



面向21世纪

高职高专系列教材

现代通信技术

◎任德齐 谭中华 郭兵 姜鸿雁 编

◎杨元挺 审



机械工业出版社
China Machine Press

面向 21 世纪高职高专系列教材

现代通信技术

任德齐 谭中华 郭兵 姜鸿雁 编
杨元挺 审



机械工业出版社

本书对现代通信技术的基本概念、基本原理和技术作了全面的介绍。主要内容有现代通信技术概述、模拟通信、数字通信、数字信号的基带传输、数字信号的载波传输等。

本书的参考学时数为 60 学时。本书适合于高职高专电子技术专业的学生作教材使用，也可作为通信工程技术人员学习参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

现代通信技术/任德齐等编. —北京: 机械工业出版社, 2002.1

面向 21 世纪高职高专系列教材

ISBN 7-111-08315-6

I. 现... II. 任... III. 通信技术—高等学校: 技术学校—教材
IV. TN91

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 068309 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:王虹 版式设计:霍永明 责任校对 李汝庚

封面设计:雷明顿 责任印制:路琳

中国建筑工业出版社密云印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2002 年 1 月第 1 版·第 1 次印刷

1000mm×1400mmB5·5.375 印张·244 千字

0 001—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) 68993821、68326677-2527

面向 21 世纪高职高专 电子技术专业系列教材编委会成员名单

顾问	王文斌	陈瑞藻	李 奇	杨 杰	
主任委员	曹建林				
副主任委员	穆天保	张中洲	张福强	巩志强	董维佳
	祖 炬	华永平	任德齐		
委员	张锡平	刘美玲	杨元挺	刘 涛	马 彪
	华天京	冯满顺	周卫华	崔金辉	曹 毅
	朱华贵	孙吉云	孙津平	吴元凯	孙心义
	张红斌	饶庆和	苟爱梅		
秘书长	胡毓坚				
副秘书长	邓 红				

出版说明

积极发展高职高专教育,完善职业教育体系,是我国职业教育改革和发展的一项重要任务。为了深化职业教育的改革,推进高职高专教育的发展,培养21世纪与我国现代化建设要求相适应的,并在生产、管理、服务第一线从事技术应用、经营管理、高新技术设备运作的高级职业技术应用型人才,尽快组织一批适应高职高专教学特色的教材,已成为各高职高专院校的迫切要求。为此,机械工业出版社与高职高专计算机专业、电子技术专业和机电专业教材编委会联合组织了全国40多所院校的骨干教师,共同研究开发了一批计算机专业、电子技术专业和机电专业的高职高专系列教材。

各编委会确立了“根据高职高专学生的培养目标,强化实践能力和创新意识的培养,反映现代职业教育思想、教育方法和教育手段,造就技术实用型人才为立足点”的编写原则,力求使教材体现“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。

本套系列教材是由高职高专计算机专业、电子技术专业、机电专业教材编委会分别会同各院校第一线专业教师针对高职高专计算机、电子技术和机电各专业的教学现状和教材存在的问题开展研讨,尤其针对目前高职高专教学改革的新情况,分别拟定各专业的课程设置计划和教材选题计划。在教材的编制中,将教学改革力度比较大、内容新颖、有创新精神、比较适合教学、需要修编的教材以及院校急需、适合社会经济发展的新选题优先列入选题规划。在广泛征集意见及充分讨论的基础上,由各编委会确定每个选题的编写大纲和编审人员,实行主编负责制,编委会通过责任编委和主审对教材进行质量监控。

担任本套教材编写的老师们都是来自各高职高专院校教育第一线的教师,他们以高度的责任感和使命感,经过近一年的努力,终于将本套教材呈现在广大读者面前。由于高职高专教育还处于起步阶段,加上我们的水平和经验有限,在教材的选题和编审中可能出现这样那样的问题,希望使用这套教材的教师和学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的繁荣而共同努力。

高职高专系列教材编委会
机械工业出版社

前 言

本教材是面向 21 世纪高职高专系列教材之一。全书紧紧围绕模拟通信系统和数字通信系统的一般原理和技术进行阐述，是一门理论性和实用性都较强的教材。

学习本课程前，应先修《高等数学》、《电路理论》、《模拟电路》、《数字电路》等课程。学习本课程后，能在“识记”、“领会”、“应用”等 3 个能力上得到提高。“识记”：能对通信中常见的概念、系统模型、性能指标等进行表述和判断；“领会”：在“识记”的基础上，能较全面地掌握通信系统的基本概念、原理和技术；“应用”：在“领会”的基础上，能应用通信系统的基本概念、原理和技术，阐释常见的通信方式及信息发送和接收的理论，分析有关的技术过程和方法，分析相关的系统模型。

