

国外电子信息科学经典教材系列

数字通信

(第三版)

Digital Communications
(Third Edition)

[美] John G. Proakis 著

张力军 张宗橙 郑宝玉 等译



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
URL: <http://www.phei.com.cn>

www.phei.com.cn

国外电子信息科学经典教材系列

数字通信(第三版)

Digital Communications (Third Edition)

[美] John G. Proakis 著

张力军 张宗橙 郑宝玉 等译

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是数字通信领域的一本经典教材,通过对概率论及随机过程的复习,详细介绍了数字和模拟信源编码、数字调制信号和窄带信号与系统的特征、加性高斯白噪声中数字通信的调制和最佳调制与检测方法、基于最大似然准则的载波相位估计和定时同步的方法、不同信道模型的信道容量及随机编码、带限信道的信号设计、受到符号间干扰恶化信号的解调与检测问题、自适应信道均衡、多信道与多载波调制、扩展频谱信号和系统、衰落信道上的数字通信。本书适合与通信工程相关专业的高年级本科生、研究生及工程技术人员使用。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,翻版必究。

图书在版编目(CIP)数据

数字通信:第三版/(美)普罗金斯(Proakis, J.G.)著;张力军等译. - 北京:电子工业出版社,2001.4
(国外电子信息科学经典教材系列)

ISBN 7-5053-6198-8

I. 数… II. ①普… ②张… III. 数字通信-教材 IV. TN914.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 75184 号

丛 书 名: 国外电子信息科学经典教材系列

书 名: 数字通信(第三版)

原 书 名: Digital Communications (Third Edition)

著 者: [美]John G. Proakis

译 者: 张力军 张宗橙 郑宝玉 等

责任编辑: 徐 堃

特约编辑: 丛 山

排版制作: 电子工业出版社计算机排版室

印 刷 者: 北京天竺颖华印刷厂

装 订 者: 三河市金马印装有限公司

出版发行: 电子工业出版社 URL: <http://www.phei.com.cn>

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: 42.5 字数: 1088 千字

版 次: 2001 年 4 月第 1 版 2001 年 4 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-5053-6198-8
TN·1373

印 数: 5 000 册 定价: 56.00 元

版权贸易合同登记号 图字: 01-98-1776

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页、所附磁盘或光盘有问题者,请向购买书店调换;
若书店售缺,请与本社发行部联系调换。电话 68279077

前 言

《数字通信(第三版)》对以前版本的内容进行了比较大的变动。与第二版相比,第二版有8章,第三版有15章。第1章(引言)和第15章(多用户通信)是新的内容,其他新内容包括游程长度受限码、Nakagami衰落统计特性、用于衰落信道的网格码、多载波调制以及对盲均衡展开的处理。因为这是一本导论性质的教科书,所以这些论题的论述及处理的范围有限。第二版中的某些论题被删减,包括回波抵消器和扩展频谱信号的窄带干扰的抑制。

第二版中有两个论题各占一章,现各拆成两章。现在,信道编码由两章来论述,信道均衡也是如此。这样的安排减少了第二版中这些章的篇幅,并为读者和教师提供更多的模块化内容。

这本书适合作为电机工程系一年级研究生的教科书,也适合从事数字通信系统设计的工程师作为自学课本和参考书。为阅读本书,读者应具备基本的微积分、线性系统理论以及概率论和随机过程的预备知识等背景知识。

第1章是本书主题的导引,包括回顾与展望、信道特征的描述和信道模型。

第2章是对概率论和随机过程基本内容的复习。它涉及本书要用到的一些概率分布函数和矩阵,包括契尔诺夫边界的推导。边界在求数字通信系统性能边界中是很有用的。

第3章论述数字和模拟信源编码,重点是标量和向量量化技术,并比较速率失真理论的基本结果。

第4章介绍数字调制信号和窄带信号与系统的特征,还论述了数字调制信号的频谱特征。

第5章论述了在加性高斯白噪声信道中,数字通信的调制和最佳调制与检测方法。重点是各种数字信号传输的差错率性能和相应的信号对信道带宽的要求。

第6章专门论述基于最大似然准则的载波相位估计和定时同步的方法,描述面向判决和非面向判决的两种方法。

第7章论述几种不同信道模型的信道容量及随机编码。第8章论述分组和卷积码编码与译码。

第9章着重带限信道的信号设计。本章的论题包括部分响应信号及频谱成形的游程长度受限码。

第10章论述受到符号间干扰恶化信号的解调与检测问题,重点是最佳与准最佳均衡方法及其性能。

第11章论述自适应信道均衡,描述LMS及递归最小二乘算法及其性能特征。本章还将介绍盲均衡。第12章论述多信道与多载波调制问题。

第13章专门阐述扩展频谱信号和系统。本章在第二版的基础上作了一些精简,删去了窄带干扰抑制的内容。

第14章论述在衰落信道上的数字通信。本章在第二版的基础上有所扩充,增加了其他信道衰落的统计特性,如最著名的Nakagami衰落。本章还介绍了用于衰落信道的网格编码。

