

21世纪
高职高专规划教材系列



数字通信基础

周友兵 主编



增值回报
电子教案



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



21 世纪高职高专规划教材系列

数字通信基础

周友兵 主编

王雪萍 参编

伍湘彬 主审

责任编辑 (CIP) 吕晓霞

ISBN 978-7-111-32414-3

机械工业出版社

机械工业出版社

机械工业出版社

机械工业出版社

机械工业出版社

机械工业出版社

机械工业出版社

机械工业出版社

机械工业出版社

机械工业出版社

机械工业出版社

机械工业出版社

机械工业出版社

机械工业出版社

机械工业出版社

机械工业出版社

机械工业出版社

机械工业出版社



本书对与数字信号传输系统相关的主要通信原理和技术作了较为全面的介绍。主要内容为：数字通信的基本知识、模拟信号的数字化传输、差错控制编码技术、数字信号的传输技术、同步技术、数字复接技术。

本书可作为高职高专通信、电子信息、计算机等专业的教材，也可供中等专业学校相关专业的学生使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

数字通信基础/周友兵主编. —北京: 机械工业出版社, 2008. 1

(21世纪高职高专规划教材系列)

ISBN 978-7-111-22414-3

I. 数… II. 周… III. 数字通信 - 高等学校: 技术学校 - 教材
IV. TN914.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 147980 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: 王颖 责任校对: 李秋荣

封面设计: 刘吉维 责任印制: 杨曦

北京机工印刷厂印刷 (兴文装订厂装订)

2008 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 9.25 印张 · 223 千字

0 001—5 000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-22414-3

定价: 16.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379739

封面无防伪标均为盗版

21 世纪高职高专 通信类专业规划教材编委会

主 任 周祥瑜

副 主 任 伍湘彬 张中洲 杨元挺 张黎明

安志鹏 俞 宁 董维佳 任德齐

委 员 (按姓氏笔画排序)

丁龙刚 冯国莉 余 周 杜志勇 张红兵

易 谷 周雪利 彭利标 陈立万 梁德厚

秘 书 长 胡毓坚

副 秘 书 长 陈 良

出版说明

为了贯彻国务院发〔2002〕16号文件《国务院关于大力推进职业教育改革与发展的决定》的精神,进一步落实《中华人民共和国职业教育法》和《中华人民共和国劳动法》,实施科教兴国战略,大力推进高等职业教育改革与发展,我们组织力量,对实现高等职业教育培养目标和保证基本教学规格的文化基础课程、专业技术基础课程和重点建设专业主干课程的教材进行了规划和编写。

本套教材内容涵盖了高职高专院校计算机类、电子信息类、通信类、自动化类、市场营销类专业的专业基础课、专业课以及选修课。其中,通信类专业规划教材由“21世纪高职高专通信类专业规划教材编委会”组织编写。该套教材从实际应用的角度出发,结合工程实际需要,为高职高专通信类专业的学生提供了学习通信技术基础和现代通信技术的教科书。

通信类专业规划教材的指导思想及编写原则如下:

1. 课程整合, 精简课程

在充分调研IT行业对通信专业学生能力结构具体要求的基础上,根据高职高专培养高技能人才的定位,以社会实际需要为目标,加强基本知识、基础理论和基本技能的教学。同时,考虑理论对实践的指导性,以“必须够用”为原则,将通信类专业课程进行全面整合,精简课程,强调知识技能的直接应用。

2. 教材内容统一规划

规划教材从通信技术必须具备的基本知识和应掌握的基本技能出发,合理安排每一门课程的知识、技能点。将从程控交换到基站建设、光纤通信、终端设备等专业技术,恰当衔接,避免不必要的课程重复。技术基础课突出“新”的教学法——一体化教学模块(单元);专业基础与专业技能课突出“新”的知识、“新”的技术,力求与行业需要相适应。

3. 结合行业资格证书

课程设置、教材编写与通信行业紧密结合。参照通信行业职业资格证书的要求,结合专业应用,用深入浅出的物理概念来替代那些难理解的理论推导。

4. 注重实训环节

注重理论与技能技术的有机结合,注重实训环节,将技能培训贯穿于整套教材。将电子基础理论与通信专业技术紧密结合,让学生在理论指导下进行技术实践,学好专业技术。

5. 编写模式合理先进

教材具体编写模式借鉴国外职教先进经验,技术基础课以能力模块(单元)来设计,每一模块(单元)设教学目标、正文、应知测试、应会测试等环节,强调案例分析,并加强实训实验环节的考核,体现以能力为本位,以学生为中心的职教理念。

通信类专业规划教材以技能培养为主,技能的设定由各主编结合企业要求组织讨论决定。技术基础课程的教材分单元展开,专业基础课程及专业技能课程的教材突出先进实用技术,强化技能训练和可操作性,同时注意设备、实训环境的大众化。

