

内 容 简 介

本书共有 8 章内容,包括绪论、数字通信系统、多媒体通信系统、通信网络系统、扩频抗干扰通信系统、微波与卫星通信系统、移动通信系统和光通信系统。

本书内容新颖,反映了当今最新的通信系统发展和应用情况。在文字叙述中突出概念的描述,避免繁琐的公式推导,重点讲述各种通信技术的性能和物理意义,并列举大量的例子加以说明。每章前面都有教学要点,每章结尾都有小结,并附有适量的思考与练习题。

本书语言简练、通俗易懂,内容系统全面,材料充实丰富,可作为通信工程、计算机通信、信息技术及其他相近专业大学专科生教材,也可作为非通信专业本科生教材,还可供相关 IT 行业的科技人员阅读和参考。

★本书配有电子教案,需要者可与出版社联系,免费提供。

图书在版编目(CIP)数据

通信系统概论/王兴亮,高利平主编. —西安:西安电子科技大学出版社,2008.2
面向 21 世纪高等学校信息工程类专业规划教材

ISBN 978 - 7 - 5606 - 1980 - 4

I. 通… II. ①王… ②高… III. 通信系统—高等学校—教材 IV. TN914

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 002556 号

策 划 马乐惠

责任编辑 杨 璠 马乐惠

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

http: //www. xduph. com E-mail: xdupfxb@pub. xaonline. com

经 销 新华书店

印刷单位 西安文化彩印厂

版 次 2008 年 2 月第 1 版 2008 年 2 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 20.5

字 数 485 千字

印 数 1~4 000 册

定 价 29.00 元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 1980 - 4/TN · 0406

XDUP 2272001 - 1

* * * 如有印装问题可调换 * * *

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

前 言

通信技术的发展突飞猛进,应用日新月异,各行各业都离不开通信技术。通信技术与系统的发展和应用的渗透到了社会的各个层面,每个专业都有了解通信技术与系统的需求,本书就是在这种形势下应运而生的。

本书共有 8 章内容。

第 1 章是绪论,着重介绍通信系统的概念,包括通信的定义、分类、方式、模型等。信息论基础是通信技术的必备知识,学习者应学会信息的度量和计算。通信系统的性能指标是贯穿全书的指标体系,要求学习者掌握和运用好通信系统的性能指标,如有效性指标、可靠性指标和信道容量等基本参量。第 2 章是数字通信系统,这是学习的重点内容。数字通信系统模型有三种基本形式,即数字频带传输通信系统、数字基带传输通信系统和模拟信号数字化传输通信系统。数字基带传输通信系统介绍数字基带信号的常用码型、数字基带传输系统性能等;数字频带传输通信系统重点论述了二进制振幅键控(2ASK)、二进制频移键控(2FSK)、二进制相移键控(2PSK)和二进制数字调制系统的性能比较等;模拟信号数字化传输通信系统主要介绍模拟信号的数字化(A/D 转换和 D/A 转换)、PCM 30/32 路典型终端设备、准同步数字体系(PDH)、数字复接的概念和方法、同步复接与异步复接、PCM 高次群、同步数字体系等。第 3 章是多媒体通信系统,首先简要介绍了多媒体的概念、特性和特点;接着介绍了多媒体系统,包括多媒体系统的概念、系统的分类、体系结构和基本组成;然后重点介绍了超文本与超媒体概念、超媒体的组成元素和超媒体系统的应用等;之后介绍了声音媒体的种类、声音数据压缩方法、音频编码标准和声音文件的格式等,以及图像的压缩标准和常用图形图像文件格式;最后重点介绍了多媒体通信技术,学习者应熟知公众交换电话网(PSTN)、综合业务数字网(ISDN)、数字用户环路(DSL)、快速以太网(Fast Ethernet)、可视电话、IP 电话、宽带 IP 网和视频会议系统等。第 4 章是通信网络技术,讲解了通信网的组成、通信网的分类、通信网的构成和功能以及通信网的发展方向;重点介绍了通信网基础,如通信网拓扑结构、网络体系分层结构及通信网协议、通信网路由选择及流量控制等。在通信网相关技术中,主要介绍了交换技术和信令与接口技术,这些都与计算机通信有着密切的联系。最后还介绍了无线网络的基本知识。第 5 章是扩频抗干扰通信系统,主要介绍了扩频通信的基本概念,重点介绍了直接序列扩频系统、跳频(FH)扩频通信系统,对跳时系统(TH)和混合扩展频谱系统也做了适当的介绍。同时,对无线信道抗干扰技术也做了论述。第 6 章是微波与卫星通信系统,本章将微波通信和卫星通信的技术和系统合在一起介绍,因为这两种通信技术所用的频率范围都是微波段。也可以说,卫星通信是微波通信的延伸。本章对信号的传输与复用、信号的调制与解调、编解码技术、信号处理技术以及卫星通信中的多址技术都做了介绍。同时对微波通信系统、数字微波通信系统、数字微波通信系统的性能和大容量微波通信系统做了介绍;对卫星通信系统,包括静止卫星通信系统、移动卫星通信系统、VSAT 卫星通信系统、卫星

通信新技术、卫星通信技术在 GPS 系统中的应用也做了介绍。在本章的最后,对微波与卫星通信技术的发展和应展开讨论,使学习者对微波通信和卫星通信的前景有一个清晰的认识。第 7 章是移动通信系统,主要介绍了移动通信的基本概念、特点、分类及系统组成,阐述了移动通信的基本技术,包括蜂窝组网技术、多址技术、调制技术、交织技术、自适应均衡技术和信道配置技术;阐述了第一代、第二代移动通信技术,并且介绍了第三代移动通信技术的几种标准,如 W-CDMA 系统、CDMA2000 系统、TD-SCDMA 系统、IMT-2000 系统等;最后还介绍了后 3G 移动通信关键技术。第 8 章是光通信系统,首先讨论了光纤通信技术,使学习者对光纤通信的基本概念、光纤通信系统的组成和光纤通信的应用有一个概括的了解。波分复用(WDM)技术是比较新的通信技术,本章论述了 WDM 的基本原理和 WDM 基本通信系统。相干光通信技术、光孤子通信和全光通信技术都是新的通信技术,本章对这些新技术也做了简介。