第 15 章论述多用户通信问题,重点是码分多址(CDMA)、信号检测和随机接入方法,例如 ALOHA 和载波侦听多址(CSMA)。

使用本书授课的教师可以将这 15 章内容和相关论题灵活地设计成一学期或者两学期的课程。第 3 章~第 6 章提供关于数字调制/解调和检测的方法的基本论述。信道编码可与调制和解调一起作为一学期课程的内容。信道均衡、衰落信道、扩展频谱和多用户通信可以作为第二学期课程的内容。

在我研究、写作过程中,有机会同许多知名学者一起工作并向他们学习,在此对他们表示感谢。这些学者包括 R. 普赖斯(R. Price)博士、P. R. 德罗依尔汉(P. R. Drouilhet)先生和 P. E. 格林(P. E. Green)博士。我在麻省理工学院林肯实验室工作期间,上述学者在衰落信道中的数字通信和多信道信号传输等方面给了我许多指导。我也要感谢 D. W. 塔夫茨(D. W. Tufts)教授,他审查了我在哈佛大学做的博士论文,并指导我对带限信道的信号设计和均衡问题的研究。我曾在通用电话和电子公司以及斯坦协会组参加过各种研究项目,与许多同事愉快地共事多年,包括斯坦(S. Stein)博士、巴罗(B. Barrow)博士、A. A 焦尔达诺(A. A. Giordano)博士、A. H. 莱韦斯克(A. H. Levesque)博士、R. 格林斯潘(R. Greenspan)博士、D. 弗里曼(D. Freeman)博士和 P. H. 安德森(P. H. Anderson)、D. 古德因(D. Gooding)及 J. 林德霍尔姆(J. Lindholm)先生。在西北大学,我与 M. 塞尔海(M. Salehi)博士和 D. 布雷迪(D. Brady)博士合作,从中受益匪浅。正是布雷迪博士使我决定在本书第三版中增加多用户通信一章,对他为我写这一章前做的准备工作和提供了几个习题表示衷心的感谢。T. 舍恩霍夫(T. Schonhoff)博士提供了 CPFSK 频谱特性曲线图,H. 吉本斯(H. Gibbons)提供了第 14 章中的曲线图的数据,这些数据表示了 in 分集情况下 PSK 和 DPSK 的性能。我非常感激同事们给予的帮助。

麦克格罗出版公司和本书第三版的审阅者提出了很多有价值的建议,他们是德克萨斯(Texas)A&M 大学的 J. 吉布森(J. Gibson)博士、凯泽工程公司的 B. 凯泽(B. Keiser)博士和布林翰约恩大学的 M. 赖斯(M. Rice)博士。同时,我也衷心感谢 A. 马莫拉(A. Mammela)博士和 F. 玻拉亚(F. Pollara),他们在本书第三版出版之后提出了宝贵的意见和建议。

最后,感谢卡伦·布莱克(Karen Blake)、格洛丽亚·多卡基斯(Gloria Doukakis)和安娜·帕奇(Anna Patch)打印了我的手稿,感谢阿波斯托斯·里佐斯(Apostolos Rizos)校对全书。

译者的话

在人类社会发展的近 10 年间,信息科学技术迅猛发展,在社会各个领域得到越来越广泛的应用,成为 21 世纪国际社会和世界经济发展的新的强大推动力。信息技术快速发展的动因和显著的特点之一是计算机技术和数字通信技术的快速发展以及计算机网络与通信网的相互融合,使得因特网迅速发展,遍布世界各地,延伸到各个角落,并从有线扩展到无线,延伸到个人的手中。各种类型的数字通信网是因特网的载体。有关数字通信的研究主要是从网络的物理层研究数字信号的传输机理及其可靠性和有效性,为建立可靠和高效的因特网提供坚实的物理基础。

