

高等学

数字通信原理



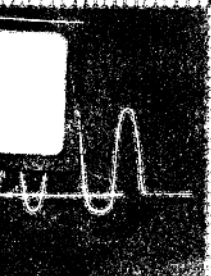
数字通信原理



数字通信原理



数字通信原理



西北工业大学出版社

内 容 简 介

本书讲述数字通信系统的基本原理。内容包括：数字通信系统模型及主要性能要求；模拟信号的数字化传输；数字基带传输原理；数字调制与解调；差错控制编码及同步原理等。讲述以系统基本原理及性能分析方法为主。本书自成系统，重视联系实际，各章后均附有习题，以作课后练习用。

本书为高等院校无线电技术专业高年级学生“数字通信原理”课程教材，也可供从事数字通信的工程技术人员参考。

高等学校教材

数 字 通 信 原 理

主 编 张 浥

责任编辑 郑永安

责任校对 钱伟峰

西北工业大学出版社出版

(西安市友谊西路127号)

陕西省新华书店发行

航空航天工业部〇一二基地印刷厂印装

ISBN 7-5612-0124-9/TN·5(课)

开本 187×1092毫米 1/16 12.45印张 206千字

1989年6月第1版 1989年6月第1次印刷

印数 1~2000册 定价：2.45元

前 言

本书是工科高等院校无线电技术专业本科高年级“数字通信原理”专业课教材，参考教学学时数为40~50学时，主要讲述数字通信系统的基本原理及其性能分析。

全书共分六章。第一章是数字通信系统简述，介绍数字通信系统模型及主要性能指标；第二章讨论信源编码，讲述模拟信号数字化传输的方法，着重介绍脉码调制和增量调制，并介绍了差分脉冲编码调制的基本原理；第三章讨论数字基带传输原理，研究数字信号及其在基带传输中的问题和基带数字信号的最佳接收原理等内容；第四章是数字调制与解调，主要讨论振幅、频率与相位的键控原理及其性能分析，另外还概略地叙述了现代数字调制技术的发展状况，并对恒包络调制方法中有代表性的四相相移键控及最小移频键控两种调制方式作了较详细的介绍；第五章是差错控制编码，介绍了差错控制编码的一般原理，并在研究正交编码的基础上讲述了扩展频谱通信技术的问题；第六章是数字通信中的同步系统，研究了相干载波提取，位同步、帧同步的原理及性能分析。以上各章后均附有适量的习题，以配合学生课后练习。

本书主要讲述原理，希望配有适当的实验课，以补充和加深学生的系统概念和实践知识。

本书由张悦担任主编，并负责编写第一至第四章，第五章由竹志年编写，第六章由邱恒忠编写。

本书由北京邮电学院倪维桢教授和李文海副教授评审，提出了不少宝贵意见，在此深表谢意。

由于编者水平有限，书中缺点与错误在所难免，欢迎读者批评指正。

编 者

1988年9月

目 录

第一章 数字通信简述.....	(1)
§ 1-1 模拟通信与数字通信.....	(1)
§ 1-2 数字通信系统模型及系统性能指标.....	(3)
第二章 模拟信号的数字化传输.....	(6)
§ 2-1 引言.....	(6)
§ 2-2 脉冲编码调制 (PCM).....	(6)
§ 2-3 基本增量调制 (ΔM 或DM).....	(30)
§ 2-4 改进型增量调制.....	(35)
§ 2-5 增量脉冲编码调制 (DPCM).....	(38)
§ 2-6 关于信源的有效编码.....	(41)
习题.....	(42)
第三章 数字基带传输原理.....	(44)
§ 3-1 概述.....	(44)
§ 3-2 数字基带信号及波形.....	(45)
§ 3-3 基带信号传输中的码间串扰.....	(56)
§ 3-4 数字基带传输中码间串扰的消除.....	(57)
§ 3-5 眼图.....	(73)
§ 3-6 最佳基带传输系统及其性能.....	(75)
习题.....	(82)
第四章 数字调制与解调.....	(84)
§ 4-1 引言.....	(84)
§ 4-2 二进制振幅键控 (2ASK) 系统.....	(85)
§ 4-3 二进制移频键控 (2FSK) 系统.....	(91)
§ 4-4 二进制相位键控 (2PSK、2DPSK) 系统.....	(97)
§ 4-5 二进制数字调制系统性能的比较.....	(104)
§ 4-6 改进的数字调制方式.....	(105)
习题.....	(113)
第五章 差错控制编码.....	(115)
§ 5-1 引言.....	(115)
§ 5-2 差错控制编码的基本原理.....	(117)
§ 5-3 常用的简单抗干扰编码.....	(120)

§ 5-4 线性分组码.....	(122)
§ 5-5 循环码.....	(127)
§ 5-6 卷积码.....	(137)
§ 5-7 正交编码.....	(142)
§ 5-8 扩展频谱技术.....	(153)
习题	(167)
第六章 数字传输中的同步系统	(169)
§ 6-1 相干载波的传输和提取.....	(169)
§ 6-2 位同步的传输和提取.....	(178)
§ 6-3 群同步信号的传输和提取.....	(184)
习题	(189)
参考文献	(190)

第一章 数字通信简述

传递消息的过程就是通信。

人类在生产和社会活动的过程中，总是离不开传递消息的。随着生产力的发展，人们对传递消息的要求越来越高，因此通信事业的发展也越来越快。从古代的烽火、金鼓、驛马传信到近代的电报、电话、传真等，出现过各种各样的通信方式。在这众多的通信方式中，利用电信号来传递消息的通信方式（简称电通信），获得了非常广泛地应用。这是由于电通信方式能使消息的传递在几乎任意的通信距离上，实现既迅速有效而又准确可靠地传递信息的缘故。如今，一般所说的通信，就是指电通信。