本书内容新颖,反映了当今最新的通信技术与系统的发展和应情况。在文字叙述中突出概念的描述,避免繁琐的公式推导,重点讲述各种通信技术与系统的性能和物理意义,并列大量的例子加以说明。每章前面都有教学要点,每章结尾都有小结,并附有适量的思考与练习题。

本书语言简练、通俗易懂,内容系统全面,材料充实丰富,可作为通信工程、计算机通信、信息技术及其他相近专业大学专科生教材,也可作为非通信专业本科学学生教材,还可供相关 IT 行业的科技人员阅读和参考。

王兴亮教授和高利平教授担任本书主编。王兴亮教授编写了第 1、2、5、6、8 章,高利平教授参与了第 6、8 章的编写,田秀劳教授编写了第 3 章,张德纯教授编写了第 4 章,李成斌研究员编写了第 7 章,任啸天、刘敏、刘莎、侯灿靖、牟京燕、储楠、蒋波也参与了部分编写工作。王兴亮教授、高利平教授负责全书统稿。西安电子科技大学的刘乃安教授审阅了全稿,并提出了许多修改意见,在此表示感谢!

限于编著者水平有限,书中缺点在所难免,欢迎各界读者批评指正。

E-mail: 8185wxl@21cn.com

wxl20060910@yahoo.com.cn

编著者

2007 年 10 月于西安

第1章 绪 论

【教学要点】

- 通信的概念：通信的定义、方式、分类及通信系统模型。
- 信息论基础：信息的度量及信息量的计算。
- 通信系统的性能指标：有效性指标及可靠性指标。
- 通信信道的基本特性：信道的概念、噪声及信道容量。

1.1 通信的概念

1.1.1 通信的定义

通信(Communication)就是信息的传递,指由一地向另一地进行信息的传输与交换,其目的是传输消息。然而,随着社会生产力的发展,人们对传递消息的要求也越来越高。在各种各样的通信方式中,利用“电”来传递消息的通信方法称为电信(Telecommunication),这种通信具有迅速、准确、可靠等特点,且几乎不受时间、地点、空间、距离的限制,因而得到了飞速发展和广泛应用。可以说,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对消息、情报、指令、文字、图像、声音或任何性质的消息进行有效的传递称为通信。

从本质上讲,通信就是实现信息传递功能的一门科学技术,它要将大量有用的信息快速、准确、广泛、无失真、高效率、安全地进行传输,同时还要在传输过程中将无用信息和有害信息抑制掉。当今的通信不仅要有效地传递信息,而且还有存储、处理、采集及显示等功能,通信已成为信息科学技术的一个重要组成部分。

1.1.2 通信的分类

通信的分类方法有许多种。

1. 按传输媒质分

按传输消息的媒质的不同,可将通信分为两大类:一类称为有线通信,另一类称为无线通信。所谓有线通信,是指传输媒质为导线、电缆、光缆、波导、纳米材料等形式的通信,其特点是媒质能看得见,摸得着。导线可以是架空明线、电缆、光缆及波导等。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。

2. 按信道中传输的信号分

信道是个抽象的概念,这里可理解成传输信号的通路。通常信道中传送的信号可分为

数字信号和模拟信号，由此，通信亦可分为数字通信和模拟通信，相应的是数字通信系统和模拟通信系统。

凡信号的某一参量(如连续波的振幅、频率、相位，脉冲波的振幅、宽度、位置等)可以取无限多个数值，且直接与消息相对应的，称为模拟信号。模拟信号有时也称连续信号，这个连续是指信号的某一参量可以连续变化(即可以取无限多个值)，而不一定在时间上也连续，例如第2章介绍的脉冲振幅调制(PAM)信号，经过调制后已调信号脉冲的振幅是可以连续变化的，但在时间上是不连续的。这里指的某一参量是指我们关心的并作为研究对象的那一参量，绝不是仅指时间参量。当然，对于参量连续变化、时间上也连续变化的信号，毫无疑问也是模拟信号，如强弱连续变化的语言信号，亮度连续变化的电视图像信号等都是模拟信号。

凡信号的某一参量只能取有限个数值，并且常常不直接与消息相对应的，称为数字信号。数字信号有时也称离散信号，这个离散是指信号的某参量是离散(不连续)变化的，而不一定在时间上也离散。

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主要用途列入表1-1中，仅作为参考。

表 1-1 通信使用的频段及主要用途

频率范围(f)	波长(λ)	符号	常用传输媒介	用途
3 Hz~30 kHz	$10^8 \sim 10^4$ m	甚低频 VLF	有线线对，长波无线电	音频、电话、数据终端、长距离导航、时标
30~300 kHz	$10^4 \sim 10^3$ m	低频 LF	有线线对，长波无线电	导航、信标、电力线通信
300 kHz~3 MHz	$10^3 \sim 10^2$ m	中频 MF	同轴电缆，中波无线电	调幅广播、移动陆地通信、业余无线电
3~30 MHz	$10^2 \sim 10$ m	高频 HF	同轴电缆，短波无线电	移动无线电话、短波广播、定点军用通信、业余无线电
30~300 MHz	10~1 m	甚高频 VHF	同轴电缆，米波无线电	电视、调频广播、空中管制、车辆通信、导航、集群通信、无线寻呼
300 MHz~3 GHz	100~10 cm	特高频 UHF	波导，分米波无线电	电视、空间遥测、雷达导航、点对点通信、移动通信
3~30 GHz	10~1 cm	超高频 SHF	波导，厘米波无线电	微波接力、卫星和空间通信、雷达
30~300 GHz	10~1 mm	极高频 EHF	波导，毫米波无线电	雷达、微波接力、射电天文学
$10^5 \sim 10^7$ GHz	$3 \times 10^{-4} \sim 3 \times 10^{-6}$ cm	紫外、可见光、红外	光纤，激光空间传播	光通信

