

高速公路机电工程丛书

高速公路通信系统 理论及应用

赵祥模 关可 靳引利 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
[http:// www.phei.com.cn](http://www.phei.com.cn)

高速公路机电工程丛书

高速公路 通信系统理论及应用

赵祥模 关 可 靳引利 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内容提要

本书结合我国高速公路通信工程的建设实际,较全面地总结了我国高速公路通信工程方面的技术设计及施工管理方面的成果及经验,既适当地讲述了高速公路通信系统的基本知识和基本原理,又简明地介绍了高速公路通信的新技术、新知识和新的通信技术的发展趋势。

本书重点讲述当前在高速公路通信工程中广泛使用的几类现代通信系统,如程控交换系统、光纤通信系统、移动通信系统等,对数据通信技术、视频传输技术和紧急电话系统也做了介绍。本书的主要目的是力图成为内容充实,简明实用,帮助读者建立完整的高速公路通信概念,理解各种通信系统的工作原理并掌握其组成结构的参考书。

本书可作为大专院校相关专业高年级本科生、研究生及成人继续教育的教材,也可以作为高速公路通信工程科研、设计、施工、建设管理与运营维护方面人员的重要技术参考书。

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,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

高速公路通信系统理论及应用/赵祥模,关可,靳引利编著. —北京:电子工业出版社,2003.11

(高速公路机电工程丛书)

ISBN 7-5053-9285-9

I. 高… II. ①赵…②关…③靳… III. 高速公路—通信系统 IV. U412.36

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 098424 号

责任编辑:夏平飞 祁祯

印刷:北京东光印刷厂

出版发行:电子工业出版社 <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:787×980 1/16 印张:22.5 字数:505 千字

版次:2003 年 11 月第 1 版 2003 年 11 月第 1 次印刷

印数:5000 册 定价:35.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010)68279077。质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

目录

第一章 概述	1	二、模拟信号的解调	53
第一节 通信概述	1	第四节 数字信号的调制与解调	54
第二节 通信系统的组成	2	一、脉冲序列调制	54
第三节 通信系统的分类及通信方式	5	二、时分多路(TDM)复用技术	68
一、分类	5	三、信道编码及数字信号的基带传输	72
二、通信方式	6	四、数字信号的载波传输	83
第四节 通信系统的主要技术指标	7	第三章 高速公路程控数字交换系统	91
一、信息的概念及其量度	7	第一节 程控数字交换系统概述	91
二、传输速率	8	一、交换机发展简介	91
三、信道容量	9	二、电话交换网的组成	93
四、通信系统的指标依据	10	三、用户交换机与公用电话网的连接	94
第五节 高速公路通信系统概述	12	第二节 程控交换机的基本组成及服务功能	96
一、高速公路通信的特点	12	一、程控交换机的基本组成	96
二、高速公路通信系统建设的基本要求	12	二、程控交换机的服务功能	97
三、高速公路数字通信	13	第三节 数字交换网络	99
四、高速公路通信系统的通信层次	13	一、时隙交换	99
五、高速公路通信系统的建设目标	14	二、多级组合交换网络	101
六、高速公路通信系统的基本组成及其功能	15	三、交换网络的控制	102
第二章 通信系统的基本理论	16	第四节 用户电路	104
第一节 通信系统中的电磁波	16	一、用户电路的功能	104
一、电磁波的基本概念	16	二、用户电路的整体结构	107
二、电磁波作为信号的载体	18	第五节 中继器	108
三、电磁波的传播	19	一、时钟提取	109
第二节 通信系统中的信号与噪声	31	二、码型变换	109
一、信号的频谱特性	32	三、帧同步和复帧同步	109
二、噪声	39	第六节 交换机的软件系统	111
第三节 模拟信号的调制与解调	41	一、软件系统的结构	112
一、模拟信号的调制	42	二、对软件系统的要求	113
		三、程序控制基本原理	114
		四、呼叫处理软件	115
		第七节 交换机的信令系统	117

一、信令的概念	117	三、光纤的指标参数	156
二、信令方式	119	四、光缆的结构和种类	159
三、信令网	121	第三节 光缆指标参数的测量	164
第八节 智能网	121	一、光纤的测量标准	164
一、智能网体系结构	121	二、损耗的测量	165
二、智能网业务	122	三、带宽的测量	169
第四章 高速公路数据通信系统	124	四、色散的测量	170
第一节 数据通信基础	124	五、折射率分布的测量	172
一、数据通信与话音通信的区别	124	六、最大理论数值孔径的测量	174
二、数据通信系统的组成	125	七、模场直径的测量	175
三、数据通信的交换方式	126	八、截止波长的测量	177
第二节 分组交换技术	127	第四节 光纤通信的主要设备	179
一、分组交换方式	127	一、光路无源器件	179
二、交换虚电路的建立与释放	128	二、光端机	184
第三节 ATM 交换	130	第五节 同步光纤数字通信网络与公路	194
一、ATM 信元的结构	130	光纤数字通信网	
二、虚信道和虚通道	131	一、同步光纤数字通信网络(SDH)	194
三、复用的基本概念	132	二、SONET/SDH	196
四、ATM 交换的基本原理	133	第六章 高速公路移动通信系统	209
五、ATM 交换网络的结构	135	第一节 移动通信概述	209
第四节 IP 交换技术	136	第二节 移动通信的工作方式	210
一、计算机通信交换技术的发展	136	一、单工制	210
二、TCP/IP 协议	138	二、半双工制	211
三、路由器工作原理	139	三、双工制	212
四、IP 交换原理	140	第三节 移动通信系统的结构	212
五、IP 电话系统的网络结构	142	第四节 移动通信的调制技术	213
第五节 综合业务数字网(ISDN)	146	一、角度调制	213
一、N-ISDN 功能体系结构	147	二、高斯滤波最小频移键控(GMSK)调制	215
二、N-ISDN 用户/网络接口	148	三、扩展频谱调制	218
三、B-ISDN 的基本概念	150	四、 $\frac{\pi}{4}$ -DQPSK 的调制与解调	221
第六节 公路数据通信网的特点	151	第五节 公路移动通信网络	225
第五章 高速公路光纤数字通信系统	153	一、城市公路移动通信网络	226
第一节 概述	153	二、国家公路主干网移动通信网络	227
第二节 光纤和光缆	154	三、边远沙漠与无人地带的公路移动	233
一、光纤种类的划分	154	通信网络	
二、光纤传输原理	156	第六节 集群移动通信系统	239