电通信（以后简称通信）所传递的消息，有各种不同的形式。例如：符号、文字、语言、音乐、数据、图片、活动画面等等。根据所传递的消息的不同，可将当今的通信业务分成电报、电话、传真、数据传输、可视电话等类别。其实，从广义的角度讲：广播、电视、雷达、导航、遥测与遥控等也都可列入通信的范畴。

为了研究的方便，常常从不同的角度，对通信采用不同的分类方法。例如，按所传递信号的形式是模拟的还是数字的而将通信分成模拟通信与数字通信两大类。另外，也可以按电信号由一地传到另一地所用的传递媒质的不同，把通信分成有线通信与无线通信两类。

实际上，无论何种通信，既不管传递什么消息或信号，也不管用什么媒质传递，都可以用图1-1这个通信系统模型来概括。这里，信息源是产生消息的环节；发送设备可将消息转变为适合于在信道中传输的信号；信道则是将信号由发送设备传到接收设备的媒介或途径；接收设备的作用与发送设备正好相反，它是将接收到的信号恢复成相应的原始信号；受信者与信息源相对应，可以是设备，也可以是人；噪声源，它散布在系统各个部分，仅仅为了研究方便，才集中表示成了一个方块形式。

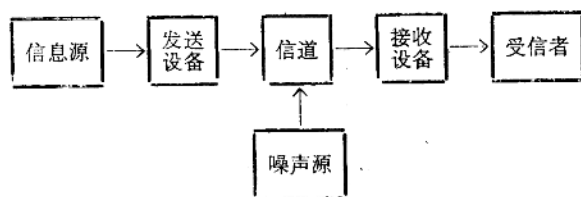


图 1-1 通信系统模型

§ 1-1 模拟通信与数字通信

通信所传递的消息是多种多样的，但总可以把它们划分成离散消息与连续消息两大类。离散消息是一些有次序的符号序列，例如状态、文字、数字等。离散消息也称数字消息。模拟消息则是非离散的，消息的状态是连续变化的。例如，强弱连续变化的语音，高低连续变化的炉温等。所以模拟消息也称连续消息。

为了用“电”来传递消息，需要将各种消息转变成电信号。消息与电信号之间必须建立

——映照的关系，若不这样接收端就无法复制出原消息。通常，消息被寄托在电信号的某一个参量上。如果电信号的参量携带的是离散消息，则该参量也必然是离散取值的，这样的信号就叫离散信号，也叫数字信号，图 1-2 表示了两种数字信号的例子；如果电信号的参量对应于模拟消息而连续取值，则称这样的信号为模拟信号或连续信号，例如普通的电话机输出的信号就是模拟信号。如图 1-3 所示。

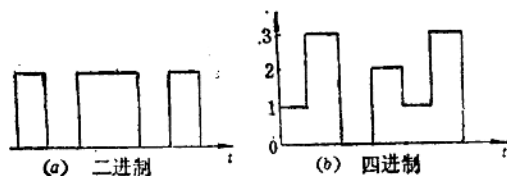


图 1-2 数字信号举例



图 1-3 模拟信号举例

按照通信系统中传输的是模拟信号还是数字信号，如前所述，就能把通信系统分成模拟通信系统和数字通信系统两类。而把相应的通信分别称作模拟通信和数字通信。

由于能够把模拟信号通过“模-数 (A/D) 变换”转换成数字信号，所以模拟信号也能通过数字通信系统来传输。当然在接收端要进行相反的“数-模 (D/A) 变换”，才能把原来的模拟信号恢复出来。有人把这种包括模拟信号数字化的通信称作“数字通信”，而把消息本身就是离散数据的通信称作“数据通信”。

研究通信发展史可知，电通信是起始于电报通信的。而电报通信实际上就是一种数字通信，但当时电报这种数字通信形式，还无法替代模拟通信。到了20世纪中叶以后，晶体管和集成电路的出现，大大地促进了数字电路技术和数字通信技术的发展。再加上近代飞速发展的计算机通信的要求，因而数字通信就得到更加迅速的发展。虽然目前数字通信和模拟通信还都是广泛使用的通信方式，但从发展的角度看，已露出了数字通信取代模拟通信的苗头。之所以如此，是因为数字通信与模拟通信相比，它更能适应对通信系统提出的越来越高的要求。这表现在：①数字通信抗噪声能力强，传送的数码被噪声恶化到一定程度后可以用再生的方法，使数码再完全恢复成原来的样子，即使由于噪声干扰，信码出现了一些错误，也可以采用差错控制编码的方法加以消除；②保密性强，可以加密；③便于使用现代计算技术对数字信息进行处理；④设备可以集成化，微型化；⑤数字通信可以传递各种消息，通信系统通用，灵活等等。这些都是数字通信所具有的独到的优点。但是，数字通信也不是没有缺点的。一般说来，数字通信的最大缺点就是它的系统带宽远远超过模拟通信系统的带宽。例如，传输一路模拟电话，一般只占据4千赫的带宽。而那怕是一路传输质量很差的数字电话（8千次/秒抽样后再8级量化，即编三位二进制码），其码元速率就要达到 $8 \times 3 = 24$ （千比特/秒）。如按照奈奎斯特准则和滚降的要求（将在第三章叙述），其传输带宽大约要20千赫兹。如果传输质量要求好一点（抽样后256级量化，编8位二进制码），同理，其码元速率将会达到 $8 \times 8 = 64$ （千比特/秒），带宽也要达到60千赫左右。由此可知，数字通信的频带利用率是不高的，但是，随着微波和卫星信道以及光纤信道的出现和发展（其频带宽度能做到数百兆赫以上），数字通信占用较宽频带的矛盾已不严重了。