本套教材可作为各类高职高专院校的教材,也可作为各类培训班的教材。

机械工业出版社

前 言

本书对与数字信号传输系统相关的主要通信原理和技术作了较为全面的介绍，为读者学习程控交换技术、移动通信技术、光纤通信技术、计算机网络等课程奠定必要的理论基础。

全书共分6单元。第1单元数字通信概述，主要介绍数字通信系统的组成及性能指标；第2单元模拟信号的数字化传输，主要介绍PCM编解码原理，还介绍了DPCM、ADPCM编码技术；第3单元噪声与差错控制编码，在介绍差错控制编码原理的基础上，主要介绍了几种简单抗干扰编码，还介绍了线性分组码、循环码、卷积码的编解码原理；第4单元数字信号的传输技术，主要介绍了数字信号的基带传输和频带传输技术，还介绍了再生中继传输系统；第5单元同步技术，主要介绍了载波同步、位同步、帧同步和网同步的基本原理；第6单元时分复用与数字复接技术，主要介绍了数字信号的复接原理、码速调整原理、PCM二次群帧结构，还简单介绍了SDH技术。

本书力求适合高职高专教学的要求，以“实用够用”为原则，以满足社会需要为目标，加强了基本知识、基本理论和基本技能的内容。全书语言通俗、概念清楚、简单明了、图文并茂、易学易懂。

本书建议学时数为60学时，各单元学时分配为：第1单元6学时，第2单元16学时，第3单元6学时，第4单元18学时，第5单元6学时，第6单元8学时。

本书的第1单元、第2单元和第4单元由江苏淮安信息职业技术学院周友兵老师编写，第3单元、第5单元和第6单元由重庆工业职业技术学院王雪萍老师编写。全书由广东省电子技术学校伍湘彬副校长主审，周友兵老师担任主编。

限于编者水平，书中难免存在不足之处，恳请读者批评指正。

为了配合本书的教学，机械工业出版社为读者提供了电子教案，读者可在 www.cmpedu.com 上下载。

编 者

目 录

出版说明	2.4 量化	23
前言	2.4.1 均匀量化	24
	2.4.2 非均匀量化	25
第1单元 数字通信概述	2.5 PCM 编码与解码	28
1.1 引言	2.5.1 编码码型	28
1.1.1 通信的概念	2.5.2 A 律 13 折线编码的码位安排	29
1.1.2 通信的发展简史	2.5.3 逐次反馈比较型编码原理	30
1.1.3 通信的种类	2.5.4 逐次反馈比较型编码器	32
1.1.4 模拟通信与数字通信	2.5.5 收端解码器	33
1.1.5 通信系统的一般模型	2.5.6 单路脉冲编码调制编解码器	34
1.2 数字通信系统的基本组成	2.5.7 实训——脉冲编码调制通信系统	36
1.3 数字通信系统的性能指标	2.6 其他常用编码技术	38
1.3.1 有关的几个概念	2.6.1 自适应差值脉冲编码调制原理	38
1.3.2 有效性指标	2.6.2 参量编码	40
1.3.3 可靠性指标	2.6.3 混合编码	40
1.4 信道与信道容量	2.7 单元小结	41
1.4.1 有线信道	2.8 单元测试	42
1.4.2 无线信道		
1.4.3 信道容量	第3单元 噪声与差错控制编码	44
1.5 数字通信的特点及发展趋势	3.1 引言	44
1.5.1 数字通信的特点	3.2 噪声	44
1.5.2 数字通信的发展趋势	3.3 差错控制编码的基本原理	46
1.6 数字通信网的基本知识	3.4 常用的几种简单抗干扰编码	49
1.6.1 通信网的概念	3.5 线性分组码	51
1.6.2 几种公用网络的特点	3.6 循环码	54
1.6.3 通信网的发展方向	3.7 卷积码	58
1.7 单元小结	3.8 单元小结	60
1.8 单元测试	3.9 单元测试	61
第2单元 模拟信号的数字化传输		
2.1 引言	第4单元 数字信号的传输技术	63
2.2 脉冲编码调制概述	4.1 引言	63
2.3 抽样	4.2 数字信号的传输方式	63
2.3.1 抽样定理	4.2.1 串行与并行传输	63
2.3.2 抽样的实现与样值信号的保持	4.2.2 异步与同步传输	64
2.3.3 实训——抽样定理与脉冲幅度调制通信系统	4.2.3 单工、半双工、全双工传输	64
	4.3 数字信号的基带传输	65