第 1 章是本书的基础部分。主要阐述了信息和通信的概念、通信系统的组成、性能指标、信息传输技术和发展方向。要求读者掌握与现代通信有关的基本概念、术语，了解现代通信所涉及的理论和技术。

第 2 章介绍模拟通信系统。首先讨论模拟信号的传输方式和连续波模拟调制的一般原理，然后进一步分析各种幅度调制和角度调制方法，以及它们的抗干扰性能，同时介绍无线电发射机、接收机和频分复用技术。要求读者掌握模拟通信系统的模型、连续波模拟调制的一般原理、各种幅度调制和角度调制的调制和解调方法、无线电收音机、无线电发射机、频分复用原理，了解模拟信号的传输方式、模拟通信系统的抗干扰性能。

第 3 章介绍数字通信系统。主要讨论数字通信中信源编码、信道编码（检错纠错编码），以及时分多路复用、数字复接和数字交换。要求读者掌握数字通信系统的模型、模拟信号的数字化原理、时分多路复用原理、检错纠错编码原理，了解数字复接技术、数字交换原理。

第 4 章介绍数字信号的基带传输。主要讨论数字信号的基带传输原理与性能，包括数字基带传输码型的设计、无码间串扰的基带传输特性，以及数字基带信号的再生中继传输。要求读者掌握基带传输码型，了解误码产生的原因及减小误码的技术措施。

第 5 章介绍数字信号的载波传输。主要讨论连续波数字调制的一般原理、二进制和多进制数字调制、调制解调器和数字通信系统中的同步技术。要求读者掌握连续波数字调制的一般原理、二进制和多进制数字调制的调制和解调原理，了解数字载波通信系统的抗噪声性能、调制解调器和数字通信系统中的同步技术。

本书第 3、4 章由谭中华编写，第 1、5 章由郭兵编写，第 2 章由姜鸿雁编写。任德齐对全书进行了统稿，杨元挺审稿。在本书编辑和出版的过程中，得到了重庆电子职业技术学院领导和同行及相关出版社的大力支持，在此表示衷心的感谢。

限于编者水平，书中错误和不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

目 录

出版说明	
前言	
第 1 章 现代通信技术概述	1
1.1 绪论	1
1.2 信号	3
1.3 信道及其容量	5
1.4 通信系统	7
1.4.1 模拟通信	8
1.4.2 数字通信	8
1.4.3 数字通信系统和模拟通信系统的 优缺点	10
1.5 通信网	11
1.5.1 通信网的基本原理	11
1.5.2 综合业务数字网 (ISDN) 的 定义及其特点	13
1.6 数字通信的发展与现状	15
1.7 通信系统的主要性能指标	18
1.7.1 模拟通信系统的主要参量	18
1.7.2 数字通信系统的基本参数	18
1.8 小结	21
1.9 习题	21
第 2 章 模拟通信	23
2.1 模拟信号的传输方式	23
2.1.1 调制的作用	24
2.1.2 噪声和干扰	25
2.2 幅度调制	27
2.2.1 双边带调制	27
2.2.2 单边带调制	30
2.2.3 解调	32
2.3 角度调制	32
2.3.1 调角波的数学表达式	33
2.3.2 调角波的频谱结构与带宽	34
2.3.3 调频方法	38
2.3.4 解调	39
2.4 无线电发射机	40
2.4.1 调幅发射机	41
2.4.2 调频发射机	43
2.5 无线电接收机	43
2.5.1 调幅接收机	45
2.5.2 单边带接收机	47
2.5.3 调频接收机	48
2.6 频分多路复用 (FDM)	49
2.7 小结	51
2.8 习题	52
第 3 章 数字通信	53
3.1 绪论	53
3.1.1 数字信号	53
3.1.2 数字通信系统的模型	54
3.1.3 数字通信系统的主要性能 指标	55
3.1.4 数字通信的特点	56
3.2 信源编码	57
3.2.1 脉冲编码调制 (PCM)	57
3.2.2 预测编码	67
3.3 时分多路复用	74
3.3.1 时分多路复用的基本概念	74
3.3.2 30/32 路 PCM 通信系统的 帧结构	74
3.4 数字复接技术	75
3.4.1 PCM 复用与数字复接	75
3.4.2 数字复接中的码速变换	77
3.4.3 同步复接与异步复接	79
3.5 数字交换原理	83
3.5.1 数字交换的基本概念	83
3.5.2 时分交换	84
3.6 信道编码	87
3.6.1 信道编码的任务和要求	87
3.6.2 传输码	88
3.6.3 差错控制编码	91
3.7 小结	95
3.8 习题	96
第 4 章 数字信号的基带传输	98

