

## 第3章 数字声音编码

声音是携带信息的重要媒体,是多媒体技术研究中的一个重要内容。对话音信号进行压缩可降低对存储容量和传输带宽的要求,ITU-TSS 为此制定了并且继续制定一系列话音(speech)数据编译码标准<sup>[1]</sup>,包括 G. 711、G. 722. 1、G. 723. 1、G. 726、G. 729 等。本章将首先介绍声音的基础知识,然后重点介绍话音编码的基本思想<sup>[2][3][4]</sup>,详细计算则留给具体设计编译码器软硬件的读者去研究,在本章所列参考文献和站点中可找到相关的文献资料。

### 3.1 声音简介

#### 3.1.1 声音是什么

声音是听觉器官对声波的感知,而声波是通过空气或其他媒体传播的连续振动。声音的强弱体现在声波压力的大小上,音调的高低体现在声音的频率上。声音用电表示时,声音信号在时间和幅度上都是连续的模拟信号,如图 3-1 所示。声波具有普通波所具有的特性,例如反射(reflection)、折射(refraction)和衍射(diffraction)等。



图 3-1 声音是一种连续的波

声音的种类繁多,如话音、乐器声、动物发出的声音、机器产生的声音以及自然界的雷声、风声和雨声等。从物理学的角度来看,声音是由许多频率不同的信号组成的,将这种声音信号称为复合信号,而将单一频率的信号称为分量信号。

#### 3.1.2 声音的频率范围

描述声音信号的两个基本参数是频率和幅度。信号的频率是指信号每秒钟变化的次数,用 Hz 表示。例如,大气压的变化周期很长,以小时或天数计算,一般人不容易感到这种气压信号的变化,更听不到这种变化。对于频率为几 Hz 到 20Hz 的空气压力信号,人们也听不到,如果它的强度足够高,也许可以感觉到。人们把频率小于 20Hz 的信号称为亚音信号,或称为次音信号(subsonic)。

信号频率为 10~20000Hz 的信号称为高保真声音(high-fidelity audio);信号频率为 20Hz~20kHz 的信号称为声音(audio/sound)信号,并将 20Hz~20kHz 范围的频率都称为(声)音频(率),这就是“音频”的来历。虽然人的发音器官发出的声音频率大约是 80~3400Hz,但男人说话的信号频率通常为 300~3000Hz,而女人说话的信号频率通常为 300~3400Hz,因此人们把在这种频率范围的信号称为话音(speech/voice)信号。

信号频率高于 20kHz 的信号称为超音信号或称为超声波(ultrasonic),这种信号具有很强的方向性,而且可以形成波束,在工业上得到广泛的应用,如超声波探测仪、超声波焊接设

备等就是利用这种信号。

人们是否都能听到声音信号,这主要取决于各个人的年龄和耳朵的特性。一般来说,人的听觉器官能感知的声音频率大约在  $20\sim 20000\text{Hz}$  之间,在这种频率范围里感知的声音幅度大约在  $0\sim 120\text{dB}$  之间。除此之外,人的听觉器官对声音的感知还有一些重要特性,这些特性将在第 9 章中介绍,它们在声音数据压缩中已经得到广泛的应用。

综上所述,在科学技术文献和产品中,人们常见的声音的频率范围归纳如下:

- 高保真声音(high-fidelity audio):  $10\sim 20000\text{Hz}$ ;
- 声音(audio/sound):  $20\sim 20000\text{Hz}$ ;
- 话音(speech/voice):  $300\sim 3400\text{Hz}$ ;
- 亚音(subsonic):  $<20\text{Hz}$ ;
- 超声(ultrasonic):  $>20000\text{Hz}$ 。

## 3.2 声音信号数字化

### 3.2.1 从模拟过渡到数字

回顾历史,大多数电信号的处理一直是用模拟元部件(如晶体管、变压器、电阻、电容等)对模拟信号进行处理。但是,开发一个具有较高精度而且几乎不受环境变化影响的模拟信号处理元部件是相当困难的,而且成本也很高。