一、集群通信系统的基本结构	240	三、通信系统单项工程施工	301
二、集群通信的共网与专网	247	第二节 通信系统设备的采购、监造、 运输与检验	305
第七章 高速公路紧急电话系统及视频 图像传输系统	250	一、通信系统设备的采购	305
第一节 紧急电话工作概况	250	二、通信系统设备工厂测试与监造	307
第二节 紧急电话亭	253	三、通信系统设备运输	310
第三节 系统控制台	254	四、通信系统设备检验	310
第四节 交通监视视频图像传输	255	第三节 通信系统关键施工工艺	311
第八章 某区域(省)高速公路通信系 统设计实例	281	一、通信管道的关键施工工艺	311
第一节 系统设计原则及目标	281	二、电缆线路工程的施工工艺	312
一、设计原则	281	三、程控交换机关键安装工艺	315
二、总体目标	282	第四节 通信系统的指标测试	316
第二节 高速公路通信业务及其接入特 点分析	282	一、概述	316
第三节 高速公路通信网络技术分析	283	二、各系统指标测试	318
一、SDH 传输技术	283	三、完工测试	319
二、ATM 传输技术和 IP 网络技术	284	四、试运转和验收	319
三、网络技术的融合	286	第五节 通信系统质量控制和管理	320
第四节 某省高速公路网通信系统网络 规划	287	一、通信系统质量管理的手段	320
一、通信机构的设置	287	二、质量控制	320
二、干线传输系统	287	三、质量改进	322
三、基层用户接入系统	289	第十章 高速公路通信新技术展望	323
四、程控数字交换系统	290	第一节 光交换技术及密集波分复用 (DWDM) 技术在高速公路 通信中的应用	323
五、紧急电话系统	293	一、光交换技术	323
六、移动通信系统	294	二、密集波分复用(DWDM)技术在 高速公路通信中的应用	329
七、图像数据传输通道	294	第二节 无线局域网与蓝牙技术概要	333
八、支撑网	295	一、无线局域网技术	334
第五节 通信系统的实施	298	二、蓝牙(bluetooth)技术概要	337
第九章 高速公路通信系统的实施 过程及质量控制	300	第三节 第三代移动通信、第四代移 动通信及个人通信	341
第一节 通信系统的施工顺序	300	一、第三代移动通信(3G)技术	341
一、高速公路通信系统实施流程	300	二、第四代移动通信(4G)技术简述	344
二、通信系统施工时间安排	301	三、个人通信	348
		参考文献	351

第一章 概述

具体的通信系统十分复杂,涉及许多基本概念和理论问题。为方便以后各章讨论,本章将介绍有关通信的一些初步概念。这些概念主要包括以下几方面:通信系统简介,通信系统的基本概念,信息的概念和量度,通信系统设计的指标依据等。

第一节 通信概述

人类自有语言和文字以后,为了交流和沟通就有了通信的要求。如图 1-1 所示,真正的通信技术始于 1840 年,在这一年美国的 Samuel Morse 和 AHred Vail 发明了电报(莫尔斯电报),它是一种简单的通信媒体。20 世纪中晚期发展起来的现代通信逐步形成了信息网络,它是一种现代通信网系统,是集信息服务和计算机技术为一体的现代通信网。信息网络可为今天的信息社会提供多方面的、丰富多彩的信息服务,给人们提供高层次的信息享受,它是一种复杂的通信媒体。

