

普通高等教育“十三五”规划教材

现代通信技术与原理

XIANDAI TONGXIN JISHU YU YUANLI

田广东 主编
尚雅琴 张良 副主编



中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

普通高等教育“十三五”规划教材

现代通信技术与原理

田广东 主 编

尚雅琴 张 良 副主编



中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

内 容 简 介

本书紧扣通信原理的基本主线,结合实际应用系统和系统的仿真对一些抽象的概念和难以理解的内容给予直观清晰的解释;系统阐述了现代通信技术的基本概念、基本原理、基本方法,并在重点论述传统通信技术基本理论的基础上,力求反映通信理论和通信技术的最新发展。在一些新技术及其应用上,如现代数字调制技术、网格编码调制技术、正交频分复用技术、空时编码、扩频通信技术等,结合相应物理模型给出基本的、易懂的解析,做到既通俗易懂,又不失严谨。

本书参考学时为40~60学时,可作为高等学校计算机、通信工程和其他相近专业教材,也可供从事通信工程等工作的广大科技人员及对通信技术感兴趣的读者阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代通信技术与原理/田广东主编. —北京:中国铁道出版社,2018.9

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-113-24772-0

I. ①现… II. ①田… III. ①通信技术-高等教育-教材②通信原理-高等教育-教材 IV. ①TN91

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 172805 号

书 名:现代通信技术与原理
作 者:田广东 主编

策 划:翟玉峰
责任编辑:翟玉峰 鲍 闻
封面设计:付 巍
封面制作:刘 颖
责任校对:张玉华
责任印制:郭向伟

读者热线:(010)63550836

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街8号)

网 址:<http://www.tdpress.com/51eds/>

印 刷:北京虎彩文化传播有限公司

版 次:2018年9月第1版 2018年9月第1次印刷

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16 印张:14 字数:336 千

书 号:ISBN 978-7-113-24772-0

定 价:39.80 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社教材图书营销部联系调换。电话:(010)63550836
打击盗版举报电话:(010)51873659



前 言

通信是人类传递信息、传播知识和相互交流的重要手段。从人类文明诞生以来,通信方式的改变一直在不断影响着人们的生产生活方式。在当今飞速发展的信息化时代,通信技术正以惊人的速度不断向前发展。近年来,伴随着智能终端的迅速发展,通信技术与计算机技术的结合更加紧密,使得现代通信的应用领域更加广泛,因此,学习和掌握通信理论和技术是信息社会时代科技工作者的迫切需求。

本书紧扣通信原理的基本主线,结合实际应用系统和系统的仿真对一些抽象的概念和难以理解的内容给予直观清晰的解释;系统阐述了现代通信技术的基本概念、基本原理、基本方法,并在重点论述传统通信技术基本理论的基础上,力求反映通信理论和通信技术的最新发展。在一些新技术及其应用上,如现代数字调制技术、网格编码调制技术、正交频分复用技术、空时编码、扩频通信技术等,结合相应物理模型给出基本的、易懂的详解,做到既通俗易懂,又不失严谨。总之,能让读者感到通信原理是一门有用的、有趣的课程,让读者真正有所收获。

全书共9章。第1章论述了通信的基本概念和信息的度量,通信系统的构成和分类及其性能的指标,并对通信的发展趋势进行了展望;第2章详细介绍了模拟通信技术,包括模拟通信系统概述以及调制的概念,着重阐述了几种线性调制和非线性调制技术,并对这些调制方式的抗噪声性能进行了详细的分析;第3章介绍了数字通信技术,包括数字通信技术概述、脉冲编码调制技术,并着重介绍了数字信号的基带传输和频带传输,最后介绍了几种数字调制技术;第4章对信道的定义、模型、噪声以及信道容量做了详细的阐述,并针对信道复用和多址技术做了详细介绍;第5章介绍了同步的概念,并介绍了四种同步技术及其原理;第6章阐述了差错控制编码技术,着重介绍了通信系统中常见的五种信道编码技术;第7章介绍了几种典型的通信系统;第8章对于未来的5G移动通信技术做了简单的介绍;第9章概述了现代通信网并着重介绍了几种典型的通信网。

