

**SHUZI TONGXIN
YUANLI**

数字通信原理

内 容 提 要

本书讲述了数字通信的基本原理和基本技术。全书共分八章,内容包括:数字通信模型及信息量概念、信源编码(主要介绍模拟信号的PCM、DM编码,其次介绍离散信源DMS编码及线性预测编码LPC)、数字信号基带系统、数字调制解调、差错控制编码、同步原理、计算机通信网络及ISDN概念和数字信号最佳接收原理。

本书叙述时,着重物理概念和基本原理,并注意理论与实际结合。本书可作为高等学校工科无线电技术、通信等专业的专业课教材和参考书,也可供通信工程技术人员和科研人员参考。

数 字 通 信 原 理

张 传 生 编

责任编辑 阎鸿森

*

西安交通大学出版社出版

(西安市咸宁路28号)

西安电子科技大学出版社印刷厂印装

陕西省新华书店发行 各地新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 14.5 字数: 348 千字

1990年3月第1版 1990年3月第1次印刷

印数: 1—2 000 册

ISBN 7-5605-0283-0/TN·12 定价: 2.95 元

前 言

本教材是根据《无线电技术与信息系统》教材编审委员会制定的《数字通信原理》课程教材编写大纲编写的。1988年12月由全国通信教材编审小组评选审定，并推荐出版。

本书是高等学校工科无线电技术专业 and 通信专业的专业教材之一，是编者吸收国内外同类教材的特点，根据多年的教学实践，并在西安交通大学“数字通信原理”讲义的基础上编写而成的。全书共分八章，主要讲述了：信源编码、数字信号基带系统、数字调制解调、差错控制编码及同步的基本原理和基本技术。第七章介绍了计算机通信网络及ISDN概念，以适应数字通信的新发展。第八章简单讲述了数字信号最佳接收原理，给出了数字通信系统的潜在性能。

本教材全部讲授约需60学时。若只讲授第一至第六章，则仅需40学时左右，但仍不失内容的系统性和完整性。

本书由聂涛教授、蹇锡钧教授和姚彦副教授担任主审。在评审会议期间责任编辑乐光新教授和主审聂涛教授对本书的修改提出了宝贵意见。在此表示真诚的感谢。

由于编者水平有限，书中难免还存在一些缺点和错误。恳请读者批评指正。

编 者 1989年10月

于西安交通大学

目 录

前言

第一章 绪 论

1.1 通信发展史.....	(1)
1.2 数字通信及数字通信模型.....	(2)
1.3 信息量、信道容量	(5)
1.4 数字通信的主要质量指标	(8)
习题	(9)

第二章 信源编码

2.1 离散无记忆信源(DMS)编码	(11)
2.2 模拟信号的脉冲编码调制(PCM).....	(14)
2.3 PCM 通信系统的组成及时分复用	(24)
2.4 集成单片 PCM 编译码器.....	(27)
2.5 PCM 系统性能	(29)
2.6 差分 PCM 编码(DPCM)	(32)
2.7 模拟信号增量编码调制 (DM).....	(33)
2.8 PCM 系统与 DM 系统的比较.....	(43)
2.9* 线性预测编码的概念	(43)
习题	(47)

第三章 数字信号基带传输系统

3.1 基带传输系统的模型.....	(50)
3.2 基带数字脉冲波形及传输码型.....	(52)
3.3 基带随机脉冲序列的功率谱.....	(60)
3.4 基带传输特性及码间串扰.....	(64)
3.5 无码间串扰传输系统及 Nyquist 准则	(65)
3.6 部分响应系统.....	(70)
3.7 基带系统的最佳化.....	(74)
3.8 基带系统的抗噪声性能.....	(77)
3.9 均衡原理.....	(80)
3.10 眼图.....	(89)
习题	(91)

第四章 数字载波调制

4.1 数字调制类型.....	(94)
4.2 振幅键控系统(ASK)	(95)
4.3 频率键控系统(FSK)	(101)
4.4 移相键控系统(PSK)	(106)
4.5 各种数字调制的性能比较.....	(112)
4.6 改进型数字调制系统.....	(114)
习题	(125)

第五章 差错控制编码

5.1 引言.....	(127)
5.2 差错控制编码的基本思想.....	(128)
5.3 纠错编码的基本原理.....	(129)
5.4 常用的简单编码.....	(133)
5.5 线性分组码.....	(135)
5.6 汉明[Hamming]码	(139)
5.7 循环码.....	(140)
5.8 卷积码简介.....	(146)
习题	(147)

第六章 同步原理

6.1 同步的基本概念.....	(148)
6.2 锁相环(PLL)的基本工作原理	(148)
6.3 载波同步.....	(156)
6.4 码元同步.....	(162)
6.5 群(帧)同步.....	(165)
6.6 数字通信网的网同步.....	(171)
习题	(174)

第七章* 计算机通信网及综合业务数字网(ISDN)简述

7.1 计算机通信网的含义.....	(176)
7.2 计算机通信网的网络结构.....	(177)
7.3 计算机网络协议及其实现.....	(181)
7.4 交换方式.....	(183)
7.5 计算机通信网的应用及发展.....	(187)
7.6 综合业务数字网(ISDN)简介.....	(188)

