

# 数据通信



## 信号编码技术

殷亚凤

[yafeng@nju.edu.cn](mailto:yafeng@nju.edu.cn)

<http://cs.nju.edu.cn/yafeng/>  
Room 901, Building of CS



# 信号编码技术



1. 数字数据，数字信号
2. 数字数据，模拟信号
3. 模拟数据，数字信号
4. 模拟数据，模拟信号

# 性能: 带宽与效率



- 传输带宽

- ASK与PSK 带宽与比特率直接相关

$$B_T = (1 + r)R \quad 0 < r < 1$$

- FSK对于低频载波, 带宽主要与数据率相关; 而对高频载波, 带宽则取决于调制频率相对于载波频率的偏移

$$B_T = 2\Delta F + (1 + r)R \quad \Delta F = f_2 - f_c = f_c - f_1$$

- 随着 $E_b/N_0$ 的增加, 比特差错率会降低

- 相同差错率时, DPSK和BPSK的 $E_b/N_0$ 比ASK和BFSK高3dB

$$C_i = B \log_2 \left( 1 + \frac{S}{n_0 B} \right) = B \log_2 \left( 1 + \frac{E_b / T_b}{n_0 B} \right)$$

# 性能: 带宽与效率

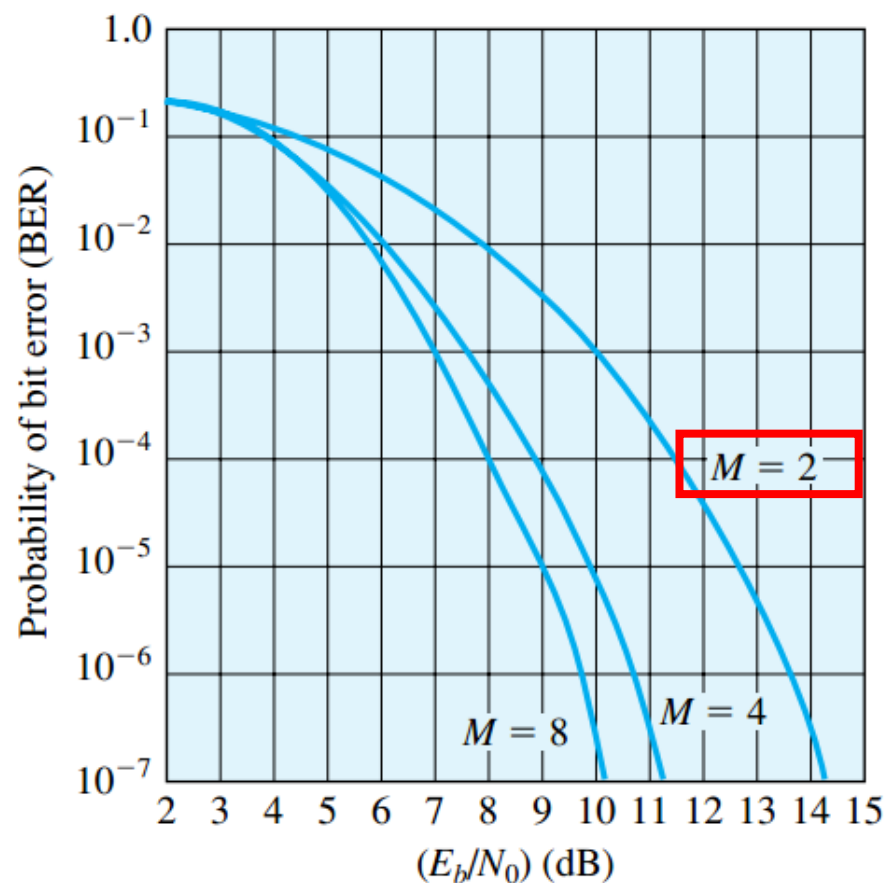


	$r = 0$	$r = 0.5$	$r = 1$
<b>ASK</b>	1.0	0.67	0.5
<b>多值 FSK</b>			
$M = 4, L = 2$	0.5	0.33	0.25
$M = 8, L = 3$	0.375	0.25	0.1875
$M = 16, L = 4$	0.25	0.167	0.125
$M = 32, L = 5$	0.156	0.104	0.078
<b>PSK</b>	1.0	0.67	0.5
<b>多值 PSK</b>			
$M = 4, L = 2$	2.00	1.33	1.00
$M = 8, L = 3$	3.00	2.00	1.50
$M = 16, L = 4$	4.00	2.67	2.00
$M = 32, L = 5$	5.00	3.33	2.50

