



经典译丛

WILEY

信息与通信技术

通信原理

—— 调制、编码与噪声

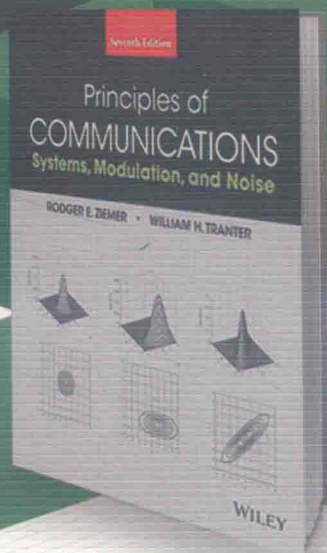
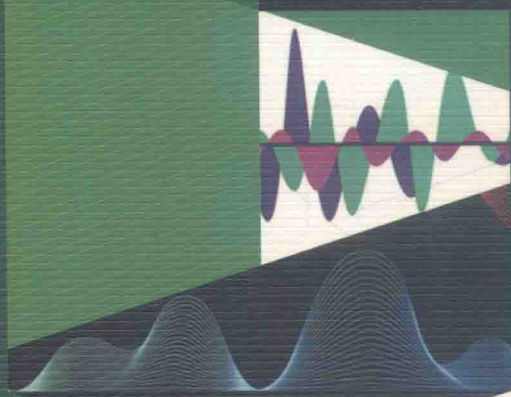
(第七版)

Principles of Communications
Systems, Modulation, and Noise, Seventh Edition

【美】 Rodger E. Ziemer 著
William H. Tranter

谭明新 译

Principles of Communications: Systems, Modulation, and Noise, Seventh Edition



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>

经典译丛·信息与通信技术

通信原理

——调制、编码与噪声

(第七版)

Principles of Communications

Systems, Modulation, and Noise

Seventh Edition

[美]

Rodger E. Ziemer

著

William H. Tranter

谭明新 译

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书围绕信息从发送到接收的一系列处理环节,深入分析构成通信系统的各项技术和全貌。全书共12章,包括信号与系统、线性调制技术、角度调制和基带复用、数字信号传输、随机信号与噪声、系统调制噪声、有噪声干扰的数字通信、数字接收机等内容。本书结合通信的主题,即调制、编码与噪声,为读者提供了丰富的实例。配套网站则提供了MATLAB代码、习题解答,并为教师提供教师手册。

本书适合高等院校电子信息、通信类专业的高年级本科生或一年级研究生作为教材,也适合从事通信、信息工作的科技和工程技术人员作为参考书。

Rodger E. Ziemer, William H. Tranter: Principles of Communications: Systems, Modulation, and Noise, Seventh Edition

ISBN: 978-1118078914

Copyright © 2015 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.

Copies of this book sold without a Wiley sticker on the cover are unauthorized and illegal.

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: 01-2016-9457

图书在版编目(CIP)数据

通信原理: 调制、编码与噪声: 第七版 / (美)罗杰·E. 齐默(Rodger E. Ziemer), (美)威廉·H. 特兰特(William H. Tranter)著; 谭明新译. —北京: 电子工业出版社, 2018.6

(经典译丛·信息与通信技术)

书名原文: Principles of Communications: Systems, Modulation, and Noise, Seventh Edition

ISBN 978-7-121-34201-1

I. ①通… II. ①罗… ②威… ③谭… III. ①通信原理—高等学校—教材 IV. ①TN911

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第103023号

策划编辑: 杨 博

责任编辑: 杨 博 特约编辑: 张传福

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司

装 订: 三河市鑫金马印装有限公司

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: 41.75 字数: 1205千字

版 次: 2018年6月第1版(原著第7版)

印 次: 2018年6月第1次印刷

定 价: 149.00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: yangbo2@phei.com.cn。

译者序

近些年国内引进翻译了通信理论方面的很多著作。细细推敲，这些著作的共同特点是：分析时牢牢抓住了通信过程中的噪声、带宽这两个核心问题，而且针对所采用的任何一种具体的技术，详细地剖析了发生的过程、所产生的结果。目前，国内电子、通信类本科生、研究生欠缺的正是这种探索精神。现代通信产品的研发，同样以解决通信中的这两个问题为主线。比如，现代战争中的电子战，就是在对方通信系统工作的带宽范围内，通过发送功率大得多的噪声，达到人为地干扰对方通信指挥系统正常工作的目的。又比如，在发生于1991年的“沙漠风暴行动”中，把GPS接收机缝制在士兵的军装内，可以避免在沙漠里迷失方向；海湾战争中采用的GPS接收机超过了9000套。与此对应的卫星通信系统，在无线收、发信机之间直接通过卫星链路完成通信与指挥，但这种背景下的通信仍需要解决噪声、带宽这两个核心问题。总之，如今的电子通信，早已发展到了太空领域。当然，无论哪一种技术，都离不开基本的理论。电子工业出版社引进的Rodger E. Ziemer的《通信原理——调制、编码与噪声(第七版)》，在围绕带宽与噪声的主题展开分析时，具有如下的特点：

1. 根据通信系统的模块化结构，分析每个模块中采用的技术。然后结合具体实例从量的角度分析这些模块的常规指标。

2. 为了理解各个模块、各种技术，书中设计了MATLAB仿真。读者通过单步执行这些程序，可以观察到通信过程的各种现象，因而有助于读者根据这些现象深入理解通信的本质。

3. 用很大的篇幅剖析模拟调制、数字调制；用很大的篇幅分析噪声、干扰对系统的影响。

4. 反复地强调概率论与随机过程。无线通信系统、有线通信系统都离不开这一最基本的理论。

5. 对于难度大一点的技术，通过反复出现在每一章后面的习题，让读者在训练之后能定量、定性理解相应的技术与指标。

6. 利用附录对实际噪声源、联合高斯随机变量、窄带噪声模型、过零点的统计特性、卡方统计分析法(以及常用的数学工具)进行了分析，有助于追根求源的同学提升自己的研究能力。