4.3.1	数字基带传输系统的组成	65	5.5	网同步	114
4.3.2	数字基带信号及其频谱特性	65	5.5.1	主从同步方式	114
4.3.3	数字基带传输的常用码型	68	5.5.2	互同步法	115
4.3.4	数字基带传输的基本理论	70	5.5.3	准同步方式	115
4.3.5	“眼图”分析法	74	5.6	单元小结	115
4.3.6	时域均衡原理	75	5.7	单元测试	116
4.4	再生中继传输系统	76	第6单元 时分复用与数字复接技术	117	
4.5	数字信号的频带传输	78	6.1	引言	117
4.5.1	二进制幅移键控	79	6.2	时分多路复用与PCM30/32路系统	117
4.5.2	二进制频移键控	82	6.2.1	时分多路复用	117
4.5.3	实训——FSK调制解调	85	6.2.2	PCM30/32路基群系统帧结构	119
4.5.4	相移键控	88	6.2.3	PCM30/32路基群终端机	120
4.5.5	实训——2PSK调制解调	95	6.3	数字复接的概念	122
4.5.6	二进制数字调制系统的性能比较	98	6.3.1	数字复接系统的组成	122
4.5.7	现代数字调制技术	99	6.3.2	数字复接方式	122
4.6	调制解调器	101	6.3.3	数字复接分类	123
4.7	单元小结	103	6.4	数字复接原理	124
4.8	单元测试	103	6.4.1	同步复接原理	124
第5单元 同步技术	105		6.4.2	异步复接原理	125
5.1	引言	105	6.5	码速调整原理	127
5.2	载波同步	106	6.5.1	正码速调整原理	128
5.2.1	插入导频法	106	6.5.2	基群支路码速调整帧结构	129
5.2.2	直接提取法	107	6.6	PCM高次群的帧结构	130
5.3	位同步	108	6.6.1	PCM二次群异步复接帧结构	130
5.3.1	插入导频法	109	6.6.2	PCM高次群	131
5.3.2	直接提取法	110	6.7	准同步数字系列与同步数字系列	131
5.3.3	实训——位同步信号的提取及眼图测量	110	6.7.1	准同步数字系列	131
5.4	帧同步	112	6.7.2	同步数字系列	132
5.4.1	设置帧同步的必要性	112	6.8	单元小结	133
5.4.2	对帧同步系统的要求	112	6.9	单元测试	134
5.4.3	帧同步的实现方法	113	附录 英文缩写名词对照表	136	
			参考文献	138	

第1单元 数字通信概述

应知应会要求:

- 熟悉通信系统的基本组成。
- 掌握数字通信系统的组成及各部分功能。
- 熟悉数字通信系统的主要性能指标。
- 掌握数字通信的特点。
- 能画出数字通信系统组成框图。
- 会计算数字通信系统的传码率、误码率和频带利用率。

1.1 引言

我们正处于信息时代,通信技术的应用已渗透到社会生产和生活的各个领域。通信的根本任务是传递信息。信息、材料、能源是构成人类社会物质文明的三大要素。通信业的发达与否是衡量一个国家经济实力和科技发展水平的重要指标之一。通信是人们从事生产活动和社会生活中不可缺少的工具和手段。

根据传递信息的信号种类,通信可分为模拟通信和数字通信两大类。数字通信是把原始消息转化为数字信号,并将其作为载体来传递信息的一种通信方式。本章主要介绍数字通信的基本概念、数字通信系统的组成与特点、数字通信系统的主要性能指标及数字通信的发展趋势等内容。

1.1.1 通信的概念

通信技术经常涉及到“消息”、“信号”、“信息”和“通信”这四个术语,它们之间既有联系又有区别。

1. 消息 (Message)

我们将感觉器官所能感知的语言、文字、数据、图像等统称为消息。消息是对客观物质运动和主观思维活动状态的一种表述。

2. 信息 (Information)

信息可以是语音、图像、数字化数据、字符或者代码——任何可以被目的端用户(人或机器)读懂的消息。从通信或传输的角度来讲,信息和消息具有相同的含义。但从信息论的观点,信息论的奠基人香农(C. E. Shannon)则把信息定义为“信息就是用来消除不确定性的东西”。即信息是指对收信者来说预先不确切知道的事情。通信的结果可使收信者知道了某一确定的内容,即消除了不确定性。简而言之,通信可使接收者收到一定的信息。“信息”与“消息”两者之间既有联系又有区别。“消息”是表达“信息”的形式,是载有“信息”的客体,“信息”是“消息”的抽象本质。

3. 信号 (Signal)

信号是消息的表现形式和传送的载体。信号应具有某种可以感知的物理参量——如电

压、电流及光波的强度和频率等。在通信系统中，一般将原始消息先转化为电流，通过信道向异地传送。其中，电流包含有原始消息，是消息的外在表现形式，也是消息的传送载体，因此我们把这里的电流就称为信号。信号具有时间特性和频率特性。信号可分为模拟信号和数字信号，还可分为基带信号与频带信号等。