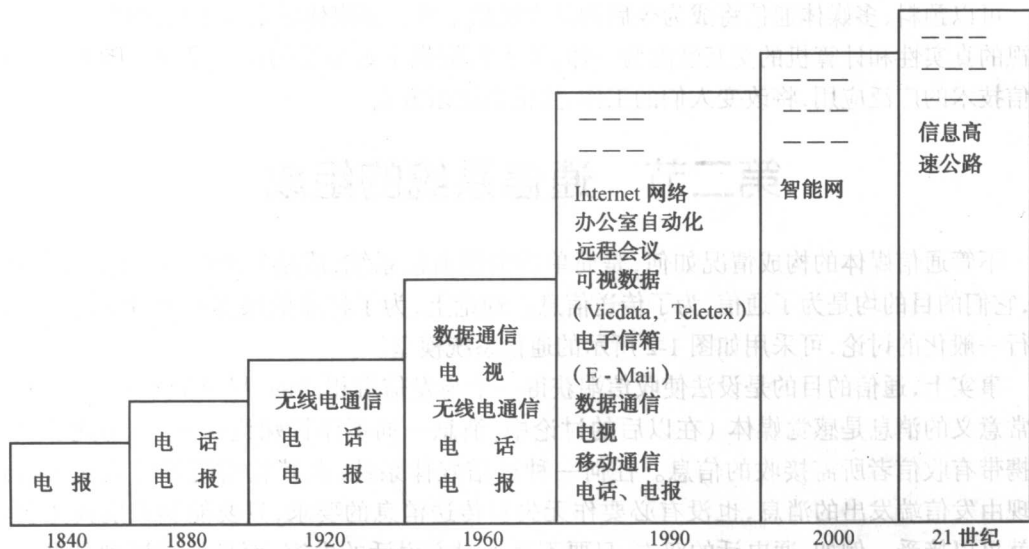


图 1-1 通信媒体发展概况

现代,将通信系统看成传送信息的媒体。媒体(media)一词用来描述信息传输系统,可能更概括一些。国际电信联盟,电信标准化部 ITU-T (1993 年 2 月 28 日以前称为 ITU-T),将媒体分为以下几类。

(1) 感觉媒体(Preception medium):是指能够直接作用于人的感觉器官,使人产生直接感觉的媒体。例如,能引起听觉反应的语言、音乐、自然界的其他声音;能引起视觉反应的文

字、图形、图像和自然景象等,均属感觉媒体。

(2) 表示媒体 (Representation medium):是指传输感觉媒体的中介媒体。例如,声音、图形、图像的各种编码等,均属表示媒体。

(3) 显示媒体 (Presentation medium):是指电信号和感觉媒体之间的转换媒体。例如,计算机键盘、光笔、扫描器、摄像机、话筒等,称为输入显示媒体;而计算机显示器、喇叭、打印机、拷贝机等,称为输出显示媒体。

(4) 存储媒体 (Storage medium):是指存储表示媒体的媒体。例如,磁带、光盘 (CD、DVD)、IC 存储器等,均属存储媒体。

(5) 传输媒体 (Transmission medium):是指传输表示媒体的物理实体。例如,电缆、光缆、大气空间等,均属传输媒体。

通常也可将载送信息的媒体分为:记录媒体 (record media) 和实时媒体 (real-time media)。书籍、资料、报纸、书信、电影、录音带、录像带、光盘 (CD、DVD) 等,均是记录媒体,它们都携带有信息,它们提供的是非实时信息;实时通信系统 (例如,电话通信系统) 是实时媒体,它传送的是实时信息。

在所谓多媒体 (medium) 信息中,既有实时信息,如电话、电视等,也有非实时信息,如书籍、情报、资料等,现代通信媒体应传输多媒体信息。

可以预料,多媒体通信将成为今后的基本通信方式。多媒体通信技术将通信的分布性、电视的真实性和计算机的交互性融为一体,为人们提供丰富多彩的信息享受。随着多媒体通信技术的广泛应用,将改变人们的工作、生活和娱乐方式。

第二节 通信系统的组成

不管通信媒体的构成情况如何,是简单的电话通信系统,或是复杂的其他信息网络系统,它们的目的均是为了通信,为了传送信息。理论上,为了将通信媒体系统带共性的问题进行一般化的讨论,可采用如图 1-2 所示的通信系统模型。

事实上,通信的目的是设法使收信端获得一个与发信端相同的、尽可能不失真的消息。通常意义的消息是感觉媒体 (在以后的讨论中,消息一词不作特殊说明时,即为此含义),它携带有收信者所需接收的信息。任何一种通信媒体系统,在其收信端不可能无失真地再现由发信端发出的消息,也没有必要作无失真传送消息的要求,只要能够识别其主要特征就可以接受。例如,通电话的双方,只要不丢失对方说话的内容,而且能够识别是谁的声音,就可以认为这个话音质量可以接受。要求适度,这就构成了合理的通信系统的性能指标。

收信端和发信端消息之间的差别,是通信信道中的噪声、干扰以及通信设备本身的工作特性引起的。所谓信道,狭义上是指通信系统中的传输媒体系统,这是狭义信道的概念。在图 1-2 所示的通信系统模型中,噪声和干扰的影响,可用一个噪声干扰源来加以考虑。

