

# 《通信原理》

(11  $\Delta M$ 增量调制)

蔡志岗

光学与光学工程系

中山大学理工学院

[lasers@netease.com](mailto:lasers@netease.com)

**13316105077**

**光信息实验室：84110909**

中大光信息

# 4.7 增量调制

数字通信原理

1

增量调制的基本原理

2

简单增量调制

3

增量调制的性能

# 增量调制的基本原理

数字通信原理

- 增量调制简称 $\Delta M$ 或DM，它是继PCM 后出现的又一种模拟信号数字传输的方法。
- $\Delta M$  只用一位编码表示相邻样值的相对大小，从而反映抽样时刻波形的变化趋势，而与样值本身的大小无关。
- 与PCM 编码方式相比, $\Delta M$ 具有编译码设备简单，低比特率时的量化信噪比高，抗误码特性好等优点。

# 2.4 增量调制

数字通信原理

1

增量调制的基本原理

2

简单增量调制

3

增量调制的性能

# 简单增量调制

数字通信原理

- 编译码的基本思想
- 简单增量调制系统框图
- 增量调制的过载特性和动态编码范围

# 编码的基本思想

数字通信原理

● 语音信号，如果抽样速率很高，那么相邻样点之间的幅度变化不会很大，相邻抽样值的相对大小（差值）同样能反映模拟信号的变化规律。

● 逼近过程

# 逼近过程

数字通信原理

时间连续编码的模拟信号

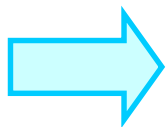
$m(t)$

用阶梯波形逼近

$m'(t)$

时间间隔为T

相邻幅度差  
 $+\sigma$ 或 $-\sigma$



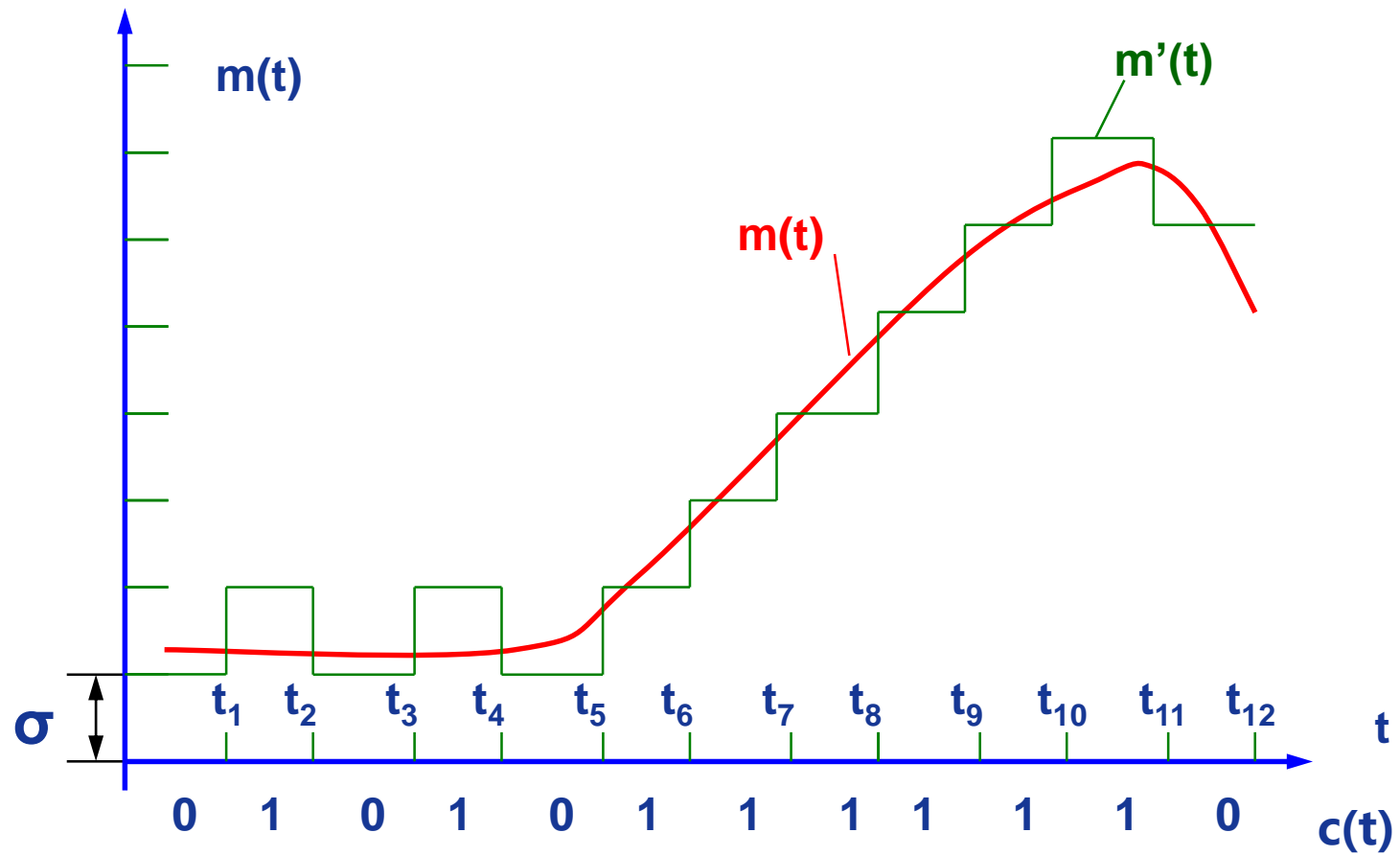
只要T足够小，即抽样速率足够高， $\sigma$ 足够小，阶梯波 $m'(t)$ 可以代替 $m(t)$