本书可作为高等学校通信工程、计算机和其他相近专业教材,参考学时为40~60学时,也可供从事这方面工作的广大科技人员以及对通信技术感兴趣的读者阅读和参考。

鉴于编者水平有限,书中难免存在一些疏漏和论述不当之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

2018年6月



第 1 章 现代通信技术概论	1
1.1 通信的定义与发展	1
1.1.1 通信的定义	1
1.1.2 通信的方式	1
1.1.3 通信的发展	5
1.2 信息及其度量	5
1.2.1 消息和信息	5
1.2.2 信号	5
1.2.3 信息量	6
1.3 通信系统	7
1.3.1 通信系统的基本模型	7
1.3.2 通信系统分类	8
1.4 通信系统的主要性能指标	10
1.5 通信发展趋势	11
思考与练习	13
第 2 章 模拟通信技术	14
2.1 模拟通信系统概述	14
2.1.1 模拟通信系统的构成	14
2.1.2 调制的意义与分类	14
2.2 线性调制	15
2.2.1 振幅调制(AM)	16
2.2.2 双边带调制(DSB)	17
2.2.3 单边带调制(SSB)	18
2.2.4 残留边带调制(VSB)	19
2.3 线性调制系统的抗噪声性能	21
2.3.1 分析模型	21
2.3.2 DSB 调制系统的性能	22
2.3.3 SSB 调制系统的性能	24
2.3.4 AM 包络检波的性能	25

2.4 非线性调制	27
2.4.1 角度调制的概念及分类	27
2.4.2 窄带调频	29
2.4.3 宽带调频	30
2.5 调频系统的抗噪声性能	32
思考与练习	34
第3章 数字通信技术	35
3.1 数字通信概述	35
3.1.1 数字通信系统的组成	35
3.1.2 数字通信主要技术概述	36
3.2 脉冲编码调制(PCM)	36
3.2.1 抽样定理	37
3.2.2 量化	41
3.2.3 编码和译码	47
3.2.4 自适应差值脉冲编码调制	55
3.3 数字基带传输系统	61
3.3.1 数字基带信号波形与频谱特性	62
3.3.2 基带传输系统模型	64
3.3.3 数字基带信号的码型	65
3.3.4 无码间串扰的传输波形	70
3.3.5 无码间串扰基带系统的抗噪声性能	76
3.3.6 眼图	78
3.4 数字信号的频带传输	79
3.4.1 二进制数字调制的一般概念	79
3.4.2 二进制数字调制信号的最佳检测	81
3.4.3 二进制数字调制与解调原理	86
3.4.4 二进制数字调制信号的功率谱密度	92
3.4.5 多进制数字调制	94
3.5 数字调制技术	99
3.5.1 正交振幅调制	99
3.5.2 交错正交相移键控	101
3.5.3 最小频移键控	102
3.5.4 用高斯滤波的最小频移键控	104
3.5.5 $\pi/4$ 四相相移键控	110
3.5.6 扩频调制	114
思考与练习	116
第4章 信道	118
4.1 信道的定义及分类	118
4.2 信道的数学模型	118

4.2.1	调制信道的数学模型	118
4.2.2	编码信道的数学模型	122
4.3	信道的加性噪声	122
4.4	信道容量	124
4.5	信道复用和多址技术	125
4.5.1	频分多路复用	126
4.5.2	时分多路复用	127
4.5.3	多址技术	128
	思考与练习	133
第5章	同步原理	134
5.1	载波同步	134
5.1.1	载波同步的插入导频法	134
5.1.2	载波同步的直接提取法	135
5.1.3	两种载波同步方法的比较	137
5.2	位同步	138
5.2.1	位同步的插入导频法	138
5.2.2	位同步的直接提取法	139
5.3	帧同步	142
5.3.1	帧同步系统的主要要求与功能	142
5.3.2	帧同步系统同步方法	143
5.4	网同步	145
	思考与练习	146
第6章	差错控制编码	147
6.1	概述	148
6.1.1	差错控制编码的基本概念	148
6.1.2	检错和纠错原理	150
6.1.3	几种常见的检错码	153
6.2	线性分组码	155
6.3	循环码	160
6.4	卷积码	162
6.5	TCM 网格编码	165
6.6	空时编码	167
	思考与练习	169
第7章	典型通信系统	170
7.1	GSM 数字蜂窝移动通信系统	170
7.1.1	GSM 系统的构成及功能	171
7.1.2	GSM 系统的信令	173
7.2	码分多址蜂窝移动通信系统	174
7.2.1	CDMA 系统构成及功能	174