第八章* 数字信号最佳接收原理

- 8.1 接收端信号和干扰的统计描述..... (191)
- 8.2 最佳接收准则..... (194)
- 8.3 恒参信道下确知信号的最佳接收——相干接收..... (196)
- 8.4 随相信号的最佳接收——非相干接收..... (207)
- 8.5 实际接收机与最佳接收机的性能比较..... (215)
- 8.6 匹配滤波器的实现问题..... (217)

参考文献

有●标志的章节，为选讲内容。

第一章 绪 论

1.1 通信发展史^{[1][2]}

当今世界是由物质、能量和信息三大要素所构成。担任信息传递的通信技术的发展代表着人类社会的文明和进步。因此,从事通信方面工作的人们应该了解通信技术的过去和现在,预测未来的发展。

自人类存在以来,在生存斗争中总是要进行思想交流和消息传递。远古时代的人类用表情和动作进行信息交换,这是人类最原始的通信。在漫长的生活斗争中,人类创造了语言和文字,进而用语言和文字(书信)进行消息的传递。这种通信方式一直保留到今天。

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。这些方式,可以在较远的距离之间及时地完成消息的传递。

大约从 1800 年,伏打(Volta)发明电源以来,人们就试图用电技术进行通信。在 1837 年,莫尔斯(Morse)第一个发明了电信号的通信——有线电报通信。这种通信是利用导线中电流的有、无来区别传号和空号,并利用传号和空号的长短进行电报符号的编码。这给远距离的消息传递揭开了崭新的一页。当电磁感应现象发现后,在 1876 年贝尔(A·G·Bell)利用电磁感应原理发明了电话机。从而可以直接利用导线上电流的强弱来传送语音信号,使通信技术的发展又进了一步。这种有线电通信方式一直保留到现在。但这种有线传送消息的系统要花费很大的代价建造线路,甚至在有些情况下(如隔海洋)是难以实现的。

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,这为现代的无线电通信提供了理论根据。无线电波可以在大气媒质中传播,不需要价格昂贵的线路投资。这一理论的创立大大推动了通信技术的发展。

在实践中,人们发现正弦波易于产生和控制,所以在 20 世纪初期就出现了用代表消息的信号去控制高频正弦波振幅的调制方式。这就是最早出现的调幅制方式——AM 制。它的出现使通信打开了新局面,它不仅可以传送语音,电报,还可以传送音乐、图像等。这种 AM 通信方式使点对点通信发展到点对面的通信(如广播),它促进了人类社会文化交流、宣传教育的发展,深刻地影响着人们的生活。

调幅制传送信号容易接受噪声干扰,使信号失真,影响传信质量。1936 年,发明了抗干扰能力比 AM 制强的调频技术(FM)。FM 制不仅提高了抗干扰能力,而且大大推动了移动通信的发展。AM 和 FM 制的应用标志着本世纪 30 年代是世界上模拟通信的兴旺时期。

自从 1928 年奈奎斯特(Nyquist)定理提出到 1937 年瑞维斯(A·H·Reeves)发明了 PCM(脉冲编码调制)通信,使通信技术由频分制(FDM)发展到时分制(TDM),由模拟通信发展到数字通信。数字通信是将模拟信号数字化以后传送,进一步提高了抗干扰能力。但由于器件的限制,当时未能实现,直到晶体管出现后,1950 年贝尔实验室才造出了第一台实用的 PCM 设备。新器件的出现对通信技术起着很大的推动作用。

数字通信不仅能使人和人之间通信,而且能完成人与机器,机器与机器之间的通信和数据交换。为现代通信网奠定了良好的基础。

随着通信容量的增加和通信范围的扩大,1955年皮尔斯(Pierce)提出卫星通信的设想。在1962年发射了人类历史上第一颗通信卫星电星号(TELSTAR)。为国际通信开辟了道路。这一技术的发展与大规模集成电路(LSI)的出现有着密切的关系。集成电路的出现,使通信设备小型化,可靠性提高,它对空间通信起了促进作用。

更大容量和更加可靠的光纤通信,在60年代初已问世。在这方面,我国正在紧追世界先进水平。目前,我国的光纤通信正处于推广应用阶段。

当今社会处于“信息时代”,人们要求通信系统能够更加迅速、有效、准确、可靠地传递信息,从而充分利用社会上现有的财富和更好地发挥各种资源的效用。因此,一个综合性的信息交换网正在形成。这就是‘计算机技术、通信系统和自动化系统’构成的完整信息交换系统。全数字化的综合业务数字网(ISDN)是目前通信界所关注和研究的新动向^[3]。自80年代初,发达国家已建立了ISDN试验网。国际电报电话咨询委员会(CCITT)在有关建议中已提出了关于ISDN的概念,它指出ISDN是一个服务于语音和非语音数据通信业务的综合网。在1984年,CCITT有关组织(IEEE的802委员会)推出了I系列关于ISDN的功能、网络结构、接口及网络互联等方面的建议。可以预计ISDN是今后一、二十年世界通信网发展的必然趋向。