4. 通信 (Communication)

通信是指信息的传递和交换过程。香农指出，人们只在两种情况下有通信的需要，一是有自己消息要告诉对方，而估计对方不知道这个消息，二是有自己某种疑问要询问对方，估计对方能给出一定的解答。这里的“不知道”、“疑问”就是通信前对某事件可能发生的结果不能作出明确的判断，存在“不确定性”。通信后，由原先的“不知道”到“知道”，原先的“疑问”得到了解答，即消除了原先存在的不确定性。通信的作用就是通过消息的传送，使接收者从收到的消息中获取一定的信息，消除了原先存在的不确定性。电信 (Telecommunication) 是指利用电磁波或光波来传送消息的通信方式。我们一般所说的通信就是指电信。

1.1.2 通信的发展简史

表 1-1 按照时间顺序列出了与通信技术发展相关的一些重大事件。从表 1-1 中可大致看出通信发展的主要历程。

表 1-1 通信发展重大事件表

年代	事件
1820 年	丹麦物理学家奥斯特发现电流磁效应
1831 年	英国法拉第发现电磁感应定律
1837 年	美国科学家莫尔斯 (Morse) 发明有线电报，发明了莫尔斯电码
1865 年	英国物理学家麦克斯韦 (Maxwell) 发表电磁场理论
1876 年	贝尔 (Bell) 利用电磁感应原理发明了电话机
1887 年	德国物理学家赫兹 (Hertz) 实验证明电磁波的存在
1898 年	意大利科学家马可尼 (Marconi) 和俄国波波夫发明无线电报
1904 年	英国物理学家弗莱明 (Fleming) 发明真空二极管
1906 年	美国工程师福雷斯特 (Forest) 发明真空三极管
1936 年	FM 广播出现，黑白电视机发明
1937 年	英国人里夫斯提出脉冲编码调制理论
1945 年	美国发明第一台计算机 ENIAC
1948 年	肖克莱 (Shockley) 等人发明了晶体三极管，香农 (Shannon) 提出了信息论
1950 年	时分多路 (TDM) 技术出现
1954 年	彩色电视机发明
1958 年	美国发明第一片集成电路
1960 年	第一颗通信卫星发射，激光器研制成功
1962 年	美国研究成功了脉码调制设备
1966 年	英籍华人高锟提出用石英玻璃可以制成低损耗光纤的设想
1969 年	出现了激光通信，世界第一个计算机网络 (ARPANET) 诞生
1970 ~ 1980	大规模集成电路、卫星通信、程控数字交换机、光纤通信等迅速发展
1980 ~ 1990	超大规模集成电路、移动通信、光纤通信的广泛应用，综合数字网崛起
1990 年以后	卫星通信、光纤通信、移动通信进一步飞速发展，HDTV、GPS 广泛应用

1.1.3 通信的种类

1) 按业务类型分为：电报、电话、会议电视、传真、数据通信等。广义上讲，广播、电视、导航、遥测、遥控也属于通信范畴。

2) 按传输媒质分为：无线通信和有线通信。所谓有线通信是指传输媒质为电缆、光缆等形式的通信。所谓无线通信是指利用高频电磁波经自由空间传递消息的一种通信方式。

3) 按信号类型分为：模拟通信和数字通信。利用模拟信号作为载体传递信息的通信方式称为模拟通信。利用数字信号作为载体传递信息的通信方式称为数字通信。

4) 按信号复用方式分为：频分复用、时分复用和码分复用。频分复用是用频谱搬移的方法使不同信号占据不同的频率范围，时分复用是使不同信号占据不同的时间间隔，码分复用则是用一组包含互相正交的码字的码组携带多路信号。

5) 按通信者是否运动分为：固定通信和移动通信。移动通信是指通信双方至少有一方是在运动中进行信息传递的通信方式。

1.1.4 模拟通信与数字通信

通信系统所传输的信息形式是多种多样的，可以是符号、文字、语音或图像等。为了实现信息的传输，首先要把它转换为相应的电信号。通常，这些信号是以它的某个参量的变化来表示信息的。按照信号参量的取值方式不同，可将信号分为两类：模拟信号与数字信号。

1. 模拟信号与数字信号

(1) 模拟信号 (analog signal)

模拟信号的特点是信号参量的取值是连续的。由于模拟信号的参量是随时间连续变化的，所以模拟信号也称连续信号。连续的含义是在某一取值范围内可以取无限多个值。

一般来说，模拟信号是把非电物理量经传感器（如话筒）变换为以电压或电流表示的电信号。例如语音、图像是非电量，经送话器、摄像机可转换为电压或电流的模拟电信号，其特点是其幅度的取值在时间上连续，且大小随非电物理量的特征——声音强度、图像亮度成比例地连续变化，其波形如图 1-1a 所示。