7.2.2	CDMA 系统的关键技术	175
7.3	第三代移动通信系统	177
7.3.1	3G 的主要性能特征	177
7.3.2	3G 系统的组成	178
7.3.3	3G 系统的关键技术	179
7.4	第四代移动通信系统	181
7.4.1	概述	181
7.4.2	4G 的网络架构	182
7.4.3	4G 的关键技术	183
	思考与练习	186
第 8 章	5G 移动通信技术	187
8.1	5G 的发展现状及应用前景	187
8.2	5G 关键技术	188
8.3	5G 面临的难题	190
	思考与练习	191
第 9 章	现代通信网概述	192
9.1	通信网概述	192
9.1.1	通信网的概念及构成要素	192
9.1.2	通信网的分层结构	194
9.2	宽带 IP 网	199
9.2.1	IP 网的现状	199
9.2.2	宽带 IP 技术	200
9.3	多媒体通信网	201
9.4	智能网 IN	204
9.4.1	IN 的概念	204
9.4.2	IN 的构成	205
9.4.3	IN 的实现方案与关键技术	207
9.5	虚拟网专用 VPN	208
9.5.1	VPN 的概念	208
9.5.2	VPN 的实现方法和接入方式	210
9.5.3	VPN 的业务类型	211
9.5.4	VPN 业务的典型应用	212
9.6	个人通信	212
9.6.1	个人通信的概念	212
9.6.2	个人通信的特点	213
9.6.3	个人通信的实现	213
	思考与练习	214
	参考文献	215

第 1 章

现代通信技术概论

通信技术,特别是数字通信技术近年来发展非常迅速,应用也越来越广泛。本章主要介绍通信的概念及其发展简史、通信的频段划分、现代通信的发展方向等。这些基本概念是学习和理解现代通信技术与原理的基础。

1.1 通信的定义与发展

从远古时代到现在高度文明发达的信息时代,人类的各种活动都与通信密切相关。特别是进入信息时代以来,随着通信技术、计算机技术和控制技术的不断发展与相互融合,极大地扩展了通信的功能,使得人们可以随时随地通过各种信息手段获取和交换各种各样的信息。通信进入社会生产和生活的各个领域,已经成为现代文明的标志之一,对人们日常生活和社会活动的影响越来越大。

1.1.1 通信的定义

一般地说,通信(Communication)是指不在同一地点的双方或多方之间进行迅速有效的信息传递。我国古代的烽火传警、击鼓作战、鸣金收兵以及古希腊用火炬位置表示字母等,都是人类最早的利用光或声音进行通信的实例。当然,这些原始通信方式在传输距离的远近以及速度的快慢等方面都不能和今天的通信相提并论。各种各样的通信方式中,利用电磁波或光波来传递各种消息的通信方法就是我们通常所说的电信(Telecommunication)。由于电信具有信息传递迅速、准确、可靠而且几乎不受时间和空间距离限制等特点,电信技术得到了飞速发展和广泛应用。现在所说的“通信”在通常意义上都是指的“电信”,本书也是如此。因此,我们不妨在这里对现代通信的概念进行重新定义:利用光、电技术手段,借助光波或电磁波,实现从一地向另一地迅速而准确的信息传递或交换。通信从本质上讲就是实现信息有效传递的一门科学技术。随着社会的发展,人们对信息的需求量日益增加,要求通信传递的信息内容已从单一的语音或文字转换为集声音、文字、数据、图像等多种信息融合在一起的多媒体信息,对传递速度的要求也越来越高。当今的通信网不仅能有效地传递信息,还可以存储、处理、采集及显示信息,实现了可视图文、电子信箱、可视电话、会议电视等多种信息业务功能。通信已成为信息科学技术的一个重要组成部分。

1.1.2 通信的方式

信号在信道中的传输方式从不同的角度考虑,可以有多种。按照信息在信道中的传输方向,可以把通信方式分为单工通信、半双工通信和全双工通信;按照通信双方传输信息的路数,通信方式又可分为串行通信和并行通信;按照信息在信道中传输的控制方式,通信

的方式可分为同步传输和异步传输；根据信源、信宿之间不同的线路连接与信号交互方式，通信又可以分为点到点通信、点到多点通信以及多点到多点通信等。下面就这些传输方式进行简单介绍。

1. 单工传输、半双工传输和全双工传输

如果通信仅在两点之间进行，根据信号的传输方向与时间的关系，信号的传输方式可分为单工传输、半双工传输和全双工传输三类。

(1) 单工传输

信号只能单方向传送，在任何时候都不能进行反向传输的通信方式称为单工传输，如图 1-1 (a) 所示。广播、电视系统就是典型的单工传输系统，收音机、电视机都只能接收信号，而不能向电台、电视台发送信号。

(2) 半双工传输

半双工传输方式中，信号可以在两个方向上传输，但时间上不能重叠，即通信双方不能同时既发送信号又接收信号，而只能交替进行。即同一时间内一方不允许向两个方向传送，即只能有一个发送方，一个接收方，如对讲机。这种方式使用的是双向信道，如图 1-1 (b) 所示。

