定信道比特速率 R , 传输 k 比特序列所对应的 M 种信号波形中的任何一个, 需要的时间是二进制调制系统中信号波形周期的 k 倍。

在数字通信系统的接收端, 数字解调器对信道损伤后的传输波形进行处理, 将每个波形映射成信号编号, 代表传输数据符号(二进制或 M 进制)的估计。例如, 采用二进制调制时, 解调器对接收到的波形进行处理, 判定发送比特是 1 还是 0。此情况下, 称解调器进行了二元判决或者硬判决。此外, 解调器还可以进行三元判决, 即依据接收信号的质量, 判定发送比特是 1 或 0, 或不进行判决。当对某个比特不做判决时, 称解调器在解调数据中插入一个删除(erasure)。利用发送数据中的冗余度, 译码器可尝试在删除发生的位置填入符号。将解调器所执行的判决处理视为一种量化, 则二元判决和三元判决实际上就是解调器采用 Q 个电平的特例, 其中 $Q \geq 2$ 。一般而言, 如果数字通信系统采用 M 进制调制, 其中 M 表示 M 个可能的发送符号(symbol)[⊖], 每个符号对应 $k = \log_2 M$ 个比特, 则解调器进行 Q 电平判决, 其中 $Q \geq M$ 。在极端的情况下不进行量化, 则 $Q = \infty$ 。

如果发送信息中没有冗余, 解调器必须要判定给定时间间隔内收到的波形是 M 个波形中的哪一个。相应地 $Q = M$, 并且由于发送信息中无冗余, 解调器之后未使用离散信道译码器。另一方面, 如果发送机采用了离散信道编码器引入了冗余, 每 k/R 秒将一个解调器的 Q 元输出信号送入译码器, 译码器根据发送端编码器的编码方案和接收数据中的冗余, 重建原始信息序列。

对于解调器和译码器性能的一个度量就是译码序列中错误发生的频度。准确地讲, 译码器输出的每比特平均错误概率是对解调器-译码器组合的性能度量。一般而言, 影响错误概率的因素包括码字特征、信道传输信息所采用的波形类型、发送功率、信道特征即噪声程度以及调制解调方法。

这些因素及其对性能的影响将在第 8 章到第 10 章介绍。

最后一步, 当需要模拟输出时, 信源译码器从信道译码器收到的输出序列, 根据信源编码方案, 重建信源的原始信号。由于信道译码错误和信源编码器以及信源译码器中可能引入的失真, 信源译码器的输出信号是原始信源输出信号的近似。原始信号与重建信号之间的差值或者差值的函数, 就是数字通信系统失真的一种度量。

9

1.2.2 早期的数字通信

尽管莫尔斯被公认为是最早的电子数字通信系统(电报)的发明者, 但奈奎斯特(Nyquist, 1924)对如何确定有限带宽电话信道上实现无码间干扰传输的最大信号速率这一问题的研究, 被公认为现代数字通信的奠基者。奈奎斯特提出了一个电报系统的模型, 其中传输信号为

$$s(t) = \sum_n a_n g(t - nT)$$

其中, $g(t)$ 表示基本的脉冲波形, $\{a_n\}$ 表示取值为 $\{\pm 1\}$ 的二元数据序列, 发送速率为 $1/T$ 比特/秒。奈奎斯特着手研究带宽限制在 W 赫兹且最大脉冲速率为 $1/T$ 的最佳脉冲波形, 在脉冲抽样时间 k/T , $k=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 时不引起符号之间的干扰(码间干扰)问题。其结论是最大脉冲速率 $1/T$ 等于 $2W$ 脉冲/秒, 此速率称为奈奎斯特速率。通过使用脉冲 $g(t) = (\sin 2\pi Wt) / 2\pi Wt$ 就可以达到这个速率。此脉冲可在抽样瞬间实现无码间干扰的数据恢复。奈奎斯特的结论与后来由香农(Shannon, 1948)精确阐述的限带信号的抽样定理等价。抽样定理指出, 带宽为 W 的信号以 $2W$ 样值每秒的奈奎斯特速率抽样, 得到的样