在翻译本书的过程中，本人得到了无线调制领域的国际知名学者Fuqing Xiong教授的指点，在此表示诚挚的感谢。

以前翻译《现代通信系统》、《无线移动通信系统(第四版)》时，我先完成纸质版笔译，由几位本科生、硕士研究生录入成电子版后，我再反复校对。与以往不同，在翻译这本《通信原理——调制、编码与噪声(第七版)》时，全文的翻译、编辑、校对都是我一人独自完成的。尽管一再推敲和检查，仍难免有疏漏与不足，敬请广大读者批评指正。联系电子邮箱：tanmingxin@mail.ccnu.edu.cn。



于武汉

前 言^①

尼尔·阿姆斯特朗于1969年成为第一个登月人之后,在不到10年的时间内,本书的第1版于1976年出版。首次登月的各项规划导致了科学与技术的多方面发展。众多进展(特别是微电子技术领域的进展、数字信号处理技术(Digital Signal Processing, DSP)领域的进展)成为通信发展的推动技术。比如,从根本上说,在1969年之前,所有的商用通信系统(包括收音机、电话、电视系统)都是模拟系统。正是这些推动技术导致了如下应用的产生:①因特网和万维网;②数字收音机与数字电视;③卫星通信;④全球定位系统(Global Positioning Systems, GPS);⑤用于传输语音与数据的蜂窝通信;⑥影响百姓日常生活的、大量的其他应用。有许多文献给出了这些应用的深度分析。与这些文献不同的是,本书并未详细地介绍各个应用领域,而将重点放在基本理论与基本技术的剖析上。同学们若能切实地掌握这些基本理论,可以为从事更高层次的理论研究与应用方面的工作打下基础。

同理,这一版仍未包括许多新的应用与技术,并且相信:同学们通过这些内容的学习,在掌握了基本理论与分析技术之后,可以对这些生存期不会太长的应用实例与具体技术给出最佳的剖析。前面各个版本的反馈意见已经证实了这样一个道理:与具体的实用技术截然相反,本书在合理的篇幅内,强调基本理论可以在很大程度上满足读者的需要。本书很适合如下读者群:①高年级本科生;②可能已经忘记了基本知识的新入学的研究生;③工程师。书中也以适当的篇幅介绍了非常重要的新技术的发展,例如,多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)系统、接近信道容量的信道码。

本书第7版的两个明显变化是:①在每章末尾的习题中新增加了疑难问题;②将第6版的第3章分为两章。疑难问题正是通过相对简单的问题让同学们参与解决问题的训练。尽管这些问题的答案很简单,但全部的疑难问题包含了每一章的重要概念。之所以将第3章分为两章,主要是由于篇幅过长。新版的第3章集中分析线性模拟调制、简单的离散时间调制技术(采样定理的直接应用)。在各章末尾的习题中融入了许多新的习题和变化之后的习题。

除去这些明显的变化,这一版还包括许多其他变化。例如,考虑到本书中“信号空间”的内容并非必需,因此删去了第2章的相关内容(第11章较详细地分析了信号空间的概念)。如前所述,第3章介绍了线性模拟调制技术。加入了如下两方面的内容:①AM信号调制指数的度量;②线性传输的度量。由于已完全淘汰了模拟电视技术,因此第3章中删去了相关内容。最后,在这部分内容中,还删除了自适应增量调制。第4章介绍非线性模拟调制技术。第5章除了习题有所变化,其他内容没有明显的增减。在分别介绍概率论与随机过程时,第6章、第7章的处理方式与第5章大体一样。第8章中加入了信噪比的度量,利用该指标分析噪声对调制系统的影响。在第9章中加入了衰减信道上基带信道模型的许多细节,以及配有最小均方误差(Minimum Mean Square Error, MMSE)的均衡器、配有自适应权值的MMSE均衡器误比特率(Bit Error Rate, BER)性能的仿真结果。这些变化同样体现在第10章中。由于还需要再增加数页才能将卫星通信进一步解释清楚,因此只能勉为其难地删除了这一内容。在MIMO系统中新加入了Alamouti处理法,在瑞利信道上,通过将2发1收的Alamouti信号传输系统与2发2收的传输系统进行比较,得出了BER曲线。第10章还在将4G与2G、3G进行比较时,加入了简要的分析。第11章除习题之外,没有其他变化。第12章中加入了“快速预览”,介绍信道容量的信道码、游程长度编码、数字电视的内容。

① 中译本的一些图示、参考文献、符号及其正斜体形式等沿用了英文原著的表示方式,特此说明。

第七版的特点是：每一章都有几个计算机仿真的实例。由于 MATLAB 广泛应用于学术环境与工业应用环境，以及考虑到 MATLAB 丰富的图形库，因此选择了 MATLAB 仿真。同学们通过这些仿真实例（从计算各种性能曲线的程序到某种类型通信系统及其各种算法的仿真程序），不必经过烦琐的计算就可以观察到较复杂系统的特性。这些实例能够让同学们了解通信系统环境下完成分析和仿真的现代化计算工具。为了保持本书的特色不变，尽管给出的这一类型的材料有限，但第 7 版中增加了计算机仿真实例和篇幅。除了章节中的计算机实例，还在每一章的末尾给出了计算机仿真练习。第 7 版明显突出了这一特色。这些仿真练习紧随各章的习题之后，这样设计的目的是：利用计算机体现出通信的基本原理，并为同学们提供进一步分析的方式。每一章除了将上一版的习题进行一些变化，还增加了大量的新习题。

本书中计算机仿真实例的所有源代码可以在 Wiley 出版社提供的网站下载。网站中还包含了附录 G（疑难问题的答案）与参考文献的具体信息（bibliography）。网址为

www.wiley.com/college/ziemer

尽管书中包含了 MATLAB 源代码文本，但这里还是建议读者从 Wiley 出版社提供的网站下载，因为文本中的代码可能会出现印刷和其他类型的错误。这些代码有助于读者深入分析所述例子的仿真技术。此外，在该网站上，会根据需要周期性地更新 MATLAB 代码。网站上也包含章末习题与计算机仿真练习的完整解答（答案设置了密码，仅提供给授课老师）^①。