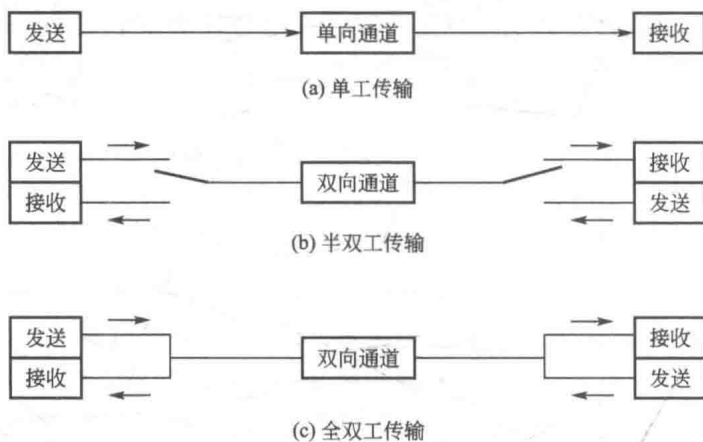


图 1-1 两点之间信号的传输方式

(3) 全双工传输

全双工传输方式中，信号可以同时两个方向上传输，如图 1-1 (c) 所示。这种方案使用的也是双向信道，这种通信方式使用得最多。

2. 串行传输和并行传输

(1) 串行传输

在串行传输中，数据流的各个码元是一位接一位地在一条信道上传输的，如图 1-2 (a) 所示。对采用这种通信方式的系统而言，同步极为重要，收发双方必须要保持位同步和字同步，才能在接收端正确恢复原始信息。串行传输中，收发双方只需要一条传输通道。因此，该传输方式实现容易，也是实际系统中比较常用的一种传输方式。

(2) 并行传输

并行传输中，构成一个编码的所有码元都是同时传送的，码组中的每一位都单独使用一

条通道,如图 1-2 (b)所示。并行传输通常用于现场通信或计算机与外设之间的数据传输。

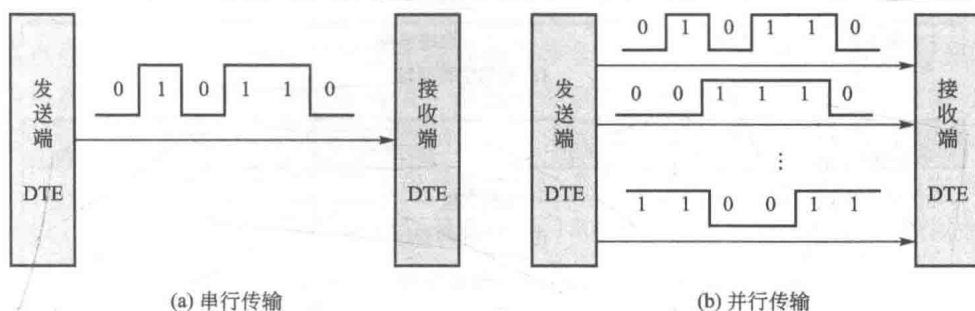


图 1-2 串行传输和并行传输

3. 同步传输和异步传输

根据信息传输过程中,收、发两端的同步与否,可将信号的传输方式分为同步传输和异步传输两类。

(1) 异步传输

异步传输每次只传送一个字符,用起始位和停止位来指示被传输字符的开始和结束。在异步传输中,字符的传输由起始位(如逻辑电平 1)引导,占一位码元时间。在每个传送的信息码之后加一个停止位(如逻辑电平 0),表示一个字符的结束,通常取停止位的宽度为 1、1.5 或 2 位码元宽度,可根据不同的需要选择。如图 1-3 所示。

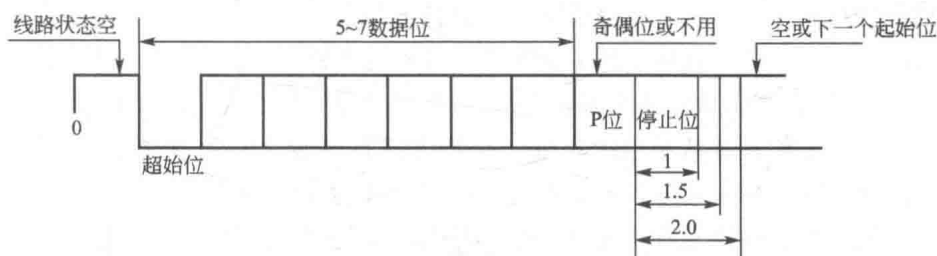


图 1-3 异步传输

异步传输将比特分成小组进行传送,小组可以是 8 位的 1 个字符或更长。发送方可以在任何时刻发送这些比特组,而接收方从不知道它们会在什么时候到达。一个常见的例子是计算机键盘与主机的通信。按下一个字母键、数字键或特殊字符键,就发送一个 8 位的 ASCII 代码。键盘可以在任何时刻发送代码,这取决于用户的输入速度,内部的硬件必须能够在任何时刻接收一个键入的字符。

