

通信系统与原理

郑学峰 敖卫东 主编



湖北科学技术出版社

高等院校“十二五”规划教材

通信系统与原理

本书编委会

主	编:	郑学峰	敖卫东		
副	主	编:	陆渊章	化雪荟	王 瑾 李向莉
			李 博	赵 青	王 聪 李在林
			张海波	孔繁庭	张立中 张伟龙
参编人员:		杨 嘉	刘传辉		

湖北科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

通信系统与原理/郑学峰,敖卫东主编. —武汉:
湖北科学技术出版社, 2013. 5
高等院校“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5352-5709-3
I. ①通… II. ①郑… ②敖… III. ①通信系统—
高等职业教育—教材 ②通信原理—高等职业教育—教材
IV. ①TN914②TN911

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 091617 号

责任编辑:谭 天

封面设计:刘杰 罗琴

策 划:北京每文鸿泰科技发展有限公司

出版发行:湖北科学技术出版社

电话:010—89542259

地 址:武汉市雄楚大街 268 号
(湖北出版文化城 B 座 13—14 层)

邮编:430070

网 址:<http://www.hbstp.com.cn>

印 刷:北京市全海印刷厂

邮编:101300

787mm×1092mm

1/16

13 印张

250 千字

2013 年 6 月第 1 版

2013 年 6 月第 1 次印刷

定价:42.00 元

版权所有,翻印必究。本书如有印装问题,可找发行部门更换。联系电话:13811492386

前 言

本书遵循教育部关于高等职业技术教育应适当减少理论教育深度、强化实际动手能力训练、培养新一代综合应用型人才的精神,参考教育部关于高等职业技术学院通信专业的教学大纲编写而成的。

本书在内容选取、章节顺序安排以及编写方面,具有如下几个特点。

1. 将信号与系统中的相关内容单独编写一章,作为《通信系统与原理》课程的预备知识,不再开设《信号与系统》这门先行课。

2. 充分考虑了高职学生的文化基础和学习能力,文字上力求浅显通俗,并适当增加了插图和例题,以帮助学生更好地理解教材内容。

3. 在内容选取上突出针对性和实用性,尽量避免泛泛而谈的情况;教学内容尽可能体现现有通信系统中采用的新知识、新技术和新方法。

4. 在教学内容和思考练习中,突出基本概念和性质的理解与掌握,系统地培养学生科学的思维方法和独立学习能力。

本书极力淡化枯燥的理论分析,尽量结合实际通信系统进行原理阐述,并配有大量的插图说明,浅显易懂。各章配有丰富的深浅适度的思考和练习题,书末配有各章练习答案供读者参考,有效帮助学生巩固所学知识。本书作为校内教材已连续使用4届,使用本书的学生和授课教师反映良好。本书既可作为高职通信、电子和网络类专业的授课教材,也可作为相关工程技术人员的参考书籍。

限于编者水平,书中疏漏甚至错误之处在所难免,欢迎各位读者批评指正。

编 者

2013 年 2 月

目 录

第1章 通信系统概论	1
1.1 通信的定义及通信的方式	1
1.2 通信系统模型	3
1.3 信息的度量	4
1.4 通信系统的主要性能指标	8
第2章 信号分析基础	11
2.1 信号的时域特性	11
2.2 信号的频域特性	21
2.3 信号通过线性系统	27
第3章 信道与噪声	36
3.1 传输信道	36
3.2 信道容量	41
3.3 随机过程	42
3.4 高斯噪声和白噪声	49
3.5 窄带噪声	53
3.6 语声信号的功率谱和听觉频率特性	55
第4章 模拟调制系统	59
4.1 幅度调制	59
4.2 幅度调制信号的抗噪声性能	66
4.3 角度调制	69
4.4 角度调制系统的噪声	78
4.5 频分多路复用(FDM)	83
4.6 模拟通信系统的应用	84
第5章 模拟信号的数字传输	91
5.1 引 言	91
5.2 模拟信号的取样	91
5.3 取样值信号的幅度量化	95

5.4	脉冲编码调制(PCM)	102
5.5	增量调制(ΔM)	105
5.6	时分复用(TDM)和多路数字电话系统	109
第6章	差错控制编码	116
6.1	差错控制的编码方式	116
6.2	差错控制编码的基本概念	117
6.3	几种简单的差错控制编码	120
第7章	数字信号的基带传输	126
7.1	数字基带信号的波形及其频域特性	126
7.2	基带传输的常用码型	129
7.3	无码间串扰的基带传输系统	133
7.4	无码间串扰基带传输系统的误码率	140
7.5	扰码和解扰	146
7.6	眼图	151
第8章	数字信号的频带传输	156
8.1	二进制幅度键控(2ASK)	156
8.2	二进制频移键控(2FSK)	158
8.3	二进制相移键控(2PSK)	161
8.4	改进型数字调制	166
8.5	数字调制系统的性能	172
第9章	数字复接与同步技术	176
9.1	数字复接	176
9.2	数字复接的码速变换	177
9.3	同步复接与异步复接	178
9.4	载波同步	181
9.5	位同步	187
9.6	帧同步	193
9.7	网同步	195
附录一		198
附录二		199
参考文献		202

