



西安电子科技大学

通信工程学院

通信原理

任光亮

glren@mail.xidian.edu.cn

本文件仅供西安电子科技大学通信原理课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

西安电子科技大学 通信工程学院
2020年10月



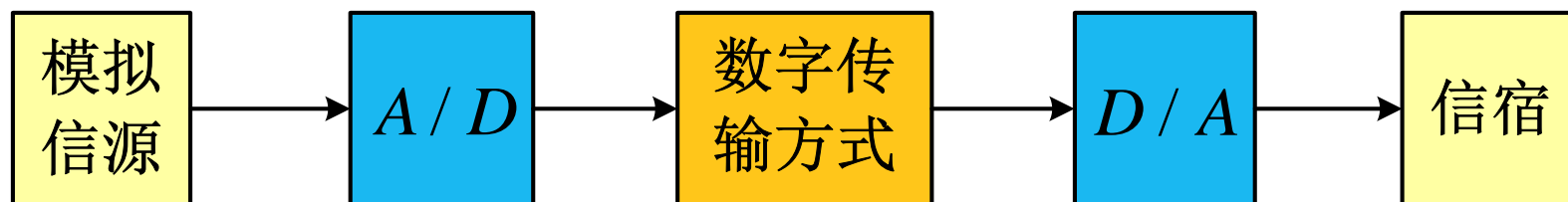


第6章 模拟信号的数字传输

西安电子科技大学

通信工程学院

模拟信号数字传输系统的原理框图：



信源编码

信源译码

语音编码 { 波形编码
参量编码

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。



第6章 模拟信号的数字传输

西安电子科技大学

通信工程学院

本章主要内容:

- ★ 低通和带通抽样定理
- ★ 脉冲振幅调制（自然抽样和平顶抽样）原理
- ★ 均匀量化与非均匀量化的原理及特点
- ★ 脉冲编码调制（PCM）原理及抗噪声性能
- ★ 增量调制（ ΔM ）原理及抗噪声性能
- ★ 时分复用（TDM）原理

本章作业:1, 2, 3, 4, 7, 8, 14, 15, 17, 18, 19



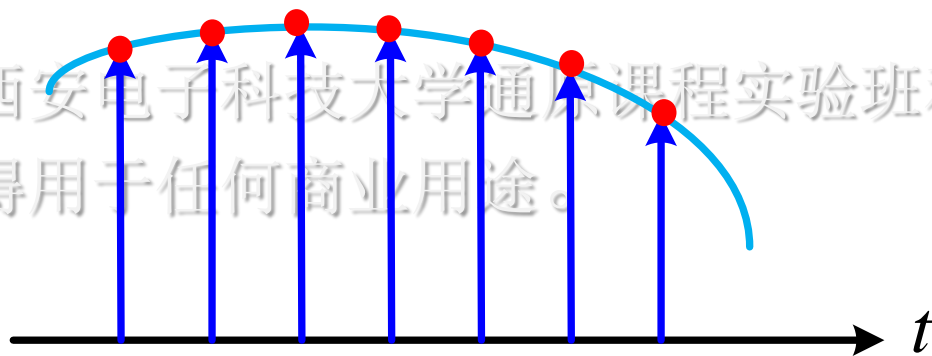
6.1 抽样定理

西安电子科技大学

通信工程学院

抽样定理是任何模拟信号数字化的理论基础。

抽样的物理过程：



实质：时间连续信号 \Rightarrow 时间离散的序列



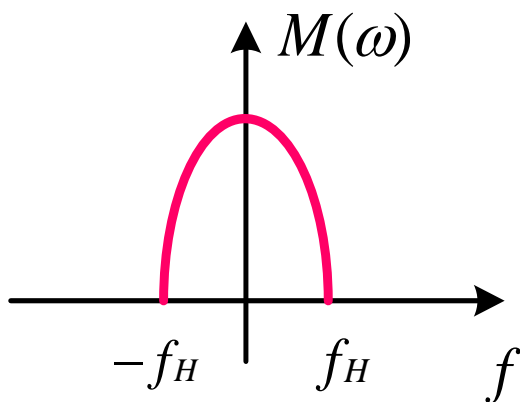
6.1 抽样定理

西安电子科技大学

通信工程学院

一、低通抽样定理

一个频带限制在 $(0, f_H)$ 内的低通信号 $m(t)$, 如果以 $f_s \geq 2f_H$ 的速率进行均匀抽样, 则由抽样序列 $\{m(nT_s)\}$ 可无失真地恢复出 $m(t)$ 。



$$f_s = 2f_H$$

Nyquist 抽样速率

$$T_s = \frac{1}{2f_H}$$

Nyquist 抽样间隔

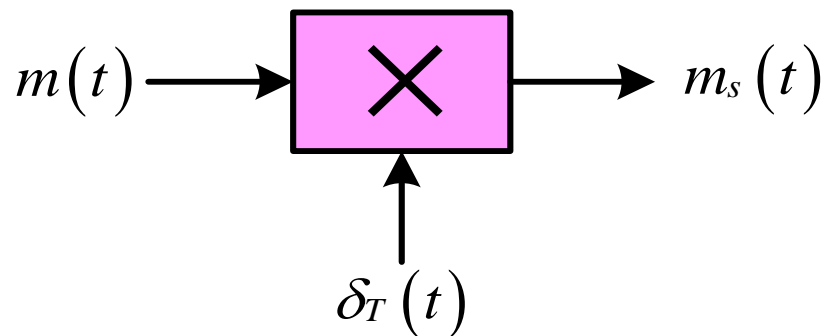


6.1 抽样定理

西安电子科技大学

通信工程学院

低通抽样定理证明：



本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

$$\delta_T(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_s) \quad \longrightarrow \quad \delta_T(\omega) = \frac{2\pi}{T_s} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(\omega - n\omega_s)$$

周期函数：

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f_n e^{jn\omega_s t} \Leftrightarrow 2\pi \sum_{n=-\infty}^{\infty} f_n \delta(\omega - n\omega_s)$$
$$f_n = \frac{1}{T_s} \int_{-\frac{T_s}{2}}^{\frac{T_s}{2}} f(t) e^{-jn\omega_s t} dt$$



6.1 抽样定理

西安电子科技大学

通信工程学院

$$m_s(t) = m(t) \cdot \delta_T(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} m(nT_s) \delta(t - nT_s)$$

$$M_s(\omega) = \frac{1}{2\pi} [M(\omega) * \delta_T(\omega)]$$

$$\delta_T(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_s)$$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

$$= \frac{1}{T_s} \left[M(\omega) * \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(\omega - n\omega_s) \right]$$

$$= \frac{1}{T_s} \sum_{n=-\infty}^{\infty} M(\omega - n\omega_s)$$

$$M_s(\omega) = \frac{1}{T_s} M(\omega) + \frac{1}{T_s} \sum_{n \neq 0} M(\omega - n\omega_s)$$

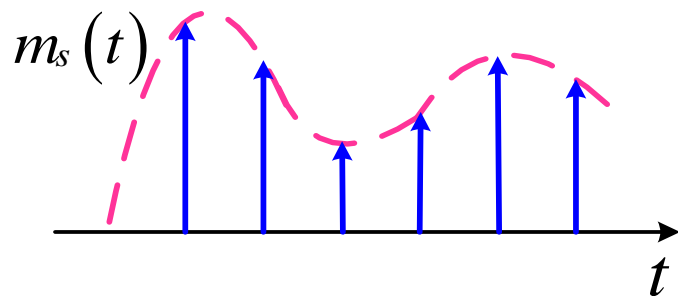
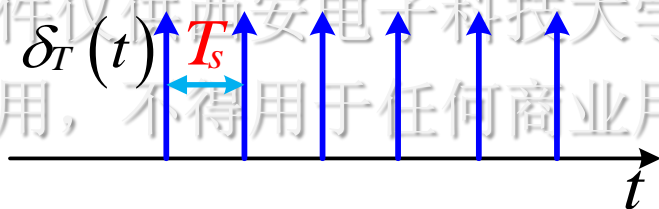
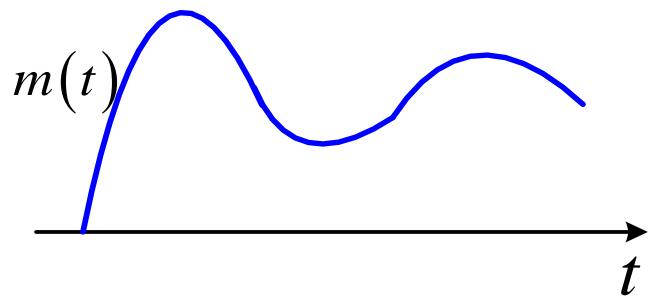


6.1 抽样定理

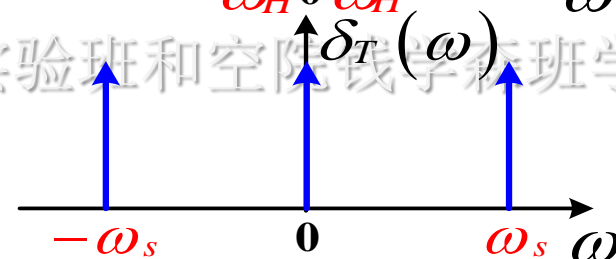
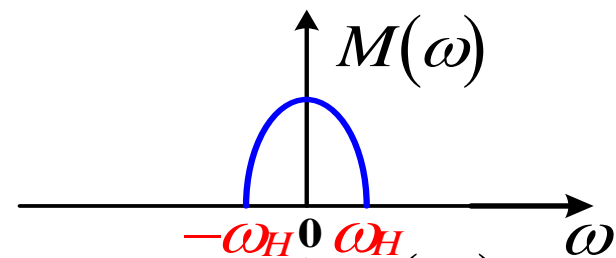
西安电子科技大学

通信工程学院

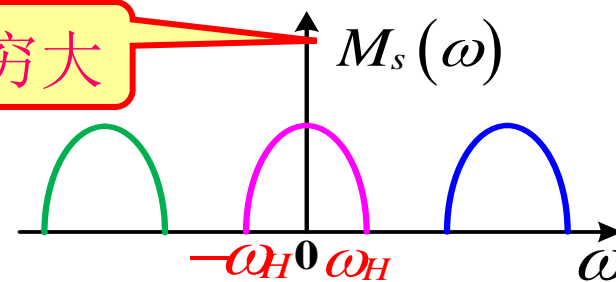
$f_s \geq 2f_H$ 时抽样过程的时间波形及频谱:



$$m_s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} m(nT_s) \delta(t - nT_s)$$



带宽无穷大



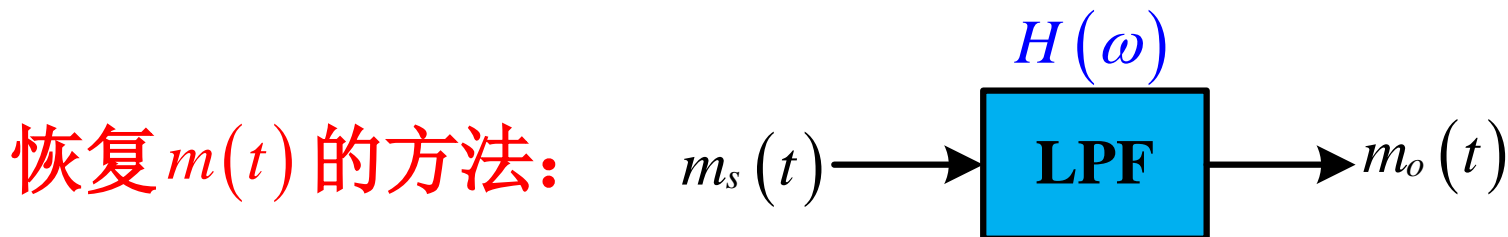
$$M_s(\omega) = \frac{1}{T_s} \sum_{n=-\infty}^{\infty} M(\omega - n\omega_s)$$



6.1 抽样定理

西安电子科技大学

通信工程学院



$$H(\omega) = \begin{cases} 1, & |\omega| \leq \omega_H \\ 0, & |\omega| > \omega_H \end{cases}$$

$$M_o(\omega) = M_s(\omega) H(\omega) = \frac{1}{T_s} M(\omega)$$

$$M_s(\omega) = \frac{1}{T_s} M(\omega) + \frac{1}{T_s} \sum_{n \neq 0} M(\omega - n\omega_s)$$

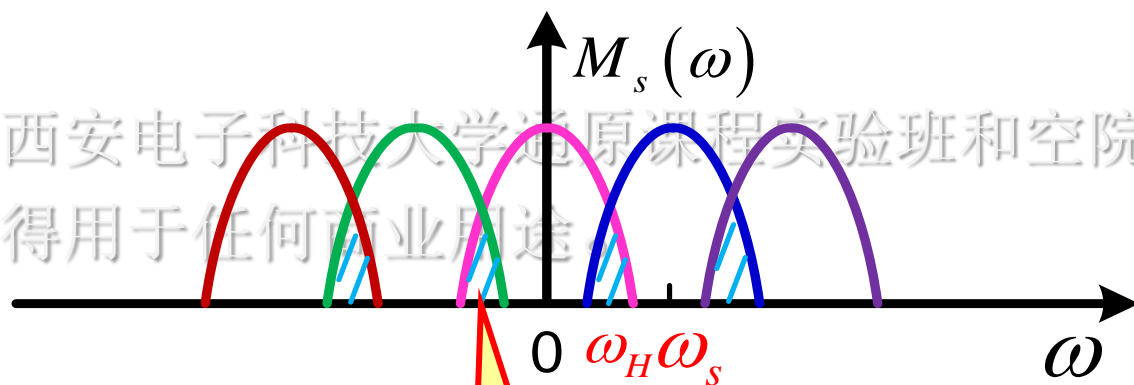


6.1 抽样定理

西安电子科技大学

通信工程学院

若 $f_s < 2f_H$ $M_s(\omega) = \frac{1}{T_s} \sum_{n=-\infty}^{\infty} M(\omega - n\omega_s)$



频谱混叠

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途

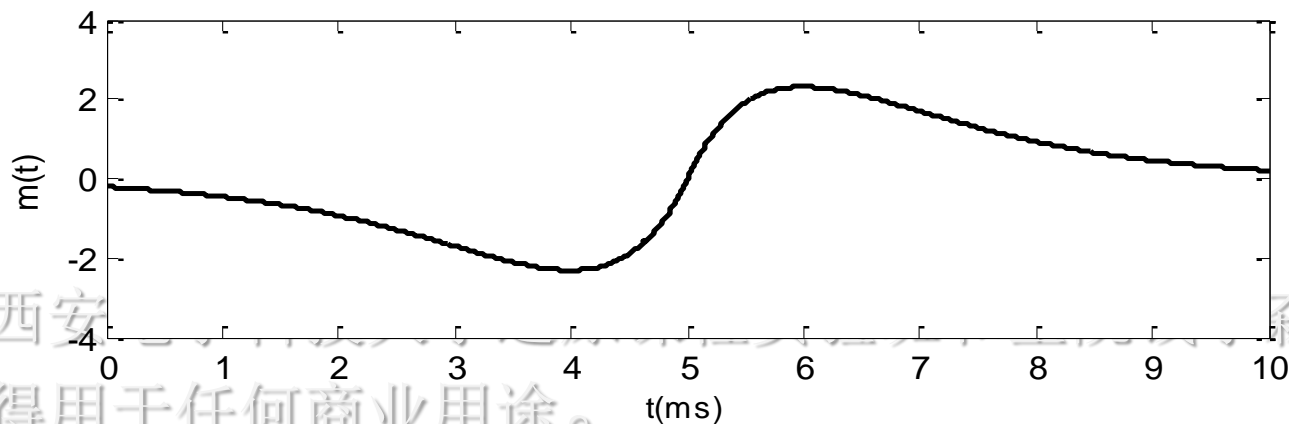


6.1 抽样定理

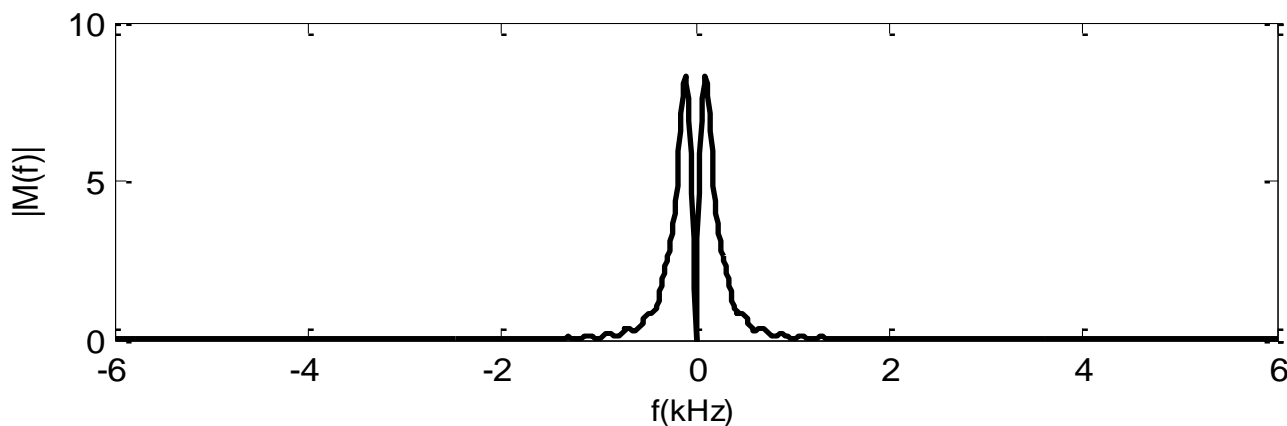
西安电子科技大学

通信工程学院

【例】 设信号 $m(t) = 100e^{-1000|t-0.005|} \times \sin[20\pi(t-0.005)]$



(a) 模拟信号波形



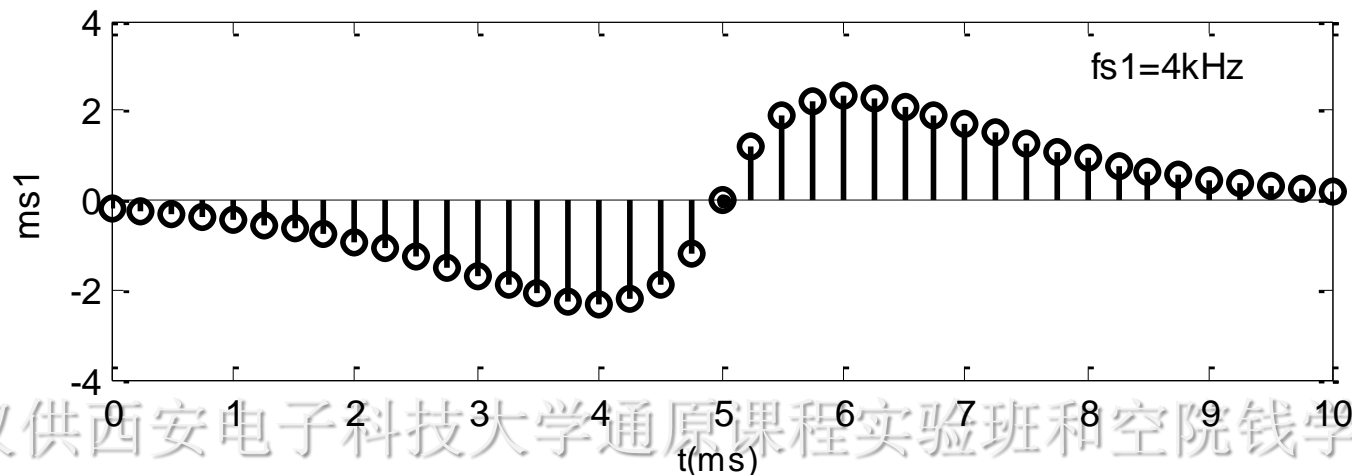
(b) 模拟信号频谱



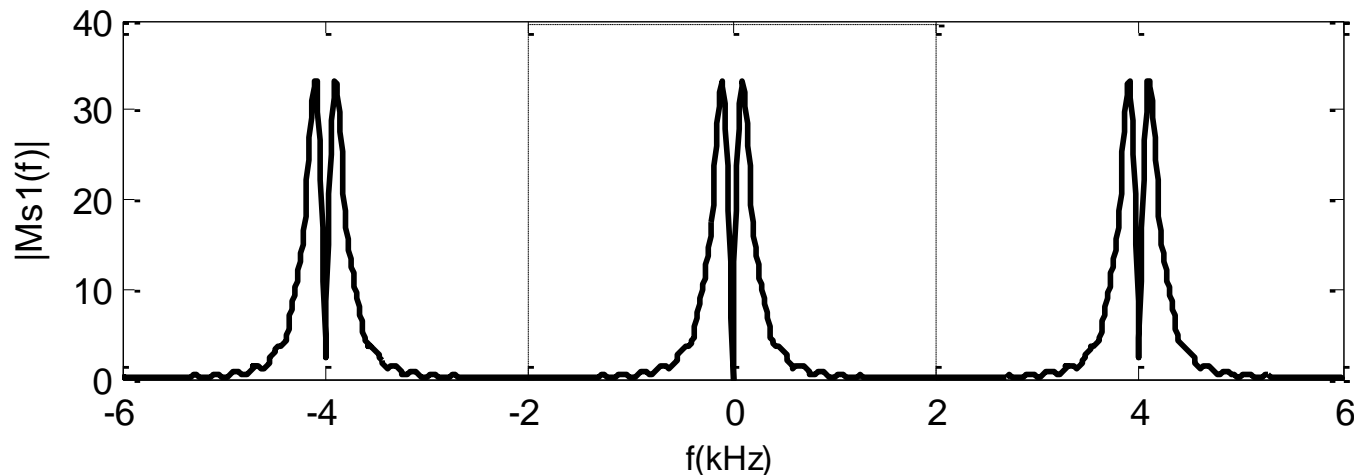
6.1 抽样定理

西安电子科技大学

通信工程学院



(c) 以奈奎斯特抽样速率进行抽样的信号波形



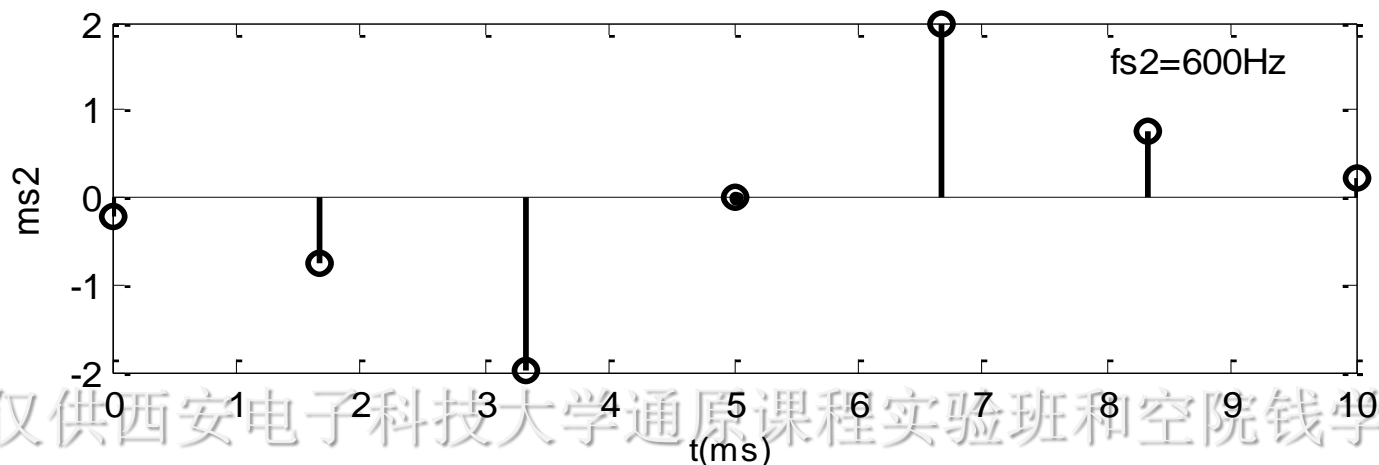
(d) 以奈奎斯特抽样速率进行抽样的信号频谱



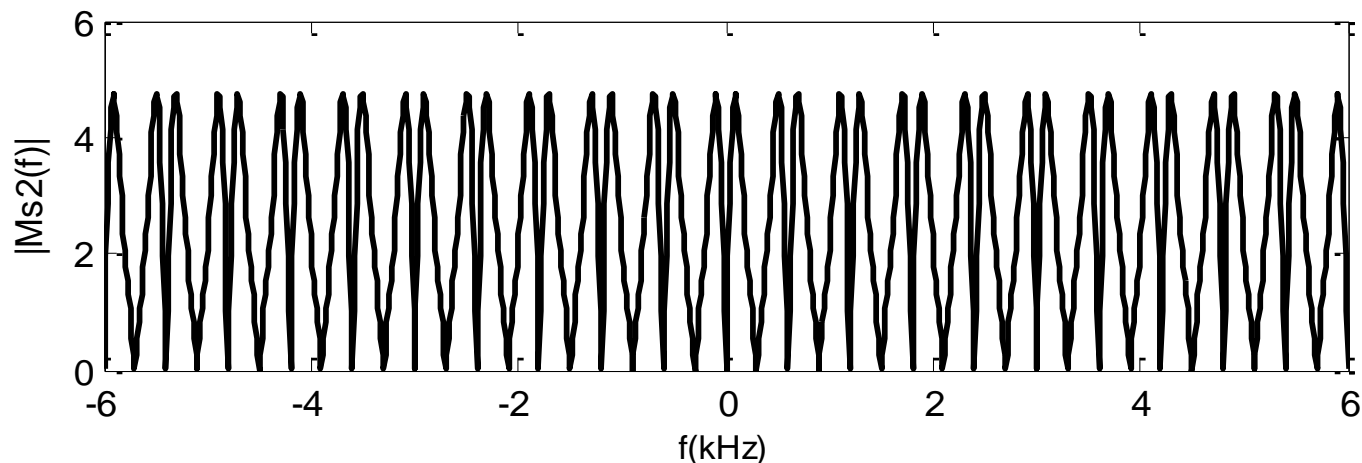
6.1 抽样定理

西安电子科技大学

通信工程学院



(e) 以低于奈奎斯特抽样速率进行抽样的信号波形



(f) 以低于奈奎斯特抽样速率进行抽样的信号频谱



6.1 抽样定理

西安电子科技大学

通信工程学院

$m(t)$ 与各抽样值之间的关系:

$$f_s \geq 2f_H \text{ 时: } M_o(\omega) = M_s(\omega) H(\omega) = \frac{1}{T_s} M(\omega)$$

$$M(\omega) = T_s [M_s(\omega) \cdot H(\omega)]$$

$$\therefore m(t) = T_s [m_s(t) * h(t)]$$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。



6.1 抽样定理

西安电子科技大学

通信工程学院

$$\text{令 } f_s = 2f_H \quad \longrightarrow \quad T_s = \frac{2\pi}{\omega_s} = \frac{\pi}{\omega_H}$$

$$m(t) = T_s \left[m_s(t) * h(t) \right]$$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

$$= T_s \left[\sum_{n=-\infty}^{\infty} m(nT_s) \delta(t - nT_s) \right] * \left[\frac{\omega_H}{\pi} \text{sa}(\omega_H t) \right]$$

$$= \sum_{n=-\infty}^{\infty} m(nT_s) \text{sa}[\omega_H(t - nT_s)]$$



6.1 抽样定理

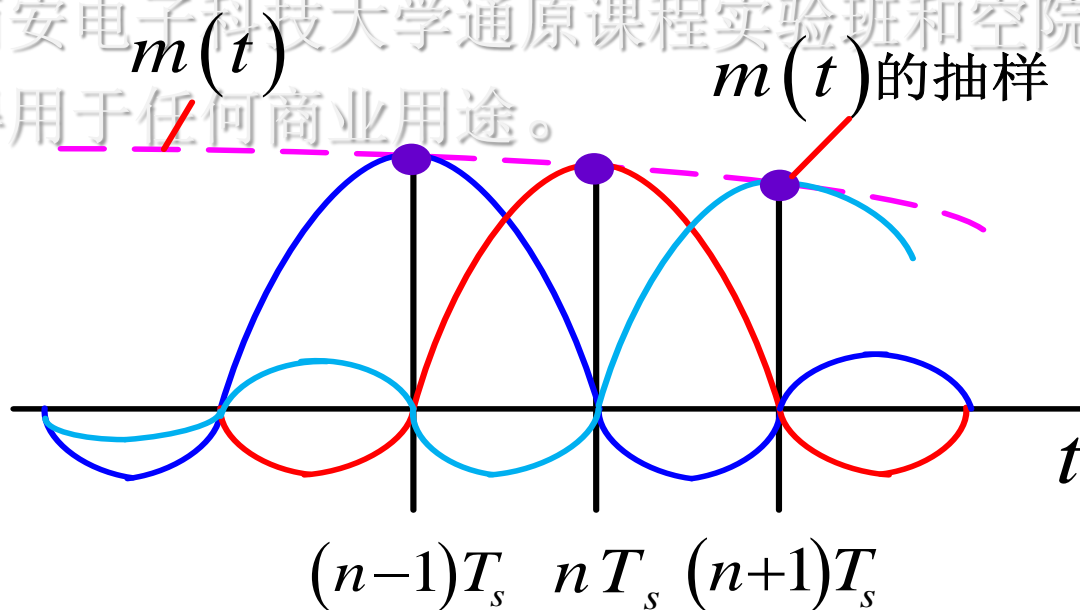
西安电子科技大学

通信工程学院

$f_s = 2f_H$ 时:

$$m(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} m(nT_s) \text{sinc}[\omega_H(t - nT_s)]$$