当然，模拟通信系统要按照模拟信号的传输特点设计，数字通信系统也要按照数字信号传输的特点来设计。但是，考虑到我国现有通信设备多数是模拟通信设备的历史现实，因而现在还有一个尽可能利用模拟通信系统来传输数字信号的问题。这就需要对原系统作某些改造，或者加装数字终端设备。

§ 1-2 数字通信系统模型及系统性能指标

一、数字通信系统模型

数字通信系统的形式各式各样，但从数字通信的共同特点以及所完成的功能看，我们能把它概括成图 1-4 所示的数字通信系统模型。

消息源与接收者：消息源是产生与发出消息的人或机器，它所发出的消息，可以是离散的，也可以是连续的；接收者则是收端用来接收这些消息的人或机器。

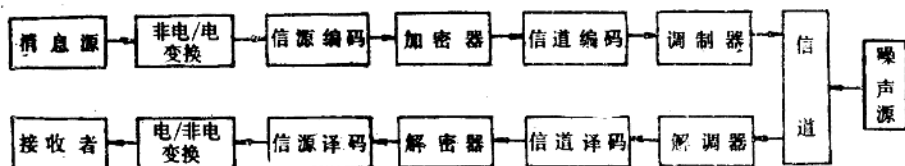


图 1-4 数字通信系统模型

在专门传送数据的数据通信系统中，消息源与接收者是数据源与数据收集器，有时也把这些叫终端设备。对于不同系统或不同应用，有各种各样的终端设备，如电传打字机，各种形式的存贮器等。

应该特别指出：以上介绍的是消息源发出的就是电信号的情况。如果消息源发出的是非电信号的时候，则应由“非电/电”和“电/非电”的变换器来完成这种发收两端对应的转换。

信源编码器与信源译码器：信源编码器是专为把消息转换成适合于下一环节所需的数字信号设置的。如果信源所发出的消息已是符合下一环节所要求的脉冲序列，那么也可以省去这一环节（例如消息是计算机或其它设备所输出的二进制序列，并且下一环节所要求的输入也是二进制序列）。若原消息是连续的，还要把模拟信号变换成数字信号（包括抽样、量化等环节），这些都属于信源编码的范畴。所以，不同用途的信源编码器的复杂程度是不同的。信源译码器的作用正好与信源编码器相反，是把数字信息序列变换成原信号。

加密与解密：为了实现保密通信，在信源编码之后，加设加密器，而在接收端相应的位置上进行解密。关于密码的研究，也属于编码的范畴。

信道编码器与信道译码器：信道编码有时也叫纠错编码。它主要是为解决可靠性问题而加设的。因为信源编码器输出的数字信号是要通过信道来传输的，而信道总是要暴露在各种噪声的干扰之下，因而可能导至接收端数字信号的判决错误（误码），信道编码就是为了减少这种误码而加设的。它把信源编码后输出的脉冲序列再进行变换，人为地按一定规律加入一些“多余的”码元以达到能自动发现和纠正错误的目的。信道译码器的作用，也正好与信道编码器相反。

调制器与解调器：由信道编码器输出的数字信号，一般不适合于在信道中直接传输。除了一部分市内电网或类似信道中的数字系统以外，一般数字通信总是把编码输出的数字信号先送到调制器进行处理。在调制器中，原始的数字信号对一正弦波进行调制，利用正弦波的某一参量的变化来传送信息。所以调制器的任务是把原始的信道数字信号变为适合于信道传输的信号。而解调器则是进行相反的变化。

调制与解调的方式对通信的质量影响是比较大的，所以为了提高通信系统的性能，就要对调制与解调方式进行合理的选择。

信道和噪声：信号的通道就是信道。早期，信道是专指用来传送信号的媒质。能够进行信号传输的媒质很多，主要有架空明线、水底电缆和地下电缆、表面波（地波），短波电离层反射传播、微波视距传播、对流层散射、人造卫星、光纤等等。但是从研究消息传输的观点看，有时会感到这样定义信道太狭窄，而把从调制器开始到解调器结束的中间所有环节统称作信道。这是广义的信道，至于前者，则往往被称作狭义的信道了。

信号在信道中传输，不可避免地要受到外界和内部噪声的影响。这些干扰主要有：起伏噪声；脉冲干扰和电台干扰等等。它分布在信道中的各个环节。如前所述，只是为了研究的方便，才把这些干扰看成一个等效的干扰源的。在通信系统的设计中，首先要了解信道的性能，才能合理地设计系统。

以上介绍了数字通信系统的组成模型，但还有一个特别重要的组成成分没有列入，那就是同步系统（因为同步加入的位置往往不是固定的）。

由于数字信息序列是按一定的节拍传输的，因而收端也必须有一个与发端相同的节拍。不然，会因收发两端步调不一致而造成混乱。另外，发送的数字信号常常是编组的（例如电报信号、数字消息及纠错编码等），在收端也必须知道这些编组的头尾，否则就无法把收到的信息恢复成原始的消息。这些都是同步问题，其实也是一个建立共同时间标准的问题。在数字通信中，称节拍一致为位同步或码元同步，而称编组一致为“群同步”、“句同步”或“码组同步”等。同步信息可能在代表原始消息的信道信号中包含着，也可能要在原始信道信号中另外加入，这要由具体的通信系统决定。

上述数字通信模型是一个功能完整的系统模型，对于具体的数字通信系统来说，就可能只由其中一部分框图来完成。例如，不需要保密的通信就可以不加密器与解密器这两部分电路；信源发出的信号本身就是电信号时就可以不要“非电/电”和“电/非电”的变换这两个部分等等。