第 1 章 通信系统概论

本章介绍通信系统概况和通信系统的组成;给出评估通信系统的主要性能指标。

1.1 通信的定义及通信的方式

人类社会建立在信息交流的基础上,通信是推动人类社会文明、进步与发展的巨大动力。从远古时代到现代文明社会,人类社会的各种活动与通信密切相关,特别是当今世界已进入信息时代,通信已渗透到社会各个领域,通信产品随处可见。通信已成为现代文明的标志之一,对人们日常生活和社会活动及发展起着日益重要的作用。

1.1.1 通信的定义

通信是指消息的传递和交换,即互通信息。自 1876 年贝尔发明电话和 1888 年莫尔斯发明了有线电报以来,通信步入了利用“电”来传送消息的电气通信时代。尤其是近 40 年来的发展,通信传送的消息不仅有语音、符号,而且还有文字、数据、图像等各种类型。当前,用来传送消息的通信形式有电缆通信、移动通信、微波接力通信、卫星通信、光纤通信和计算机通信等。移动通信、卫星通信、光纤通信和计算机通信组成了现代通信。

1.1.2 通信的方式

1. 电话通信

自贝尔发明电话以来,经过 100 多年的发展,电话通信已成为人们日常生活中不可缺少的通信工具。我国第一个电话交换机开通于 1882 年,经过 100 多年的发展,我国电信事业发生了翻天覆地的变化。目前已建成的固定电话网位居世界第二。过去,电话用户到交换机的连接都是用电话电缆,因此又称电缆通信。随着光纤通信的发展,光纤已逐渐替代铜质电缆。

2. 光纤通信

光纤通信是以光纤作为传输介质的通信系统。1960 年梅爱发明了红宝石激光器,1966 年高锟博士提出了以带有包层材料的石英玻璃纤维进行远距离激光通信的设想,受到世界各国的极大重视。以此为目标,1976 年全球第一条光纤通信实验系统在美国亚特兰大建成,1980 年在苏格兰西海岸敷设了第一条海底光缆,从此,光纤通信得到了迅速发展。例如,在长途干线和市话中继线中,光纤已成为主要的传输手段,海底光缆代替了海底同轴电缆。同时,光纤传输在局域网、宽带综合业务数字网和移动通信蜂窝网中得到广泛应用。

光纤通信能得到如此迅猛的发展,主要原因有:第一,光纤传输衰减小、体积小、重量轻;第二,频带宽、容量大;第三,利用光纤作为传输介质,不受外界电磁波干扰。我国从 20 世纪 70 年代初开始光纤通信的研究,到 80 年代末,光纤通信的关键技术已达到国际先进水平。目前,我国建成了东西南北纵横交错的格状型光纤通信网,同时建成了中日、中韩以及亚欧等多条陆地、海底光缆,大大拓宽了国际通信传输通道。

3. 卫星通信

卫星通信是利用人造地球卫星作为中继站转发无线电波,在地球表面设置的无线电通



信站之间进行通信。由于卫星通信具有通信覆盖区域大、通信距离远、通信容量大、通信质量和可靠性高等优点,自 1957 年第一颗人造卫星发射成功和 1965 年国际卫星组织发射第一颗商用静止通信卫星以来,卫星通信得到迅速发展。目前,地球上空同步轨道上运行的同步卫星已达 140 多颗,利用卫星通信的国家和地区多达 180 余个,全球各地有近 20 万座卫星通信地面站以及数百万卫星接收站。

我国从 1972 年租用国际卫星 4 号,引进国外设备,先后建立 4 座大型地面站,首次开展商业性的国际卫星通信业务。1985 年开始发展国内卫星通信,先后成功发射了东方红系列多频通信卫星。同时为了满足用户的需要,国内组建的卫星公司与国外合作或购买国外通信卫星在国内发射,以解决空间资源的紧张。

4. 移动通信

移动通信是通信双方至少有一方在运行中进行信息交换的通信方式。由于移动通信中有一方是运动的,所以具有通信灵活机动,需求量大,用户多和应用范围广等特点。

早期移动通信受到条件限制,移动电台的重量和体积不能满足个人用户携带方便的要求,公众陆地移动通信发展速度并不很快。这一时期移动通信多数应用于特殊部门。

20 世纪 70 年代中期开始,随着大规模集成电路技术和计算机技术的迅速发展,解决了困扰移动通信终端小型化和系统设计等关键问题,移动通信系统进入了蓬勃发展阶段。1978 年美国贝尔公司开发了小区大容量制式,这是一种模拟蜂窝移动通信系统。1991 年以后,欧洲推出的数字蜂窝移动通信系统投入商用。最近十几年,世界各国对发展移动通信表现出极大的热情,纷纷增加投资。使得信息设备制造业和服务业增长率在国民生产总值中明显增长。目前,全球移动电话使用人数估计近 8 亿人,这使得移动通信展现出无比诱人的前景。

