

新
版

21世纪

高职高专系列教材

数字通信技术

◎李志菁 主编

14. 3-43
1-2



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



21 世纪高职高专系列教材

数 字 通 信 技 术

李志菁 主编
高 健 主审



机 械 工 业 出 版 社

本书介绍了通信系统的基本组成和基本概念、信源编码、信道编码、模拟信号的数字传输、基带传输、频带传输、同步系统等数字通信技术。特别是为了培养学生的实际技能，书中增添了8个实验，体现了理论与实践一体化的教学理念。

全书共6章，第1章绪论；第2章信源编码；第3章数字信号的基带传输；第4章数字信号的频带传输；第5章同步系统；第6章信道编码。

本书的特点是系统性强，内容编排连贯，突出基本概念、基本原理，减少不必要的数学推导和计算；注重数字通信技术理论在实际通信系统中的应用。本书每一章都配有实验和习题。

本书可作为高职高专院校无线电通信和无线电技术专业教材，也可供其他专业人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

数字通信技术/李志菁主编. —北京：机械工业出版社，2005.7

(21世纪高职高专系列教材)

ISBN 7-111-16892-5

I. 数... II. 李... 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(2005)第075642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：蔡岩 版式设计：张世琴 责任校对：唐海燕

封面设计：雷明顿 责任印制：陶湛

北京铭成印刷有限公司印刷

2005年8月第1版第1次印刷

787mm×1092mm $\frac{1}{16}$ ·9.75印张·234千字

0001 5000册

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

本社购书热线电话(010)68326294

封面无防伪标均为盗版

21 世纪高职高专 电子技术专业系列教材编委会成员名单

主 任	曹建林				
副 主 任	张中洲	张福强	祖 炬	董维佳	
	俞 宁	蒋蒙安	吕何新	伍湘彬	
	任德齐	华永平	吴元凯		
委 员	(按姓氏笔画排序)				
	马 彪	邓 红	王树忠	王新新	尹立贤
	白直灿	包中婷	冯满顺	华天京	吉雪峰
	刘美玲	刘 涛	孙吉云	孙津平	朱晓红
	李菊芳	邢树忠	陈子聪	杨元挺	张立群
	张锡平	苟爱梅	姚建永	曹 毅	崔金辉
	黄永定	章大钧	彭文敏	曾日波	谭克清
秘 书 长	胡毓坚				
副秘书长	戴红霞				

出版说明

根据《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》中提出的高等职业院校必须把培养学生动手能力、实践能力和可持续发展能力放在突出的地位,促进学生技能的培养,以及教材内容要紧密结合生产实际,并注意及时跟踪先进技术的发展等指导精神,机械工业出版社组织全国40余所院校的骨干教师对在2001年出版的“面向21世纪高职高专系列教材”进行了修订。

在几年的教学实践中,本系列教材获得了较高的评价。因此,在修订过程中,各编委会保持了第1版教材“定位准确、注重能力、内容创新、结构合理和叙述通俗”的编写特色。同时,针对教育部提出的高等职业教育的学制将由三年逐步过渡为两年,以及强调以能力培养为主的精神,制定出了本次教材修订的原则:跟上我国信息产业飞速发展的节拍,适应信息行业相关岗位群对第一线技术应用型操作人员能力的要求,针对两年制兼顾三年制,理论以“必须、够用”为原则,增加实训的比重,并且制作了内容丰富而且实用的电子教案,实现了教材的立体化。

针对课程的不同性质,修订过程中采取了不同的处理办法。核心基础课的教材在保持扎实的理论基础的同时,增加实训和习题;实践性较强的课程强调理论与实训紧密结合;涉及实用技术的课程则在教材中引入了最新的知识、技术、工艺和方法。此外,在修订过程中,还进行了将几门课程整合在一起的尝试。所有这些都充分地体现了修订版教材求真务实、循序渐进和勇于创新的精神。在修订现有教材的同时,为了顺应高职高专教学改革的不断深入,以及新技术新工艺的不断涌现和发展,机械工业出版社及教材编委会在对高职高专院校的专业设置和课程设置进行了深入的研究后,还准备出版一批适应社会发展的急需教材。

信息技术以前所未有的速度飞快地向前发展,信息技术已经成为经济发展的关键手段,作为与之相关的教材要抓住发展的机遇,找准自身的定位,形成鲜明的特色,夯实人才培养的基础。为此,担任本系列教材修订任务的教师,将努力把最新的教学实践经验融于教材的编写之中,并以可贵的探索精神推进本系列教材的更新。由于高职高专教育正在不断的发展中,加之我们的水平和经验有限,在教材的编审中难免出现问题和错误,恳请使用这套教材的师生提出宝贵的意见和建议,以利我们今后不断改进,为我国的高职高专教育事业作出积极的贡献。