4.1 数字基带传输系统	98	5.4.1 二进制振幅键控 (2ASK) 系统的抗 噪声性能	128
4.1.1 限带信道传输对信号波形 的影响	98	5.4.2 二进制频移键控 (2FSK) 系统的抗 噪声性能	133
4.1.2 无码间串扰的条件	100	5.4.3 绝对移相键控 (2PSK) 及相对 移相键控 (2DPSK) 系统的抗 噪声性能	136
4.1.3 无码间干扰的滚降系统特性 ..	101	5.5 多进制数字调制系统	141
4.1.4 部分响应基带传输系统	102	5.5.1 MASK 系统	141
4.2 数字基带信号的再生中继传输	104	5.5.2 MFSK 系统	142
4.2.1 PCM 信号基带传输信道	104	5.5.3 MPSK 系统	143
4.2.2 再生中继系统和再生中继器 ..	105	5.5.4 多进制数字调制系统的性能 ..	147
4.3 小结	109	5.6 同步原理	148
4.4 习题	110	5.6.1 概述	148
第 5 章 数字信号的载波传输	111	5.6.2 载波同步	149
5.1 二进制数字振幅调制	111	5.6.3 位同步	154
5.2 二进制数字频率调制	116	5.7 小结	159
5.3 二进制数字相位调制	120	5.8 习题	160
5.3.1 绝对移相调制	120	参考文献	164
5.3.2 相对移相调制 (2DPSK)	123		
5.4 二进制数字调制系统的抗 噪声性能	128		

第 1 章 现代通信技术概述

1.1 绪论

在人类的生产和社会生活中离不开信息的交流与传递。传递消息的过程就是通信。通信的目的就是把含有信息的信息从一地传向另一地。自古以来，人们已经创造了很多的通信方式，例如：古代人们曾利用烽火、狼烟、金鼓、旗语作为表现信息和传递信息的手段；近代的灯光信号；现代的电报、电话、传真、电视等。所有通信都是将消息变成与之对应的信号来传递的。信号实际上就是消息的转载者。显然，现代通信以电信号来传递消息是最好的，它既传递得快又准确可靠，而且几乎不受时间、地点、距离等方面的限制，因而获得了飞速的发展和广泛的应用。人们要让信息在时域和空域上转移和转换，这就需要有装载信息的媒体。所谓媒体就是一种传送信息的手段，或装载信息的物质，如话音、胶片、磁盘、磁带、声波、电波等都可作为信息的媒体。通信技术的发展历史是人们长期寻求如何利用各种媒体实现迅速而准确地传递更多的信息到更远处的历史。通信技术伴随着人类经济和文化的发展不断取得进步，尤其在近代社会，通信技术的发展速度可谓日新月异。

大约在 1600 年，W. 希尔伯特 (W. Hilbert) 首先指出了电的存在。以后，科学家对电引起的各种现象进行了研究，逐步使其达到实用水平。18 世纪中叶，发电机和电池的发明，使人们获得了稳定的电流。人们把电流在导线中以惊人的速度传导，而且可以传送到远处这一现象，作为传送信息的媒体进行了种种实验，其中获得最大成功的是 1848 年 S.F.D. 莫尔斯 (S.F.D. Morse) 发明的电报，随后，陆续诞生了多种利用电的媒体，在传送信息的数量、速度及范围等方面有了迅速的发展。继电报之后，1876 年 A.G 贝尔 (A.G. Bell) 发明了电话，利用电话可以把语音直接进行传送。1896 年 G. 马可尼 (G. Marconi) 成功地发明了无线电报。由于电子管（以后由晶体管、集成电路代替）的发明，可以把被衰减的电信号放大，能将电报、电话传送到更遥远、更辽阔的地方。马可尼通信方式发展成无线电广播，进一步又发明了传送图像、文件等信息的传真和电视广播等通信方式。由于录音及再生技术的发展，产生了唱片和唱机，它与电影相结合，产生了有声电影。由于这一技术的发展，产生了磁带录音机、磁带录像机、激光盘等各种媒体。

计算机的发明在现代通信技术的各种媒体中占有独特的地位。计算机在当今社会的各个领域里不仅作为各种信息处理设备使用，而且它与通信相结合，使电信业务更加丰富，这些新业务有可视图文 (videotex)、图文电视 (teletext)，这是一种新的记录型媒体，还有电子信箱 (E-mail)，它包括文字、语音、图形信函。新的实时型媒体有电子会议 (tele-conferencing)，有计算机、语音、视像会议等形式，还有交互式电视，它

可为用户提供许多视像节目。由此可见，在近代，媒体有了迅速的发展，其中多媒体通信将支撑今后信息社会的发展。这种新的通信业务同时存在着话音、文字、图形、图像、音响和视像等多种媒体，因此，其想象力十分丰富。