在图 1-2 中,发信机的功能是将消息转换为适合于在信道传输的信号,发信机是感觉媒

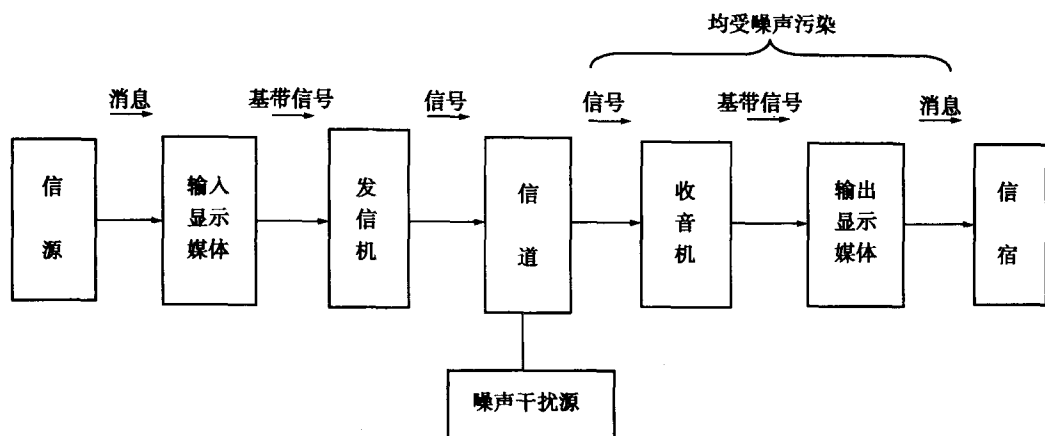


图 1-2 通信系统模型

体和传输媒体的中介媒体,具有表示媒体的功能。信号是消息的载体,信号可以是电信号,也可以是光信号,本质上都是一种载送消息,并适合在传输媒体中传输(或传播)的所谓电磁波载体,这不论是有线通信(例如,明线、电缆和光纤通信)或无线电通信均如此。例如,在明线(即双线传输线)、电缆、大气空间(对无线电通信而言)中传输的是 TEM 波,在光纤中传输的是 $HE_{11}(LP_{01})$ 波(对单模光纤通信而言),它们都是电磁波的波形,在通信中它们都是信号的载体。

在通信系统中,要将消息转变为信号,一般要经过转换、调制和编码这样一些加工处理的过程,下面分别介绍它们的含义。

1. 转换

所谓转换是将表达消息的感觉媒体(通常是一些非电物理量)通过显示媒体转换为电物理量(电流、电压)。例如,电话机的送话器(显示媒体)将发话人的声压转换为相应变化的电流;电视摄像机将图像景物的光感,转换为相应变化的电压等,都是通信中的转换过程。

2. 调制

调制是通信系统工作的核心,信号之所以载有消息是通过调制加工处理后而获得的。将与消息作相应变化的电压或电流,对发信机中的被调制部件(例如,调制器)电振荡或光振荡的参数进行控制,就可以达到调制的目的,例如,控制振荡波的振幅,就是调幅;控制振荡波的频率,就是调频;控制振荡波的相位,就是调相。被调制的振荡波,称为载波信号,或称已调波信号。

调制的主要作用是将经转换获得的电信号(例如,话音信号)的频谱在发信机中进行搬移,将它搬移到某个载频(即载波的频率)附近的频带内。这样做,至少可以达到以下两个目的:

(1) 利用高载频率电磁波向大气空间强的辐射能力,以满足无线电通信的需要。

根据电磁场理论的观点,低频(率)信号(例如,话音信号和视频信号),虽然可视为电磁波,但不具备强的辐射能力,它们通常只能在传输线(例如,电缆线、双线传输线)引导下传输。因此,低频信号要以无线电方式和以大气空间为传输媒体进行通信,必须对其进行调制处理,将它的频谱搬移到某个高载频附近的频率范围内。实际中,这需要根据传输的波(频)段而定。例如,给定传输波段是微波波段,就需要将低频信号的频谱搬移到微波频段上去。但需指出,这是对载波进行直接调制的发信机而言;如果出于某种技术上的考虑(例如,在微波通信系统中,为了获得较好的设备兼容性),不容许直接在发射载波上进行调制时,可以选定在一个低的载频上进行调制,然后再采用所谓变频的方法,将它搬移到发射载频上去。例如,在频率为 70MHz 的载频上进行调制,然后采用变频的方法,将 70MHz 的载频搬移到 8GHz 的载频发射。所谓变频也是通信系统中搬移信号频谱的加工处理方法。

(2) 可以实现频分复用 FDM (Frequency Division Multiplexing),以满足多路通信的要求。

通常,送往信道传输的信号,其频带宽度(简称带宽)远小于信道可能提供的带宽。因此,如果不采用多路复用的方法,而仅将一个信号送往信道传输,将对信道带宽造成极大的浪费。以电话通信为例,每个用户的话音信号所占的带宽为 0.3~3.4kHz,如果将这带宽不足 4kHz 的话音信号送往信道中传输,将对信道的带宽能力造成极大的浪费。例如,1970 年同轴电缆的带宽能力就可以做到 100MHz·km,如果用如此宽的宽带信道传送带宽仅为 3.1kHz 的一个用户电话,简直浪费惊人。因此,为了充分利用传输信道的带宽能力,必须采用多路复用。对于模拟信号通信而言,是将每个用户的话音信号频谱利用调制方法,将它们搬移到高低不同的载频附近,令载频按高低秩序排队,以组成多个用户的多路信号。这种复用方式,称为频分复用(FDM)。在模拟通信系统中,一个同轴电缆传输信道,可以传输由上万个用户电话组成的频分复用多路电话信号。

3. 基带信号

消息经转换处理后,所得到的初始电信号是一种如图 1-3(a) 所示的模拟信号,称它为连续信号,它是随时间连续变化的函数 $s(t)$;如果将模拟信号经过所谓抽样、量化和编码处理,就可以得到如图 1-3(b) 所示的数字信号。数字信号在时间上、取值上均是离散的,是离散信号。

图 1-3 所示的信号具有两个特点:第一,它们都没有经过载波调制处理;第二,它们的频谱均从零频附近开始,一直延伸到很远(通常为数十 MHz)。具有这些特点的信号,通常称为基带信号。图 1-3(a) $s(t)$ 是模拟基带信号,图 1-3(b) 是数字基带信号。