我国于 20 世纪 80 年代开始发展公众陆地移动通信。在 1987 年,我国第一个模拟移动电话系统开通并投入商用,1993 年第一个全数字移动电话系统建成开通。目前,我国移动电话用户数已达 11 亿,固定电话用户数达 2.8 亿,用户总数达 13.8 亿,早已跃居世界首位。

最近掀起的个人通信是移动通信的最高境界,它依靠低轨道卫星通信系统实现全球通信。建立个人通信网已成为通信网进一步发展的目标。个人通信网的最终要求是全能的个人化通信,就是为移动中的个人用户提供全球范围内的电话和非话业务,实现任何一个人(Whoever)在任何时间(Whenever)向任何地点(Wherever)的任何另一个人(Whomever)传输任何形式内容的信息(Whatever)。

5. 计算机通信

计算机通信是计算机技术和通信技术紧密结合的一种通信方式。它可以对地理位置分散的计算机进行集中管理与控制,可以共享计算机系统的硬件、软件和数据。20 世纪 60 年代末,美国 ARPA 计算机网络的诞生,首次实现了位于不同地点、不同种类的计算机与计算机的通信和资源共享,是计算机通信网络技术发展的里程碑。20 世纪 70 年代中期计算机网络与分布处理技术获得了迅速发展。80 年代末研究开发了网络传输介质的光纤化、智能化和多媒体网络及宽带综合业务数字网。

目前,因特网(Internet)是世界最大的计算机网络,它将 180 多个国家和地区的成千上万个不同类型的计算机网连接,进行通信和资源共享。它不仅能传输数据,而且可以传递语言、文字和图像等信息。

我国于 1990 年建成中国科技网,1994 年 4 月与国际互联网连接,并先后建立了中国公共互联网、中国教育科研网和中国金桥网等。

1.2 通信系统模型

通信系统是由完成通信任务的各种技术设备和传输介质构成的总体。通信的对象有语言、文字、数据和图像等不同类型,通信系统完成传递上述各类信息的任务,可以采用各种不同的通信方式。下面按照通信的目的和传输信号的性质,对典型通信系统的各个组成部分进行分析。

1.2.1 通信系统的组成

图 1-1 是一个高度概括的通信系统模型,下面介绍图中各个方框的含义。

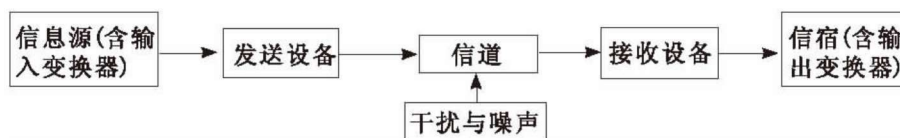


图 1-1 通信系统模型

信息源:简称信源(含输入变换器),是生产传送消息的源。例如,人类活动的语言、电视图像、电报报文或计算机数据等。信源发出消息的形式,可以是连续的,也可以是离散的。如果信源输出的消息是非电的,必须通过输入变换器把它转变为电信号。例如,电话通话时,话机就是变换器,由变换器输出的信号称为信息信号或者基带信号,基带信号是指未经调制变换的信号。话机输出的基带信号的频率通常限制在 $300\sim 3400\text{Hz}$ 。电视图像信号的频率在 $0\sim 6\text{MHz}$ 内。信号所占的频率范围,称为信号带宽。

发送设备:它的功能是把消息信号经过处理变换后送入信道。有时也可以由输入变换器把信号直接送入信道传输,这种传输称为基带传输。基带信号的处理变换包括信号的放大、滤波和调制,其中最重要的是调制。调制是把基带信号的频谱搬移到一个较高的频谱范围内,以适应信号在信道内有效地传输。

信道:是传输各种电磁波的介质。最常见的有有线电缆,无线电传播的自由空间。目前迅速发展的光纤通信和卫星通信系统,光缆和人造卫星与地面站之间的空间也是传输信息的信道。尽管随通信模式不同,有各种类型的信道,但其共同特点是:信号经过信道传输后,波形将发生失真,并受到干扰噪声的污染。

接收设备:它的功能是从接收信号中提取所需消息信号,并把它变换到适合于输出变换器所要求的信号形式。其中解调(调制的逆变换)是最重要的。

信宿:(含输出变换器),能把基带信号转变为用户所能接受的信号形式。扬声器、电传打字机和电视机等是该变换器的实例。

1.2.2 模拟通信、数字通信和数据通信

通信所传输的消息是多样的。表示各种消息的传输信号按其特点可以分为两类。一类是模拟信号,它可以表达为时间连续函数的波形。模拟的含义是指用电参量(如电压、电流)的变化来模拟信源发出的信号。例如,话筒输出的话音信号、电视摄像机输出的图像信号都是模拟信号。另一类是数字信号,特征是在时间上和幅度上的取值都是离散型的。