我们翻译的约翰 G. 普罗金斯的《数字通信》(第三版)一书是作者多年教学和科研的总结,它全面而系统地论述了数字通信的基本理论,包括信源编码、数字调制信号特征、信道的模型、数字调制与解调、符号与定时同步、自适应均衡技术、多信道与多载波系统、扩频通信、衰落信道上的数字通信以及多用户通信。正如作者在前言中指出的,本书从第一版(1983 年)、第二版(1989 年)到第三版(1995 年),增添了不少新的内容,及时地反映了数字通信技术发展的新成果。本书在内容上既论述了数字通信的基本理论,又对数字通信新技术进行了比较深入的分析。本书采用信号空间和等效低通分析方法,根据最佳接收准则,先后讨论并分析了在加性高斯白噪声(AWGN)信道、带限线性滤波器(有符号间干扰和加性噪声)信道以及多径衰落信道等 3 种基本的典型信道条件下的数字信号传输的最佳接收问题。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,习题和参考资料丰富。本书是一本比较全面、系统、深入的数字通信理论著作,在学术界很有影响,被许多学术论文引用。同时,它也是一本优秀的研究生教材,目前在国内外有许多高等院校采用本书作为信息和通信专业的研究生教材。本书对于相关专业的教师、学生以及科技工作者来说,也是一本很好的参考书。

译者自 1986 年以来一直采用本书(一、二、三版)作为研究生数字通信课程的教材。从教学实践中,我们感到本书作为教材理论性较强,其性质相当于“高等通信原理”,也就是说,要求学习本课程的学生应当具备良好的本科“通信原理”基础。研究生通过本课程的学习可在通信理论方面打下比较好的基础,为深入研究创造良好的条件。

本书的前言、第 1、2、4、5、6、9、10、11、12 章由张力军翻译(其中的习题由曹士珂翻译),第 3、7、8 章由张宗橙翻译,第 13、14、15 章及附录由郑宝玉翻译,张力军负责统校全书。全书由徐惕审校,电子工业出版社文宏武副社长和责任编辑徐堃为本书的出版付出了辛勤的劳动。南京邮电学院 97、98 和 99 级研究生陈中文、蒋昆、肖晨阳、胡晓军、鲍舰、黄杰、施万青、陈星、李爽等为译稿的打印、校对、整理等做了大量的工作。借此机会,表示诚挚的谢意。译稿对原书中的错漏作了更正和译注。限于水平,译文倘有疏漏不当之处,敬请读者不吝指出。

目 录

第 1 章 引言	(1)
1-1 数字通信系统的基本组成部分	(1)
1-2 通信信道及其特征	(2)
1-3 通信信道的数学模型	(6)
1-4 数字通信发展的回顾与展望	(8)
1-5 本书概貌	(10)
1-6 文献与参考资料	(10)
第 2 章 概率论与随机过程	(11)
2-1 概率	(11)
2-1-1 随机变量、概率分布和概率密度	(14)
2-1-2 随机变量的函数	(18)
2-1-3 随机变量的统计平均	(21)
2-1-4 某些有用的概率分布	(24)
2-1-5 尾部概率的上边界	(35)
2-1-6 随机变量之和与中心极限定理	(39)
2-2 随机过程	(42)
2-2-1 统计平均	(43)
2-2-2 功率密度谱	(45)
2-2-3 线性时不变系统对随机输入信号的响应	(46)
2-2-4 带限随机过程的抽样定理	(49)
2-2-5 离散时间随机信号与系统	(50)
2-2-6 循环平稳过程	(51)
2-3 文献与参考资料	(52)
习题	(53)
第 3 章 信源编码	(57)
3-1 信源的数学模型	(57)
3-2 信息的对数量度	(58)
3-2-1 平均互信息和熵	(60)
3-2-2 连续随机变量信息的度量	(62)
3-3 离散信源编码	(63)
3-3-1 离散无记忆信源的编码	(64)
3-3-2 平稳离散信源	(70)
3-3-3 Lempel-Ziv 编码算法	(71)