阶梯波 $m(t)$ 的特点

# 阶梯波逼近

数字通信原理





# 阶梯波 $m(t)$ 的特点

数字通信原理

## ● 阶梯波 $m'(t)$ 有两个特点

- 在每个  $\Delta t$  间隔内,  $m'(t)$  的幅值不变。
- 相邻间隔的幅值差不是  $+\sigma$  (上升一个量化阶) 就是  $-\sigma$  (下降一个量化阶)

## ● 可见

- 利用这两个特点, 用 “1”码和 “0”码分别代表  $m'(t)$  上升或下降一个量化阶  $\sigma$ ,  $m'(t)$  就被一个二进制序列表征。

# 斜变波的逼近

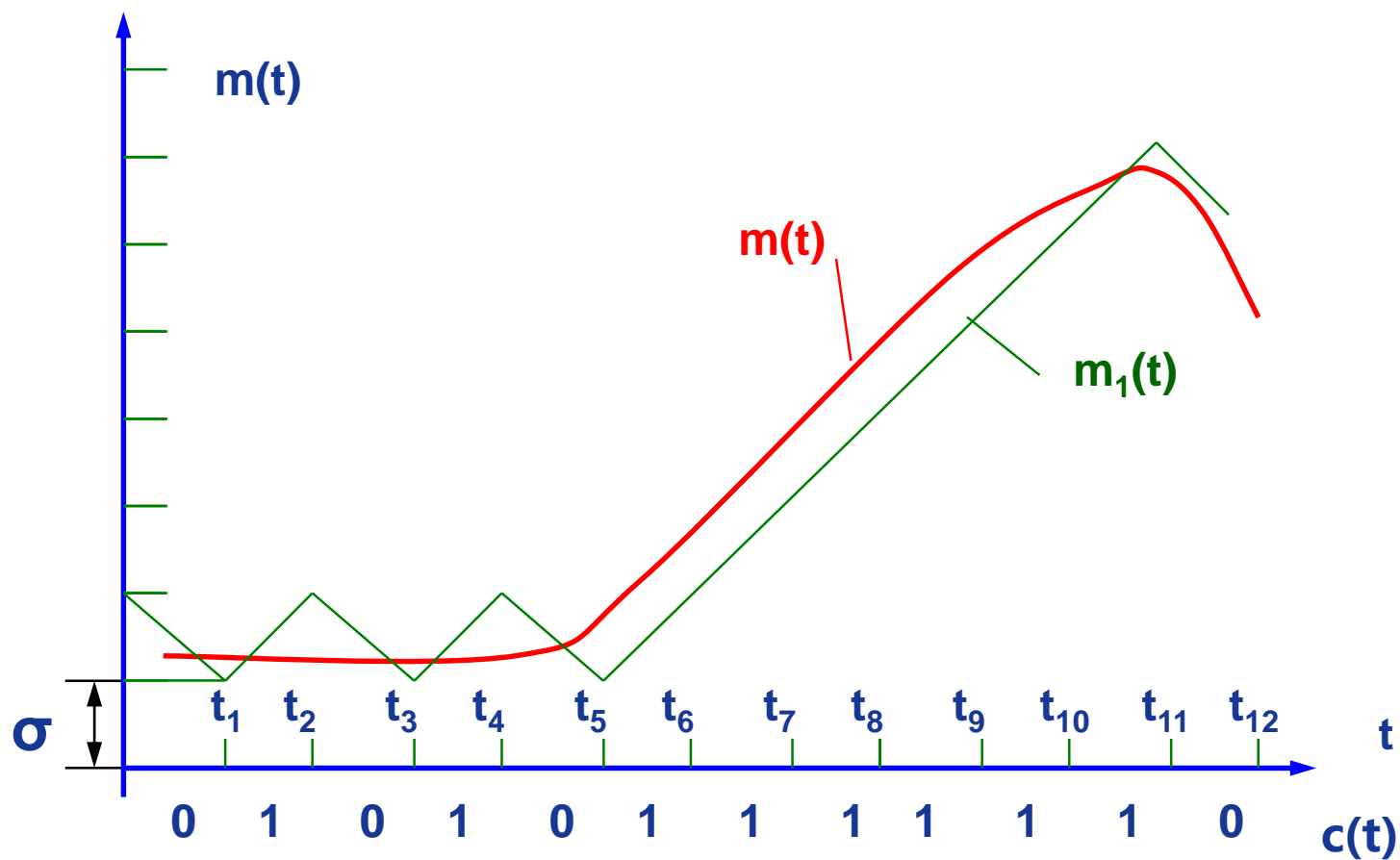
数字通信原理

● 也可用斜变波 $m_1(t)$ 近似 $m(t)$ ，斜变波也有两种变化

- 按斜率 $\sigma/\Delta t$ 上升一个量阶；
- 按斜率 $-\sigma/\Delta t$ 下降一个量阶。
- 用“1”码表示正斜率，用“0”码表示负斜率，同样可以获得二进制序列。