由于社会对通信技术的需要越来越迫切，从而大大推动了通信科学的发展。从 20 世纪 30 年代开始，尤其是 20 世纪 50 年代之后，人们逐步对通信实践中遇到的问题展开了深入的理论研究，并获得了可喜的进展。在通信理论上，先后形成了“过滤和预测理论”、“香农信息论”、“纠错编码理论”、“信源统计特性理论”、“信号保真度理论”、“调制理论”、“信号检测理论”等。在通信的体制上，由于电子管的更加完善，晶体管的出现以及集成电路的问世，不仅促进了像电话通信那样的模拟通信的高速发展，而且使电报通信方式有了重大的突破，出现了具有广阔前景的数字通信方式。在通信的种类上，相继出现了脉码通信、微波通信、卫星通信、激光通信、移动通信和计算机通信等。在通信的对象上，突破了人与人之间进行通信的范畴，实现了人与机器或机器与机器之间的通信。现代通信正朝着以适应知识密集型信息化社会的各种通信要求方向发展。进入 20 世纪 70 年代以来，世界上先进国家已完全掌握了在各种传输介质（微波、各种电缆、卫星、光纤等）中传输数字信号的技术。

从语言的产生、文字的创作、印刷术的发明到电报、电话的电气通信时代到来，从指南针的发明到全球定位导航系统，从移动电话、可视电话等各种多功能电话机、袖珍寻呼机、传真机到各种数据通信系统、计算机互联网（Internet）、会议电视系统、高清晰度电视等的使用，直到今天计算机的普及和微波、卫星、光纤、移动通信技术的飞速发展，使人类通信产生了革命性的突变，从根本上改变了传统的信息传输手段。人类每时每刻通过已建成的覆盖全球的各种通信网，包括地面的、海底的、空间的，在不同地域、不同社会、不同群体之间大量地交换和传递着信息，以满足当今社会对通信的更广泛、更快捷、更可靠、更大容量、更多方式的信息交换和传递要求。

通信作为社会的基本设施和必要条件，引起了世界各国的广泛关注，通信事业的发展远远超前于国民经济的发展，通信自然成为人类社会发展的基本动力，并促使人类提早进入以信息为主导地位的信息化社会。信息社会的到来又导致通信新技术的大力发展，传统的通信网已不适应现代通信的要求，为了给用户提供更来来越多、越来越快的信息服务，通信技术正在大踏步地走向智能化和网络化。各单项技术汇流成综合业务数字网络（ISDN——Integrated Service Digital Network），开辟了网络时代的新纪元。我国在卫星通信、光纤通信、计算机网络通信方面也投入了大量的物力、财力，促进其发展。由于数字通信具有一系列优点，在 20 世纪 80 年代，各国都相继投入大量资金来改建通信线路，使其逐步成为综合数字网（IDN），即除用户线以外，进入本地局交换机以后的信息传输、交换都以数字形式进行，它可以方便地实现各种业务的处理和交换，到 20 世纪 90 年代出现了综合业务数字网（ISDN）的发展高潮。窄带 ISDN 迅速走向宽带化（Broadband）、智能化（Intelligent）和个人化（Personal），标志着信息传输技术进一步走向成熟。宽带综合业务数字网（B-ISDN）、多媒体终端技术（MMT）、综合移动卫星通信（M-SAT）、个人通信网（PCN）以及智能通信网（IN 或 AIN）等相继问世，使世界信息和通信市场得到空前的繁荣。世界各国都把信息网络为主体的信息基

基础设施的建设作为新的国策。

美国政府提出所谓“信息高速公路”计划，正式名称为“国家信息基础结构”，即 National Information Infrastructure (NII)，是当今世界上最宏伟、最先进的信息技术和产业计划。它是以光缆为“路”，集电脑、电视、录像、电话为一体的多媒体为“载体”，向美国各大学、研究机构、企业及普通家庭及时提供所需数据、图像、声音，传输多种服务的全国性高速信息网络。这一计划的提出，导致在全世界范围内掀起了一个建设“信息高速公路”的浪潮。在信息化社会，通信的重要性已经不仅仅表现为“社会的基础设施和社会物质生产的一般条件”这一概念上，更为重要的是，它已经成为现代社会生产力要素和综合国力的重要组成部分，成为信息时代的“国脉”。因此，各发达国家不惜投入巨资，促进通信的现代化。建设“信息高速公路”是一项规模巨大、意义重大的工程，仅从技术角度而言，就涉及计算机科学技术、光纤通信技术、数字通信技术、个人通信技术、信号处理技术、光电子技术、半导体技术、大容量存储技术、网络技术、多媒体技术、信息安全技术等信息技术。信息技术借助以微电子学为基础的计算机技术和通信技术，综合对声音、图像、文字、数字等各种传感信息进行获取、加工处理、存储、传递和使用。信息技术成为实现信息化社会基本特征的手段，得到了迅速发展，导致人们的生活节奏和社会变革的速度大大加快，信息经济将作为维系社会存在和发展的主导经济，社会的主导产业将从一系列工业群转向广义的信息产业、智力产业，信息经济成为一个国家科技、经济社会发展的主要因素，其兴衰将对未来的社会发展产生决定性的影响。