(2) 同步传输

同步传输不是以一个字符而是以一个数据块为单位进行信息传输的。为了使接收方能准确地确定每个数据块的开始和结束,需在数据块的前面加上一个前文(Preamble),表示传输数据块的开始;在数据块的后面再加上一个后文(Postamble),表示数据块的结束,这种加有前文和后文的一个数据块称为一帧(Frame),如图 1-4 所示。

同步传输方式中发送方和接收方的时钟是统一的、字符与字符间的传输是同步无间隔的。异步传输方式并不要求发送方和接收方的时钟完全一样,字符与字符间的传输是异步的。

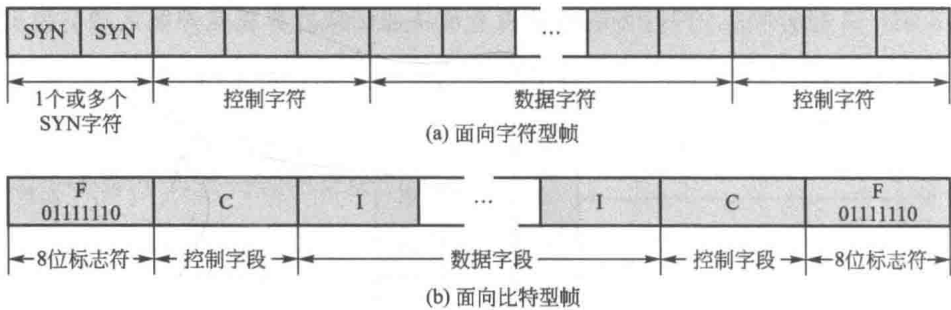


图 1-4 同步传输

同步与异步传输的区别：

- ① 异步传输是面向字符的传输，而同步传输是面向位的传输。
- ② 异步传输的单位是字符而同步传输的单位是帧。
- ③ 异步传输通过字符起止的开始和停止码抓住再同步的机会，而同步传输则是以数据中抽取同步信息。
- ④ 异步传输对时序的要求较低，同步传输往往通过特定的时钟线路协调时序。
- ⑤ 异步传输相对于同步传输效率较低。

4. 两点间直通传输、分支传输和交换传输

按照信息在通信网中的传递方式，可以将信息传输方式分为两点间直通传输、分支传输和交换传输三种，如图 1-5 所示。直通方式是通信网中最简单的一种形式，终端 A 与终端 B 之间的线路是专用的，可以直接进行信息交流。在分支方式中，它的每一个终端（如 A, B, C, …, N 等）经过同一个信道与转接站相互连接，各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系统中出现。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通信方式，既可以把要求通信的两个终端之间的线路（自动）接通，也可以通过程序控制，先把发来的消息存储起来，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于网络通信的范畴。和点到点的直通方式相比，这两种网络通信方式既存在信息控制问题，也有网同步的问题。

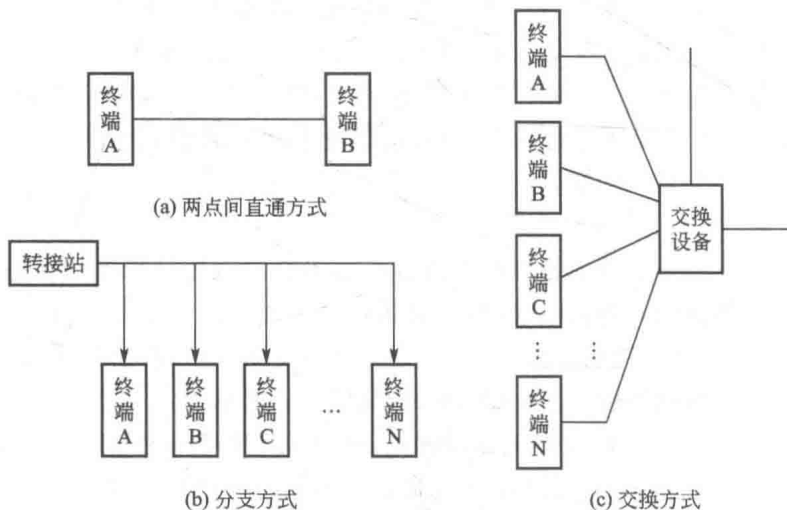


图 1-5 信息在通信网中的传递方式

1.1.3 通信的发展

人类自存在以来,为了生存从未停止过劳动和斗争,而这一过程是必须要进行思想交流和信息传递的。所以说,有人类就有通信。最初人类利用表情和动作进行信息交换,这就是最原始的通信。在漫长的生活和劳动进化中,人类创造了语言和文字,进而用它们进行消息的传递,并一直沿用至今。在电信号出现之前,人们还创造了许多种消息传递的方式,如古代的烽火台、金鼓、旌旗,航行用的信号灯等等。从1800年伏特(Volta)发明电源以来,人们就开始努力试图利用电来进行通信了。