如果把模拟信号转变成数字信号,用数字来表示模拟量,对数字信号做计算,那么难点就发生了转移,把开发模拟运算部件的问题转变成开发数字运算部件的问题,这就出现了数字信号处理器(digital signal processor,DSP)。DSP 与通用微处理器相比,除了它们的结构不同外,其基本差别是,DSP 有能力响应和处理采样模拟信号得到的数据流,如做乘法和累加求和运算。

在数字域而不在模拟域中做信号处理的主要优点是:首先,数字信号计算是一种精确的运算方法,它不受时间和环境变化的影响;其次,表示部件功能的数学运算不是物理上实现的功能部件,而是用相对容易实现的数学运算去模拟;此外,可以对数字运算部件进行编程,如欲改变算法或改变某些功能,还可对数字部件进行再编程。

### 3.2.2 模拟信号与数字信号

话音信号是典型的连续信号,不仅在时间上是连续的,而且在幅度上也是连续的。在时间上“连续”是指在一个指定的时间范围里,声音信号的幅值有无穷多个。在幅度上“连续”是指幅度的数值有无穷多个。我们把在时间和幅度上都是连续的信号称为模拟信号。

在某些特定的时刻对这种模拟信号进行测量叫做采样(sampling),由这些特定时刻采样得到的信号称为离散时间信号。由于用这种方法采样得到的幅值是无穷多个实数值中的一个,因此幅度还是连续的。如果把信号幅度取值的数目加以限定,这种由有限数目的数值组成的信号就称为离散幅度信号。

例如,假设输入电压的范围是  $0.0\sim 0.7\text{V}$ ,并假设它的取值只限定在  $0, 0.1, 0.2, \dots, 0.7$  共 8 个值。如果采样得到的幅度值是  $0.123\text{V}$ ,它的取值就应算作  $0.1\text{V}$ ;如果采样得到

的幅度值是 0.26V,它的取值就算作 0.3V,这种数值就称为离散数值。我们把时间和幅度都用离散的数字表示的信号称为数字信号。

### 3.2.3 声音信号数字化

#### 1. 数字化的概念

声音进入计算机的第一步就是数字化,数字化实际上就是采样和量化。如前所述,连续时间的离散化通过采样来实现,就是每隔相等的一段时间采样一次,这种采样称为均匀采样(uniform sampling);连续幅度的离散化通过量化(quantization)来实现,就是把信号的强度划分成一小段一小段,如果幅度的划分是等间隔的,就称为线性量化,否则就称为非线性量化。图 3-2 表示了声音数字化的概念。

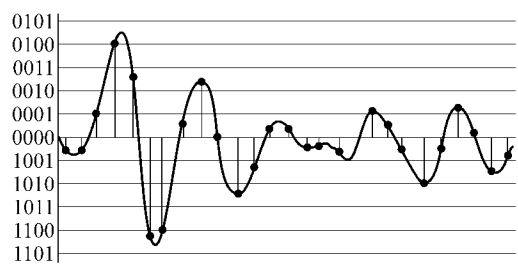


图 3-2 声音的采样和量化

声音数字化需要回答两个问题:(1)每秒钟需要采集多少个声音样本,也就是采样频率( $f_s$ )是多少;(2)每个声音样本的位数(bit per sample, bps)应该是多少,也就是量化精度。

#### 2. 采样频率

采样频率的高低是根据奈奎斯特理论(Nyquist theory)和声音信号本身的最高频率决定的。奈奎斯特理论指出,采样频率不应低于声音信号最高频率的两倍,这样就能把以数字表达的声音还原成原来的声音,这叫做无损数字化(lossless digitization)。采样定律用公式表示为:

$$f_s \geq 2f \quad \text{或者} \quad T_s \leq T/2$$

其中, $f$ 为被采样信号的最高频率。

读者可这样来理解奈奎斯特理论:声音信号可看成是由许多正弦波组成的,一个振幅为  $A$ 、频率为  $f$  的正弦波至少需要两个采样样本表示,因此,如果一个信号中的最高频率为  $f_{\max}$ ,采样频率最低要选择  $2f_{\max}$ 。例如,话音信号的最高频率约为 3.4kHz,采样频率就选为 8kHz。