二、数字通信系统的主要性能指标

数字通信系统的性能指标是比较多的。例如，有效性、可靠性、适应性、可靠度（可靠通信时间）、使用维修方便与否、通信建立时间长短及成本高低等等。从系统原理角度出发，我们将主要讨论有效性和可靠性的问题，其他性能多是工程性很强的概念，本课程不再涉及。

所谓有效性，就是在给定的信道中，传送信息速率的高低；而所谓可靠性，就是信息传输的准确程度。在实际通信系统中，有效性与可靠性之间是互相矛盾的。为了提高可靠性可以采用抗干扰编码，增加信号的多余度，但有效性会因数码率的增加而降低；为了提高有效性，必须尽量缩短码元长度，这样就势必使可靠性下降。设计具体的数字通信系统时，要根据对系统的要求折衷的选择。在数字通信系统中，具体衡量这两个性能的指标就是传输速率

和错误率。

1. 传输速率：它用来衡量数字通信系统的有效程度。通常有以下三种不同的定义：

第一种是码元速率 R_b ，它是指单位时间（每秒）内所传送的码元数目。单位是“波特”（B）。有时也把码元速率称为信号速率或波形速率，也有称为调制速率的。

第二种是信息速率 R_i （亦称传信率或比特率）：是指单位时间（秒）内所传输的信息量。单位为“比特/秒”（b/s）。

上述两种传输速率的单位是有区别的，“波特”是指每秒钟传送的码元数，它已经包含了时间的概念；而“比特”则是信息量的单位，它不包含时间的概念，故信息速率必须写成“比特/秒”、“千比特/秒”、“兆比特/秒”等。

在二进制码元传输中，若二值符号具有等概的统计特性，则每一码元就代表一个比特的信息量，这时码元速率和信息速率在数值上是相等的，只是单位不同而已。但是在多进制中，例如 M 进制中，则一个码元代表 $\log_2 M$ 比特的信息量，所以码元速率和信息速率在数值上则是不相等的。它们的关系是

$$R_i = R_b \log_2 M \quad (1-1)$$

例如在四进制（ $M = 4$ ）的脉码传输中，已知信号（码元）的传输速率是600波特，则信息的传输速率就是1200比特/秒。由此可见，采用多进制码传输，能够提高信息传输速率。

第三种是消息速率 R_m ，它是指单位时间内所传的消息数。例如消息是汉字，那就是每秒钟所传输的汉字数。由于构成消息时，可采用不同的码元基数及不同的长度，再加上所传的同步码元也不一定相同，因此消息速率与码元速率的关系对于不同的系统是不相同的。在这三种表示传输速率的指标中，一般把信息速率作为衡量的标准。

在比较两个通信系统的效率时，单看它们的传信率还是不够的。因为在两个系统传信率相同的情况下，它们的效率还可能是不一样的，这就要看一下它们所占的频带宽度。通信系统所占的频带越宽，传信的能力应该越大，这时往往用信道频带利用率来表示。它是指单位频带上所能达到的信息速率，即信息速率与所占用的频带宽度之比，单位是比特/秒·赫。它通常取决于所采用的调制方式。这一指标也是衡量数字通信系统有效性的重要指标。

2. 错误率：是用来衡量可靠性的主要指标。它有下列两种不同的定义：

第一种是误码率（也叫错码率） P_e ：它是指错误接收的码元数与传输的总码元数之比。即

$$P_e = \frac{\text{错误接收的码元数}}{\text{传输码元总数}} \quad (1-2)$$

第二种是误比特率（错比特率或错信率） P_b ：它是指错误接收的比特数与所传总比特数之比。即

$$P_b = \frac{\text{错误接收的比特数}}{\text{传输的总比特数}} \quad (1-3)$$

对二进制码来说，误码率与误比特率在数值上是相等的。

除了以上两种常用的错误率以外，还有所谓误字率与误句率的说法。它们分别是错误接收的字或句与传输的总字数或总句数的比值。

第二章 模拟信号的数字化传输

§ 2-1 引言

在第一章中我们曾经提到过数字通信的许多优点,那些都是模拟通信无法与它比拟的,所以多年来人们一直力图发展数字通信。从电报通信发明以后,在发展模拟通信的同时,也提出了用数字信号传输模拟消息的问题,这就是脉冲编码通信。但是,由于多年来电子管设备庞大,功耗也太大,所以迟迟得不到发展。随着半导体技术的出现,特别是近年来集成电路的出现和发展,使数字通信的应用越来越广泛。

目前,把模拟信号数字化,进行数字通信的方式大致分两大类:一类是脉冲编码调制(PCM)通信;另一类则是增量调制(ΔM 或 DM)通信。其实,增量调制也是脉冲编码调制的一种特殊形式,只是由于它们在原理与技术上都有明显区别,才把它们分成两种不同的调制方式来对待的。

当利用脉冲编码调制(PCM)方式来传输模拟信号时,在发送端需要经过抽样、量化和编码等步骤,把模拟信号变换成数字信号;而在接收端则必须通过相应地逆变换,以便从数字信号再恢复成模拟信号。图2-1表示了一个PCM系统的原理框图。

