

国外信息科学经典教材

Prentice
Hall

数字通信基础

(原书第2版)

Introduction to Digital Communication

(美) Rodger E. Ziemer 著
Roger L. Peterson

尹长川 郝建军 罗 涛 等译
乐光新 审



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

国外信息科学经典教材

数字通信基础

(原书第2版)

(美) **Rodger E. Ziemer** 著
Roger L. Peterson

尹长川 郝建军 罗 涛 等译
乐光新 审



机械工业出版社

本书是国外众多重点大学电子工程专业高年级本科生和低年级研究生选用的教材。全书较系统地讲述了数字通信的基本理论。主要内容包括：信号和线性系统理论、调制和噪声、基本数字通信系统、数字数据传输中的信号空间方法、数字通信中的信道损耗、信息论和分组编码的基本原理、卷积码基础、自动重传请求系统原理、扩频通信系统、蜂窝无线通信基础、卫星通信等。本书可作为通信与信息类专业高年级本科生及相关专业研究生的教学用书或参考书，也可供通信领域从事研究与开发的工程技术人员参考。

Original English language title: Introduction to digital communication/Rodger E.Ziemer, Roger L.Peterson. — 2nd ed.

ISBN: 0-13-896481-5

Copyright © 2001 by Prentice-Hall, Inc.

Simplified Chinese edition copyright © 2004 by China Machine Press and Pearson Education North Asia Limited.

All rights reserved.

本书中文简体字版由美国 Pearson Education (培生教育出版集团)授权机械工业出版社在中国大陆境内独家出版发行，未经出版者许可，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。

北京市版权局著作权合同登记号：图字：01-2002-6210

图书在版编目(CIP)数据

数字通信基础/(美)齐默(Ziemer, R.E.),
彼得森(Peterson, R.L.)著;尹长川等译. —北京:
机械工业出版社, 2005.1

国外信息科学经典教材

ISBN 7-111-15304-9

I. 数... II. ①齐...②彼...③尹... III. 数字通
信—教材 IV. TN914.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 096768 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
责任编辑:车 忱 版式设计:霍永明 责任校对:刘志文
封面设计:刘吉维 责任印制:施 红

北京铭成印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2005 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

787mm × 1092mm 1/16 · 40 印张 · 1041 千字

0001—3000 册

定价: 69.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68993821、88379646

68326294、68320718

封面无防伪标均为盗版

译者序

本书是一本著名的通信系统原理教材。它的第一版出版于1985年,书名为《Digital Communications and Spread Spectrum Systems》(数字通信与扩频通信系统)。第一作者 R. Ziemer 是美国科罗拉多大学(科罗拉多斯普林斯校区)电机工程系教授,以他长期从事通信理论和通信系统方面的教学工作积累的资料和经验写成的这本教材,受到广泛的重视,被许多学校选作本科高年级和研究生通信系统原理课程的教材。本书是根据经过彻底修改的第二版(出版于2001年)翻译的,书名改为《Introduction to Digital Communication》(数字通信基础),与第一版相比,主要在以下三方面作了重大的修改和补充:

1) 大大加强了数字通信的基础理论内容,这一部分大体上与国内普通高校《通信原理》的内容相当。

2) 增加了三章篇幅,用于介绍信息论基础、分组码、卷积码和 ARQ 系统。

3) 通信系统部分由原来只讲扩频系统,新增了两章分别用于介绍蜂窝无线通信系统和卫星通信系统。

可以看出,全书几乎是重新写过,系统性和覆盖面都得到了加强,全书内容更完整,适应面更宽了。

作为教材,本书强调基本概念的准确和原理叙述的完整,所举例子和使用的图表都经过仔细选择,每章末附有大量习题便于读者学习和理解。本书第4章把现代通信传输理论中常用的信号空间方法引入教材(本书第1版就做了这样的处理),体现了本书独有的特色。这给学习者(特别是研究生)提供了掌握现代通信分析方法的很好的基础。本书还重视在相关的章节中介绍通信技术的最新进展,当前通信技术的许多热点,如:OFDM、Turbo 编码、多用户检测等的基本概念和基本理论在本书中也都能找到。

本书是为普通高校本科高年级学生和低年级研究生写的。他们通过本书的学习一定会对通信系统的构成原理有一个系统深入的了解,为他们的发展打下坚实的基础。另一方面,从前面的介绍可看出:本书对从事通信工程的科技工作者和工程师,特别是从事研究开发的工程师,不仅可作为深入学习的蓝本,也可作为实际工作中的参考书。

本书由北京邮电大学电信工程学院尹长川副教授主持翻译,参加翻译工作的还有郝建军副教授、罗涛副教授、纪红教授、桑林副教授,以及博士研究生滕勇、吴军力、邓建民、侯晓林等同学,最后由尹长川、罗涛负责全书的统稿。乐光新教授审阅了全部译稿,并提出了若干改进意见。感谢实验室的硕士研究生许一波、陈昌海、李政东、刘万华、刘江华、李书博、夏德荣、路遥等同学在译稿整理过程中提供的帮助。