内插公式



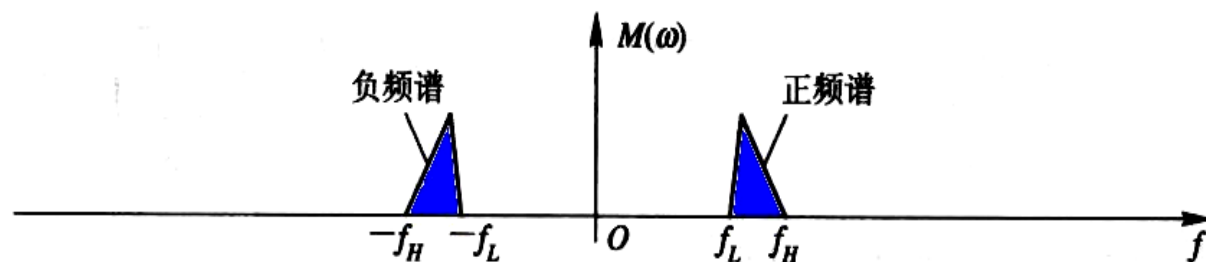
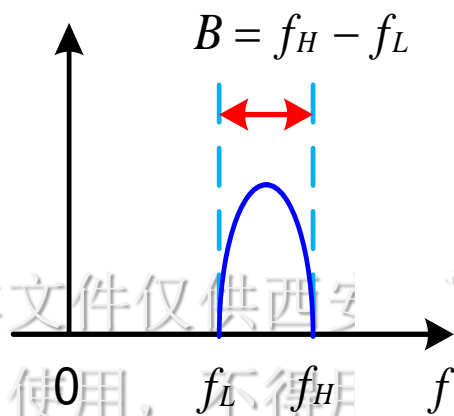


6.1 抽样定理

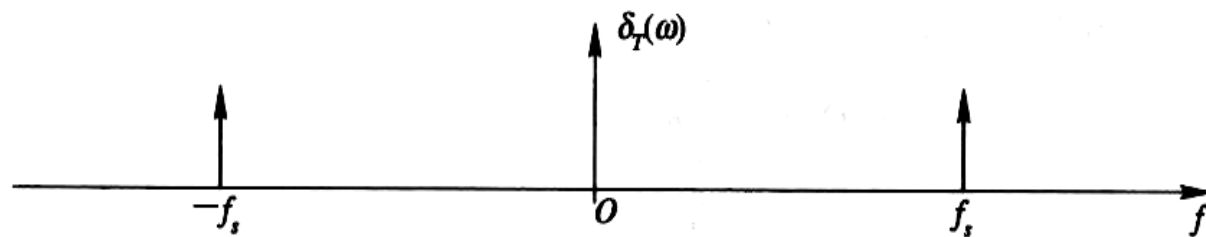
西安电子科技大学

通信工程学院

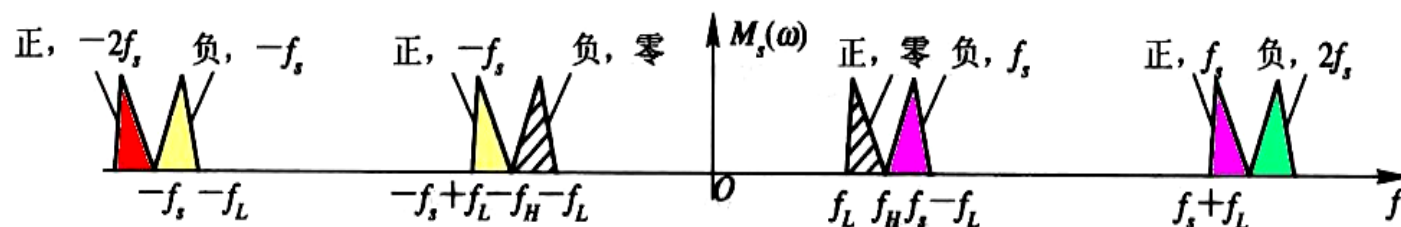
二、带通抽样定理



(a)



(b)



(c)



6.1 抽样定理

西安电子科技大学

通信工程学院

带通抽样定理：

频带限制在 (f_L, f_H) 内的带通信号 $m(t)$ ，带宽 $B = f_H - f_L$ ，若 $f_H = nB + kB$ ($n \in N, 0 \leq k < 1$)，则能无失真恢复出 $m(t)$ 的最小抽样速率为 $f_s = 2B \left(1 + \frac{k}{n} \right)$ 。

注：①既不留空隙，也无混叠现象。

②抽样速率大于此数值，不一定都满足要求。

本
习

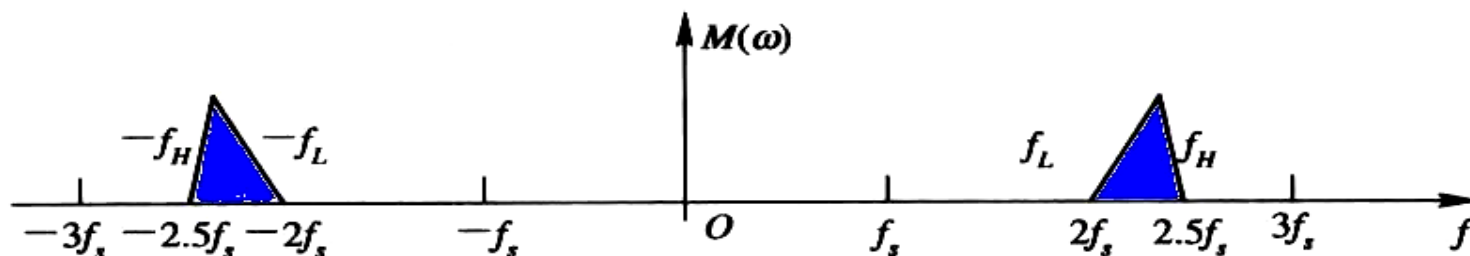


6.1 抽样定理

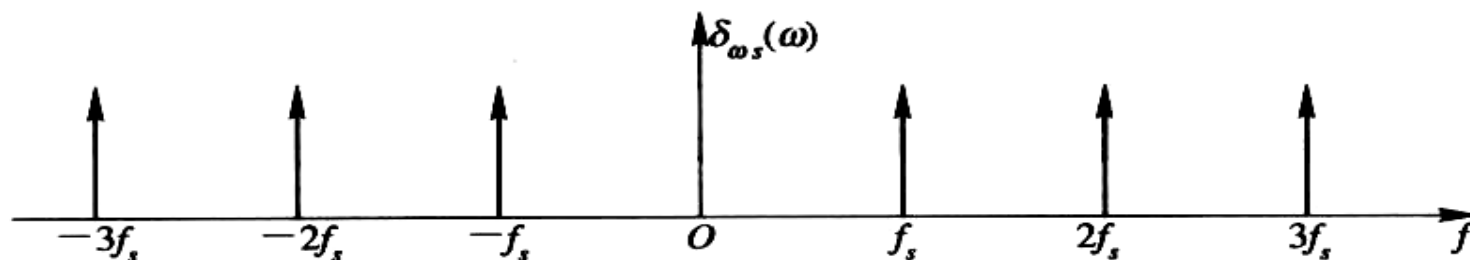
西安电子科技大学

通信工程学院

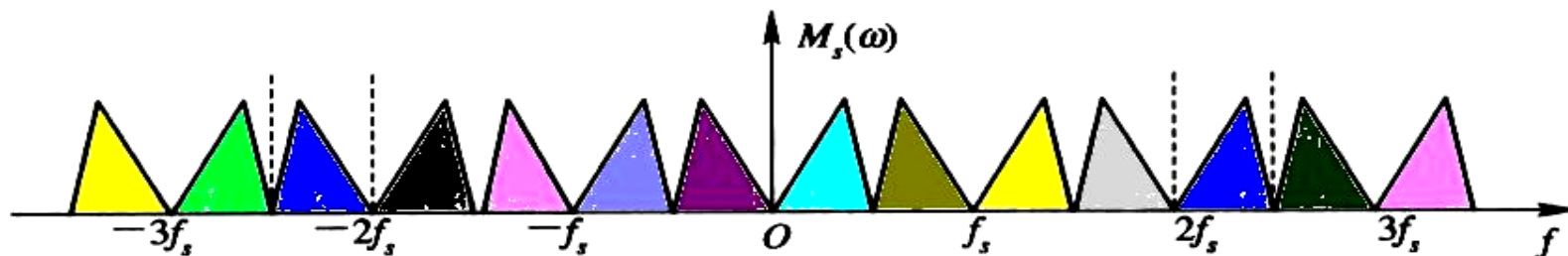
若 $f_H = 5\text{ B}$ \longrightarrow $f_s = 2B$



(a)



(b)





6.1 抽样定理

西安电子科技大学

通信工程学院

【例】 $f_L = 100.5\text{MHz}$, $f_H = 100.9\text{MHz}$

➡ $B = 0.4\text{MHz}$

$$f_H = 252B + 0.25B$$

$$f_s = 2B \left(1 + \frac{k}{n} \right) = 800.8\text{kHz}$$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

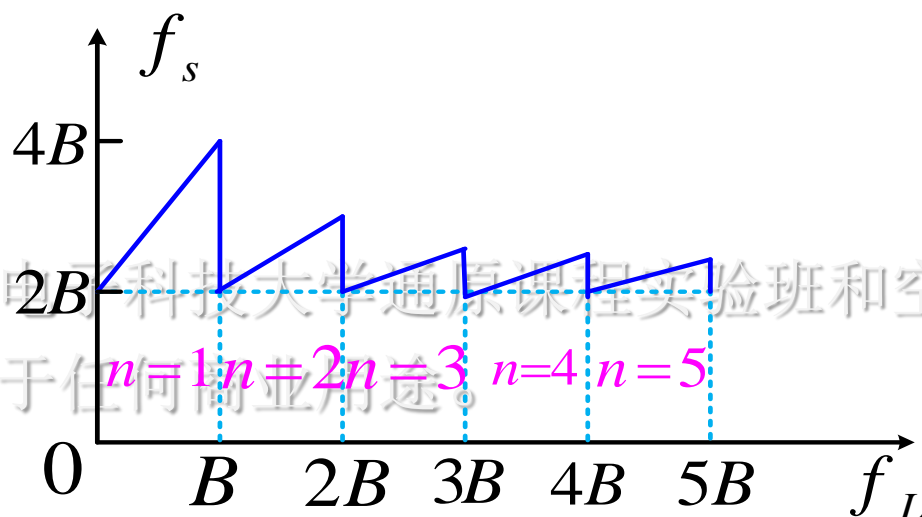


6.1 抽样定理

西安电子科技大学

通信工程学院

f_s 与 f_L 的关系曲线:



注：带通信号通常为窄带信号， $f_L \gg B$ ，故一般按**2B**速率采样。



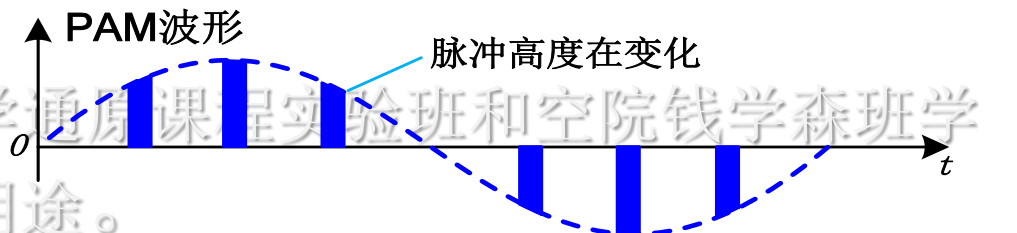
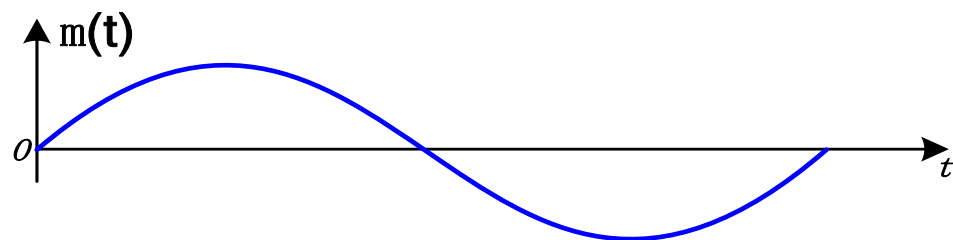
6.2 脉冲振幅调制(PAM)

西安电子科技大学

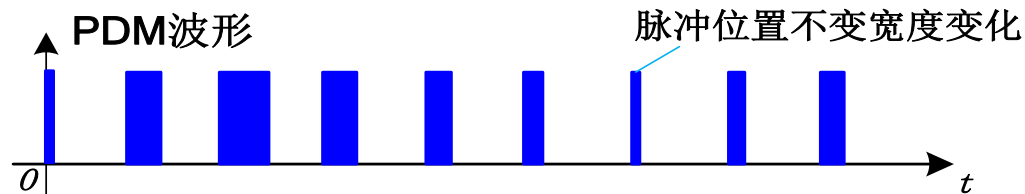
通信工程学院

一、脉冲调制

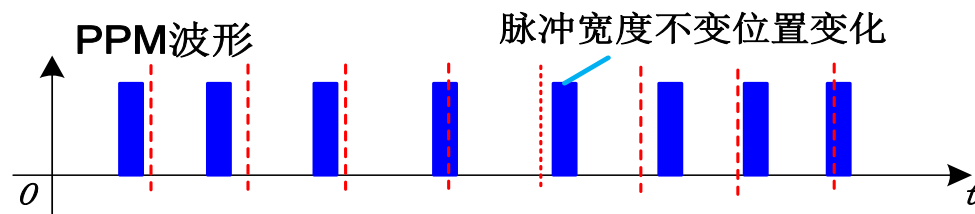
1、脉幅调制 (PAM)



2、脉宽调制 (PDM)



3、脉位调制 (PPM)





6.2 脉冲振幅调制(PAM)

西安电子科技大学

通信工程学院

脉幅调制 (PAM) {
理想抽样
实际抽样 { 自然抽样
平顶抽样

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

理想抽样： 抽样脉冲序列为理想的冲激脉冲序列

实际抽样： 抽样脉冲具有一定的宽度

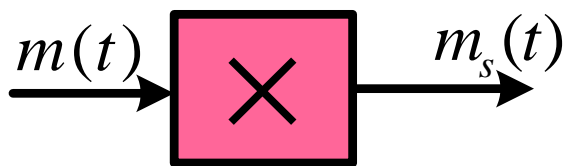


6.2 脉冲振幅调制(PAM)

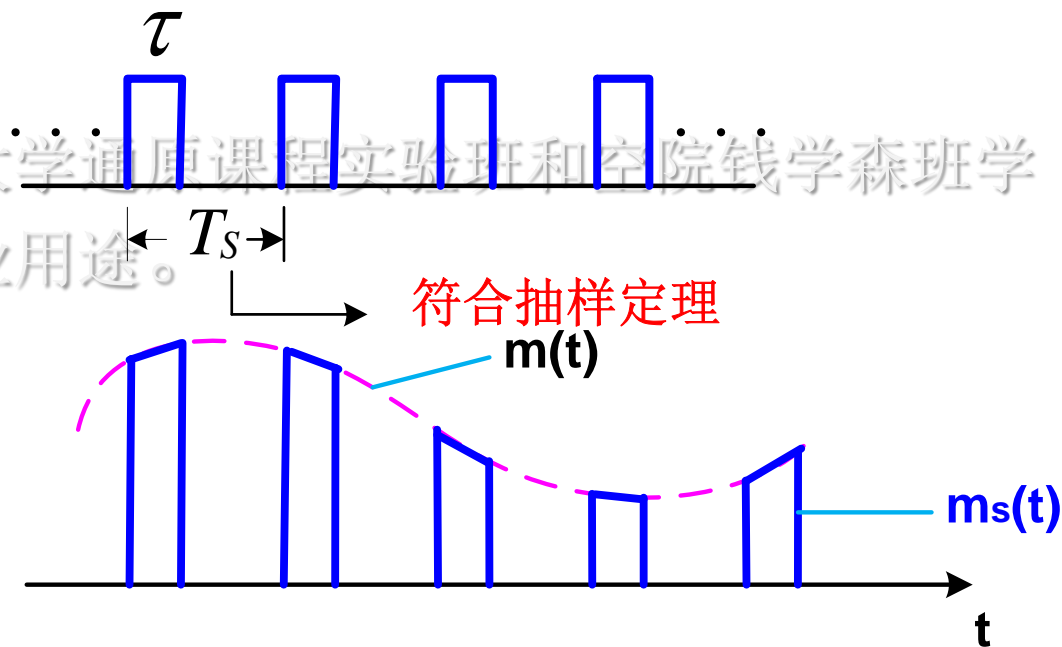
西安电子科技大学

通信工程学院

二、自然抽样



可是任意的
窄脉冲序列



曲顶抽样



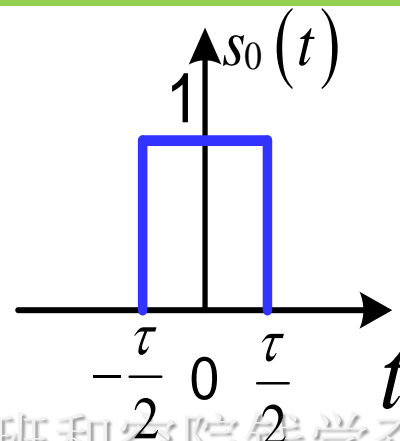
6.2 脉冲振幅调制(PAM)

西安电子科技大学

通信工程学院

抽样脉冲序列:

$$s(t) = s_0(t) * \delta_T(t)$$



$$S(\omega) = S_0(\omega) \cdot \delta_T(\omega)$$

$$= \tau S_a\left(\frac{\omega\tau}{2}\right) \cdot \frac{2\pi}{T_s} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(\omega - n\omega_s)$$

$$S_0(\omega) = \tau S_a\left(\frac{\omega\tau}{2}\right)$$

$$\text{令 } f_s = 2f_H$$

$$S(\omega) = \frac{2\pi\tau}{T_s} \sum_{n=-\infty}^{\infty} Sa(n\omega_H\tau) \cdot \delta(\omega - 2n\omega_H)$$



6.2 脉冲振幅调制(PAM)

西安电子科技大学

通信工程学院

自然抽样信号: $m_s(t) = m(t)s(t)$

频谱表达式:

$$M_s(\omega) = \frac{1}{2\pi} [M(\omega) * S(\omega)]$$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用, 不得用于任何商业用途。

$$= \frac{\tau}{T_s} \sum_{n=-\infty}^{\infty} S_a(n\omega_H \tau) M(\omega - 2n\omega_H)$$

信号恢复:



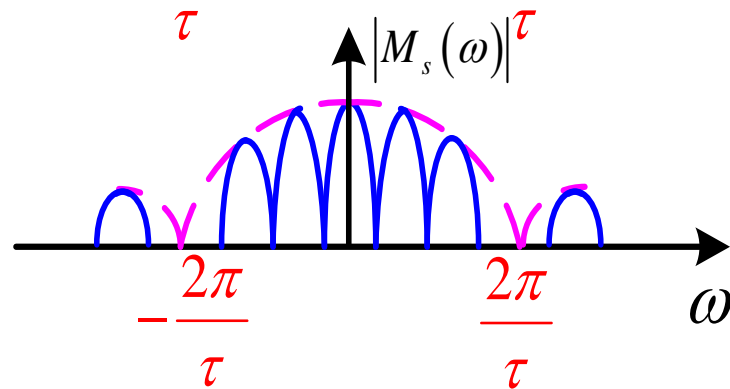
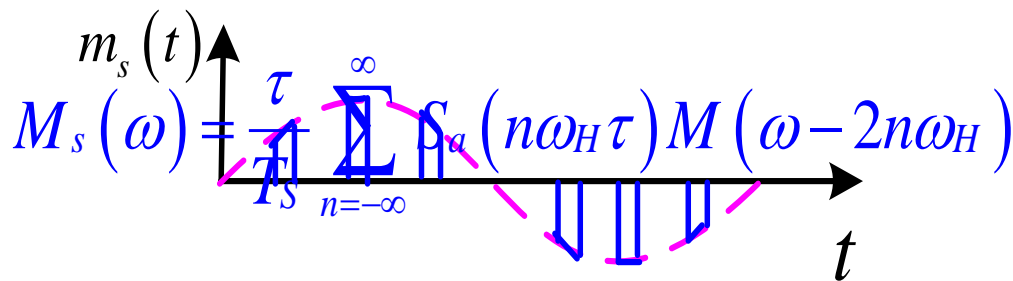
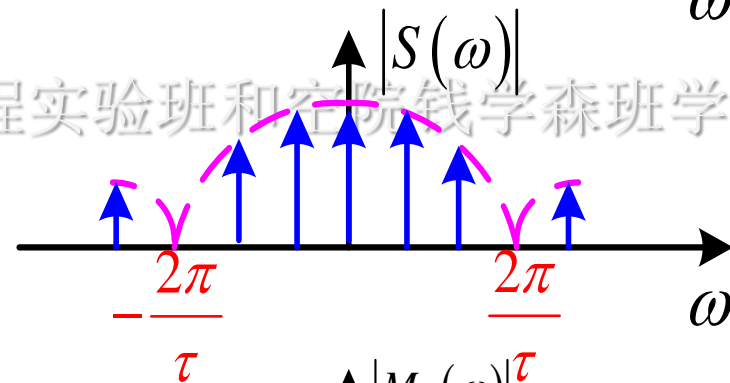
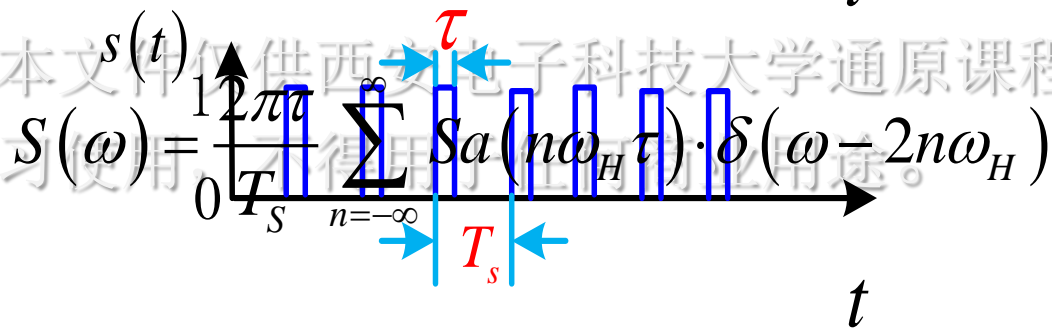
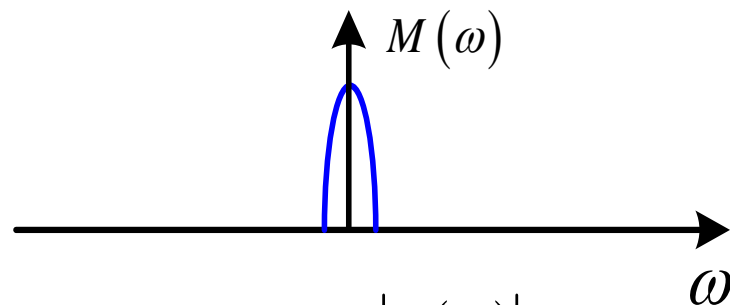
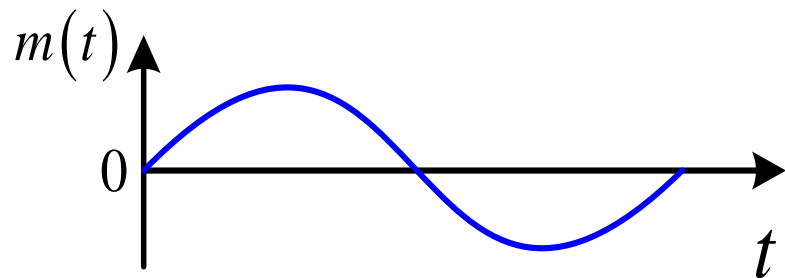


6.2 脉冲振幅调制(PAM)

西安电子科技大学

通信工程学院

自然抽样的波形和频谱：



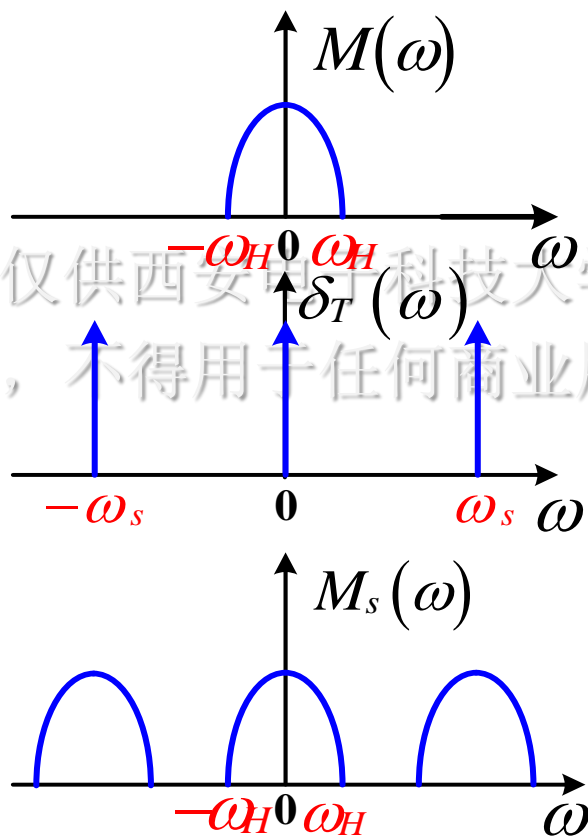


6.2 脉冲振幅调制(PAM)

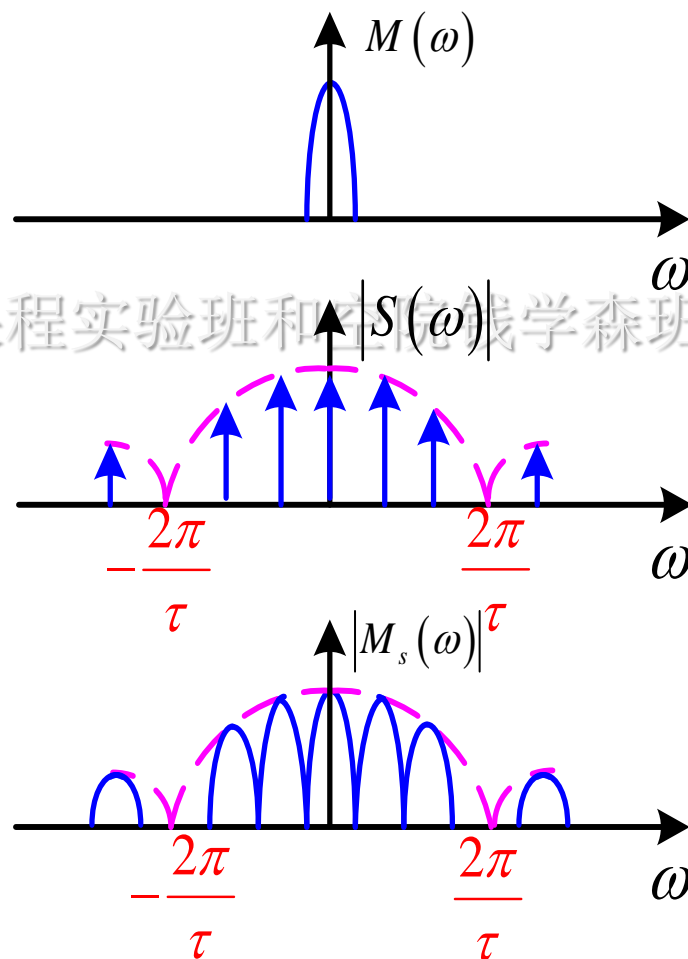
西安电子科技大学

通信工程学院

理想抽样频谱:



自然抽样频谱:



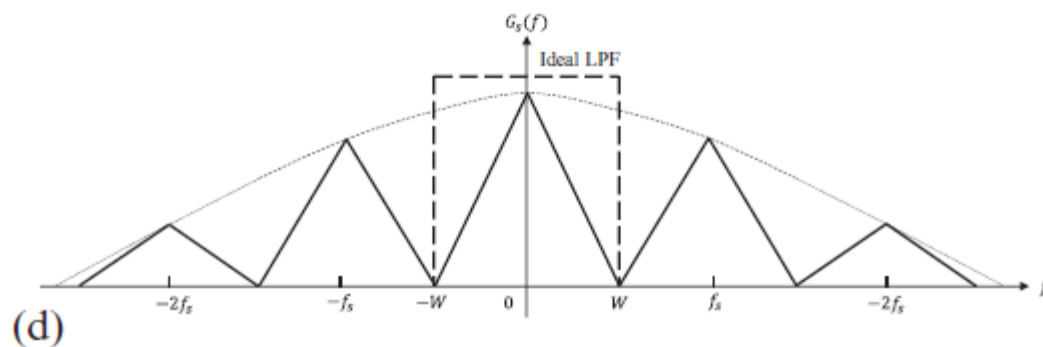
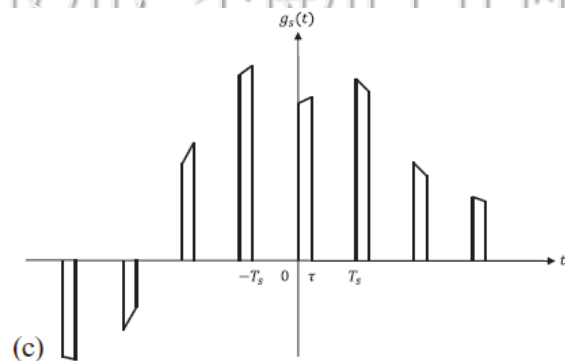
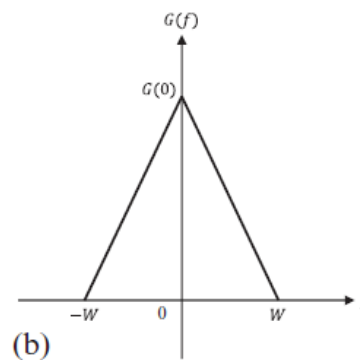
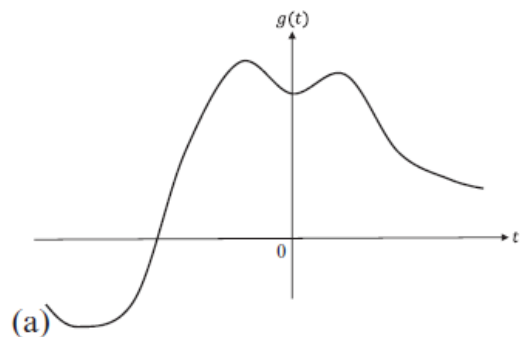
本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空信钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。



6.2 脉冲振幅调制(PAM)

西安电子科技大学

通信工程学院



西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。



6.2 脉冲振幅调制(PAM)

西安电子科技大学

通信工程学院

自然抽样与理想抽样的关系:

相同点: 由无穷多个间隔为 ω_s 的 $M(\omega)$ 叠加而成, 只要抽样速率满足要求, 就可通过 LPF 恢复 $m(t)$ 。

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习

不同点: 理想抽样的频谱被常数 $\frac{1}{T_s}$ 加权, $B = \infty$ 。

自然抽样频谱的包络按Sa函数随频率增高而下降, 因而**带宽是有限的**, 且 $\tau \uparrow \Rightarrow B \downarrow$ 。

τ 的选择要兼顾带宽和复用路数的要求。

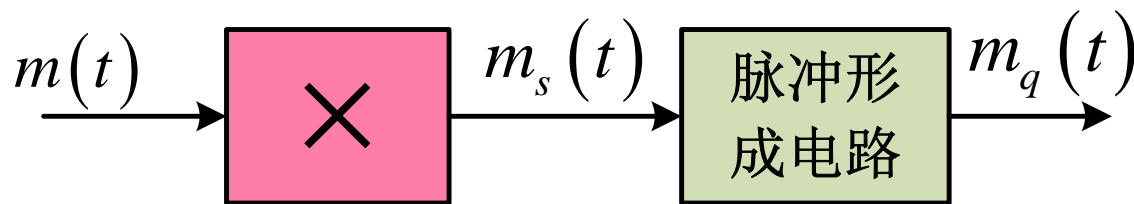


6.2 脉冲振幅调制(PAM)

西安电子科技大学

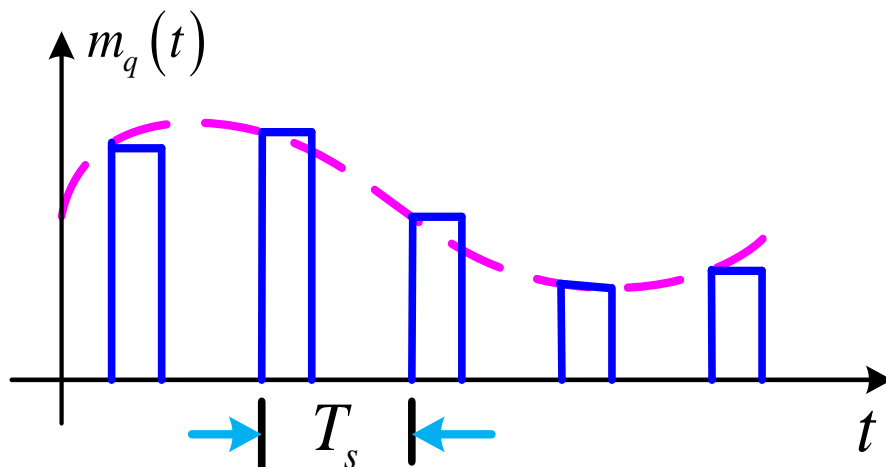
通信工程学院

三、平顶抽样



本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途

若 $Q(\omega)$ 为矩形脉冲形成电路



瞬时抽样



6.2 脉冲振幅调制(PAM)

西安电子科技大学

通信工程学院

理想抽样后: $m_s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} m(nT_s) \delta(t - nT_s)$

$$\therefore m_q(t) = m_s(t) * q(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} m(nT_s) q(t - nT_s)$$

$$M_q(\omega) = M_s(\omega) \cdot Q(\omega)$$

本文档仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

$$= \frac{1}{T_s} \sum_{n=-\infty}^{\infty} M(\omega - n\omega_s) \cdot Q(\omega)$$

$$\text{令 } f_s = 2f_H \quad M_q(\omega) = \frac{1}{T_s} \sum_{n=-\infty}^{\infty} Q(\omega) M(\omega - 2n\omega_H)$$

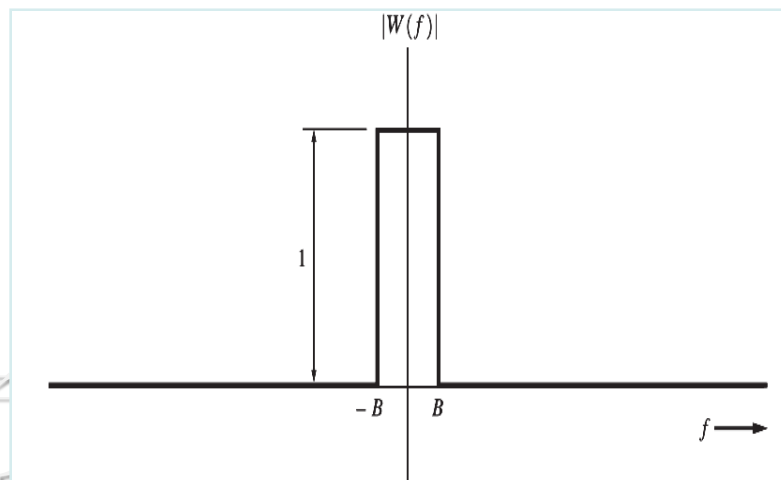
$$M_s(\omega) = \frac{\tau}{T_s} \sum_{n=-\infty}^{\infty} S_a(n\omega_H \tau) M(\omega - 2n\omega_H)$$



6.2 脉冲振幅调制(PAM)

西安电子科技大学

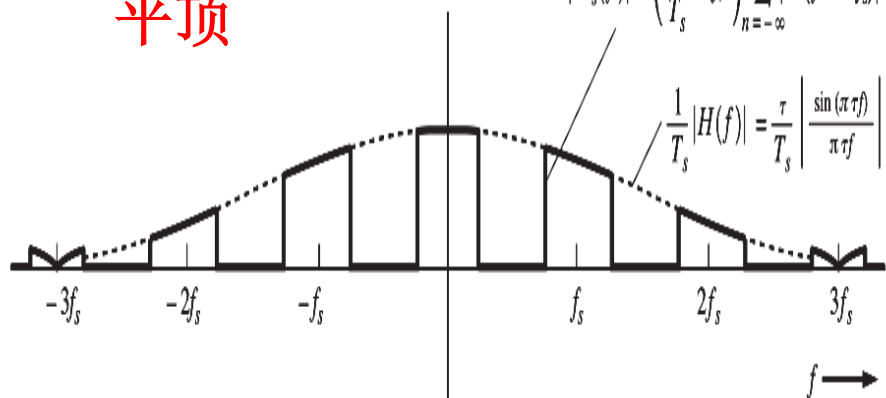
通信工程学院



平顶

$$|W_s(f)| = \left(\frac{1}{T_s} |H(f)| \right) \sum_{n=-\infty}^{\infty} |W(f - kf_s)|$$

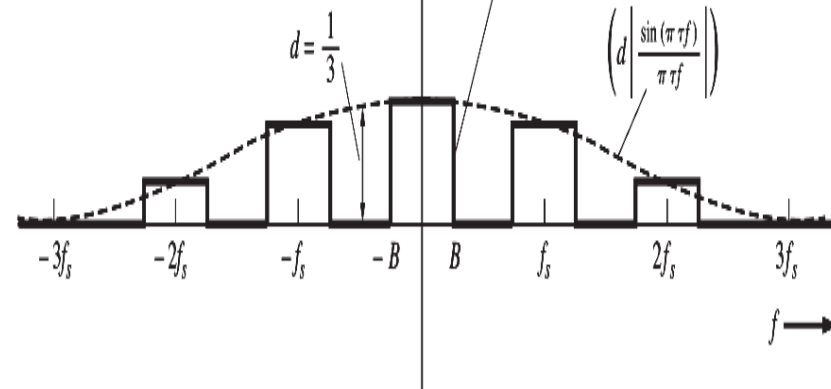
$$\frac{1}{T_s} |H(f)| = \frac{\tau}{T_s} \left| \frac{\sin(\pi \tau f)}{\pi \tau f} \right|$$



自然

$$|W_s(f)| = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ \left| d \frac{\sin(\pi n d)}{\pi n d} \right| |W(f - nf_s)| \right\}$$

$$\left(d \left| \frac{\sin(\pi \tau f)}{\pi \tau f} \right| \right)$$



空院钱学森班学

本文件仅供西安电子
习使用，不得用于任何商业用途。

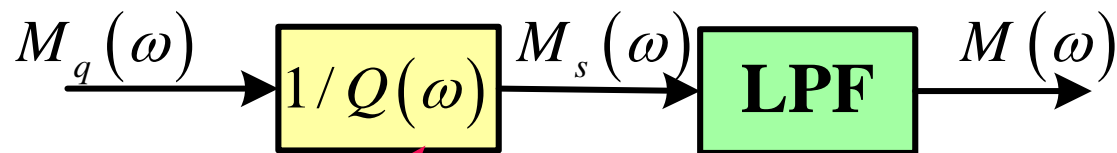


6.2 脉冲振幅调制(PAM)

西安电子科技大学

通信工程学院

恢复 $m(t)$ 的方法:



频谱校正网络

$$M_s(\omega) = M_Q(\omega) \cdot \frac{1}{Q(\omega)} = \frac{1}{T_s} \sum_{n=-\infty}^{\infty} M(\omega - 2n\omega_H)$$

注: ①平顶抽样信号多采用**抽样保持**电路实现。
②在实际应用中, 一般取 $f_s = (2.5 \sim 3) f_H$ 。



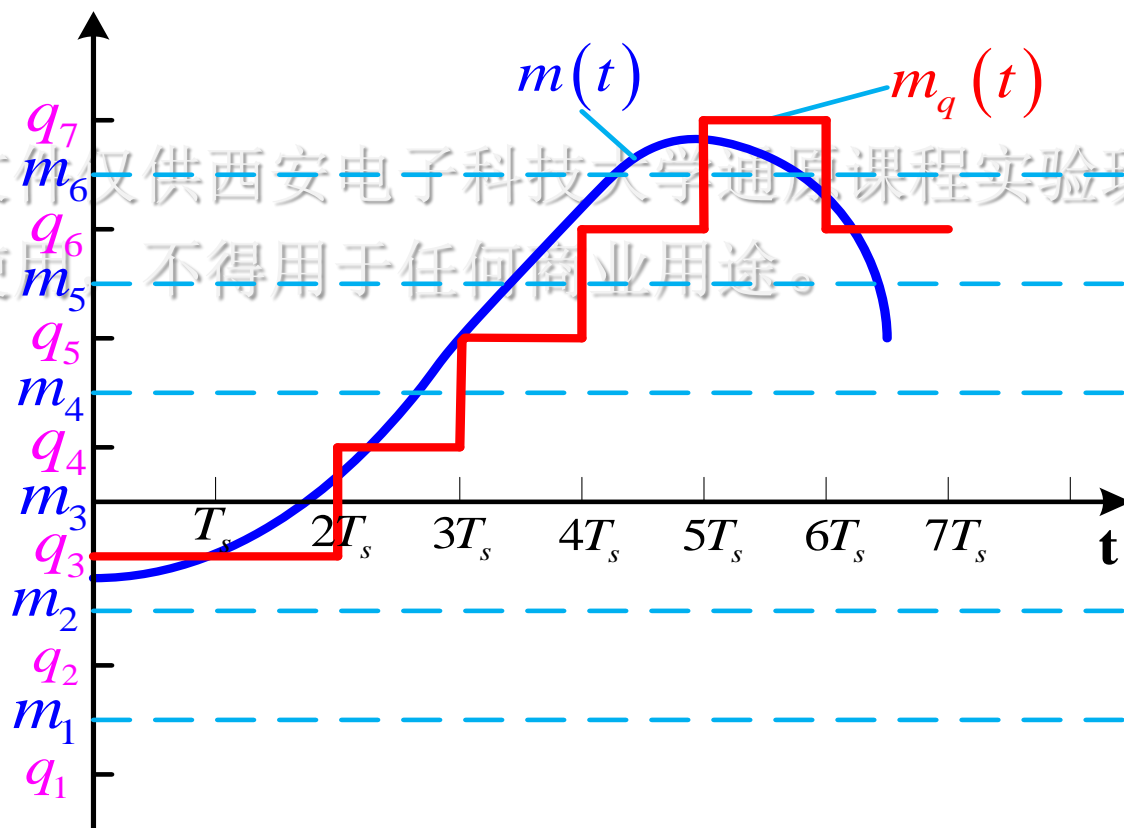
6.3 量化

西安电子科技大学

通信工程学院

量化： 用预先规定的有限个电平来表示模拟抽样值。

一、量化原理



$q_1 \sim q_7$

量化电平

$m_1 \sim m_6$

分层电平

$$\Delta_i = m_i - m_{i-1}$$

量化间隔



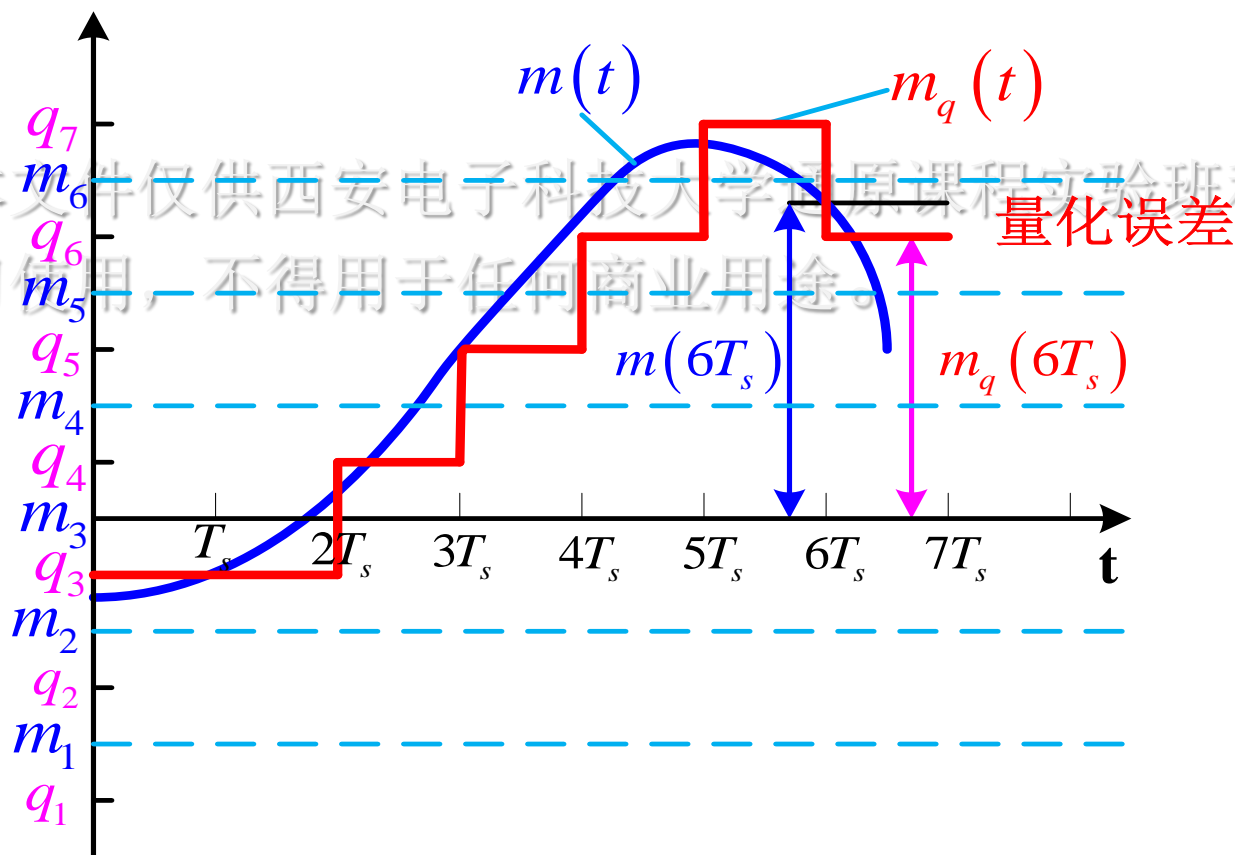
6.3 量化

西安电子科技大学

通信工程学院

若 $m_{i-1} \leq m(kT_s) < m_i$, 则 $m_q(kT_s) = q_i$

$$m_q(t) = m_q(kT_s), \quad kT_s \leq t \leq (k+1)T_s$$



抽样速率一定：
增加量化电平数
且量化电平选择
适当，可提高近似程度。



6.3 量化

西安电子科技大学

通信工程学院

量化误差:

$$e_q(kT_s) = m(kT_s) - m_q(kT_s)$$

$$e_q = m - m_q$$

量化噪声

量化器的性能指标: 量化信噪比

$$\frac{S}{N_q} = \frac{E[m^2]}{E[(m - m_q)^2]}$$



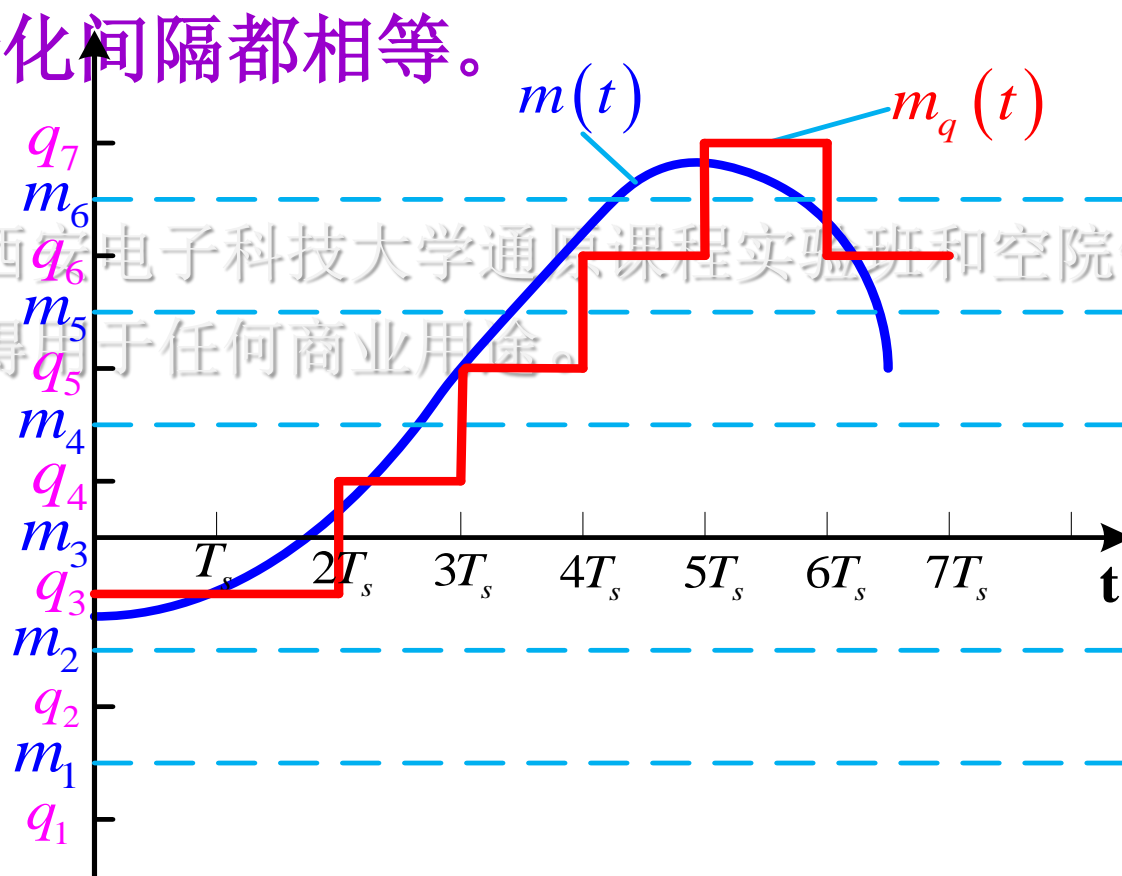
6.3 量化

西安电子科技大学

通信工程学院

二、均匀量化

量化间隔都相等。



本文件仅供西安电子科技大学通信课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。



6.3 量化

西安电子科技大学

通信工程学院

二、均匀量化

若设输入信号的最小值为 a ，最大值为 b ，量化电平数为 M ，则均匀量化的量化间隔为：

$$\Delta_i = \Delta = \frac{b-a}{M}$$

分层电平： $m_i = a + i\Delta$

量化电平： $q_i = \frac{m_i + m_{i-1}}{2}$



6.3 量化

西安电子科技大学

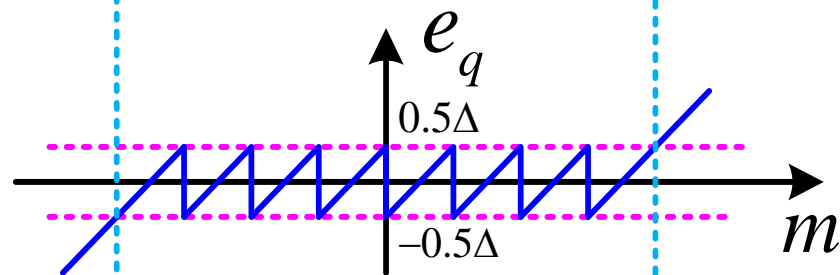
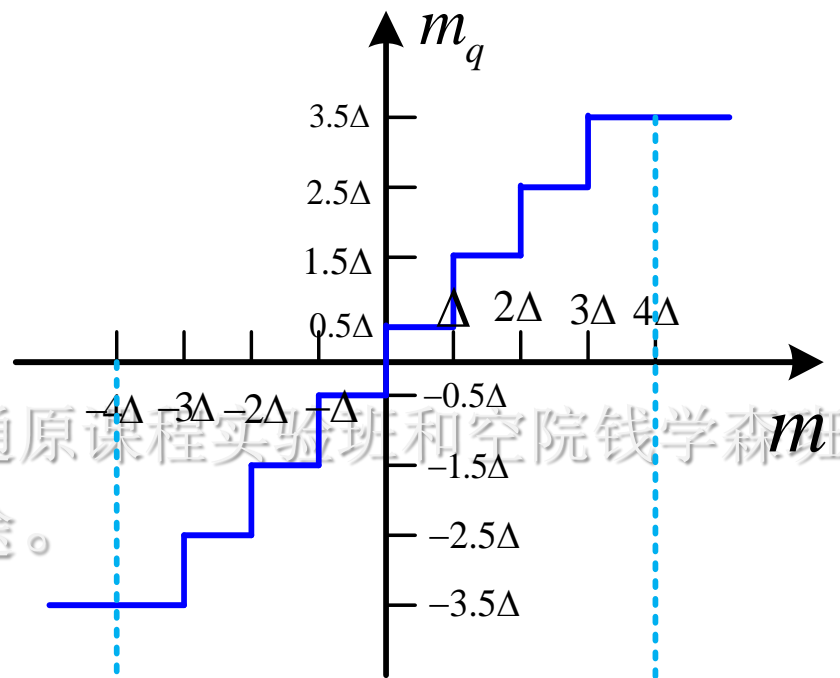
通信工程学院