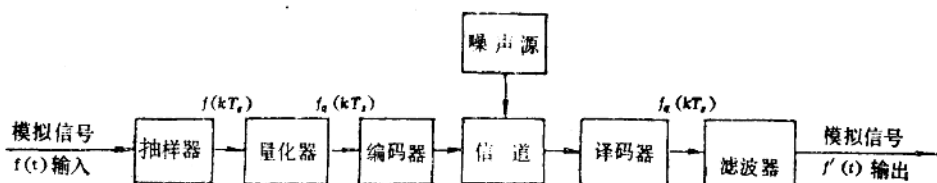


图 2-1 PCM系统原理方框图

对于 ΔM 系统,它传送的是信息的增量。而一般的增量调制,只编一位二进制码,因此编码设备就变得特别简单。

应该着重指出,PCM和 ΔM 都是属于信源编码的范畴的。因为所谓信源编码,实际上就是为解决模拟信号的数字化和提高数字信号传输的有效性而采取的编码措施,也可以说是对于信源消息按一定规律通过编码的方法进行变换的过程。粗略地说,信源编码就是用二进制(或多进制)的代码来合理地替代原始消息的过程。

本章着重讲述PCM和 ΔM 的工作原理和性能分析。在此基础上,再介绍增量脉冲编码调制(DPCM)的原理与过程,最后还要简单介绍一下关于信源有效性编码的问题。

§ 2-2 脉冲编码调制(PCM)

在图2-1中已给出了PCM的原理框图,下面将逐个介绍它们的工作原理与过程。

一、抽样

根据抽样定理可知,一个带限(存在最高截止频率 f_c)的连续信号,可以用每秒钟均匀

地传送多于或等于 $2f_c$ 个信号样值来代替（不需要传送无限多点的值）而不丢失消息。这是模拟信号能够通过数字通信方式传输的最基本的理论依据。它是一个重要的定理，只是因为有关的信号传输原理课程中已详细地证明和论述过本定理和有关问题，这里不再阐述。

依据抽样定理，对带限连续信号在时间上进行离散化的过程就叫抽样。完成抽样任务的抽样器，一般都是由乘法电路组成的。如图 2-2 所示。图中， $u(t)$ 是被抽样的模拟信号， $S_T(t)$ 是周期为 T_s 的开关脉冲序列， $u_T(t)$ 是抽样输出信号。

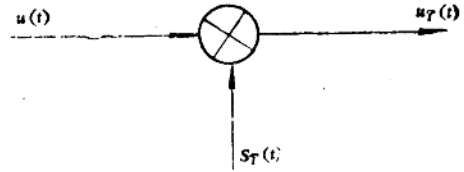


图 2-2 抽样电路模型

二、线性量化及量化噪声

（一）分层的基本原理

模拟信号经过抽样以后，在时间上是离散化了，但幅值仍然是连续的。只有再经过分层处理，方可形成时间和幅度都是离散的数字信号。量化的实现过程如图 2-3 所示，它是用“四舍五入”的近似方法来实现的。其中，图 2-3(a) 是用阶梯波表示一个连续信号；而图 2-3(b) 则是把抽样过的样值信号用“四舍五入”的方法取为预先规定的有限个值。这种取有限个数值近似地表示某一连续信号的方法就叫量化，也就是分层，所以说量化是用分层的方法来实现的。也可以说分层就是量化。

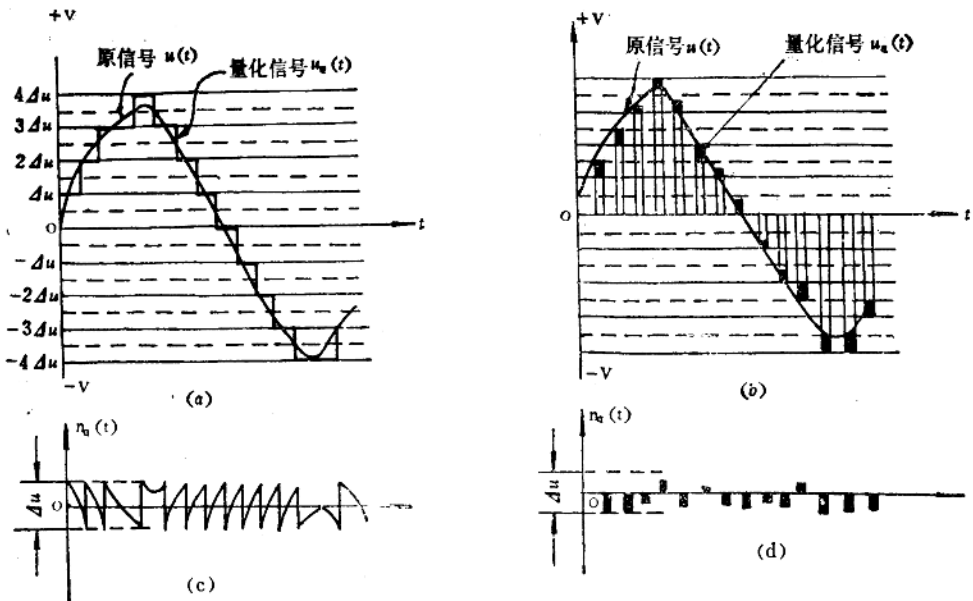


图 2-3 信号的量化及量化误差

如果把所研究的幅度范围定为 $-V \sim +V$ 的信号分作 M 级，则每级级差，也就是分层间隔 Δu 就能表示成

$$\Delta u = \frac{2V}{M} \quad (2-1)$$

Δu 通常叫量化阶, 而 M 就是分层数, 也叫量化级数。对相邻两级之间的信号量化值的取值, 就以 $\frac{1}{2}\Delta u$ 为判别标准 (也叫判决电平, 如图2-3中虚线所示)。如果信号值在某一级以上, 且大于 $\frac{1}{2}\Delta u$, 就取比这一级更高一级的数值, 相当于“大于五者入”; 如果信号在某一级以上, 但小于 $\frac{1}{2}\Delta u$ 时, 就取该级数值, 相当于“小于五者舍”。经过这样的分层处理, 模拟信号就变成了只有有限个数值的数字信号了。