由于本书涉及面广,且译者水平有限,错误之处在所难免,欢迎读者批评指正。

译者

前 言

构成本书的理念与第一版完全相同，就是特别注重在坚实的数学基础上根据所关注的不同专题的大量文献来介绍数字通信的基础知识。在本书的前八章中讨论了数字调制和编码的基本理论，接下来分三章介绍三个另外的专门领域，即扩频、蜂窝和卫星通信。本书的目的是不仅为数字通信的基本理论提供坚实的基础，而且对近年来为许多应用提供基础的三个领域进行了介绍，同时指出了当前受到广泛关注的研究方向。例如，扩频通信包括的一些子领域：具有良好相关性的码字族、多用户检测、用于分解多径信道的超宽带通信等。蜂窝无线电系统提供了许多研究领域，如多用户通信系统的容量优化和支持混合速率业务的方法。随着低轨道移动话音通信系统(其中的一种已实现)、卫星导航系统和小口径天线系统应用的提出，卫星通信重新引起了人们的兴趣。采用本书的这种体系结构，我们认为对通信企业中具有实际经验的工程师和在校的三年级本科生或一年级研究生来说，其兴趣都会得到满足。对前者来说，本书向其提供了工作中复习或自学的重要专题；而对于后者，则为他们提供了可能进一步深入研究的专题所需要的基础理论背景。

几乎所有电气工程专业大学三年级的学习计划中都包括一门有关线性系统的课程，本书也是在这样的假设下编写的。但是，由于这些线性系统课程的内容随学习计划的不同而不同，因此在本书的第2章中包括了对线性系统的概述。提供这方面信息的另外一个原因是为书中后续内容所使用的符号和特定信号进行定义。

作者的另一个假设是认为采用本书上课的学生一般都修过初等概率论课程。这类课程通常还包括统计学和随机过程的一些专题内容。但是，由于不同的学习计划对这些专题的覆盖范围不尽相同，因此在本书的第2章中还包括了有关随机过程的必要内容。对于那些可能还没修过概率论课程的学生，我们的建议是在使用本书作教材的课程之前应该先修概率论。但是，对于不希望这样做的非常勤奋的学生，或者在很久之前已修过概率论课程的学生们，我们在本书的附录A中为其提供了概率论必要专题的简单概述。这些材料可以结合第1章的内容一起进行复习，并且直到第2章的后半部分，讲到随机过程时才会用到。

本书在第1章中首先介绍了数字通信系统的一般特征，接下来对信道特性进行了简要介绍，并介绍了链路功率计算。后一主题还会在第10章和第11章中分别结合蜂窝无线链路和卫星通信链路再次进行讨论。第1章中有关本专题的介绍

提供了通信系统的性能要求和发送机发送功率要求之间的联系,通信系统的性能要求是由接收机输入端的信噪比来衡量的,而发送机的功率要求则取决于预期的性能和信道的衰减特性。

如前所述,第2章是信号和系统理论、模拟调制以及随机过程的回顾。除了对基本信号和公共符号进行了定义外,还用实例描述了一个噪声通过线性系统(巴特沃兹(Butterworth)滤波器)的非常简单的仿真过程。该实例建立了在第3章所要用的对简单数字通信系统进行仿真的方法。随后在第3章的几个练习题中应鼓励学生进行自己的仿真练习。

第3章介绍数字数据传输的内容。假定接收机的结构是由一个线性滤波器紧接一个门限检测器所组成,通过使接收机输出端的信号峰值和噪声的均方根值之比极大化对接收机滤波器进行优化,导出了经典匹配滤波器接收机的概念。在本章中考虑的数据传输方案均为二进制。虽然最先我们考虑的信道具有无限带宽,但最终我们也考虑了带宽严格受限情况下的最优系统。接下来讨论了用于补偿符号间干扰的均衡方法,这些符号间干扰是由信道带宽受限所引起的。在本章的最后简单讨论了有限带宽信道的信号设计和脉冲编码调制系统中的噪声影响。

第4章的目的是为第3章所介绍的数字调制系统提供坚实的理论基础,并将取得的结果在几个方向上加以扩展。所采用的方法是基于信号空间语言的贝叶斯(Bayes)检测。假定背景噪声是加性和白色的,在这样的情况下,允许使用生成信号空间的任意正交基函数集,这就给出了数字信号接收过程的一张非常清晰的几何图画。作为第3章内容的扩展,第4章考虑了M进制数字数据传输并对适合于实际信道的调制方案进行了清楚的讨论。为了提供对M进制系统进行比较的基础,介绍了等效比特错误概率和按每赫兹每秒比特数的带宽有效性的概念。在本章的最后还介绍了几个设计问题的例子,并对正交频分复用的基本内容进行了介绍。

有了第4章所建立的理想系统,第5章讨论了几个方面的专题,这些专题可以看作是引起理想系统性能下降的主要原因。首先讨论了不同层次(即载波、比特和帧)上的同步方法,以及不理想的载波同步所引起的性能下降。接下来描述了衰落信道的影响并讨论了克服衰落的分集传输技术。在本章的最后讨论了作为表征通信系统性能手段的包络图、眼图和相位图,并描述了这些图形的计算机仿真产生方法。