传输模拟信号的通信系统,称为模拟通信系统;传输数字信号的通信系统,称为数字通信系统。模

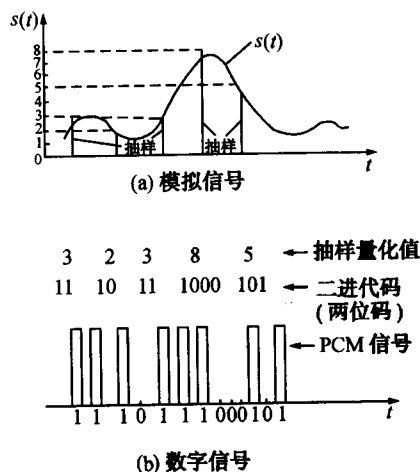


图 1-3 基带信号

拟信号和数字信号,均可采用基带传输和载波传输两种传输方式在信道中传输。所谓基带传输是将基带信号直接送往信道中传输的传输方式;所谓载波传输是将基带信号对载波进行调制后,以载波传输的传输方式。但光纤通信和无线电通信仅能采用载波传输方式,因此,此时的基带信号必须由光载波和无线电载波载送。

4. 编码

如果说调制是通信系统工作的核心,而对信号的编码加工处理则是数字通信系统工作的又一核心。所谓编码,简单说,它是用一些“符号(例如,正、负脉冲)”按一定规律组合用来表示某种消息的含义。例如,表示“是”的含义或表示“否”的含义等,编码信号是数字信号。编码有两个目的:第一,是为了提高信号的传输效率,以此为目的编码称为有效性编码,或称为信源编码;第二,是为了提高信号传输时的可靠性(或抗干扰能力),以此为目的的编码,称为可靠性编码,或称为信道编码。

模拟信号经过抽样、量化和代码处理,变换成数字信号的过程(称为模/数或 A/D 变换),就是一种信源编码,通常称为脉冲编码调制,即 PCM(Pulse Code Modulation)。在某些情况,例如,当传输数字电视信号时,需要将 PCM 数字电视信号的速率(数码率)进行压缩,因此产生了以减少速率为目的的压缩编码,这类编码属于信源编码;对数字信号的加密处理,也属于信源编码。信源编码的主要措施是尽可能删去信源信号的多余部分(称为剩余度),以提高传输效率。一般说,信源信号经过信源编码后,代表信源信号的符号之间的相关性减少了,比原来更加独立,这将导致信源编码信号的抗噪声干扰能力下降。因此,信源编码信号传输时,还需进行抗干扰性编码,即进行信道编码。

信道编码的主要措施是在经信源编码处理后的数字信号中,人为地加入一些码元,以提高数字信号的抗噪声干扰的能力。

综上所述可见,通信系统中的发信机,要将信源发出的消息,转换为适合于在信道中传输的信号,需要经过复杂的加工处理,或者说要经过许多变换;而收信机只需经解调、解(译)码等相应的反变换处理,就可获取发信端信源发出的消息。

发信者称为信源,收信者称为信宿。在现代通信中,信源和信宿可以是人,也可以是计算机或其他机器设备。

第三节 通信系统的分类及通信方式

一、分类

通信系统的分类方法较多,侧重点有所不同。如可按消息的物理特征来分,可按调制方式来分,可按传输媒介分,也可按信号的复用方式分。但从信号的本质特征上分类,可以分为模拟和数字通信系统两类。

1. 模拟通信系统模型

图 1-4 所示的模拟通信系统模型是载波传输方式的模型。在该模型中,只强调了调制

和反调制(解调)功能,因为在信号变换过程中,它们的作用是实质性的。信号的调制变换由调制器完成;已调信号的反变换由解调器完成,它可以从已调信号中取出发信端送来的基带信号。实际模拟通信系统方案(组成、框图)要复杂得多,除具有一些辅助功能系统(例如,电源系统、自动增益控制系统等)外,仅就对信号加工处理环节而言,还应具有放大、变频、滤波等一系列加工程序。如果将这些内容包括进来,模拟通信系统将是一个庞杂的系统,从而可以想象出进入信道中的“噪声”也是多途径的。例如,系统中大量使用的有源器件(各类 P-N 结器件)的内部噪声、无源器件(电阻、引线)的热噪声、传输媒体的噪声(例如,无线电通信的工业干扰、雷电干扰),甚至电源系统的噪声,都将进入信道中,依附在信道中传输的信号上。可见,通信系统模型中的噪声源必不可少,它是引入通信信道中各种噪声的一个集中概括,噪声将给收信端对信号的变换带来许多困难,需设法对抗。

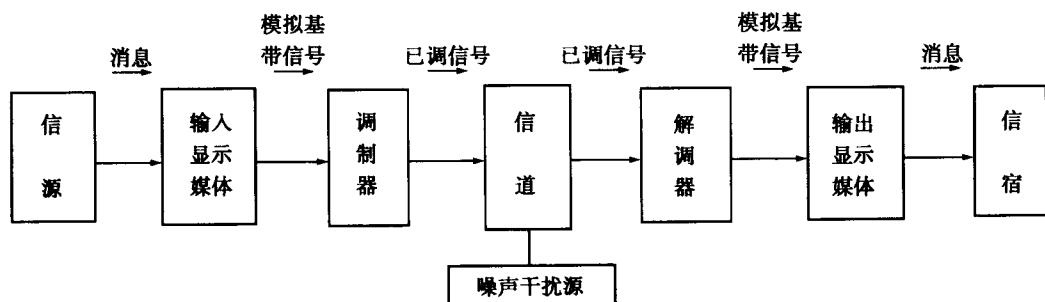


图 1-4 模拟通信系统模型

2. 数字通信系统模型

在图 1-5 所示的数字通信系统模型中,除应具有调制和解调功能外,还应具备编码和解(译)码功能,在数字通信系统中,它们的作用是实质性的。信源编码和解码,在一般情况下分别由模/数(A/D)和数/模(D/A)变换器完成;信道编码和解码分别由信道编码器和解(译)码器完成。同理,实际数字通信系统方案(组成、框图)十分庞杂,且必须具备同步系统;信道中噪声来源也是多途径的,通信系统中的噪声源必不可少;噪声也将给收信端对信号的变换带来许多困难,需设法对抗。