# 斜变波逼近

数字通信原理



# 译码

数字通信原理

## ● 与编码相对应，译码也有两种形式

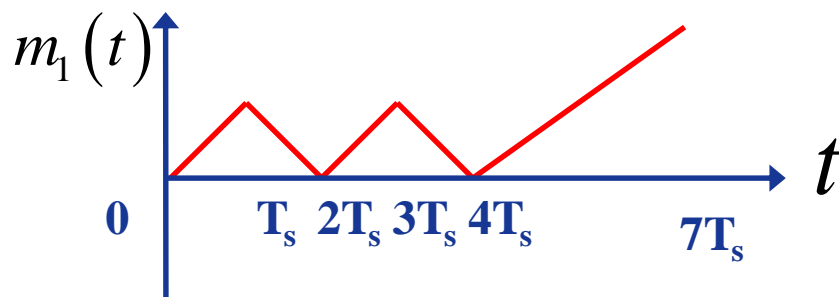
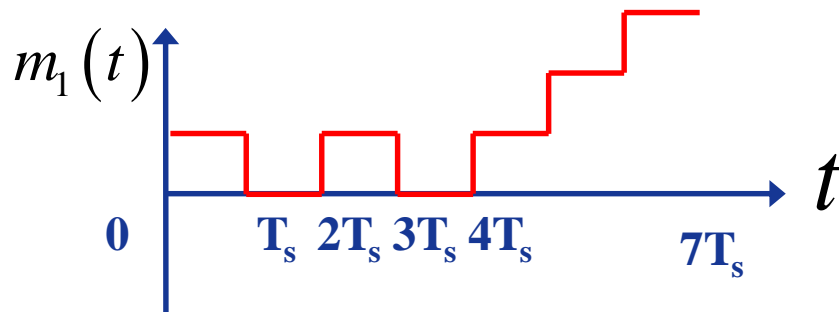
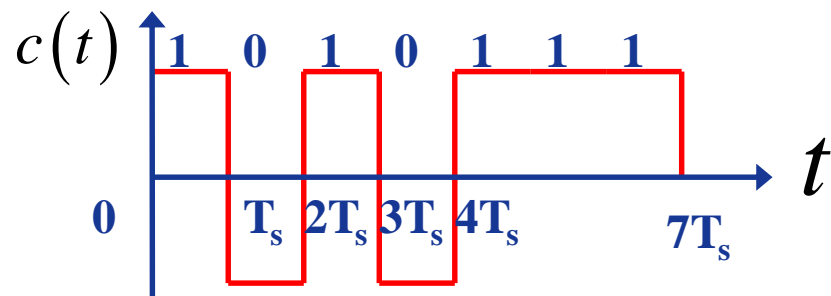
- 一种是收到“1”码上升一个量阶（跳变），收到“0”码下降一个量阶（跳变），这样把二进制代码经过译码后变为 $m'(t)$ 这样的**阶梯波**。
- 另一种是收到“1”码后产生一个正斜率电压，在 $\Delta t$ 时间内上升一个量阶 $\sigma$ ，收到“0”码后产生一个负斜率电压，在 $\Delta t$ 时间内下降一个量阶 $\sigma$ ，二进制代码经译码。变为 $m_1(t)$ 这样的**斜变波**。
- 如考虑电路实现的简易程度，一般采用后一种方法。这种方法可用一个简单的RC 积分电路，即可把二进制代码变为 $m_1(t)$ 波形

❖ 吾爱巫师，吾更爱真理

❖ “*Plato is dear to me, but dearer still is truth.*”