感谢促进本教材出版的那些人以及对前面各版提出改进意见的那些人。感谢众多的同事们，是他们以各种形式给出了建议。还要感谢支持我们研究的工业界与各个机构。特别感谢密苏里大学理工学院、科罗拉多大学斯普林司分校、弗吉尼亚理工大学的同事们和同学们，本书第 7 版的出版离不开他们的意见与建议。谨以此书献给同学们。在过去的 40 多年中，我们与众多的人共事，是他们帮助我们塑造了教学与研究的风格。感谢所有共过事的人。

最后，在 40 年的写作生涯中，离不开我的家人的支持，对他们道一声谢谢远不足以表达我对他们的感激之情。

Rodger E. Ziemer

William H. Tranter

^① 教辅申请方式也可参见书末的“John Wiley 教学支持信息反馈表”。

老师您好, 若您需要与 John Wiley 教材配套的教辅(免费), 烦请填写本表并传真给我们。也可联络 John Wiley 北京代表处索取本表的电子文件, 填好后 e-mail 给我们。

原书信息

原版 ISBN:

英文书名 (Title):

版次 (Edition):

作者 (Author):

配套教辅可能包含下列一项或多项

教师用书(或指导手册) / 习题解答 / 习题库 / PPT 讲义 / 其他

教师信息(中英文信息均需填写)

➤ 学校名称(中文):

➤ 学校名称(英文):

➤ 学校地址(中文):

➤ 学校地址(英文):

➤ 院 / 系名称(中文):

➤ 院 / 系名称(英文):

课程名称 (Course Name):

年级 / 程度 (Year / Level): 大专 本科 Grade: 1 2 3 4 硕士 博士 MBA EMBA

课程性质(多选项): 必修课 选修课 国外合作办学项目 指定的双语课程

学年(学期): 春季 秋季 整学年使用 其他(起止月份_____)

使用的教材版本: 中文版 英文影印(改编)版 进口英文原版(购买价格为____元)

学生: _____ 个班共 _____ 人

授课教师姓名:

电话:

传真:

E-mail:

WILEY - 约翰威立商务服务(北京)有限公司

John Wiley & Sons Commercial Service (Beijing) Co Ltd

北京市朝阳区太阳宫中路12A号, 太阳宫大厦8层 805-808室, 邮政编码100028

Direct +86 10 8418 7815 Fax +86 10 8418 7810

Email: iwang@wiley.com

目 录

第 1 章 绪论	1	2.5.1 时间平均的自相关函数	41
1.1 通信系统的结构图	3	2.5.2 $R(\tau)$ 的性质	42
1.2 信道的特性	4	2.6 信号与线性系统	45
1.2.1 各种噪声源	4	2.6.1 线性时不变系统的定义	45
1.2.2 传输信道的类型	5	2.6.2 冲激响应与叠加积分法	45
1.3 系统分析技术概述	10	2.6.3 稳定性	46
1.3.1 时域分析与频域分析	10	2.6.4 传输函数(频率响应函数)	46
1.3.2 调制及其传输理论	10	2.6.5 因果性	47
1.4 系统优化的概率统计方法	11	2.6.6 $H(f)$ 的对称性	48
1.4.1 信号的统计检测和估计理论	11	2.6.7 频谱密度的输入-输出关系	50
1.4.2 信息论与编码	11	2.6.8 周期性输入信号的响应	50
1.4.3 领域内的最新进展	12	2.6.9 无失真传输	51
1.5 本书内容的概要介绍	12	2.6.10 群时延与相位时延	52
补充书目	13	2.6.11 非线性失真	54
第 2 章 信号与线性系统简要分析	14	2.6.12 理想滤波器	55
2.1 信号的各种模型	14	2.6.13 用可实现的滤波器逼近理想低通滤波器	57
2.1.1 确知信号与随机信号	14	2.6.14 脉冲的精度、上升沿的持续时间与带宽的关系	60
2.1.2 周期性信号与非周期性信号	14	2.7 采样定理	63
2.1.3 相量信号与频谱	15	2.8 希尔伯特变换	66
2.1.4 奇异函数	17	2.8.1 定义	66
2.2 信号的分类	19	2.8.2 希尔伯特变换的性质	68
2.3 傅里叶级数	21	2.8.3 解析信号	69
2.3.1 复指数傅里叶级数	21	2.8.4 带通信号的复包络表示	70
2.3.2 傅里叶系数的对称性	22	2.8.5 带通系统的复包络表示	72
2.3.3 傅里叶级数的三角函数表示形式	22	2.9 离散傅里叶变换与快速傅里叶变换	73
2.3.4 帕塞瓦尔定理	23	补充书目	77
2.3.5 傅里叶级数的例子	23	本章内容小结	77
2.3.6 线谱	24	疑难问题	80
2.4 傅里叶变换	28	习题	84
2.4.1 幅度谱与相位谱	29	计算机仿真练习	98
2.4.2 对称性	29	第 3 章 线性调制技术	100
2.4.3 能量谱密度	30	3.1 双边带调制	100
2.4.4 卷积	31	3.2 幅度调制	103
2.4.5 傅里叶变换的各项定理: 证明及其应用	32	3.2.1 包络检波	104
2.4.6 周期信号的傅里叶变换	39	3.2.2 调制梯形	108
2.4.7 泊松求和公式	40	3.3 单边带调制	110
2.5 功率谱密度与相关性	41	3.4 残留边带调制	117