如果对模拟信号以相同的时间间隔 T_s 抽取样值，如图 1-1b 所示，虽然抽样后的样值信号在时间上已经离散，但其幅度的取值仍包含无限多个数值，且与原模拟信号一一对应，通常称这种抽样后的信号为脉冲幅度调制 (PAM) 信号。因为它的幅度取值不是离散的，仍有无限多个值，所以它仍是模拟信号。

(2) 数字信号 (digital signal)

数字信号的参量取值是离散的。数字信号又称离散信号。数字信号的特点是其参量取值是有限的。图 1-2 给出了数字信号波形的例子，其中图 1-2a 是二进制码，每个码只有 0 或

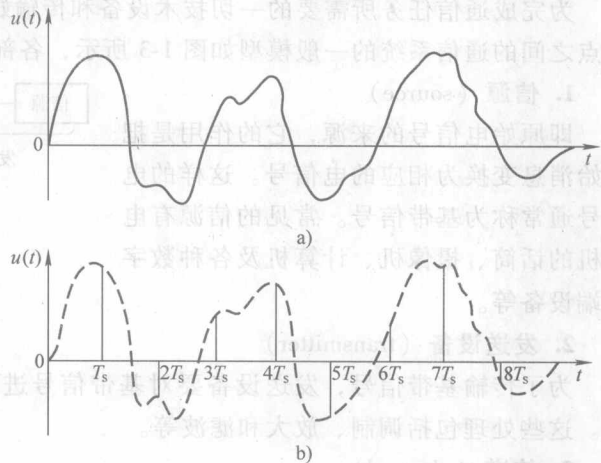


图 1-1 模拟信号

a) 模拟电信号 b) 脉冲幅度调制信号

A 两种取值, 图 1-2b 是四进制码, 每个码取值有 3、1、-1、-3 四种取值。

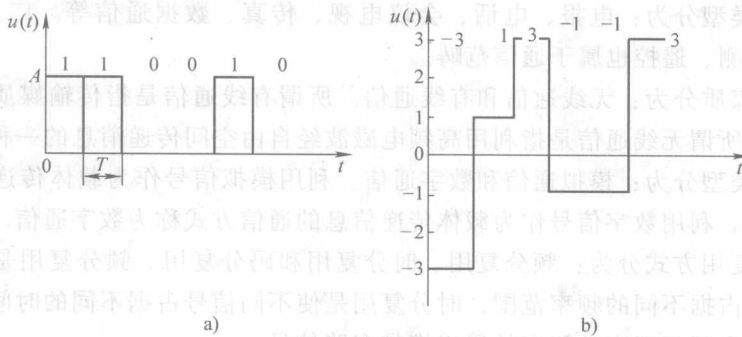


图 1-2 数字信号

a) 二进制码 b) 四进制码

我们把这种在时间和幅度上都离散的信号称为数字信号。电报信号就是数字信号的典型例子。

2. 模拟通信与数字通信

利用模拟信号作为载体来传递信息的通信方式称为模拟通信。利用数字信号作为载体来传递信息的通信方式称为数字通信。对于数字通信, 根据信源发出的信号类型又可以分为数据通信和模拟信号数字化传输两类。前者的典型应用是计算机通信, 后者的典型应用是数字电话通信。

1.1.5 通信系统的一般模型

为完成通信任务所需要的一切技术设备和传输媒质所构成的总体称为通信系统。基于点与点之间的通信系统的一般模型如图 1-3 所示, 各部分功能简述如下。

1. 信源 (source)

即原始电信号的来源, 它的作用是把原始消息变换为相应的电信号。这样的电信号通常称为基带信号。常见的信源有电话机的话筒、摄像机、计算机及各种数字终端设备等。



图 1-3 通信系统的一般模型

2. 发送设备 (transmitter)

为了传输基带信号, 发送设备要对基带信号进行处理和变换, 使它适合于在信道中传输。这些处理包括调制、放大和滤波等。

3. 信道 (channel)

用于在发送设备和接收设备之间传输信号的媒质称为信道。根据传输媒质的不同, 信道可分为有线信道 (电缆、光缆等) 与无线信道 (包括微波等)。

4. 接收设备 (receiver)

其功能与发送设备相反, 作用是对接收到的信号进行必要的处理和变换, 以便恢复出相应的基带信号。

5. 收信者 (distination)

其作用是将恢复出来的原始电信号转换成相应的消息, 例如电话机的听筒将音频电信号

转换为声音。收信者是信息的归宿，可以是人或者机器。

6. 噪声源 (noise)