1.2 信号

什么是信号 (Signal)? 信号是运载与传递信息的载体与工具。广义地说，信号是随时间变化的某种物理量。对于通信技术一般将语言、文字、图像或数据等统称为消息 (Message)，在消息之中包含有一定数量的信息 (Information)。通信的目的就是从一方向另一方传送消息，给对方以信息。但是，消息的传送一般都不是直接的，而必须借助于一定形式的信号 (光信号、电信号等) 才能便于远距离快速传输和进行各种处理。因而，信号是消息的表现形式，它是通信传输的客观对象，而消息则是信号的具体内容，它蕴藏在信号之中。由于信号是随时间而变化的，在数学上它可以用一个时间 t 的函数来表示，因此，习惯上常常交替地使用“信号”与“函数”这两个名词。

信号的特性可以从两个方面来描述，这就是时间特性和频率特性。信号是时间 t 的函数，它具有一定的波形，因而表现出一定的时间特性，如出现时间的先后、持续时间的长短、重复周期的大小以及随时间变化的快慢等。另外，任意信号总可以分解为许多不同频率的正弦分量，即具有一定的频率成分，因而表现出一定的频率特性，如各频率分量的相对大小，主要频率分量占有的范围等。信号的形式所以不同，就在于它们各自有不同的时间特性和频率特性。信号的时间特性和频率特性之间有着密切的关系，不同的时间特性将导致不同的频率特性。

按照各种信号的不同性质与数学特征，可以有多种不同的分类方法。例如，按照信

号的物理特性，可以分为光信号、电信号等；按照信号的用途，可以分为雷达信号、电视信号、通信信号等；按照信号的数学对称性，可以分为奇信号、偶信号、非对称信号等；从能量的角度出发，可以分为功率信号与能量信号；从信号的传输性质，可以分为调制信号和已调信号等。通常，信号有以下 3 种最常用分类方法。

1. 连续信号与离散信号

一个信号，若在某个时间区间内除有限个间断点外的所有瞬时都有确定的值，就称这个信号为在该区间内的连续信号。正弦信号就是典型的连续信号。模拟信号是指其代表消息的参数（幅度、频率或相位）、完全随消息的变化而变化。例如，声音和图像的强度都是连续变化的，传感器采集的大多数数据也都是连续取值的。所以连续信号又称为模拟信号。一个信号，如果只是在离散的时间瞬时才有确定的值，就称这个信号为（时间）离散信号。如果一个信号不仅自变量的取值是离散的，其函数值也是“量化”了的，则称这种信号为数字信号。所谓“量化”，就是分级取整的意思，例如用“四舍五入”的方法，使各离散时间点上的函数值归为某一最接近的整数，从而将连续变化的函数值用有限的若干整数值来表示。例如，电报、数据、计算机输入输出的信号都是数字信号。

2. 确定信号和随机信号

确定信号（Determinate signal）和随机信号（Random signal）。确定信号是时间 t 的确定函数，即确定信号对于任意的确定时刻都有确定的函数值相对应。正弦信号和各种形状的周期信号就是确定信号的例子。随机信号则不是时间 t 的确定函数。例如雷达发射机发射一系列脉冲到达目标又反射回来，接收机收到的回波信号就有很大的随机性。因为它与目标性质、大气条件、外界干扰等种种因素有关，不能用确定的函数式表示而只能用统计规律来描述。实际传输的信号几乎都具有未可须知的不确定性，因此都是随机信号。如果传输的信号都是时间的确定函数，那么对接收者，就不可能由它得知任何新的信息，这样失去了传送消息的本意。但是，在一定条件下，随机信号也会表现出某种确定性。例如在一个较长的时间内随时间变化的规律比较确定，可以近似地看成确定信号，使分析简化，以便于工程上的实际应用。理论上，应该首先研究确定信号，在此基础上根据随机信号的统计规律进一步研究随机信号的特性。