通信中工作频率和工作波长可互换,公式为

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (1-1)$$

式中: λ 为工作波长; f 为工作频率; c 为电波在自由空间中的传播速度,通常可近似地认为 $c=3 \times 10^8$ m/s。

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,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。表 1-2 列出了一些常用的调制方式。

表 1-2 常用的调制方式

调制方式		用 途	
连续波调制	线性调制	常规双边带调幅(AM)	广播
		抑制载波双边带调幅(DSB)	立体声广播
		单边带调幅(SSB)	载波通信、无线电台、数据传输
		残留边带调幅(VSB)	电视广播、数据传输、传真
	非线性调制	频率调制(FM)	微波中继、卫星通信、广播
		相位调制(PM)	中间调制方式
	数字调制	幅度键控(ASK)	数据传输
		频率键控(FSK)	数据传输
		相位键控(PSK、DPSK、QPSK等)	数据传输、数字微波、空间通信
		其他高效数字调制(QAM、MSK等)	数字微波、空间通信
脉冲调制	脉冲模拟调制	脉幅调制(PAM)	中间调制方式、遥测
		脉宽调制(PDM/PWM)	中间调制方式
		脉位调制(PPM)	遥测、光纤传输
	脉冲数字调制	脉码调制(PCM)	市话、卫星、空间通信
		增量调制(DM)	军用、民用电话
		差分脉码调制(DPCM)	电视电话、图像编码
		其他语言编码方式(ADPCM、APC、LPC)	中低速数字电话

1.1.3 通信的方式

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,如图 1-1 所示。

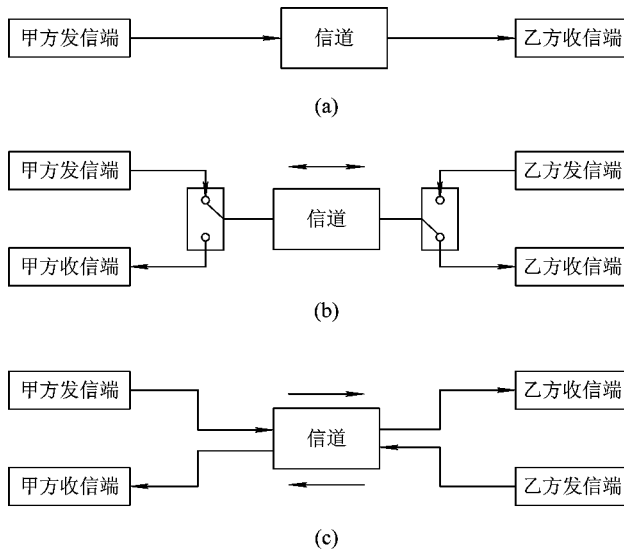


图 1-1 按消息传送的方向和时间划分的通信方式

(a) 单工通信；(b) 半双工通信；(c) 全双工通信

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。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 BP 机上。

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。例如使用同一频段的对讲机、收发报机等都是这种通信方式。

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。这种方式双方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，如电话、手机等。

2. 按数字信号排序分

在数字通信中，按照数字信号排列的顺序不同，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 1-2(a)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 1-2(b)所示。

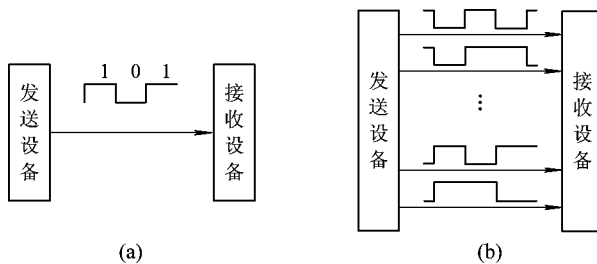


图 1-2 按数字信号排序划分的通信方式

(a) 串序传输方式；(b) 并序传输方式

一般的数字通信方式大都采用串序传输, 这种方式的优点是只需占用一条通路, 缺点是占用时间相对较长; 并行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: 点到点通信方式、点到多点通信(分支)方式和多点到多点通信(交换)方式, 它们的示意图如图 1-3 所示。

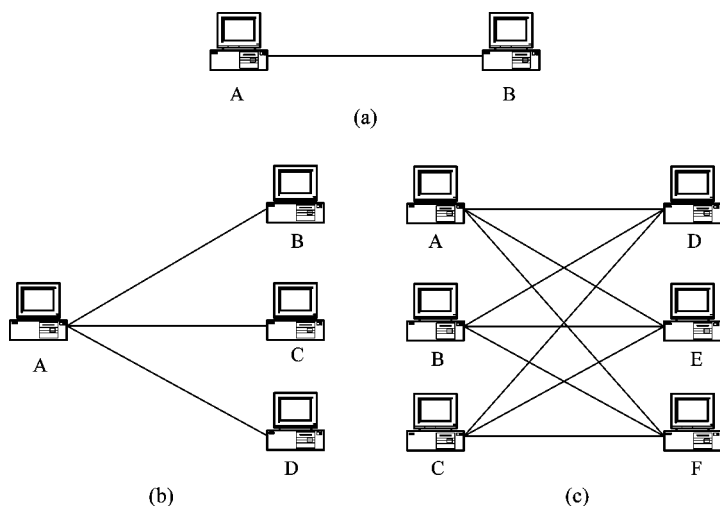


图 1-3 按网络形式划分的通信方式

(a) 点到点通信; (b) 点到多点通信; (c) 多点到多点通信

点到点通信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; 在点到多点通信(分支)方式中, 它的每一个终端(A, B, C, ...)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, 而必须经过转接站转接, 此种方式只在数字通信中出现; 多点到多点通信(交换)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方来的消息储存起来, 然后再转发至收方, 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, 网通信的基础仍是点与点之间的通信。