噪声源是信道中的噪声以及分散在通信系统中各处的噪声的集中表示。

1.2 数字通信系统的基本组成

数字通信系统的模型如图 1-4 所示，各部分功能简述如下。

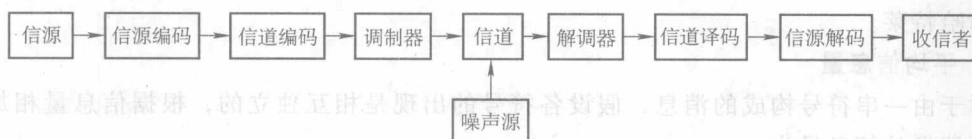


图 1-4 数字通信系统模型

1. 信源编码

信源产生的信号绝大多数都是模拟信号。信源编码的任务就是把模拟信号转换为相应的数字信号。常用的模数转换方法有脉冲编码调制 (PCM) 技术、增量调制 (ΔM) 技术及自适应差值脉冲编码调制 (ADPCM) 技术等。

2. 信道编码

信道编码的功能有两个：一是对数字信号在传输过程中可能出现的差错进行检错和纠错，二是为了使信源编码后的数字信号更适合于在信道上传输，进行码型变换。

3. 调制

经过信源编码和信道编码后的数字信号仍然是基带信号，只适合于在有线信道中直接传输，在无线信道中不能直接传输。基带信号必须经过调制，即将基带信号的频谱搬移到适合于无线信道传输的频谱上才能在无线信道中传输。

4. 噪声

噪声分为系统内部噪声与系统外部噪声两大类。噪声对通信是有害的，因为它对通信系统中的信号传输与处理起扰乱作用。因此，必须通过改善传输媒质性能和信道编码等措施来加以克服。

接收端的解调、信道解码、信源解码等设备的功能与发送端对应设备的功能正好相反，是一一对应的反变换关系。收信者可以是人，也可以是各种终端设备。对于具体的数字通信系统而言，其方框图并非要和图 1-4 完全一样。例如，若信源发出的是数字信号，则信源编码和信源解码环节就可省掉，若通信距离不太远，且通信容量不太大时，信道一般可采用基带传输方式，这样就不需要调制和解调环节了。

1.3 数字通信系统的性能指标

为了衡量通信系统的质量优劣，必须引入通信系统的性能指标。通信系统的性能指标涉及到通信的有效性、可靠性、标准性、经济性等方面。从信息传输的角度来讲，通信的有效性和可靠性是最重要的指标。

1.3.1 有关的几个概念

1. 信息量

衡量某消息中包含信息多少的物理量称为信息量。信息量的定义为：若一消息 x_i 出现的概率为 $P(x_i)$ ，则这一消息所含的信息量为

$$I(x_i) = \log_a \frac{1}{P(x_i)} = -\log_a P(x_i) \quad (1-1)$$

信息量的单位取决于式 (1-1) 中对数底 a 的取值。如果 a 取值为 2，则信息量的单位为比特；如果取 e 为对数的底，则信息量的单位为奈特；如果取 10 为对数的底，则信息量的单位为哈特莱。

2. 平均信息量

对于由一串符号构成的消息，假设各符号的出现是相互独立的，根据信息量相加的概念，该消息的信息量为

$$I = - \sum_{i=1}^N n_i \log_2 P(x_i) \quad (1-2)$$

式中， n_i 为第 i 种符号出现的次数； $P(x_i)$ 为第 i 种符号出现的概率； N 为信息源的符号种类。当消息很长时，用符号出现概率和次数来计算信息量比较麻烦，此时可用平均信息量的概念来计算。平均信息量是指每个符号所含信息量的统计平均值，其定义式如下

$$H(x) = - \sum_{i=1}^N P(x_i) \log_2 P(x_i) \quad (1-3)$$

$H(x)$ 的单位为比特/符号，通常又称平均信息量为熵 (entropy)。可以证明，当信源中每种符号出现的概率相等，且各符号的出现为统计独立时，该消息的平均信息量最大，即

$$H_{\max} = \log_2 N \quad (1-4)$$

3. 码元

携带信息的基本数字信号单元称作码元。在数字通信中，它一般指在信道中所传送数字信号的一个波形符号。它可以是二进制的，也可以是多进制的。在二进制数字通信系统中，码元只有两种取值即“0”和“1”。

4. 比特

比特是英文 bit 的译音。比特的英文全称为 binary digit，意为二进制数字。在二进制中，一位二进制数字就叫 1 比特。在数字通信中，比特还是信息量的度量单位，一个二进制码元所包含的信息量即为 1 比特。