3. 周期信号与非周期信号

无始无终地重复着某一变化规律的信号，称为周期信号。

用数学语言来描述，周期信号 $f(t)$ 必定满足

$$f(t) = f(t + mT) \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

使得上式成立的最小自然数 T 值，称为 $f(t)$ 的周期。不满足上式的信号就是非周期信号。例如，正弦信号就是典型的周期信号。

1.3 信道及其容量

信道是通信系统必不可少的组成部分,而信道中的噪声又是不可避免的。因而,对信道和噪声的研究乃是研究通信问题的基础。

信道是信号的传输媒质,它可分为有线信道与无线信道两类。有线信道包括明线、对称电缆、同轴电缆及光缆等。而无线信道有地波传播、短波电离层反射、超短波或微波视距中继、人造卫星中继以及各种散射信道等。应该说,信道的这种分类是直观的。信道的范围还可以扩大,除包括传输媒质外,还可以包括有关的变换装置(如:发送设备、接收设备、馈线与天线、调制器、解调器等),称这种扩大范围信道为广义信道,而称前者为狭义信道。在讨论通信的一般原理时,通常采用广义信道。不过,狭义信道(传输媒质)是广义信道十分重要的组成部分,通信效果的好坏,在很大程度上将依赖于狭义信道的特性,因此,在研究信道的一般特性时,“传输媒质”仍是讨论的重点。今后,为了叙述方便,常把广义信道简称为信道。

信源输出的信息总是要通过信道传送给接收端的收信者,因此需要量度信道传输信息的能力。所谓信道容量就是单位时间内该信道所能传输的最大信息量(比特数)。显然,如果实际传输的信息量小于信道容量,就会使信道出现空闲,造成浪费,使信道的有效性降低;反之,如果实际传输的信息量大于信道容量,就会使信道溢出,造成信息失真或丢失,使通信的可靠性变差。可见,信道容量是测试信道好坏的一个重要指标。

1. 数字信道的容量

一般来说,信道容量与信道参量有着密切的关系。例如:差错率很大时,势必使每秒钟内传输的信息量下降,因而使信道容量变小。

数字信道的情况比较复杂,可通过分析一个典型例子(等概率、对称的二元信道)来理解。等概率的含义指被传输的二进制码元序列(代表消息的随机序列)中,“0”码元和“1”码元出现的概率相等,各为50%。对称的含义指在传输过程中,“0”错成“1”与“1”错成“0”的概率相等,皆为 P_e 。二元信道指被传输的信号是二进制码元序列。每传输一个码元就等于传送1bit的信息量。这种假定可以使分析简化,而且基本上是符合实际情况的。

在这种信道中,每传送一个码元所含有的信息量如式(1-1)

$$I = 1 - P_e \log_2 \frac{1}{P_e} - (1 - P_e) \log_2 \frac{1}{(1 - P_e)} \quad (1-1)$$

根据信道容量的定义,上式再乘上信道每秒钟内能够传输的最大码元数就等于信道容量 C 。理论分析证明,如果信道的带宽为 B 。那么它能够传输的最大码元传输速率为每秒 $2B$ 个码元。因此,等概率、对称的二元信道容量为

$$C = 2B \left[1 - P_e \log_2 \frac{1}{P_e} - (1 - P_e) \log_2 \frac{1}{(1 - P_e)} \right] \quad (1-2)$$

从式(1-2)看到,信道容量 C 与信道参量(码元传输速率和差错率)有关。

信息论中的编码定理指出：只要实际传输的信息比特率小于信道容量，并且编码足够长，就可几乎做到无差错地传输。

例如：上述的特定信道中，令 $P_e = 0.1$ 时，算出其信道容量 $C = 2B \times 0.53$ 。即传送一个二进制码元只有 0.53bit 的信息量。那么，就可用两个码元（码组）去表示 1bit 的信息量。这样传输的比特率就下降了。也就是说，可靠性的提高是用有效性的下降来换取的。通常，通信中可靠性与有效性是一对基本矛盾，两者不可兼得。

2. 模拟信道的容量

若模拟信道的带宽为 B ，则它每秒内最多能传送 $2B$ 个彼此独立的互不干扰的码元。对模拟信道来说，这 $2B$ 个码元可以看作是 $2B$ 个彼此独立的样值。一般来说，这些样值的取值是连续的（PAM 信号），所以具有无穷多个可能的取值。每个样值具有信息量 $I = \infty$ 。就是说，模拟信道的容量是无穷大，但是，这只能在无噪声干扰的条件下才能成立。理论分析证明，在白噪声干扰下的模拟信道中，每个独立样值所含有的最大信息量为

$$\frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{P}{P_b} \right)$$

式中 P 是模拟信号的功率； P_b 是白噪声功率； P/P_b 是功率信噪比。

根据信道容量的定义，带宽为 B 的模拟信道的容量为

$$C = 2B \times \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{P}{P_b} \right) = B \log_2 \left(1 + \frac{P}{P_b} \right) \quad (1-3)$$