1.1.4 通信系统的模型

通信的任务是完成消息的传递和交换。以点对点通信为例, 可以看出要实现消息从一地到另一地的传递, 必须有三个部分: 一是发送端, 二是接收端, 三是收发两端之间的信道, 如图 1-4 所示。

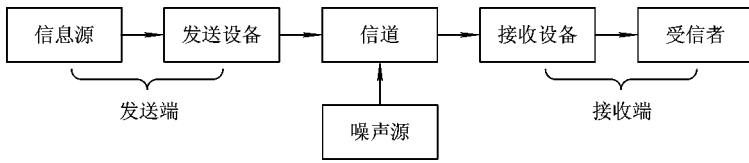


图 1-4 通信系统的模型

通信系统各部分作用如下。

1. 信息源和受信者

信息源简称信源，是信息的发出处。受信者简称信宿，是信息的归宿处。根据信源输出信号性质的不同可分为模拟信源和离散信源，如模拟电话机为模拟信源，数字摄像机及计算机为离散信源。两种信号形式可以互相转化。

2. 发送设备

发送设备的作用就是将信源产生的信号变换为传输信道所需要的信号，使信源和信道匹配起来，并送往信道。这种变换根据对传输信号的要求不同有相应不同的变换方式，通常要求实现大功率发射、频谱搬移、信源编码、信道编码、多路复用、保密处理等，其相应的变换方式为功率放大、调制、模/数转换、纠错编码、FDM 或 TDM、加密技术等。

3. 信道

信道是指传输信号的通道，是从发送设备到接收设备之间信号传递所经过的媒介，可以是有线的，也可以是无线的。信道既给信号以通路，也对信号产生各种干扰和噪声，直接影响着通信的质量，其干扰和噪声的性能由传输媒介的固有特性所决定。图 1-4 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。

4. 接收设备

接收设备的基本功能是完成发送设备的反变换，即进行接收放大、解调、数/模转换、纠错译码、FDM 或 TDM 的分路、解密等，其任务是从带有干扰的信号中正确地恢复出原始信号。

图 1-4 仅是一个单向通信系统模型，实际通信系统要实现双向通信，通信的双方需要随时交流信息，信源兼为信宿，双方都要有发送设备和接收设备。如果两个方向用各自的传输媒介，则双方都独立地进行发送和接收；如果两个方向共用一个传输媒介，则必须采用频率、时间或代码分割的办法来实现资源共享。

通信系统除了完成信息传输之外，还必须进行信息的交换。传输系统和交换系统共同组成一个完整的通信系统。

1.2 信息论基础

1.2.1 信息的度量

“信息”(information)一词在概念上与消息(message)的意义相似，但它的含义却更具

普遍性、抽象性。信息可被理解为消息中包含的有意义的内容；消息可以有各种各样的形式，但消息的内容可统一用信息来表述。传输信息的多少可直观地使用“信息量”进行衡量。

传递的消息都有其量值的概念。在一切有意义的通信中，虽然消息的传递意味着信息的传递，但对接收者而言，某些消息比另外一些消息的传递具有更多的信息。例如，甲方告诉乙方一件非常可能发生的事情，“明天中午 12 时正常开饭”，那么比起告诉乙方一件极不可能发生的事情，“明天 12 时有地震”来说，前一消息包含的信息显然要比后者少些。因为对乙方（接收者）来说，前一事情很可能（必然）发生，不足为奇，而后一事情却极难发生，听后会使人惊奇。这表明消息确实有量值的意义，而且对接收者来说，事件愈不可能发生，愈会使人感到意外和惊奇，则信息量就愈大。正如已经指出的，消息是多种多样的，因此，量度消息中所含的信息量值，必须能够用来估计任何消息的信息量，且与消息种类无关。另外，消息中所含信息的多少也应和消息的重要程度无关。

由概率论可知，事件的不确定程度可用事件出现的概率来描述。事件出现（发生）的可能性愈小，则概率愈小；反之，概率愈大。基于这种认识，可以得到：消息中的信息量与消息发生的概率紧密相关。消息出现的概率愈小，则消息中包含的信息量就愈大，且概率为 0 时（不可能发生事件）信息量为无穷大，概率为 1 时（必然事件）信息量为 0。

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

$$I = I[P(x)] \quad (1-2)$$

(2) 消息出现的概率愈小，它所含信息量愈大，反之信息量愈小，且

$$P = 1 \text{ 时 } I = 0$$

$$P = 0 \text{ 时 } I = \infty$$

(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

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

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：

$$I = \log_a \frac{1}{P(x)} = -\log_a P(x) \quad (1-3)$$

信息量 I 的单位与对数的底数 a 有关： $a=2$ ，单位为比特（bit 或 b）； $a=e$ ，单位为奈特（nat 或 n）； $a=10$ ，单位为笛特（Det）或称为十进制单位； $a=r$ ，单位称为 r 进制单位。通常使用的单位为比特。