随着各种通信网的建立和数字通信的发展,相应的安全保密通信技术也进一步引起人们的注意。

此外,由于通信容量的增加,对频率资源的开发向着更高的频段发展(如微波接力通信已用于20GC,移动通信已达800MC等)。然而,在信源数据的处理上要求进一步压缩,提高通信的有效性。

回顾通信的发展历史,可以看到通信技术是何等年轻,而又发展得何等迅速的新技术!它仅仅100年左右的时间,从简单的通信技术发展为通信科学。这样迅速的发展其原因除了生活实际、社会要求和新器件发明的推动之外,通信理论的指导起着十分重要的作用。在本世纪四、五十年代通信理论的发展出现了高峰,过滤和预测理论、香农信息论、纠错编码理论、信号和噪声理论、调制理论及信号检测理论等使通信理论在有效性和可靠性的研究方面出现了突破。这些理论的出现使通信技术变成通信科学。尽管如此,通信目前仍不能满足人们越来越高的要求。一般说来,技术来源于科学,它推动着社会,又不断受着社会的推动而发展。电讯技术也是这样。可以预见,它将和其他科学一样正朝着更高的水平疾跑。

1.2 数字通信及数字通信模型

1.2.1 模拟通信和数字通信

通信就是传递消息。为了使消息可以在信道中传送,首先应将消息转换为可以传送的电信号。按代表消息的信号的参量取值方式,一般分为两类:一类为模拟信号,又叫连续信号,如电话机送出的语音信号,摄象机产生的图象信号等,它们的电压(或电流)波形的取值为连续的时间函数;另一类为数字信号,又称离散信号,如电报数字,雷达数据,遥控指令及计算机数据等,这种信号的取值为有限个离散值,且不是时间的连续函数。

通常我们把传送模拟信号的通信系统称为模拟通信系统,把传送数字信号的通信系统称为数字通信系统。

在模拟通信系统中, 传送的信号是一个模拟的波形, 它要求接收机能够高度保真地重视波形信号。所以在模拟通信系统中追求的主要质量指标是较高的信噪比, 在接收端对信号的检测就是对信号连续波形的参量估值。因此, 对模拟信号的检测理论就是参量估值理论。

在数字通信系统中, 传送的信号是取有限个值的离散脉冲, 在干扰存在的情况下, 接收端要求正确判决发送的是哪一种离散状态。只要脉冲波形的失真不足以引起错误判决就不会影响通信质量。因此, 衡量数字通信的主要质量指标是误码率。研究数字通信系统检测的主要理论是统计判决理论。

数字通信自 50 年代一出现就显示了极大的优越性。数字通信与模拟通信相比有以下主要优点:

1. 抗噪声(即抗干扰)能力强, 尤其是数字信号通过中继再生可消除噪声积累, 理论上数字信号可以传送无限远。
2. 数字通信可以通过差错控制编码, 提高通信的可靠性。
3. 由于数字信号传输一般采用二进制码, 所以可以使用现代计算机对数字信号进行处理。数字通信可以完成计算机之间的通信, 实现复杂的远距离控制, 例如由雷达、数字通信机、计算机及导弹系统组成的自动化防空系统。
4. 数字通信系统可以传送各种消息(模拟的和离散的), 使通信系统灵活、通用, 因而可以构成信号处理、传送、交换的现代数字通信网。
5. 数字信号易于加密处理, 所以数字通信保密性强。

另外数字通信系统还具有易于集成化, 体积小, 重量轻, 可靠性高的优点。

由于数字通信具有以上优点, 因而发展十分迅速, 正处在蓬勃发展的兴旺时期。目前数字通信大有取代模拟通信的趋势。根据美国和加拿大对通信投资的统计资料^[4]图 1.2-1 所示, 可以看到目前数字通信将是通信的主要方式。

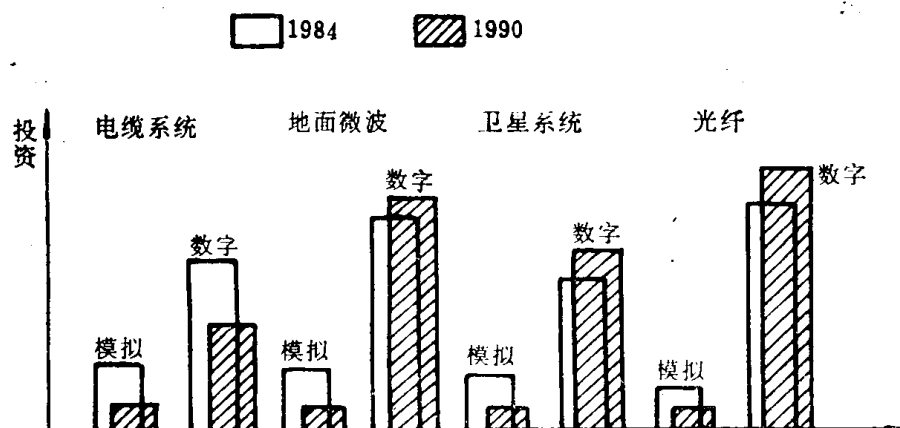


图 1.2-1 1984 年和 1990 年, 美国和加拿大电话工业在中长距离宽带传输系统方面的投资计划

数字通信较突出的缺点是比模拟通信占带宽, 如一路模拟电话仅占 4KHz 带宽, 而一路数字电话约占 20~64KHz 的带宽。然而在当前由于毫米波和光纤通信的出现, 带宽问题已基本上得到解决。