1837年,莫尔斯(Morse)发明了有线电报;1876年,贝尔(A. G. Bell)利用电磁感应原理发明了电话机;1864年,麦克斯韦(Maxwell)预言了电磁波辐射的存在,1887年,赫兹(Hertz)通过实验加以证实;20世纪初,出现了用消息的电信号去控制高频正弦信号的振幅的调制方式;1936年,频率调制FM技术出现了;从1928年奈奎斯特(Nyquist)定理被提出;1937年瑞维斯(A. H. Reeves)发明PCM(脉冲编码调制)通信;1948年晶体管出现,贝尔实验室于1950年试制出第一台实用PCM设备;1955年皮尔斯(Pierce)提出了卫星通信的设想;1960年,人类历史上第一颗通信卫星(TELSTAR)发射成功;20世纪60年代,出现了电缆电视、激光通信、雷达、计算机网络和数字技术,光电处理技术和射电天文学飞速发展;20世纪70年代,大规模集成电路、商用卫星通信、程控数字交换机、光纤通信、微处理机迅猛发展;20世纪80年代,超大规模集成电路、移动通信、光纤通信得到广泛应用,综合业务数字网迅速崛起;1990年以后,卫星通信、移动通信和光纤通信进一步飞速发展,高清晰彩色数字电视技术不断成熟,全球定位系统(GPS)得到广泛应用。目前,有线通信、无线通信都在向传输大数据发展,一场新的通信革命即将到来,我们的生活方式也将随之而改变。

1.2 信息及其度量

1.2.1 消息和信息

消息由信源产生,它具有与信源相应的特征及属性,常见的消息有语音、文字、数据和图像消息等。不同的信源要求有不同的通信系统与之对应,从而形成了多种多样的通信系统,如电话通信系统、图像通信系统等。信息是抽象的消息,一般是用数据来表示的。表示信息的数据通常都要经过适当的变换和处理,变成适合在信道上传输的信号(电或光信号)才可以传输。可以说,信号是信息的一种电磁表示方法,它利用某种可以被感知的物理参量(如电压、电流、光波强度或频率等)来携带信息,即信号是信息的载体。

1.2.2 信号

信号一般以时间为自变量,以表示信息的某个参量(如电信号的振幅、频率或相位等)为因变量。根据信号的因变量的取值是否连续,可以分为模拟信号和数字信号。模拟信号就是因变量完全连续地随信息的变化而变化的信号,其自变量可以是连续的,也可以是离散的,但因变量一定是连续的。电视图像信号、语音信号、温度压力传感器的输出信号及许多遥感遥测信号等都是模拟信号;脉冲幅度调制信号(PAM)、脉冲相位调制信号(PPM)以及脉冲宽度调制信号(PWM)等也属于模拟信号。这两类信号的差异只是在于它们的自变量取值

连续与否。模拟信号的特点是信号的强度(如电压或电流)取值随时间而发生连续的变化,数字信号是指信号的因变量和自变量取值都是离散的信号。由于因变量离散取值,其状态数量即强度的取值个数必然有限,故通常又把数字信号称为离散信号。

由于模拟信号与数字信号物理特性不同,它们对信号传输通路的要求及其各自的信号传输处理过程也各不相同,但两者之间在一定条件下也可以相互转化。模拟信号可以通过抽样、编码等处理过程变成数字信号,而数字信号也可以通过解码、平滑处理后作为模拟信号输出。

1.2.3 信息量

前文已指出,信号是消息的载体,而信息则是其内涵。任何信源产生的输出都是随机的,也就是说,信源输出是用统计方法来定性的。对接收者来说,只有消息中不确定的内容才构成信息;否则,信源输出已确切知晓,就没有必要再传输它了。因此,信息含量就是对消息中这种不确定性的度量。首先,让我们从常识的角度来感觉三条消息:①太阳从东方升起;②太阳比往日大两倍;③太阳将从西方升起。第一条几乎没有带来任何信息,第二条带来了大量信息,第三条带来的信息多于第二条。究其原因,第一个事件是一个必然事件,人们不足为奇;第三个事件几乎不可能发生,它使人感到惊奇和意外,也就是说,它带来更多的信息。因此,信息含量是与惊奇这一因素相关联的,这是不确定性或不可预测性的结果。越是不可预测的事件,越会使人感到惊奇,带来的信息量越大。