1、量化特性

量化区: $|e_q| \leq \frac{\Delta}{2}$

过载(饱和)区:

$$|e_q| > \frac{\Delta}{2}$$



过载区 ← 量化区 → 过载区



6.3 量化

西安电子科技大学

通信工程学院

2、量化信噪比

设 $m(t)$ 是均值为0，概率密度为 $f(x)$ 的平稳随机过程，且不会出现过载量化

$$S = E[m^2] = \int_a^b x^2 f(x) dx$$

$$N_q = E[(m - m_q)^2] = \int_a^b (x - m_q)^2 f(x) dx$$

$$= \sum_{i=1}^M \int_{m_{i-1}}^{m_i} (x - q_i)^2 f(x) dx$$

$$m_i = a + i\Delta \quad q_i = a + i\Delta - \frac{\Delta}{2}$$



6.3 量化

西安电子科技大学

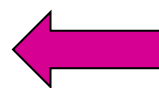
通信工程学院

若量化电平数 M 很大，量化间隔 Δ 很小，因而可认为在 Δ 内 $f(x)$ 不变，为 f_i ，则

$$N_q = \sum_{i=1}^M \int_{m_{i-1}}^{m_i} (x - q_i)^2 f(x) dx$$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

$$= \sum_{i=1}^M f_i \int_{m_{i-1}}^{m_i} (x - q_i)^2 dx$$



$$\begin{cases} m_i = a + i\Delta \\ q_i = a + i\Delta - \frac{\Delta}{2} \end{cases}$$

$$= \frac{\Delta^2}{12} \sum_{i=1}^M f_i \Delta$$

=1

$$N_q = \frac{\Delta^2}{12}$$



6.3 量化

西安电子科技大学

通信工程学院

2、量化信噪比

$$S = E[m^2] = \int_a^b x^2 f(x) dx \quad N_q = \frac{\Delta^2}{12}$$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用

$$\frac{S}{N_q} = \frac{E[m^2]}{E[(m - m_q)^2]}$$

量化信噪比是衡量量化器性能重要指标。



6.3 量化

西安电子科技大学

通信工程学院

【例】 设 M 个量化电平的均匀量化器，输入信号在区间 $[-a, a]$ 内均匀分布，求该量化器的量化信噪比。

解： $f(x) = \frac{1}{2a}$ $\Delta = \frac{2a}{M}$

$$N_q = \sum_{i=1}^M \int_{m_{i-1}}^{m_i} (x - q_i)^2 \frac{1}{2a} dx$$

$$= \sum_{i=1}^M \int_{-a+(i-1)\Delta}^{-a+i\Delta} \left(x + a - i\Delta + \frac{\Delta}{2} \right)^2 \frac{1}{2a} dx$$

$$= \frac{M \cdot \Delta^3}{24a} = \frac{\Delta^2}{12}$$



6.3 量化

西安电子科技大学

通信工程学院

$$S = \int_{-a}^a x^2 \cdot \frac{1}{2a} dx = \frac{\Delta^2}{12} \cdot M^2$$

$$N_q = \frac{\Delta^2}{12}$$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

$$\frac{S}{N_q} = M^2$$

$$\left(\frac{S}{N_q} \right)_{dB} = 20 \lg M$$



6.3 量化

西安电子科技大学

通信工程学院

均匀量化器不过载 $N_q = \frac{\Delta^2}{12}$ ，与信号的统计特性无关

$$\frac{S}{N_q} = \frac{E[m^2]}{E[(m - m_q)^2]}$$

本文件仅供西安电

班和空院钱学森班学

均匀量化的缺点： 量化信噪比随信号电平的减小而下降，使得小信号的量化信噪比低，限制了输入信号的动态范围。

输入信号的动态范围： 满足信噪比要求的输入信号的取值范围。

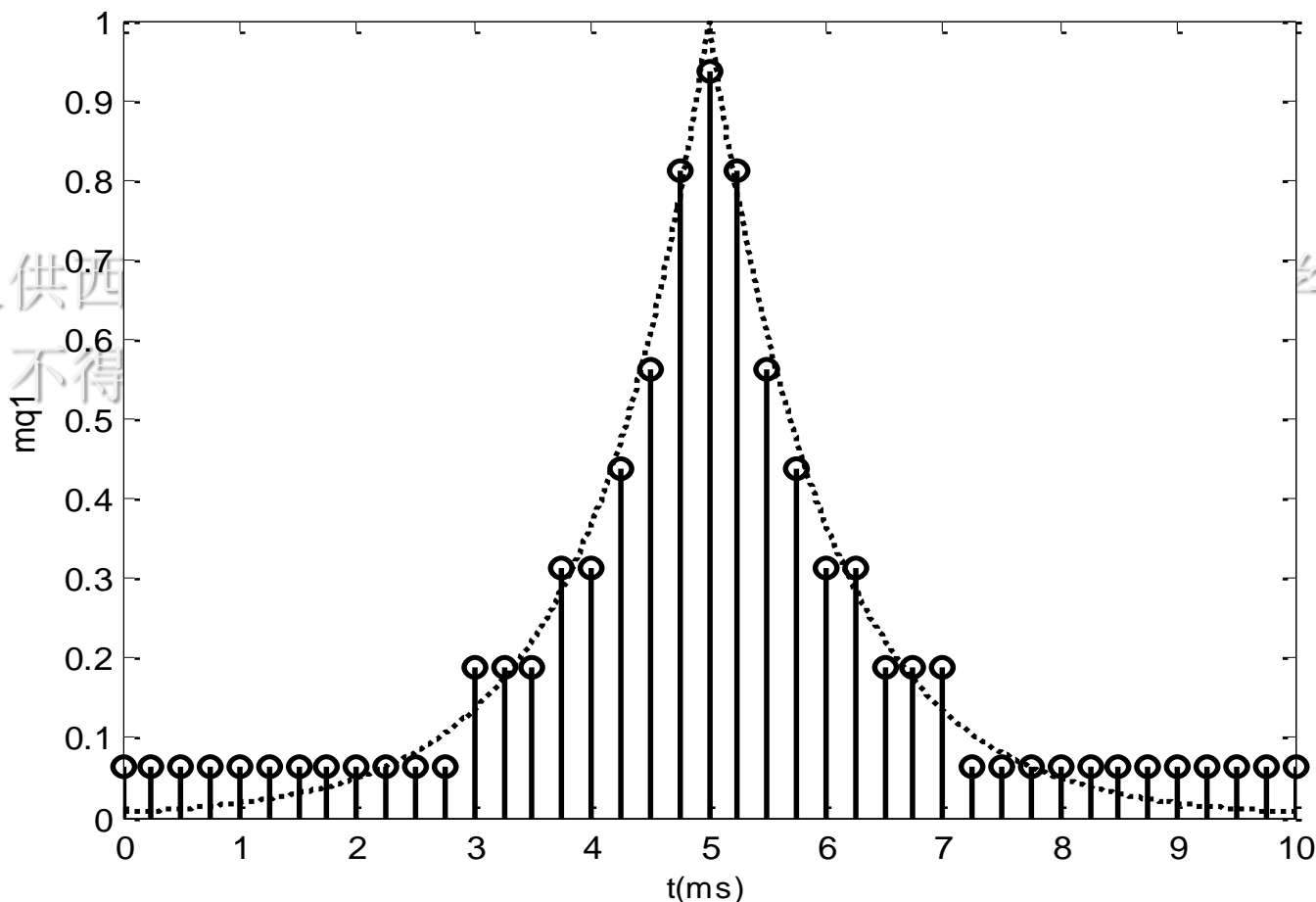


6.3 量化

西安电子科技大学

通信工程学院

【例】 $m(t) = e^{-1000|t-0.005|}$, 8电平平均均匀量化



(a) 抽样信号的均匀量化

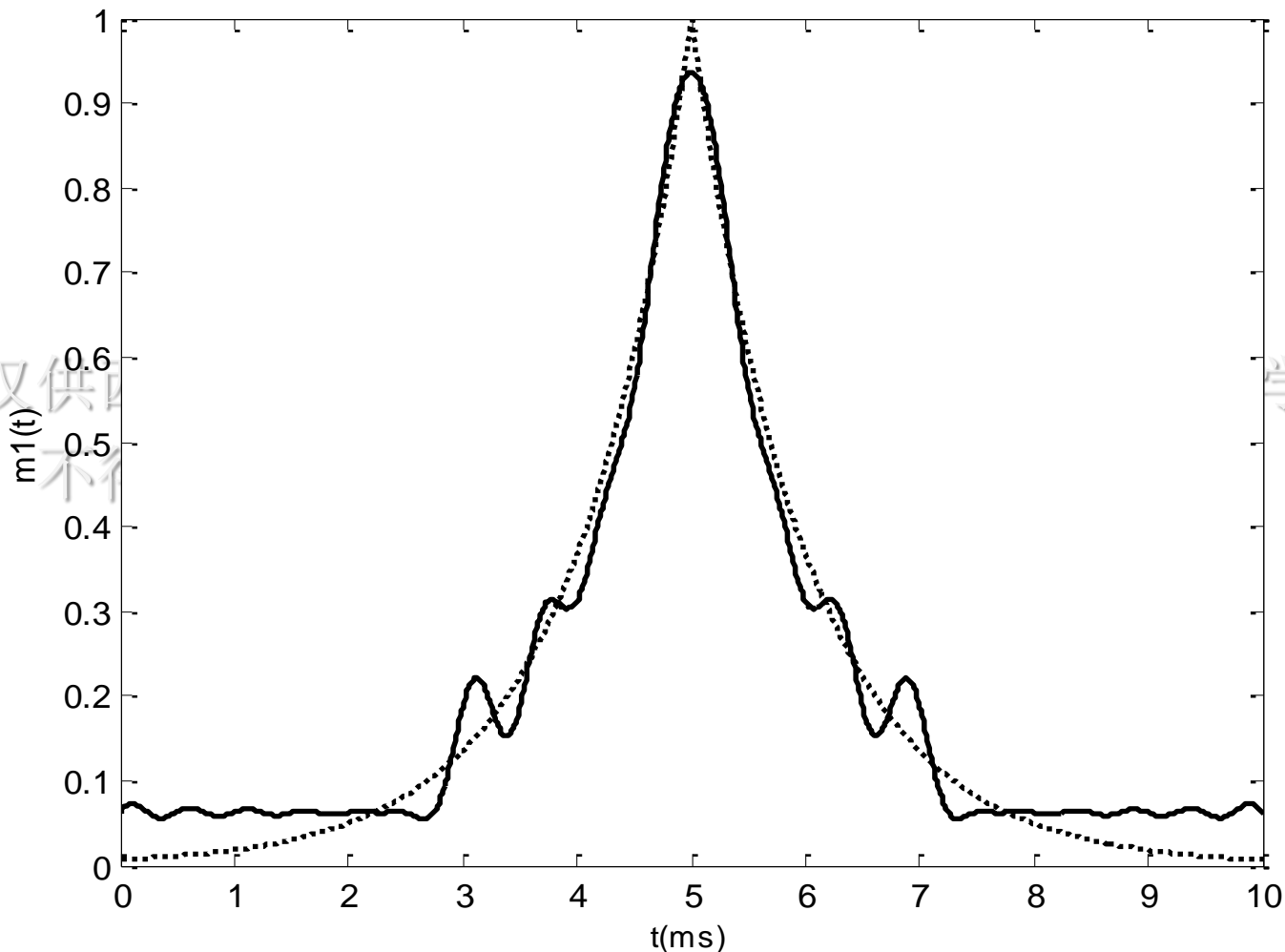
(信号的幅度范围等于量化器的工作范围)



6.3 量化

西安电子科技大学

通信工程学院



(b) (a)中量化信号的恢复



6.3 量化

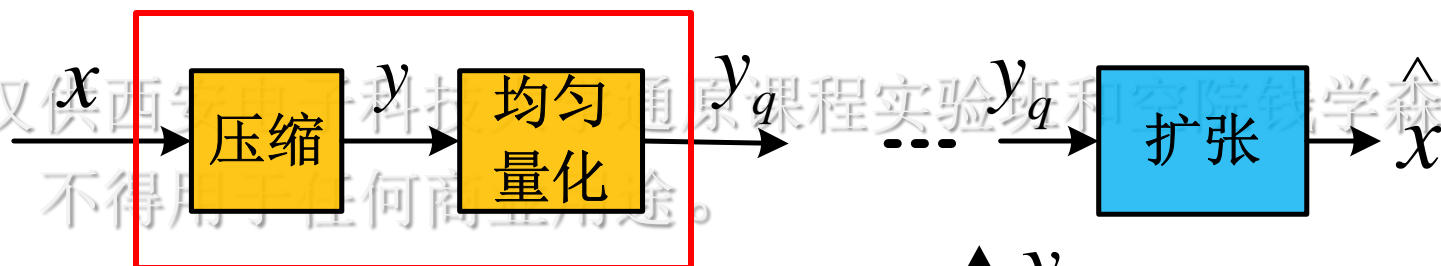
西安电子科技大学

通信工程学院

三、非均匀量化

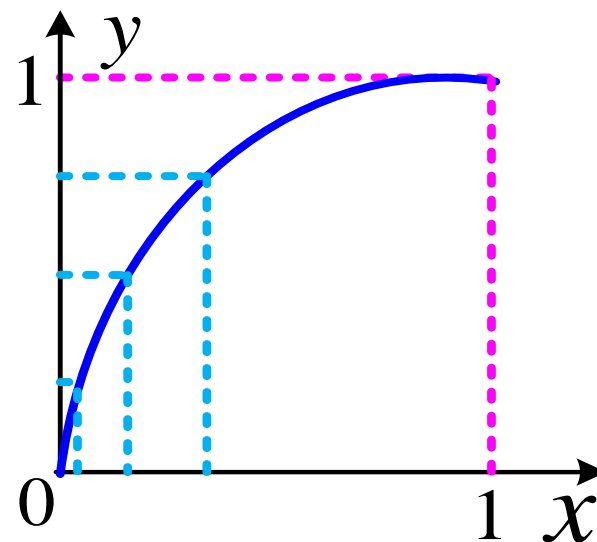
非均匀量化：量化间隔不相等。

1、实现方法



非均匀量化

压缩与扩张特性互逆





6.3 量化

西安电子科技大学

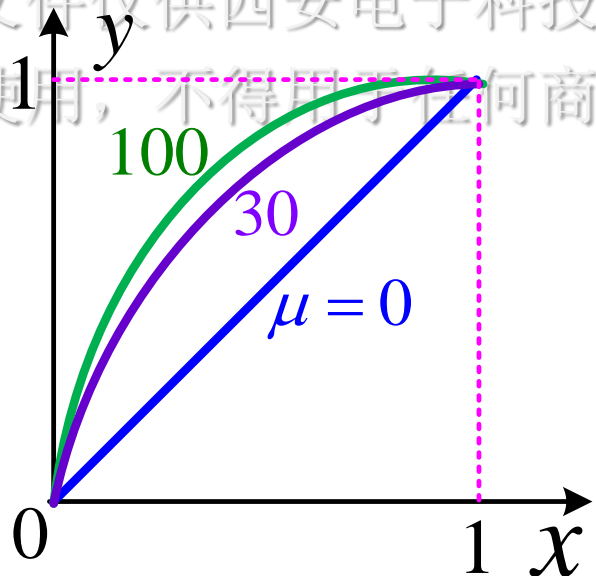
通信工程学院

2、两种对数压缩律

(1) μ 压缩律

美、日

$$y = \frac{\ln(1 + \mu x)}{\ln(1 + \mu)}, \quad 0 \leq x \leq 1$$



① $\mu = 0$ ，无压缩

均匀量化

$\mu \uparrow \rightarrow$ 压缩效果 \uparrow

② 以原点奇对称

③ 典型值： $\mu = 255$



6.3 量化

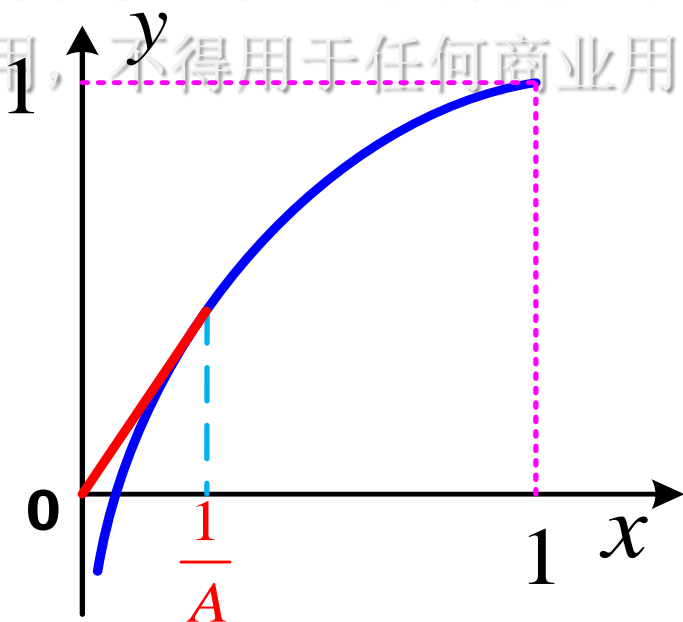
西安电子科技大学

通信工程学院

(2) A 压缩律 中、欧

$$y = \begin{cases} \frac{Ax}{1 + \ln A}, & 0 \leq x \leq \frac{1}{A} \\ \frac{1 + \ln Ax}{1 + \ln A}, & \frac{1}{A} \leq x \leq 1 \end{cases}$$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。



① $A=1$: 无压缩

$A \uparrow \Rightarrow$ 压缩效果 \uparrow

② 以原点奇对称

③ 典型值: $A=87.6$



6.3 量化

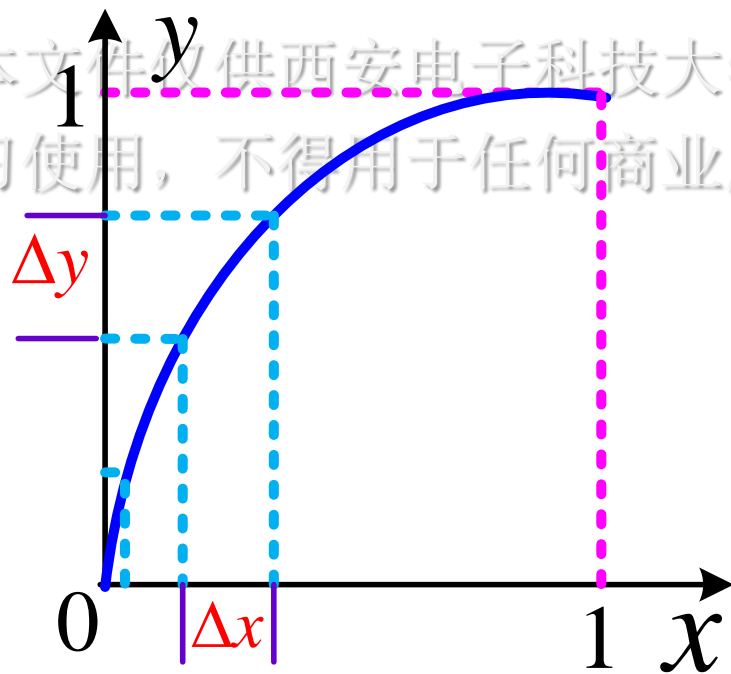
西安电子科技大学

通信工程学院

【例】 求 $\mu=100$ 时，压缩对大、小信号的量化信噪比的改善量。

解：

$$y = \frac{\ln(1 + \mu x)}{\ln(1 + \mu)}$$



$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{dy}{dx} = \frac{\mu}{(1 + \mu x) \ln(1 + \mu)}$$

$$[Q]_{dB} = 20 \lg \left(\frac{\Delta y}{\Delta x} \right) = 20 \lg \left(\frac{dy}{dx} \right)$$



6.3 量化

西安电子科技大学

通信工程学院

对于小信号 ($x \rightarrow 0$)

$$\left(\frac{dy}{dx}\right)_{x \rightarrow 0} = \frac{\mu}{(1 + \mu x) \ln(1 + \mu)} \Big|_{x \rightarrow 0} = \frac{\mu}{\ln(1 + \mu)} = \frac{100}{4.62} > 1$$

本文件仅供西安电子科技大学通信工程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

对于大信号 ($x \rightarrow 1$)

$$\left(\frac{dy}{dx}\right)_{x \rightarrow 1} = \frac{\mu}{(1 + \mu) \ln(1 + \mu)} = \frac{1}{4.67} < 1$$

$$\therefore [Q]_{dB} = 20 \lg \left(\frac{dy}{dx} \right) = -13.3 dB$$



6.3 量化

西安电子科技大学

通信工程学院

量化信噪比的改善程度和输入电平的关系：

χ	1	0.316	0.1	$\frac{0.031}{2}$	0.01	0.003
输入信号电平 / dB	0	-10	-20	-30	-40	-50
$[Q]_{dB}$	-13.3	-3.5	5.8	14.4	20.6	24.4

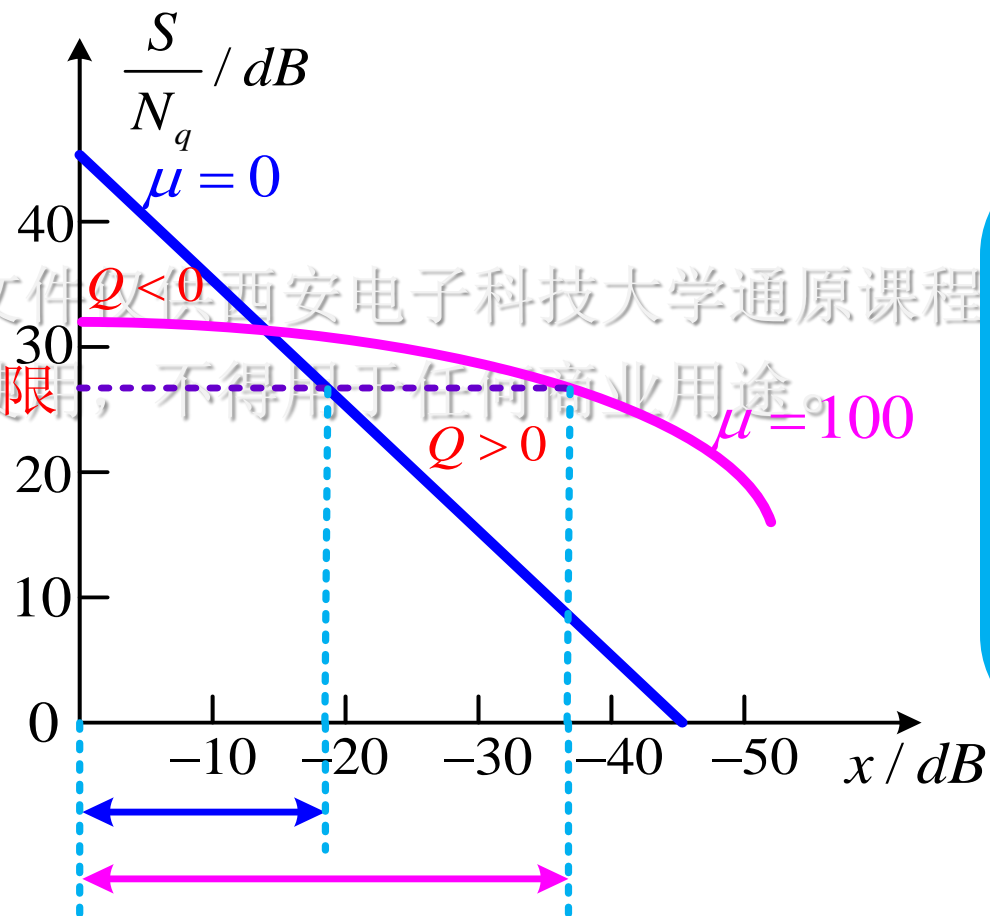


6.3 量化

西安电子科技大学

通信工程学院

有无压扩的比较曲线：



非均匀量化的优点：
提高了小信号的量化信噪比，扩大了输入信号的动态范围。

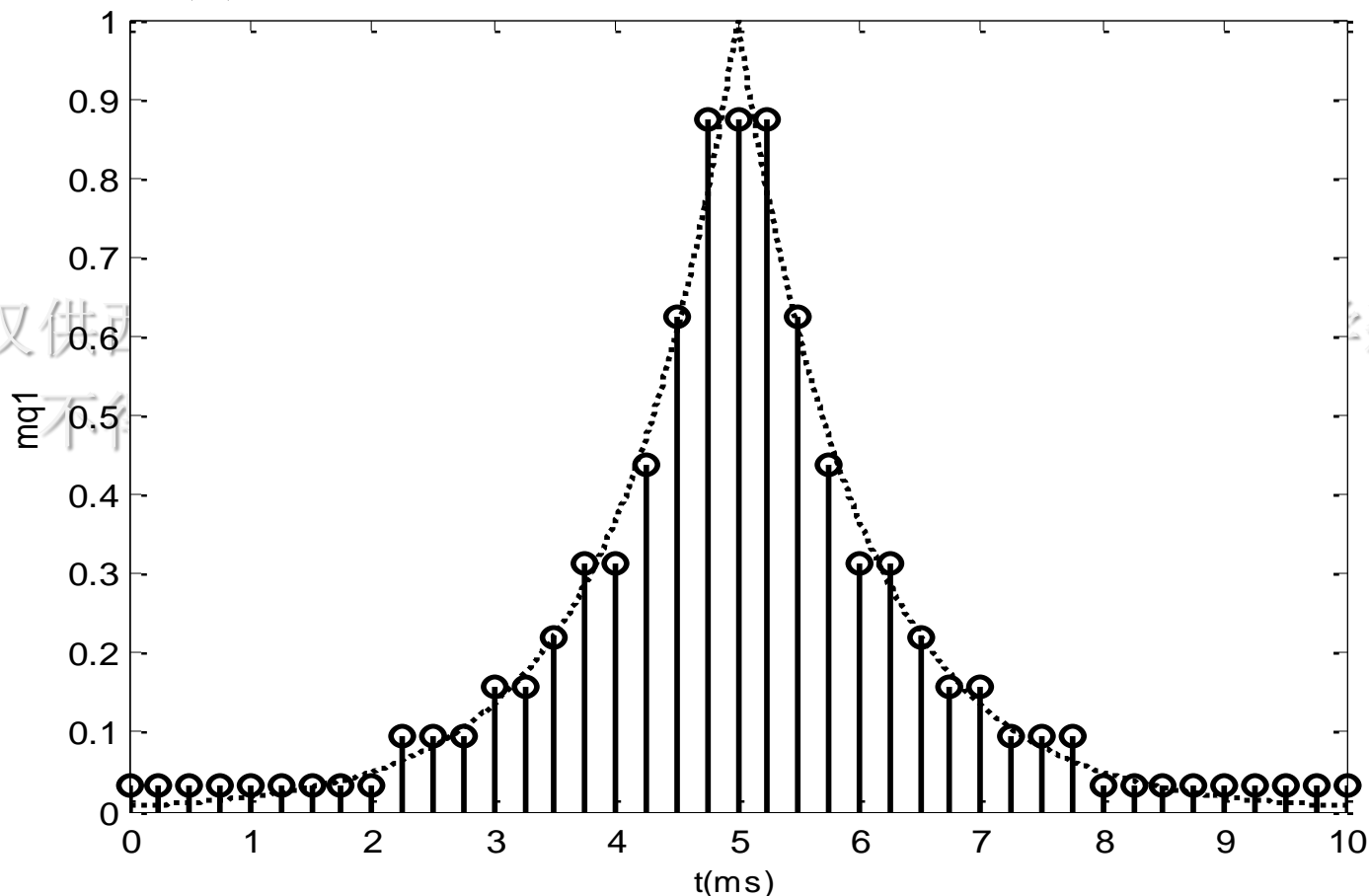


6.3 量化

西安电子科技大学

通信工程学院

【例】 $m(t) = e^{-1000|t-0.005|}$, 8电平非均匀量化



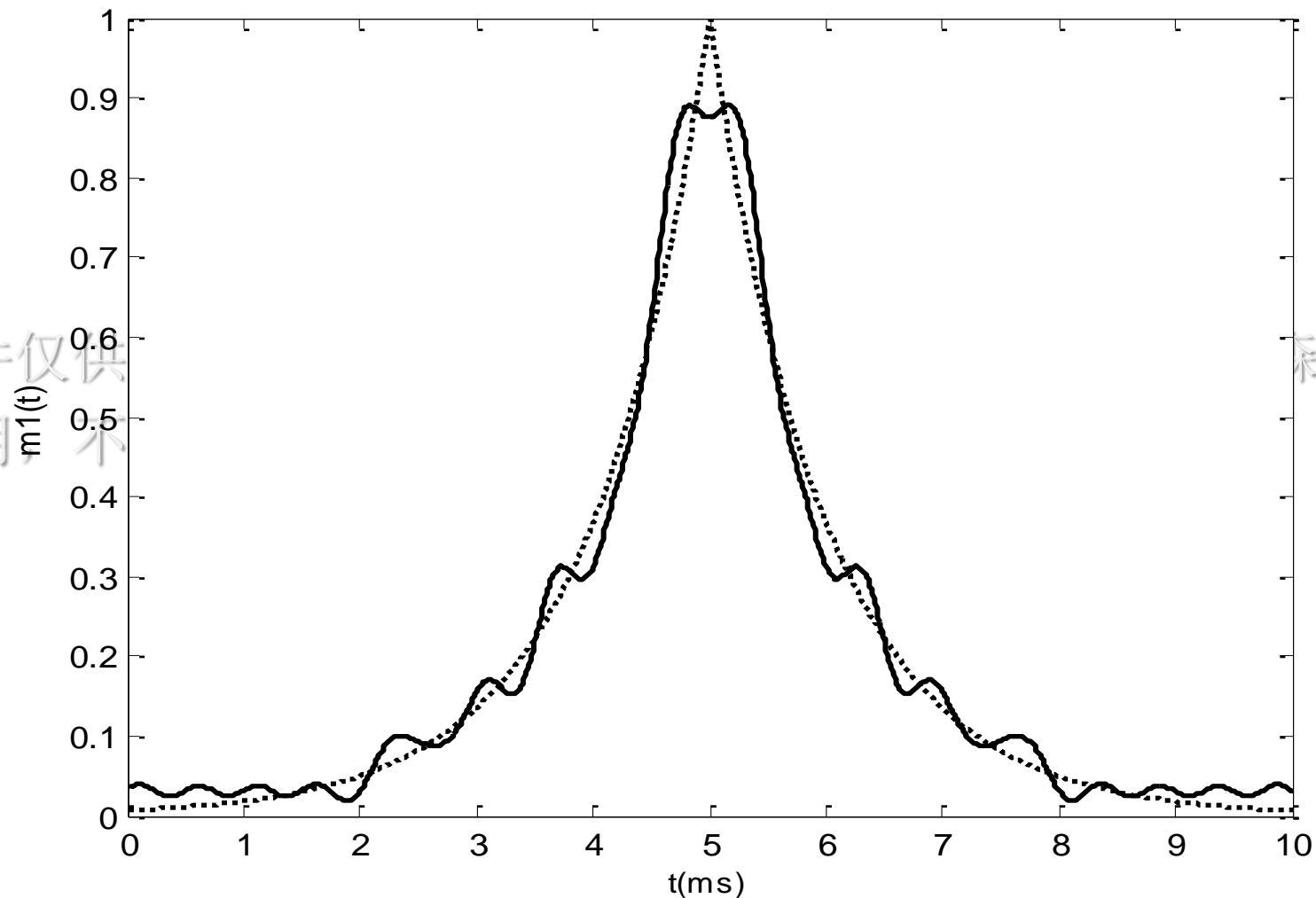
(a) 抽样信号的非均匀量化
(信号的幅度范围等于量化器的工作范围)