1.2.2 数字通信系统的模型

数字通信系统的形式有各种各样, 但从系统的主要功能和部件来看, 所有的数字通信系

统都可以概括为图 1.2-2 的模型。

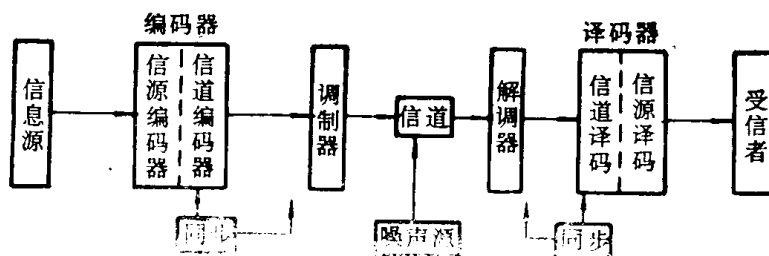


图 1.2-2 数字通信模型

从该模型看出，一个数字通信系统包括七个主要组成部分：信源、编码器、调制器、信道、解调器、译码器、受信者，另外还必须具有同步系统。以下对各部分的功能及构成作简单介绍。

1. 信源和受信者

这两部分有时统称为终端设备。信源是产生和发出消息的人或机器。发出的消息可以是连续的(模拟的)，也可以是离散的(数字的)。而受信者是接受这些消息的人或机器。

模拟信源如：送出语音信号的电话机，送出图象信号的摄象机等。数字信源有低数码率的，也有高数码率的。低速的如电传打字机，高速数据信号源常常由存储器和变换系统构成，如纸带、磁带、卡片或大容量存贮系统等，经高速时钟读出成为高速数字信源。

受信者是与信源相应的终端设备，以便接受或记录收到的消息。

2. 编码器和译码器

编码器是将原始的消息(信源发出的信号)转换为数字序列的设备。这种数字序列一般为二进制的脉冲序列。而译码器功能与编码器相反。

如图 1.2-2 中所示，编码器一般包括两个部分：信源编码器和信道编码器。信源编码器的主要任务是将信源送出的模拟信号数字化或将信源输出的数字信号进行变换以提高传送的有效性减少原始消息的冗余度，将数据进行压缩编码。若信源输出的信号是模拟信号，则信源编码器首先应对信号进行 A/D 转换编码，如 PCM 编码或 DM(增量)编码等；若信源送出的信号是数字信号，应根据实际信源的统计特性进行数据压缩编码。关于信源问题的研究是信息论的重要分支，详细地讨论已超出本书的范围。本书在第二章中关于信源编码主要介绍对语音信号的 PCM 和 DM 编码。

信道编码主要解决数字通信的可靠性问题，故又称为抗干扰编码。数字信号在信道中传输，与模拟信号一样受到噪声污染，可能导致接收信号的错误判决(误码)。信道编码就是为了减少这种错判的概率。它将信源编码后的数字信号，人为地按一定规律加入多余的数字码以达到接收端可以发现和纠正误码的目的。信道编码的扼要介绍将在本书第五章中进行。

信源译码器和信道译码器是编码器的逆变换，是为恢复原始的数字信号而设置的。

还应当指出，为了保密的目的，在信道编码器的前面(或后面)加入加密器而在接收端相应的位置加入解密器，这种加密和解密仍属于编码范畴。

由编码器和译码器输出的信号为数字基带信号。对于数字基带信号和基带传输系统的讨论在本书第三章中详细介绍。

3. 调制器和解调器

由编码器输出的基带信号一般不适于在信道中直接传送。为了适于信道传送，要把基带

数字信号经过变换——调制后再送往信道。所谓调制就是把信号频谱搬移到较高的频段上，也就是用数字信号去控制一个高频率正弦波的某个参数(如正弦波的振幅、频率或相位)的变化，将数字信号寄载于高频上，这个高频正弦波称为载波。解调是调制的逆过程，即接收端收到已调载波之后恢复出原数字信号的过程称为解调。调制的主要功能是提高信号在信道上的传输效率，或是达到信号复用的目的，或是为了提高抗干扰的性能。按照数字信号对正弦波调制的参数不同可分为：数字调幅(ASK)、数字调频(FSK)、数字调相(PSK)。数字调制根据取值状态数不同可分为二进制数字调制和多进制数字调制。不同的调制方式具有不同的抗噪声性能。为了提高通信系统的性能，要对调制方式进行合理的选择。关于数字调制的基本原理和性能分析将在第四章中讲述。