3.5 变频与混频	119	第5章 基带数字数据传输的原理	187
3.6 线性调制中的干扰	122	5.1 带通数字数据传输系统	187
3.7 脉冲幅度调制	124	5.2 各种线路码及其功率谱	188
3.8 数字脉冲调制	126	5.2.1 线路码简介	188
3.8.1 增量调制	126	5.2.2 完成线路编码之后数据的功率谱	189
3.8.2 脉冲编码调制	128	5.3 对数字数据进行滤波处理之后的效果——码间干扰	195
3.8.3 时分复用	129	5.4 脉冲的整形：码间干扰为零时的奈奎斯特准则	198
3.8.4 实例：数字电话系统	130	5.4.1 具有零码间干扰特性的脉冲	198
补充书目	131	5.4.2 奈奎斯特脉冲整形准则	199
本章内容小结	131	5.4.3 码间干扰为零时的发送滤波器与接收滤波器	201
疑难问题	132	5.5 迫零均衡	202
习题	133	5.6 眼图	205
计算机仿真练习	136	5.7 同步	207
第4章 角度调制与复用	137	5.8 基带数字信号的载波调制	210
4.1 调相与调频的定义	137	补充书目	211
4.1.1 窄带角度调制	139	本章内容小结	211
4.1.2 角度调制信号的频谱	141	疑难问题	212
4.1.3 角度调制信号中包含的功率	146	习题	213
4.1.4 角度调制信号的带宽	146	计算机仿真练习	217
4.1.5 窄带调频信号转换为宽带调频信号	151	第6章 概率与随机变量简介	218
4.2 角度调制信号的解调	152	6.1 什么是概率	218
4.3 反馈式解调器：锁相环	156	6.1.1 事件等概率发生时的结果	218
4.3.1 将锁相环用于调频信号与调相信号的解调	156	6.1.2 相对频率	218
4.3.2 工作在跟踪模式的锁相环：线性模型	158	6.1.3 样本空间与概率的公理	219
4.3.3 工作在捕获模式的锁相环	163	6.1.4 维恩图	220
4.3.4 科斯塔斯锁相环	167	6.1.5 实用的概率关系式	220
4.3.5 倍频与分频	168	6.1.6 树状图	223
4.4 角度调制系统中的干扰	169	6.1.7 一些较通用的关系式	225
4.5 模拟脉冲调制	173	6.2 随机变量及其有关的各个函数	226
4.5.1 脉冲宽度调制	174	6.2.1 随机变量	226
4.5.2 脉冲位置调制	175	6.2.2 概率(累积)分布函数	227
4.6 复用	175	6.2.3 概率密度函数	228
4.6.1 频分复用	176	6.2.4 联合cdf与联合pdf	230
4.6.2 频分复用的实例：调频立体声广播	176	6.2.5 随机变量的变换	234
4.6.3 正交复用	178	6.3 统计平均	238
4.6.4 各种复用方案的比较	179	6.3.1 离散随机变量的平均	238
补充书目	179	6.3.2 连续随机变量的平均	239
本章内容小结	179	6.3.3 随机变量的函数的平均	239
疑难问题	181	6.3.4 函数的随机变量多于一个时的平均	241
习题	181	6.3.5 随机变量的方差	242
计算机仿真练习	185		

6.3.6	将 N 个随机变量线性组合之后的平均	243	7.4.3	噪声的等效带宽	291
6.3.7	独立随机变量的线性组合的方差	244	7.5	窄带噪声	294
6.3.8	表示平均的另一个具体指标——特征函数	245	7.5.1	噪声的正交分量表示法、包络-相位表示法	294
6.3.9	两个独立随机变量之和的概率密度函数	245	7.5.2	$n_c(t)$ 、 $n_s(t)$ 的功率谱密度函数	296
6.3.10	协方差与相关系数	247	7.5.3	莱斯概率密度函数	298
6.4	实用的概率密度函数	248	补充书目		300
6.4.1	二项分布	248	本章内容小结		300
6.4.2	二项分布的拉普拉斯近似	250	疑难问题		302
6.4.3	泊松分布以及二项分布的泊松近似	251	习题		303
6.4.4	几何分布	252	计算机仿真练习		311
6.4.5	高斯分布	252	第 8 章 调制系统中的噪声		313
6.4.6	呈高斯分布的 Q 函数	255	8.1	信噪比	313
6.4.7	切比雪夫不等式	257	8.1.1	基带系统	314
6.4.8	各种概率函数及其均值、方差的汇总	257	8.1.2	双边带系统	315
补充书目		258	8.1.3	单边带系统	316
本章内容小结		258	8.1.4	幅度调制系统	318
疑难问题		260	8.1.5	信噪比估计器	323
习题		263	8.2	相干解调系统中的噪声误差与相位误差	328
计算机仿真练习		271	8.3	角度调制系统中的噪声	331
第 7 章 随机信号与随机噪声		273	8.3.1	噪声对接收机输入端的影响	331
7.1	从相对频率的角度表示随机变量	273	8.3.2	PM 信号的解调	333
7.2	表示随机过程的若干术语	273	8.3.3	FM 信号的解调: 高于门限时的处理过程	334
7.2.1	样本函数与总体	273	8.3.4	通过采用去加重技术提高系统的性能	335
7.2.2	用联合概率密度函数表示的随机过程	275	8.4	FM 信号解调时的门限效应	337
7.2.3	平稳性	275	8.4.1	FM 解调器的门限效应	337
7.2.4	局部表示方式体现随机过程的特性: 各态历经性	277	8.5	脉冲编码调制中的噪声	344
7.2.5	各态历经过程中各种平均的含义	278	8.5.1	检波后的信噪比	344
7.3	相关性与功率谱密度	280	8.5.2	压缩扩张特性	347
7.3.1	功率谱密度	280	补充书目		348
7.3.2	维纳-辛钦定理	281	本章内容小结		348
7.3.3	自相关函数的性质	283	疑难问题		350
7.3.4	随机脉冲序列的自相关函数	284	习题		351
7.3.5	互相关函数与互功率谱密度	286	计算机仿真练习		354
7.4	线性系统与随机过程	287	第 9 章 噪声环境下数字数据传输的原理		356
7.4.1	输入输出之间的关系	287	9.1	高斯白噪声环境下的基带数据传输	357
7.4.2	滤波之后的高斯过程	289	9.2	信号为任意形状时的二进制同步数据传输	362
			9.2.1	接收机的结构与误码率	362
			9.2.2	匹配滤波器	364