第6章到第8章讨论的主题是编码。在第6章中考虑了信息论和分组编码的基本原理,而第7章讨论了卷积码的基本原理。虽然遮第6和第7章中给出了理论基础,但其潜在的主要目的还是系统应用。在第6和第7章中所考虑的编码技术都根据以下两个方面对其进行了描述,即:它们所引起的在达到预期的比特差错概率时所需信噪比值(功率有效性)降低的能力以及每赫兹带宽所能支持的每秒比特数(带宽有效性)。第8章对另外一种被称为自动请求重传(ARQ)的差错控制方案进行了简单讨论,该方案中使用了反馈信道。

第9章对扩频通信系统进行了概述。讨论了当接收到来自多个用户的信号情况下多用户检测的概念,该检测过程考虑了信号的统计特性,并讨论了多用户检测比将其它用户信号看作噪声时所获得的检测器性能有所改善。

第10章讨论蜂窝无线通信。本章介绍了蜂窝的概念以及在这些系统中造成性能降低的主要因素,包括其它用户干扰和多径衰落。讨论了第一代和第二代蜂窝系统,并给出了一个精彩的实例,说明由于若干原因造成了模拟向数字传输的转变。

作为近年来数字通信的概念及其应用已得到广泛使用的例子,第11章讨论了卫星通信。本章首先用几个设计实例说明了卫星通信的概念,然后汇总了用于移动电话通信的几种低轨道卫星通信系统。

本书的第一版多年来已成功地为有能力的本科生和一年级研究生开设数字通信课程。一般情况下,在讲述完第1章的序言之后,要花一些时间对信号、系统和随机过程进行复习,然后讲述基本的数字调制理论和编码技术(第3~7章)。在课程的一开始就要强调计算机仿真的使用,在大约期中的时候,布置一道计算机仿真的课程设计题目,让学生在整個学期內完成。每周都应布置习题并进行计分。在期中的时候进行一次课堂闭卷期中考试以督促学生们熟练掌握基本的随机过程、调制和数字检测原理(通常,期中考试在第3章末进行)。根据计算机课程设计的覆盖范围和课堂上学生们的表现,可以决定是否有必要进行期末考试。

我们感谢为本书直接或间接作出贡献的许多人。这其中包括分布在世界各地的我们的同事。我们要特别感谢赛克(SAIC)公司的大卫·基赛克(David Kisak)对本书第6~8章的仔细审阅和建设性的批评意见,感谢尼克·亚历山德拉(Nick Alexandru)对本书第一版若干例题的修正,感谢哈里斯(Harris)公司的杰瑞·博兰德(Jerry Brand)和摩托罗拉(Motorola)公司的约翰·哈格(John Haug)对本书第10章的阅读和建设性的批评意见。感谢海军研究部(Office of Navy Research)对罗杰·齐默(Rodger Ziemer)的研究资助,从而也间接地支持了本书的写作。同样也感谢国家科学基金会为罗杰·兹默提供的研发时间,在本书第二版的写作过程中罗杰·兹默是该基金会的计划官员。我们还要感谢本书审阅者们的有益批评和建议,其中的大多数已经被本书采纳。特别地,我们要感谢以下教授为本书第一版所提供的帮助,他们是:南加里福尼亚大学的维基·钱恩(Vijay K. Jain),科罗拉多大学布尔德(Boulder)分校的皮特·麦斯(Peter Mathys),加利福尼亚大学圣地亚哥分校的劳伦斯·梅尔斯顿(Laurence B. Milstein),佛罗里达大学的培通·皮堡(Peyton Z. Peebles)教授,弗吉尼亚理工学院的威廉·特兰特(William Tranter)。我们还要感谢德克萨斯技术大学的默哈默德·马库斯(Mohammad Maqusi)和巴克耐尔(Bucknell)大学的理查德·考兹克(Richard Kozick)对本书第二版所提供的帮助。

本书现存的任何错误和不足均为本书作者的责任。

最重要地,我们要感谢我们的妻子,桑迪·齐默(Sandy Ziemer)和安·克拉克

(Ann Clark)，感谢她们在本书第1版和第2版写作过程中所持有的耐心，第二作者还要感谢他的女儿黛安·彼得森(Diane Peterson)的爱和在本书写作过程中的支持。第一作者希望特别提及他的孩子们，艾美·齐默-尼尔森(Amy Ziemer-Nilson)和马克·齐默(Mark Ziemer)，显然他们对作者写作活动的注意超出了作者的想像。他们两个现在也已成为作者了。

罗杰·齐默(Rodger Ziemer)

罗杰·彼得森(Roger Peterson)