(二) 线性量化及量化噪声

由式 (2-1) 可知, 量化间隔 Δu 是一个不变的常数, 也就是说在整个信号幅度范围内信号分级的级差是相等的, 我们把这样的量化叫均匀量化, 也叫线性量化。线性量化的量化阶 Δu 只与信号幅度范围 $2V$ 及分层数 M 有关, 而且每个量化分层的量化电平, 都设置在各分层的中间。图2-3 就是线性量化的具体例子, 其中, 输出的阶梯信号 $u_q(t)$ 与输入信号 $u(t)$ 的差值就是量化误差 $n_q(t)$, 也叫量化噪声 (严格地说, 此噪声与平时我们所说的噪声是有区别的。如平时我们所说的噪声并不由信号值来决定, 而这里却是与信号值的大小有关)。图

2-3(c) 和 (d) 就是量化噪声。需要指出的是图 2-3 是以 $\pm \frac{\Delta u}{2}$ 、 $\pm \frac{3\Delta u}{2}$ 、 $\pm \frac{5\Delta u}{2}$ 、

$\pm \frac{7\Delta u}{2}$ 为判决电平, 以 0 、 $\pm \Delta u$ 、 $\pm 2\Delta u$ 、 $\pm 3\Delta u$ 、 $\pm 4\Delta u$ 为量化电平的情况。也有以 0 、

$\pm \Delta u$ 、 $\pm 2\Delta u$ 、 $\pm 3\Delta u$ 、 $\pm 4\Delta u$ 作为判决电平, 以 $\pm \frac{\Delta u}{2}$ 、 $\pm \frac{3\Delta u}{2}$ 、 $\pm \frac{5\Delta u}{2}$ 、 $\pm \frac{7\Delta u}{2}$ 作为量

化电平的情况、读者可以自己画出来。

在均匀量化时, 量化器的输入, 输出关系可以用量化特性来表示, 如图2-4所示。其中, (a)、(b) 两图表示均匀量化特性, 它们的横坐标表示输入幅度值 u , 而纵坐标则表示量化器输出幅度值 u_q , 斜线表示未经量化连续取值的输入输出关系, 阶梯波形则表示经过量化后的对应关系。这里, (a) 和 (b) 两图分别表示了两种判决值和量化值的对应关系, 其中(a)

是以 $\pm \frac{\Delta u}{2}$ 、 $\pm \frac{3\Delta u}{2}$ 、 $\pm \frac{5\Delta u}{2}$ 、……为判决值, 以 0 、 $\pm \Delta u$ 、 $\pm 2\Delta u$ 、 $\pm 3\Delta u$ 、……为

量化值的; 而 (b) 则是以 0 、 $\pm \Delta u$ 、 $\pm 2\Delta u$ 、……为判决值, 以 $\pm \frac{\Delta u}{2}$ 、 $\pm \frac{3\Delta u}{2}$ 、……为量

化值的。实际系统中, 多采用后一种量化特性。图 2-4(c) 和 (d) 分别表示 (a) 和 (b) 两组量化特性曲线的对应量化误差特性曲线, 它是量化前后的电平之差, 即

$$n_q = u_i - u \quad (2-2)$$

一般情况下, 输入信号是一时间函数 $u(t)$, 所以量化误差也必然是一个时间函数 $n_q(t)$, 于是

量化误差也可以写成

$$n_1(t) = u_1(t) - u(t) \quad (2-3)$$

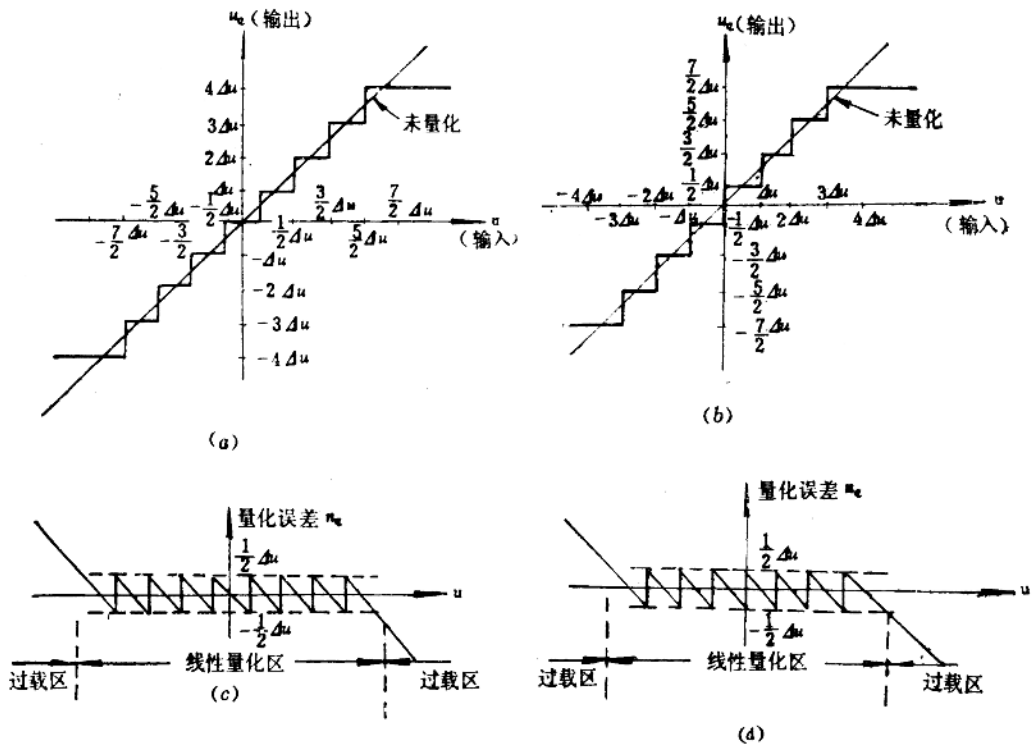


图 2-4 均匀量化特性及其量化误差

由图2-4可以看出，输入信号在量化范围内，即不超过线性量化区时，由于量化是采用“四舍五入”的方法实现的，所以量化误差的幅度不会超过 $1/2$ 个量化阶的值，即

$$|n_1(t)| \leq 1/2 \Delta u \quad (2-4)$$

当输入信号超出线性量化范围时，量化器的输出幅度就不再跟随输入信号作相应的变化，而被钳位在量化输出的最高电平上（绝对值），这就叫过载，相应的区域叫过载区。下面，我们就按这两种情况来研究量化噪声。