1.2.2 平均信息量

平均信息量 \bar{I} 等于各个符号的信息量乘以各自出现的概率之和。

二进制时：

$$\bar{I} = -P(1) \text{ lb}P(1) - P(0) \text{ lb}P(0) \quad (1-4)$$

把 $P(1)=P$ 代入，则

$$\begin{aligned} \bar{I} &= -P \text{ lb}P - (1-P) \text{ lb}(1-P) \\ &= -P \text{ lb}P + (P-1) \text{ lb}(1-P) \quad (\text{bit/符号}) \end{aligned}$$

对于多个信息符号的平均信息量的计算如下：

设各符号出现的概率为

$$\begin{pmatrix} x_1, & x_2, & \dots, & x_n \\ P(x_1), & P(x_2), & \dots, & P(x_n) \end{pmatrix}$$

且 $\sum_{i=1}^n P(x_i) = 1$ ，则每个符号所含信息的平均值(平均信息量)为

$$\begin{aligned} \bar{I} &= P(x_1)[- \lg P(x_1)] + P(x_2)[- \lg P(x_2)] + \dots + P(x_n)[- \lg P(x_n)] \\ &= \sum_{i=1}^n P(x_i)[- \lg P(x_i)] \end{aligned} \quad (1-5)$$

由于平均信息量同热力学中的熵形式相似，故通常又称它为信息源的熵。平均信息量 \bar{I} 的单位为 bit/符号。

当离散信息源中每个符号等概率出现，而且各符号的出现为统计独立时，该信息源的信息量最大。此时最大熵(平均信息量)为

$$\bar{I}_{\max} = \sum_{i=1}^n P(x_i)[- \lg P(x_i)] = - \sum_{i=1}^n \frac{1}{N} \left[\lg \frac{1}{N} \right] = \lg N \quad (n = N \text{ 时}) \quad (1-6)$$

1.3 通信系统的性能指标

衡量、比较和评价一个通信系统的好坏时，必然要涉及系统的主要性能指标，否则就无法衡量通信系统的好坏与优劣。无论是模拟通信还是数字、数据通信，尽管业务类型和质量要求各异，它们都有一个总的质量指标要求，即通信系统的性能指标。

1.3.1 一般通信系统的性能指标

通信系统的性能指标有：有效性、可靠性、适应性、保密性、标准性、维修性、工艺性等。从信息传输的角度来看，通信的有效性和可靠性将是系统最主要的两个性能指标，这也是通信技术讨论的重点。

有效性是指要求系统高效率地传输消息。解决通信系统如何以最合理、最经济的方法传输最大数量的消息。

可靠性是指要求系统可靠地传输消息。由于存在干扰，收到的与发出的消息并不完全相同。可靠性是一种量度，用来表示收到消息与发出消息的符合程度。因此，可靠性决定于系统抵抗干扰的性能，也就是说，决定于通信系统的抗干扰性。

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。

1.3.2 通信系统的有效性指标

模拟通信系统中，每一路模拟信号需占用一定信道带宽，如何在信道具有一定带宽时充分利用它的传输能力，可有几个方面的措施。其中有两个主要方面，一是多路信号通过频率分割复用，即频分复用(FDM)，以复用路数多少来体现其有效性，如同轴电缆最高可

容纳 10 800 路 4 kHz 模拟话音信号。目前使用的无线频段为 $10^5 \sim 10^{12}$ Hz 范围的自由空间,更是利用多种频分复用方式实现各种无线通信的。另一方面,提高模拟通信有效性是根据业务性质减少信号带宽,如话音信号的调幅单边带(SSB)为 4 kHz,就比调频信号带宽小数倍,但可靠性较差。

数字通信的有效性主要体现在一个信道中通过的信息速率。对于基带数字信号传输,可以采用时分复用(TDM)以充分利用信道带宽;而对于频带数字信号传输,可以采用多元调制提高有效性。数字通信系统的有效性可用传输速率来衡量,传输速率越高,系统的有效性越好。通常可从以下三个不同的角度来定义传输速率。

1. 码元传输速率 R_B

码元传输速率通常又可称为码元速率(也有称为数码率、传码率、码率、信号速率或波形速率等),用符号 R_B 来表示。码元速率是指单位时间(每秒)内传输码元数目的多少,单位为波特(Baud),常用符号“Bd”表示(注意,不能用小写)。例如,某系统在 2 秒内共传送 4800 个码元,则系统的传码率为 2400 Bd。

数字信号一般有二进制与多进制之分,但码元速率 R_B 与信号的进制数无关,只与码元宽度 T_b 有关。

$$R_B = \frac{1}{T_b} \quad (1-7)$$

通常在给出系统码元速率时,有必要说明码元的进制,多进制(M)码元速率 R_{BM} 与二进制码元速率 R_{B2} 之间,在保证系统信息速率不变的情况下,相互可转换,转换关系式为

$$R_{B2} = R_{BM} \cdot \lg M(\text{Bd}) \quad (1-8)$$

式中, $M=2^k$, $k=2, 3, 4, \dots$ 。

2. 信息传输速率 R_b

信息传输速率简称信息速率,又可称为传信率、比特率等。信息传输速率用符号 R_b 表示。 R_b 是指单位时间(每秒)内传送的信息量的多少,单位为比特/秒(bit/s),简记为 b/s 或 bps。例如,若某信源在 1 秒内传送 1200 个符号,且每一个符号的平均信息量为 1(bit),则该信源的 $R_b=1200$ b/s 或 1200 bps。因为信息量与信号进制数 M 有关,所以 R_b 也与 M 有关。

3. 消息传输速率 R_m

消息传输速率亦称消息速率,它被定义为单位时间(每秒)内传输的消息数,用 R_m 表示。因消息的衡量单位不同,有各种不同的含义。例如,当消息的单位是汉字时, R_m 的单位为字/秒。消息速率在实际中应用不多。