9.2.3	匹配滤波器接收机的误码率	368	10.1.12	各种多进制通信系统的误比特率比较	454
9.2.4	用相关器实现匹配滤波器接收机	370	10.1.13	以带宽为基础将各种多进制通信系统进行比较	457
9.2.5	最佳门限	371	10.2	数字调制的功率谱	458
9.2.6	非白噪声环境(有色噪声环境)	371	10.2.1	正交调制技术	458
9.2.7	接收机实现中存在的问题	372	10.2.2	频移键控调制	462
9.2.8	二进制信号相干传输系统的误码率	372	10.2.3	小结	464
9.3	不需要相干参考载波的调制方案	377	10.3	同步	464
9.3.1	差分相移键控	378	10.3.1	载波同步	464
9.3.2	数据的差分编码与译码	382	10.3.2	符号同步	467
9.3.3	FSK 的非相干解调	384	10.3.3	字同步	469
9.4	多进制脉冲幅度调制	385	10.3.4	伪随机噪声序列	471
9.5	各种数字调制系统的比较	389	10.4	扩频通信系统	474
9.6	码间干扰为零时数字数据传输系统的噪声性能	391	10.4.1	直接序列扩频	476
9.7	多径干扰	396	10.4.2	在连续波干扰环境下 DSSS 的性能	478
9.8	衰落信道	400	10.4.3	扩频在多用户环境下的性能	479
9.8.1	信道的基本模型	400	10.4.4	跳频扩频	481
9.8.2	平坦衰落信道的统计特性与误码率	401	10.4.5	码同步	482
9.9	均衡技术	406	10.4.6	结论	484
9.9.1	迫零均衡法	406	10.5	多载波调制与正交频分复用	484
9.9.2	最小均方均衡法	410	10.6	蜂窝无线通信系统	488
9.9.3	抽头权值的调整	413	10.6.1	蜂窝无线的基本原理	489
补充书目		416	10.6.2	蜂窝无线系统中的信道干扰	493
本章内容小结		416	10.6.3	多入多出系统——预防衰落	493
疑难问题		418	10.6.4	1G 与 2G 蜂窝系统的特性	495
习题		419	10.6.5	cdma2000 和 W-CDMA 的特性	496
计算机仿真练习		428	10.6.6	过渡到 4G	497
第 10 章	高级数据通信的原理	430	补充书目		497
10.1	多进制数据通信系统	430	本章内容小结		498
10.1.1	以正交复用为基础的多进制方案	430	疑难问题		499
10.1.2	偏移四相相移键控系统	433	习题		500
10.1.3	最小频移键控	434	计算机仿真练习		506
10.1.4	从信号空间的角度表示多进制数据传输	440	第 11 章	最佳接收机与信号空间的基本思想	507
10.1.5	从信号空间的角度表示 QPSK	441	11.1	贝叶斯优化	507
10.1.6	多进制相移键控	443	11.1.1	信号的检测与估计	507
10.1.7	正交幅度调制	445	11.1.2	优化准则	507
10.1.8	相干 FSK	447	11.1.3	贝叶斯检测器	508
10.1.9	非相干 FSK	448	11.1.4	贝叶斯检测器的性能	511
10.1.10	差分相干相移键控	452	11.1.5	奈曼-皮尔森检测器	514
10.1.11	把误符号率转换为误比特率	452	11.1.6	检测器的最小差错概率	514
			11.1.7	最大后验概率检测器	514

11.1.8	Minimax 检测器	515	12.2.1	信源编码的例子	563
11.1.9	M 进制假定的情形	515	12.2.2	几个定义	566
11.1.10	以各个向量的观测值为基础的 判决	515	12.2.3	扩展之后的二进制信源的熵	567
11.2	信号的向量空间表示	515	12.2.4	香农-费诺信源编码	568
11.2.1	信号空间的结构	516	12.2.5	霍夫曼信源编码	568
11.2.2	标量积	517	12.3	噪声环境下的通信: 基本思想	569
11.2.3	准则	517	12.4	噪声信道上的通信: 分组码	572
11.2.4	许瓦兹不等式	517	12.4.1	汉明距离与纠错	572
11.2.5	用傅里叶系数表示的两个信号的 标量积	519	12.4.2	单比特的奇偶校验码	573
11.2.6	基函数单元的选择: 格拉姆-施密 特正交化过程	520	12.4.3	重复码	573
11.2.7	随信号持续时间变化的信号度量 指标	522	12.4.4	纠正一个差错的奇偶校验码	574
11.3	数字数据传输的最大后验概率接 收机	523	12.4.5	汉明码	578
11.3.1	从信号空间的角度分析相干系统 的判决准则	523	12.4.6	循环码	579
11.3.2	充分性统计量	528	12.4.7	Golay 码	580
11.3.3	多进制正交信号的检测	529	12.4.8	BCH 码与 RS 码	581
11.3.4	非相干系统的实例	531	12.4.9	各种技术的性能比较	581
11.4	估计理论	534	12.4.10	分组码实例	583
11.4.1	贝叶斯估计	534	12.5	在噪声信道上实现通信: 卷积码	589
11.4.2	最大似然估计	536	12.5.1	树图与篱笆图	590
11.4.3	根据多次观测进行的估计	537	12.5.2	维特比算法	593
11.4.4	最大似然估计的其他各项性质	539	12.5.3	卷积码的性能比较	595
11.4.5	最大似然估计的渐进性	540	12.6	兼顾带宽与功率效率的调制技术	598
11.5	估计理论在通信中的应用	540	12.7	反馈信道	603
11.5.1	脉冲幅度调制	540	12.8	调制与带宽效率	606
11.5.2	信号相位的估计: 再次用到 锁相环	541	12.8.1	带宽与信噪比	606
	补充书目	543	12.8.2	各种调制系统的比较	607
	本章内容小结	544	12.9	概要介绍	608
	疑难问题	545	12.9.1	交织技术与纠正突发差错	608
	习题	545	12.9.2	Turbo 码的编译码	609
	计算机仿真练习	553	12.9.3	信源编码的实例	611
			12.9.4	数字电视	613
				补充书目	614
				本章内容小结	614
				疑难问题	616
				习题	616
				计算机仿真练习	621
第 12 章	信息论与编码	554	附录 A	通信中的实际噪声源	622
12.1	基本概念	554	附录 B	联合高斯随机变量	640
12.1.1	信息	555	附录 C	窄带噪声模型的证明	642
12.1.2	熵	555	附录 D	过零点的统计特性与包含原点的统计 特性	644
12.1.3	离散信道的各种模型	557	附录 E	卡方统计分析法	650
12.1.4	联合熵与条件熵	558	附录 F	通用的数学表、数值表	652
12.1.5	信道容量	559			
12.2	信源编码	563			