2000年1月17日

目 录

译者序		复指数信号; 频率响应函数	33
前言		2.1.5 正交函数序列	34
第1章 数字数据传输导论	1	2.1.6 复指数傅里叶级数	35
1.1 引言	1	2.1.7 傅里叶变换	37
1.2 数字通信系统组成	3	2.1.8 信号频谱	40
1.2.1 一般考虑	4	2.1.9 能量关系	41
1.2.2 典型通信系统中的子系统	4	2.1.10 系统分析	42
1.2.3 通信链路的容量	6	2.2 基本模拟调制技术	42
1.3 通信信道建模	8	2.2.1 双边带调制	42
1.3.1 引言	8	2.2.2 Hilbert 变换; 单边带调制	44
1.3.2 特定通信信道举例	9	2.2.3 角度调制	46
1.3.2.1 传播信道	9	2.3 带通信号与系统的复包络表示	49
1.3.2.2 地面链路	10	2.3.1 带通信号	49
1.3.2.3 光盘(CD)信道	11	2.3.2 带通系统	50
1.3.3 通信信道建模方法	11	2.4 信号失真及滤波	52
1.3.3.1 离散信道方法	11	2.4.1 无失真传输和理想滤波器	52
1.3.3.2 通信信道的波形描述	12	2.4.2 群时延和相位时延	53
1.3.4 通信信道中的干扰和失真	13	2.4.3 非线性系统与非线性失真	58
1.3.5 对外部信道传播的若干考虑	18	2.5 实用滤波器的类型和特征	61
1.4 通信链路功率计算	19	2.5.1 常用术语	61
1.4.1 通信系统性能计算中的分贝	20	2.5.2 巴特沃兹滤波器(最平坦)	62
1.4.2 通信系统中的功率电平计算; 链路预算	20	2.5.3 切比雪夫滤波器(等波纹)	63
1.5 通信的驱动力	23	2.5.4 贝塞尔滤波器(最平坦时延)	65
1.6 计算机在通信系统分析和 设计中的使用	24	2.6 抽样定理	65
1.7 本书预览	25	2.6.1 低通抽样定理	65
参考文献	26	2.6.2 非理想因素对抽样的影响	68
习题	27	2.6.3 带通信号的抽样	68
第2章 信号、系统、调制和噪声	31	2.6.4 降低对滤波器要求的 过抽样和减抽样	69
2.1 信号和线性系统理论回顾	31	2.6.5 脉冲编码调制	69
2.1.1 引言	31	2.6.6 差分脉冲编码调制	72
2.1.2 信号的分类	31	2.7 随机过程	72
2.1.3 系统的基本性质	32	2.7.1 随机过程的数学描述	72
2.1.4 时不变线性系统的特征函数——		2.7.2 具有随机输入的线性时不变系统的 输入输出关系; 功率谱密度	77

2.7.2.1 部分描述	77	3.4.5 其他均衡器结构	133
2.7.2.2 线性系统的输出统计特性	79	3.4.6 均衡器的性能	134
2.7.2.3 中心和非中心 χ^2 分布	81	3.5 数字通信系统仿真举例	136
2.7.3 随机过程的例子	82	3.6 脉冲编码调制中的噪声影响	139
2.7.4 窄带噪声的表示	83	3.7 本章小结	143
2.7.5 窄带高斯过程包络的分布	85	参考文献	144
2.8 随机变量的计算机产生	87	习题	145
2.8.1 引言	87	第 4 章 数字数据传输中的	
2.8.2 具有特定分布的随机变量 的产生	87	信号空间方法	147
2.8.3 仿真白噪声过程的功率谱	89	4.1 引言	147
2.8.4 伪噪声序列的产生	92	4.2 基于矢量空间的最佳接收机原理	149
2.9 本章小结	94	4.2.1 最大后验概率检测器	149
参考文献	97	4.2.2 信号的矢量空间表示	151
练习	97	4.2.2.1 接收波形的 K 维 信号空间表示	151
第 3 章 基本数字通信系统	102	4.2.2.2 标量积	152
3.1 引言	102	4.2.2.3 格兰姆—施密特方法	153
3.2 二进制数字通信问题	102	4.2.2.4 许瓦兹不等式	154
3.2.1 AWGN 中的二进制信号检测	102	4.2.2.5 帕斯瓦尔定理	154
3.2.2 匹配滤波器	105	4.2.3 信号空间中的 MAP 检测器	156
3.2.3 匹配滤波器在二进制数据 检测中的应用	107	4.2.4 MAP 接收机性能计算	158
3.2.3.1 P_E 的一般公式	107	4.3 相干数字传输方式下的性能分析	160
3.2.3.2 双极性基带信号	108	4.3.1 相干二进制系统	160
3.2.3.3 基带正交信号	109	4.3.2 相干 M 进制正交信号 传输方式	161
3.2.3.4 基带启闭信号	109	4.3.3 M 进制相移键控	163
3.2.4 匹配滤波器接收机的 相关器实现	111	4.3.4 正交幅度调制	165
3.3 信号通过带宽受限信道	112	4.4 接收机不需要相干参考的传输方式	169
3.3.1 系统模型	112	4.4.1 非相干频移键控	169
3.3.2 无符号间干扰设计: 奈奎斯特 脉冲成形准则	114	4.4.2 差分相移键控	171
3.3.3 最佳的发送和接收滤波器	116	4.5 数字调制系统的比较	176
3.3.4 发送信号频谱的成形	119	4.5.1 由符号错误概率得到 比特错误概率	176
3.3.5 双二进制信号	121	4.5.2 M 进制数字通信系统的 带宽有效性	178
3.4 数字数据传输系统中的均衡	123	4.6 功率和带宽等价基础上 M 进制数字 调制方案的比较	179
3.4.1 引言	123	4.6.1 相干数字调制方案	179
3.4.2 迫零均衡器	123	4.6.2 非相干数字调制方案	181
3.4.3 最小均方误差均衡器	127	4.7 几种常用的调制方案	183
3.4.4 自适应权值调整	130		