4. R_b 与 R_B 的关系

在二进制中,码元速率 R_{B2} 同信息速率 R_{b2} 在数值上相等,但单位不同。

在多进制中, R_{BM} 与 R_{bM} 之间数值不同,单位亦不同。它们之间在数值上有如下关系式:

$$R_{bM} = R_{BM} \cdot \lg M \quad (1-9)$$

在码元速率保持不变的条件下,二进制信息速率 R_{b2} 与多进制信息速率 R_{bM} 之间的关系为

$$R_{b2} = \frac{R_{bM}}{\lg M} \quad (1-10)$$

5. 频带利用率 η

频带利用率指的是传输效率问题,也就是说,我们不仅关心通信系统的传输速率,还要看在这样的传输速率下所占用的信道频带宽度是多少。如果频带利用率高,说明通信系统的传输效率高,否则相反。

频带利用率的定义是单位频带内码元传输速率的大小,即

$$\eta = \frac{R_B}{B} \quad (\text{Bd/Hz}) \quad (1-11)$$

频带宽度 B 的大小取决于码元速率 R_B ,而码元速率 R_B 与信息速率有确定的关系。因此,频带利用率还可用信息速率 R_b 的形式来定义,以便比较不同系统的传输效率,即

$$\eta = \frac{R_b}{B} \quad (\text{b}/(\text{s} \cdot \text{Hz})) \quad (1-12)$$

1.3.3 通信系统的可靠性指标

对于模拟通信系统,可靠性通常以整个系统的输出信噪比来衡量。信噪比是信号的平均功率与噪声的平均功率之比。信噪比越高,说明噪声对信号的影响越小,信号的质量越好。例如,在卫星通信系统中,发送信号功率总是有一定限量的,而信道噪声(主要是热噪声)则随传输距离而增长,其功率不断累积,并以相加的形式来干扰信号。信号加噪声的混合波形与原信号相比则具有一定程度失真。模拟通信的输出信噪比越高,通信质量就越好。诸如,公共电话(商用)以 40 dB 为优良质量,电视节目信噪比至少应为 50 dB,优质电视接收应在 60 dB 以上,公务通信可以降低质量要求,也需 20 dB 以上。当然,衡量信号质量还可以用均方误差,它是衡量发送的模拟信号与接收端恢复的模拟信号之间误差程度的质量指标。均方误差越小,说明恢复的信号越逼真。

提高模拟信号传输的输出信噪比,固然可以提高信号功率或减少噪声功率,但提高发送电平往往受到限制。对于一般通信系统,提高信号电平会干扰相邻信道的信号。抑制噪声可从广义信道的电子设备入手,如采用性能良好的电子器件并设计精良的电路。一旦构成系统后,再要降低噪声干扰就不那么容易了。

在实际中,常用折中办法来改善可靠性,即以带宽(有效性)为代价换取可靠性,提高输出信号信噪比,这与信号的调制方式有关。例如,宽带调频(FM)比调幅多占几倍或更大的带宽,解调输出信噪比改善量与带宽增加倍数的平方成正比。如民用调幅广播,每台节目约占 10 kHz 带宽,而调频台节目带宽为 180 kHz,但信噪比增大十几倍,因此音质极好。另外,同一种调制方式,不同的解调方式,可靠性也不同。

衡量数字通信系统可靠性的指标,具体可用信号在传输过程中出错的概率来表述,即用差错率来衡量。差错率越大,表明系统可靠性愈差。差错率通常有两种表示方法。

1. 码元差错率 P_e

码元差错率 P_e 也称为误码率,它是指接收错误的码元数在传送总码元数中所占的比例。更确切地说,误码率就是码元在传输系统中被传错的概率。用表达式可表示成

$$P_e = \frac{\text{单位时间内接收的错误码元数}}{\text{单位时间内系统传输的总码元数}} \quad (1-13)$$

2. 信息差错率 P_b

信息差错率 P_b 也称为误信率或误比特率, 它是指接收错误的信息量在传送信息总量中所占的比例, 或者说, 它是码元的信息量在传输系统中被丢失的概率。用表达式可表示成

$$P_b = \frac{\text{单位时间内接收的错误比特数(信息量)}}{\text{单位时间内系统传输的总比特数(总信息量)}} \quad (1-14)$$

3. P_e 与 P_b 的关系

对于二进制而言, 误码率和误比特率显然相等。而 M 进制信号的每个码元含有 $n = \lg M$ 比特, 并且一个特定的错误码元可以有 $(M-1)$ 种不同的错误样式。当 M 较大时,

$$P_b \approx \frac{1}{2} P_e \quad (1-15)$$

1.4 通信信道的基本特性

信道是通信系统必不可少的组成部分, 信道特性的好坏直接影响到系统的总特性。信号在信道中传输时, 噪声作用于所传输的信号, 接收端所接收的信号是传输信号与噪声的混合物。

1.4.1 信道的概念

1. 信道的定义

通俗地说, 信道是指以传输媒介(质)为基础的信号通路。具体地说, 信道是指由有线或无线电路提供的信号通路; 抽象地说, 信道是指定的一段频带, 它让信号通过, 同时又给信号以限制和损害。信道的作用是传输信号。

信道大体可分成两类: 狭义信道和广义信道。

狭义信道通常按具体媒介类型的不同可分为有线信道和无线信道。所谓有线信道, 是指传输媒介为明线、对称电缆、同轴电缆、光缆及波导等一类能够看得见的媒介。有线信道是现代通信网中最常用的信道之一。无线信道的传输媒质比较多, 它包括短波电离层、对流层散射等。虽然无线信道的传输特性没有有线信道的传输特性稳定和可靠, 但是无线信道具有方便、灵活, 通信者可移动等优点。