根据概率论知识,事件的不确定性可用事件出现的概率来描述。可能性越小,概率越小;反之,概率越大。因此,消息中包含的信息量与消息发生的概率密切相关。消息出现的概率越小,消息中包含的信息量就越大。假设 $P(x)$ 是一个消息发生的概率, I 是从该消息获悉的信息,根据上面的认知,显然 I 与 $P(x)$ 之间的关系反映为如下规律:

(1) 信息量是概率的函数,即 $I=f[P(x)]$ 。

(2) $P(x)$ 越小, I 越大;反之, I 越小,且

$$P(x) \rightarrow 1 \text{ 时, } I \rightarrow 0; P(x) \rightarrow 0 \text{ 时, } I \rightarrow +\infty。$$

(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之和,也就是说,信息具有相加性,即

$$I[P(x_1)P(x_2)\cdots]=I[P(x_1)]+I[P(x_2)]+\cdots$$

综上所述,信息量 I 与消息出现的概率 $P(x)$ 之间的关系应为

$$I=\log_a \frac{1}{P(x)}=-\log_a P(x) \quad (1.2-1)$$

信息量的单位与对数底数 a 有关。 $a=2$ 时,信息量的单位为比特(bit); $a=e$ 时,信息量的单位为奈特(nit); $a=10$ 时,信息量的单位为十进制单位,叫哈特莱。目前广泛使用的单位为比特。下面举例说明信息量的对数度量是一种合理的度量方法。例如:设二进制离散信源,以相等的概率发送数字 0 或 1,则信源每个输出的信息含量为

$$I(0)=I(1)=-\log_2 \frac{1}{2}=1(\text{bit}) \quad (1.2-2)$$

可见,传送等概率的二进制波形之一($P=1/2$)的信息量为 1 bit。同理,传送等概率的四进制波形之一($P=1/4$)的信息量为 2 bit,这时每一个四进制波形需要用 2 个二进制脉冲表示;传送等概率的八进制波形之一($P=1/8$)的信息量为 3 bit,这时至少需要 3 个二进制脉冲。

综上所述,对于离散信源, M 个波形等概率($P=1/M$)发送,且每一个波形的出现是独立的,即信源是无记忆的,则传送 M 进制波形之一的信息量为

$$I = -\log_2 \frac{1}{M} = \log_2 M (\text{bit}) \quad (1.2-3)$$

式中: P 为每一个波形出现的概率; M 为传送的波形数。若 M 是 2 的整数幂,比如 $M=2^k$ ($k=1,2,3,\dots$),则式(1.2-3)可改写为

$$I = \log_2 2^k = k (\text{bit}) \quad (1.2-4)$$

式中, k 是二进制脉冲数目,也就是说,传送每一个 $M(M=2^k)$ 进制波形的信息量就等于用二进制脉冲表示该波形所需的脉冲数目 k 。如果是非等概情况,设离散信源是一个由 n 个符号组成的符号集,其中每个符号 x_i ($i=1,2,3,\dots,n$) 出现的概率为 $P(x_i)$,则 x_1, x_2, \dots, x_n 所包含的信息量分别为 $-\log_2 P(x_1), -\log_2 P(x_2), \dots, -\log_2 P(x_n)$ 。于是,每个符号所含信息量的统计平均值,即平均信息量为

$$\begin{aligned} H(x) &= P(x_1)[-\log_2 P(x_1)] + P(x_2)[-\log_2 P(x_2)] + \dots + P(x_n)[-\log_2 P(x_n)] \\ &= -\sum_{i=1}^n P(x_i) \log_2 P(x_i) (\text{bit/符号}) \end{aligned} \quad (1.2-5)$$

由于 H 同热力学中的熵形式一样,故通常又称它为信息源的熵,其单位为 bit/符号。显然,当信源中每个符号等概独立出现时,此时信源的熵有最大值。可见,这种算法的结果有一定误差,但当消息很长时,用熵的概念来计算比较方便。而且随着消息序列长度的增加,这种计算误差将趋于零。以上我们介绍了离散消息所含信息量的度量方法。对于连续消息,信息论中有一个重要结论,就是任何形式的待传信息都可以用二进制形式表示而不丢失主要内容。抽样定理告诉我们:一个频带受限的连续信号,可以用每秒一定数目的抽样值代替。而每个抽样值可以用若干个二进制脉冲序列来表示。因此,以上信息量的定义和计算同样适用于连续信号。

1.3 通信系统

1.3.1 通信系统的基本模型

尽管通信系统种类繁多、形式各异,但其实质都是完成从一端到另一端的信息传递或交换。因此,可以把通信系统概括为一个统一的模型,如图 1-6 所示,即通信系统包括信源、变换器、信道、反变换器、信宿和噪声源六个部分,如图 1-6 所示。