1. 模拟通信

以模拟信号来传送消息的通信方式,称为模拟通信,模拟通信系统的组成与图 1-1 所

示相仿,其中发送设备主要是模拟调制器,而接收设备是相应的解调器.有关模拟调制和解调器原理的内容在第四章中讨论。

2. 数字通信与数据通信

数字通信和数据通信都是用数字信号来传送消息的。由于数字通信相对于模拟通信有下列优点,因而可以将待传送的语音信号、图像、文字和符号等各种信息,经过数字化处理后,便于统一处理,有利于建立计算机通信网络。

① 数字信号便于产生、存储和交换,也便于计算机连接。

② 在干扰情况下,数字信号易于检测,且可在中继站再生信号,消除传输中波形误差的累积。

③ 便于实现干扰和保密编码,提高通信的可靠性和保密性。

④ 便于电路集成化,也易于利用现代固体器件和计算技术的研究成果。

图 1-2 表示一个数字通信系统模型。它与图 1-1 的区别是增加了信源编码、信源译码、信道编码及信道译码,并且调制器和解调器都是采用数字调制和解调技术。

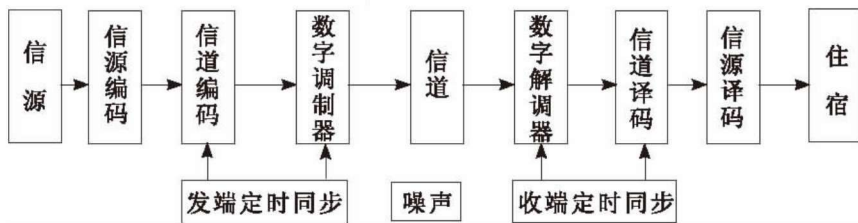


图 1-2 数字通信系统模型

信源编码的作用是降低信息的多余度,目的是减少码元数目,降低码元速率。多余度就是信息码流经过信源编码后,减少不必要的码元,并在信源译码时,仍能恢复和辨认。另一方面,如果信源输出的是模拟信号,信源编码将其取样、量化和编码后,转换为数字信号,称为模/数变换(A/D 变换)。

信道编码又称为差错控制编码(或称纠错编码),作用是在信源编码输出的码流中,人为地按一定规则加入多余码元,以便在接收端信道译码时,发现错码或者纠正错码,从而提高通信的可靠性。

对于一个具体的数字通信系统,信道编译码视需要而用,并不是所有数字通信系统都必须设置。当然,有些通信系统需要附加保密,这时,在系统的发送和接收端,应分别加设加密器和解密器装置。此外,在任何数字通信系统中,同步系统是必不可少的,图 1-2 中已画出。

数字通信与数据通信习惯上的区分方法是:将模拟消息经数字化处理后,用数字信号的形式来传送的通信方式,称为数字通信;而把信源本身发出的数字形式的消息(如计算机或其他数字终端作为信源发出的数据、指令等),不管用何种形式的信号来传输这类消息的通信方式,均称为数据通信。

1.3 信息的度量

信息源发出的每一个消息所包含的信息是不相等的,有的消息携带信息多,有的消息包含信息少,有的甚至几乎没有什么信息。那么,每个消息携带信息的多少,各个消息之间信息量的比较,是如何来衡量呢?为了回答这些问题,先举个实际例子。

假设居住在北方的张先生计划在冬天到云南丽江去度假,为了了解当地的天气,打电话到丽江气象局询问。他可能收到如下三种预报之一:① 温和晴朗;② 天冷;③ 可能有大雪。

从这三种预报来看,第一条消息所包含的信息最少,因为,丽江的天气大部分时间是温和晴朗的。第二条消息携带的信息比第一条消息多。第三条消息所包含的信息最多,因为丽江很少下雪,下雪会使人感到意外。从这个简单例子可以看到,消息所含信息的多少与事件发生的可能性有关系。事件发生的可能性愈大,消息携带信息愈少;事件发生的可能性愈小,消息携带信息愈多。因此,消息所含信息量依赖于潜在事件的不确定性,而不是组成消息的符号数。下面运用概率的工程定义来建立信息量的概念。

1.3.1 信息和信息量

概率论告诉我们,事件的不确定程度,可以用其出现的概率来描述。亦即事件出现的可能性越小,则概率就越小;反之,则概率就越大。消息中包含的信息量与消息发生的概率紧密相关,消息出现的概率越小,则消息中包括的信息量就越大。如果事件是必然的(概率为1),则它传递的信息量为零;如果事件是不可能的(概率为0),则它将有无穷的信息量。如果得到的不是由一个而是由若干个独立事件构成的消息,那么,这时得到的总的信息量,就是若干个独立事件的信息量的总和。