4. 信道和噪声

信道是用来传送信号的媒质。信道的主要形式有：①明线电缆。②水底和地下电缆。③表面波(地波)。④短波和超短波电离层反射传播。⑤微波视距传播。⑥对流层散射。⑦人造卫星。⑧激光和光纤维等。信道的特性对传输质量影响很大，应注意选择和补偿。

有时为了研究编码和译码问题，常把调制器和解调器也包括在信道中，称这种信道为广义信道(又称为编码信道)。而把专指传输信号媒质的信道称为狭义信道。上面所举出的8种具体信道就是狭义信道。有时也把信道按传送的信号分类，如模拟信道，数字信道等。

信号在信道中传输不可避免地会受到噪声或干扰的影响。这些噪声主要分为：起伏噪声、脉冲干扰和电台干扰等等。

通信系统设计中，应首先了解信道的传输性能，才能合理地选择编码方法和调制方式。关于信道特性及干扰问题的详细了解请参看有关书籍。这里因篇幅所限不作详述。

5. 同步系统

同步问题是数字通信中一个重要的实际问题。同步系统是数字通信系统中不可缺少的组成部分。所谓同步，就是指发送端和接收端要有统一的时间标准，要使接收端与发送端“步调一致”。同步系统包括载波同步、码元(时钟)同步、群同步(帧同步)及网同步。如果同步有误差或失去同步，则数字通信中就会出现大量误码，甚至使整个通信无效。对于同步原理的讨论将在第六章中详细阐述。

以上我们介绍了数字通信模型中各组成部分的作用和功能。本书以下各章将对各组成部分进行较详细地讨论。

1.3 信息量、信道容量

1.3.1 信息量

通信中所传送的消息都含有一定的信息量。所谓信息量是对消息中所含的不确定性的度量。显然，消息中所含信息量的大小与消息发生的概率有着密切的关系。一件事发生的概率愈小，愈使人感到意外和惊奇，则此消息所含的信息量愈大。若消息出现的概率接近于零，则消息的信息量趋向于无穷大。若消息发生的概率为1，是一个必然事件，则其所含的信息量为0。消息所含的信息量可用消息发生的概率倒数的对数来表示。在信息论中，消息所含的信息量按以下表示式定义：

$$I = \log \frac{1}{p} \quad (1.3-1)$$

式中 I ——消息所含的信息量

p ——消息发生的概率

式(1.3-1)中,对数的底决定了度量信息的单位。若对数底为2,则 I 的单位为比特(bit);若对数的底为 e ,则 I 的单位为奈特(nat)。在以下各节中我们都用比特作为信息量的单位,因此,式(1.3-1)又可写为:

$$I = \log_2 \frac{1}{p} = -\log_2 p \quad (\text{比特}) \quad (1.3-2)$$

由式(1.3-2)定义看出:当消息发生的概率 $p = \frac{1}{2}$ 时,消息所含的信息量为1比特,当消息发生的概率 $p = \frac{1}{4}$ 时,消息所含的信息量为2比特;当消息发生的概率 $p = \frac{1}{8}$ 时,消息所含的信息量为3比特。从传输这些消息所用的二进制脉冲数来看,与消息的信息量有密切的关系。若传送等概率出现的两个消息之一(即 $p = \frac{1}{2}$)时,至少需要一位二进制脉冲;若传输八个等概率出现的消息之一(即 $p = \frac{1}{8}$)时,至少需要三位二进制脉冲。由以上分析可以看出,当消息的信息量用比特表示时,它所含的信息量可以用传送它所需要的最少的二进制脉冲数来表示。

以上结论,表面上看,仅对离散消息而言,但是,在信息论中有一个重要结论,任何形式的待传信息可以用二进制形式表示而不失其主要内容。过去课程中学过的抽样定理告诉我们,一个频带有限的连续信号中的信息,可以用每秒一定数目的离散抽样值代替。而这些离散的样值可以用二进制的脉冲序列表示。可见以上给出的信息量定义同样适用于连续的信息。

1.3.2 平均信息量

在由多个消息所形成的消息串中,每个消息(或符号)所含的信息量的统计平均值,称为信源中消息(或符号)的平均信息量。平均信息量的计算是由每个消息的信息量的概率加权求和得到的。例如某一信源是由 A 、 B 、 C 三种符号组成,出现 A 的概率为 $p(A)$,出现 B 的概率为 $p(B)$,出现 C 的概率为 $p(C)$,则消息的平均信息量为:

$$H = -[p(A)\log_2 p(A) + p(B)\log_2 p(B) + p(C)\log_2 p(C)], \quad (1.3-3)$$

在由 n 个独立的符号 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 所构成的消息源中,每个符号出现的概率分别为: $p(x_1), p(x_2), \dots, p(x_n)$,则此信源中每个符号的统计平均信息量为:

$$H(x) = -\sum_{i=1}^n p(x_i) \log_2 p(x_i) \quad (1.3-4)$$

由于此平均信息量的定义与统计热力学中熵的定义相似,所以我们称 $H(X)$ 为信源的熵(Entropy)。

由式(1.3-4)可以得到在消息等概($p = \frac{1}{n}$)出现时, $H(x)$ 具有最大值^[1]这时平均信息量就是每个符号的信息量,即

$$H(x) = -\sum_{i=1}^n \frac{1}{n} \log_2 \frac{1}{n} = \log_2 n \quad (1.3-5)$$

1.3.3 信道容量

在有干扰的信道中, 由于信道带限和噪声的存在, 使信道的最大传输信息的能力受到限制。信息论的鼻祖香农(Shannon)把信道传输信息的最大极限速率定义为信道容量, 他已严格地证明了: 在信道中存在白色高斯噪声的情况下, 信道的容量 C 可用下式表示:

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (1.3-6)$$

式中: S ——为信号的平均功率

N ——为高斯白噪声的平均功率

B (赫兹)——为信道带宽

式(1.3-6)的严格证明已超出本书范围, 这里我们仅从工程的观点上给是粗略地证明。

在式(1.3-6)中涉及到信息传输速率的问题, 那么什么是信息的传输速率呢? 信息传输速率就是指单位时间所传输的信息量。如果已知每个符号的平均信息 H 和每秒传输的符号的个数(即传输符号的速率) r , 那么, 系统传输信息的速率可由下式计算:

$$R = rH \text{ (比特/秒)} \quad (1.3-7)$$

在有扰信道中, 传输每个符号需要一定幅值的脉冲。如果要传送 M 个符号。可用 M 种不同幅度值的脉冲代表。若各种幅值的出现是等概的(即符号出现的概率相等), 则传送每一种幅值的脉冲代表着传送 $\log_2 M$ 比特的信息量。为了提高传送的脉冲的信息量, 希望 M 增加。在传输的信号功率受限的情况下, 脉冲幅度取值的数目越多, 则各种脉冲取值之间的量化分层间隔越小。当脉冲取值间隔小到一定程度时, 由于信道中噪声的干扰, 使接收端难以分辨出所发送的是哪一个幅度的脉冲, 这将没法获得信息。若信道中白色高斯噪声的功率为 N (瓦), 则它的均方根电压值为 $\sqrt{N}$ (认为负载为 1Ω)。为了使信号幅度分层数(或称量化取值数)最多而又能使接收端可分辨, 则各取值之间的最小间隔应大于等于 $\sqrt{N}$ 。若信号功率为 S , 则接收端功率为 $S+N$, 这时接收端信号的最大分层数为:

$$M = \frac{\sqrt{S+N}}{\sqrt{N}} = \left(1 + \frac{S}{N} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.3-8)$$

设 M 种幅值分层出现的概率相等, 则每个脉冲出现所代表的信息量为:

$$H = -\log_2 \frac{1}{M} = \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.3-9)$$

若信道带宽为 B , 可以证明, 此信道每秒最多可传送 $2B$ 个脉冲*。即传送脉冲的最高速率 $r = 2B$ 。根据式(1.3-7)、(1.3-9)可以得出此信道传输信息的最大速率, 即信道容量 C 为:

$$\begin{aligned} C &= [R]_{\max} = 2B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)^{\frac{1}{2}} \\ &= B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \end{aligned} \quad (1.3-10)$$

这就是著名的香农信道容量公式。式中 S/N 为信噪比

由式(1.3-10)可以看出, 扩大信道的传输带宽或提高信号传输的信噪比都可以增加容量。但应当注意, 由于信号功率的受限和噪声的存在, 信噪比不能无限增加。而且信道中白色高

* 这个结论将在第三章中证明。

斯噪声的功率与信道带宽成正比,即 $N = n_0 B$ (n_0 为信道中噪声的功率谱密度)。在信道带宽无限扩大时,信道容量趋于某一极限值^[8]。可见在有扰信道中,信道容量不可能无限大, C 总是一个有限值。

香农信道容量公式还告诉我们,在信道容量给定的情况下,信道带宽和信噪比大小可以互换,即在信道容量保持不变的条件下,可以用较大的带宽,较小的信噪比;也可以用较小的带宽,较大的信噪比来传输信息。这一原理对通信系统的设计有着指导性意义。同时,也为现代的扩频通信的发展奠定了理论基础。

1.4 数字通信的主要质量指标

对于一个通信系统的评价,往往涉及到许多性能指标,如系统的有效性、可靠性、适应性、经济性、标准性及使用维修方便性等。这些指标从各方面评价了通信系统的质量。对于一个数字通信系统也是这样。但是,在这里我们仅从信息传输的角度来讨论数字通信的质量指标,也就是说主要讨论通信系统的有效性和可靠性问题。

1.4.1 通信系统的有效性

一个数字通信系统有效性的描述可从以下三个指标来说明,这三个指标是码元传输速率、信息传输速率及系统的带宽利用率。

1. 码元速率 R_B , 又称传码率, 是单位时间(每秒)所传送的码元(即脉冲)数目, 单位为“波特”(Boud)