这就是通信理论中著名的香农公式，也叫香农—哈特莱（Shannon - Hartley）公式。由此可见，一个模拟信道的信道容量由 B 、 P_b 、 P 3 个要素共同决定，只要 3 个要素确定，则信道容量也就随之确定。香农公式在通信系统设计中有两个重要意义。其一，香农公式给出了高斯白噪声信道上可靠传输速率的上限。显然，在设计实际通信系统中不可能达到这个速率。但是它给设计者一个界限，让设计者在设计过程中尽量接近式（1-3）。因而，能达到香农公式中速率传送信息的系统是一种理想通信系统。其二，香农公式给出了信噪比与信道带宽的关系。例如，已知带宽 $B = 3000\text{Hz}$ ，要求信道传输速率为 1000bit/s 的数据，这时信噪比可以从香农公式解出为

$$\frac{P}{P_b} = 2^{3.333} - 1 \approx 9$$

如果带宽 $B = 10000\text{Hz}$ ，则 $P/P_b = 1$ ，这就说明了带宽 B 从 3000Hz 增加到 10000Hz ，信噪比从 9 减少到 1 仍能保持原来的传输速率。由此可得出：当 C 一定时，在 B 和 P/P_b 之间存在着互换关系。当信道带宽 B 增大时，信噪比 P/P_b 可以减小；当信道带宽 B 减小时，信噪比 P/P_b 必须增大，这对通信系统的设计有重大的指导作用。例如：在卫星通信系统中，信号功率 P 受到限制，要保证获得一定的信道容量 C ，可以采用增大信道带宽来解决。

从香农公式可知，信道容量 C 随着带宽 B 增大而增大，但是否无限增大呢？可以

证明，这是不可能的。因为噪声功率随着信道带宽 B 增大而增大，如果白噪声的双边功率谱密度为 $P_b/2$ ，则噪声平均功率 $P_0 = P_b B$ ，有

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{P}{P_b} \right) = \left(\frac{P}{P_0} \right) \left(\frac{P_0 B}{P} \right) \log_2 \left(1 + \frac{P}{P_0 B} \right) = \frac{P}{P_b} \log_2 \left(1 + \frac{P}{P_0 B} \right)^{P_0 B/P} \quad (1-4)$$

利用关系式：
$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x} \log_2(1+x) = \log_2 e \approx 1.44$$

当 $B \rightarrow \infty$ 时，有

$$\lim_{B \rightarrow \infty} C = \frac{P}{P_0} \log_2 e = 1.44 \frac{P}{P_0} \quad (1-5)$$

式 (1-5) 表明，保持 P/P_0 一定，即使信道带宽 $B \rightarrow \infty$ ，信道容量也是有限的，这是因为信道带宽 $B \rightarrow \infty$ 时，噪声功率 P_b 也趋于无穷大。

【例 1-1】 有一 CRT 终端连接计算机系统，其连接应用一条电话线路，电话线路带宽为 3000Hz，输出信噪比 $P/P_b = 10\text{dB}$ 。设终端有 128 个印刷字符，终端输出字符是相互独立的，并且是等概率的。求

- ① 信道容量；
- ② 从终端传输字符到计算机无错误时，信道传输字符的最大速率（理论上的）。

解

- ① 信道容量

$$\begin{aligned} C &= B \log_2 (1 + P/P_b) = 3000 \log_2 11 \\ &= 10378 \text{ bit/s} \end{aligned}$$

- ② 每个字符的平均信息量

$$H = \log_2 128 = 7 \text{ bit/字符}$$

信源输出平均信息速率

$$R = H r_s < C, \text{ 则}$$

$$7 r_s < 10378$$

$$r_s < 1482 \text{ 字符/s}$$

因此，在信道上无错误传输数据的最大速率是 1482 字符/s。

1.4 通信系统

通信是把消息从一地传送到另一地的过程，为了传递各种消息就把其转换成电信号。消息与电信号之间必须建立单一的对应关系，否则在接收端就无法复制出原来的消息。通常，消息被承载在电信号的某一参量上，如果电信号的该参量携带着离散消息，则该参量必将是离散取值的，这样的信号就称为数字信号。例如，电转机输出的信号就是数字信号。如果电信号的该参量连续取值，则称这样的信号为模拟信号。例如，普通电话机输出的信号就是模拟信号。