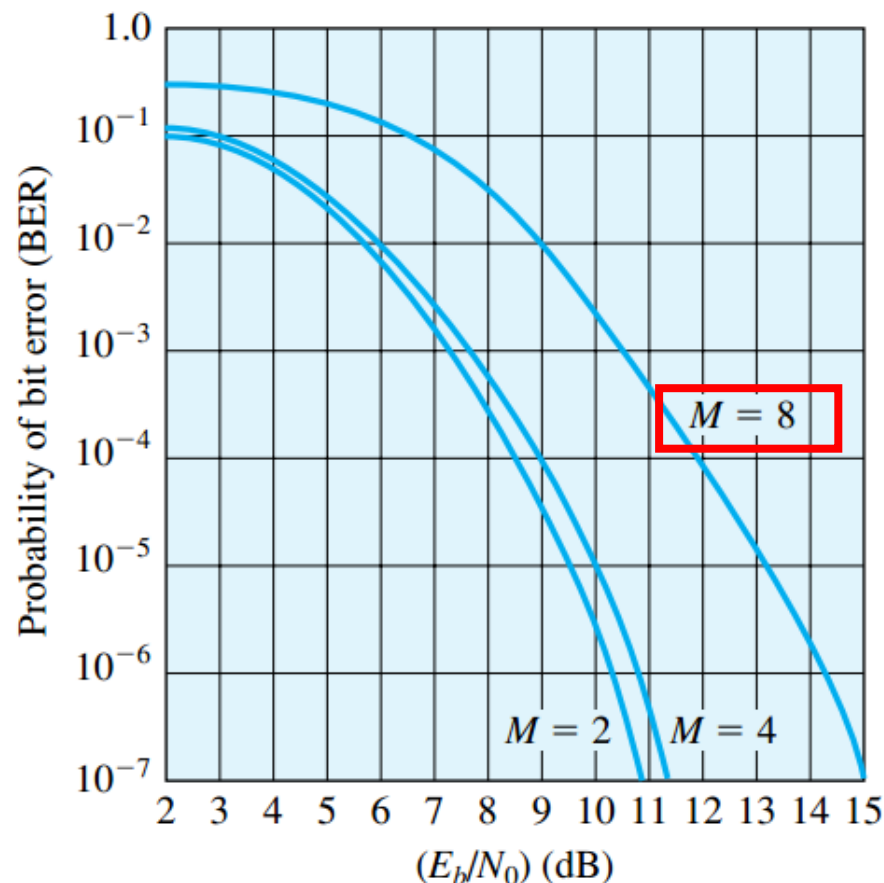
带宽有效率  
( $R/B_T$ )

- ASK和PSK  $B_T = (1 + r)R$   $0 < r < 1$
- FSK  $B_T = 2\Delta F + (1 + r)R$   $\Delta F = f_2 - f_c = f_c - f_1$
- MPSK  $B_T = \left(\frac{1 + r}{b}\right)R = \frac{1 + r}{\log_2 M} R$
- MFSK  $B_T = \frac{(1 + r)M}{\log_2 M} R$

# MFSK和MPSK 比特差错率



(a) 多值 FSK (MFSK)



(b) 多值 PSK (MPSK)