1. 非过载量化噪声 在线性量化区，也就是非过载区，被均匀地划分成 M 个量化阶。如果设信号的概率密度为 $p(u)$ ，则在任一个量化阶（例如第 k 个量化阶）内，其量化噪声功率（即误差的均方值）应为

$$\overline{N_1} = \overline{(u - u_{1k})^2} = \int_{u_{1k} - \frac{\Delta u}{2}}^{u_{1k} + \frac{\Delta u}{2}} (u - u_{1k})^2 p(u) du \quad (2-5)$$

如果量化分层数 M 很大，亦即阶距 Δu 很小，则抽样值在这一区间的概率密度 $p(u)$ 可以近似地看成一个定值 $p(u_{1k})$ ，它代表着量化电平 u_{1k} 处的概率密度。用 $p(u_{1k})$ 代替 $p(u)$ ，则式(2-5)积分后得第 k 个区间的量化噪声平均功率为

$$\begin{aligned}\overline{N}_1 &= p(u_{11}) \int_{u_{11} - \frac{\Delta u}{2}}^{u_{11} + \frac{\Delta u}{2}} (u - u_{11})^2 du \\ &= \frac{1}{12} p(u_{11}) \Delta u^3\end{aligned}\quad (2-6)$$

这是一个量化阶内的噪声功率，由于一共分成了 M 个量化阶，所以在非过载区的量化噪声总平均功率 N_1' 应由求和得到，即

$$N_1' = \sum_{k=1}^M \frac{1}{12} p(u_{1k}) \Delta u^3 = \frac{\Delta u^2}{12} \sum_{k=1}^M p(u_{1k}) \Delta u \quad (2-7)$$

式中 $\sum_{k=1}^M p(u_{1k}) \Delta u$ 是信号在线性量化区的总概率。如果适当的选择量化器范围 (V 值)，可以做到在线性量化区之外，信号出现的概率非常之小，这样，就能认为 $\sum_{k=1}^M p(u_{1k}) \Delta u = 1$ ，于是式

(2-7) 就可以写成

$$N_1' = \frac{\Delta u^2}{12} \quad (2-8)$$

由式 (2-8) 可以看出，非过载均匀量化噪声平均功率与量化的级差 Δu (即分层间隔，这是常数) 的平方成正比，而与输入信号的统计特性无关。如将式 (2-1) 代入式 (2-8) 可得

$$N_1' = \frac{V^2}{3M^2} \quad (2-9)$$

这就是非过载区量化噪声功率的又一表达式。

2. 过载量化噪声 由于 $+V$ 和 $-V$ 是量化器的最高量化电平 ($V = \frac{1}{2} \Delta u M$)，因此，当输入信号电平超过这一电平时，就出现限幅现象而使输出产生失真。我们称这种失真为过载失真。习惯上称由此产生的失真分量为过载噪声。

如果输入信号的概率密度函数为 $p(u)$ ，则发生过载的概率为

$$P(|u| > V) = 2 \int_V^\infty p(u) du \quad (2-10)$$

在过载区内，量化误差应该是 $u - V$ 。其中 V 为确知量。我们仍然定义在这一区域内量化器过载失真功率是输入与输出之间误差的均方值，从而可得过载噪声功率为

$$N_1'' = 2 \int_V^\infty (u - V)^2 p(u) du \quad (2-11)$$

由此可见，过载噪声功率是与输入信号的统计特性有关的。所以，要计算过载噪声，必须首先知道输入信号的统计特性，这一点是与非过载量化噪声不同的。例如，我们已知话音信号的概率密度函数为

$$p(u) = \frac{1}{\sqrt{2} u_s} e^{-\sqrt{2} |u/u_s|} \quad (2-12)$$

式中, u_s 是输入信号的均方根值, 把式 (2-12) 代入式 (2-11), 就得到话音信号的过载量化噪声功率为

$$N_q'' = u_s^2 e^{-\frac{\sqrt{2}V}{u_s}} \quad (2-13)$$

于是, 对于话音信号量化的总噪声功率 N_q 就可以写成:

$$N_q = N_q' + N_q'' = \frac{V^2}{3M^2} + u_s^2 \cdot e^{-\sqrt{2}V/u_s} \quad (2-14)$$

(三) 均匀量化的量化器输出信号——失真功率比

如上所述, u_s 是信号的均方根值, 则信号的功率就应该是 u_s^2 。当分级数 M 很大时, 可以认为量化器输出的信号功率 S_q 与量化器的输入信号功率 S 近似相等, 即 $S_q \approx S = u_s^2$ 。所以, 量化器输出信号与量化噪声的功率比应为

$$\frac{S}{N_q} = \frac{u_s^2}{V^2/3M^2 + u_s^2 e^{-\sqrt{2}V/u_s}} = \frac{1}{c^2/3M^2 + e^{-\sqrt{2}c}} \quad (2-15)$$