注意,图 1-4 和图 1-5 所示的模拟和数字通信系统模型仅适用于载波传输,若用于基带传输,只需将调制器和解调器移去即可。

二、通信方式

对于点与点之间的通信,按消息传送的方向与时间关系,通信方式可分为单工通信、半双工通信及全双工通信三种。

单工通信是指消息上能单方向传输的工作方式,如遥控、遥测、广播等就是单工通信方式。

半双工通信是指通信双方都能收发消息,但不能同时收发的工作方式。如使用同一载

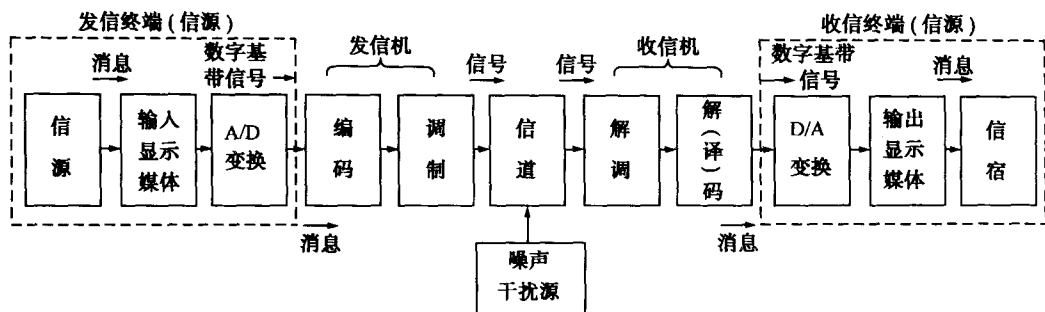


图 1-5 数字通信系统模型

频工作的无线对讲机就是按这种通信方式工作的。

全双工通信是指通信双方可同时进行收发消息的工作方式。如普通电话就是一种最常见的全双工通信方式。

除了点与点之间的通信外，还有点与多点、多点与多点之间的通信，多点间的通信属于网络通信。显然，网络通信的基础仍是点与点的通信。

第四节 通信系统的主要技术指标

一、信息的概念及其量度

对收信者而言，其目的是通过通信系统获取信息，而通信系统仅负责传送消息。因此，研究通信系统时，理解信息的概念十分重要。

通常，收信者在收到消息前，总是有一种不确定性的感觉。消息中所隐含的不确定性，好像有一种量的感受。理论上，使用信息量（或信息）对消息的不确定性作定量的描述，量度信息的物理量称为信息量。

由数学中的概率论可知，事件不确定性的程度，可以用事件出现（发生）的概率描述。即是说，事件出现的可能性越小，则事件发生的概率就越小；反之，事件发生的概率就越大。据此，可以想到：消息中所隐含的信息量，与构成消息的事件发生的概率有密切的关系。

据此可定义出消息中所隐含的信息量 I 与构成消息的事件 x 发生的概率 $P(x)$ 的关系，由下式确定，即

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

由上式可见， I 与 $P(x)$ 成反比。 $P(x)=0$ 时， $I \rightarrow \infty$ ； $P(x)=1$ 时， $I=0$ 。这与事实相符，因而上式是成立的。

采用何种单位量度信息量，取决于 (1-1) 式中对底数 a 的选择。如果取 $a=2$ ，则信息量的单位为比特 (bit)；如果取 $a=e$ ，则信息量的单位为奈特 (nit)；如果取 $a=10$ ，则信息量的单位为哈特莱。

实际中,通常使用 bit 作为量度信息的单位,1bit 表示出现概率为 $\frac{1}{2}$ 的符号(例如,0 或 1)或消息(终端设备作信源时,一个符号代表一个独立的消息)所隐含的信息量。实际中,通常认为一个二进制的码元(0 或 1)携带有 1bit 的信息量,这仅是一种习惯的说法,但这种说法对高速率传输的二进制 PCM 码(元)流中的码元而言是正确的。即是说,高速率传输的 PCM 数字信号中,每个码元(0 或 1)携带有 1bit 的信息量。这是因为在这码流中,0 或 1 出现的概率为 $\frac{1}{2}$ 。例如抛掷硬币的游戏,如果抛掷数千次或数万次,可以肯定硬币的正面和背面出现的概率将各为 $\frac{1}{2}$,即 $P(0) = P(1) = \frac{1}{2}$,将该概率值代入(1-1)式,并令 $a=2$,显然可得 $I=1$ bit。