# 正交调幅QAM



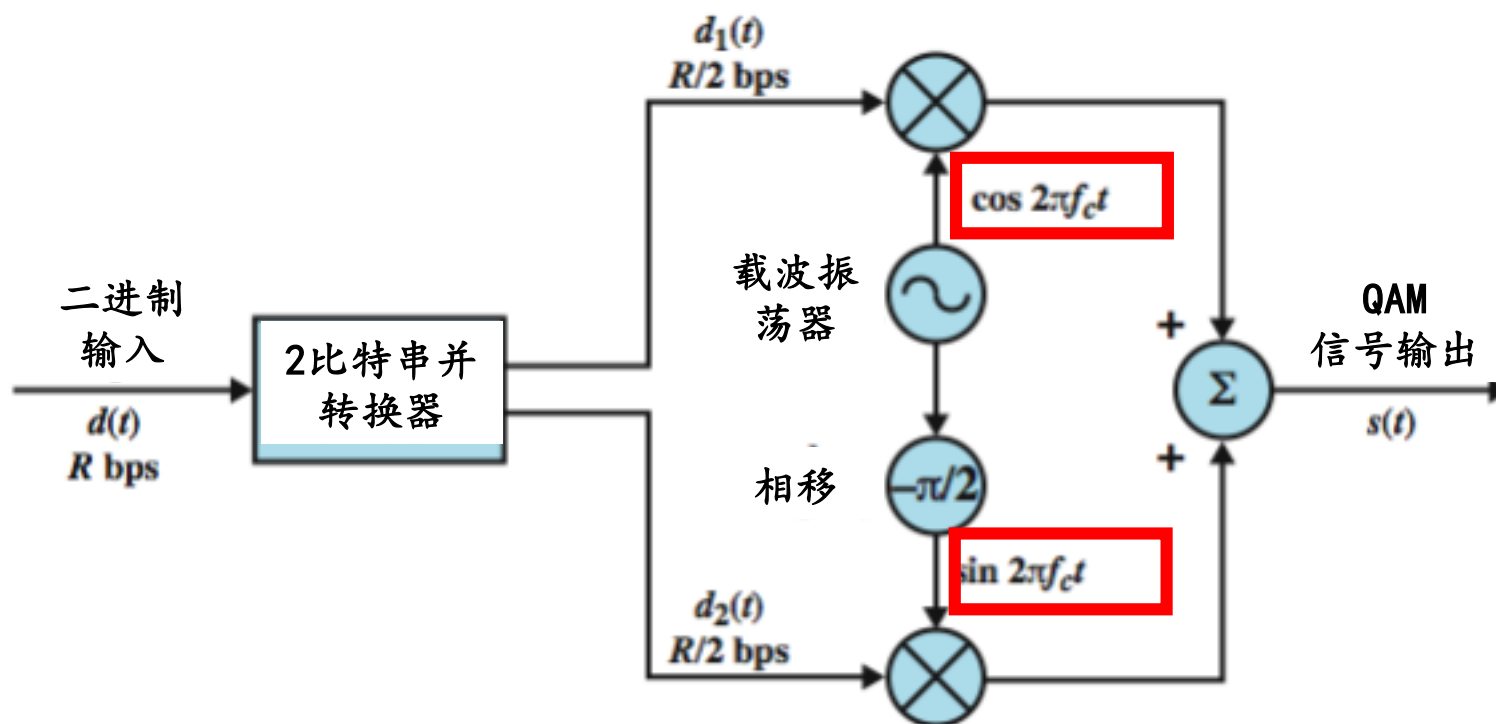
$$S(t) = d_1(t) \cos(2\pi f_c t) + d_2(t) \sin(2\pi f_c t)$$

- ASK 和 PSK 的组合
- QPSK的扩展，在**同样的载波频率**上发送两个不同的信号
  - 使用两个载波，具有**90° 偏移**
  - **每个**载波通过 **ASK** 调制
  - 在同样的传输媒体发送**两个独立的信号**
- QAM 常用于ADSL（非对称数字用户线路）和无线模拟信号传输