3-4 模拟信源的编码——最优量化	(73)
3-4-1 率失真函数	(73)
3-4-2 标量量化	(76)
3-4-3 矢量量化	(80)
3-5 模拟信源的编码技术	(84)
3-5-1 时间波形编码	(84)
3-5-2 频谱波形编码	(92)
3-5-3 模型基信源编码	(93)
3-6 文献与参考资料	(98)
习题	(98)
第4章 通信信号与系统的表征	(105)
4-1 带通信号与系统的表示法	(105)
4-1-1 带通信号的表示法	(105)
4-1-2 线性带通系统的表示法	(108)
4-1-3 带通系统对带通信号的响应	(109)
4-1-4 带通平稳随机过程的表示法	(109)
4-2 信号空间表示法	(112)
4-2-1 向量空间概念	(112)
4-2-2 信号空间概念	(114)
4-2-3 信号的正交展开	(114)
4-3 数字调制信号的表示法	(120)
4-3-1 无记忆调制	(120)
4-3-2 有记忆线性调制	(128)
4-3-3 有记忆非线性调制	(131)
4-4 数字调制信号的频谱特性	(141)
4-4-1 线性调制信号的功率谱	(141)
4-4-2 CPFSK 和 CPM 信号功率谱	(145)
4-4-3 有记忆调制信号功率谱	(152)
4-5 文献与参考资料	(154)
习题	(155)
第5章 加性高斯白噪声信道的最佳接收机	(163)
5-1 受加性高斯白噪声恶化信号的最佳接收机	(163)
5-1-1 相关解调器	(164)
5-1-2 匹配滤波器解调器	(167)
5-1-3 最佳检测器	(171)
5-1-4 最大似然序列检测器	(175)
5-1-5 有记忆信号的逐个符号 MAP 检测器	(178)
5-2 无记忆调制的最佳接收机性能	(179)
5-2-1 二进制调制的错误概率	(180)

5-2-2	M 元正交信号的错误概率	(182)
5-2-3	M 元双正交信号的错误概率	(185)
5-2-4	单纯信号的错误概率	(186)
5-2-5	M 元二进制编码信号的错误概率	(186)
5-2-6	M 元 PAM 的错误概率	(186)
5-2-7	M 元 PSK 的错误概率	(188)
5-2-8	差分 PSK(DPSK)及其性能	(191)
5-2-9	QAM 错误概率	(193)
5-2-10	数字调制方法的比较	(196)
5-3	CPM 信号的最佳接收机	(198)
5-3-1	CPM 的最佳解调和检测	(198)
5-3-2	CPM 信号的性能	(201)
5-3-3	CPM 信号的逐个符号检测	(206)
5-4	AWGN 信道中随机相位信号的最佳接收机	(208)
5-4-1	二进制信号的最佳接收机	(209)
5-4-2	M 元正交信号的最佳接收机	(213)
5-4-3	M 元正交信号包络检测的错误概率	(213)
5-4-4	相关二进制信号包络检测的错误概率	(216)
5-5	再生中继器和链路预算分析	(217)
5-5-1	再生中继器	(217)
5-5-2	通信链路预算分析	(218)
5-6	文献与参考资料	(221)
	习题	(222)
第 6 章	载波和符号同步	(233)
6-1	信号参数估计	(233)
6-1-1	似然函数	(234)
6-1-2	信号解调中的载波恢复与符号同步	(234)
6-2	载波相位估计	(236)
6-2-1	最大似然载波相位估计	(237)
6-2-2	锁相环	(239)
6-2-3	加性噪声对相位估计的影响	(240)
6-2-4	面向判决环	(242)
6-2-5	非面向判决环	(245)
6-3	符号定时估计	(250)
6-3-1	最大似然定时估计	(251)
6-3-2	非面向判决定时估计	(252)
6-4	载波相位和符号定时的联合估计	(255)
6-5	最大似然估计器的性能特征	(256)
6-6	文献与参考资料	(258)

习题	(259)
第7章 信道容量和信道编码	(262)
7-1 信道模型和信道容量	(262)
7-1-1 信道模型	(262)
7-1-2 信道容量	(265)
7-1-3 以正交信号获取信道容量	(270)
7-1-4 信道可靠性函数	(271)
7-2 随机选择的码	(272)
7-2-1 基于 M 元二进制信号的随机编码	(272)
7-2-2 基于 M 元多幅度信号的随机编码	(277)
7-2-3 R_0^* 与 AWGN 信道容量的比较	(278)
7-3 基于截止速率的通信系统的设计	(279)
7-4 文献与参考资料	(283)
习题	(283)
第8章 分组码和卷积信道码	(289)
8-1 线性分组码	(289)
8-1-1 生成矩阵和奇偶校验矩阵	(291)
8-1-2 一些特殊的线性分组码	(294)
8-1-3 循环码	(296)
8-1-4 线性分组码的最佳软判决译码	(306)
8-1-5 硬判决译码	(311)
8-1-6 硬判决译码和软判决译码性能的比较	(318)
8-1-7 线性分组码最小距离的边界	(321)
8-1-8 非二进制分组码和级联分组码	(323)
8-1-9 突发差错信道中编码数据的交织	(326)
8-2 卷积码	(327)
8-2-1 卷积码的转移函数	(332)
8-2-2 卷积码的最佳译码——维特比算法	(335)
8-2-3 软判决译码的差错概率	(337)
8-2-4 硬判决译码的差错概率	(340)
8-2-5 二进制卷积码的距离特性	(341)
8-2-6 非二进制双 k 码和级联码	(345)
8-2-7 卷积码的其他译码算法	(347)
8-2-8 卷积码实用中一些问题的考虑	(351)
8-3 带限信道的编码调制	(354)
8-4 文献与参考资料	(364)
习题	(365)
第9章 带限信道的信号设计	(370)
9-1 带限信道的特征	(370)