6.3 量化

西安电子科技大学

通信工程学院



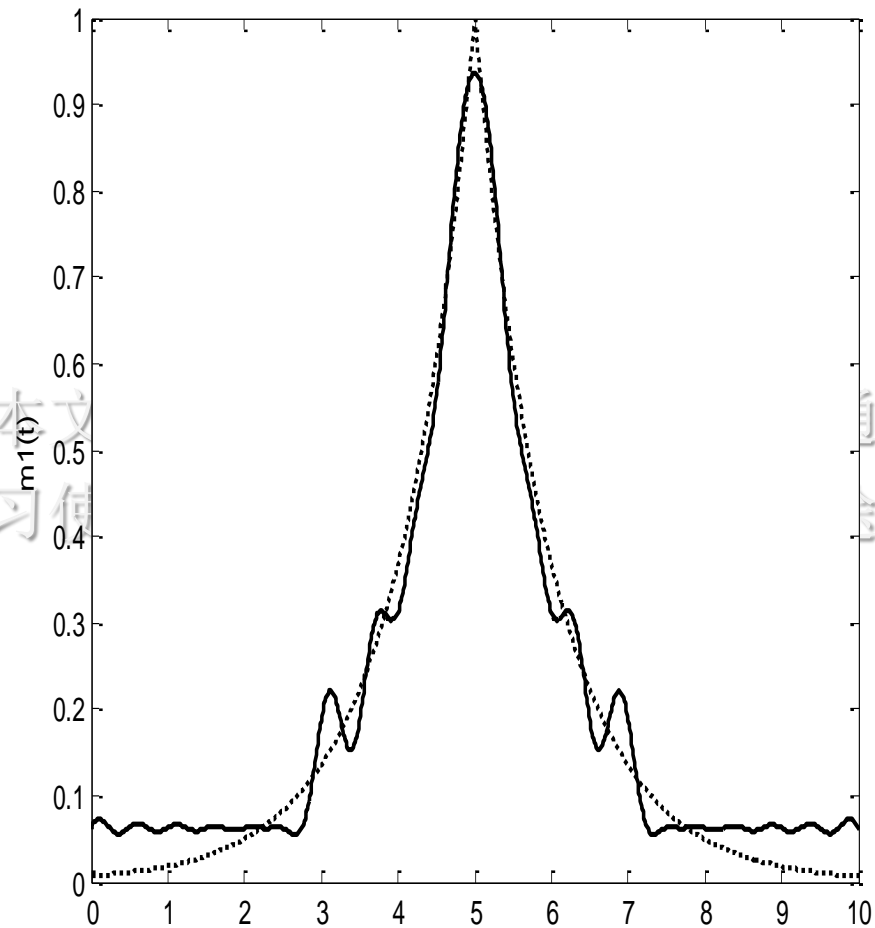
(b) 由(a)中量化信号恢复出的信号波形



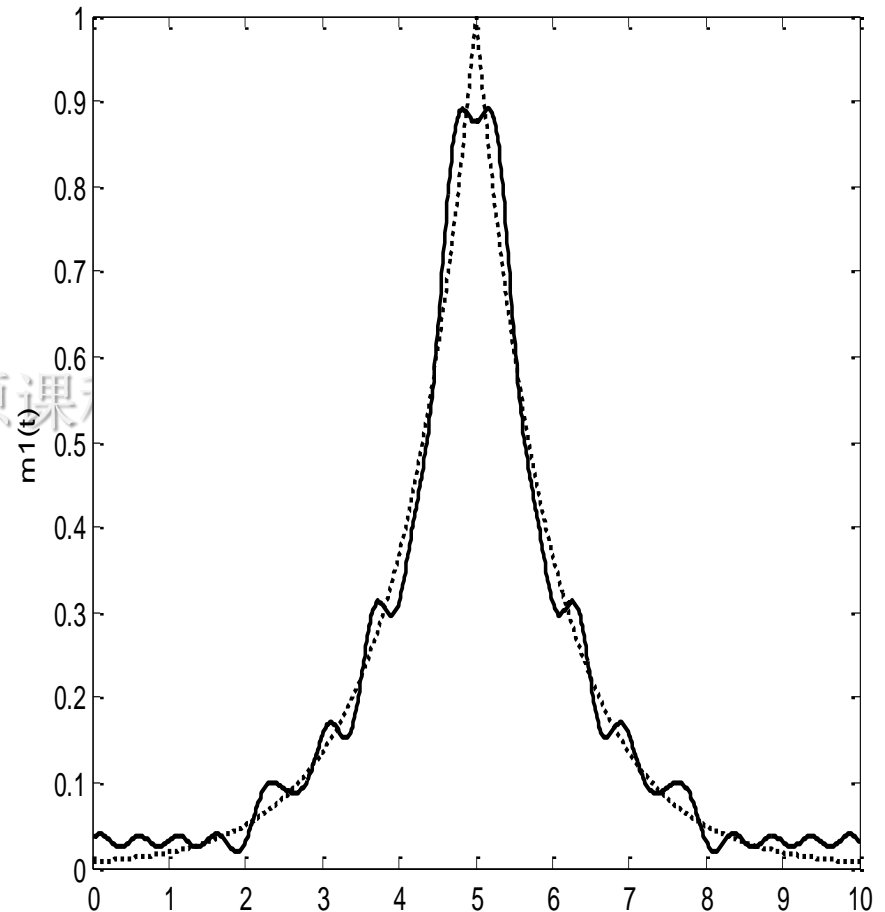
6.3 量化

西安电子科技大学

通信工程学院



均匀量化



非均匀量化



6.3 量化

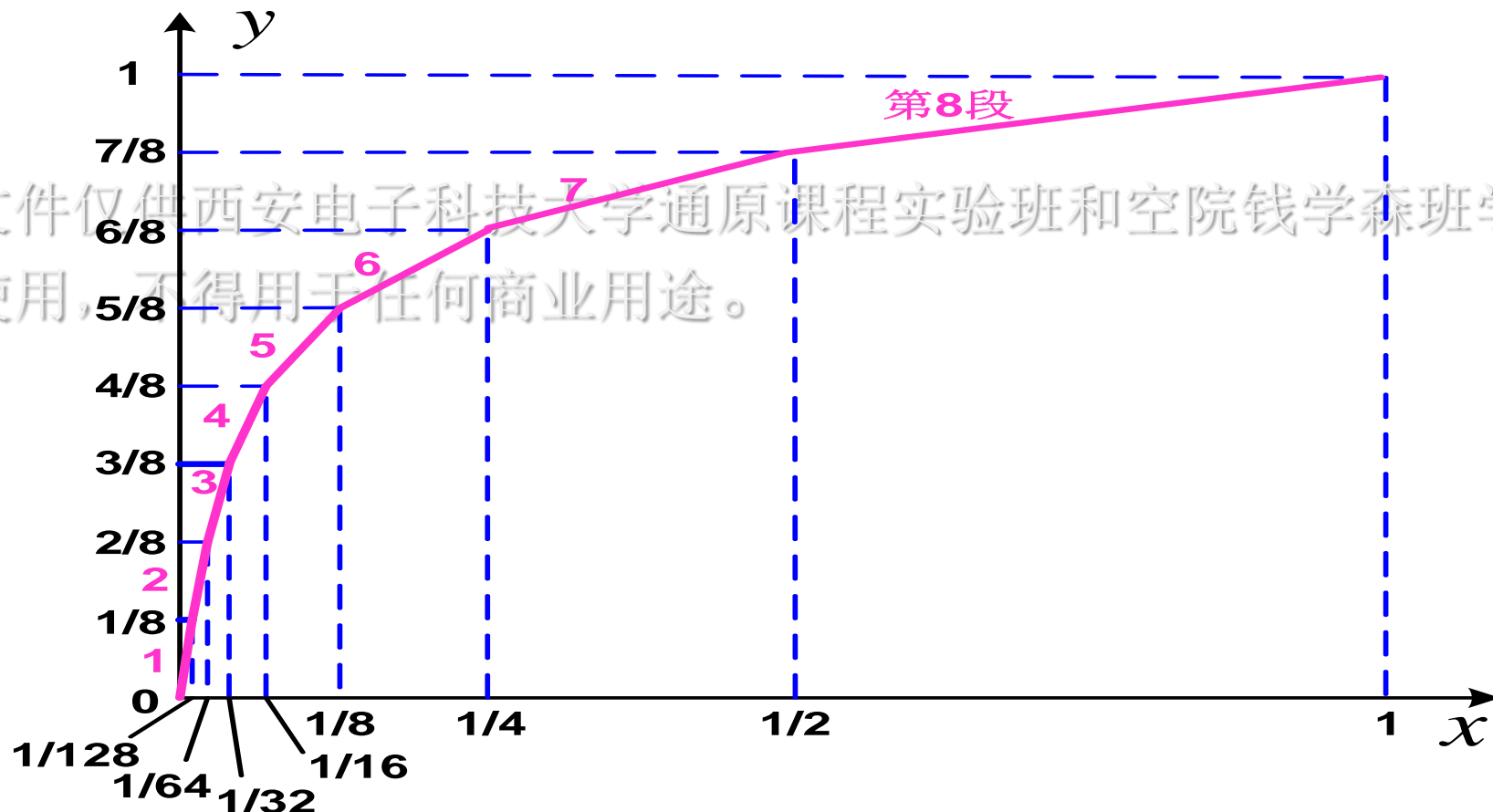
西安电子科技大学

通信工程学院

3、对数压缩特性的折线近似

数字压扩

(1) A律13折线 $A=87.6$



本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。



6.3 量化

西安电子科技大学

通信工程学院

$A=87.6$ 与13折线压缩特性的比较:

y	0	1/8	2/8	3/8	4/8	5/8	6/8	7/8	1
x	0	1/12 8	1/60. 6	1/30. 6	1/15. 4	1/7.7 9	1/3.9 3	1/1.9 8	1
按折线 分段时 的 x	0	1/12 8	1/64	1/32	1/16	1/8	1/4	1/2	1
段落		1	2	3	4	5	6	7	8
斜率		16	16	8	4	2	1	1/2	1/4



6.3 量化

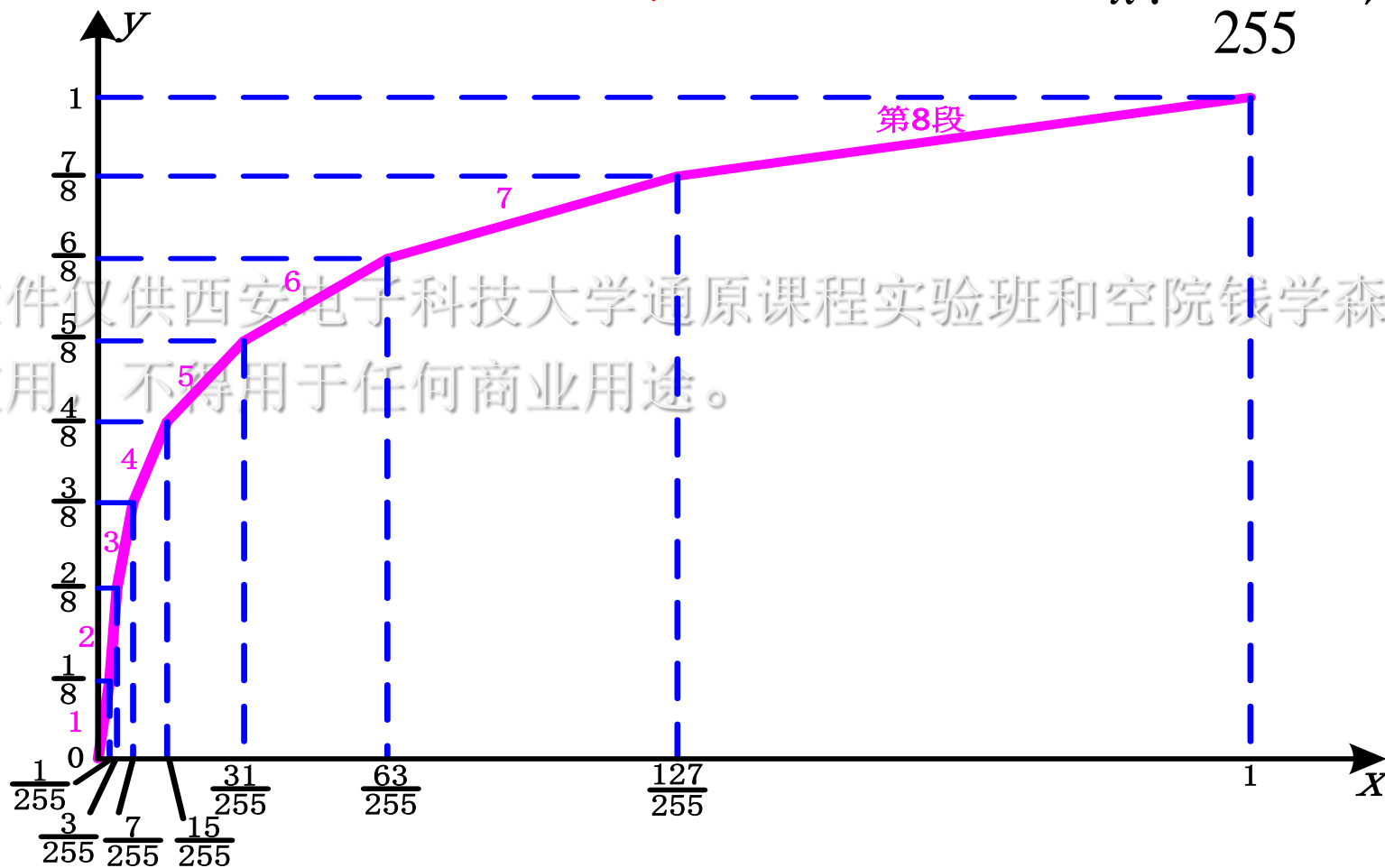
西安电子科技大学

通信工程学院

(2) μ 律15折线

$\mu = 255$

$$x: \frac{2^i - 1}{255} \rightarrow y: \frac{i}{8}$$





$$10 \log \text{SNR}_0 \approx 6R + 4.77 - 20 \log(\ln(1 + \mu)) \quad (\text{dB}) \quad (5.20a)$$

$$10 \log \text{SNR}_0 \approx 6R + 4.77 - 20 \log(1 + \ln A) \quad (\text{dB}) \quad (5.20b)$$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。



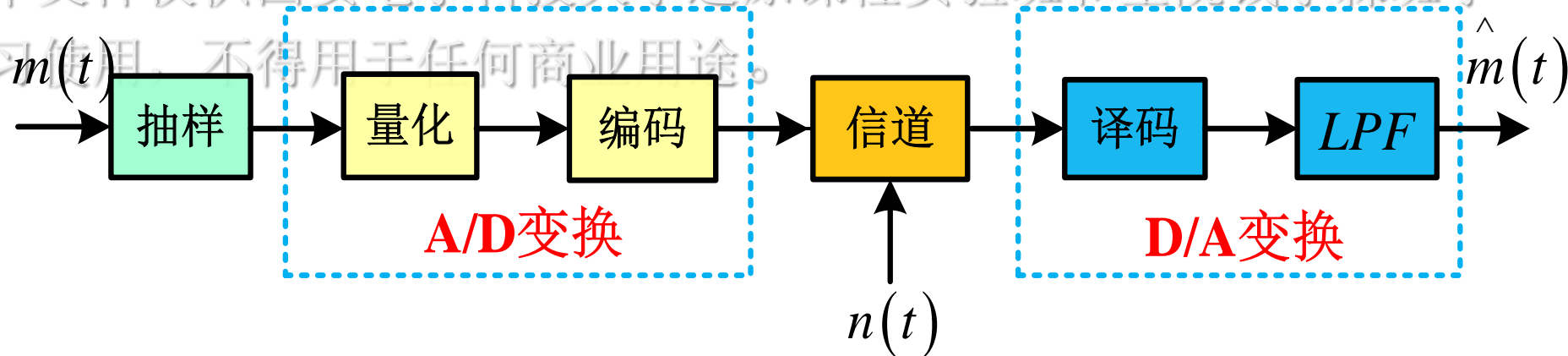
6.4 脉冲编码调制 (PCM)

西安电子科技大学

通信工程学院

脉冲编码调制 (PCM) : 把模拟信号抽样、量化, 直到变换成为二进制代码来实现通信的方式。

PCM系统原理框图:



信道: 广义信道, PCM码组可采用基带或频带传输



6.4 脉冲编码调制 (PCM)

西安电子科技大学

通信工程学院

一、代码的选择

1、码型

格雷二进制码	自然二进制码	折叠二进制码	量化极序号
1 0 0 0	1 1 1 1	1 1 1 1	15
1 0 0 1	1 1 1 0	1 1 1 0	14
1 0 1 1	1 1 0 1	1 1 0 1	13
1 0 1 0	1 1 0 0	1 1 0 0	12
1 1 1 0	1 0 1 1	1 0 1 1	11
1 1 1 1	1 0 1 0	1 0 1 0	10
1 1 0 1	1 0 0 1	1 0 0 1	9
1 1 0 0	1 0 0 0	1 0 0 0	8
0 1 0 0	0 1 1 1	0 0 0 0	7
0 1 0 1	0 1 1 0	0 0 0 1	6
0 1 1 1	0 1 0 1	0 0 1 0	5
0 1 1 0	0 1 0 0	0 0 1 1	4
0 0 1 0	0 0 1 1	0 1 0 0	3
0 0 1 1	0 0 1 0	0 1 0 1	2
0 0 0 1	0 0 0 1	0 1 1 0	1
0 0 0 0	0 0 0 0	0 1 1 1	0

本文件仅供西安电子科技大学
习使用，不得用于任



6.4 脉冲编码调制 (PCM)

西安电子科技大学

通信工程学院

PCM采用折叠码的原因：

- ①对双极性信号，可简化编码过程。
- ②传输过程中，如出现误码，对小信号影响小。

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

折叠码：符号幅度码

第一位：极性

正：“1” 负：“0”

其余位：幅度

符合自然码规则



6.4 脉冲编码调制 (PCM)

西安电子科技大学

通信工程学院

2、位数

如量化电平数为 M ，则编码位数为

$$N = \log_2 M$$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

较高的话音质量

限制信号的带宽



PCM编码采用8位折叠码



6.4 脉冲编码调制 (PCM)

西安电子科技大学

通信工程学院

二、编码原理

按量化方式分

线性编码 (均匀量化)

非线性编码 (非均匀量化)

按编码方法分

逐次比较型

折叠级联型

混合型

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。



6.4 脉冲编码调制 (PCM)

西安电子科技大学

通信工程学院

1、码位的安排

极性码

C_1

段落码

$C_2C_3C_4$

段内码

$C_5C_6C_7C_8$

段落 序号	C_2	C_3	C_4
8	1	1	1
7	1	1	0
6	1	0	1
5	1	0	0
4	0	1	1
3	0	1	0
2	0	0	1
1	0	0	0

电 序	平 号	C_5	C_6	C_7	C_8	电 序	平 号	C_5	C_6	C_7	C_8
15		1	1	1	1	7		0	1	1	1
14		1	1	1	0	6		0	1	1	0
13		1	1	0	1	5		0	1	0	1
12		1	1	0	0	4		0	1	0	0
11		1	0	1	1	3		0	0	1	1
10		1	0	1	0	2		0	0	1	0
9		1	0	0	1	1		0	0	0	1
8		1	0	0	0	0		0	0	0	0



6.4 脉冲编码调制 (PCM)

西安电子科技大学

通信工程学院

8段共分成128个量化级

最小量化间隔:

$$\Delta = \frac{1}{128} \times \frac{1}{16} = \frac{1}{2048}$$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

小信号量化间隔相同

7位非线性编码



11位线性编码



6.4 脉冲编码调制 (PCM)

西安电子科技大学

通信工程学院

13折线段落码及其对应电平

量化段序号	电平范围 (Δ)	段落码 $C_2 \ C_3 \ C_4$			量化间隔 $\Delta_i (\Delta)$
8	1024~2048	1	1	1	64
7	512~1024	1	1	0	32
6	256~512	1	0	1	16
5	128~256	1	0	0	8
4	64~128	0	1	1	4
3	32~64	0	1	0	2
2	16~32	0	0	1	1
1	0~16	0	0	0	1

本文件仅
习使用，

班学

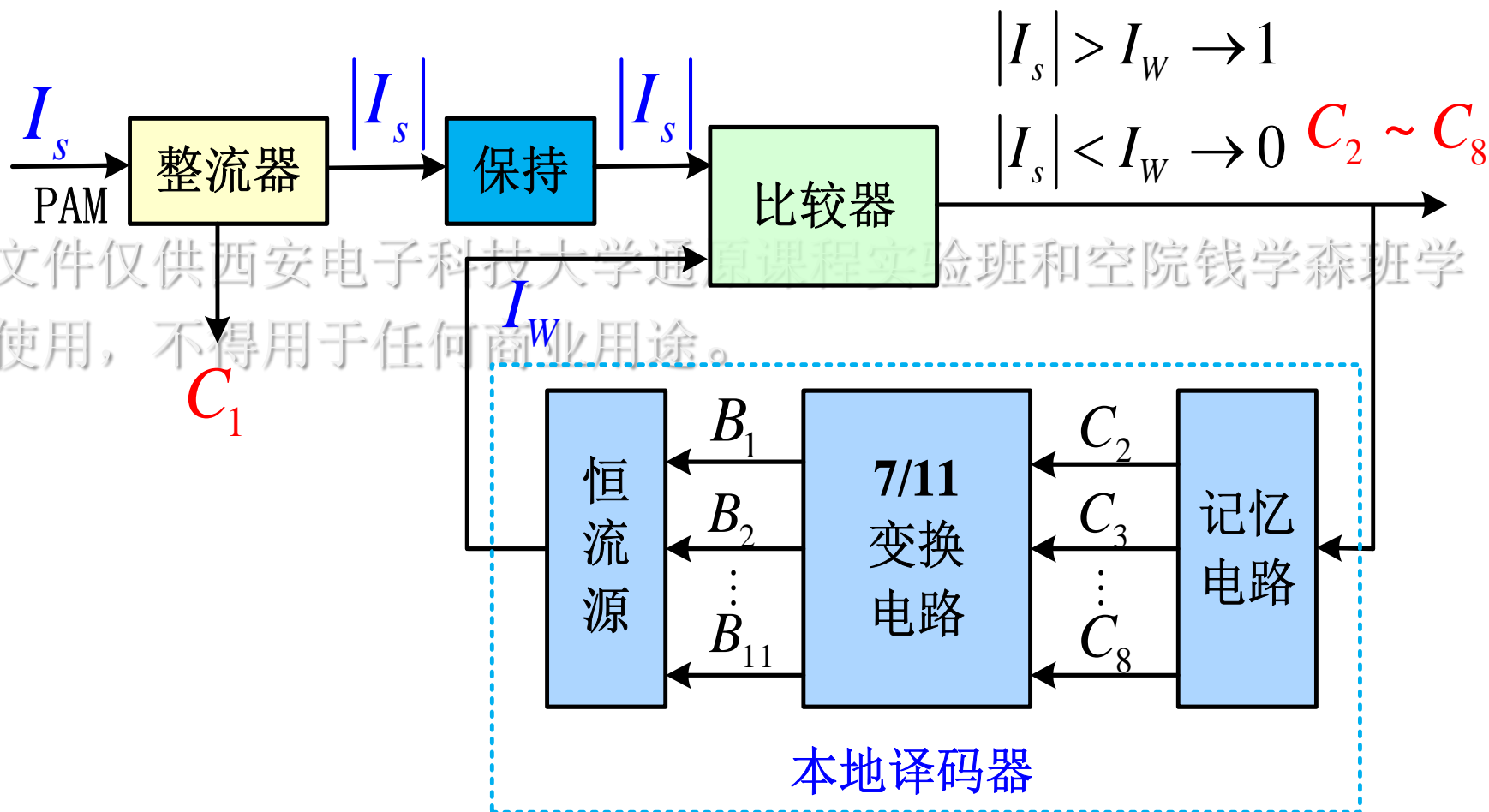


6.4 脉冲编码调制 (PCM)

西安电子科技大学

通信工程学院

2、逐次比较型编码原理





6.4 脉冲编码调制(PCM)

西安电子科技大学

通信工程学院

注：① $|I_s|$: 被测量 I_w : 砵码

② 本地译码器只译幅度，不译极性。

③ 实际实现中，量化和编码同时完成。

本文件仅供西安电子科技大学通信工程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。



6.4 脉冲编码调制(PCM)

西安电子科技大学

通信工程学院

【例】 设抽样值 $I_s = 142\Delta$ ，采用逐次比较型编码器将它按 A 律13折线编码编成8位码，求出其量化误差和7位幅度码所对应的11位线性码。

解： $I_s > 0 \quad \therefore C_1 = 1$

$$I_{W_1} = 128\Delta \quad |I_s| > I_{W_1} \quad C_2 = 1 \quad 5 \sim 8 \text{段}$$

$$I_{W_2} = 512\Delta \quad |I_s| < I_{W_2} \quad C_3 = 0 \quad 5 \sim 6 \text{段}$$

$$I_{W_3} = 256\Delta \quad |I_s| < I_{W_3} \quad C_4 = 0 \quad 5 \text{段}$$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。



6.4 脉冲编码调制 (PCM)

西安电子科技大学

通信工程学院

$$I_{W_4} = 128\Delta + 8 \times 8\Delta = 192\Delta$$

$$|I_s| < I_{W_4}$$

$$C_5 = 0 \quad 0 \sim 7 \text{级}$$

$$I_{W_5} = 128\Delta + 4 \times 8\Delta = 160\Delta$$

$$|I_s| < I_{W_5}$$

$$C_6 = 0 \quad 0 \sim 3 \text{级}$$

$$I_{W_6} = 128\Delta + 2 \times 8\Delta = 144\Delta$$

$$|I_s| < I_{W_6}$$

$$C_7 = 0 \quad 0 \sim 1 \text{级}$$

$$I_{W_7} = 128\Delta + 8\Delta = 136\Delta$$

$$|I_s| > I_{W_7}$$

$$C_8 = 1 \quad 1 \text{级}$$

$$\therefore C_1 \sim C_8 = 1 \textcolor{blue}{100} \textcolor{red}{000} 1$$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。



6.4 脉冲编码调制 (PCM)

西安电子科技大学

通信工程学院

$$\text{量化电平} = 128\Delta + 8\Delta \times 1 = 136\Delta$$

$$\text{量化误差} = 142\Delta - 136\Delta = 6\Delta$$

$$\therefore 136 = 128 + 8 = 2^7 + 2^3$$

$$\therefore B_1 \sim B_{11} = 00010001000$$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。



6.4 脉冲编码调制 (PCM)

西安电子科技大学

通信工程学院

【例】 设抽样值 $I_s = 142\Delta$ ，采用逐次比较型编码器将它按 A 律13折线编码编成8位码，求出其量化误差和7位幅度码所对应的11位线性码。

解： $I_s > 0 \quad \therefore C_1 = 1$

$$I_{W_1} = 128\Delta \quad |I_s| > I_{W_1} \quad C_2 = 1 \quad 5 \sim 8 \text{段}$$

$$I_{W_2} = 512\Delta \quad |I_s| < I_{W_2} \quad C_3 = 0 \quad 5 \sim 6 \text{段}$$

$$I_{W_3} = 256\Delta \quad |I_s| < I_{W_3} \quad C_4 = 0 \quad 5 \text{段}$$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。



6.4 脉冲编码调制 (PCM)

西安电子科技大学

通信工程学院

$$I_{W_4} = 128\Delta + 8 \times 8\Delta = 192\Delta$$

$$|I_s| < I_{W_4}$$

$$C_5 = 0 \quad 0 \sim 7 \text{级}$$

$$I_{W_5} = 128\Delta + 4 \times 8\Delta = 160\Delta$$

$$|I_s| < I_{W_5}$$

$$C_6 = 0 \quad 0 \sim 3 \text{级}$$

$$I_{W_6} = 128\Delta + 2 \times 8\Delta = 144\Delta$$

$$|I_s| < I_{W_6}$$

$$C_7 = 0 \quad 0 \sim 1 \text{级}$$

$$I_{W_7} = 128\Delta + 8\Delta = 136\Delta$$

$$|I_s| > I_{W_7}$$

$$C_8 = 1 \quad 1 \text{级}$$

$$\therefore C_1 \sim C_8 = 11000001$$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。



6.4 脉冲编码调制(PCM)

西安电子科技大学

通信工程学院

$$\text{量化电平} = 128\Delta + 8\Delta \times 1 = 136\Delta$$

$$\text{量化误差} = 142\Delta - 136\Delta = 6\Delta$$

$$\therefore 136 = 128 + 8 = 2^7 + 2^3$$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

$$\therefore B_1 \sim B_{11} = 00010001000$$

问题：7位非线性码转换成11位线性码还有其
他方法吗？



6.4 脉冲编码调制 (PCM)

西安电子科技大学

通信工程学院

编码时7位非线性码与11位线性码之间的关系

段落序号	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	B_7	B_8	B_9	B_{10}	B_{11}
	1024	512	256	128	64	32	16	8	4	2	Δ
8	1	$C_5 \ C_6 \ C_7 \ C_8$				0	0	0	0	0	0
7	0	1	$C_5 \ C_6 \ C_7 \ C_8$				0	0	0	0	0
6	0	0	1	$C_5 \ C_6 \ C_7 \ C_8$				0	0	0	0
5	0	0	0	1	$C_5 \ C_6 \ C_7 \ C_8$				0	0	0
4	0	0	0	0	1	$C_5 \ C_6 \ C_7 \ C_8$				0	0
3	0	0	0	0	0	1	$C_5 \ C_6 \ C_7 \ C_8$				0
2	0	0	0	0	0	0	1	$C_5 \ C_6 \ C_7 \ C_8$			
1	0	0	0	0	0	0	0	$C_5 \ C_6 \ C_7 \ C_8$			

第5段第1级: $B_1 \sim B_{11} = 00010001000$



6.4 脉冲编码调制(PCM)