#### 3. 采样精度

样本大小是用每个声音样本的位数(即 bps)表示的,它反映度量声音波形幅度的精度。例如,每个声音样本用 16 位(2 字节)表示,测得的声音样本值是在  $[0 \sim 65535]$  范围里的数,它的精度就是输入信号的  $1/65536$ 。精度是在模拟信号数字化过程中度量模拟信号的最小单位,因此也称“量化阶(quantization step size)”。例如,将  $0 \sim 1V$  的电压用 256 个数表示时,它的量化阶等于  $1/256V$ 。

样本位数的大小影响到声音的质量,位数越多,声音质量越高,所需存储空间也越多;位

数越少,声音质量就越低,所需存储空间也越少。

采样精度的另一种表示方法是信号噪声比,简称为信噪比(signal-to-noise ratio,SNR),并用下式计算:

$$SNR = 10\lg\left[\frac{(V_{signal})^2}{(V_{noise})^2}\right] = 20\lg\left(\frac{V_{signal}}{V_{noise}}\right)$$

其中, $V_{signal}$ 表示信号电压, $V_{noise}$ 表示量化噪声电压,就是模拟信号的采样值和与它最接近的数字数值之间的差值,SNR 的单位为分贝(dB)。

例如,假设信号电压  $V_{signal}=0.7V$ ,如果采样精度用 16 位表示,则最大的量化噪声电压  $V_{noise}=0.7\times[1/(2^{16})]V$ ,代入上式计算得到的信噪比  $SNR\approx 96(dB)$ 。

假设采样精度的位数为  $n$  位,信噪比可写成:

$$SNR = 20\lg\left(\frac{V_{signal}}{V_{noise}}\right) = 20\lg\left(\frac{V_{signal}}{V_{signal}(1/2^n)}\right) = 20\lg(2^n) \approx 6.02n$$

同样,如果采样精度用 8 位表示,则信噪比  $SNR\approx 48(dB)$ 。我们可以这样说,采样精度每增加 1 位,信噪比就增加 6dB。

3.2.4 声音质量与数据率

根据声音的频带,通常把声音的质量分成 5 个等级,由低到高分别是电话(telephone)、调幅(amplitude modulation,AM)广播声音、调频(frequency modulation,FM)广播声音、激光唱盘(CD-Audio) 声音和数字录音带(digital audio tape,DAT) 声音。在这 5 个等级中,使用的采样频率、样本精度、通道数和数据率见表 3-1。

表 3-1 声音质量和数据率

| 质量  | 采样频率<br>(kHz) | 样本精度<br>(bit/s) | 单道声/<br>立体声 | 数据率(kb/s)<br>(未压缩) | 频率范围       |
|-----|---------------|-----------------|-------------|--------------------|------------|
| 电话* | 8             | 8               | 单道声         | 64.0               | 200~3400Hz |
| AM  | 11.025        | 8               | 单道声         | 88.2               | 20~15000Hz |
| FM  | 22.050        | 16              | 立体声         | 705.6              | 50~7000Hz  |
| CD  | 44.1          | 16              | 立体声         | 1411.2             | 20~20000Hz |
| DAT | 48            | 16              | 立体声         | 1536.0             | 20~20000Hz |

\* 电话使用  $\mu$  律编码,动态范围为 13 位,而不是 8 位,见 3.4 节。

3.3 声音质量的 MOS 评分标准

声音质量的评价是一个很困难的问题。前面介绍了用声音信号的带宽来衡量声音的质量,等级由高到低依次是 DAT、CD、FM、AM 和数字电话。此外,声音质量的度量还有两种基本的方法:一种是客观质量度量;另一种是主观质量度量。评价语音质量时,有时同时采取两种方法评估,有时以主观质量度量为主。

声音客观质量的度量主要用信噪比(signal to noise ratio,SNR),详细计算请参看文献[5]。与用 SNR 客观质量度量相比,可以说人的感觉(如听觉、视觉等)更具有决定意义,感