2. 信息速率 R_b , 又称传信率, 是单位时间系统所传送的信息量, 单位为: 比特/秒 (b/s)。

传码率 R_B 和传信率 R_b 统称为系统的传输速率。在二进制码元的传输中, 每个码元代表一个比特的信息量, 所以这时码元的传输速率和信息的传输速率在数值上是相等的, $R_b = R_B$, 只是单位不同。而在多进制脉冲传输中, 码元的传输速率与传信率是不相等的。如在 M 进制中, 每个码元脉冲代表 $\log_2 M$ 个比特的信息量。这样传信率和传码率之间的关系是:

$$R_b = R_B \log_2 M \quad \text{比特/秒} \quad (1.4-1)$$

例如在四进制中 ($M = 4$), 已知码元的传输速率 $R_B = 600$ 。则信息的传输速率 $R = 1200$ 比特/秒。

3. 系统的频带利用率 ρ

在比较两个通信系统的有效性时, 单看它们的传输速率是不够的, 或者说两个系统的传输速率相同, 而它们的系统效率可以是不一样的, 因为两个系统可能具有不同的带宽。从式 (1.3-10) 看到通信系统的带宽不同, 它们传输信息的能力不同。所以衡量系统效率的另一个重要指标是系统频带的利用率 ρ 。

通信系统的频带利用率 ρ , 是单位时间(秒)单位频带上传输信息量的多少, 单位为比特/秒/赫兹 (bit/s/Hz)。在二进制基带系统中最高频带利用率 $\rho = 2 \text{ bit/s/Hz}$ 。在多进制基带系统中频带利用率可以大于 2 b/s/Hz 。在频带系统中, 不同的调制方式可能有不同的频带利用率, 如二进制调幅系统频带利用率仅等于 $\frac{1}{2}$, 而多进制的调幅、调相系统频带利用率目前达到 6 bit/s/Hz 。总之, 系统的单位频带利用率越高, 系统的有效性发挥得越好。

1.4.2 通信系统的可靠性

由于在数字通信系统中(尤其是在信道中)存在着噪声干扰,接收到的数字码元可能会发生错误,而使通信的可靠性受到影响。对于数字通信系统的可靠性指标主要用误码率 P_e 和误信率 P_b 来衡量。

1. 误码率 P_e , 是指通信过程中系统传错码元的数目与所传输的总码元数目之比, 也就是传错码元的概率, 即

$$P_e = \frac{\text{传错码元个数}}{\text{传输码元的总数}} \quad (1.4-2)$$

2. 误比特率 P_b , 又称误信率, 是指传错信息的比特数目与所传送的总信息比特数之比。

$$P_b = \frac{\text{传错的比特数}}{\text{传输的总比特数}} \quad (1.4-3)$$

现在, 我们来讨论误码率与误信率之间的关系。误码率是指由于信码在传输过程中受到干扰致使接收端错误判决而造成的误码比例, 而误信率是指由于码元的错判而造成传送信息错误的比例。在二进制系统中, 显然误码数目就等于错传输信息量的比特数, 所以这时 $P_e = P_b$ 。而在多进制传输中, 每错一个码元并不等于传错一个比特的信息量, 所以说这时误码率与误信率是不相等的。具体的误信率的计算要看多进制脉冲传错的程度。可以证明^[5], 多进制 (M 进制) 中平均误比特率与误码率有以下关系:

$$P_b = \frac{M}{2(M-1)} P_e \approx \frac{1}{2} P_e \quad (1.4-4)$$

对通信系统, 我们总是希望它的效率和可靠性都很高。但对于实际的通信系统, 这两方面的指标是相互制约, 相互矛盾的。为了在实际的通信系统中两种性能相互兼顾, 必须在满足一定可靠性的基础上尽量提高效率。不同的通信, 对可靠性的要求是不一样的, 所以我们在设计通信系统时, 应根据对这两种性能的不同要求进行合理的安排。

对于通信系统性能的衡量, 有时涉及到传输方向性的系统功能。对图(1.2-2)的数字通信模型, 这个系统中信号的传输是单方向的, 称这种通信为单工通信。若一个通信系统能使通信的双方同时发送和同时接收信息, 则称这种通信为双工通信。若通信的双方都可收可发, 但只能一方发另一方收, 则称这种通信为半双工通信。

一个通信系统性能的衡量除了以上所讨论的两个方面之外, 还涉及到其他的指标, 如适应性、经济性、使用维修的方便性等等。这些不同的性能指标对于不同的通信系统有着不同的要求。这里不再详细讨论。

习 题

1. 什么是模拟通信? 什么是数字通信? 数字通信有哪些主要优点? 你对今后“数字通信大有取代模拟通信的趋势”有什么看法?

2. 数字通信模型中各主要组成部分的功能是什么?