4.7.1 正交复用信号方案	183
4.7.1.1 正交复用	184
4.7.1.2 正交和偏移正交四相 相移键控	185
4.7.1.3 最小频移键控	186
4.7.1.4 数字正交调制系统的性能	186
4.7.2 高斯 MSK	189
4.7.3 $\pi/4$ -D QPSK	189
4.7.4 正交调制方案的功率谱	191
4.8 设计实例与系统选择	193
4.9 多指数连续相位调制	198
4.9.1 多指数 CPM 信号模式的描述	199
4.9.2 多指数 CPM 信号功率谱 的计算	203
4.9.3 多指数 CPM 信号的同步	206
4.10 正交频分复用	207
4.10.1 简介	207
4.10.2 OFDM 的思想	208
4.10.3 DFT 实现 OFDM 的数学描述	209
4.10.4 衰落对 OFDM 检测的影响	212
4.10.5 OFDM 中的参数选择和 实现问题	214
4.10.5.1 对抗时延扩展的 OFDM 符号速率	214
4.10.5.2 在 OFDM 中实现分集	214
4.10.5.3 实现问题	214
4.10.6 OFDM 波形仿真	215
4.11 本章小结	215
参考文献	218
习题	220
第 5 章 数字通信中的信道损耗	224
5.1 引言	224
5.2 通信系统中的同步	224
5.2.1 载波同步	224
5.2.2 符号同步	231
5.2.3 帧同步	232
5.3 信号慢衰落对通信系统的影响	234
5.3.1 瑞利衰落信道中二进制 调制方案的性能	234
5.3.1.1 引言	234

5.3.1.2 瑞利慢衰落中的比 特差错率性能	234
5.3.1.3 衰落中使用路径分集以 提高性能	235
5.3.1.4 中等瑞利快衰落中 DPSK 调制的性能	239
5.3.2 慢衰落中 M 进制调制的性能	243
5.3.2.1 引言	243
5.3.2.2 瑞利慢衰落中 M 进制 PSK 和 DPSK 调制的性能	243
5.3.2.3 莱斯慢衰落中 M 进制 PSK 和 DPSK 调制的性能	245
5.3.2.4 莱斯慢衰落中 M 进制 QAM 的性能	247
5.3.2.5 莱斯慢衰落中 M 进制 非相干 FSK 的性能	247
5.3.3 慢衰落中采用分集的 M 进制 BPSK 和 DPSK 的性能	251
5.3.3.1 瑞利衰落	251
5.3.3.2 莱斯衰落	252
5.4 用于通信系统设计的诊断工具	256
5.4.1 引言	256
5.4.2 眼图	256
5.4.3 数字调制方法的包络函数	256
5.4.4 数字调制系统的矢量图	259
5.5 本章小结	262
参考文献	263
习题	264
第 6 章 信息论和分组编码的 基本原理	267
6.1 引言	267
6.2 信息论的基本概念	268
6.2.1 信源编码	268
6.2.2 莱姆培尔-日杰夫编码算法	272
6.2.3 信道编码和信道容量	279
6.2.3.1 概述	279
6.2.3.2 仙农信道容量公式	280
6.2.3.3 离散无记忆信道的 信道容量	281
6.2.3.4 可计算截止率	283

6.3 分组编码基础	285	6.4 慢衰落信道上的编码性能	326
6.3.1 基本概念	286	6.5 本章小结	330
6.3.1.1 分组编码的定义	286	参考文献	336
6.3.1.2 汉明距离和汉明重量	286	习题	337
6.3.1.3 错误矢量	287	第7章 卷积码基本原理	342
6.3.1.4 最佳译码准则	288	7.1 引言	342
6.3.1.5 译码区域与错误概率	289	7.2 基本概念	342
6.3.1.6 编码增益	291	7.2.1 卷积码的定义	342
6.3.1.7 小结	292	7.2.2 卷积码的译码	346
6.3.2 线性码	292	7.2.3 软判决的潜在编码增益	348
6.3.2.1 模2矢量运算	292	7.2.4 卷积码的距离特性	351
6.3.2.2 二进制线性矢量空间	293	7.3 维特比算法	354
6.3.2.3 线性分组编码	295	7.3.1 硬判决译码	354
6.3.2.4 系统线性分组编码	297	7.3.2 软判决译码	358
6.3.2.5 线性分组编码的距离特性	298	7.3.3 译码错误概率	360
6.3.2.6 用标准阵列译码	298	7.3.4 比特错误概率	361
6.3.2.7 线性码的错误概率	302	7.4 好的卷积码及其性能	362
6.3.3 循环码	306	7.5 其他主题	365
6.3.3.1 循环码的定义	306	7.5.1 序列译码	365
6.3.3.2 多项式运算	306	7.5.2 门限译码	365
6.3.3.3 循环码的性质	308	7.5.3 里德-所罗门/卷积级联码	365
6.3.3.4 循环码的编码	309	7.5.4 凿孔卷积码	366
6.3.3.5 循环码的译码	310	7.5.5 网格编码调制	369
6.3.4 汉明码	310	7.5.6 Turbo 码	372
6.3.4.1 汉明码的定义	310	7.5.7 应用	374
6.3.4.2 汉明码的编码	312	7.6 本章小结	375
6.3.4.3 汉明码的译码	313	参考文献	377
6.3.4.4 汉明码的性能	313	习题	379
6.3.5 BCH 码	317	第8章 自动重传请求系统原理	382
6.3.5.1 BCH 码的定义和编码	317	8.1 简介	382
6.3.5.2 BCH 码的译码	319	8.2 基本原理	382
6.3.5.3 BCH 码的性能	321	8.3 三种 ARQ 策略	383
6.3.6 里德-所罗门码	323	8.3.1 停止等待 ARQ	383
6.3.6.1 里德-所罗门码的定义	323	8.3.1.1 基本原理	383
6.3.6.2 RS 码的译码	323	8.3.1.2 吞吐量计算	384
6.3.6.3 RS 码的性能	323	8.3.2 连续 ARQ	387
6.3.7 高莱码	324	8.3.2.1 基本原理	387
6.3.7.1 高莱码的定义	324	8.3.2.2 吞吐量计算	388
6.3.7.2 高莱码的译码	325	8.3.3 选择重传 ARQ	390
6.3.7.3 高莱码的性能	325	8.3.3.1 基本原理	390