综上所述可以看出,为了计算信息量,消息中所含的信息量 I 与消息出现的概率 $P(x)$ 间的关系式应当反应如下规律:

- ① 消息中所含的信息量 I 是出现该消息的概率 $P(x)$ 的函数,即

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

- ② 消息的出现概率越小,它所含信息量越大;反之信息量越小,且当 $P(x) = 1$ 时, $I = 0$ 。

- 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

$$I[P(x_1)P(x_2)\cdots] = I[P(x_1)] + I[P(x_2)] + \cdots \quad (1-2)$$

不难看出,若 I 与 $P(x)$ 间的关系式为

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

就可满足上述要求。

信息量的单位的确定取决于上式中对数底 a 的确定。如果取对数的底为2,则信息量的单位为比特(bit);如果取 e 为对数的底,则信息量的单位为奈特(nat);若取10为底,则信息量的单位称为十进制单位,或叫哈特莱。上述三种单位的使用场合,应根据计算及使用的方便来决定。通常使用的单位为比特。

下面讨论等概率出现的离散消息的度量。若须要传递的离散消息是在 M 个消息之中独立的选择其一,且认为每一消息的出现概率是相同的。显然,为了传递一个消息,只需采用一个 M 进制的波形来传送。也就是说,传送 M 个消息之一这样一件事与传送 M 进制波形之一是完全等价的。 M 进制中最简单的情况是 $M = 2$,即二进制,而且,任意一个 M 进制波形总可用若干个二进制波形来表示。因此,用“ $M = 2$ ”时的波形定义信息量是恰当的。定义传送两个等概率的二进制波形之一的信息量为1,单位为“比特”。该定义就意味着式(1-3)变为

$$I = \log_2 \frac{1}{1/2} = \log_2 2 = 1 \text{ bit} \quad (1-4)$$

这里选择的对数是以2为底,在数学运算上这也是方便的。同时,在数字通信中,由于常以二进制传输方式为主,因而这也是恰当的。按式(1-3)的定义,对于 $M > 2$,则传送每



一波形的信息量应为

$$I = \log_2 \frac{1}{1/M} = \log_2 M \text{ bit} \quad (1-5)$$

若 M 是 2 的整数次幂, 比如 $M = 2^K$ ($K=1, 2, 3, \dots$), 则式(1-5)可改写成

$$I = \log_2 2^K = K \text{ bit} \quad (1-6)$$

式(1-6)表明, M ($M=2^K$) 进制的每一波形包含的信息量, 恰好是二进制每一波形包含信息量的 K 倍。由于 K 就是每一个 M 进制波形用二进制波形表示时所需的波形数目, 故传送每一个 M ($M=2^K$) 进制波形的信息量就等于用二进制波形表示该波形所需的波形数目 K 。

综上所述, 只要在接收者看来每一传送波形是独立等概率出现的 ($P = \frac{1}{M}$), 则一个波形所能传送的信息量为

$$I = \log_2 \frac{1}{P} \text{ bit} \quad (1-7)$$

或

$$I = \log_2 M \text{ bit} \quad (1-8)$$

式中: M ——传送的波形数;

P ——每一波形出现的概率。

以上是单一符号出现时的信息量。对于由一串符号构成的消息, 假设各符号的出现相互统计独立, 即离散信源为包含 N 种符号 $x_1, x_2, \dots, x_N$ 的集合, 每个符号出现的概率分别为 $P(x_1), P(x_2), \dots, P(x_N)$, 那么可以用概率场

$$\begin{bmatrix} x_1, & x_2, & \dots, & x_N, \\ P(x_1), & P(x_2), & \dots, & P(x_N), \end{bmatrix} \quad \sum_{i=1}^N P(x_i) = 1 \quad (1-9)$$

来描述离散信源, 则根据信息相加性概念, 整个消息的信息量

$$I = - \sum_{i=1}^N n_i \log_2 P(x_i) \quad (1-10)$$

【例 1-1】某离散信源由 0, 1, 2, 3, 四种符号组成, 其概率场为

$$\begin{bmatrix} 0, & 3/8, & 1, & 1/4, \\ 2, & 1/4, & 3, & 1/8, \end{bmatrix}$$

求信息 201020130213001203210100321010023102002010312032100121002 的信息量。

解: 此消息总长为 57 个符号, 其中 0 出现 23 次, 1 出现 14 次, 2 出现 13 次, 3 出现 7 次。由式(1-10), 可求得此消息的信息量

$$\begin{aligned} I &= - \sum_{i=1}^4 n_i \log_2 P(x_i) = -23 \log_2 \frac{3}{8} - 14 \log_2 \frac{1}{4} - 13 \log_2 \frac{1}{4} - 7 \log_2 \frac{1}{8} \\ &= (33.55 + 28 + 26 + 21) = 108.55 \text{ (bit)} \end{aligned}$$