以上研究的内容是由一个事件(或符号,例如 0 和 1 就是一种符号)构成的消息中所隐含的信息量;而实际通信中,信源(发信终端)发出的消息,通常是 n 个相互独立的符号所构成的 n 个相互独立的消息。若设在这 n 个相互独立的消息序列中,构成第 i 个消息的符号 x_i 出现的概率为 $P_i(x_i)$,则第 i 个消息在该消息序列中将出现 $nP_i(x_i)$ 次。因此,根据(1-1)式,可求得从第 i 个消息中所获得的总信息量为

$$I_{i\Sigma} = -nP_i(x_i)\log_2 P_i(x_i) \quad (1-2)$$

为了求得 n 个消息中所隐含的总信息量,只需对上式求和,即

$$I_{n\Sigma} = -n \sum_{i=1}^n P_i(x_i)\log_2 P_i(x_i) \quad (1-3)$$

显然,将上式除以 n ,便可求得每个消息隐含的平均信息量为

$$H = - \sum_{i=1}^n P_i(x_i)\log_2 P_i(x_i) \quad (1-4)$$

H 称为信源的熵(entropy);上式应该是指每个符号所隐含的信息量,无需作特殊说明,如果要强调,可使用“bits/符号”作为 H 的量度单位。

在信源输出的符号序列中,如果每一个符号出现的概率相等,则信源的熵最大。例如,有一个能输出 26 个英文字母的信源,如果每个字母出现的概率 $P_i(x_i)$ 相等,即 $P_i(x_i) = \frac{1}{26}$,且字母之间没有空白,则该信源的熵可以根据(1-4)式求得,即

$$\text{信源熵} = - \sum_{i=1}^{26} \frac{1}{26} \log_2 \frac{1}{26} = 4.7$$

但实际的熵远小于这个值,其原因有两点:第一,在英语里各字母组成的概率不相等;第二,在英语里不是随便什么字母都能组成单字,不是随便什么单字都能组成语句。

二、传输速率

数字通信系统在信道中的传输效率可靠性以及信道容量的计算,均和数字信号的传输速率有关,数字信号的传输速率主要包括:信息传输速率和码元传输速率,下面介绍它们的含义。

1. 信息传输速率

信息传输速率 R_{SM} : 每秒钟经信道传输的信息量, 量度单位是 bit/s (比特/秒) 或 bps。信息传输速率又称为信息率, 或信息速率、传信率、比特率。

数字通信系统传输的是离散信号, 假设有一个离散信源每秒钟输出 n 个具有等时间间隔的符号 (或码元), 仿照 (1-1) 式, 可求得该符号序列的信息传输速率为

$$R_{SM} = n \log_2 M \quad (1-5)$$

式中, M 是进制数, 例如 $M=2$ 是二进制, $M=4$ 是四进制, $M=8$ 是八进制, 等等。 M 是一个大于 2 的正整数, $M=2^k (k=1, 2, 3, \dots)$ 。

2. 码元传输速率

码元传输速率 R_{CM} : 每秒钟经信道传输的码元数, 量度单位是 Bd (Baud 波特)。码元传输速率又称为码元速率或波特率。

需注意, 码元速率仅表示每秒钟传输的码元数目的多少, 而没有对码元的进制作限定。在某些情况下必须强调码元进制, 且必须对不同进制的码元速率进行转换时, 可利用 (1-6) 式

$$R_{C2} = R_{CM} \log_2 M \quad (1-6)$$

的转换关系, 将二进制码元速率 R_{C2} 与 M 进制码元速率 R_{CM} 进行互换。

信息速率 R_{SM} 与码元速率 R_{CM} 的转换关系为:

$$R_{SM} = R_{CM} \log_2 M \quad (1-7)$$

由 (1-7) 式可知, 二进制信息速率和二进制码元速率在数值上相等, 仅单位不同, 实用中统称为速率, 单位为 bit/s。

三、信道容量

所谓信道容量 C , 是指信道能够传输的最大信息速率。当考虑到引入信道中的噪声时, 信道容量

$$C = (R_{SMS} - R_{SMN})_{\max} \quad (1-8)$$

式中,

$$R_{SMS} = B \log_e 2\pi e (S + N) \quad (1-9)$$

是连续信源输出信号加上噪声, 它们抽样值幅度的概率密度分布为高斯分布 (参见图 1-6b) 时的最大信息速率。该式中, B 是信源输出信号的频带宽度, 也可将 B 看成信道的带宽。 B 引入 (1-9) 式中, 从概念上讲是因为将如图 1-6 (a) 所示的连续信号 (含噪声), 以 $1/2B$ 的抽样速率 (抽样) 使之变成离散信号而引进的; $e=2.7118$ 是自然对数的底, S 是信号的平均功率; N 是信道中具有高斯概率密度分布的白噪声的平均功率, 这种白噪声具有如图 1-6 (a) 所示的电压波形, 其抽样值的概率密度分布如图 1-6 (b) 所示, 为高斯分布。而

$$R_{SMN} = B \log_e 2\pi N \quad (1-10)$$

为噪声的最大信息速率。

将 (1-9) 式和 (1-10) 式代入 (1-8) 式, 可得通信系统信道容量的计算式, 即

$$\begin{aligned} C &= B \log_e \left(1 + \frac{S}{N} \right) \\ &= B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \end{aligned} \quad (1-11)$$