8.3.3.2 吞吐量计算	390	脉冲干扰下的差错概率	440
8.4 差错检测码	392	9.8 多用户环境下的性能	442
8.4.1 基本原理	392	9.9 多用户检测	445
8.4.2 汉明码	394	9.10 扩频系统举例	449
8.4.3 BCH 码	395	9.10.1 航天飞机频谱解扩器	449
8.4.4 高莱码	395	9.10.2 全球定位系统	451
8.5 本章小结	396	9.11 本章小结	453
参考文献	397	参考文献	454
习题	398	习题	456
第 9 章 扩频系统	400	第 10 章 蜂窝无线通信基础	460
9.1 引言	400	10.1 简介	460
9.2 两个通信问题	401	10.2 频率重用	461
9.2.1 脉冲噪声干扰	401	10.3 信道模型	465
9.2.2 低检测概率	402	10.3.1 路径损耗和阴影衰落模型	466
9.3 扩频系统的种类	404	10.3.1.1 自由空间路径损耗	466
9.3.1 BPSK 直接序列扩频	404	10.3.1.2 平坦地面路径损耗	467
9.3.2 QPSK 直接序列扩频	411	10.3.1.3 奥村/羽田路径衰减模型	469
9.3.3 非相干慢跳频扩频	414	10.3.1.4 对数正态阴影衰落	470
9.3.4 非相干快跳频扩频	416	10.3.2 多径信道模型	471
9.3.5 混合直接序列/跳频扩频	418	10.3.2.1 瑞利衰落(不可分 解多径)模型	473
9.4 扩频系统的复包络表示	419	10.3.2.2 莱斯(不可分解)模型	484
9.5 伪随机序列的产生和特性	422	10.3.2.3 小结	487
9.5.1 定义和数学背景	422	10.3.2.4 可分解多径分量	487
9.5.2 m 序列发生器的结构	424	10.3.2.5 WSSUS 信道的数学模型	488
9.5.3 m 序列的特性	424	10.4 减轻多径衰落的技术	491
9.5.4 m 序列的功率谱	426	10.4.1 引言	491
9.5.5 产生 m 序列的多项式表	427	10.4.2 空间分集	493
9.5.6 m 序列的安全性	429	10.4.3 频率分集	494
9.5.7 戈德码	430	10.4.4 时间分集	495
9.5.8 卡萨米序列(小集合)	432	10.4.5 多径分集和 RAKE 接收机	495
9.5.9 四元(四相)序列	432	10.5 系统设计和性能预测	497
9.5.10 沃尔什码	434	10.5.1 引言	497
9.6 扩频系统的同步	434	10.5.2 性能评价准则	498
9.7 干扰环境下扩频系统的性能	437	10.5.3 频率重用	499
9.7.1 引言	437	10.5.4 实际小区的几何形状	501
9.7.2 干扰类型	437	10.5.5 干扰平均	501
9.7.3 对抗智能干扰源	437	10.6 先进移动电话业务	503
9.7.4 阻塞噪声干扰情况下的 错误概率	438	10.6.1 引言	503
9.7.5 经过优化的部分带宽干扰或		10.6.2 呼叫建立和控制	504