图 1-6 通信系统的基本模型

1. 模拟通信系统

信源发出的消息经变换器变换处理后,送往信道上传输的是模拟信号的通信系统就称为模拟通信系统。图 1-7 所示是根据早期模拟电话通信系统结构画出的模拟通信系统模型。

图中的送话器和受话器相当于变换器和反变换器,分别完成语音/电信号和电信号/语音的转换,使通话双方的话音信号得以以电信号的形式传送,不再受到距离的约束和限制。

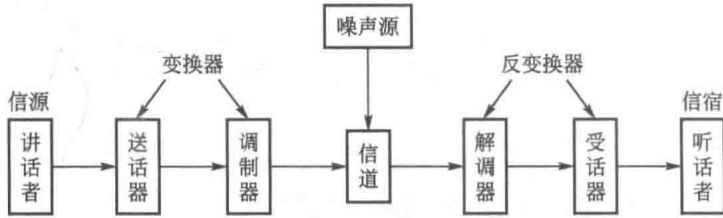


图 1-7 模拟通信系统模型

2. 数字通信系统

信源发出的信息经变换处理后,送往信道上传输的是数字信号的通信系统就是数字通信系统,即传送和处理数字信号的系统就是数字通信系统,图 1-8 所示为根据数字电话传输系统的结构画出的数字通信系统模型。

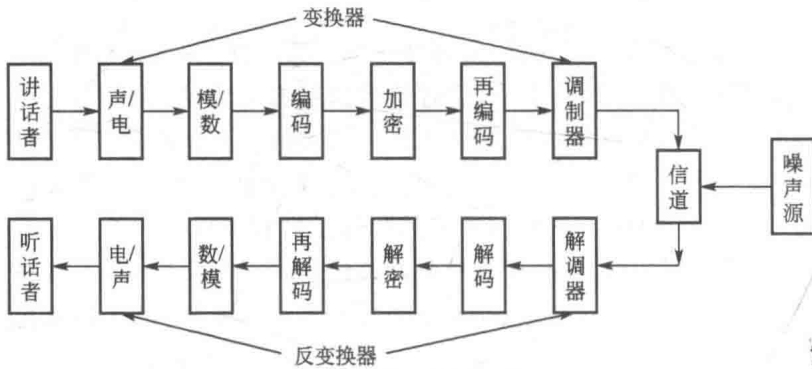


图 1-8 数字通信系统模型

1.3.2 通信系统分类

1. 按通信业务分类

按通信业务分,通信系统有话务通信和非话务通信。电话业务在电信领域中一直占主导地位,它属于人与人之间最基本的通信。近年来,非话务通信发展迅速,非话务通信主要是分组数据业务、计算机通信、数据库检索、电子信箱、电子数据交换、传真存储转发、可视图文及会议电视、图像通信等。由于电话通信最为发达,因而其他通信常常借助于公共的电话通信系统进行。未来的综合业务数字通信网中各种用途的消息都能在一个统一的通信网中传输。此外,还有遥测、遥控、遥信和遥调等控制通信业务。

2. 按调制方式分类

根据是否采用调制,可将通信系统分为基带传输和频带(调制)传输。基带传输是将未经调制的信号直接传送,如音频市内电话。频带传输是对各种信号调制后传输的总称。调制方式很多,表 1-1 列出了一些常见的调制方式。

表 1-1 常见的调制方式

调制方式		用 途	
连续波调制	线性调制	常规双边带调制	广播
		抑制载波双边带调幅	立体声广播
		单边带调幅 SSB	载波通信、无线电台、数传
		残留边带调幅 VSB	电视广播、数传、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
相位键控		数据传输	
脉冲数字调制	数字调制	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	

3. 按信号特征分类

按照信道中所传输的是模拟信号还是数字信号,相应地把通信系统分成模拟通信系统和数字通信系统。

4. 按传输媒质分类

按传输媒质分,通信系统可分为有线通信系统和无线通信系统两大类。有线通信是用导线(如架空明线、同轴电缆、光导纤维、波导等)作为传输媒质完成通信的,如市内电话、有线电视、海底电缆通信等。无线通信是依靠电磁波在空间传播达到传递消息目的的,如短波电离层传播、微波视距传播、卫星中继等。

5. 按工作波段分类

按通信设备的工作频率不同可分为长波通信、中波通信、短波通信、远红外线通信等。表 1-2 列出了通信使用的频段、常用的传输媒质及主要用途。

表 1-2 通信波段与常用传输媒质

频率范围	波 长	符 号	传 输 媒 质	用 途
3 Hz~30 kHz	$10^4 \sim 10^8$ 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	$10^3 \sim 10^4$ m	低频 LF	有线线对长波无线电	导航、信标、电力线通信