西安电子科技大学

通信工程学院

思考： PCM编码有没有简化方法？

通式：
$$\frac{|I_s| - I_{B_i}}{\Delta_i} = \text{商} \cdots \cdots \text{余数}$$

商为段内码，余数为量化误差

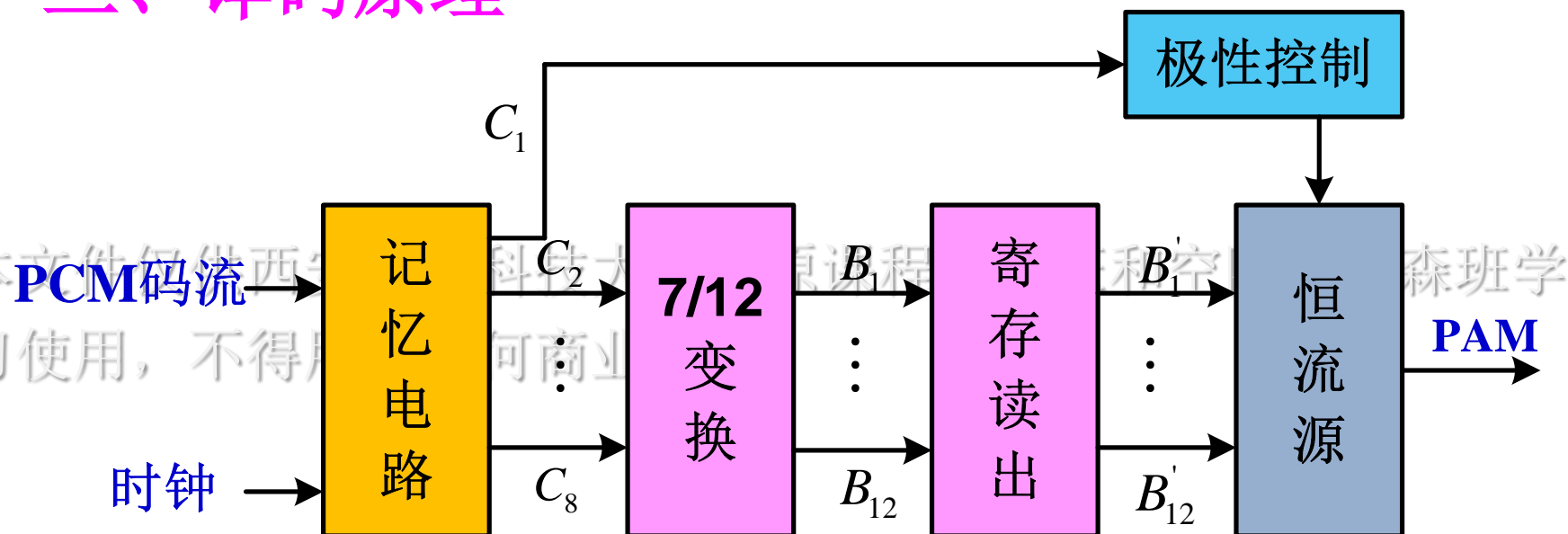


6.4 脉冲编码调制 (PCM)

西安电子科技大学

通信工程学院

三、译码原理



思考：与本地译码器有什么区别？

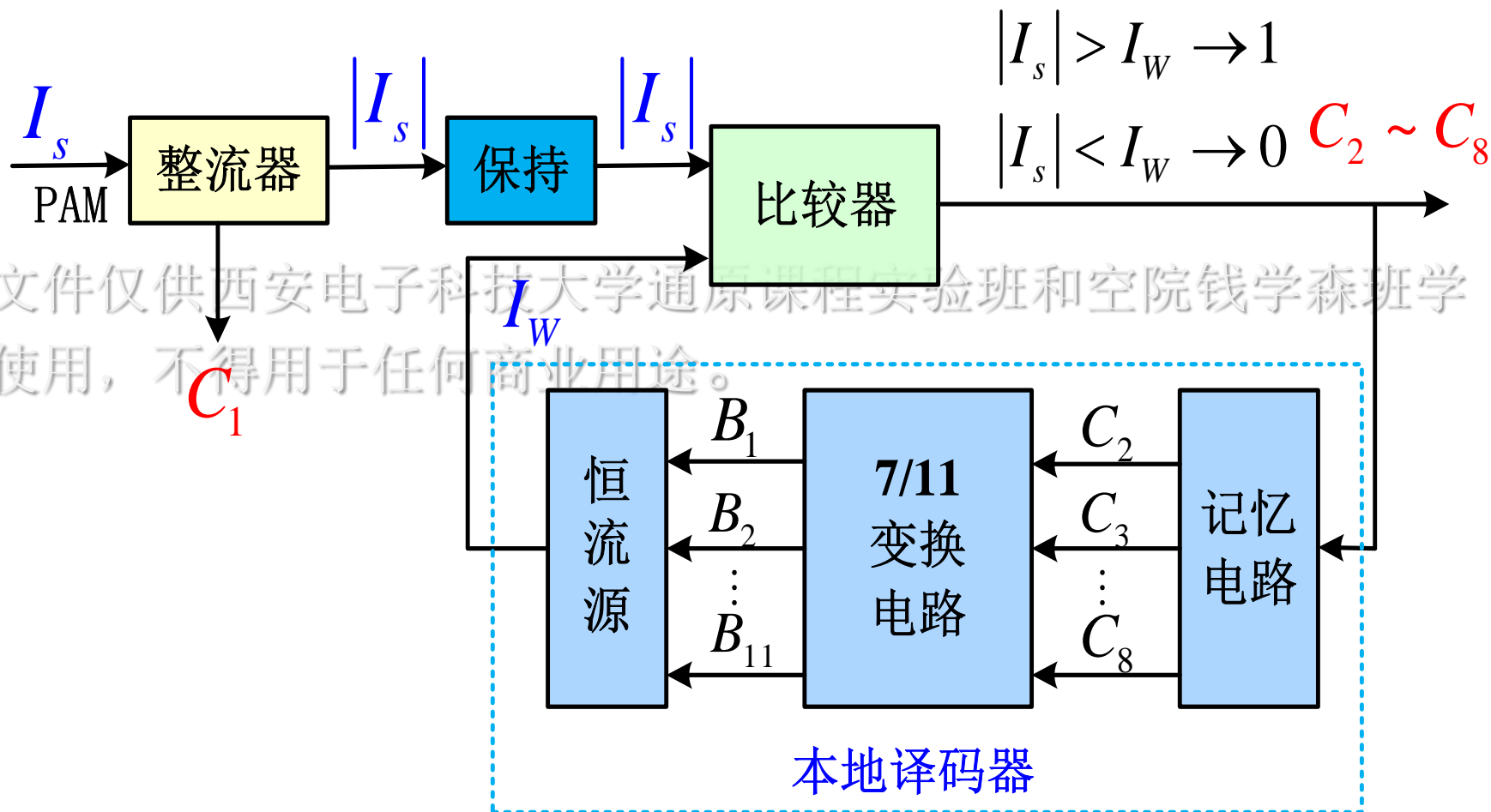


6.4 脉冲编码调制 (PCM)

西安电子科技大学

通信工程学院

逐次比较型编码器



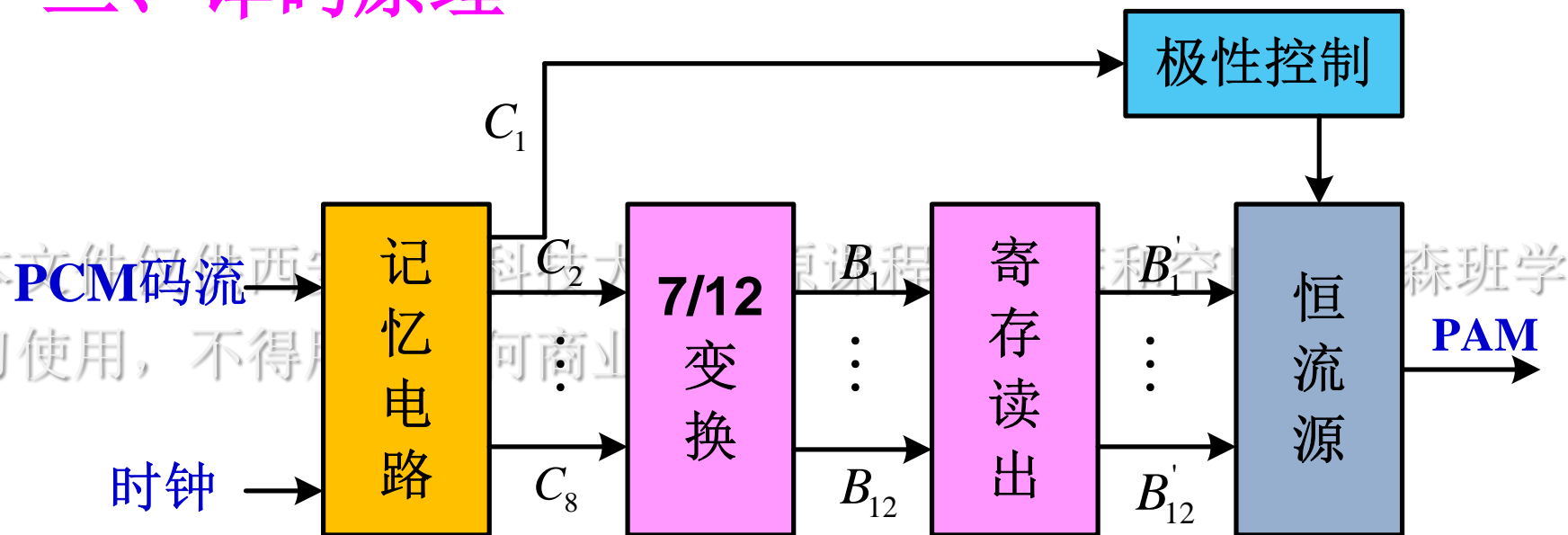


6.4 脉冲编码调制 (PCM)

西安电子科技大学

通信工程学院

三、译码原理





6.4 脉冲编码调制(PCM)

西安电子科技大学

通信工程学院

问题：本地译码，量化误差可能会超过 $\Delta_i/2$

方法：译码器中有 $+\Delta_i/2$ 电路，即将量化电平从量化区间的左端点移到中点。

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

分析： $I_s = 142\Delta$ 时， $C_1 \sim C_8 = 11000001$ ，那么
译码输出是多少？ $B_1 \sim B_{11} = 00010001000$

译码时7位非线性码对应12位线性码



6.4 脉冲编码调制 (PCM)

西安电子科技大学

通信工程学院

编码时7位非线性码与11位线性码之间的关系

段落序号	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	B_7	B_8	B_9	B_{10}	B_{11}
	1024	512	256	128	64	32	16	8	4	2	Δ
8	1	$C_5 \ C_6 \ C_7 \ C_8$				0	0	0	0	0	0
7	0	1	$C_5 \ C_6 \ C_7 \ C_8$				0	0	0	0	0
6	0	0	1	$C_5 \ C_6 \ C_7 \ C_8$				0	0	0	0
5	0	0	0	1	$C_5 \ C_6 \ C_7 \ C_8$				0	0	0
4	0	0	0	0	1	$C_5 \ C_6 \ C_7 \ C_8$				0	0
3	0	0	0	0	0	1	$C_5 \ C_6 \ C_7 \ C_8$				0
2	0	0	0	0	0	0	1	$C_5 \ C_6 \ C_7 \ C_8$			
1	0	0	0	0	0	0	0	$C_5 \ C_6 \ C_7 \ C_8$			

第5段第1级: $B_1 \sim B_{11} = 00010001000$



6.4 脉冲编码调制 (PCM)

西安电子科技大学

通信工程学院

译码时7位非线性码与12位线性码之间的关系

段落 序号	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	B_7	B_8	B_9	B_{10}	B_{11}	B_{12}^*
	102 4	512	256	128	64	32	16	8	4	2	1	$\Delta/2$
8	1	C_5	C_6	C_7	C_8	1^*	0	0	0	0	0	0
7	0	1	C_5	C_6	C_7	C_8	1^*	0	0	0	0	0
6	0	0	1	C_5	C_6	C_7	C_8	1^*	0	0	0	0
5	0	0	0	1	C_5	C_6	C_7	C_8	1^*	0	0	0
4	0	0	0	0	1	C_5	C_6	C_7	C_8	1^*	0	0
3	0	0	0	0	0	1	C_5	C_6	C_7	C_8	1^*	0
2	0	0	0	0	0	0	1	C_5	C_6	C_7	C_8	1^*
1	0	0	0	0	0	0	0	C_5	C_6	C_7	C_8	1^*

本文
习使



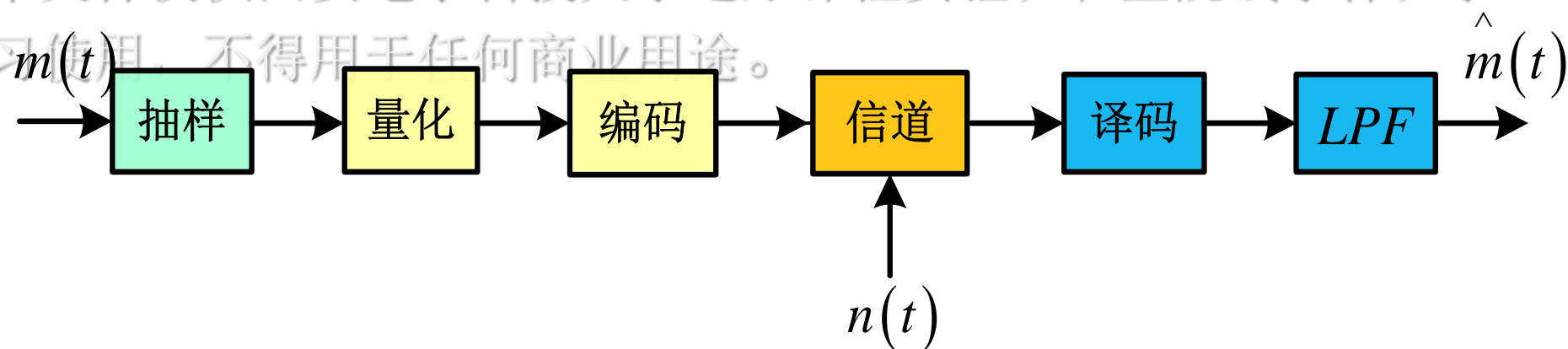
6.4 脉冲编码调制 (PCM)

西安电子科技大学

通信工程学院

四、PCM信号的码元速率和带宽

PCM系统原理框图：





6.4 脉冲编码调制 (PCM)

西安电子科技大学

通信工程学院

四、PCM信号的码元速率和带宽

1、码元速率

设 $m(t)$ 为低通信号 $(0, f_H)$ ，则 $f_s \geq 2f_H$

$$R_B = N \cdot f_s = \log_2 M \cdot f_s$$

2、带宽

最小传输带宽: $B_{\min} = \frac{R_B}{2} = N \cdot f_H$ (理想低通)

实际传输带宽: $B = R_B = N \cdot f_s$ (升余弦)



6.4 脉冲编码调制 (PCM)

西安电子科技大学

通信工程学院

五、PCM系统的抗噪声性能

两种噪声：量化噪声和加性噪声

PCM系统接收端低通滤波器的输出：

$$\hat{m}(t) = \underbrace{m(t)}_{S_o} + \underbrace{n_q(t)}_{N_q} + \underbrace{n_e(t)}_{N_e}$$

系统总的输出信噪比：

$$\frac{S_o}{N_o} = \frac{E[m^2(t)]}{E[n_q^2(t)] + E[n_e^2(t)]} = \frac{S_o}{N_q + N_e}$$



6.4 脉冲编码调制 (PCM)

西安电子科技大学

通信工程学院

1、仅考虑量化噪声

设 $m(t)$ 在区间 $[-a, a]$ 均匀分布，对其均匀量化，
量化级数为 M

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

$$\frac{S_o}{N_q} = \frac{E[m^2(t)]}{E[n_q^2(t)]} = M^2 = 2^{2N}$$

PCM信号最小传输带宽： $B = N \cdot f_H$

$$\frac{S_o}{N_q} = 2^{2B/f_H} \rightarrow \boxed{\text{带宽与信噪比互换}}$$



6.4 脉冲编码调制(PCM)

西安电子科技大学

通信工程学院

2、仅考虑加性噪声

若采用自然码编码, 每个码元的误码率皆为 P_e

误码: $N_e = E[n_e^2(t)] = P_e \sum_{i=1}^N (2^{i-1} \Delta)^2$

$$= \Delta^2 P_e \cdot \frac{2^{2N} - 1}{3} \approx \Delta^2 P_e \cdot \frac{2^{2N}}{3}$$

均匀分布: $S_o = E[m^2(t)] = \int_{-a}^a x^2 \cdot \frac{1}{2a} dx = \frac{\Delta^2}{12} \cdot M^2$

$$= \frac{\Delta^2}{12} \cdot 2^{2N} \quad \frac{S_o}{N_e} = \frac{1}{4P_e}$$



6.4 脉冲编码调制 (PCM)

西安电子科技大学

通信工程学院

PCM系统总的输出信噪比:

$$\frac{S_o}{N_o} = \frac{2^{2N}}{1 + 4P_e 2^{2N}}$$

适用条件:

- ① 均匀分布
- ② 均匀量化
- ③ 自然码

大信噪比时: $\frac{S_o}{N_o} \approx 2^{2N}$

小信噪比时: $\frac{S_o}{N_o} \approx \frac{1}{4P_e}$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实
习使用, 不得用于任何商业用途。

森班学



6.4 脉冲编码调制(PCM)

西安电子科技大学

通信工程学院

【例】 若 A 律13折线编码器的过载电平是 $5V$ ，即
编码范围 $[-5V, 5V]$ ，输入抽样脉冲幅度是 $-0.95V$ ，

(1) 求编码器输出码组，并计算量化误差；

(2) 写出该7位码对应的11位线性码；

(3) 计算译码器输出的量化电平。



6.4 脉冲编码调制(PCM)

西安电子科技大学

通信工程学院

解: (1) $\frac{-0.95}{5} \times 2048\Delta = -389\Delta$
 $C_1 = 0$

首先进行归一化

$$\because 256\Delta < 389\Delta < 512\Delta$$

\therefore 第6段 $C_2 C_3 C_4 = 101$ 量化间隔 16Δ

$$\frac{389\Delta - 256\Delta}{16\Delta} = 8 \cdots 5\Delta$$

$$C_5 \sim C_8 = 1000 \quad \text{量化误差 } 5\Delta$$

$$\therefore C_1 \sim C_8 = 01011000$$

$$\text{量化误差: } 5 \times \frac{5}{2048} = 0.012V$$



6.4 脉冲编码调制(PCM)

西安电子科技大学

通信工程学院

$$(2) \text{量化电平: } 256\Delta + 8 \times 16\Delta = 384\Delta$$

$$384 = 2^8 + 2^7$$

$$\therefore B_1 \sim B_{11} = 00\textcolor{red}{1}\textcolor{blue}{1000}0000$$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用,不得用于任何商业用途。

$$(3) \text{译码输出: } -\left(384\Delta + \frac{\textcolor{blue}{16}\Delta}{2}\right) = -392\Delta$$

$$\textcolor{red}{-392} \times \frac{\textcolor{red}{5}}{\textcolor{red}{2048}} = \textcolor{red}{-0.957V}$$



6.4 脉冲编码调制(PCM)

西安电子科技大学

通信工程学院

解: (1) $\frac{-0.95}{5} \times 2048\Delta = -389\Delta$
 $C_1 = 0$

首先进行归一化

$$\because 256\Delta < 389\Delta < 512\Delta$$

\therefore 第6段 $C_2 C_3 C_4 = 101$ 量化间隔 16Δ

$$\frac{389\Delta - 256\Delta}{16\Delta} = 8 \cdots 5\Delta$$

$$C_5 \sim C_8 = 1000 \quad \text{量化误差 } 5\Delta$$

$$\therefore C_1 \sim C_8 = 01011000$$

$$\text{量化误差: } 5 \times \frac{5}{2048} = 0.012V$$



6.4 脉冲编码调制 (PCM)

西安电子科技大学

通信工程学院

$$(2) \text{量化电平: } 256\Delta + 8 \times 16\Delta = 384\Delta$$

$$384 = 2^8 + 2^7$$

$$\therefore B_1 \sim B_{11} = 00\textcolor{red}{1}\textcolor{blue}{1000}0000$$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

$$(3) \text{译码输出: } -\left(384\Delta + \frac{\textcolor{blue}{16}\Delta}{2}\right) = -392\Delta$$

$$\textcolor{red}{-392} \times \frac{\textcolor{red}{5}}{\textcolor{red}{2048}} = \textcolor{red}{-0.957V}$$

思考：译码器中 $\textcolor{red}{7}$ 位非线性码对应的 $\textcolor{red}{12}$ 位线性码是什么？



6.4 脉冲编码调制(PCM)

西安电子科技大学

通信工程学院

已知最高频率为 4 kHz 的模拟信号 $m(t)$ 在 (+0.32~ -0.32 伏) 量化范围内服从均匀分布,

若采用 PCM 系统对其进行抽样、均匀量化和编码, 且量化间隔为 0.01 伏, 试问:

- (1) 若传输中产生的误码率 $P_e = 10^{-4}$, 计算 PCM 系统输出端的平均信号噪声功率比 (S_o / N_o);
- (2) 该 PCM 信号的传码率和最小传输带宽;



6.4 脉冲编码调制 (PCM)

西安电子科技大学

通信工程学院

解: (1) 由模拟信号 $m(t)$ 的量化范围和量化间隔可知该系统为 64 级量化, PCM 码组长度

$N = \log_2 64 = 6$. PCM 系统输出端的平均信号噪声功率比为

$$\frac{S_0}{N_0} = \frac{2^{2N}}{1 + 4P_e 2^{2N}} = \frac{2^{12}}{1 + 4 \times 10^{-4} \times 2^{12}} = 1552.5 \approx 32 \text{ dB}$$

(2) 该 PCM 信号传码率为 $R = f_s N = 2f_H N = 48 \text{ kB}$. 最小传输带宽为

$$B = R / 2 = f_H N = 24 \text{ kHz}.$$



6.5 增量调制(ΔM)

西安电子科技大学

通信工程学院

为了简化模拟信号数字化的方法，1946年，一法国工程师提出了增量调制。

ΔM 与PCM的区别：

PCM：一个抽样值用N位码表示，反映样值本身的大小。

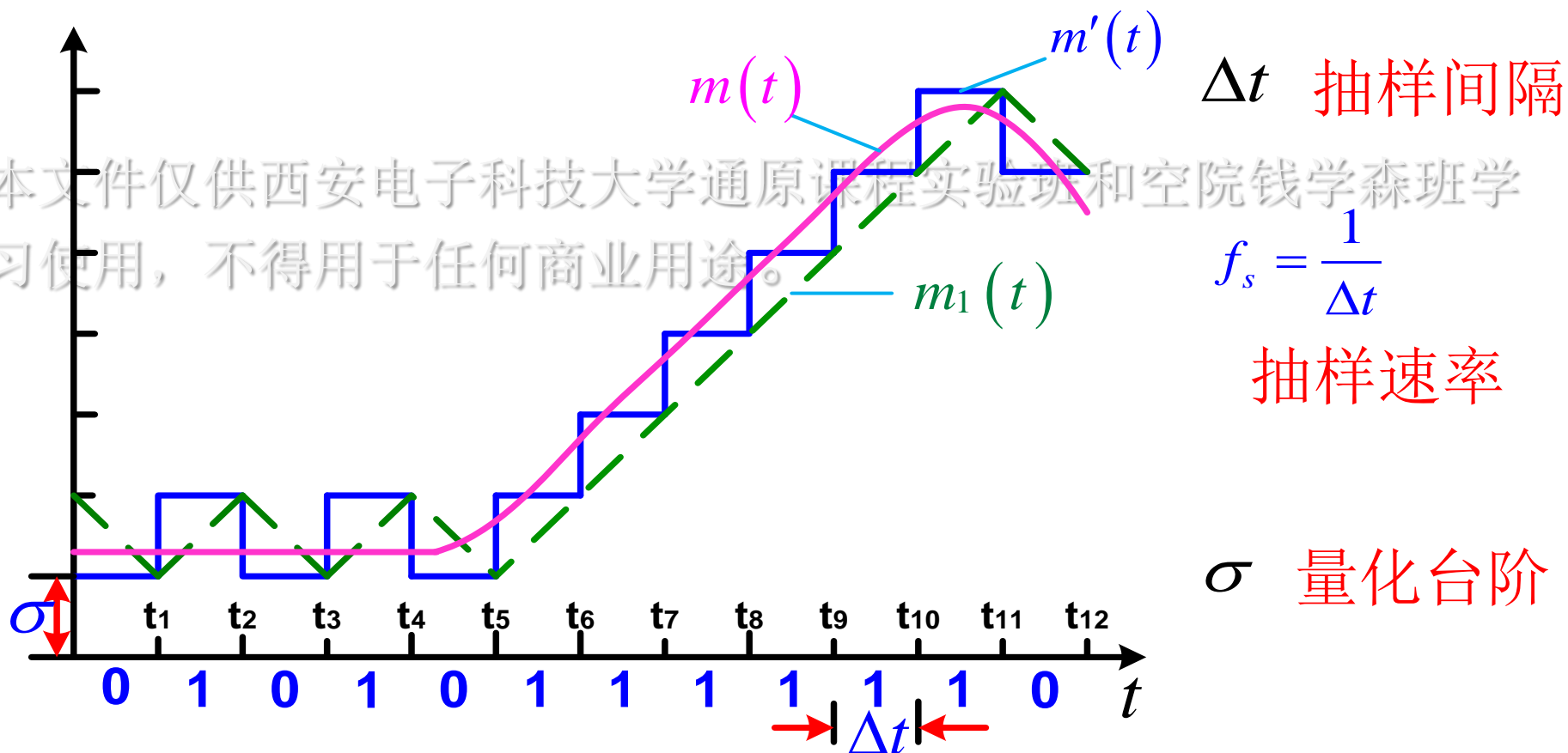
ΔM ：一个抽样值用1位码表示，反映相邻样值的相对大小。



通信工程学院

一、增量调制的原理

1、编码的基本思想





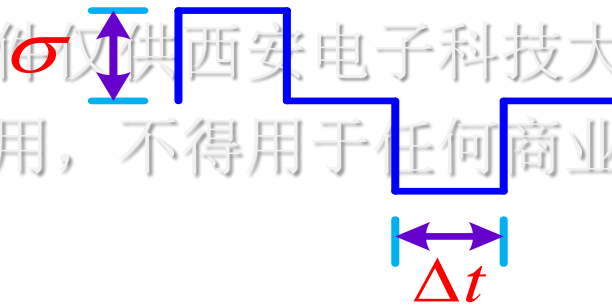
6.5 增量调制(ΔM)

西安电子科技大学

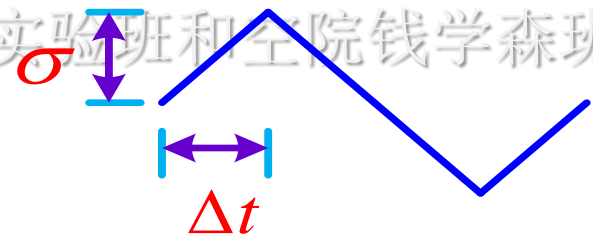
通信工程学院

2、译码的基本思想

1 0 0 1



1 0 0 1



注：一般采用RC积分电路获得斜变波



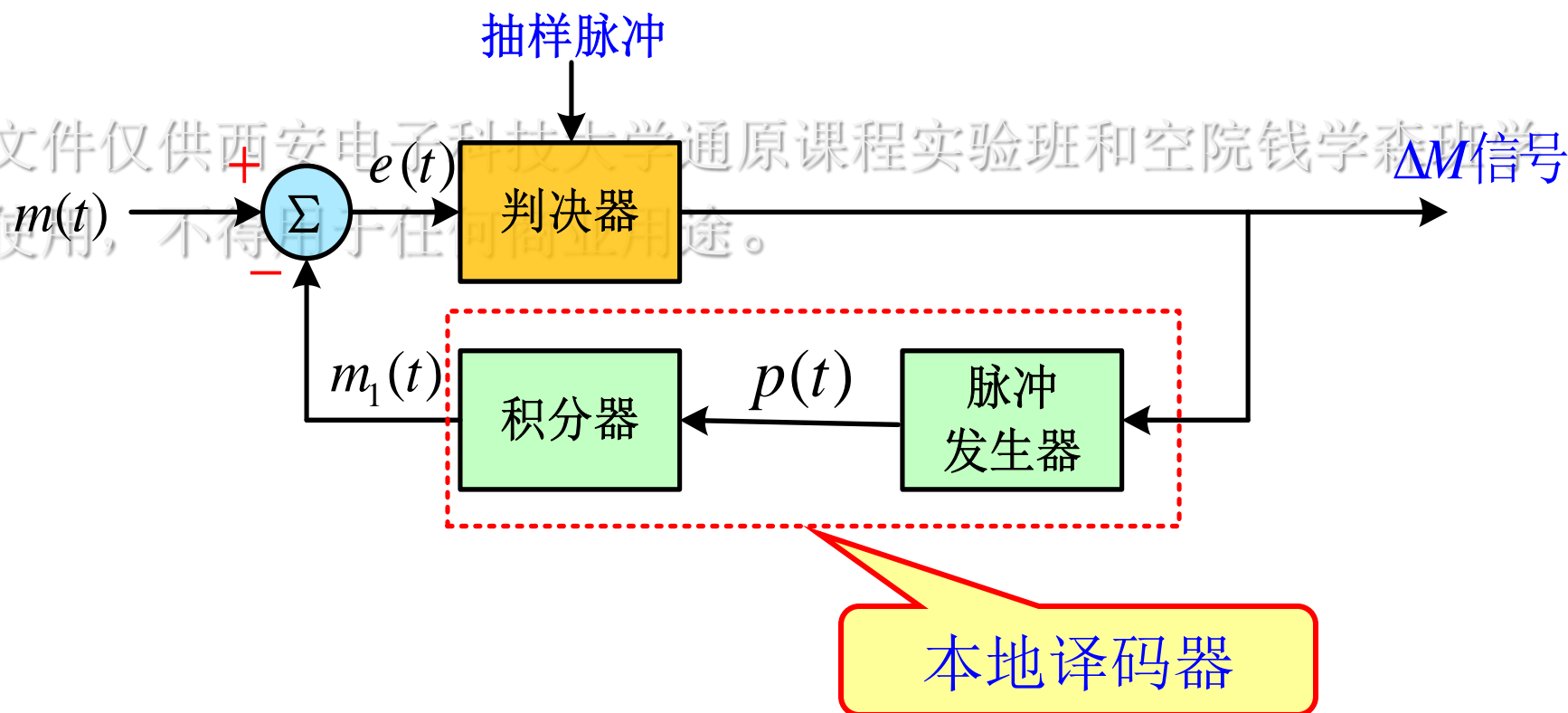
6.5 增量调制(ΔM)