1.3.2 有效性指标

数字通信系统的有效性是指传输一定信息量所占用的信道资源数 (带宽和时间)，一般用传码率、传信率和频带利用率来衡量。

1. 传码率

又称码元速率，指系统在单位时间内传送码元数目的多少，用 R_B 表示，单位为码元/秒，又称波特 (Baud)。

2. 传信率

又称比特率，指系统在单位时间内传送信息量的多少，用 R_b 表示，单位为比特/秒 (bit/s)。

传信率与传码率具有不同的定义，二者不能混淆，但它们之间又有确定的关系。对于二进制来说，每个码元含信息量为 1 比特。因此，二进制的传码率与传信率在数值上是相等的。而对于 M 进制码元来说，每一码元所包含的信息量为 $\log_2 M$ 比特。因此，二者关系可表示为

$$R_b = R_B \log_2 M \quad (1-5)$$

式中， M 表示码元的进制。例如，某通信系统每秒钟传送 2400 个码元，则其传码率为 2400 Baud。当码元为二进制时，其传信率为 2400 bit/s，当码元为四进制时其传信率为 4800 bit/s。

3. 频带利用率

指通信系统在单位频带内所能达到的传信率，用 η 表示，单位为 (比特/秒)/赫兹 ((bit/s)/Hz)。它反映了系统对频带资源的利用水平，其定义式为

$$\eta = \frac{\text{传信率}}{\text{占用频带宽度}} \quad (1-6)$$

【例 1-1】 设有三个数字通信系统 A、B 和 C，在 $125 \mu\text{s}$ 时间内分别传送了 256 个八进制、二进制和二进制码元，而系统 B 和 C 所占用的信道频带分别为 2.048 MHz 和 1.024 MHz，试计算三个系统的传码率、传信率以及 B、C 两个系统的频带利用率。

解： $R_{B1} = [256 / (125 \times 10^{-6})] \text{Baud} = 2.048 \times 10^6 \text{Baud}$

$$R_{b1} = R_{B1} \cdot \log_2 M = (2.048 \times \log_2 8) \text{bit/s} = 6.144 \times 10^6 \text{bit/s}$$

$$R_{B2} = R_{B3} = R_{B1} = 2.048 \times 10^6 \text{Baud}$$

$$R_{b2} = R_{b3} = R_{B1} \cdot \log_2 2 = 2.048 \times 10^6 \text{bit/s}$$

$$\eta_2 = 2.048 \times 10^6 / (2.048 \times 10^6) (\text{bit/s})/\text{Hz} = 1 (\text{bit/s})/\text{Hz}$$

$$\eta_3 = 2.048 \times 10^6 / (1.024 \times 10^6) (\text{bit/s})/\text{Hz} = 2 (\text{bit/s})/\text{Hz}$$

由例 1-1 可见，系统 A、B 虽然传码率相同，但系统 A 传信率高，故其有效性高。系统 B、C 虽然传码率、传信率相同，但系统 C 频带利用率高，更节省信道频率资源，因此系统 C 有效性高。因此，分析一个数字通信系统的有效性不能只看其中一个指标，需要把传码率、传信率、频带利用率三者综合考虑。

1.3.3 可靠性指标

数字通信系统的可靠性是指接收信息的准确程度，用误码率 (P_e) 和误比特率 (P_b) 来衡量。

1. 误码率

指在传输码元总数中发生差错的码元数所占的比例。

$$P_e = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\text{发生误码个数 } n}{\text{传输总码元数 } N} \quad (1-7)$$

这个指标是多次统计结果的平均量，所以指的是平均误码率。

2. 误比特率

指在传输比特总数中发生差错的比特数所占的比例。

$$P_b = \frac{\text{传错的比特数}}{\text{传输的总比特数}} \quad (1-8)$$

误比特率是通信系统常用的指标，不同的通信系统对误比特率的要求不同。如数字电话

要求误比特率不大于 10^{-5} ，而数据通信则要求误比特率不大于 10^{-8} 。

1.4 信道与信道容量

信道是信号的传输媒质。通信系统传送信号有两种方式：一是沿导体或光纤传播，即有线通信方式，二是通过自由空间传播，即无线通信方式。因而信道有有线信道和无线信道之分。

1.4.1 有线信道

构成有线信道的传输媒质主要有双绞线、同轴电缆、光纤等，它们分别适应于不同的通信系统的需求。

1. 双绞线

双绞线是由两条相互绝缘的铜导线扭绞起来构成的。扭绞处理的目的是减小噪声。双绞线既可用于传输模拟信号，也可用于传输数字信号，其通信距离一般为几到几十千米。由于电磁耦合和集肤效应的影响，线对的传输衰减随着频率的增高而增大，故信道的传输特性呈低通特性。由于双绞线成本低且性能较好，在数据通信中应用普遍。双绞线有非屏蔽和屏蔽两种类型。

(1) 非屏蔽双绞线 (UTP)