3. 由信道容量公式 $C = B \log\left(1 + \frac{S}{N}\right)$, 讨论 C 、 B 、 $\frac{S}{N}$ 之间的关系, 并证明:

① $B \rightarrow \infty$ 时 $\lim C \approx 1.44S/n_0$ (其中 n_0 为高斯白色噪声的单边功率谱密度)。

② $B \rightarrow \infty$ 时, 传信速率达到信道容量极限, 即 $R = C$ 时, 试证明码元能量与噪声功率谱密度之比为 $E_b/n_0 \approx -1.6$ (分贝)。这就是极限最小信噪比。

4. 一个由字母 A 、 B 、 C 、 D 组成的信源, 对传输的每一个字母用二进制脉冲编码: 00 代表 A , 01 代表 B , 10 代表 C , 11 代表 D 。又知每个脉冲的宽度为 5ms , 试求:

① 不同字母等概出现时, 传输的平均信息速率以及传输码元速率。

② 若各字母出现的概率分别为: $P_A = 1/5$, $P_B = 1/4$, $P_C = 1/4$, $P_D = 3/10$, 试计算平均信息传输速率。

5. 英文字母中 e 出现的概率为 0.105 , c 出现的概率为 0.023 , o 出现的概率为 0.001 。试计算它的信息量。

6. 某气象广播员用明线报告天气预报, 有四种可能的消息: 晴、云、雨和雾。若每个消息等概出现, 发送每个消息最少所需的二进制脉冲数为多少? 若这四个消息出现的概率不等, 且分别为 $1/4$ 、 $1/8$, $1/8$ 和 $1/2$ 。在这种情况下试计算每个消息的平均信息量。

7. 一个平均功率受限的理想信道, 带宽为 1MHz , 受高斯白噪声干扰, 信噪比等于 10 , 试求:

① 信道容量为多少?

② 若信噪比降为 5 , 在信道容量相同时, 带宽应等于多少?

③ 若带宽降到 0.5MHz , 保持同样信道容量时, 信噪比应为多少?

8. 具有 1MHz 带宽的高斯信道, 若信号功率与噪声的功率谱密度之比为 $S/n_0 = 10^6\text{Hz}$, 试计算信道容量。

9. 一个系统传输四脉冲组, 每个脉冲宽度为 1ms , 高度分别为: 0 、 1 、 2 和 3 伏, 且等概出现。每四个脉冲之后紧跟一个 -1 伏的脉冲 (宽度为 1ms) 把各组脉冲分开 (即不带信息的同步脉冲)。试计算系统传输信息的平均速率。

10. 一个电压波形 $S_a(2000\pi t)$, 要以不超过 $1/80$ 伏的不确定性发送, 试计算所需信道容量。(注意波形信号最大值为 1 伏最小值为 -0.2 伏)。

第二章 信 源 编 码

为了使代表消息的信号在数字系统或数字信道中有效地传输,必须将信源输出的信号进行变换,使之成为合适的数字脉冲串(一般为二进制脉冲),这就是信源编码。在数字通信中,信源编码的主要目的有两个:第一,将信号变换为适于数字通信系统处理和传送的数字信号形式。如果信源是模拟信源,应首先进行模拟/数字转换。经过信源编码输出的信号应是在时间上离散,在取值上为有限个状态的数字脉冲串;第二,通过信源编码提高通信的有效性,尽可能地减少原消息中的冗余度(Redundancy),进行压缩信号带宽的编码,使单位时间或单位系统频带上所传的信息量最大。以上两个目的常常在编码的过程中同时得以实现。

在信源编码中,我们主要介绍不同情况的三种编码方法。首先介绍离散无记忆信源编码,这里简单描述了不等概消息的最佳编码——哈夫曼(Huffman)编码过程;然后较详细地阐述了语音模拟波形信号的数字化编码——脉冲调制编码(PCM)和增量调制码(DM)的编码原理、方法及其性能;最后介绍线性预测编码(LPC)的基本概念。通过对语音信号的几种编码性能比较,可以发现线性预测编码对压缩语音信号的带宽有很大潜力。

2.1 离散无记忆信源(DMS)编码^[7]

假定信源的输出是来自一个由有限个符号 $x_i, i=1,2,\dots,L$, 构成的集合(例如,中文电报是由 0~9 十个数码构成的),而且这些符号出现的概率分别为 $p(x_i), i=1,2,\dots,L$ 。由第一章知道,这个信源的熵(平均信息量)为:

$$H(x) = - \sum_{i=1}^L p(x_i) \log_2 p(x_i) \leq \log_2 L \quad (2.1-1)$$

当 $p(x_i)$ 为等概时不等式中的等号成立。

离散信源编码就是给每个符号赋予一定长度的代码表示。在信息论中已经证明,每个符号的二进制代码平均长度最短不应小于信源的熵^[6]。各符号的代码长度可以是等长的,也可以不等长。编码方法不同,编码的效率也不同。

2.1.1 等长编码

所谓等长编码(即均匀编码)就是不管符号出现的概率如何,每个符号都用 N 位二进制码表示。设信源共有 L 种符号,则需要的编码长度 N (位数)由 $\log_2 L$ 决定。当 L 为 2 的整数次幂时

$$N = \log_2 L \quad (2.1-2)$$

当 L 不为 2 的整数次幂时,则应取

$$N = [\log_2 L] + 1 \quad (2.1-3)$$

符号 $[\log_2 L]$ 表示取 $\log_2 L$ 中的最大整数。

我们定义 DMS 编码的效率为 $H(x)/N$, 即每位二进制码所代表的信源的信息量。从以上式子看到,当 L 刚好为 2 的整数次幂且每个符号等概出现时 $N = H(x)$ 。这时编码效率达到