1.3.2 平均信息量

信源随机选送符号 S_j , 接收端准确识别信号后, 收到信息量 $I(S_j)$ 。而在设计通信系统中, 是要知道信源发出多少信息量, 信道传送多少信息量, 而不是某个特定消息的信息量, 因而有必要讨论平均信息量。

设信息源发出有限个符号 $s_1, s_2, \dots, s_n$ (共 n 个), 它们组成的输出序列前后符号之间相互统计独立, 即某个符号出现的概率完全不受前面出现什么符号的影响。 $p_1, p_2, \dots, p_n$ 分别为 n 个符号出现的概率。现在来分析信源发出一串 N 个 ($N > n$) 符号组成的消息, 其

中符号 s_1 发生 $p_1 N$ 次,符号 s_2 发生 $p_2 N$ 次,符号 s_i 发生 $p_i N$ 次。可以把一个符号认为是一个消息,第 i 个符号的信息量是 $\log_2(1/p_i)$ bit。由于在 N 个符号序列中 s_i 发生 $p_i N$ 次,因此 $p_i N$ 个 s_i 符号的信息量为 $p_i N \log_2(1/p_i)$ bit。信源发出 N 个符号的总信息量就是每个符号信息量之和,可以表示为

$$I_t = \sum_{i=1}^n N p_i \log_2(1/p_i) \text{ bit}$$

则平均信息量为

$$H = \frac{I_t}{N} = \sum_{i=1}^n p_i \log_2(1/p_i) = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i \quad \text{bit/Symbol} \quad (1-11)$$

平均信息量的表达式(1-11)表示每个符号平均携带的信息量,与热力学和统计力学中关于系统熵的公式相同,因此也把信源输出的平均信息量称为信源的熵。

【例 1-2】信源有三个符号 A 、 B 、 C ,符号间相互统计独立,概率分别为 $\frac{1}{2}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}$,求信源的熵。

解:给定 $s_1 = A, s_2 = B, s_3 = C$

$$p_1 = \frac{1}{2}, p_2 = p_3 = \frac{1}{4},$$

根据式(1-7)

$$I(s_1) = \log_2 \frac{1}{p_1} = \log_2 2 = 1 \text{ bit}$$

$$I(s_2) = \log_2 \frac{1}{p_2} = \log_2 4 = 2 \text{ bit}$$

$$I(s_3) = \log_2 \frac{1}{p_3} = \log_2 4 = 2 \text{ bit}$$

信源熵(或平均信息量)根据式(1-11)为

$$\begin{aligned} H &= p_1 \log_2 \frac{1}{p_1} + p_2 \log_2 \frac{1}{p_2} + p_3 \log_2 \frac{1}{p_3} \\ &= \frac{1}{2} \times 1 + \frac{1}{4} \times 2 + \frac{1}{4} \times 2 = 1.5 \text{ bit/Symbol} \end{aligned}$$

【例 1-3】计算【例 1-1】中信源的平均信息量。

解:由式(1-11)得

$$H = -\frac{3}{8} \log_2 \frac{3}{8} - \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - \frac{1}{8} \log_2 \frac{1}{8} = 1.9056 \text{ bit/符号}$$

顺便指出,用上述平均信息量算得【例 1-1】中的消息量

$$I = (1.9056 \text{ bit/符号}) \times 57 \text{ 符号} = 108.62 \text{ bit}$$

这里的平均信息量计算所得是总信息量,与例 1-1 计算所得的结果并不完全相同,其原因是例 1-1 的消息序列还不够长,每个符号出现的频率与概率场中给出的概率并不相等。随着序列长度增大,其误差将趋于零。

以上讨论了离散消息的度量。同样,关于连续消息的信息量可用概率密度来描述。可以证明,连续消息的平均信息量为

$$H_1 = - \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \log_2 f(x) dx \quad (1-12)$$

式中: $f(x)$ —— 连续消息出现的概率密度。



1.4 通信系统的主要性能指标

通信系统的质量指标通常包括电气性能、工艺结构和使用维修等方面。但从传输信号角度看,质量指标主要为有效性和可靠性。通信的有效性是指传输信息的速率,即在可传输的频带内能够传输多少信息。而通信的可靠性则表示准确通信的程度。然而在设计中,有效性和可靠性这两个要求,往往互相矛盾,通常只能在满足一定可靠性的指标下,尽可能提高通信系统的有效性。

1.4.1 模拟通信系统的质量指标

1. 有效性

对模拟通信来说,信号传输的有效性通常可用有效传输频带来衡量,即在指定信道带宽内容许同时传输的最多通路数。每一路信号的有效带宽与模拟调制方式有关。在相同条件下,每路所占频带越窄,则容许同时传输的通路数越多。