机械工业出版社

前 言

本教材以培养技能型人材为目标,注重学生能力的培养。本教材适用于高等职业技术教育电子与信息技术专业的课程教学或通信技术专业的基础课程教学。

在当今和未来的信息化社会中,数字通信已成为信息传输的重要手段,全球数字化已成为当今社会的主要潮流,数字通信的新设备在不断涌现,人们越来越离不开数字通信这种手段,越来越期望了解和掌握数字通信技术。

本书以数字通信技术为主线,对通信系统的基本组成和基本概念、信源编码、信道编码、模拟信号的数字传输、基带传输、频带传输、同步系统等主要技术进行了全面系统的论述,同时对一些较新的调制解调技术作了介绍,特别是为了培养学生的实际技能,书中增添了8个实验,体现了理论与实践一体化的教学理念。

全书共6章,参考学时数为80学时。

第1章:绪论,主要介绍通信系统的基本组成和基本概念,重点介绍数字通信的主要性能指标、信道与噪声、通信技术发展概况。

第2章:信源编码,主要讨论了语音信号的数字化方式、脉冲编码调制(PCM)、增量调制(ΔM)、时分复用与数字复接原理。

第3章:数字信号的基带传输,主要介绍数字基带信号、数字基带传输系统、无码间串扰的基带传输系统、眼图和均衡。

第4章:数字信号的频带传输,着重介绍了数字信号的频带传输、内容包括二进制、多进制数字调制以及数字调制系统性能比较。

第5章:同步系统,重点分析了载波同步、位同步、群同步(帧同步)、网同步技术。

第6章:信道编码,主要介绍了信道编码的基本概念、常用的差错控制编码、线性分组码。

本书的特点是系统性强,内容编排连贯,突出基本概念、基本原理,减少了不必要的数学推导和计算;注重数字通信技术理论在实际通信系统中的应用。本书每一章节都配有实验和习题。

本教材由天津电子信息职业技术学院李志菁担任主编,并编写了第1章、第6章和全书的全部实验内容。山东信息职业技术学院宋悦孝编写了第2章和第3章的内容。山东省电子工业学校王毅东编写了第4章和第5章的内容。珠海城市职业技术学院高健担任主审,主审人对本书提出了许多宝贵的指导性意见,对此表示诚挚的谢意。