9-2 带限信道的信号设计	(373)
9-2-1 无符号间干扰的带限信号的设计——奈奎斯特准则	(375)
9-2-2 具有受控 ISI 的带限信号设计——部分响应信号	(379)
9-2-3 受控 ISI 的数据检测	(381)
9-2-4 有失真信道的信号设计	(385)
9-3 PAM 检测的错误概率	(388)
9-3-1 具有零 ISI 的 PAM 检测的错误概率	(388)
9-3-2 部分响应信号检测的错误概率	(389)
9-3-3 有失真信道中最佳信号的错误概率	(391)
9-4 谱成形调制码	(391)
9-5 文献与参考资料	(398)
习题	(398)
第 10 章 通过带限线性滤波器信道的通信	(404)
10-1 有 ISI 和 AWGN 信道的最佳接收机	(404)
10-1-1 最佳最大似然接收机	(404)
10-1-2 具有 ISI 信道的离散时间模型	(406)
10-1-3 离散时间白噪声滤波器模型的维特比算法	(408)
10-1-4 具有 ISI 信道的 MLSE 的性能	(411)
10-2 线性均衡	(417)
10-2-1 峰值失真准则	(418)
10-2-2 均方误差(MSE)准则	(421)
10-2-3 MSE 均衡器的性能特征	(424)
10-2-4 分数间隔均衡器	(427)
10-3 判决反馈均衡器	(431)
10-3-1 系数最佳化	(431)
10-3-2 DFE 的性能特征	(432)
10-3-3 预测判决反馈均衡器	(435)
10-4 文献与参考资料	(436)
习题	(436)
第 11 章 自适应均衡	(443)
11-1 自适应线性均衡	(443)
11-1-1 迫零算法	(443)
11-1-2 LMS 算法	(444)
11-1-3 LMS 算法的收敛特性	(447)
11-1-4 由有噪梯度估计的过剩 MSE	(448)
11-1-5 基带和带通线性均衡器	(450)
11-2 自适应判决反馈均衡器	(451)
11-2-1 网格编码信号的自适应均衡	(452)
11-3 用于 ML 序列检测的自适应信道估计器	(453)

11-4	自适应均衡的递推最小二乘算法	(455)
11-4-1	递推最小二乘(卡尔曼)算法	(456)
11-4-2	线性预测和格型滤波器	(459)
11-5	自恢复(盲)均衡	(461)
11-5-1	基于最大似然准则的盲均衡	(462)
11-5-2	随机梯度算法	(464)
11-5-3	基于二阶和高阶信号统计特征的盲均衡算法	(468)
11-6	文献与参考资料	(469)
	习题	(469)
第 12 章	多信道和多载波系统	(473)
12-1	在 AWGN 信道中的多信道数字通信	(473)
12-1-1	二进制信号	(474)
12-1-2	M 元正交信号	(476)
12-2	多载波通信	(477)
12-2-1	非理想线性滤波器信道的容量	(477)
12-2-2	基于 FFT 的多载波系统	(479)
12-3	文献与参考资料	(481)
	习题	(482)
第 13 章	数字通信用的扩频信号	(484)
13-1	扩频数字通信系统的模型	(485)
13-2	直接序列扩频信号	(486)
13-2-1	译码器的差错率性能	(488)
13-2-2	DS 扩频信号的应用	(495)
13-2-3	脉冲干扰对 DS 扩频系统的影响	(499)
13-2-4	PN 序列的生成	(503)
13-3	跳频扩频信号	(507)
13-3-1	AWGN 信道中的 FH 扩频信号的性能	(508)
13-3-2	部分频带干扰下 FH 扩频信号的性能	(510)
13-3-3	基于 FH 扩频信号的 CDMA 系统	(515)
13-4	其他类型的扩频信号	(516)
13-5	扩频信号的同步	(517)
13-6	文献与参考资料	(522)
	习题	(523)
第 14 章	通过多径衰落信道的数字通信	(528)
14-1	多径衰落信道的特征	(528)
14-1-1	信道相关函数和功率谱	(530)
14-1-2	衰落信道的统计模型	(533)
14-2	信号特征对信道模型选择的影响	(535)
14-3	频率非选择性慢衰落信道	(537)