广义信道通常也可分成两种, 即调制信道和编码信道。调制信道是从研究调制与解调的基本问题出发而构成的, 它的范围是从调制器输出端到解调器输入端。因为从调制和解调的角度来看, 由调制器输出端到解调器输入端的所有转换器及传输媒质, 不管其中间过程如何, 它们不过是把已调信号进行了某种变换而已, 我们只需关心变换的最终结果, 而无需关心形成这个最终结果的详细过程。因此, 研究调制与解调问题时, 定义一个调制信道是方便和恰当的。调制信道常常用在模拟通信中。

在数字通信系统中, 如果仅着眼于编码和译码问题, 则可得到另一种广义信道——编码信道。这是因为, 从编码和译码的角度看, 编码器的输出仍是某一数字序列, 而译码器

的输入同样也是一数字序列，它们在一般情况下是相同的数字序列。因此，从编码器输出端到译码器输入端的所有转换器及传输媒质可用一个完成数字序列变换的方框加以概括，此方框称为编码信道。调制信道和编码信道的示意图如图 1-5 所示。另外，根据研究对象和关心问题的不同，也可以定义其他形式的广义信道。

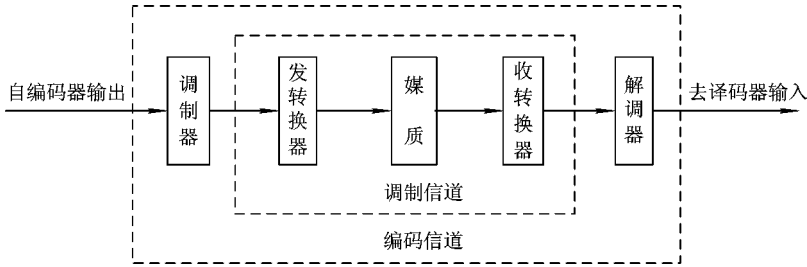


图 1-5 调制信道与编码信道

2. 信道的模型

通常为了方便地表述信道的一般特性，引入信道的模型：调制信道模型和编码信道模型。

1) 调制信道

在频带传输系统中，已调信号离开调制器便进入调制信道。对于调制和解调而言，通常可以不管调制信道究竟包括了什么样的转换器，也不管选用了什么样的传输媒质，以及发生了怎样的传输过程，我们仅关心已调信号通过调制信道后的最终结果。因此，把调制信道概括成一个模型是可能的。

通过对调制信道进行大量的考察之后，可发现它有如下主要特性：

- (1) 有一对(或多对)输入端，则必然有一对(或多对)输出端；
- (2) 绝大部分信道是线性的，即满足叠加原理；
- (3) 信号通过信道需要一定的迟延时间；
- (4) 信道对信号有损耗(固定损耗或时变损耗)；
- (5) 即使没有信号输入，在信道的输出端仍可能有一定的功率输出(噪声)。

由此看来，可用一个二对端(或多对端)的时变线性网络去替代调制信道，这个网络就称做调制信道模型，如图 1-6 所示。

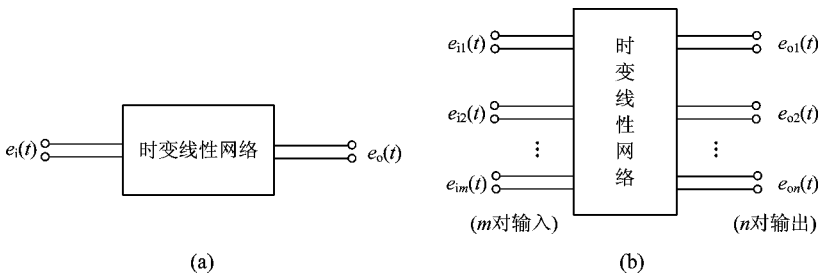


图 1-6 调制信道模型

(a) 二对端时变线性网络；(b) 多对端时变线性网络

对于二对端的信道模型来说，它的输入和输出之间的关系式可表示成

$$e_o(t) = f[e_i(t)] + n(t) \quad (1-16)$$

式中， $e_i(t)$ ——输入的已调信号；

$e_o(t)$ ——信道输出波形；

$n(t)$ ——信道噪声(或称信道干扰)；

$f[e_i(t)]$ ——信道对信号影响(变换)的某种函数关系。

由于 $f[e_i(t)]$ 形式是个高度概括的结果，为了进一步理解信道对信号的影响，把 $f[e_i(t)]$ 设想成 $k(t) \cdot e_i(t)$ 的形式。因此，式(1-16)可写成

$$e_o(t) = k(t) \cdot e_i(t) + n(t) \quad (1-17)$$

式中， $k(t)$ 称为乘性干扰，它依赖于网络的特性，对信号 $e_i(t)$ 影响较大； $n(t)$ 则称为加性干扰(或噪声)。

这样即可将信道对信号的影响归纳为两点：一是乘性干扰 $k(t)$ 的影响，二是加性干扰 $n(t)$ 的影响。如果了解了 $k(t)$ 和 $n(t)$ 的特性，则信道对信号的具体影响就能搞清楚。不同特性的信道，仅反映信道模型有不同的 $k(t)$ 及 $n(t)$ 而已。