式中, $c = \frac{V}{u_s}$, 是选定的最大量化幅度与信号的均方根值 (即有效值) 之比。用对数表示, 可以写成

$$\left(\frac{S}{N_q}\right)_{dB} = -10 \lg \left(\frac{c^2}{3M^2} + e^{-\sqrt{2}c} \right) \quad (2-16)$$

当 $c > 10$ 时, 即当是小信号的时候, 式中括号内的第二项 $e^{-\sqrt{2}c}$ 可以略去不计, 并且代入关系式 $M = 2^n$ (这里 n 是码组编码位数), 则

$$\left(\frac{S}{N_q}\right)_{dB} \approx 4.8 + 6n - 20 \lg c \quad (2-17)$$

由式 (2-17) 可见, 在小信号的情况下, 每增加一位二进制码, 信噪比就能增加 6 分贝。同时, 量化信噪比还随着信号减小而下降。且信号减小的 dB 数, 即 V/u_s 增加的 dB 数, 就等于输出信噪比下降的 dB 数。

当 $c < 10$ 时, 可以略去式 (2-16) 括号中的第一项, 这时式 (2-16) 可以用下式来近似

$$\left(\frac{S}{N_q}\right)_{dB} \approx 6.1c \quad (2-18)$$

这种情况是出现在过载失真占主要成分的时候。我们应尽量使 $c < 10$ 出现的概率很小才行。

图 2-5 画出了上述输出信号量化噪声功率比与 $c = \frac{V}{u_s}$ 的关系曲线。

还要特别指出的一点是, 在实际测量输出信号与噪声的功率比时, 大多是用输入正弦音频信号来进行的。例如输入正弦音频信号的峰值幅度为量化范围的一半 (即等于 V) 时, 它必然不产生过载失真。这样, 式 (2-16) 中的第二项就可以去掉, 即相当于式 (2-17) 中的情况。这时用 $c = V/u_s = \sqrt{2}$ 代入到式 (2-17) 中去, 则得到

$$\left(\frac{S}{N_q}\right)_{dB} = 4.8 + 6n - 20 \lg \sqrt{2} = 6n + 1.8 \quad (2-19)$$

显然, 式 (2-19) 是临界不过载的情况, 也就是信噪比最大的情况, 即输入正弦信号量化时, 量化器输出的最大信噪比是

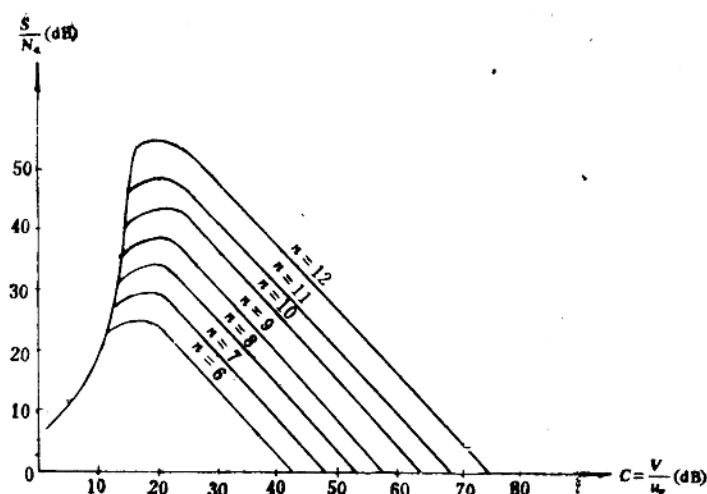


图 2-5 语音信号量化信噪比与 c 的关系曲线

$$\left(\frac{S}{N_q}\right)_{\text{dB} \cdot \max} = 6n + 1.8 \quad (2-20)$$

对于幅度 u 比 V 小的任一正弦信号, 其量化信噪比应该是

$$\begin{aligned} \left(\frac{S}{N_q}\right)_{\text{dB}} &= 10 \lg \frac{\left(\frac{u}{\sqrt{2}}\right)^2}{\frac{1}{12} (\Delta u)^2} = 10 \lg \left[\frac{\frac{V^2}{2}}{\frac{1}{12} (\Delta u)^2} \cdot \frac{u^2}{V^2} \right] \\ &= 6n + 1.8 + 20 \lg \frac{u}{V} \\ &= \left(\frac{S}{N_q}\right)_{\text{dB} \cdot \max} + 20 \lg \frac{u}{V} \end{aligned} \quad (2-21)$$

可见, 当输入正弦信号幅度 $u = V$ 时, 式中第二项 $20 \lg \frac{u}{V} = 0$, 这时的量化信噪比就等于

$\left(\frac{S}{N_q}\right)_{\text{dB} \cdot \max}$, 随着正弦信号幅值 u 的下降, 信噪比就跟着下降, 当下降到系统所允许的最小信噪比时, 对应的 u 就是系统所允许的最小输入信号。这时 u 所允许的变化范围, 就代表了正弦信号的动态范围。

在数字语音通信系统中, 由于语音信号功率的动态范围约有40dB, 所以当小信号时, $c = \frac{V}{u}$ 必然很大, 这时的量化输出信噪比也必然较低。为保证在小信号量化时信噪比指标不低于15~20dB (如再低, 语音质量就很差)。由图2-5可以看出, 这时编码码组的位数 n 必须大于10才行, 否则就不能保证语音的清晰度。之所以有这样的结果是因为等阶距量化所造成的。由于量化噪声的大小与信号电平无关, 只取决于量化级数 M 和信号的最大取值范围。也就是说量化噪声 N_q 是不变的, 当小信号时其量化信噪比 $\left(\frac{S}{N_q}\right)_{\text{dB}} = \left(\frac{u^2}{N_q}\right)_{\text{dB}}$ 当然就