本书在编写过程中得到了张伟和王茹香老师的帮助,在此表示衷心的感谢。

限于作者的水平,书中难免有不妥或错误之处,恳请读者批评指正。

目 录

出版说明

前言

第1章 绪论 1

1.1 通信的概念 1

1.1.1 信号与信息 1

1.1.2 通信的分类 1

1.1.3 通信方式 4

1.2 通信系统的组成 5

1.2.1 模拟通信系统 6

1.2.2 数字通信系统 6

1.2.3 数字通信的主要优缺点 7

1.3 数字通信系统的主要性能指标 7

1.3.1 一般通信系统的性能指标 8

1.3.2 信息及其度量 8

1.3.3 数字通信系统的有效性和可靠性 9

1.4 信道与噪声 10

1.4.1 信道的定义与分类 11

1.4.2 信道的模型 11

1.4.3 信道的干扰和噪声 13

1.4.4 信道容量 15

1.5 数字通信发展概况 17

1.5.1 数字通信发展简史 17

1.5.2 数字通信的现状与发展趋势 18

1.6 实验 19

1.7 习题 24

第2章 信源编码 25

2.1 语音信号的数字化方式 25

2.1.1 PCM 通信系统 25

2.1.2 DPCM 系统 31

2.2 脉冲编码调制(PCM) 33

2.2.1 抽样定理 33

2.2.2 量化 36

2.3 增量调制(ΔM) 43

2.3.1 简单增量调制 44

2.3.2 改进型增量调制 47

2.4 多路复用与数字复接原理 49

2.4.1 频分多路复用 49

2.4.2 时分多路复用 50

2.4.3 数字复接技术 52

2.5 实验 57

2.5.1 抽样定理和脉冲调幅实验 57

2.5.2 脉冲编码调制(PCM)实验 59

2.5.3 增量调制(ΔM)编译码实验 64

2.6 习题 69

第3章 数字信号的基带传输 70

3.1 数字基带信号 70

3.1.1 数字基带信号的常用码型 70

3.1.2 数字基带信号功率谱密度 74

3.2 数字基带传输系统 77

3.2.1 数字基带系统的基本组成 77

3.2.2 码间串扰的消除 78

3.3 无码间串扰的基带传输系统 80

3.3.1 理想基带传输系统 80

3.3.2 升余弦滚降传输特性 81

3.4 眼图和均衡 82

3.4.1 眼图 82

3.4.2 均衡 83

3.5 实验 85

3.6 习题 91

第4章 数字信号的频带传输 92

4.1 二进制数字调制 92

4.1.1 二进制数字振幅键控(2ASK) 92

4.1.2 二进制数字频移键控(2FSK) 95

4.1.3 二进制数字相移键控(2PSK) 98

4.2 多进制数字调制	100	5.4 群同步(帧同步)技术	126
4.2.1 多进制数字振幅键控(MASK)	101	5.4.1 起止式同步法	127
4.2.2 多进制数字频移键控(MFSK)	102	5.4.2 集中式插入法	127
4.2.3 多进制数字相移键控(MPSK)	103	5.4.3 分散式插入法	128
4.3 数字调制系统性能比较	105	5.5 网同步技术	129
4.3.1 二进制数字调制系统 的性能比较	105	5.5.1 全网同步系统	129
4.3.2 多进制数字调制系统 的性能比较	105	5.5.2 准同步系统	130
4.4 实验	106	5.6 实验	130
4.4.1 幅度键控(ASK)调制解调 系统实验	106	5.7 习题	133
4.4.2 频移键控(FSK)调制解调 系统实验	109	第6章 信道编码	134
4.4.3 相移键控(PSK、DPSK)调制 解调实验	114	6.1 概述	134
4.5 习题	120	6.1.1 信道编码的基本概念	135
第5章 同步系统	121	6.1.2 差错控制的方法	137
5.1 同步的概念	121	6.2 常用的差错控制编码	138
5.2 载波同步技术	122	6.2.1 奇偶校验码	138
5.2.1 插入导频法	122	6.2.2 二维奇偶校验码	138
5.2.2 直接提取法	123	6.2.3 恒比码	139
5.3 位同步技术	124	6.2.4 正反码	140
5.3.1 外同步法	125	6.3 线性分组码	140
5.3.2 自同步法	125	6.3.1 基本概念	140
		6.3.2 监督矩阵 H 和生成矩阵 G	141
		6.3.3 伴随式(校正子)S	143
		6.4 习题	144
		参考文献	145

第 1 章 绪 论

本章要点

- 通信的基本概念与分类
- 数字通信系统的构成与特点
- 数字通信系统的主要性能指标
- 信道与噪声
- 信道容量的计算

1.1 通信的概念

1.1.1 信号与信息

通信是指由一地向另一地进行消息的有效传递。例如：古代的烽火台、金鼓、旌旗，现代的书信、电报、电话、传真、电子信箱、可视图文等，都是人们用来传递信息的方式。要互通情报，交换消息，这就需要消息的传递。

通信的方式多种多样，其中利用“电”来传递信息，是一种最有效的传输方式，这种通信方式称为电通信。电通信方式能使消息几乎在任意的通信距离上实现既迅速、有效，又准确、可靠的传递，因此它发展迅速，应用极其广泛。

电通信一般指电信，即指利用电子等技术手段，借助电信号(含光信号)实现从一地向另一地进行消息的有效传递和交换。电信业务可分为电报、电话、数据传输、传真、可视电话等。从广义上讲，广播、电视、雷达、导航、遥控遥测、计算机通信等都应属于电通信的范畴。

人类社会的生存和发展离不开信息的交流，尤其是随着社会生产力的发展和科技的进步，现在人类社会已步入了信息社会，信息高效、快速的传递变得越来越重要。既然信息对于人类社会是如此普遍和重要，因此首先弄清楚它的含义就变得很有必要。

什么叫信息？在通信中，信息是指对收信者来说还不知道的、待传送、交换、存储或提取的内容。

信号是信息的载体，是运载信息的工具。人们要想传递和交换信息，必须借助于信号，首先用信号来表示。例如：说出来的语言、写出来的文字、画出来的图像、编出来的电码等，都是不同形式的信号。同一信息可用不同形式的信号来表示，从这一意义上讲，可以认为通信的任务是传递和交换信号。

1.1.2 通信的分类

通信的目的是传递消息。通信按照不同的分类法，可分成许多类型，下面我们介绍几种

常用的分类方法。

1. 按传输媒质分

按消息由一地向另一地传递时传输媒质的不同,通信可分为两大类:一类称为有线电通信,另一类称为无线电通信。所谓有线电通信,是以架空明线、波导等导体为传输媒介,常用的市内电话、海底电缆通信等都属于有线电通信。其特点是媒质能看得见,摸得着。所谓无线通信,是指传输消息的媒质为看不见、摸不着的媒质(如电磁波)的一种通信形式。

通常,有线通信亦可进一步再分类,如明线通信、电缆通信、光缆通信等。无线通信常见的形式有微波通信、短波通信、移动通信、卫星通信、散射通信等,其形式较多。

无线电通信较之有线电通信具有机动灵活、不受地理环境限制、通信区域广等特点。在某些场合,如卫星通信、移动体(汽车、飞机、轮船等)的通信,只能采用无线电通信。但无线电通信容易受到外界干扰、保密性差。有线电通信可靠性高,成本低,适合于近距离固定点之间的通信。在一个大型的通信系统中,有线电通信系统和无线电通信系统往往并存,相互补偿。