式中, $\frac{S}{N}$ 称为信噪比。 $\frac{S}{N}$ 越高, 通信质量越好。

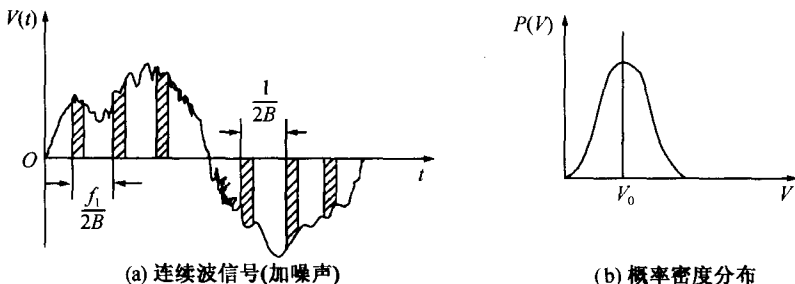


图 1-6 连续波信号(加噪声)和相应的概率密度分布

需指出, (1-11) 式仅给出一个计算噪声信道的信道容量的理论极限值, 实际上无法达到该理论值; 另外, 不能根据 (1-11) 式片面地认为, 只要增加传输信道的带宽 B , 就可以无限制地增加噪声信道的信道容量 C 。这是因为信道中的噪声为白噪声时, 白噪声的平均功率 N 与信道带宽 B 成正比, 即 $N = N_0 B$, 此处 N_0 为白噪声谱密度 (W/Hz)。将该 N 值代入 (1-10) 式中, 令 $B \rightarrow \infty$ 求极限, 可得

$$C_{\max} = \left(\frac{S}{N_0} \right) \log_2 e \approx 1.44 \left(\frac{S}{N_0} \right) \quad (1-12)$$

可见, 不可期望依靠无限增加信道带宽 B 来获得无限的噪声信道的信道容量 C , 即便是 $B \rightarrow \infty$, 也只能做到 $C \rightarrow C_{\max}$, 更何况现代带宽最宽的光纤传输信道也无法使 $B \rightarrow \infty$ 。

要在一个通信系统中传送 I 比特的信息量, 可根据 (1-10) 式求得

$$I = TB \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (1-13)$$

式中, T 为信息 I 的传输时间。

由 (1-13) 式可见, 为了达到传输信息量 I 的目的, 信道带宽 B 、传输时间 T 和信噪比 $\frac{S}{N}$, 三者之间可以互换。如果要求一定的信噪比 $\frac{S}{N}$, 那么扩展信道宽 B , 就要压缩传输时间 T ; 或者增加传输时间 T , 就可以压缩信道带宽 B 。如果传输时间 T 要求固定, 那么扩展信道带宽 B , 就可以降低信噪比 $\frac{S}{N}$ 的要求; 或者需要压缩信道带宽 B , 那就需要提高信噪比 $\frac{S}{N}$ 的要求。

四、通信系统的指标依据

通信系统设计涉及到站间距离的计算、设备的选型和配置、站址的选择、机房建设、各种

标准规范以及投资效益等多方面问题的考虑。作为设计者主要考虑的应是如何保证通信系统的有效性、可靠性和可用性,以及了解为此而做出的性能指标规范的含义。下面仅就通信系统的主要性能指标做一些介绍。

依据信息论的观点,对通信系统有效性和可靠性的性能评估十分简单、明确,即:通信系统的有效性可用信息传输速率来衡量;可靠性可用信号的差错率来衡量,模拟信号不能计算差错率,可用信噪比 $\frac{S}{N}$ 来衡量;可用性通常用系统的最大允许失效时间来衡量。

在模拟通信系统中,采用模拟信号多路复用(例如FDM)方法,可以提高通信系统的有效性,即可以提高单位时间内传输的信息量。通信系统复用的路数越多,信道传输的有效性就越高;通常用模拟通信系统输出端的信噪比 $\frac{S}{N}$ 来衡量系统传输的可靠性。系统输出信噪比 $\frac{S}{N}$ 越高,通信质量就越好。例如,电话通信系统输出端信噪比 $\frac{S}{N}=40\text{dB}$ 时,可以保证较好的通话质量;一个较好的电视传输系统大约要求60dB的输出信噪比。

在数字通信系统中,也可以采用数字信号多路复用TDM(Time Division Multiplexing)方法提高通信系统的有效性,它可以极大地提高信息速率。

衡量数字通信可靠性的差错率,是指收信机收到的数字信号出现错误的概率,它可用误码率和误比特率表示。

误码率 P_e 表示收信机错误接收码元的概率,即

$$P_e = \frac{\text{错误接收的码元数}}{\text{传输的总码元数}} \quad (1-14)$$

误比特率 P_b 表示收信机错误接收的比特数的概率,即

$$P_b = \frac{\text{错误接收的比特数}}{\text{传输的总比特数}} \quad (1-15)$$

在二进制数字通信系统中, $P_e = P_b$;在多进制(例如,四进制和八进制)数字通信系统中 $P_e > P_b$ 。

数字通信系统的误码率越低,则系统的可靠性就越高,通信质量越好。现代数字微波通信要求误码率 $P_e \leq 10^{-6}$;数字光纤通信要求误码率 $P_e \leq 10^{-11} \sim 10^{-9}$ 。这种误码率的要求相当高。例如对于数字光纤通信而言,要求光收信机每接收 $10^9 \sim 10^{11}$ 个码元,只允许一个码元出错(例如,对于二进制码元而言,将“1”错为“0”或将“0”错为“1”)。

需指出,以上介绍的是通信系统的性能指标,它用来评价通信系统,通常作为设计通信系统的主要依据,应通过合理的系统设计给予保证。至于通信设备采用何种进制的数字信号,可以提高系统频带利用率以提高系统的有效性,采用何种编码方法可以提高系统的有效性和可靠性,采用何种调制方法可以改善系统输出信噪比等等,均是通信设备设计方面的问题,仅只能供通信系统设计者在设备选型时,结合投资效益统筹考虑。