# 译码

数字通信原理



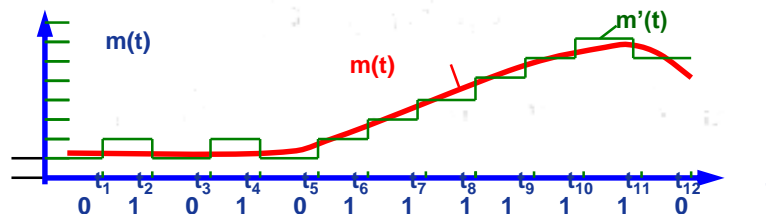
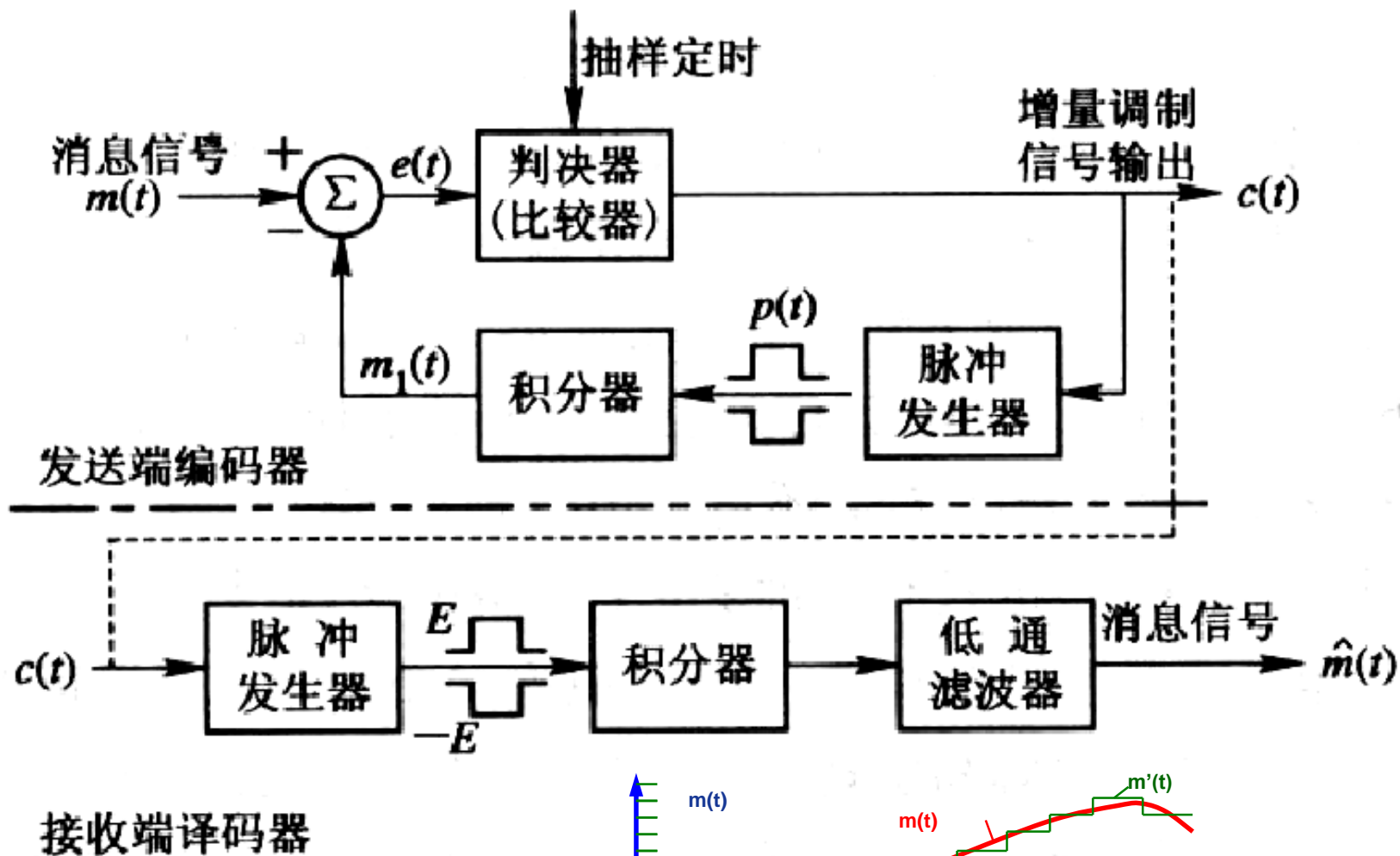
# 简单增量调制

数字通信原理

- 编译码的基本思想
- 简单增量调制系统框图
- 增量调制的过载特性和动态编码范围

# 简单增量调制系统框图

数字通信原理





# 简单增量调制系统

数字通信原理

●发送端编码器是相减器、判决器、本地译码器及脉冲产生器（极性变换电路）组成的一个闭环反馈电路。

●接收端解码电路由译码器和低通滤波器组成

# 简单增量调制系统

数字通信原理

● 相减器的作用是取出差值 $e(t)$ ，使

$$e(t) = m(t) - m_1(t)$$

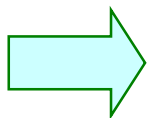
● 判决器也称比较器或数码形成器，它的作用是对差值 $e(t)$ 极性进行识别和判决，以便在抽样时刻输出数码（增量码） $c(t)$

# 简单增量调制系统

数字通信原理

给定抽样时刻 $t_i$

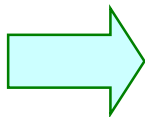
$$e(t_i) = m(t_i) - m_1(t_i) > 0$$



判决器输出1

给定抽样时刻 $t_i$

$$e(t_i) = m(t_i) - m_1(t_i) < 0$$



判决器输出0

# 简单增量调制系统

数字通信原理

● 积分器和脉冲产生器组成本地译码器，它的作用是根据 $c(t)$ ，形成预测信号 $m_1(t)$

- $c(t)$ 为“1”， $m(t)$ 上升一个量阶 $\sigma$
- $c(t)$ 为“0”， $m(t)$ 下降一个量阶 $\sigma$
- 送到相减器与 $m(t)$ 进行幅度比较