10.6.3 调制和信令格式	505	附录	566
10.7 全球移动通信系统	507	附录 A 概率和随机变量	566
10.7.1 引言	507	A.1 概率理论	566
10.7.2 系统概述	508	A.1.1 定义	566
10.7.3 调制和信令格式	509	A.1.2 公理	566
10.7.4 小结和另外的评注	513	A.1.3 联合、边际和条件概率	567
10.8 码分多址	514	A.2 随机变量、概率密度函数以及均值	568
10.8.1 引言	514	A.2.1 随机变量	568
10.8.2 前向链路描述	517	A.2.2 概率分布和密度函数	568
10.8.3 反向链路描述	521	A.2.3 随机变量的均值	571
10.8.4 CDMA 的容量	524	练习	571
10.8.5 另外的评注	527	A.3 特征函数和概率母函数	572
10.9 推荐读物	528	A.3.1 特征函数	572
10.9.1 蜂窝的概念和系统	528	A.3.2 概率母函数	574
10.9.2 信道建模和传播	529	A.4 随机变量的变换	575
10.9.3 结束语	530	A.4.1 一般结论	575
参考文献	530	A.4.2 高斯随机变量的线性变换	578
习题	532	A.5 中心极限定理	579
第 11 章 卫星通信	536	参考文献	579
1.1 引言	536	习题	579
11.1.1 卫星通信简史	536	附录 B 内部噪声的特性	582
11.1.2 基本概念和术语	537	参考文献	585
11.1.3 轨道的关系	539	习题	585
11.1.4 天线覆盖	540	附录 C 大气中的气体成分和降雨引起 的无线电波传输损耗	586
11.2 卫星传输资源的分配	541	附录 D 相干参考的产生	589
11.2.1 FDMA	541	D.1 介绍	589
11.2.2 TDMA	542	D.2 对相位噪声及其性质的描述	589
11.2.3 CDMA	545	D.2.1 一般考虑	589
11.3 链路功率预算分析	546	D.2.2 相位和频率噪声功率谱	589
11.3.1 弯管中继	546	D.2.3 艾伦方差	592
11.3.2 解调/再调制(再生)数字 转发器	548	D.2.4 倍频器或分频器对相位 噪声频谱的影响	593
11.3.3 相邻信道干扰	549	D.3 锁相环模型和工作特性	594
11.3.4 相邻卫星干扰	550	D.3.1 同步模式: 线性工作	594
11.3.5 受限转发器中的功率划分	551	D.3.2 噪声的影响	596
11.4 链路功率预算的计算举例	553	D.3.3 带有相位噪声振荡器的 锁相环跟踪	600
11.5 中低地球轨道话音消息卫星系统	561	D.3.4 相位抖动加噪声的影响	601
11.6 本章小结	562	D.3.5 瞬时响应	602
参考文献	563		
习题	564		

D.3.6	锁相环的捕获	604
D.3.7	传输时延的影响	607
D.4	频率合成	607
D.4.1	数字合成器	608
D.4.2	直接合成	609
D.4.2.1	结构	609
D.4.2.2	直接合成器中寄生频率 成分的产生	609
D.4.3	锁相频率合成器	611
D.4.3.1	结构	611
D.4.3.2	输出相位噪声	611
D.4.3.3	间接合成器的寄生产物	612

参考文献	612
习题	613
附录 E 高斯概率函数	616
参考文献	617
附录 F 数学表	618
F.1 sinc 函数	618
F.2 三角恒等式	618
F.3 不定积分	619
F.4 定积分	620
F.5 级数展开	621
F.6 傅里叶变换的性质	622
F.7 傅里叶变换对	622

第 1 章 数字数据传输导论

1.1 引言

在本书中我们关心的是利用数字通信技术通过电子手段进行的信息传输。信息可以通过数字或者模拟通信系统从一点传送到另一点。在数字通信系统中,信息经过处理可以表示为离散消息的序列。图 1-1 中的数字信源可以是模拟信源,比如语音,经过抽样和量化而得到的结果,也可以是本来就代表一个数字信源,比如一个电子邮件文件。在每种情况下,每个消息都是包含 q 个消息的有限集合中的一个元素。如果 $q = 2$,该信源称为二进制信源,信源输出的两种可能的数值称为比特(bit),其中英文单位 bit 是 binary digit 的缩写。还要注意的是不论信源是离散的还是模拟的,其输出本身都具有随机性。如果信源的输出不具有随机性,那么我们就没有必要使用通信系统。

我们进一步考虑数字信息取自模拟信源的情况,例如,一个传感器,其输出电压在任意给定的时刻都可以假定取连续值。这种波形可以按以下的过程来进行处理:首先在适当间隔的时刻进行抽样,然后对这些抽样进行量化,再将每一个经过量化的样值转换为二进制数(这就是一个模/数转换器)。这样,每个样值都可以表示为一个由 1 和 0 组成的序列,然后通信系统将消息 1 用传送信号 $s_1(t)$ 来表示,将消息 0 用传送信号 $s_0(t)$ 来表示。在每个信号的传送间隔内,或者传送消息 0,或者传送消息 1,不存在其他的选择。实际上,传送信号 $s_0(t)$ 和 $s_1(t)$ 可以采用以下的方式来进行(也可以采用其他的表示方式):

- (1) 利用两种不同幅度的正弦信号,例如,幅度取 A_0 和 A_1 ;
- (2) 利用两种不同相位的正弦信号,例如,相位取 $\pi/2$ 和 $-\pi/2$ 弧度;
- (3) 利用两种不同频率的正弦信号,例如,频率取 f_0 和 f_1 赫兹。