觉上的、主观上的测试应该成为评价声音和图像质量不可缺少的部分。有的学者认为,在语音和图像信号编码中使用主观质量度量比使用客观质量度量更加恰当,更有意义。然而,可靠的主观度量值也比较难获得,所获得的值也是一个相对值。

主观度量声音质量的方法类似于电视节目中的歌手比赛,由评委对每个歌手的表现进行评分,然后求出平均值。对声音质量的度量也可使用类似的方法,召集若干实验者,由他们对声音质量的好坏进行评分,求出平均值作为对声音质量的评价。这种方法称为主观平均判分法,所得的分数称为主观平均分(mean opinion score,MOS)。

现在,对声音主观质量度量比较通用的标准是 5 分制,各档次的评分标准见表 3-2。

表 3-2 声音质量 MOS 评分标准

| 分 数 | 质量 级 别       | 失 真 级 别   |
|-----|--------------|-----------|
| 5   | 优(Excellent) | 无察觉       |
| 4   | 良(Good)      | (刚)察觉但不讨厌 |
| 3   | 中(Fair)      | (察觉)有点讨厌  |
| 2   | 差(Poor)      | 讨厌但不反感    |
| 1   | 劣(Bad)       | 极讨厌(令人反感) |

### 3.4 脉冲编码调制(PCM)

#### 3.4.1 PCM 的概念

脉冲编码调制(pulse code modulation,PCM)是概念上最简单、理论上最完善的编码系统,是最早研制成功、使用最为广泛的编码系统,但也是数据量最大的编码系统。

PCM 的编码原理比较直观和简单,它的原理框图如图 3-3 所示。在这个编码框图中,它的输入是模拟声音信号,它的输出是 PCM 样本。图中的“防失真滤波器”是一个低通滤波器,用来滤除声音频带以外的信号;“波形编码器”可理解为“采样器”,“量化器”可理解为“量化阶大小(step-size)”生成器或称为“量化间隔”生成器。

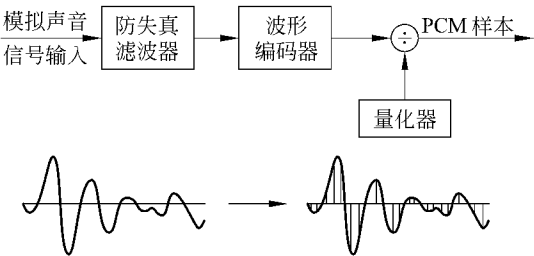


图 3-3 PCM 编码框图

前面已经介绍,声音数字化有两个步骤:第一步是采样,就是每隔一段时间间隔读一次声音的幅度;第二步是量化,就是把采样得到的声音信号幅度转换成数字值。量化有好几种方法,但可归纳成两类:一类称为均匀量化;另一类称为非均匀量化。采用的量化方法不

同,量化后的数据量也就不同。因此,可以说量化也是一种压缩数据的方法。

### 3.4.2 均匀量化

如果采用相等的量化间隔对采样得到的信号进行量化,那么这种量化称为均匀量化。

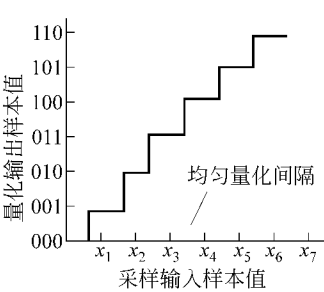


图 3-4 均匀量化

均匀量化就是采用相同的“等分尺”来度量采样得到的幅度,也称为线性量化,如图 3-4 所示。量化后的样本值  $Y$  和原始值  $X$  的差  $E=Y-X$  称为量化误差或量化噪声。

用这种方法量化输入信号时,无论对大的输入信号还是小的输入信号一律都采用相同的量化间隔。为了适应幅度大的输入信号,同时又要满足精度要求,就需要增加样本的位数。但是,对话音信号来说,大信号出现的机会并不多,增加的样本位数就没有充分利用。为了克服这个不足,就出现了非均匀量化的方法,也叫做非线性量化。