# 简单增量调制系统

数字通信原理

- 译码器与发送端的本地译码器相同由

$c(t)$ 恢复 $m_1(t)$

- 低通滤波器的作用是滤除 $m_1(t)$ 中的高次谐波，使得输出平滑波形

# 简单增量调制

数字通信原理

- 编译码的基本思想
- 简单增量调制系统框图
- 增量调制的过载特性和动态编码范围

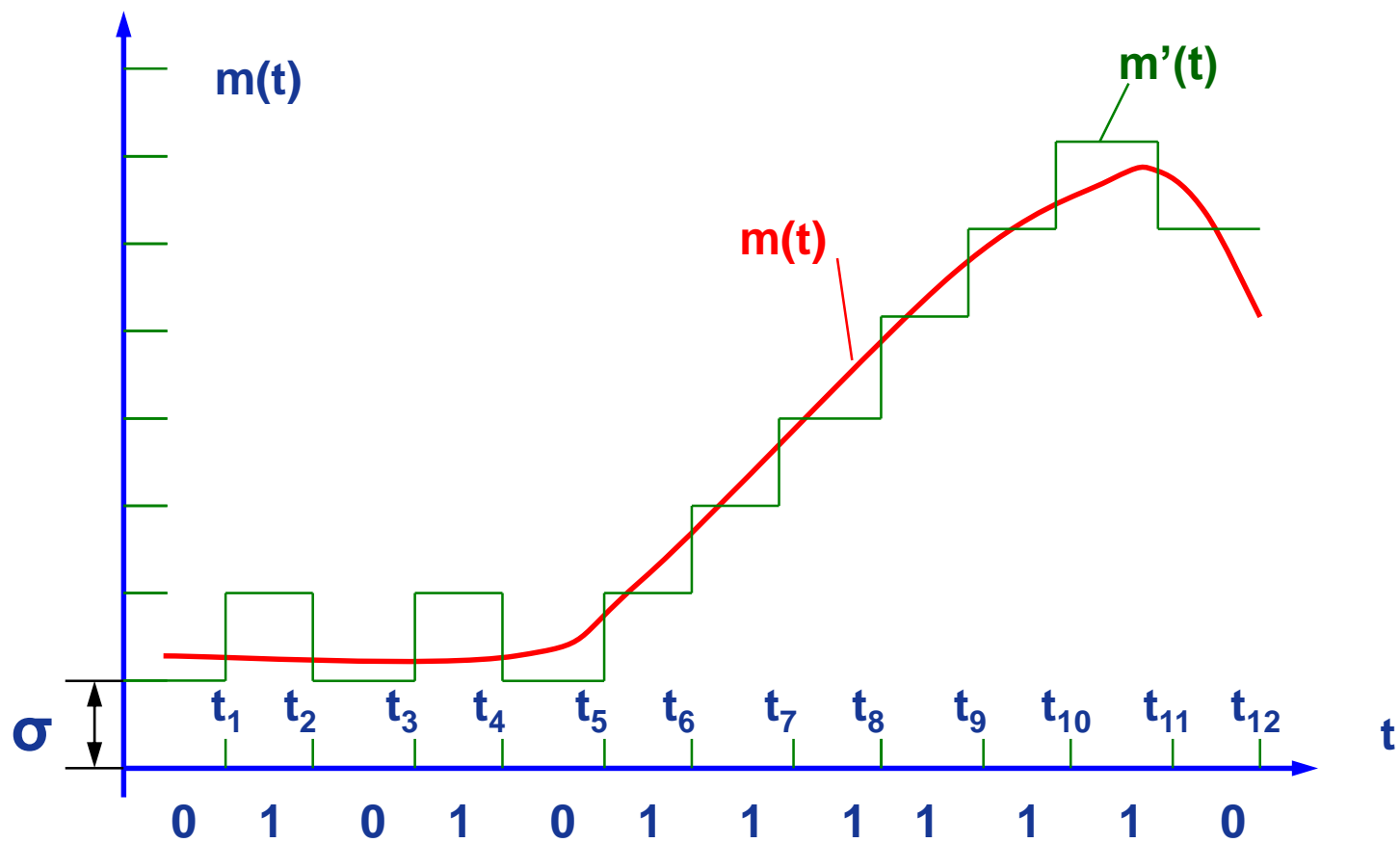
# 过载特性和动态编码范围

数字通信原理

- 增量调制也会带来误差而形成**量化噪声**
- 当模拟输入信号斜率陡变时，本地译码器输出信号 $m'(t)$ 跟不上信号 $m(t)$ 的变化， $m'(t)$ 与 $m(t)$ 之间的误差明显增大，引起译码后的严重失真，这种现象称为**过载现象**，产生的失真称为**过载失真**