14-4	多径衰落信道的分集技术	(540)
14-4-1	二进制信号	(540)
14-4-2	多相信号	(545)
14-4-3	M 元正交信号	(548)
14-5	在频率选择性慢衰落信道中的数字信号传输	(552)
14-5-1	抽头延时线信道模型	(552)
14-5-2	RAKE 解调器	(554)
14-5-3	RAKE 接收机的性能	(556)
14-6	用于衰落信道的编码波形	(560)
14-6-1	线性二进制分组码软判决译码的错误概率	(562)
14-6-2	线性二进制分组码硬判决译码的错误概率	(563)
14-6-3	用于瑞利衰落信道的卷积码性能的上边界	(564)
14-6-4	衰落信道中恒重码和级联码的应用	(565)
14-6-5	基于截止率的系统设计	(571)
14-6-6	网格编码调制	(574)
14-7	文献与参考资料	(576)
	习题	(577)
第 15 章	多用户通信	(583)
15-1	多址技术	(583)
15-2	多址方式的容量	(585)
15-3	码分多址	(588)
15-3-1	CDMA 信号与信道模型	(588)
15-3-2	最佳接收机	(589)
15-3-3	次最佳检测器	(592)
15-3-4	检测器的性能特征	(596)
15-4	随机接入方式	(598)
15-4-1	ALOHA 系统和协议	(598)
15-4-2	载波侦听系统和协议	(601)
15-5	文献与参考资料	(604)
	习题	(605)
附录 A	列文森-杜宾算法	(611)
附录 B	多信道二进制信号的错误概率	(613)
附录 C	M 相信号自适应接收的错误概率	(617)
C-1	M 相信号通信系统的数学模型	(617)
C-2	相位 θ 的特征函数和概率密度函数	(618)
C-3	瑞利慢衰落信道的错误概率	(620)
C-4	时不变与莱斯衰落信道的错误概率	(622)
附录 D	平方根分解	(626)
	文献与参考资料	(628)

中英文人名对照表..... (645)

词汇表..... (651)

第 1 章 引 言

在本书中,我们将介绍作为数字通信系统分析和设计基础的基本原理。数字通信的研究主题包括数字形式的信息从产生该信息的信源到一个或多个目的地的传输问题。在通信系统的分析和设计中,特别重要的是信息传输所通过的物理信道的特征。信道的特征一般会影响通信系统基本组成部分的设计。下面阐述一个通信系统的基本组成部分及其功能。

1-1 数字通信系统的基本组成部分

图 1-1-1 显示了一个数字通信系统的功能性框图和基本组成部分。信源输出的可以是模拟信号,如音频或视频信号;也可以是数字信号,如电传机的输出,该信号在时间上是离散的,并且具有有限个输出字符。在数字通信系统中,由信源产生的消息变换成二进制数字序列。理论上,应当用尽可能少的二进制数字表示信源输出(消息)。换句话说,我们要寻求一种信源输出的有效的表示方法,使其很少产生或不产生冗余。将模拟或数字信源的输出有效地变换成二进制数字序列的处理过程称为信源编码或数据压缩。