⊖ 本书中有时也根据习惯将该词译为“码元”。——译者注

值可以重构恢复，重构内插公式为

$$s(t) = \sum_n s\left(\frac{n}{2W}\right) \frac{\sin 2\pi W(t - n/2W)}{2\pi W(t - n/2W)}$$

受奈奎斯特研究的启发，哈特莱(Hatley, 1928)研究了使用多振幅电平时，在带宽受限信道中可靠传输的数据量。由于噪声和其他干扰的存在，哈特莱假定接收机能以某种准确度(如 A_s)可靠地估计出信号的振幅。其研究结论是，当最大信号幅度限制在 A_{\max} (固定功率容限)且幅度分辨率为 A_s 时，在限带信道上存在一个可以保证可靠通信的最大数据速率。

通信技术发展的另一个重大进展是维纳(Wiener, 1942)的研究工作，即加性噪声存在的条件下，如何通过分析接收信号 $r(t) = s(t) + n(t)$ 估计有用信号 $s(t)$ 。这个问题源于信号解调。维纳给出了实现有用信号 $s(t)$ 的最佳均方逼近的线性滤波器设计方法，这种滤波器称为最佳线性滤波器。

哈特莱和奈奎斯特关于数字信息最大传送速率的研究结果，成为香农研究工作(1948a, b)的先导。香农建立起信息论的数学基础，并推导出关于数字通信系统的基本限制。在香农的研究中，采用信源和通信信道的概率模型，从统计意义上严格表述了可靠通信的基本问题，并在此基础上，引入信源信息量的对数测度。香农还证明了发送器的功率容限、带宽容限及加性噪声的影响都可以与信道相联系，并且合并成一个参数，称为信道容量。例如，在加性白(谱平坦)高斯噪声干扰的情况下，带宽为 W 的理想带宽受限信道的容量 C 为

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{P}{W N_0} \right) \text{ 比特 / 秒}$$

其中 P 是平均发射功率， N_0 是加性噪声的功率谱密度。信道容量的意义是：如果信源的信息速率 R 小于 C ($R < C$)，理论上可以采用适当编码实现信号在信道上的可靠传输；另一方面，如果 $R > C$ ，无论发送机和接收机如何处理信号，都不可能实现可靠传输。因此香农建立了信息传输的基本限制，并且开辟了一个新的研究领域——信息论。

起初香农的研究成果并未对数字通信系统的设计和开发产生很大的影响。一部分原因是，20世纪50年代对数字信息传输的需求较少。另一个原因是，要实现香农理论所预言的高效率、高可靠性数字传输，对数字硬件的要求非常复杂，由此也会导致高昂的成本。

数字通信领域另一个重要的贡献是科捷利尼科夫(Kotelnikov, 1947)的研究成果，他为各种数字通信系统提供了基于几何空间的相干分析方法。科捷利尼科夫的方法后来由沃曾克拉夫特和雅各布(Wozencraft, Jacobs, 1965)进一步拓展。

近四十年来数据通信需求量不断增长，集成电路技术也持续发展，推动了高效率、高可靠性数字通信系统的发展。在此进程中，香农的基础研究结果，以及在信道最大传输能力限制、可实现性能界限方面的研究成果，已成为各种通信系统设计的基准。香农以及其他信息论研究者给出的这些理论极限，成为数字通信系统开发和设计中努力追求的终极目标。

紧随香农工作之后的重要贡献是汉明(Hamming, 1950)的研究工作，即采用检错编码和纠错编码抵抗信道噪声的有害影响。随后的几年里，汉明的工作激发了大量研究者的兴趣，提出了很多新的功能强大的编码方法，其中许多方法至今仍在现代通信系统中广为使用。

1.3 通信信道及其特征

正如前面讨论的，通信信道提供了发送机与接收机的连接通道。物理信道可以是一对承载电信号的电线，也可以是通过已调光束承载信息的光纤，或者是以声波形式传播信号的水下越洋信道，再或者是载荷信息信号的通过天线辐射的自由空间。其他可以称为通信信道的媒介还包括数据存储介质，例如磁带、磁盘和光盘等。

在任何信道上进行信号传送的一个常见问题是加性噪声。一般情况下，加性噪声产生

10

11