其传输信号的频率范围为 $100\text{Hz} \sim 5\text{MHz}$ ，对于传输数字信号和语音信号都是适用的。UTP 的优点是价格便宜且使用方便，在许多局域网中经常采用。

(2) 屏蔽双绞线 (STP)

屏蔽双绞线在每一对导线外都有一层金属箔或金属网格。这层金属的作用是屏蔽电磁噪声和防止串线干扰。

2. 同轴电缆

同轴电缆是由内导体（实心铜线）、外导体（金属网格）、绝缘层和外部保护层构成。内导体和外导体位于同一轴线上，其结构如图 1-5 所示。外导体除传导电流外，还起到屏蔽的作用。

同轴电缆应用时外导体是接地的，故同轴电缆具有很好的抗干扰性，它与双绞线相比具有较好的频率特性。同轴电缆传输信号的频率范围为 $100\text{kHz} \sim 500\text{MHz}$ 。

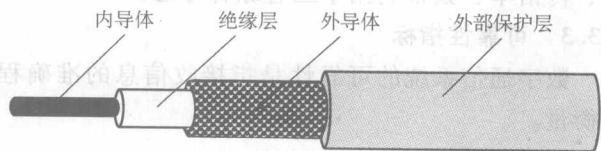


图 1-5 同轴电缆结构示意图

3. 光纤

光纤是由玻璃或塑料制成的，是以光波形式传输信号的。光纤直径大约 0.1mm 。光波的波长为微米级。目前，光纤通信使用的光波长在近红外区内，即波长为 $0.8 \sim 1\mu\text{m}$ 。20 世纪 80 年代初的多模光纤通信应用 850nm 窗口，20 世纪 90 年代初的 PDH 系统应用 1310nm 窗口，1993 年开始的 SDH 逐步转向 1550nm 窗口。光在真空中以每秒 30 万公里的速度传播。光纤利用全反射原理将光线限制在信道内定向传输。光纤中心是玻璃或塑料的芯材，外面填充着密度相对较小的玻璃或塑料，两者的密度差异必须达到能够使芯材中的光线只能反射回来而不能折射入填充材料的程度。光纤的结构如图 1-6 所示。

光纤的特点有：

① 不受外界电磁波的干扰。因为光纤传输使用的是光波而不是电磁波，所以电磁噪声对它没有影响。

② 信号衰减小，光纤的衰耗约为 0.2dB/km。

③ 传输频带宽、通信容量大。

④ 线径细、重量轻。由于光纤的质地脆、机械强度低，在实际应用中是将多根光纤外加护套组成光缆使用。



图 1-6 光纤的结构示意图

1.4.2 无线信道

所谓无线传输就是不使用物理导体来传输信号，而是将信号转换为电磁波通过自由空间传播出去。在不便于架设有线信道或远距离传输的场所，必须采用无线信道。无线信道一般具有频率高、通信容量较大的特点，它属带通型信道。微波通信、卫星通信和移动通信的信道均属无线信道。

1.4.3 信道容量

信道容量表示信道每秒可能传送的最大信息量，即最大传信率。信息论中的基本定理——香农公式揭示了信道传输信息的能力。

香农 (Shannon) 公式内容为：对于带宽为 B Hz、信噪比为 S/N 的有扰连续信道（干扰为加性高斯白噪声），其信道容量（即最大传信率） C (单位：bit/s) 为

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (1-9)$$

式中， S 为信号功率； N 为噪声功率； S/N 为信噪比。通常把信噪比表示成 $10 \lg(S/N)$ (单位：dB)。由香农公式可以得出以下结论：

- 1) 提高信噪比 S/N ，可增加信道容量。
- 2) 当噪声功率 $N \rightarrow 0$ 时， $C \rightarrow \infty$ 。说明无扰信道的信道容量为无穷大。
- 3) 当信号功率 $S \rightarrow \infty$ 时， $C \rightarrow \infty$ 。说明当允许信号功率不受限时，信道容量可达无穷大。
- 4) 当信道带宽 $B \rightarrow \infty$ 时， $C \rightarrow 1.44(S/n_0)$ (n_0 为噪声单边功率谱密度)，也即信道带宽即使无限增大，信道容量仍然是有限的。
- 5) 当信道容量一定时，信道带宽与信噪比之间可以互换。

【例 1-2】 电话信道的带宽为 3kHz，信噪比为 30dB。试计算其信道容量。

解：

$$\text{信道容量 } C = B \log_2(1 + S/N) = 29.9 \times 10^3 \text{ bit/s}$$

1.5 数字通信的特点及发展趋势

1.5.1 数字通信的特点

数字通信与模拟通信相比，无论是在传输质量上还是在技术上都有其显著特点。

1. 优点