### 3.4.3 非均匀量化

非线性量化的基本想法是,对输入信号进行量化时,大的输入信号采用大的量化间隔,小的输入信号采用小的量化间隔,如图 3-5 所示。这样就可以在满足精度要求的情况下用较少的位数来表示。声音数据还原时,采用相同的规则。

在非线性量化中,采样输入信号幅度和量化输出数据之间定义了两种对应关系:一种称为  $\mu$  律压扩(companding)算法;另一种称为  $A$  律压扩算法。

#### 1. $\mu$ 律压扩

$\mu$  律( $\mu$ -Law)压扩(G. 711)主要用在北美和日本等地区的数字电话通信中,按下面的式子确定量化输入和输出的关系:

$$F_{\mu}(x) = \operatorname{sgn}(x) \frac{\ln(1 + \mu |x|)}{\ln(1 + \mu)}$$

式中:  $x$  为输入信号幅度,规格化成  $-1 \leq x \leq 1$ ;  $\operatorname{sgn}(x)$  为  $x$  的极性;  $\mu$  为确定压缩量的参数,它反映最大量化间隔和最小量化间隔之比,取  $100 \leq \mu \leq 500$ 。

由于  $\mu$  律压扩的输入和输出关系是对数关系,所以这种编码又称为对数 PCM。具体计算时,用  $\mu=255$ ,把对数曲线变成 8 条折线以简化计算过程。详细计算请看参考文献[5]、[6]。

#### 2. $A$ 律压扩

$A$  律( $A$ -Law)压扩(G. 711)主要用在欧洲和中国大陆等地区的数字电话通信中,按下面的式子确定量化输入和输出的关系:

$$F_A(x) = \operatorname{sgn}(x) \frac{A |x|}{1 + \ln A} \quad 0 \leq |x| \leq 1/A$$

$$F_A(x) = \operatorname{sgn}(x) \frac{1 + \ln(A |x|)}{1 + \ln A} \quad 1/A < |x| \leq 1$$

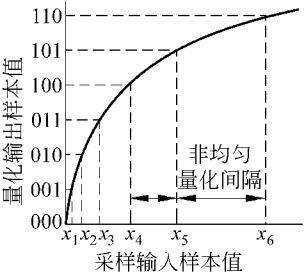


图 3-5 非均匀量化

式中： $x$  为输入信号幅度，规格化成  $-1 \leq x \leq 1$ ； $\text{sgn}(x)$  为  $x$  的极性； $A$  为确定压缩量的参数，它反映最大量化间隔和最小量化间隔之比。

$A$  律压扩的前一部分是线性的，其余部分与  $\mu$  律压扩相同。具体计算时， $A=87.56$ ，为简化计算，同样把对数曲线部分变成折线。详细计算请看参考文献[5]、[6]。

对于采样频率为 8kHz，样本精度为 13 位、14 位或者 16 位的输入信号，使用  $\mu$  律压扩编码或者使用  $A$  律压扩编码，经过 PCM 编码器之后每个样本的精度为 8 位，输出的数据率为 64kb/s。这个数据就是 CCITT 推荐的 G. 711 标准：话音频率脉冲编码调制(Pulse Code Modulation (PCM) of Voice Frequencies)。

## 3.5 PCM 在通信中的应用

PCM 编码早期主要用于话音通信中的多路复用。过去在电信网中传输媒体费用约占总成本的 65%，设备费用约占总成本的 35%，因此提高线路利用率是一个重要课题。提高线路利用率通常有两种方法：频分多路复用(frequency-division multiplexing, FDM)和时分多路复用(time-division multiplexing, TDM)。

### 3.5.1 频分多路复用

频分多路复用是在一条通信线路上使用不同频段同时传送多个独立信号的通信方法，它是模拟载波通信用的主要方法。它的核心思想是把传输信道的频带分成几个窄带，每个窄带传送一路信号。例如，一个信道的频带为 1400Hz，把这个信道分成 4 个子信道(subchannels)：820~990Hz，1230~1400Hz，1640~1810Hz 和 2050~2220Hz，相邻子信道间有一个相距 240Hz 的保护带，用于确保子信道之间不产生相互干扰。每对用户仅占用其中的一个子信道。