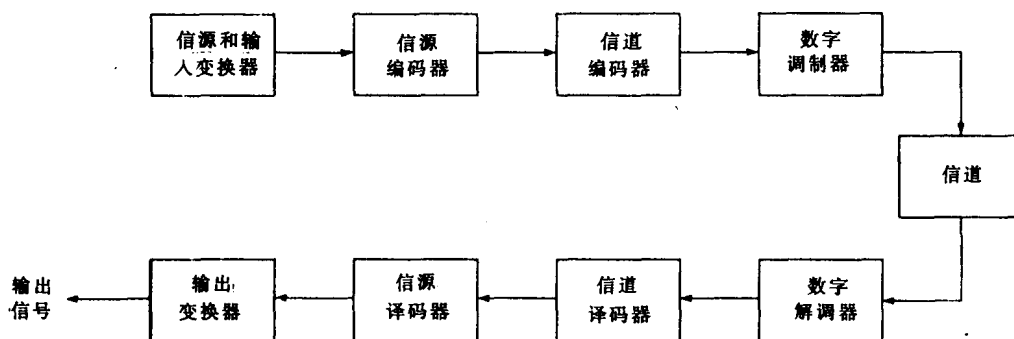


图 1-1-1 数字通信系统的基本组成部分

由信源编码器输出的二进制数字序列称为信息序列,它被传送到信道编码器。信道编码器的目的是在二进制信息序列中以受控的方式引入一些冗余,以便于在接收机中用来克服信号在信道中传输时所遭受的噪声和干扰的影响。因此,所增加的冗余是用来提高接收数据的可靠性以及改善接收信号的逼真度的。实际上,信息序列中的冗余有助于接收机译出期望的信息序列。例如,二进制信息序列的一种(平凡的)形式的编码就是将每个二进制数字简单重复 m 次,这里 m 为一个正整数。更复杂的(不平凡的)编码涉及到一次取 k 个信息比特,并将每个 k 比特序列映射成唯一的 n 比特序列,该序列称为码字。以这种方式对数据编码所引入的冗余度的大小是由比率 n/k 来度量的。该比率的倒数,即 k/n ,称为码的速率或简称码率。

信道编码器输出的二进制序列送至数字调制器,它是通信信道的接口。因为在实际中遇到的几乎所有的通信信道都能够传输电信号(波形),所以数字调制的主要目的是将二进制信息序列映射成信号波形。为了详细说明这一点,假定已编码的信息序列以均匀速率 R 比特/秒—

次一个比特传输,数字调制器可以简单地将二进制数字“0”映射成波形 $s_0(t)$,而二进制数字“1”映射成波形 $s_1(t)$ 。在这种方式中,信道编码器输出的每一比特是分别传输的。我们把它称为二进制调制。另一种方式,调制器一次传输 b 个已编码的信息比特,其方法是采用 $M=2^b$ 个不同的波形 $s_i(t), i=0,1,2,\dots,M$,每一个波形用来传输 2^b 个可能的 b 比特序列中的一个序列。我们称这种方式为 M 元调制($M>2$)。注意,每 b/R 秒就有一个新的 b 比特序列进入调制器。因此,当信道比特率 R 固定,与一个 b 比特序列相应的 M 个波形之一的传输时间量是二进制调制系统时间周期的 b 倍。

通信信道是用来将发送机的信号发送给接收机的物理媒质。在无线传输中,信道可以是大气(自由空间)。另一方面,电话信道通常使用各种各样的物理媒质,包括有线线路、光缆和无线(微波)等。无论用什么物理媒质来传输信息,其基本特点是发送信号随机地受到各种可能机理的恶化,例如由电子器件产生的加性热噪声、人为噪声(如汽车点火噪声)及大气噪声(如在雷暴雨时的闪电)。

在数字通信系统的接收端,数字解调器对受到信道恶化的发送波形进行处理,并将该波形还原成一个数的序列,该序列表示发送数据符号的估计值(二进制或 M 元)。这个数的序列被送至信道译码器,它根据信道编码器所用的关于码的知识及接收数据所含的冗余度重构初始的信息序列。

解调器和译码器工作性能好坏的一个度量是译码序列中发生差错的频度。更准确地说,在译码器输出端的平均比特错误概率是解调器-译码器组合性能的一个度量。一般地,错误概率是下列各种因素的函数:码特征、用来在信道上传输信息的波形的类型、发送功率、信道的特征(即噪声的大小)、干扰的性质等以及解调和译码的方法。在后续各章中将详细讨论这些因素及其对性能的影响。

作为最后一步,当需要模拟输出时,信源译码器从信道译码器接收其输出序列,并根据所采用的信源编码方法的有关知识重构由信源发出的原始信号。由于信道译码的差错以及信源编码器可能引入的失真,在信源译码器输出端的信号只是原始信源输出的一个近似。在原始信号与重构信号之间的信号差或信号差的函数是数字通信系统引入失真的一种度量。

1-2 通信信道及其特征

正如前面指出的,通信信道在发送机与接收机之间提供了连接。物理信道也许是携带电信号的一对明线;或是在已调光波束上携带信息的光纤;或是水下海洋信道,其中信息以声波形式传输;或是自由空间,携带信息的信号通过天线在空间辐射传输。可被表征为通信信道的其他媒质是数据存储媒质,例如磁带、磁盘和光盘。