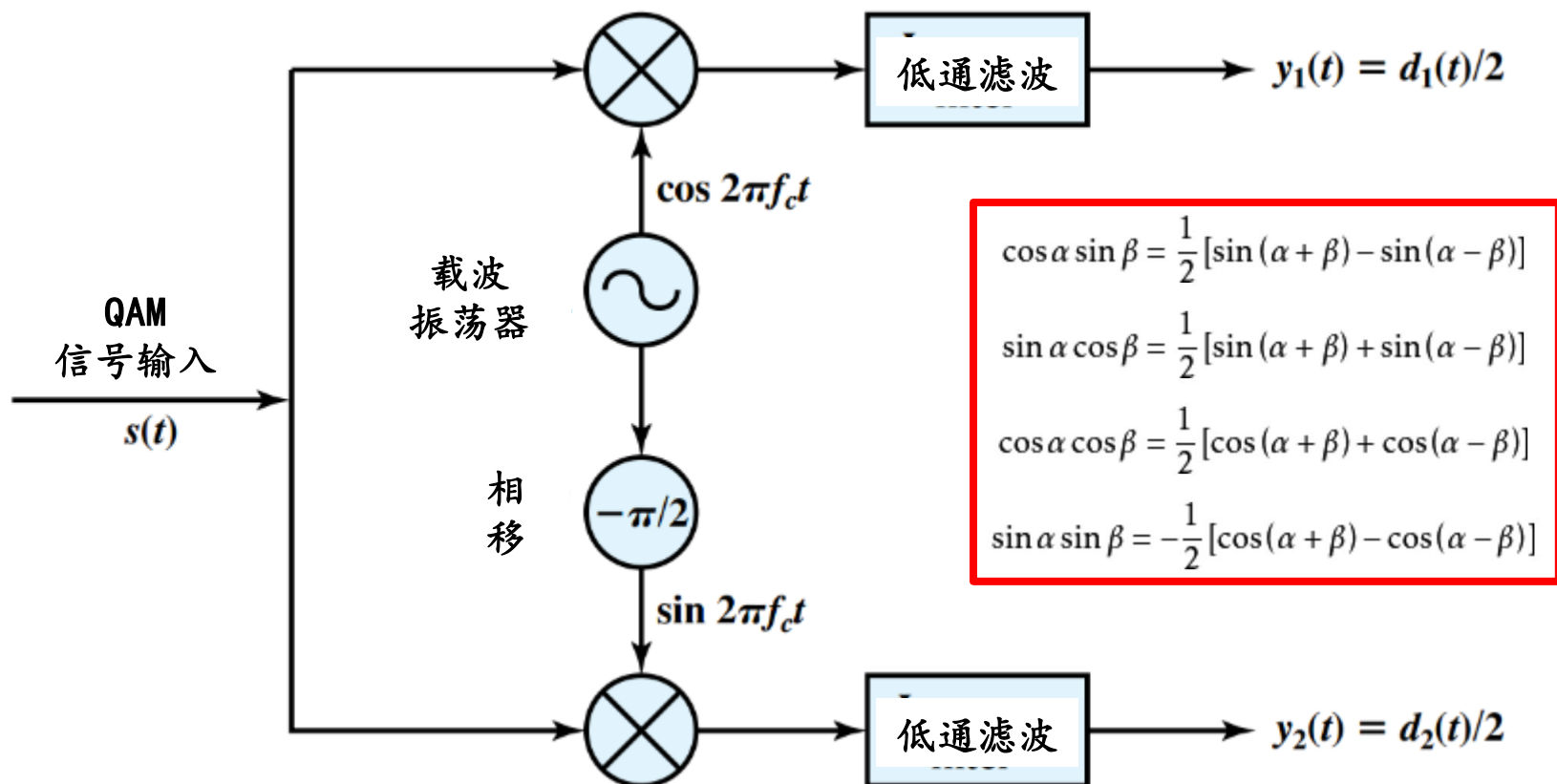
# QAM 调制



$$S(t) = d_1(t) \cos(2\pi f_c t) + d_2(t) \sin(2\pi f_c t)$$



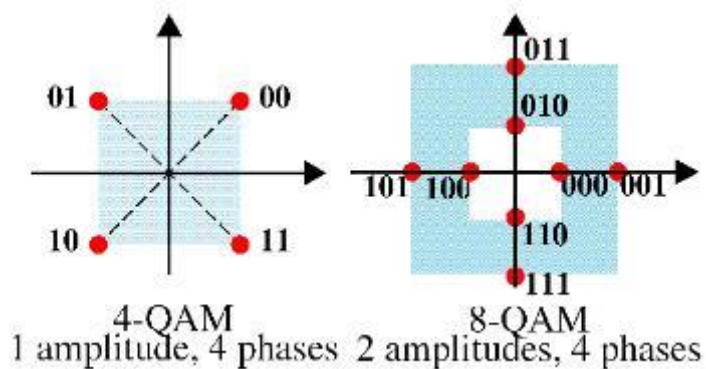
# QAM 解调



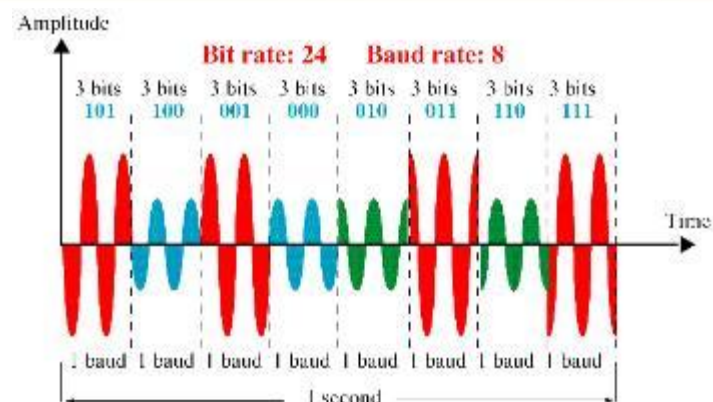
- $y_1(t) = s(t) \cos 2\pi f_c t = d_1(t) \cos^2 2\pi f_c t + d_2(t) \sin 2\pi f_c t \cos 2\pi f_c t$
- $y_2(t) = s(t) \sin 2\pi f_c t = d_1(t) \cos 2\pi f_c t \sin 2\pi f_c t + d_2(t) \sin^2 2\pi f_c t$
- 提示：利用三角恒等式和低通滤波解习题5.17