2. 按信道中所传信号的不同分

信道是个抽象的概念。这里我们可理解成传输信号的通路,在 1.4 节里将详细介绍。通信系统若按所传输信号的形式分类,可以分为模拟通信系统和数字通信系统。

模拟通信系统传输模拟信号,自然界存在的信号大多是模拟信号,其主要的特征有两个,一是时间上连续,任意时刻的信号值都是它的一部分;其次是状态连续,任意时刻的值和与其相邻时刻的值相关,从数学角度上讲,模拟信号的值对时间的导数(dV/dt)总是存在的。常见的模拟信号有话音信号、电视图像信号以及来自于各种传感器的检测信号等。

数字通信系统传输数字信号,数字信号是另一种形式的信号,它具有离散且有限的状态。目前常见的数字信号多为二进制信号,其两个状态分别用“1”和“0”表示。图 1-1 是模拟信号和数字信号的波形。相对而言,模拟信号比较适合于传输,数字信号则比较适合于处理。

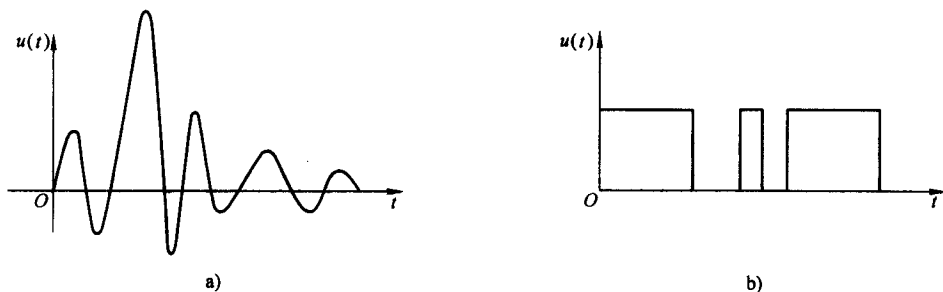


图 1-1 模拟信号和数字信号的波形

a) 模拟信号波形 b) 数字信号波形

模拟信号与数字信号是可以相互转换的。模拟信号可以通过 A/D 转换(数字编码)变为数字信号,而数字信号通过 D/A 转换(解码)可以变为模拟信号,在通信中常见的数字编解码方式有 PCM 编码、增量调制以及在此基础上改进的各种方式。值得一提的是,当数字信号需要在模拟信道中传输时,数字基带信号必须进行正弦调制,将基带信号转换成频带信号,以适应模拟信道的传输特性,比如计算机数据要通过模拟电话线传输时,必须使用调制

解调器(Modem)，有些资料把这种方式称为数字信号的模拟传输。

3. 按工作频段分

根据通信设备的工作频率不同，通信通常可分为长波通信、中波通信、短波通信、微波通信等。为了比较全面地对通信中所使用的频段有所了解，下面把通信使用的频段及说明列入表 1-1 中，供读者参考。

表 1-1 通信使用的频段及主要用途

波段名称	频率范围(f)	波长(λ)	主要传输方式及用途
长波	30~300kHz	1000~10000m	地表波、远距离通信、导航
中波	300~3000kHz	100~1000m	地表波、调幅广播、船舶通信、飞行通信
短波	3~30MHz	10~100m	电离层反射波、调幅及单边带通信、调幅广播
超短波	30~300MHz	1~10m	直射波、调频通信、调频广播和电视、雷达和导航
分米波	300~3000MHz	10~100cm	直射波、对流层散射波、接力通信、卫星通信与雷达
厘米波	3~30GHz	1~10cm	直射波、接力通信、卫星通信与雷达
毫米波	30~300GHz	1~10mm	

4. 按调制方式分

根据消息在送到信道之前是否采用调制，通信可分为基带传输和频带传输。所谓基带传输是指信号没有经过调制而直接送到信道中去传输的一种方式，基带信号含有低频成分甚至直流成分的信号，通常原始信号都是基带信号。基带信号所占据的频带宽度相对于它的中心频率而言很宽，不适合于较长距离传输，更不能进行无线电发送。话音信号是一种典型的基带信号，它由人的声音经话筒转换而成，其频率在几十个 Hz 到十几个 kHz 范围内。计算机数据也是一种基带信号。而频带传输是指信号经过调制后再送到信道中传输，接收端有相应解调措施的通信系统。频带信号的中心频率相对较高，带宽又窄，因此适合于在信道中传输。基带信号经过各种正弦调制可以转换成频带信号。常见的调制方式有振幅调制(AM)、单边带调制(SSB)、频率调制(FM)和相位调制(PM)。如果调制信号是数字信号，则还可以有数字键控方式的调制，如振幅键控(ASK)、频移键控(FSK)、相移键控(PSK)以及差分相移键控(DPSK)等。