应当指出，可以先把模拟信号变换成数字信号（这种变换称作模拟-数字变换），经数字通信方式传输后，在接收端再进行相反的变换（即数字-模拟变换），以还原出模拟信号。

1.4.1 模拟通信

模拟通信利用模拟信号来传递信息，如普通的电话、广播、电视都属于模拟通信。按传送模拟信号而设计的通信系统称模拟通信系统，如图 1-1 所示。

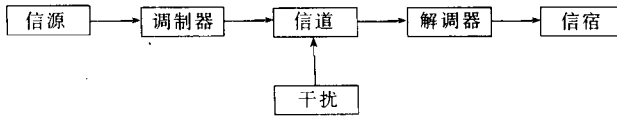


图 1-1 模拟通信系统

模拟通信系统需要两种变换。首先，发送端的连续消息要变换成原始电信号，接收端收到的信号要反向变换成原连续消息。这里所说的原始电信号，由于它通常具有频率很低的频谱分量，一般不宜直接传输。因此，模拟通信系统里常需要有第二种变换：将原始电信号变换成其频带适合信道传输的信号，并在接收端进行反变换。这种变换和反变换通常称为调制或解调。图 1-1 中的调制器和解调器实质上是一种信号变换器，它对信号进行各种变换，使之能在传输介质中传输。经过调制器调制后的信号称已调信号，它仍然是一种连续信号。解调器对已调信号进行反变换，使其恢复成调制前的信号。通常将发送端调制前和接收端解调后的信号称为基带信号。因此，原始电信号又称基带信号，而已调信号则称为频带信号。模拟通信系统按其调制方式的不同又可分为连续调制系统和脉冲调制系统。连续调制系统包括振幅调制系统、频率调制系统、相位调制系统等；脉冲调制系统包括脉冲幅度调制系统、脉冲相位调制系统、脉冲宽度调制系统等。这些模拟通信系统在实际中得到了较广泛的应用。为了扩大通信容量，使得在一个信道中可以同时传输多路信号，目前广泛采用了多路复用的方法，最常用的复用方式是频分复用（FDM）和时分复用（TDM）。

有必要指出，消息从发送端传递到接收端并非仅经过以上两种变换，系统里可能还有滤波、放大、变频、辐射等过程，但本书只着重研究上述两种变换和反变换。在模拟通信系统中，原始的模拟信号一般都要经过调制（一些近距离的有线通信也可不经过调制）再通过信道传输。

在模拟通信中，通过信道的信号频谱通常比较窄，因此信道的利用率较高。它的缺点是：

- 1) 传输的信号是连续的，混入噪声后不易清除，抗干扰能力差；
- 2) 不易进行保密通信；
- 3) 设备不易大规模集成；
- 4) 不能适应数据通信的要求。

1.4.2 数字通信

若信息源发出的是模拟信号，经过取样、量化和编码等数字化处理后，以数字信号形式传送，这种通信方式叫数字通信，数字通信系统的模型如图 1-2 所示。在数字通信系统中可以使用数字传输方式，也可以使用模拟传输方式。

一个数字通信系统主要由 8 部分组成：信源、编码器、调制器、信道、解调器、译码器、信宿和定时同步系统。下面简要地对各部分的组成和功能做一介绍：

1. 信源和信宿

信源和信宿分别为信息的产生和接受者，通常可以是人或机器终端，它们产生或接受的信号可以是数字的，也可以是模拟的。

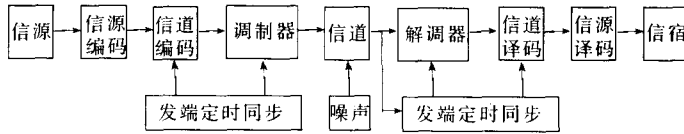


图 1-2 数字通信系统模型

2. 编码器和译码器

信源编码器主要起两个作用：一是实现模数转换，把信息源发出的连续信号变换为数字序列；二是降低信号的数码率如脉码调制、声码器，信号的数据率压缩都属于信源编码。信源译码器是信源编码器的逆过程。信道编码器的作用是提高通信的可靠性。通常信道会遭受到各种噪声干扰，这些噪声均可能导致接收信号的错误。采用纠错编码（又叫信道编码）在发送端按一定的规则加入多余码元，使接收端能发现错码或纠正信道译码的作用和信道编码的相反。编码器的功能主要是将原始信息转换成适当的数字序列（通常是二进制序列）。译码器的功能与编码器相反，将数字序列还原成消息。

3. 调制器和解调器

一般而言，编码器输出的信号不适宜直接送入信道进行传输，通常要进行某种变换以适应信道的传送，这个任务主要由调制器完成。调制主要有两类：一类仅做信号频谱变换，然后就直接传送，这种传输称为基带信号传输；另一类除了作频谱变换外，还要进行频谱搬移，以达到信道复用等目的，提高传输效率。解调是调制的逆过程。

4. 信道和噪声

信道是传输信号的通路，由于构成信道的物理媒介不同，信道可以是有线信道（如电缆、光纤等）、无线信道（如短波、微波等）、卫星信道等。

信号在信道中传输，不可避免地要受到噪声的干扰。噪声有多种多样，但主要的噪声可抽象成随机噪声（如热噪声、起伏噪声等）和脉冲噪声（如冲击噪声）；或抽象成乘性噪声和加性噪声。不同的噪声对系统的主要影响是不同的。

5. 定时同步系统

任何一个现实的通信系统要正常工作，都必须有一稳定的定时同步系统。定时系统产生一系列定时信号，使系统有序地工作，同步系统确保收发端机之间具有一定（相对不变）的时间关系。