另一方面,在一个模拟通信系统中,传感器的输出可以直接用来改变传送信号的某些特性,如幅度,相位,或者频率,被选定的参数在一个连续值范围内变化。

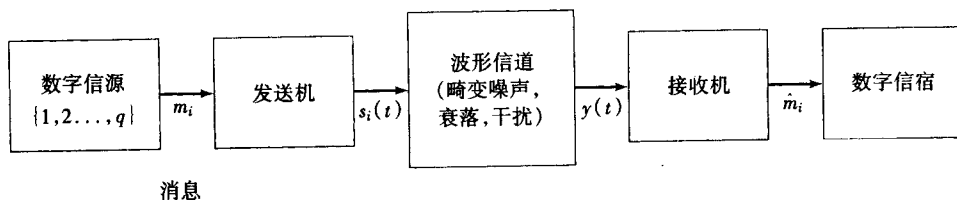


图 1-1 数字通信系统简化框图

有趣的是,信息的数字传输在历史上要早于模拟传输。自古以来,军事上就使用烽火、旗语和反射阳光来传递信号。电报(一种数字数据传输设备)的发明要比电话(一种模拟通信工具)的发明早 35 年多^①。

① 电报是在 1837 年由美国的塞缪尔·莫尔斯(Samuel F. B. Morse)和英国的查尔斯·惠斯通(Charles Wheatstone)爵士共同发明的,在 1844 年传送了第一份公用电报。1876 年,亚历山大·格雷厄姆·贝尔(Alexander Graham Bell)发明了电话。

电话发明之后,模拟传输似乎变成了电子通信的主流。这种状况维持了将近一个世纪,直到今天,当数字传输正在取代传统的模拟传输领域时,情况还是这样。转向数字通信的理由有以下几点:

(1) 在 20 世纪 40 年代末,人们认识到在适当的距离间隔上采用再生中继器基本上可以无差错地重建数字信号^①。也就是说,在数字通信链路上噪声的影响和信道所引入的失真几乎可以被完全消除,而在模拟通信系统中的中继器(即放大器)却只能将信号和噪声及失真一起再生。

(2) 信息数字化表示的第二个优点是处理数字信息本身所具有的灵活性^②。即,数字信号可以独立地进行处理,无需考虑该信号代表的是离散数据信源还是数字化的模拟信源。这意味着对设计者来说,对信号本身和处理方法的选择基本上没有任何限制。根据所传送的信息的起点和预期的目的地,这些处理可能包括信源编码、压缩、加密,用于频谱控制的脉冲成形,前向纠错(FEC)编码,用于扩展信号频谱的特殊调制,以及补偿信道失真的均衡。在本书中我们将对这些术语和其他问题进行定义和讨论。

(3) 数字数据传输越来越普及的第三个主要原因是,可以用来提高数字集成电路的性价比。近年来,人们已经用大规模的集成电路来实现专用的数字信号处理功能,并且用更小的封装来实现越来越多的调制解调器(modem)^③功能。微型计算机和专用可编程数字信号处理器的出现意味着现在可以用软件^④来实现数据传输系统。这样做的优点是,对于一项特定的设计其实现不用再受到硬件的“限定”,随着改良设计的出现或者需求的更改,我们可以随时更改和替换原来的设计。

(4) 信息数字传输的第四个原因是,在今天多数的应用中,信息的格式都采用了数字化表示,从而不论信息的起源如何,都可以采用相同的处理方法进行处理,这一点我们在前面已经提到。另外,更重要的是,信息用数字化形式表示之后,在传输过程中很容易组合在一起。其中的一个例子是因特网(Internet),其最初仅用来传送信息分组或文件,或者相对较短的报文消息。随着其在 20 世纪 90 年代初的爆发性普及和传输速度的急剧增长,人们发现传统的模拟形式的信息,如音频和视频信息,可以与更传统的分组信息一起在因特网上进行传送。

在本章的其余部分,我们将讨论有关数字通信的系统方面的一些内容。图 1-1 所示的简化的数字通信系统框图指出,任何通信系统都是由发送机,信道或者传输媒体,以及接收机组成的^⑤。

为了说明信道对传送信号的影响,我们重新回到前面考虑过的二进制信源情况。两种可能的消息可以用集合 $\{0, 1\}$ 来表示。如果信源每隔 T 秒发出一个 0 或者 1,那么 1 可以用一个电压为 A 伏持续时间为 T 秒的脉冲来表示,0 可以用一个电压为 $-A$ 伏持续时间为 T 秒的脉冲来表示。典型的传送波形如图 1-2a 所示。假定信道在此波形中加入了噪声,产生的波形如图 1-2b

① 参阅本章末的参考文献[1]。

② 里斯滕柏特(Ristenbatt)在参考文献[2]中对数字通信的术语、概念和数学描述给出了很好的阐述。

③ 有关无线功能的集成电路(IC)实现进展可以参考 J. Sevenhans, B. Verstraeten, and S. Taraborrelli, "Trends in Silicon Radio Large Scale Integration," IEEE Commun. Mag., Vol. 38, pp. 142-147, Jan. 2000。

④ 参阅 IEEE Communications Magazine special issue on software radio [3]。

⑤ 在这一框图中考虑的是单条链路的数字通信系统。从发送机(信源)和接收机(信宿)的关系来考虑,通信系统经常的情况是多对一,一对多,或者多对多。