第1章 绪 论

如今正处于称之为无形经济的时代,这样的时代并非由实际有形的实物流程推进,而是由信息流推进。比如,人们在进行大型购买时,可能会利用因特网收集相关产品的信息。短时间内通过访问相关产品的大量信息,即可完成信息的搜集,然后选择广泛认可的具体品牌。在仔细研究实现这种可瞬间接入的技术(有时称为通信与计算的融合)时,涉及两种主要的处理方式:①可靠、快捷的通信方式;②存储信息以备将来使用。

本书关注的是信息传输系统的基本理论。系统将电路和/或者器件组合起来之后完成预期的任务(比如将信息从一个地方传输到另一个地方)。从古到今,从古罗马人利用镜面的日光反射到现代电子通信(现代电子通信始于19世纪的前10年发明的电报),已采用了许多种方法传输信息。毫无疑问,本书关注的是各种电子通信系统的理论。

电子通信系统的特性是:具有不确定性。出现这种不确定性的部分原因是任何系统中都难免存在不希望出现的干扰信号(统称为噪声);部分原因是信息本身的特性:无法预测。因此,分析这种不确定性的系统时,需要用到概率论。

自早期的电子通信以来,从通信过程的开始到通信过程的结束,噪声问题始终存在,但在这一研究领域,直到20世纪40年代才将随机系统的分析方法和处理方法用于分析和优化通信系统[Wiener 1949; Rice 1944, 1945]¹。另外,有些出人意料的是,直到20世纪40年代后期克劳德·香农的论文——“通信中的数学理论”发表之后,人们才广泛地认识到信息不可预知的特性[Shannon 1948]。这篇论文标志着信息科学理论的开始,后面将会较详细地介绍这一主题。

表1.1列出了与电子通信的发展相关联的主要历史事件。表中给出了与通信加速发展有关的各种发明、各种事件的历史轨迹。

表 1.1 与电子通信的发展相关的主要历史事件与发明

时间	事件
1791	亚历桑德罗·伏特发明原电池或者电池
1826	乔治·西蒙·欧姆通过电阻创建电压与电流之间关系的定律
1838	萨缪尔·摩尔斯演示电报
1864	詹姆斯·C. 麦克斯韦预测电磁波的辐射
1876	亚历山大·格雷厄姆·贝尔取得电话的专利权
1887	海因里希·赫兹证明麦克斯韦的理论
1897	古列尔莫·马可尼获得整个无线电报系统的专利
1904	约翰·弗莱明获得热电子二极管的专利
1905	费森登利用无线信道传输语音
1906	德福雷斯特发明三极管放大器
1915	贝尔系统公司完成美国跨州的电话线部署
1918	B. H. 阿姆斯特朗完成超外差式无线接收机
1920	J. R. 卡尔森将采样用于通信
1925~1927	英国与美国的首次电视广播

1 方括号[]内的参考文献表示文献的历史资料部分。

续表

时间	事件
1931	出现电传业务
1933	埃德温·阿姆斯特朗发明调频
1936	BBC 开始运营固定的电视广播
1937	亚历克·李维斯设计脉冲编码调制(Pulse-Code Modulation, PCM)
二战	开发雷达与微波系统; 将统计方法用于解决信号提取的问题
1944	计算机用于公共服务(国有单位)
1948	W. 布拉顿、J. 巴丁、W. 肖克莱发明晶体管
1948	克劳德·香农发表论文“通信中的数学理论”
1950	将时分复用技术用于电话系统
1956	越洋通信电缆首次成功
1959	杰克·凯比获得“固态电路”的专利——集成电路的前身
1960	休斯实验室的 T. H. 梅首次演示工作激光器(在与贝尔实验室的长达 20 年的争执之后, G. 古尔德获得了专利)
1962	首次发射通信卫星(Telstar I)
1966	传真机首次成功
1967	美国最高法院卡特电话决议: 开放调制解调器的开发
1968	月球探测的电视实况转播
1969	互联网的首次启动——ARPANET
1970	开发出低损耗的光纤
1971	发明微处理器
1975	申请以太网的专利
1976	发明苹果 I 家用计算机
1977	现场直播由光缆系统实现传输的电话业务
1977	实现星际探测: 木星、土星、天王星和海王星
1979	第一个蜂窝电话网在日本运营
1981	IBM 开发的个人计算机面向公众发售
1981	贺氏智能调制解调器进入市场(实现计算机控制的自动拨号)
1982	开发出 16 比特 PCM 的音频光碟(Compact Disk, CD)
1983	首次发售 16 比特的可编程数字信号处理器
1984	AT&T 本地业务资产剥离后成立 7 个贝尔运营公司
1985	公布程序代码的台式机首次发售; 开发以太网
1988	快闪存储器首次进入商业应用(后用于蜂窝电话等)
1988	开发出非对称数字用户环线(Asymmetric Digital Subscriber Line, ADSL)
1990 年代	甚小孔径卫星(Very Small Aperture Satellites, VSAT)通信系统开始流行
1991	利用回波相消技术得到成本很低的 14 400 bps 调制解调器
1993	发明接近香农极限的 turbo 码
1990 年代中期	第二代蜂窝通信系统(2G)进入商用
1995	全球定位系统进入全面运营
1996	全数字电话系统采用下载速率为 56 Kbps 的调制解调器
1990 年代后期	因特网广泛地进入个人应用与商业应用; 高清电视成为主流; 苹果 iPod 首次发售(10 月), 截至 2007 年 4 月, 销售量过亿
2001	3G 蜂窝电话系统开始登场; WiFi 与 WiMAX 可接入; ①因特网; ②需要移动到每地的电子设备
21 世纪 00 年代	最初为军事应用设计的无线传感器网络用于民用(例如环境监测、保健应用、家庭自动化以及交通管理)
21 世纪 10 年代	引入第四代蜂窝无线系统。与通信相关的设备(例如蜂窝电话、电视、个人数码助手)开始出现技术融合