# 阶梯波逼近

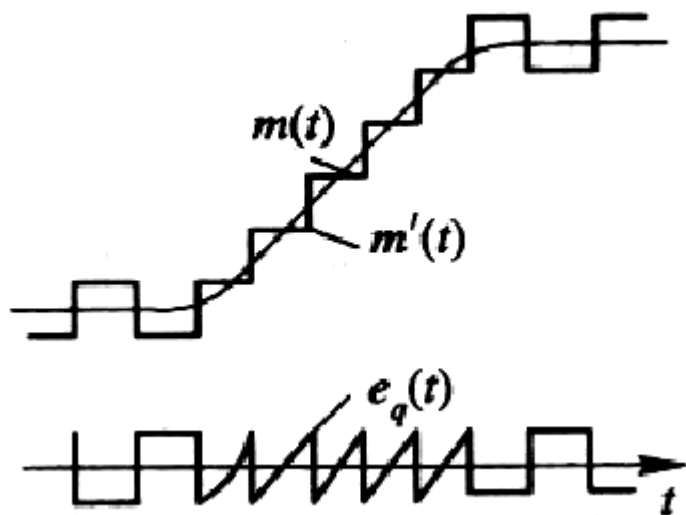
数字通信原理



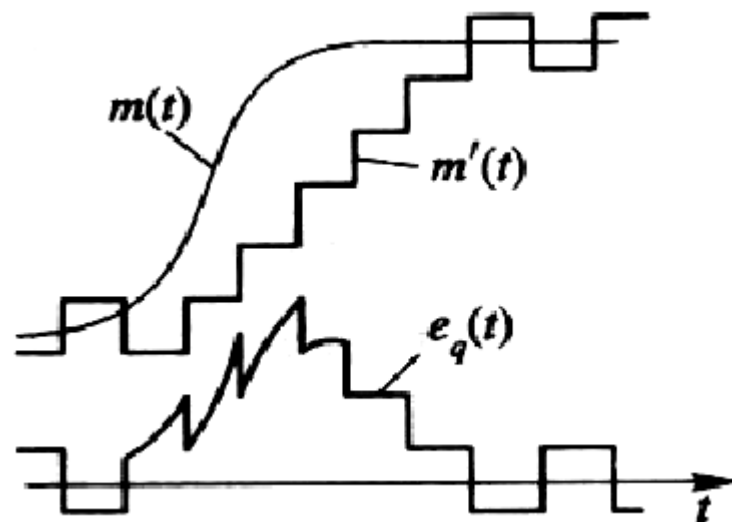


# 过载特性和动态编码范围

数字通信原理



一般量化噪声



过载量化噪声

# 过载特性

数字通信原理

用阶梯波 $m'(t)$ 逼近

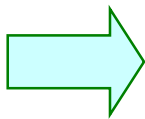
设

抽样间隔

$\Delta t$

一个量阶 $\sigma$ 上最大斜率

$$K = \frac{\sigma}{\Delta t} = \sigma \cdot f_s$$



译码器的最大跟踪斜率

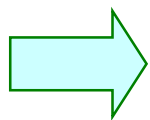
# 过载特性

数字通信原理



$$\left| \frac{dm(t)}{dt} \right|_{\max} \leq \sigma \cdot f_s$$

译码器的输出 $m'(t)$ 能跟上 $m(t)$ 的变化



$e_q(t)$ 在 $[-\sigma, +\sigma]$ 区间内变化

量化误差

# 过载特性

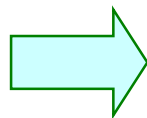
数字通信原理

为了不过载

$$\sigma \uparrow, f_s \uparrow$$

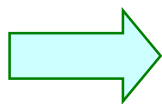
$$K = \frac{\sigma}{\Delta t} = \sigma \cdot f_s$$

$$\sigma \uparrow$$

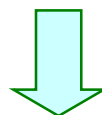


量化误差增大

$$f_s \uparrow$$



有利于减少量化误差和过载噪声



增量调制系统的抽样速率  
远大于PCM

# 过载特性

数字通信原理

设

模拟信号

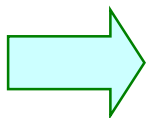
$$m(t) = A \sin \omega_k t$$

斜率

$$\frac{dm(t)}{dt} = A \omega_k \cos \omega_k t$$

不过载条件

$$A \omega_k \leq \sigma \cdot f_s$$



临界过载振幅  
(允许信号幅度)

$$A_{\max} = \frac{\sigma \cdot f_s}{\omega_k}$$

最大允许  
编码电平

# 过载特性

数字通信原理

最大允许编码电平

$$A_{\max} = \frac{\sigma \cdot f_s}{\omega_k}$$

● 可见

- 当信号斜率一定时，允许信号的幅度随信号频率的增加而减小，这将导致语音高频段信号量化信噪比下降。

最小允许编码电平

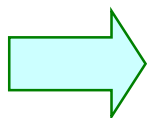
$$A_{\min} = \frac{\sigma}{2}$$

# 编码的动态范围

数字通信原理

● 编码的动态范围定义为：最大允许编码电平与最小允许编码电平之比

$$[D_c]_{dB} = 20\lg \frac{A_{\max}}{A_{\min}}$$

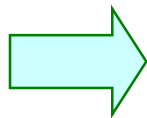


编码器能够正常工作的  
输入信号振幅范围

$$[D_c]_{dB} = 20\lg \left[ \frac{\sigma \cdot f_s}{2\pi f_k} / \frac{\sigma}{2} \right] = 20\lg \left( \frac{f_s}{\pi f_k} \right)$$