2. 可靠性

模拟通信系统的可靠性通常采用接收端的输出信号平均功率和噪声平均功率之比来衡量,称为功率信噪比,简称信噪比,记作 $\frac{S}{N}$ 。

$$\frac{S}{N} = \frac{\text{信号平均功率}}{\text{噪声平均功率}} \quad (1-13)$$

在相同条件下,通信系统的输出信噪比越高,通信质量越好,互通信息越准确。例如,一般民用电话通信的 $\frac{S}{N} = 40(\text{dB})$ 时,能听清 95% 以上的讲话内容。对电视节目而言,当输出信噪比 $\left(\frac{S}{N}\right)$ 达到 40~60dB 时,才能将画面细节看清。

计量单位——分贝,信号平均功率的计量单位,在电信系统中通常应用分贝计数。这是从功率放大或衰减的运算中采用的,因为人耳感觉声音增强倍数不是直接声音功率增加的倍数,实际上,两者成对数关系。为使客观上的功率增大与人的主观感觉相一致,采用信号功率放大 10 倍作为一个单位计算。功率放大 100 倍作为两个单位计算,称为 2 个贝尔。由于以贝尔为单位计量时,单位太大,往往采用 $\frac{1}{10}$ 贝尔作为单位,称为分贝,记作 dB。分贝是描述比值的一个计量单位,它是一个以 10 为底的对数。分贝定义为

$$\text{分贝} = 10 \lg \text{功率比} \quad (1-14)$$

分贝描述的是功率比值,是一个相对单位。为了给出绝对电子定量的概念,可以引入分贝毫瓦(dBm)的定义——即对于 1 毫瓦的功率电平

$$\text{dBm 值} = 10 \lg \frac{\text{某点功率值(以毫瓦计)}}{1 \text{ 毫瓦}} \quad (1-15)$$

电信系统中,除了分贝作为计量单位外,还有奈培,记作 Np,其定义为

$$\text{奈培} = \frac{1}{2} \log_e (\text{功率比}) = \frac{1}{2} \ln (\text{功率比}) \quad (1-16)$$

分贝与奈培的换算关系式

$$1 \text{ Np} = 8.686 \text{ dB} \quad (1-17)$$

1.4.2 数字通信系统的质量指标

1. 有效性

数字通信系统的有效性可用 3 个指标来说明,即传输速率(含码元速率(符号)、信息速率和消息速率)、功率利用率和频带利用率。

(1) 传输速率

1) 码元速率(R_B)

每秒钟传送码元的个数称为码元速率。各个码元都占有均等的时间间隔,这个时间间隔称为码元长度。当码元长度为 T ,则码元速率

$$R_B = \frac{1}{T} \quad (1-18)$$

码元速率称符号速率。单位为波特(Baud),可简写为 Bd。应该注意,波特一词已经是速率单位,如果写成“波特/秒”是错误的。

2) 信息速率(R_b)

信息速率是每秒钟传送的信息量,记作 R_b ,单位为比特/秒(binary digit 简写为 bit),或写作 bit/s。

在二进制中,码元速率与信息速率在数值上相等,但它们的单位是不同的。例如,二进制数字信号的码元速率为 75Bd,则信息速率为 75bit/s。对于 M 进制,两者的数值是不相等的,信息速率与码元速率之间的关系为

$$R_b = R_B \log_2 M \quad (1-19)$$

3) 消息速率(R_m)

消息速率是单位时间(每秒)通过系统所传送的从信源发出的消息量,单位为比特/秒(bit/s)。消息速率与信息速率的关系为:

$$R_m = \alpha R_b \text{ (bit/s)} \quad (\alpha \leq 1) \quad (1-20)$$

(2) 功率利用率

数字通信系统的功率利用率用系统信噪比来描述。在保证系统传输质量(传输比特差错率小于规定值)条件下,系统所需要的最低归一化信噪比(每比特信号的能量 E_b 和噪声单边功率谱密度 N_0 的比值)定义为系统的功率利用率。

(3) 频带利用率

数字通信系统的有效性指标除了码元速率和信息速率外,还可以用频带利用率来衡量。频带利用率是指单位频带内能够传递码元的速率,即每赫兹波特数。频带利用率

$$\eta = \frac{\text{码元速率}}{\text{频带宽度}} \text{ Bd/s} \cdot \text{Hz} \quad (1-21)$$

所以,在数字通信中,当信道传送的码元速率相等条件时,多进制比二进制系统传送的信息速率高。这也是多进制方式获得广泛应用的原因之一。

2. 可靠性

数字通信系统的可靠性由差错率指标来衡量,它代表接收到的数字信号出现错误码的概率。通常有两种表示方法,即误码率 P_e 和误信率(误比特率) P_b 。另外,为了

说明系统正常工作的能力,可靠性指标还包括可靠度和中断率。



(1) 差错率

1) 误码率

$$P_e = \frac{\text{差错码元数}}{\text{传输码元总数}} \quad (1-22a)$$

2) 误信率

$$P_b = \frac{\text{错误信息的比特}}{\text{传输消息的总比特数}} \quad (1-22b)$$

二进制时, $P_b = P_e$ 。数字通信系统的质量指标通常用 R_B 和 P_e 来表示。码元速率 R_B 越大, 有效性越好; 数字信号占用带宽越宽, 则抗噪声性能越差, 即误码率越大。