西安电子科技大学

通信工程学院

3、简单 ΔM 系统方框图

(1) 编码器



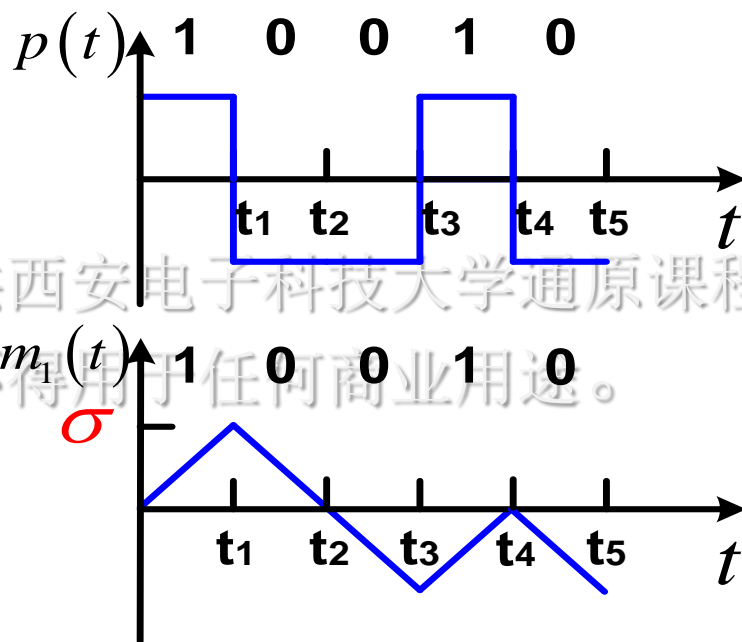


6.5 增量调制 (ΔM)

西安电子科技大学

通信工程学院

积分器输入输出波形:



本地译码器: 形成 $m(t)$ 的预测信号 $m_1(t)$



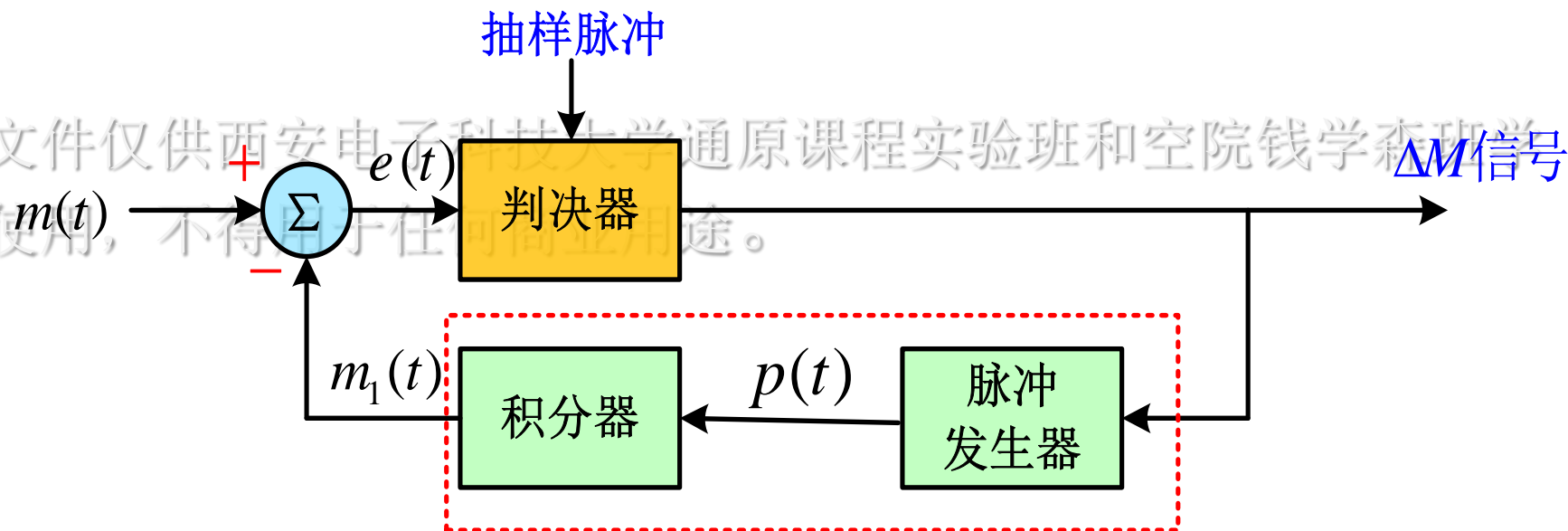
6.5 增量调制(ΔM)

西安电子科技大学

通信工程学院

3、简单 ΔM 系统方框图

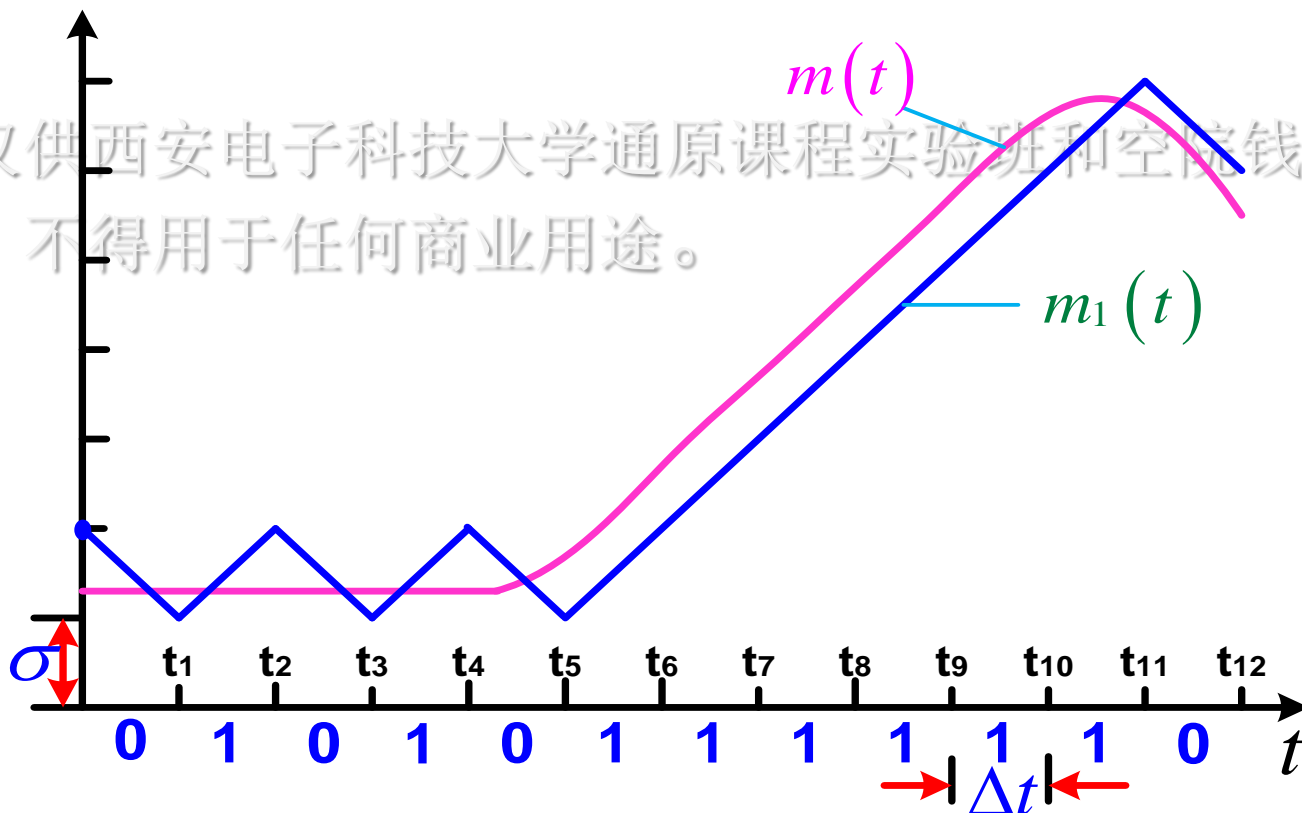
(1) 编码器





通信工程学院

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



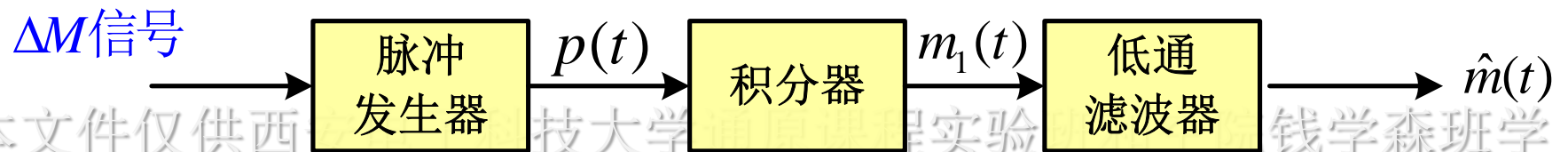


6.5 增量调制(ΔM)

西安电子科技大学

通信工程学院

(2) 译码器



LPF的作用：滤除高次谐波，使输出波形平滑

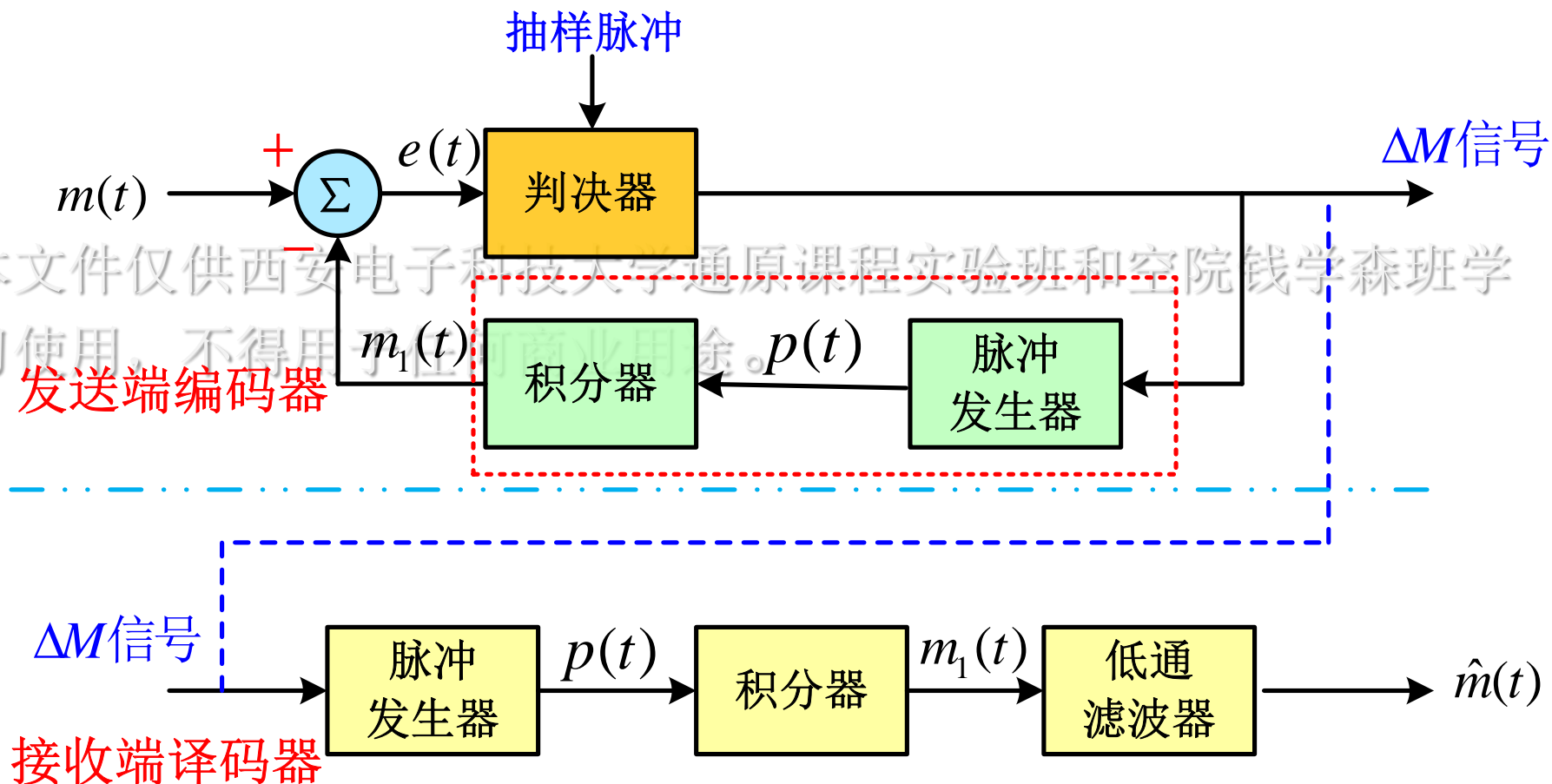


6.5 增量调制(ΔM)

西安电子科技大学

通信工程学院

3、简单增量调制系统方框图





6.5 增量调制(ΔM)

西安电子科技大学

通信工程学院

二、 ΔM 信号的码元速率和带宽

1、码元速率

$$R_B = f_s$$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用,不得用于任何商业用途。

2、带宽

最小传输带宽(理想低通) $B_{\min} = \frac{f_s}{2}$

实际传输带宽(升余弦) $B = f_s$



6.5 增量调制(ΔM)

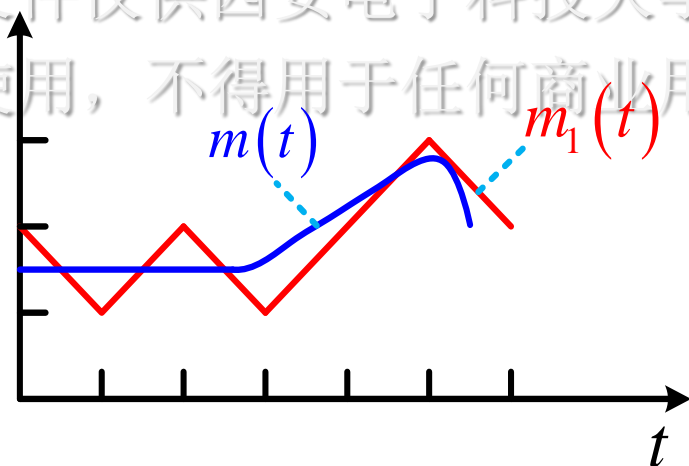
西安电子科技大学

通信工程学院

三、增量调制的过载特性和编码动态范围

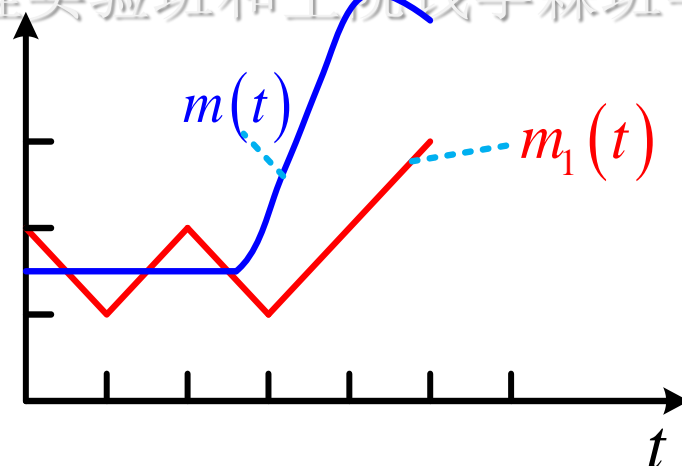
量化误差: $e_q(t) = m(t) - m_1(t)$

1、一般量化误差



$$|e_q| \leq \sigma$$

2、过载量化误差



$$|e_q| > \sigma$$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。



6.5 增量调制(ΔM)

西安电子科技大学

通信工程学院

为防止出现过载现象, 要求

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

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用, 不得用于任何商业用途。

3、编码动态范围

$$\text{设 } m(t) = A \sin \omega_k t$$

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

最大允许编码电平
(临界过载振幅)

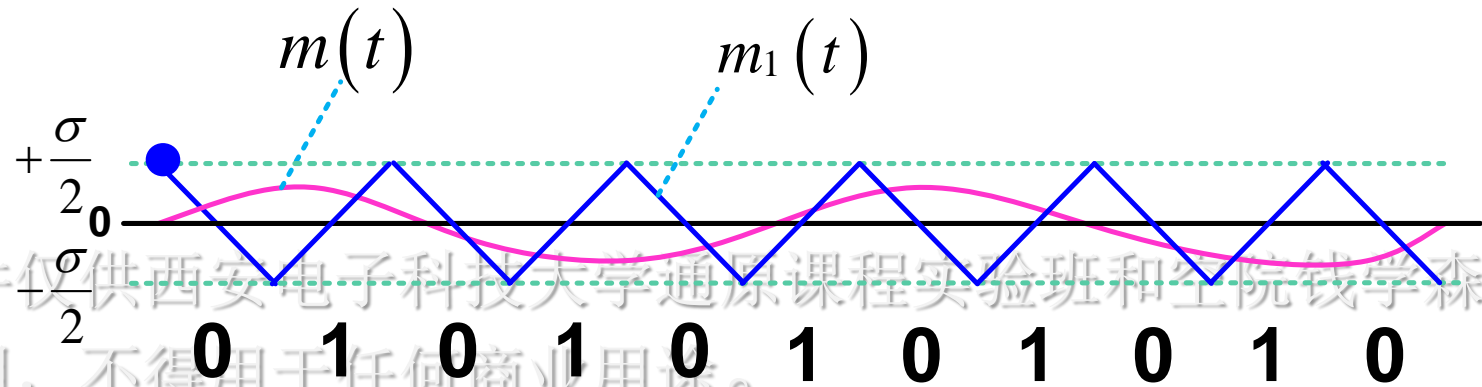


6.5 增量调制 (ΔM)

西安电子科技大学

通信工程学院

若输入小信号，即 $A < \frac{\sigma}{2}$ ，则



$$A_{\min} = \frac{\sigma}{2} \quad \text{起始编码电平}$$

$$\frac{\sigma}{2} \leq A \leq \frac{\sigma \cdot f_s}{\omega_k}$$



6.5 增量调制 (ΔM)

西安电子科技大学

通信工程学院

编码动态范围: $[D_c]_{dB} = 20\lg \frac{A_{\max}}{A_{\min}} = 20\lg \left(\frac{f_s}{\pi f_k} \right)$

采用 $f_k = 800Hz$ 为测试标准:

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习

抽样速率 $f_s (kHz)$	10	20	32	40	80	100
编码动态范围 $D_c (dB)$	12	18	22	24	30	32

话音信号的动态范围要求: 40-50dB



6.5 增量调制(ΔM)

西安电子科技大学

通信工程学院

四、增量调制系统的抗噪声性能

两种噪声：量化噪声和加性噪声

ΔM 系统接收端低通滤波器的输出：

$$\hat{m}(t) = \underbrace{m(t)}_{S_o} + \underbrace{n_q(t)}_{N_q} + \underbrace{n_e(t)}_{N_e}$$

系统总的输出信噪比：

$$\frac{S_o}{N_o} = \frac{E[m^2(t)]}{E[n_q^2(t)] + E[n_e^2(t)]} = \frac{S_o}{N_q + N_e}$$



6.5 增量调制 (ΔM)

西安电子科技大学

通信工程学院

1、仅考虑量化噪声

无过载，接收端低通滤波器的截止频率为 f_m ，

设 $m(t) = A \sin \omega_k t$ ，在临界振幅条件下

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

$$\left(\frac{S_o}{N_q} \right)_{dB} = 10 \lg \left(0.04 \frac{f_s^3}{f_k^2 f_m} \right)$$

$$= 30 \lg f_s - 20 \lg f_k - 10 \lg f_m - 14$$



6.5 增量调制 (ΔM)

西安电子科技大学

通信工程学院

2、仅考虑加性噪声

设 $m(t) = A \sin \omega_k t$ ，在临界振幅条件下，系统

误码率为 P_e ，语音频带下截止频率为 f_1 ，

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

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



6.6 PCM与 ΔM 系统的比较

西安电子科技大学

通信工程学院

PCM与 ΔM 的本质区别

PCM是对样值本身编码；

ΔM 是对相邻样值的差值的极性编码

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

一、抽样速率

$$PCM: f_s \geq 2f_H$$

$$\Delta M: f_s \gg 2f_H$$



6.6 PCM与 ΔM 系统的比较

西安电子科技大学

通信工程学院

二、带宽

	PCM	ΔM
B_{\min}	$N \cdot f_H$	$\frac{f_s}{2}$
实际B	$N \cdot f_s$	f_s

同样的语音质量要求下： $B_{\Delta M} > B_{PCM}$



6.6 PCM与 ΔM 系统的比较

西安电子科技大学

通信工程学院

三、量化信噪比

$$\left(\frac{S_o}{N_q}\right)_{PCM} = 10\lg 2^{2N} \approx 6N \text{ dB}$$

$$\left(\frac{S_o}{N_q}\right)_{\Delta M} = 10\lg\left(0.04 \frac{f_s^3}{f_k^2 f_m}\right)$$

在相同信道带宽条件下：

$$PCM : R_B = 2Nf_m \quad \Delta M : R_B = f_s$$

$$\left(\frac{S_o}{N_q}\right)_{\Delta M} \approx 10\lg\left[0.32N^3\left(\frac{f_m}{f_k}\right)^2\right]$$

本文件仅供西安电子科技大学通信课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。



6.6 PCM与 ΔM 系统的比较

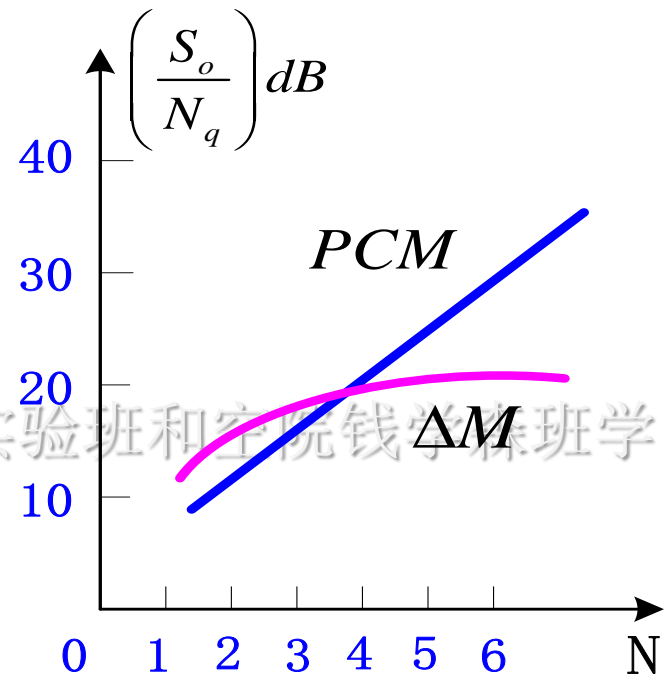
西安电子科技大学

通信工程学院

令 $f_m = 3000\text{Hz}$, $f_k = 1000\text{Hz}$

$N < 4$ (低 R_b) 时: ΔM 性能优于 PCM ;

$N \geq 4$ (高 R_b) 时: PCM 性能优于 ΔM 。



四、信道误码的影响

误码对PCM的影响比 ΔM 要严重。

PCM要求: $10^{-5} \sim 10^{-6}$ ΔM 要求: $10^{-3} \sim 10^{-4}$



6.6 PCM与 ΔM 系统的比较

西安电子科技大学

通信工程学院

五、设备复杂度

PCM: 多路信号统一编码, 编码设备复杂, 但质量较好。

适用: 大容量的干线(多路)通信

ΔM : 设备简单, 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。

适用: 小容量支线通信



6.7 时分复用(TDM)

西安电子科技大学

通信工程学院

一、时分复用原理

$m_1(t)$

各抽样值在时间上互不重叠

$m_2(t)$



TDM: 按照一定的时间顺序依次循环地传输各路信号，以实现多路通信。



6.7 时分复用 (TDM)

西安电子科技大学

通信工程学院

与FDM相比，TDM的优点：

(1) 多路信号的复接和分路采用数字处理方式

实现，通用性、一致性好；

(2) 对信道的非线性失真要求可降低。

本文件仅供西安电子科技大学通信课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。



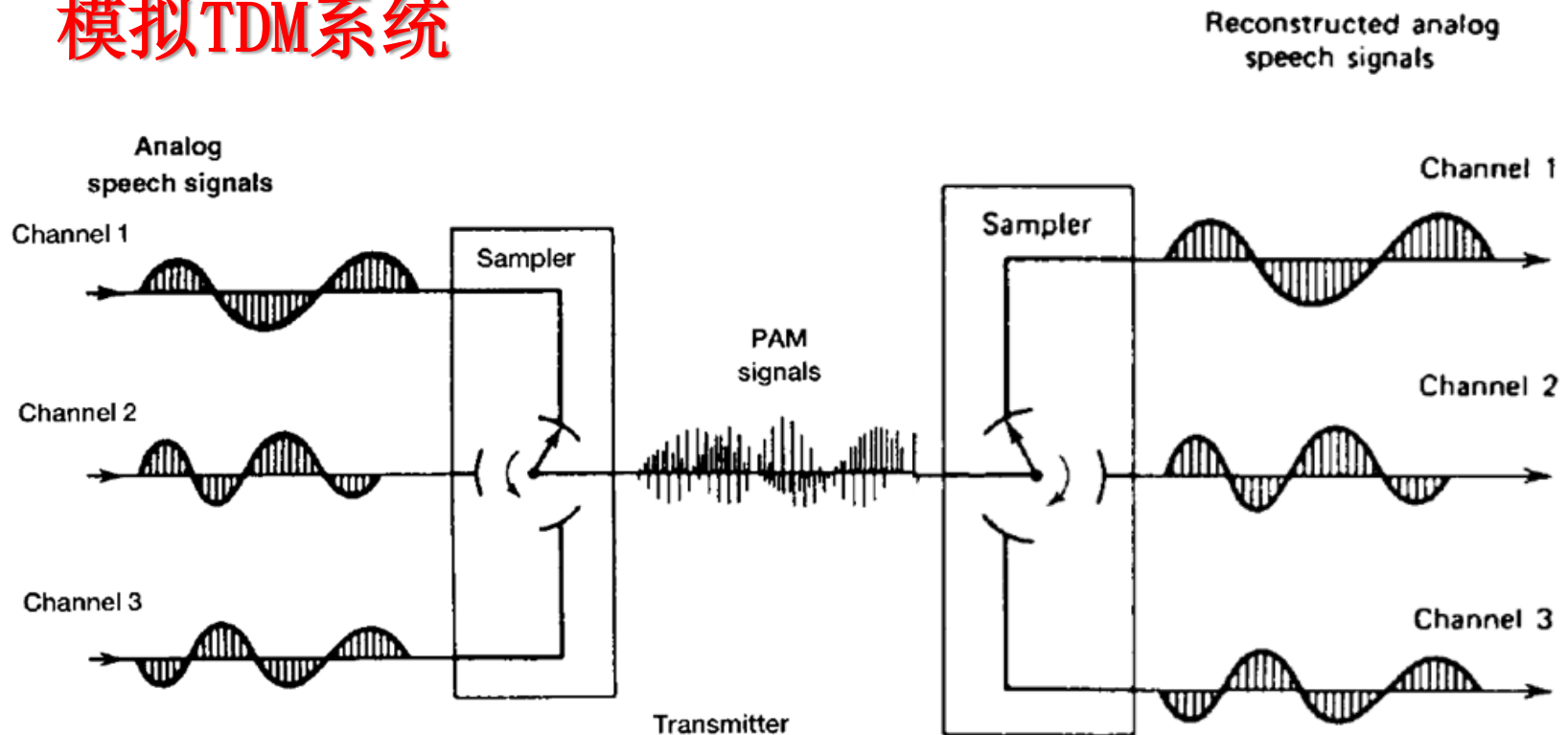
6.7 时分复用(TDM)