引人注意的是，第一套电子通信系统——电报通信系统为数字系统，这就是说，该系统以数字代码(即由点和线构成的莫尔斯信号)的方式传输点到点的信息²。在电报出现 38 年之后，发明了电话，语音信号在电话系统中以模拟电流的形式传输，这种更便捷的通信方式已经持续了 75 年³。

在了解了通信的发展史之后，人们可能会问，为什么如今的通信领域几乎完全由数字信号控制？有如下几个理由：①信号的完整性——再生数字信号比再生模拟信号的损耗小得多；②信号的融合——无论是语音信号、图像信号，还是逼真的数字数据(例如文档)，全都以数字信号的形式进行处理；③交互的灵活性——在支持从一对一的交互到多对多的交互时，数字域的处理要方便得多；④编辑——无论是文本、语音、图形或者视频，以数字方式编辑时会很方便、容易。

根据上面对通信的简要介绍及其发展历程，下面较详细地分析构成常规通信系统的各个组成部分。

1.1 通信系统的结构图

图 1.1 示出了通信系统中一个通信链路的常用模型⁴。尽管这让人联想到两个相距很远的两个地方之间的通信，但该结构图同样适用于遥感探测系统(比如雷达或者声呐)，系统中同一端的输入与输出可以位于同一个地方。信息传输系统无论具有哪些具体的应用以及采用怎样的配置，都需要如下 3 个主要的子系统：①发射机；②信道；③接收机。本书分析相距很远的地方之间的信息传输。但是，需要强调的是，书中介绍的系统分析技术不只是针对这类系统。

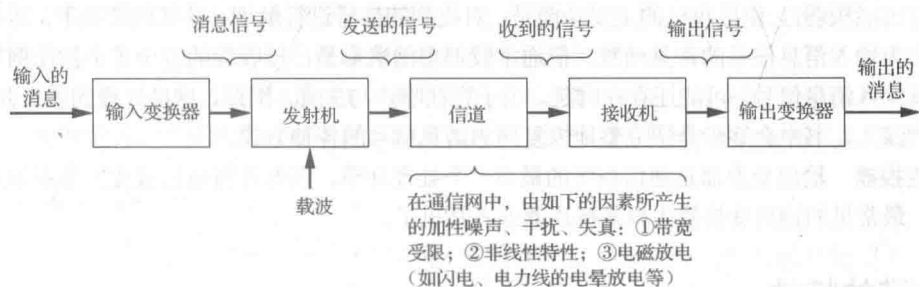


图 1.1 通信系统的方框图

下面详细地介绍图 1.1 中的每一个功能单元。

输入变换器 各种各样的信源产生多种形式的消息。无论消息采用哪一种形式，总可以将信号分为模拟信号与数字信号。可以把前者(即模拟信号)设计为：随着时间的变化，信号连续地发生变化(例如压力、温度、语音、音乐)；后者(即数字信号)可以用离散符号建模(例如，①书面文本；②对模拟信号(如语音信号)进行采样、量化、编码的处理)。几乎无一例外的是，必须由变换器将信源产生的消息的格式进行变换，使之适于所采用的通信系统的具体类型。例如，在电子通信中，麦克风将语音信号变换为变化的电压。把经历这一变换之后得到的消息称为消息信号。因此，可以将本书中的信号理解为量的变化(通常指电压或者电流随着时间的变化而变化)。

2 在实际的电报系统中，利用报务员的按键(即开关)来关闭和开启电路，点用短促的双击表示；利用报务员的按键方式来延长电路的关闭时间后，线用持续时间较长的双击表示。

3 参见 B. Oliver, J. Pierce, and C. Shannon, “PCM 的基本原理”, Proc. IRE, Vol. 16, pp. 1324 - 1331, November 1948.

4 常规通信系统更复杂(而非特例)，比如电视或者商业电台为一对多的情形，即多个接收机接收来自同一信源的信息；在多址通信系统中，由许多用户共享相同的信道(例如卫星通信系统)；多对多的通信环境最复杂，例如电话系统与因特网，这两种系统都能够众多用户的任意一对用户之间建立通信。尽管在复用与多址技术中介绍了共享资源的方法，但本书的绝大部分内容仅介绍最简单的单发单收的情形。

发射机 发射机的目的是：将消息发送到信道。尽管将输入变换器直接连接到传输介质的情形不少，但是，(比如在一些对讲机系统中)通常需要利用来自输入变换器的信号对载波进行调制。调制指的是改变系统载波的某些属性(例如幅度、频率或者相位)，使之与消息信号的变化一致。利用载波实现调制的理由有好多，其中最重要的几条理由如下：①容易传输；②减少噪声与干扰；③信道分配；④复用(或者说，几个消息信号在单个通信信道上传输)；⑤克服对设备的限制。

除调制外，由发射机完成的其他的主要功能包括滤波、放大、将已调信号发送到信道(例如，通过天线或者其他的合理设备发送到信道)。

信道 信道有许多种形式；最熟悉的信道可能是：介于商业无线电台的发射天线与收音机接收天线之间的信道。在这种信道中，发送信号经过大气(或者自由空间)的传输之后到达接收天线。发射机通过固定连接到达接收端的情形也很常见，例如大多数本地电话系统(即有线电话系统)；这种系统的信道与收音机的信道大不相同。但所有的信道都有一个共同的特性：当信号从发送端到达接收端时，信号的质量下降。尽管信号质量的下降可能出现在通信系统结构图中的任何一个地方，但通常只将其与信道联系在一起。一般来说，如下的因素会导致信号质量的下降：①噪声；②其他不需要的信号(或者干扰)；③其他的失真效应(例如衰落后的信号电平、多个传输路径、滤波)。稍后较详细地分析这些不希望出现的干扰。

接收机 接收机的功能是：在信道的输出端，从收到的信号中提取所需的信号，并且将其转换为适于输出变换器处理的形式。尽管放大可能是接收机首先完成的处理过程之一(特别是在无线通信中，收到的信号可能极弱)，但接收机的主要功能是：对收到的信号进行解调。在某些情况下，尽管期望接收端的输出为输入消息信号的常见函数，但通常较理想的情形是：接收端的输出等于按比例发生了变化的调制器输入消息信号，可能还存在时延。由于存在噪声与失真，因此，这样处理的效果并不理想。随着分析的深入，书中会逐步介绍完整地恢复理想消息信号的各种方式。