误码率 P_e 越小, 通信的可靠性越高。

(2) 可靠度

可靠度是指在全部工作时间内, 系统正常工作时间所占的百分比, 记作 P_r 。

(3) 中断率

中断率是指在全部工作时间内, 系统传输中断的时间所占的百分比, 记作 ϵ 。

显然, 可靠度与中断率之间有: $\epsilon = 1 - P_r$

思考与练习

一、思考题

1. 什么是通信? 常见的通信方式有哪些?
2. 通信系统是如何分类的?
3. 何谓数字通信? 数字通信的优缺点是什么?
4. 试画出模拟通信系统的模型, 并简要说明各部分的作用。
5. 试画出数字通信系统的一般模型, 并简要说明各部分的作用。
6. 衡量通信系统的主要性能指标是什么? 对于数字通信具体用什么来表述?
7. 何谓码元速率? 何谓信息速率? 它们之间的关系如何?

二、计算题

1. 设英文字母 e 出现的概率 $P_e = 0.105$, x 出现的概率为 $P_x = 0.002$, 试求 e 和 x 的信息量各为多少?
2. 某信源的符号集由 A, B, C, D, E, F 组成, 设每个符号独立出现, 其概率分别为 $1/4, 1/4, 1/16, 1/8, 1/16, 1/4$, 试求该信息源输出符号的平均信息量 $\bar{I}$ 。
3. 设一数字传输系统传送二进制信号, 码元速率 $R_{B2} = 2400\text{B}$, 试求该系统的信息速率 $R_{B2} = ?$ 若该系统改为传送十六进制信号, 码元速率不变, 则此时的系统信息速率为多少?
4. 已知某数字传输系统传送八进制信号, 信息速率为 3600b/s , 试问码元速率为多少?
5. 已知二进制信号的信息传输速率为 4800b/s , 试问变换成四进制和八进制数字信号时的信息传输速率各为多少(码元速率不变)?
6. 已知某系统的码元速率为 3600kB , 接收端在 1h 内共收到 1295 个错误码元, 试求系统的误码率 P_e 。
7. 已知某四进制数字信号传输系统的信息速率为 2400b/s , 接收端在 0.5h 内共收到 218 个错误码元, 试计算该系统的误码率 P_e 。

第2章 信号分析基础

2.1 信号的时域特性

从前述中已知,信号与通信系统之间有着不可分割的关系。通信系统中不是直接传输信息,而是传送经过变换的电信号。信号作为待传送消息的表现形式,可以看作为运载消息的工具。因此,有必要了解信号及信号通过线性系统的特性和分析方法。

2.1.1 信号的分类

信号是用来携带信息的载体,它表现了物理量的变化。描述信号的基本方法是写出它的时间函数表达式。信号从表征时间函数参量的已知程度,可以分为确知信号和随机信号。

若信号被表示为一个确定的时间函数,对于指定的某一时刻,可确定一个相应的函数值,这种信号称为确定信号,例如,正弦信号。但是,实际传送的信号往往具有未可预知的不确定性,这种信号称为随机信号。随机信号不能给出确定的时间函数,只能用概率统计的方法来描述。在通信系统中,信道噪声就是这种类型的随机信号,这部分内容,将在第3章中讨论。

信号按不同的角度可以分为周期信号和非周期信号,连续时间信号和离散时间信号,能量信号和功率信号等。

在通信系统中,从信号的形式看,经常应用的基本信号有正弦信号、复数信号、矩形脉冲信号、单位阶跃信号、单位冲激信号、 $Sa(t)$ 信号、钟形信号等,下面分别介绍。

2.1.2 典型的连续时间信号

1. 正弦信号

正弦信号和余弦信号统称为正弦信号,一般表示为

$$f(t) = A \sin(\omega t + \theta) \quad (2-1)$$

式中: A ——信号振幅;

θ ——初相位;

ω ——角频率。

当 $\theta = \frac{\pi}{2}$ 时,即为余弦信号。正弦信号是一种周期信号,其周期 T 与角频率 ω 及频率 f 之间关系满足下式,即

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{f}$$

2. 复指数信号

复指数信号的函数表达式为

$$f(t) = Ae^{st} \quad (2-2)$$

其中, s 为一复数, $s = \sigma + j\omega$ 。利用欧拉公式

$$e^{\pm j\omega t} = \cos\omega t \pm j\sin\omega t$$