西安电子科技大学

通信工程学院

一、时分复用原理

模拟TDM系统





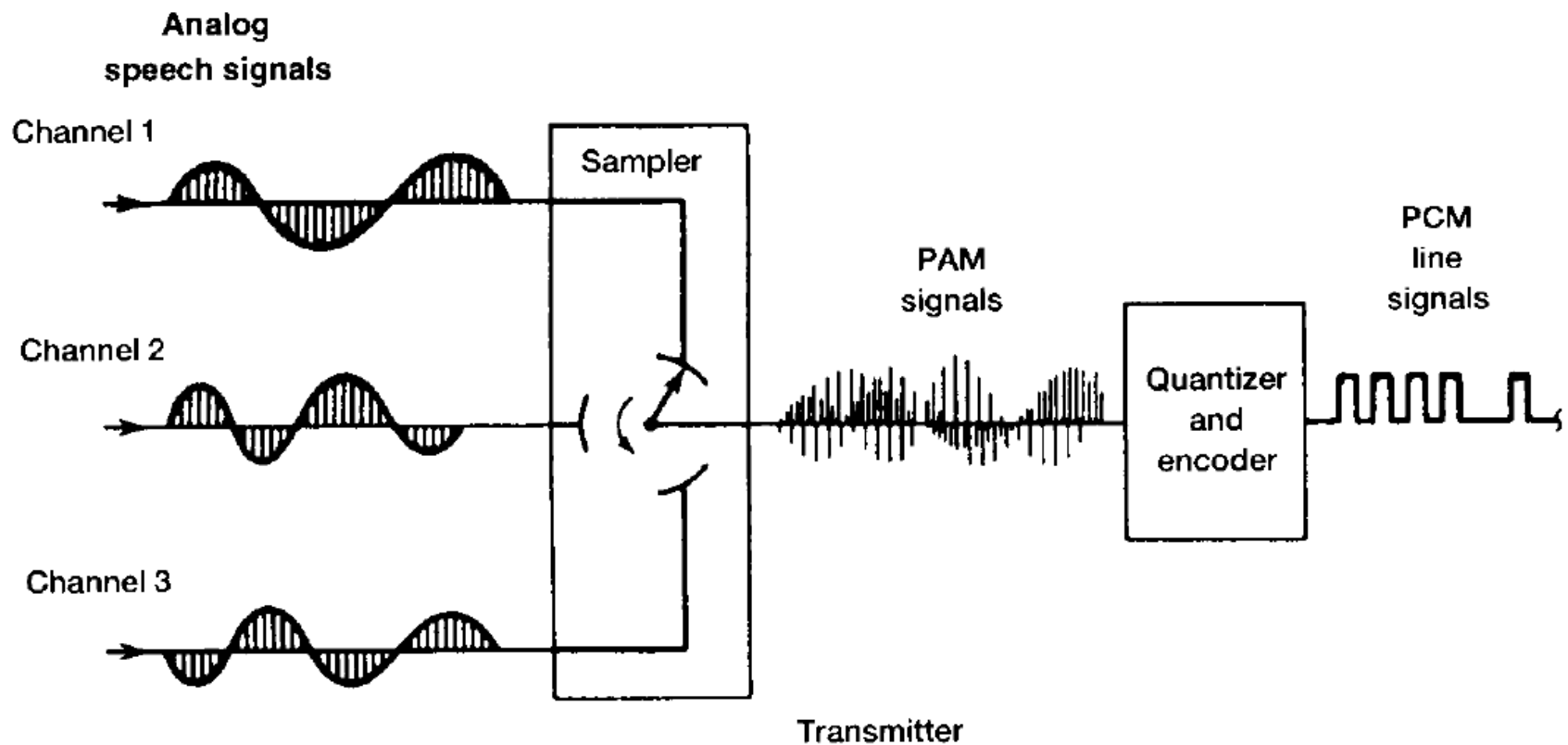
6.7 时分复用(TDM)

西安电子科技大学

通信工程学院

一、时分复用原理

数字TDM系统



(a)

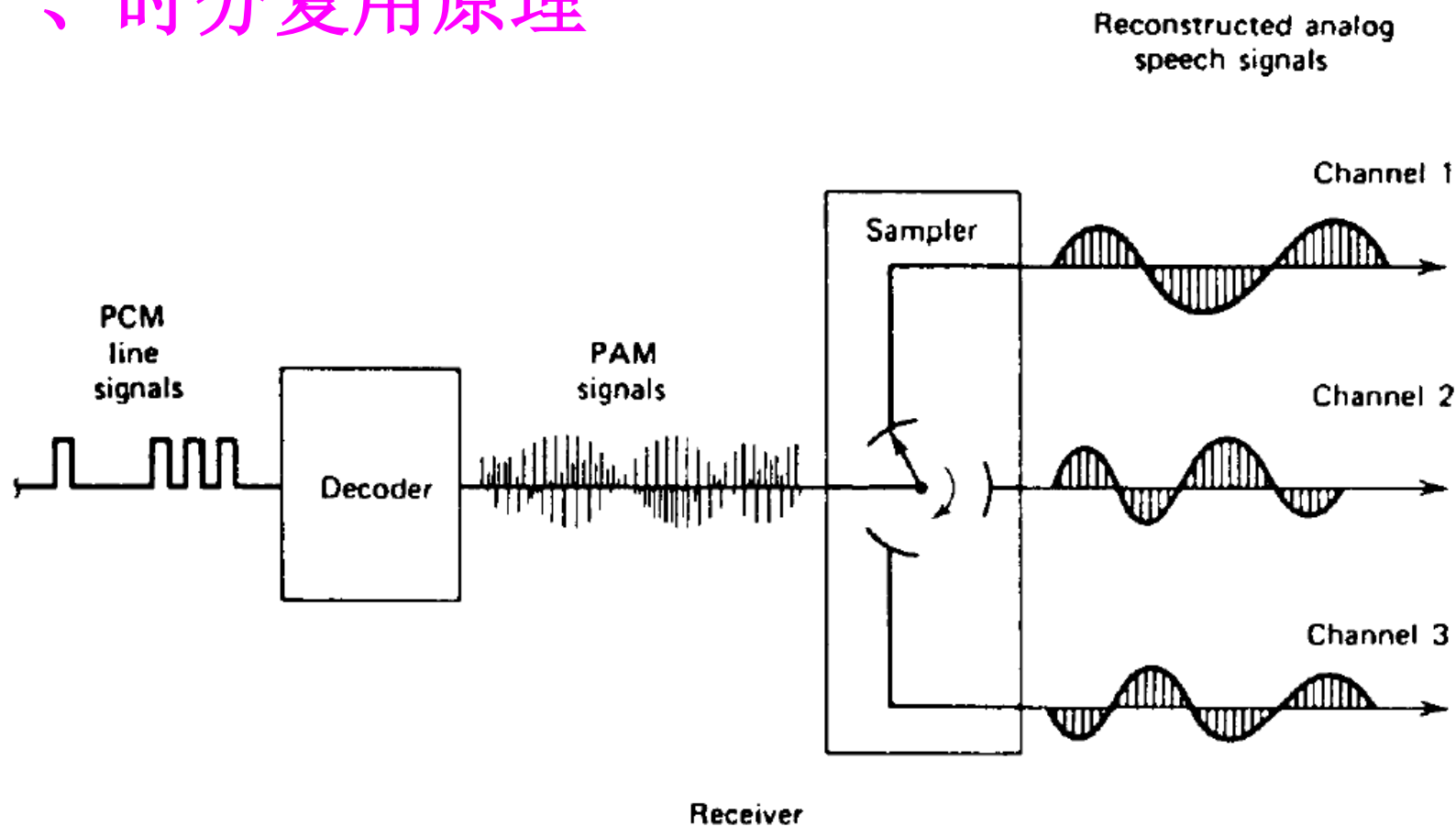


6.7 时分复用(TDM)

西安电子科技大学

通信工程学院

一、时分复用原理



(b)

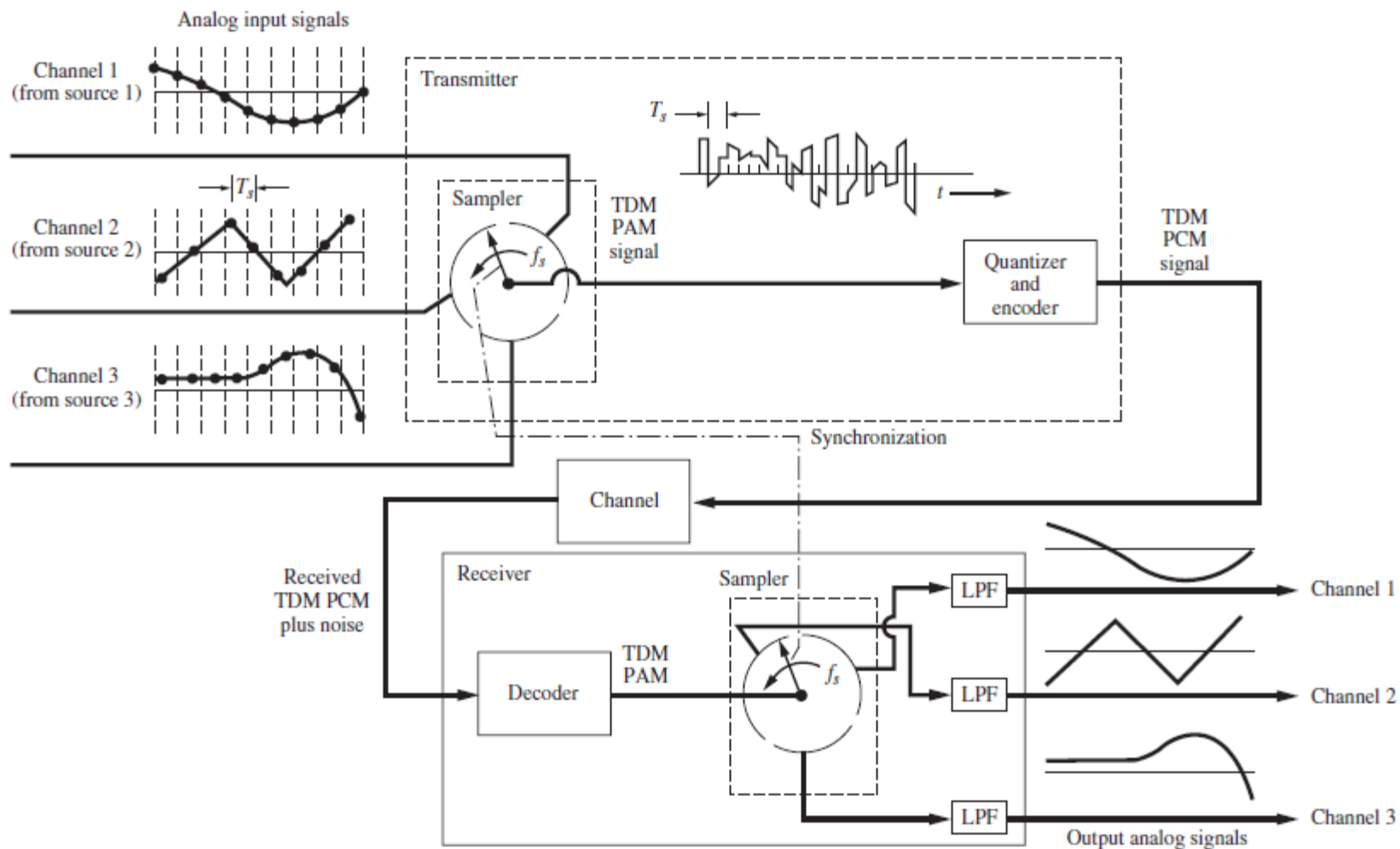


6.7 时分复用(TDM)

西安电子科技大学

通信工程学院

一、时分复用原理



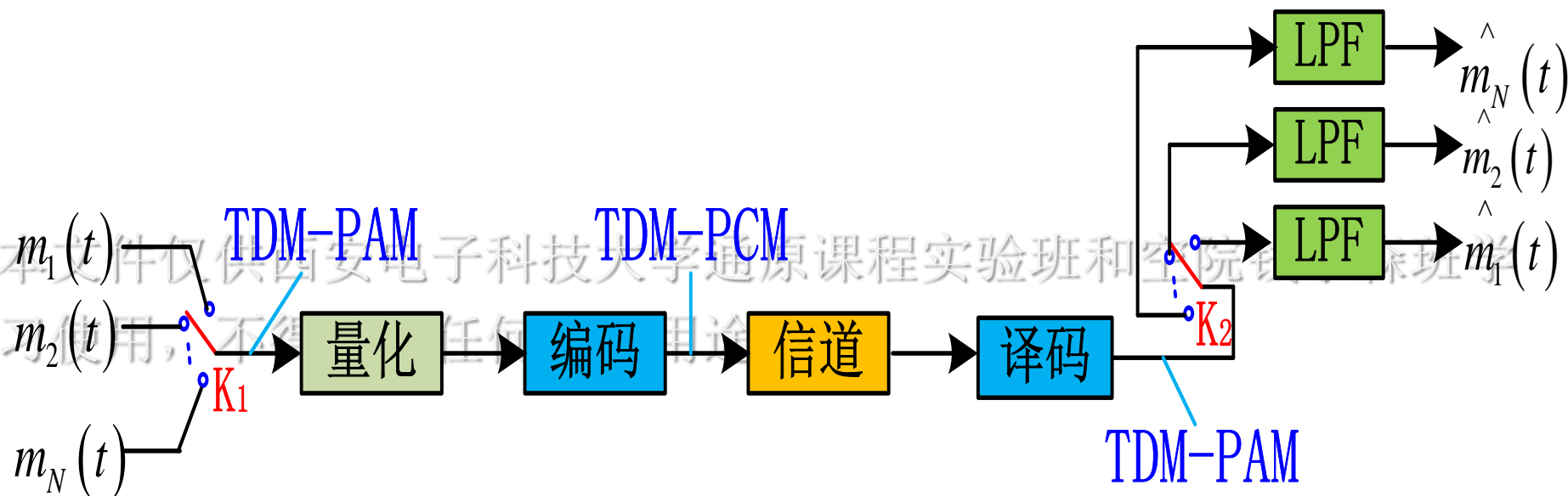


6.7 时分复用(TDM)

西安电子科技大学

通信工程学院

二、TDM-PCM系统



注：①转换开关 K_1 ：以单路信号采样周期为旋转周期。

② K_1 与 K_2 同步旋转。



6.7 时分复用 (TDM)

西安电子科技大学

通信工程学院

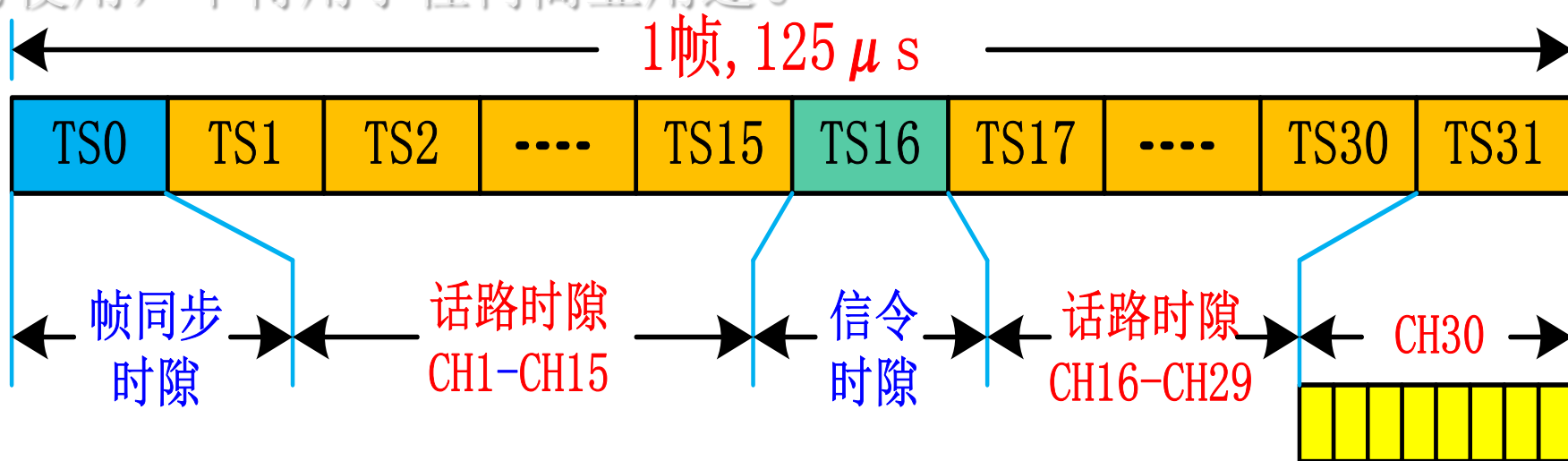
三、PCM基群帧结构

国际上推荐使用的PCM基群有两种标准：

PCM30/32路 (A律)

PCM24路 (μ 律)

1、PCM30/32路基群帧结构





6.7 时分复用(TDM)

西安电子科技大学

通信工程学院

每路话音信号抽样速率: $f_s = 8kHz$

每帧时间间隔: $T_s = \frac{1}{f_s} = 125\mu s$

信息传输速率: $R_b = 8000 \times 32 \times 8 = 2.048Mb/s$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和全院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

每比特时间宽度: $t_b = \frac{1}{R_b} \approx 0.488\mu s$

每路时隙时间宽度: $t_l = 8t_b \approx 3.91\mu s$

思考: $B_{\min} = ?$ $B_{\min} = 1.024MHz$

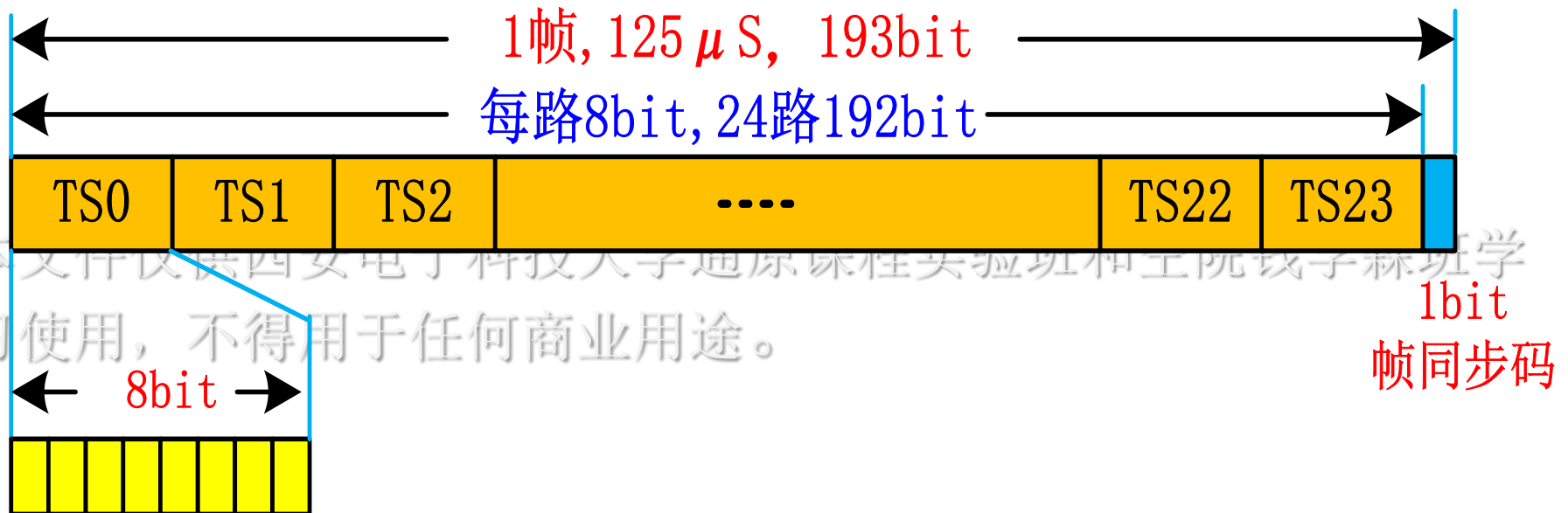


6.7 时分复用(TDM)

西安电子科技大学

通信工程学院

2、PCM24路基群帧结构



$$R_b = 8k(24 \times 8 + 1) = 1.544 Mb / s$$



6.7 时分复用(TDM)

西安电子科技大学

通信工程学院

信道误码对TDM-PCM系统的影响

Error Rate	S/N (dB)	Error Rate	S/N (dB)
10^{-2}	13.5	10^{-7}	20.3
10^{-3}	16.0	10^{-8}	21.0
10^{-4}	17.5	10^{-9}	21.6
10^{-5}	18.7	10^{-10}	22.0
10^{-6}	19.6	10^{-11}	22.2

本
习



6.7 时分复用(TDM)

西安电子科技大学

通信工程学院

四、PCM高次群结构

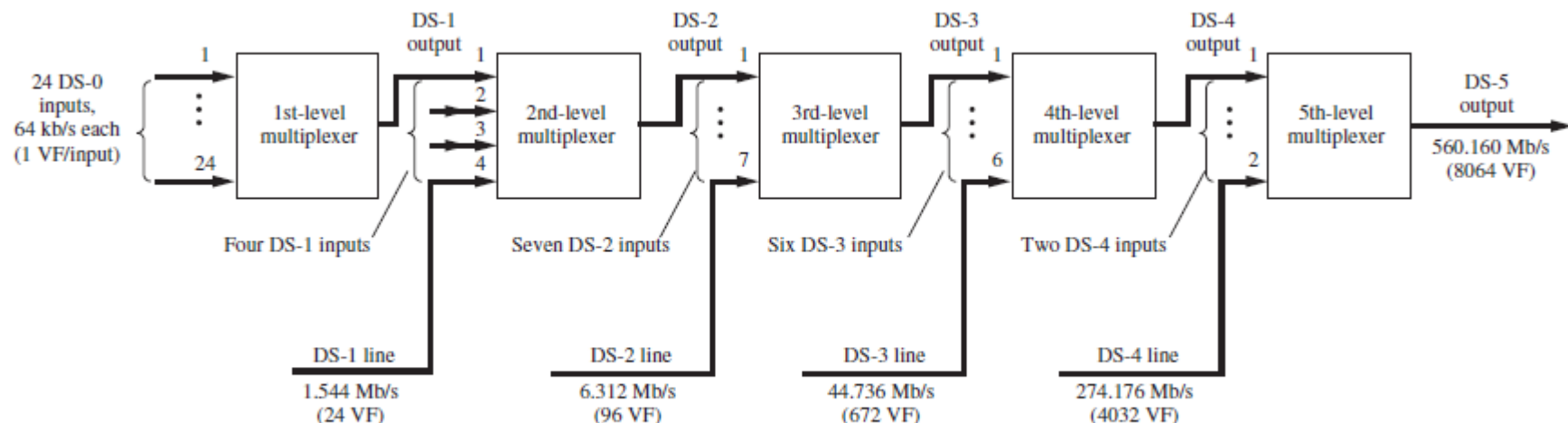


Figure 3-40 North American digital TDM hierarchy.

Digital Signal Number	Bit Rate, R (Mbits/s)	No. of 64 kbits/s PCM VF Channels	Transmission Media Used
DS-0	0.064	1	Wire pairs
DS-1	1.544	24	Wire pairs
DS-1C	3.152	48	Wire pairs
DS-2	6.312	96	Wire pairs, fiber
DS-3	44.736	672	Coax., radio, fiber
DS-3C	90.254	1344	Radio, fiber
DS-4E	139.264	2016	Radio, fiber, coax.
DS-4	274.176	4032	Coax., fiber
DS-432	432.000	6048	Fiber
DS-5	560.160	8064	Coax., fiber



6.7 时分复用(TDM)

西安电子科技大学

通信工程学院

四、PCM高次群结构

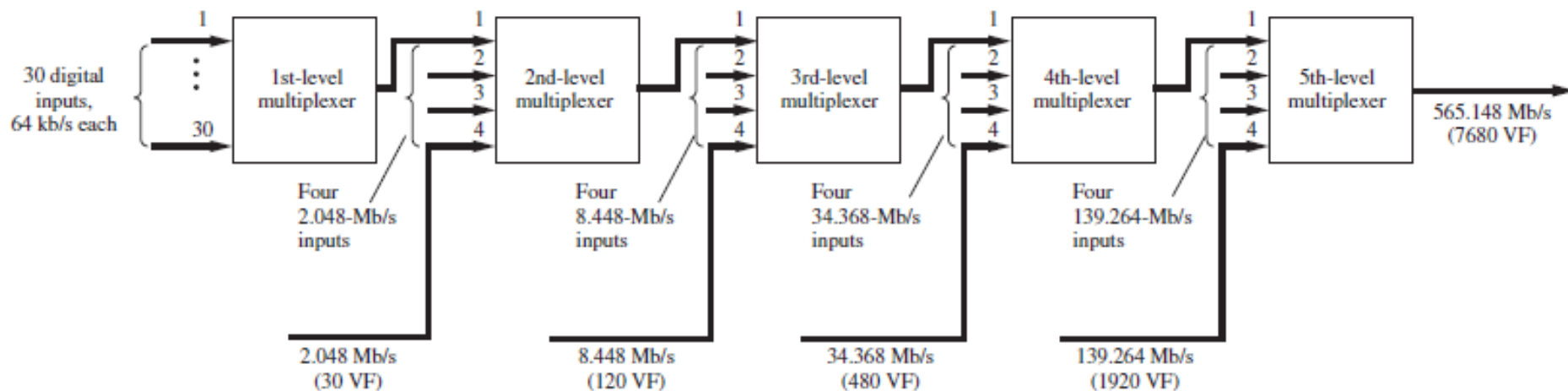


TABLE 3-10 SONET SIGNAL HIERARCHY

Optical OC Level	Electrical STS Level	Line Rate (Mbits/s)	Equivalent Number of		
			DS-3s	DS-1s	DS-0s
OC-1	STS-1	51.84	1	28	672
OC-3	STS-3	155.52	3	84	2,016
OC-9	STS-9	466.56	9	252	6,048
OC-12	STS-12	622.08	12	336	8,064
OC-18	STS-18	933.12	18	504	12,096
OC-24	STS-24	1,244.16	24	672	16,128
OC-36	STS-36	1,866.24	36	1,008	24,192
OC-48	STS-48	2,488.32	48	1,344	32,256
OC-192	STS-192	9,953.28	192	5,376	129,024
OC-768	STS-768	89,813.12	768	21,504	516,096
OC-3072	STS-3072	159,252.48	3,072	86,016	2,064,384



例题

西安电子科技大学

通信工程学院

例 已知最高频率为 4 kHz 的模拟信号 $m(t)$ 在 (+1.0~-1.0 伏) 量化范围内服从均匀分布, 若采用 PCM 系统对其进行抽样、均匀量化和编码, 若要量化信噪比大于 30dB, 试问:

- (1) 求均匀量化器的量化间隔;
- (2) 该 PCM 信号的传码率和最小传输带宽;
- (3) 传输中产生的误码率 $P_e = 10^{-2}$, 计算 PCM 系统输出端的平均信号噪声功率比 (S_o/N_o);



(1) 因为 $\left[\frac{S_q}{N_q} \right]_{dB} = 20 \lg M \geq 30 dB$, 所以取 $M=32$

$$\text{量化间隔 } \Delta = \frac{1 - (-1)}{M} = 0.0625$$

(2) 抽样速率 $f_s = 2f_m = 8kHz$

$$\text{编码位数 } N = \lg M = 5$$

$$\text{最小带宽 } B = \frac{1}{2} f_s \times N = 20kHz$$

$$\text{信息速率 } r_b = f_s \times N = 40kb/s$$

$$(3) \text{ 输出信噪比 } \frac{S_o}{N_o} = \frac{2^{2N}}{1 + 4P_e 2^{2N}} \approx 24.4$$



第6章 模拟信号的数字传输

西安电子科技大学

通信工程学院

本章主要内容:

- ★ 低通和带通抽样定理
- ★ 脉冲振幅调制（自然抽样和平顶抽样）原理
- ★ 均匀量化与非均匀量化的原理及特点
- ★ 脉冲编码调制（PCM）原理及抗噪声性能
- ★ 增量调制（ ΔM ）原理及抗噪声性能
- ★ 时分复用（TDM）原理

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。