设

$$f_k = 800\text{Hz}$$



$$[D_c]_{dB} = 20\lg \left( \frac{f_s}{800\pi} \right)$$

# 说明

- 可见简单增量调制的编码动态范围较小，在低传码率时，不符合话音信号要求。

故，一般采用很大的采样频率  $f_s$

- 实用中的 $\Delta M$ 常用它的改进型（自适应， $\Delta$ - $\Sigma$ 调制）。



# 2.4 增量调制

数字通信原理

1

增量调制的基本原理

2

简单增量调制

3

增量调制的性能

# 增量调制系统的性能

数字通信原理

- **抗噪声性能**

- **与PCM系统的比较**

# 抗噪声性能

数字通信原理

## ● 增量调制系统的两种噪声

- 量化噪声

- 加性噪声

# 量化噪声信噪比

数字通信原理

## ● 前提

■ 不考虑过载，只研究量化噪声

不过载条件下

$$e_q(t) \in (-\sigma, +\sigma)$$

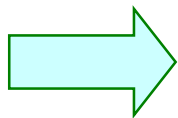
设

$$e_q(t)$$

在 $(-\sigma, +\sigma)$ 范围内均匀分布

$\Delta M$ 量化噪声平均功率

$$E[e_q^2(t)] = \int_{-\sigma}^{\sigma} \frac{e^2}{2\sigma} de = \frac{\sigma^2}{3}$$



量化噪声功率谱在 $(0, f_s)$ 均匀分布

# 量化噪声信噪比

数字通信原理

量化噪声单边功率谱密度

$$P(f) \approx \frac{E[e_q^2(t)]}{f_s} = \frac{\sigma^2}{3f_s}$$

接收端低通滤波器截止频率

$$f_m$$

输出量化噪声功率

$$N_q = P(f) \cdot f_m = \frac{\sigma^2 f_m}{3f_s}$$

# 量化噪声信噪比

数字通信原理

## ● 可知

■ 信号越大，信噪比越大

正弦信号临界过载振幅

$$A_{\max} = \frac{\sigma \cdot f_s}{2\pi f_k}$$

信号功率的最大值

$$S_0 = \frac{A_{\max}^2}{2} = \frac{\sigma^2 f_s^2}{8\pi^2 f_k^2}$$

临界振幅  
信号最大量化信噪比

$$\frac{S_0}{N_q} = \frac{3}{8\pi^2} \cdot \frac{f_s^3}{f_k^2 f_m} \approx 0.04 \frac{f_s^3}{f_k^2 f_m}$$

# 量化噪声信噪比

数字通信原理

分贝表示

$$\left( \frac{S_0}{N_q} \right)_{dB} = 30 \lg f_s - 20 \lg f_k - 10 \lg f_m - 14$$

## ● 增量调制最重要的公式，表明

- 简单 $\Delta M$  的信噪比与抽样速率 $f_s$ 成立方关系，即 $f_s$ 每提高一倍，量化信噪比提高9dB
- 量化信噪比与信号频率 $f_k$ 的平方成反比，即 $f_k$ 每提高一倍，量化信噪下降6dB

# 抗噪声性能

数字通信原理

## ● 增量调制系统的两种噪声

- 量化噪声

- 加性噪声



# 误码信噪功率比

数字通信原理

由误码造成的误码噪声功率

$$N_e = \frac{2\sigma^2 \cdot f_s P_e}{\pi^2 f_1}$$

信噪比

$$\frac{S_0}{N_e} = \frac{f_1 f_s}{16 P_e f_k^2}$$

语音信号的下截止边带

总信噪比

$$\frac{S_0}{N_0} = \frac{S_0}{N_e + N_q} = \frac{3f_1 f_s^3}{8\pi^2 f_1 f_m f_k^2 + 48P_e f_k^2 f_s^2}$$

# 增量调制系统的性能

数字通信原理

- **抗噪声性能**

- **与PCM系统的比较**

# 增量调制系统的性能

数字通信原理

**PCM和 $\Delta M$ 都是模拟信号数字化的方法，PCM是对样值本身编码， $\Delta M$ 是对相邻样值的差值极性（符号）编码——这是二者的本质区别**

- ① 抽样速率
- ② 带宽
- ③ 量化信噪比
- ④ 信道误码的影响
- ⑤ 设备复杂度

# ①抽样速率

数字通信原理

- PCM 系统中的抽样速率是根据抽样定理来确定的。若信号的最高频率为 $f_m$ ，则 $f_s \geq 2f_m$ 。
- $\Delta M$ 系统不能根据抽样定理确定抽样速率。在保证不发生过载，达到与PCM 系统相同的信噪比时， $\Delta M$ 的抽样速率远远高于奈奎斯特速率。