输出变换器 输出变换器是通信系统的最后一个处理环节。该器件将电信号变换为系统用户所期望的形式。最常见的输出变换器大概是扬声器或者耳机了。

1.2 信道的特性

1.2.1 各种噪声源

根据不同的来源，可以将通信系统中的噪声分为两大类。由通信系统中的元器件(例如电阻、固态电子元件)产生的噪声称为内部噪声。第二种噪声(即外部噪声)由通信系统之外的噪声源产生，包括大气噪声源、人为的噪声源、宇宙噪声源。

大气噪声主要来自于寄生的无线电波：在雷雨时的大气层内，因自然放电而产生大气噪声。通常把大气噪声称为静态噪声或者天电噪声。在频率约 100 MHz 以下时，这种无线电波的场强与频率成反比。大气噪声在时域内体现为幅度大、持续的时间短，大气噪声是典型的脉冲噪声的例子。由于大气噪声的强度与频率成反比，因此，与大气噪声对工作在 50 MHz 以上的无线电视、调频(Frequency Modulation, FM)广播的影响相比，大气噪声对工作频带为 540 kHz~1600 kHz 的商业调幅(Amplitude Modulation, AM)无线广播的影响更大一些。

人为噪声源包括高压电力线的电晕放电、电动机中的整流器产生的噪声、汽车和飞机点火启动的噪声、齿轮切换的噪声。就特性来说，点火噪声、切换噪声与大气噪声一样，也是脉冲噪声。在有线信道(例如电话信道)切换时，脉冲噪声是噪声的主要类型。对传输语音的应用而言，脉冲噪声只是让人有些不舒服；然而，在数字数据传输的应用中，脉冲噪声可能是产生严重差错的根源。

另一种重要的人为噪声源是射频发射机(这些射频发射机发射的信号并不是需要的信号)。把由干扰发射机产生的噪声称为射频干扰(Radio Frequency Interference, RFI)。当接收天线位于高密度的发射机环境下时,处理 RFI 特别麻烦(例如,在大城市的移动通信环境下,干扰发射机的数量相当大)。

宇宙噪声源包括太阳、其他的热天体(例如恒星)。由于太阳的温度高(6000°C)并且离地球近,因此影响很大。好在已经把无线信源的能量扩展到了很宽的频谱范围。同理,恒星是宽带射频噪声的根源。尽管这些恒星与地球之间的距离比太阳与地球之间的距离远得多(因此导致各个恒星所产生的噪声强度也小得多),但由于恒星的数目巨大,因此,把这些噪声汇总起来之后发现,恒星是个重要的噪声源。射电恒星(如类星体、脉冲星)也是射频噪声的重要根源。与射电天文学家们所考虑的信号源相比,通信工程师们会将这样的恒星视为另一个噪声源。太阳和宇宙噪声的频率范围介于几 MHz 与几 GHz 之间。

通信系统中的另一个干扰源是多径传输。在传输介质中,由于如下因素的作用产生了这些传输路径:①高楼、地面、飞机和轮船等物体表面的反射;②各种层次的折射。根据散射机制,由于各个发送信号产生了大量的反射分量,那么所收到的这些多径信号就成了噪声,并且四处扩散。如果多径信号分量仅由一个或者两个很强的反射分量构成,则会发生镜面反射。最后,由于传输介质中的衰减具有随机性,因此会导致通信系统中信号质量的下降。把信号经历的这种干扰称为衰减。值得注意的是,由于收到的多个信号叠加之后导致信号时强时弱,于是反射的多径信号也会发生衰减。

在电子器件内因电荷载流子的无规则运动而产生的噪声称为内部噪声。通常将其分为3种类型:①受到热运动激励后,导体内或者半导体内因自由电子的不规则运动而产生的热噪声;②在热离子管或者半导体结型器件中,因离散的电荷载流子随机到达所导致的散粒噪声;③半导体中产生的闪烁噪声(目前尚未弄清楚产生闪烁噪声的原理),频率越低,噪声越严重。第1种类型的噪声源(即热噪声)的解析模型见附录A。在采用这种模型时,附录A中还通过几个例子给出了系统所具有的特性。

1.2.2 传输信道的类型

有多种类型的信道。这里介绍如下3种常见信道的特性、优缺点:①电磁波传输信道;②导向型电磁波传输信道;③光纤信道。下面根据电磁波的传输对这3种传输信道的特性进行分析。由于每一种信道的特性与应用各不相同,因此分别介绍。

1. 电磁波传输信道

1864年,苏格兰数学家詹姆斯·克拉克·麦克斯韦(1831~1879)根据迈克尔·法拉第的实验工作,在他的理论中给出了电磁波可以传输的预测。德国物理学家海因里希·赫兹(1857~1894)在1886~1888年进行的实验中利用快速振荡的火花产生了电磁波,因而从实验上证明了麦克斯韦的预测。所以,19世纪的后半叶为利用电磁波传输的许多现代发明(例如,收音机、电视、雷达)奠定了物理基础。

电磁波传输所涉及的基本原理是:利用辐射单元(即天线)将电磁波的能量耦合到传输介质中,可以把自由空间(或者大气)用作传输介质。根据天线的实际配置和传输介质的特性,电磁波的传输存在多种传输模式。最简单的情形是(从未出现在实际应用中):从面的角度来说,来自单点信号源的电磁波在无限的介质中传输。在这种情况下,传输的波前(相位恒定的各个平面)为同心球。从遥远的宇宙飞船向地面传输电磁能量时,可以采用这种模型。另一个理想模型是垂直于无限大平板导体的导线,该模型与商用广播天线的无线电波传输相似。本书的电磁理论中分析了这些模型以及其他的理想模型。这样处理的目的是并不是归纳所有的理想模型,而是在各种实际信道中强调传输现象的基本知识。

除了太空中两个宇宙飞船之间电磁波传输的例子,在发射机与接收机之间的传输介质不可能近似于自由空间。地面通信链路除了与所涉及的距离、辐射信号的频率有关,还与图1.2中所示的如