5. 按业务的不同分

目前通信业务可分为电报、电话、传真、数据传输、可视电话、无线寻呼等，另外从广义的角度来看，广播、电视、雷达、导航、遥控、遥测等也应列入通信的范畴，因为它们都满足通信的定义。由于广播、电视、雷达、导航等的不断发展，目前它们已从通信中派生出来，形成了独立的学科。

6. 按受信者是否运动分

通信还可按受信者是否运动分为移动通信和固定通信。移动通信是指通信双方至少有一方在运动中进行信息交换。由于移动通信具有建网快、投资少、机动灵活，它使用户能随时随地快速可靠地进行信息传递，因此，移动通信已被列为现代通信中的三大新兴通信方式之一。

通信还有其他一些分类方法，如按多址方式可分为频分多址通信、时分多址通信、码分多址通信等。按用户类型可分为公用通信和专用通信等。

1.1.3 通信方式

通信的工作方式通常有以下几种分类方法。

1. 按消息传送的方向与时间分

通常，如果通信仅在点对点之间进行，或一点对多点之间进行，那么，按消息传送的方向与时间不同，通信的工作方式可分为单工通信、半双工通信及全双工通信。

所谓单工通信，是指消息只能单方向进行传输的一种通信工作方式，如图 1-2a 所示。单工通信的例子很多，如广播、遥控、无线寻呼等，这里，信号(消息)只从广播发射台、遥控器和无线寻呼中心分别传到收音机、遥控对象和 BB 机上。

所谓半双工通信方式，是指通信双方都能收发消息，但不能同时进行收和发的形式，如图 1-2b 所示。例如对讲机、收发报机等都是这种通信方式。

所谓全双工通信，是指通信双方可同时进行双向传输消息的工作方式。如图 1-2c 所示。这种方式，双方都可同时进行收发消息，很明显，全双工通信的信道必须是双向信道。生活中全双工通信的例子非常多，如普通电话、各种手机等。

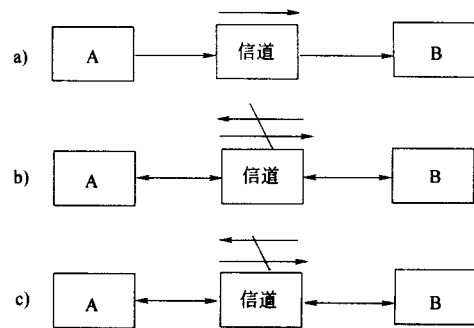


图 1-2 按消息传送的方向和时间划分的通信方式

a) 单工方式 b) 半双工方式 c) 全双工方式

2. 按数字信号排序分

在数字通信中，按照数字信号排列的不同传输顺序，可将通信方式分为串序传输和并序传输。

所谓串序传输，是将代表信息的数字信号序列按时间顺序一个接一个地在信道中传输的方式，如图 1-3a 所示，如果将代表信息的数字信号序列分割成两路或两路以上的数字信号序列同时在信道上传输，则称为并序传输通信方式，如图 1-3b 所示。