期望的信道(理想信道)应是 $k(t) = \text{常数}$ ， $n(t) = 0$ ，即

$$e_o(t) = k \cdot e_i(t) \quad (1-18)$$

实际中，乘性干扰 $k(t)$ 一般是一个复杂函数，它可能包括各种线性畸变、非线性畸变、交调畸变、衰落畸变等，而且往往只能用随机过程加以表述，这是由于网络的迟延特性和损耗特性随时间随机变化的结果。但是，经大量观察表明，有些信道的 $k(t)$ 基本不随时间变化，或者信道对信号的影响是固定的或变化极为缓慢的；但有的信道则不然，它们的 $k(t)$ 是随机快速变化的。因此，在分析研究乘性干扰 $k(t)$ 时，在相对的意义可把调制信道分为两大类：一类称为恒参信道，即 $k(t)$ 可看成不随时间变化或变化极为缓慢的一类信道；另一类则称为随参信道(或称变参信道)，它是非恒参信道的统称，或者说 $k(t)$ 是随时间随机变化的信道。一般情况下，人们认为有线信道绝大部分为恒参信道，而无线信道大部分为随参信道。

2) 编码信道

编码信道是包括调制信道及调制器、解调器在内的信道。它与调制信道模型有明显的不同，即调制信道对信号的影响是通过 $k(t)$ 和 $n(t)$ 使调制信号发生“模拟”变化，而编码信道对信号的影响则是一种数字序列的变换，即把一种数字序列变成另一种数字序列。故有时把编码信道看成是一种数字信道。

由于编码信道包含调制信道，因而它同样要受到调制信道的干扰。但是，从编/译码的角度看，以上这个影响已被反映在解调器的最终结果里，使解调器输出数字序列以某种概率发生差错。显然，如果调制信道越差，即特性越不理想和加性噪声越严重，则发生错误的概率将会越大。

由此看来，编码信道的模型可用数字信号的转移概率来描述。例如，在最常见的二进制数字传输系统中，一个简单的编码信道模型如图 1-7 所示。之所以说这个模型是“简单的”，是因为在这里假设解调器输出的每个数码元发生

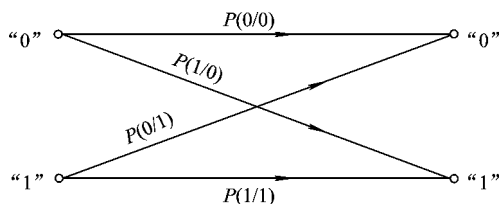


图 1-7 二进制无记忆编码信道模型

差错是相互独立的。

用编码的术语来说,这种信道是无记忆的(当前码元的差错与其前后码元的差错没有依赖关系)。在这个模型里,把 $P(0/0)$ 、 $P(1/0)$ 、 $P(0/1)$ 、 $P(1/1)$ 称为信道转移概率,具体地把 $P(0/0)$ 和 $P(1/1)$ 称为正确转移概率,而把 $P(1/0)$ 和 $P(0/1)$ 称为错误转移概率。根据概率性质可知

$$P(0/0) + P(1/0) = 1 \quad (1-19)$$

$$P(1/1) + P(0/1) = 1 \quad (1-20)$$

转移概率完全由编码信道的特性所决定,一个特定的编码信道就会有相应确定的转移概率。应该指出,编码信道的转移概率一般需要对实际编码信道作大量的统计分析才能得到。

编码信道可细分为无记忆编码信道和有记忆编码信道。有记忆是指编码信道中码元发生差错的事件不是独立的,即码元发生错误与其前后码元是有联系的。

1.4.2 传输信道

传输信道可分为有线信道和无线信道,有线信道主要有各种线缆和光缆,无线信道主要指的是可以传输无线电波和光波的空间或大气。下面介绍几种常用的传输媒介。

1. 有线信道

常用的有线信道传输媒介有双绞线、同轴电缆、架空明线、多芯电缆和光纤。

1) 双绞线

双绞线又称为双扭线,它是由若干对且每对由两条相互绝缘的铜导线按一定规则绞合而成的。这种绞合结构可以减少相邻线对的电磁干扰。根据是否外加屏蔽层,还可以将双绞线分为屏蔽双绞线和非屏蔽双绞线。双绞线既可以传输模拟信号,又可以传输数字信号,其通信距离一般为几千米到十几千米。导线越粗,通信距离越远,但导线价格越高。屏蔽双绞线传输质量较好,传输速率也高,但施工不便;非屏蔽双绞线虽然传输性能不如屏蔽双绞线,但施工方便,组网灵活,造价较低,因而较多采用。

2) 同轴电缆

同轴电缆以硬铜线为芯,外包一层绝缘材料。这层绝缘材料用密织的网状导体环绕,网外又覆盖一层保护性材料。金属屏蔽层能将磁场反射回中心导体,同时也使中心导体免受外界干扰,故同轴电缆比双绞线具有更高的带宽和更好的噪声抑制特性。按特性阻抗数值的不同可分为两种,一种为 50Ω (指沿电缆导体各点的电磁电压对电流之比)同轴电缆,用于数字信号的传输,即基带同轴电缆;另一种为 75Ω 同轴电缆,用于宽带模拟信号的传输,即宽带同轴电缆。

基带同轴电缆只支持一个信道,传输带宽为 1 Mb/s 。它能够以 10 Mb/s 的速率把基带数字信号传输 $1 \sim 1.2 \text{ km}$,在局域网中广泛使用;宽带同轴电缆支持的带宽为 $300 \sim 450 \text{ MHz}$,可用于宽带数据信号的传输,传输距离可达 100 km 。宽带同轴电缆既可以传输数字信号,又可以传输模拟信号,如话音、视频等,是综合宽带网的一种理想介质。

3) 光纤

光导纤维是软而细的、利用内部全反射原理来传导光束的传输介质。由于可见光的频率非常高,约为 10^8 MHz ,且其频率范围非常宽,因此,一个光纤通信系统的传输带宽远远大于其他各种传输介质的带宽,是目前最有发展前途的有线传输介质。