在信号通过任何信道传输中的一个共同的问题是加性噪声。一般地,加性噪声是由通信系统内部组成元器件所引起的,例如电阻和固态器件。有时将这种噪声称为热噪声。其他噪声和干扰源也许是系统外面引起的,例如来自信道上其他用户的干扰。当这样的噪声和干扰与期望信号占有同频带时,可通过对发送信号和接收机中解调器的适当设计来使它们的影响最小。信号在信道上传输时可能会遇到的其他类型损伤有信号衰减、幅度和相位失真、多径失真等。

可以通过增加发送信号功率的方法使噪声的影响最小。然而,设备和其他实际因素限制了发送信号的功率电平。另一个基本的限制是可用的信道带宽。带宽的限制通常是由于媒质以

及发送机和接收机中组成器件和部件的物理限制产生的。这两种限制因素限制了在任何通信信道上能可靠传输的数据量,我们将在以后各章中讨论这种情况。下面描述几种通信信道的重要特征。

1. 有线信道

电话网络扩大了有线线路的应用,如话音信号传输以及数据和视频传输。双绞线和同轴电缆是基本的导向电磁信道,它能提供比较适度的带宽。通常用来连接用户和中心机房的电话线的带宽为几百千赫兹(kHz)。另一方面,同轴电缆的可用带宽是几兆赫兹(MHz)。图 1-2-1 示出了导向电磁信道的频率范围,其中包含波导和光纤。

信号在这样的信道上传输时,其幅度和相位都会发生失真,还受到加性噪声的恶化。双绞线信道还易受到来自物理邻近信道的串音干扰。因为在全国和全世界有线信道上通信在日常通信中占有相当大的比例,因此,人们对传输特性的表征以及对信号传输时的幅度和相位失真的减缓方法做了大量研究。在第 9 章中,我们将阐述最佳传输信号及其解调的设计方法。在第 10 章和第 11 章中,我们将研究信道均衡器的设计,它是用来补偿信道的幅度和相位失真的。

2. 光纤信道

光纤提供的信道带宽比同轴电缆信道大几个数量级。在过去的 10 年中,已经研发出具有较低信号衰减的光纤,以及用于信号和信号检测的可靠性光子器件。这些技术上的进展导致了光纤信道应用的快速发展,不仅应用在国内通信系统中,也应用于跨大西洋和跨太平洋的通信中。由于光纤信道具有大的可用带宽,因此有可能使电话公司为用户提供宽系列电话业务,包括话音、数据、传真和视频等。

在光纤通信系统中,发送机或调制器是一个光源,或者是发光二极管(LED)或者是激光。通过消息信号改变(调制)光源的强度来发送信息。光像光波一样通过光纤传播,并沿着传输路径被周期性地放大以补偿信号衰减(在数字传输中,光由中继器检测和再生)。在接收机中,光的强度由光电二极管检测,它的输出电信号的变化直接与照射到光电二极管上的光的功率成正比。光纤信道中的噪声源是光电二极管和电子放大器。

可以预计,在新的世纪,光纤信道将代替电话网络中几乎所有的有线信道。

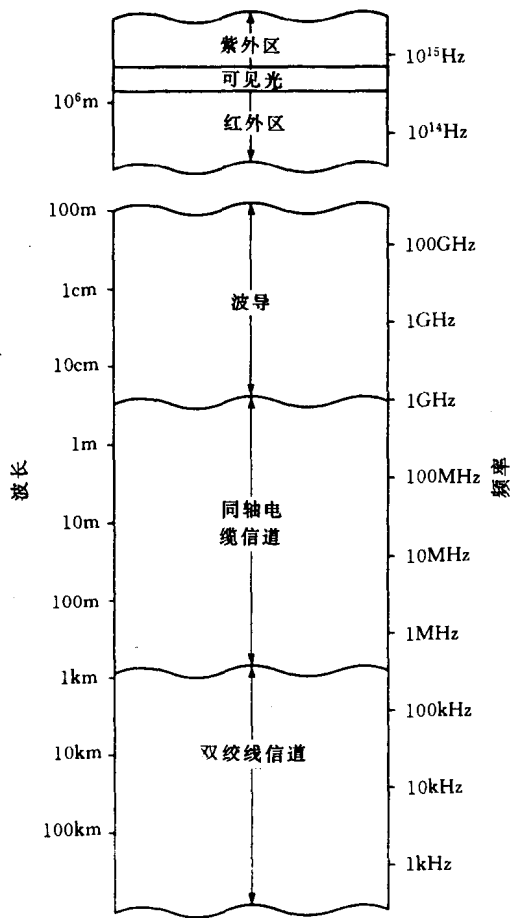


图 1-2-1 导向有线信道的频率范围