### 3.5.2 时分多路复用

时分多路复用是在同一条通信线路上使用不同时段“同时”传送多个独立信号的通信方法，它是数字通信的主要方法。时分多路复用的核心思想是将时间分成等间隔的时段，为每对用户指定一个时间间隔，每个间隔传输信号的一部分，这样就可使许多用户同时使用一条传输线路。例如，话音信号的采样频率  $f=8000\text{Hz/s}$ ，它的采样周期  $=125\mu\text{s}$ ，这个时间称为 1 帧(frame)。在这个时间里可容纳的话路数有两种规格：24 路制(如图 3-6 所示)和 30 路制。

(1) 24 路制的重要参数如下：

- 每秒钟传送 8000 帧，每帧  $125\mu\text{s}$ 。
- 12 帧组成 1 复帧(用于同步)。
- 每帧由 24 个时间片(信道)和 1 位同步位组成。
- 每个信道每次传送 8 位代码，1 帧有  $24 \times 8 + 1 = 193$ (位)。
- 数据传输率  $R=8000 \times 193 = 1544\text{kb/s}$ 。
- 每一个话路的数据传输率  $=8000 \times 8 = 64\text{kb/s}$ 。



远距离数字通信线路”和 E1 等级。T1/E1、T2/E2、T3/E3、T4/E4 和 T5/E5 的数据传输率见表 3-3。

表 3-3 多次复用的数据传输率①

| 数字网络等级 |            | T1/E1 | T2/E2 | T3/E3  | T4/E4   | T5/E5   |
|--------|------------|-------|-------|--------|---------|---------|
| 美国     | 64kb/s 话路数 | 24    | 96    | 672    | 4032    |         |
|        | 总传输率(Mb/s) | 1.544 | 6.312 | 44.736 | 274.176 |         |
| 欧洲     | 64kb/s 话路数 | 30    | 120   | 480    | 1920    | 7680    |
|        | 总传输率(Mb/s) | 2.048 | 8.448 | 34.368 | 139.264 | 560.000 |
| 日本     | 64kb/s 话路数 | 24    | 96    | 480    | 1440    |         |
|        | 总传输率(Mb/s) | 1.544 | 6.312 | 32.064 | 97.728  |         |

3.6 增量调制与自适应增量调制

由于 DM 编码的简单性,它已成为数字通信和压缩存储的一种重要方法,很多人对最早在 1946 年发明的 DM 系统做了大量的改进和提高工作。后来的自适应增量调制 ADM 系统采用十分简单的算法就能实现 32~48kb/s 的数据率,而且可提供高质量的重构话音,它的 MOS 评分可达到 4.3 分左右。

3.6.1 增量调制(DM)

增量调制也称  $\Delta$  调制(delta modulation,DM),它是一种预测编码技术,是 PCM 编码的一种变形。PCM 是对每个采样信号的整个幅度进行量化编码,因此它具有对任意波形进行编码的能力;DM 是对实际的采样信号与预测的采样信号之差的极性进行编码,将极性变成“0”和“1”这两种可能的取值之一。如果实际的采样信号与预测的采样信号之差的极性为“正”,则用“1”表示;相反则用“0”表示,或者相反。由于 DM 编码只须用 1 位对话音信号进行编码,所以 DM 编码系统又称为“1 位系统”。

DM 波形编码的原理如图 3-8 所示。纵坐标表示“模拟信号输入幅度”,横坐标表示“编码输出”。用  $i$  表示采样点的位置, $x[i]$ 表示在  $i$  点的编码输出。输入信号的实际值用  $y_i$  表示,输入信号的预测值用  $y[i+1]=y[i]\pm\Delta$  表示。假设采用均匀量化,量化阶的大小为  $\Delta$ ,在开始位置的输入信号  $y_0=0$ ,预测值  $y[0]=0$ ,编码输出  $x[0]=1$ 。