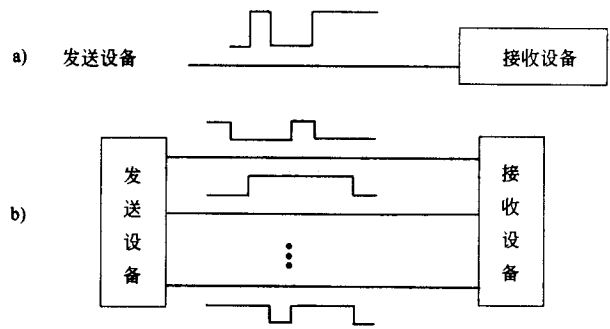


图 1-3 按数字信号排序划分的通信方式

a) 串序传输 b) 并序传输

一般的数字通信方式大多采用串序传输，这种方式只需占用一条通路，缺点是占用时间相对较长；并序传输方式在通信中也时有用到，它需要占用多条通路，优点是传输时间较短。

3. 按通信网络形式分

通信的网络形式通常可分为三种：两点间直通方式、分支方式和交换方式，它们的示意图如图 1-4 所示。

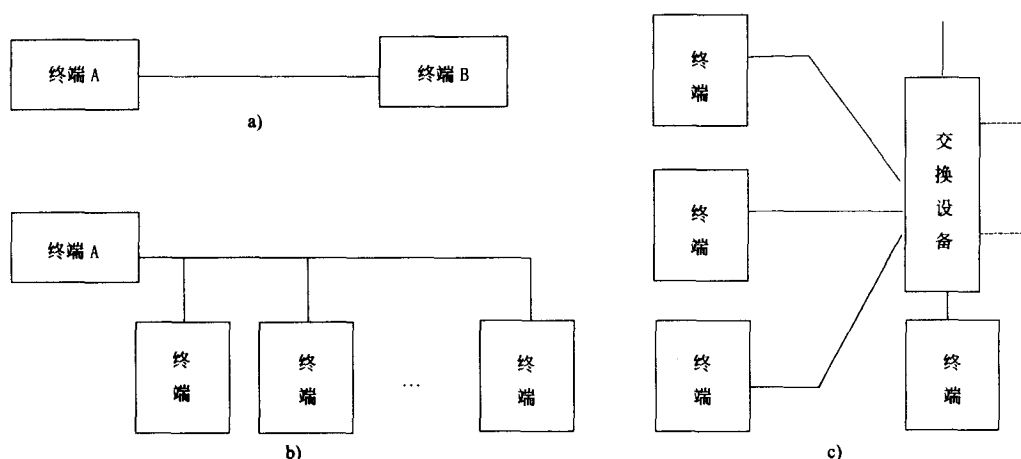


图 1-4 按网络形式划分的通信方式

a) 两点间直通方式 b) 分支方式 c) 交换方式

直通方式是通信网络中最为简单的一种形式，终端 A 与终端 B 之间的线路是专用的；在分支方式中，它的每一个终端(A、B、C、…、N)经过同一信道与转接站相互连接，此时，终端之间不能直通信息，必须经过转接站转接，此种方式只在数字通信中出现；交换方式是终端之间通过交换设备灵活地进行线路交换的一种方式，即把要求通信的两终端之间的线路接通(自动接通)，或者通过程序控制实现消息交换，即通过交换设备先把发送方发来的消息贮存起来，然后再转发至接收方。这种消息转发可以是实时的，也可是延时的。

分支方式及交换方式均属网络通信的范畴。无疑，它和点与点直通方式相比，还有其特殊的一面。例如，通信网中有一套具体的线路交换与消息交换的规定、协议等，通信网中既有信息控制问题，也有网同步问题等。尽管如此，通信网的基础仍是点与点之间的通信，因此，本书中只把注意力集中到点与点通信上，而不涉及通信网的其他问题。

1.2 通信系统的组成

通信系统是指完成信息传输过程的全部设备和传输媒介，通信系统的一般模型如图 1-5 所示。

这里，信息源(简称信源)的作用是把待传输的消息转换成原始电信号，如电话系统中电

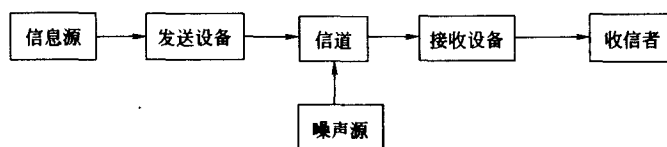


图 1-5 通信系统的模型

话机可看成是信源，信源发出的信号称为基带信号。所谓基带信号是指没有经过调制(频率搬移)的原始信号，其特点是频率较低。基带信号可分为数字基带信号和模拟基带信号。为了使原始信号(基带信号)适合在信道中传输，由发送设备对基带信号进行某种变换或处理，使之适应信道的传输特性要求。它所完成的功能很多，例如调制、放大、滤波、发射等。在数字通信系统中还包括编码和加密等。信道是信号传输的通路，信道中自然会叠加上噪声。在接收端，接收设备的功能正好相反于发送设备，它将从收到的信号中恢复出相应的原始信号。受信者(也称信宿或收终端)是将复原的原始信号转换成相应的消息，如电话机将对方传来的电信号还原成了声音。图中噪声源，是信道中的所有噪声以及分散在通信系统中其他各处噪声的集合。图中这种表示并非指通信中一定要有一个噪声源，而是为了在分析和讨论问题时便于理解而人为设置的。

按照信道中所传信号的形式不同，通信可以分为模拟通信和数字通信，为了进一步了解它们的组成，下面分别加以论述。

1.2.1 模拟通信系统

对于模拟通信系统，主要包含两种重要变换。一是把连续消息变换成电信号(由发送端信息源完成)和把电信号恢复成最初的连续消息(由收端受信者完成)。由信源输出的电信号(基带信号)由于它具有频率较低的频谱分量，一般不能直接作为传输信号送到信道中去。因此，模拟通信系统里常有第二种变换，即将基带信号转换成其频带适合信道传输的信号，这一变换由调制器完成；在接收端同样需要经过相反的变换，它由解调器完成。经过调制后的信号通常称为已调信号。已调信号有三个基本特性：一是携带有消息，二是适合在信道中传输，三是具有较高频率成份。