# 数字码元速率

数字通信原理

- $\Delta M$ 系统在每一次抽样，只传送一位代码，因此 $\Delta M$ 系统的数码率 $f_b = f_s$ ，要求的最小带宽为

$$B_{\Delta M} = \frac{f_s}{2}$$

◆ 实际应用时  $B_{\Delta M} = f_s$

- PCM系统数码率  $f_b = Nf_s$

# ②带宽

## ● 同样语音质量要求下

- PCM 系统的数码率为64kHz，因而要求最小信道带宽为32kHz。
- $\Delta M$  系统抽样速率至少为100 kHz，则最小带宽为50kHz

# ③量化信噪比

数字通信原理

● 在相同的信道带宽（即相同的数码率 $f_b$ ）条件下：

- 在低数码率时， $\Delta M$  性能优越；
- 在编码位数多，码率较高时，PCM 性能优越。

● 信噪比分析

# 信噪比分析

数字通信原理

**PCM量化信噪比**

$$\frac{S_0}{N_q} \approx 10 \lg 2^{2N} \approx 6N$$

**$\Delta M$ 系统数码率 $f_b=f_s$ , PCM系统数码率 $f_b=2Nf_m$ , 当 $\Delta M$ 与PCM数码率相同时, 有 $f_s=2Nf_m$ , 可得增量调制系统的量化信噪比**

$$\frac{S_0}{N_q} \approx 10 \lg \left[ 0.32N^3 \left( \frac{f_m}{f_k} \right)^2 \right] dB$$

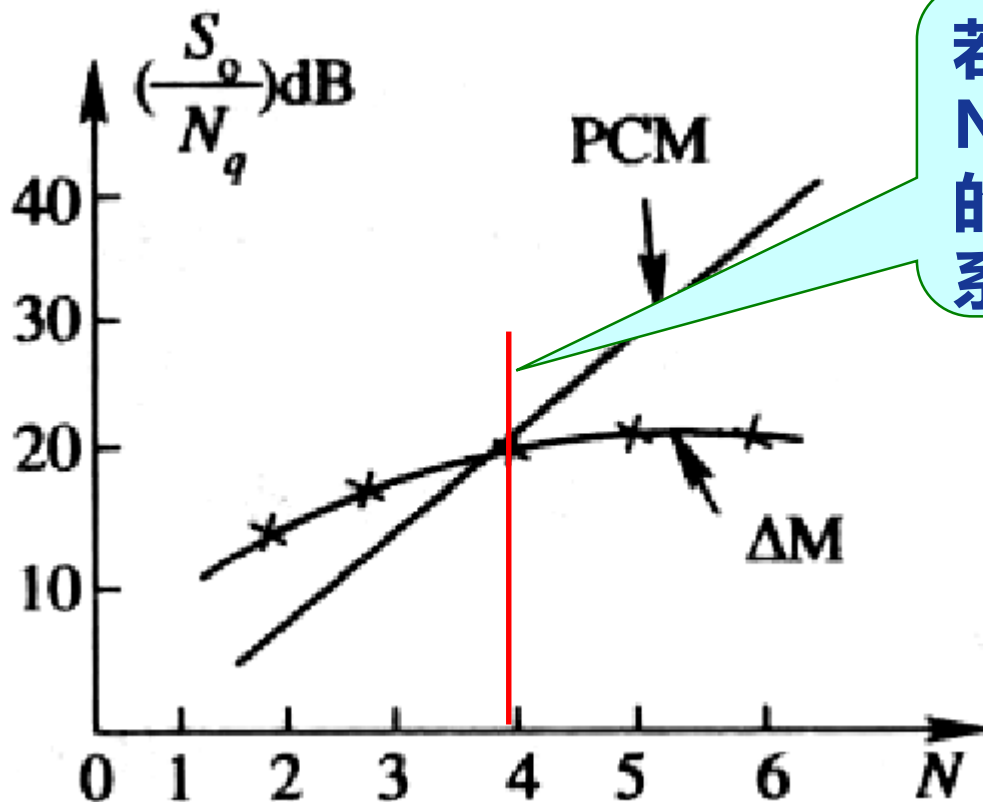
**它与N 成对数关系, 且与 $f_m/f_k$ 有关**



# 信噪比分析

数字通信原理

当 $f_m/f_k=3000/1000$  时,  
量化信噪比与 $N$  的关系曲线



若PCM 系统的编码位数  
 $N < 4$  (码率较低),  $\Delta M$   
的量化信噪比高于PCM  
系统。

# ④信道误码的影响

- 在 $\Delta M$ 系统中，每一个误码代表造成一个量阶的误差，所以它对误码不太敏感。对误码率的要求较低。
- PCM的每一个误码会造成较大的误差，尤其高位码元，误码对PCM系统的影响要比 $\Delta M$ 系统严重些，故对误码率的要求较高。

# ⑤设备复杂度

- PCM系统的特点是多路信号统一编码，一般采用8位编码，编码设备复杂，但质量好。
- $\Delta M$ 系统的特点是单路信号独用一个编码器，设备简单，单路应用时，不需要收发同步设备。但在多路应用时，每路独用一套编译码器，所以路数增多时设备成倍增加。 $\Delta M$ 一般适于小容量支线通信，话路上下方便灵活