现在让我们看几个采样点的输出。在采样点  $i=1$  处,预测值  $y[1]=\Delta$ ,由于实际输入信号大于预测值,因此  $x[1]=1;\cdots$ ;在采样点  $i=4$  处,预测值  $y[4]=3\Delta$ ,同样由于实际输入信号大于预测值,因此  $x[4]=1$ ;其他情况依此类推。

从图 3-8 中可以看到,在开始阶段增量调制器的输出不能保持跟踪输入信号的快速变化,这种现象就称为增量调制器的“斜率过载”(slope overload)。一般来说,当输入信号的

① 在 ITU 的文件中,数据率用 kb/s 和 Mb/s 做单位,因此这章没有用 kbps 和 Mbps 做单位。

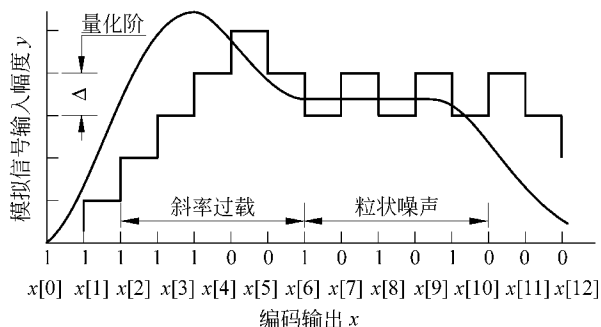


图 3-8 DM 波形编码示意图

变化速度超过反馈回路输出信号的最大变化速度时,就会出现斜率过载。之所以会出现这种现象,主要是反馈回路输出信号的最大变化速率受到量化阶大小的限制,因为量化阶的大小是固定的。

从图 3-8 中还可以看到,在输入信号缓慢变化部分,即输入信号与预测信号的差值接近零的区域,增量调制器的输出出现随机交变的“0”和“1”。这种现象称为增量调制器的粒状噪声(granular noise),这种噪声是不可能消除的。

在输入信号变化快的区域,斜率过载是关心的焦点,而在输入信号变化慢的区域,关心的焦点是粒状噪声。为了尽可能避免出现斜率过载,就要加大量化阶  $\Delta$ ,但这样做又会加大粒状噪声;相反,如果要减小粒状噪声,就要减小量化阶  $\Delta$ ,这又会使斜率过载更加严重。这就促进了对自适应增量调制(adaptive delta modulation, ADM)的研究。

### 3.6.2 自适应增量调制(ADM)

为了使增量调制器的量化阶  $\Delta$  能自适应,也就是根据输入信号斜率的变化自动调整量化阶  $\Delta$  的大小,以使斜率过载和粒状噪声都减到最小,许多研究人员研究了各种各样的方法,而且几乎所有的方法基本上都是在检测到斜率过载时开始增大量化阶  $\Delta$ ,而在输入信号的斜率减小时降低量化阶  $\Delta$ 。

例如,宋(Song)在 1971 描述的自适应增量调制技术中提出:假定增量调制器的输出为 1 和 0,每当输出不变时量化阶增大 50%,使预测器的输出跟上输入信号;每当输出值改变时,量化阶减小 50%,使粒状噪声减到最小,这种自适应方法使斜率过载和粒状噪声同时减到最小。

又如,使用较多的另一种自适应增量调制器是由格林弗基斯(Greefkes)在 1970 年提出的,称为连续可变斜率增量调制(continuously variable slope delta modulation, CVSD)。它的基本方法是:如果连续可变斜率增量调制器(continuously variable slope delta modulator, CVSD)的输出连续出现三个相同的值,量化阶就加上一个大的增量,反之,就加一个小的增量。

为了适应数字通信快速增长的需要, Motorola 公司于 20 世纪 80 年代初期就开发了实现 CVSD 算法的集成电路芯片,如 MC3417/MC3517 和 MC3418/MC3518,前者采用 3 位算法,后者采用 4 位算法。MC3417/MC3517 用于一般的数字通信,MC3418/MC3518 用于数