我们把信道中传输模拟信号的系统称为模拟通信系统。模拟通信系统的组成(通常也称为模型)可由一般通信系统模型略加改变而成，如图 1-6 所示。

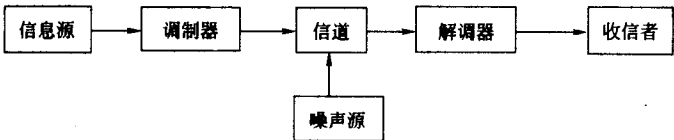


图 1-6 模拟通信系统模型

必须指出，从消息的发送到消息的恢复，事实上并非仅有以上两种变换，通常在一个通信系统里可能还有滤波、放大、天线辐射与接收、控制等过程。对信号传输而言，由于上面两种变换对信号起决定性变化，它是通信过程中的重要方面。而其他过程对信号来说，没有发生质的变化，只不过是信号进行了放大和改善信号特性等，因此，这些过程我们可以认为都是理想的，这里不去讨论它。

1.2.2 数字通信系统

数字通信系统传输的是数字信号。其特点是在调制之前先要进行两次编码，即信源编码和信道编码。相应地，接收端在解调之后要进行信道译码和信源译码。图 1-7 所示为数字通信系统模型。

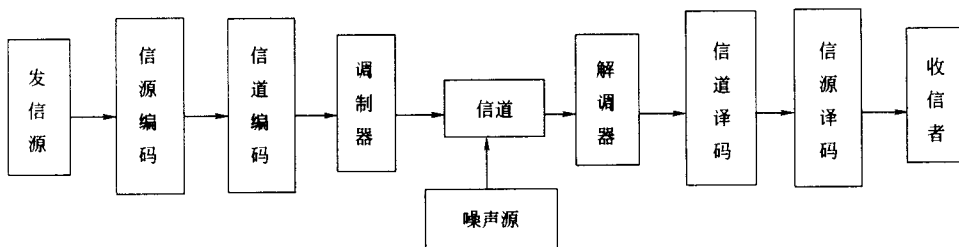


图 1-7 数字通信系统模型

信源编码的主要任务是提高信号传输的有效性。具体地说，就是用适当的方法降低数字信号的码元速率以压缩频带。另外，如果信息源是数据处理设备，还要进行并/串变换以便进行数据传输；如果传输的是模拟信号，则先进行模数(A/D)转换，信源编码的输出是信息码。此外，数据扰乱、话音和图像压缩编码等都是在信源编码器内完成。接收端信源译码器是信源编码的逆过程。

信道编码的主要任务是提高信号传输的可靠性。其基本做法是在信息码组中按一定的规则附加一些码，以使接收端根据相应的规则进行检错和纠错，信道编码也称纠错编码。接收端信道译码是其相反的过程。

1.2.3 数字通信的主要优缺点

模拟通信系统信道传输的是模拟信号，其占有频带一般都比较窄，因此其频带利用率较高。缺点是抗干扰能力差，不易保密，设备不易大规模集成，不能适应飞速发展的计算机通信的要求。

数字通信和模拟通信相比，有如下优点：

- (1) 抗干扰能力强。
- (2) 可采用再生中继，实现高质量的远距离通信。
- (3) 灵活性高，能适应各种通信业务的要求。
- (4) 可以很方便地与现代数字计算机相连接。
- (5) 数字信号易于加密。
- (6) 便于集成化。

数字通信的最大缺点就是占用频带较宽，为了保证数字通信的质量，需要严格的同步系统，设备较复杂。然而，随着卫星通信、光纤通信等宽频带通信系统的日益发展和成熟，为数字通信提供了宽阔的频道，使数字通信迅猛发展，应用越来越广泛，已成为现代通信的主要传输方式，有逐渐取代模拟通信的趋势。

1.3 数字通信系统的主要性能指标

我们采用某一通信系统进行通信时，首先考虑的就是此系统的通信质量问题。如何来衡量呢？必然要涉及系统的主要性能指标问题，否则就无法衡量通信系统的优劣。通信系统的主要性能指标也称主要质量指标，它们是从整个系统上综合提出或规定的。下面具体加以讨论。

1.3.1 一般通信系统的性能指标

一般通信系统的性能指标归纳起来有以下几个方面：

- (1) 有效性。指通信系统传输消息的“速率”问题，即快慢问题。
- (2) 可靠性。指通信系统传输消息的“质量”问题，即好坏问题。
- (3) 适应性。指通信系统使用时的环境条件。
- (4) 经济性。指系统的成本问题。
- (5) 保密性。指系统对所传输信号的加密措施，这点对军用系统显得更加重要。
- (6) 标准性。指系统的接口、各种结构及协议是否合乎国家、国际标准。
- (7) 维修性。指系统维修是否方便。
- (8) 工艺性。指通信系统的各种工艺要求。

对于一个通信系统，有效性和可靠性是主要的两个指标。这也是通信技术讨论的重点，至于其他的指标，如工艺性、经济性、适应性等不属于本书研究的范围。

通信系统的有效性和可靠性，是一对矛盾，这一点，通过以后的进一步学习，将会有更深的体会。一般情况下，要增加系统的有效性，就得降低可靠性，反之亦然。在实际中，常常依据实际系统要求采取相对统一的办法，即在满足一定可靠性指标下，尽量提高消息的传输速率，即有效性；或者，在维持一定有效性条件下，尽可能提高系统的可靠性。

对于模拟通信来说，系统的有效性和可靠性可用系统有效带宽和输出信噪比(或均方误差)来衡量。模拟系统的有效传输带宽 B_w 越大，系统同时传输的话路数也就越多，有效性就越好。

对于数字通信系统而言，系统的可靠性和有效性可用差错率和传输速率来衡量。在具体叙述数字通信系统的可靠性和有效性之前，我们首先简要地介绍一下信息及其度量的一些基本知识。

1.3.2 信息及其度量

在通信系统中，传输的对象是消息，消息是以信号的形式由发信者传送到收信者，使收信者获得实质性的信息。

消息是通信系统的传输对象，它是事物状态描述的一种具体形式。这种描述具有人们能够感知的物理特征。例如电话中的话音、电视中的图像画面等。

信号(在这里是指电信号)是消息的载荷者。因为消息不能远距离传送，因此需要将消息变换为适合在信道中传输的电信号(电压或者电流)。

信息的含义与消息很相似，但它比消息更广泛、更抽象。信息可以被理解为消息中包含的有意义的内容。消息可以是各种各样的，但其内容可统一用信息去描述。如同运输货物的多少可用“货运量”来统一衡量一样，传输信息的多少可以用“信息量”来衡量。

消息中所含“信息量”的多少，与该消息发生的概率密切相关。例如，若有人告诉你“明天的天气晴朗”，你可能会认为无所谓，因为这是预料之中的事，因此从这条消息中得到的信息量很少；假如有人告诉你“明天可能要地震”，你就会很震惊，因为这属于突发事件，是没有预料到的，这条消息包含的消息量就很大。这个例子说明，一个消息越不可预测，或者说出现的不确定性越大，它所含的信息量就越大，而概率描述的正是这种不确定性。

综上所述,可以得出消息中所含信息量与消息出现的概率之间的关系应反映如下规律:

(1) 消息中所含信息量 I 是消息出现的概率 $P(x)$ 的函数,即

$$I = I[P(x)] \quad (1-1)$$

(2) 消息出现的概率越小,它所含信息量越大;反之信息量越小。且

$$P=1 \text{ 时 } I=0$$

$$P=0 \text{ 时 } I=1$$

(3) 若干个互相独立事件构成的消息,所含信息量等于各独立事件信息量的和,即

$$I[P_1(x) \cdot P_2(x) \cdots] = I[P_1(x)] + I[P_2(x)] = \cdots$$

可以看出 I 与 $P(x)$ 间应满足以上三点,则它们有如下关系式:

$$I = \log_a \frac{1}{P(x)} = -\log_a P(x) \quad (1-2)$$

信息量 I 的单位与对数的底数 a 有关:

$a=2$ 单位为比特(bit);

$a=e$ 单位为奈特(nat, 简写为 n)

$a=10$ 单位为笛特(Det)或称为十进制单位;

通常使用的单位为比特。下面我们举例说明简单的信息量的计算。

【例 1-1】 试计算二进制符号等概率和多进制(M 进制)等概率时每个符号的信息量。

解: 二进制等概率时, 即 $P(1)=P(0)=1/2$

$$I(1)=I(0)=-\log_2 \frac{1}{2}=1(\text{bit})$$

M 进制等概率时, 即 $P(1)=P(2)=\cdots P(x)=1/M$

$$I(1)=I(2)=\cdots I(M)=-\log_2 \frac{1}{M}=\log_2 M(\text{bit})$$

1.3.3 数字通信系统的有效性和可靠性

数字通信系统的有效性指标用传输速率来表示。传输速率有两种,一种是码元传输速率,另一种是信息传输速率。

码元传输速率又称码元速率,简称传码率,它是指系统每秒钟传送码元的数目,单位是波特,常用符号“B”表示。

信息传输速率又称为信息速率,简称传信率。在信息论中是用“信息量”来衡量信息的多少,单位是 bit(比特),每个二进制码元含有 1bit 的信息量。所以系统的传信率用每秒传送的信息量即每秒所传送的二进制码元数来表示,单位是比特/秒,常用符号“bit/s”表示。

传码率和传信率都是用来衡量数字通信系统有效性指标的,二者既有联系又有区别,只有在二进制的情况下,传码率才与传信率在数值上相等,只是单位不同。但是对于多进制时,情况就不一样,传码率 R_B 和传信率 R_b 可以互相换算。设 N 进制的码元速率为 R_{BN} , 则

$$R_b = R_{BN} \log_2 N \quad (1-3)$$

$$R_{BN} = \frac{R_b}{\log_2 N} \quad (1-4)$$

【例 1-2】 已知某信号的传信率为 4800bit/s, 采用四进制传输时, 其传码率为