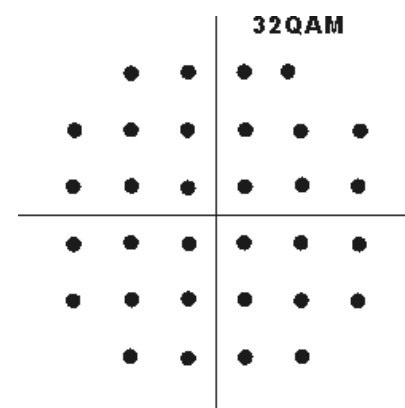
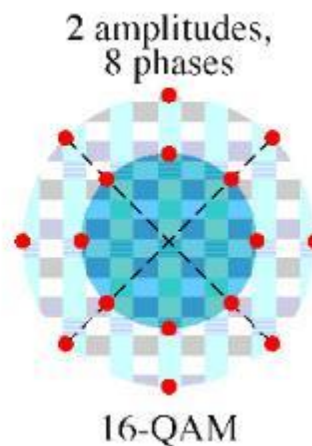
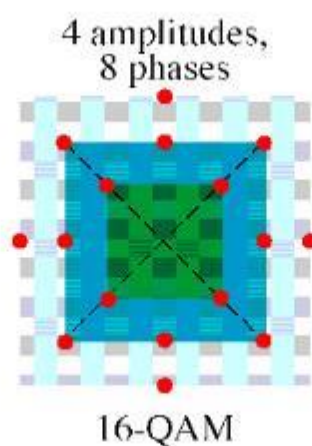
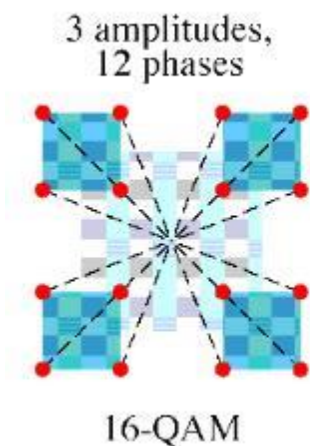
# QAM : QPSK+MASK



4-QAM , 8-QAM 星座图



8-QAM



16-QAM, 32-QAM 星座图

# 信号编码技术



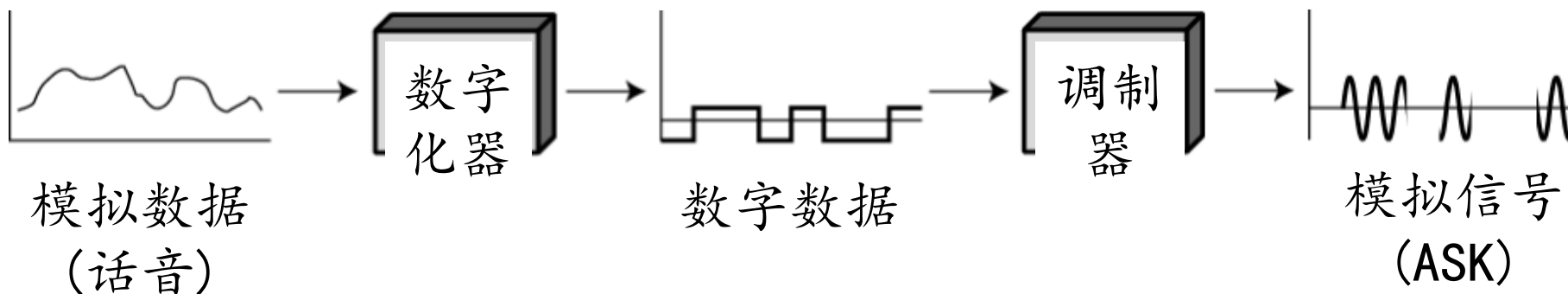
1. 数字数据，数字信号
2. 数字数据，模拟信号
3. 模拟数据，数字信号
4. 模拟数据，模拟信号

# 模拟数据数字化



➤ 数字化：把**模拟数据**转变成**数字数据**

- 直接使用NRZ-L编码技术传输：模拟数据→**数字信号**
- 通过转换使用非NRZ-L编码传输：模拟数据→**数字信号**
- 模拟数据转化为数字数据，再转换为**模拟信号**



◆ 语音数据 → 数字化 → 模拟信号

# 模拟数据数字化



➤ **编解码器**：将模拟数据转换成可传输的数字形式，或相应地将数字信号恢复成原始模拟信号

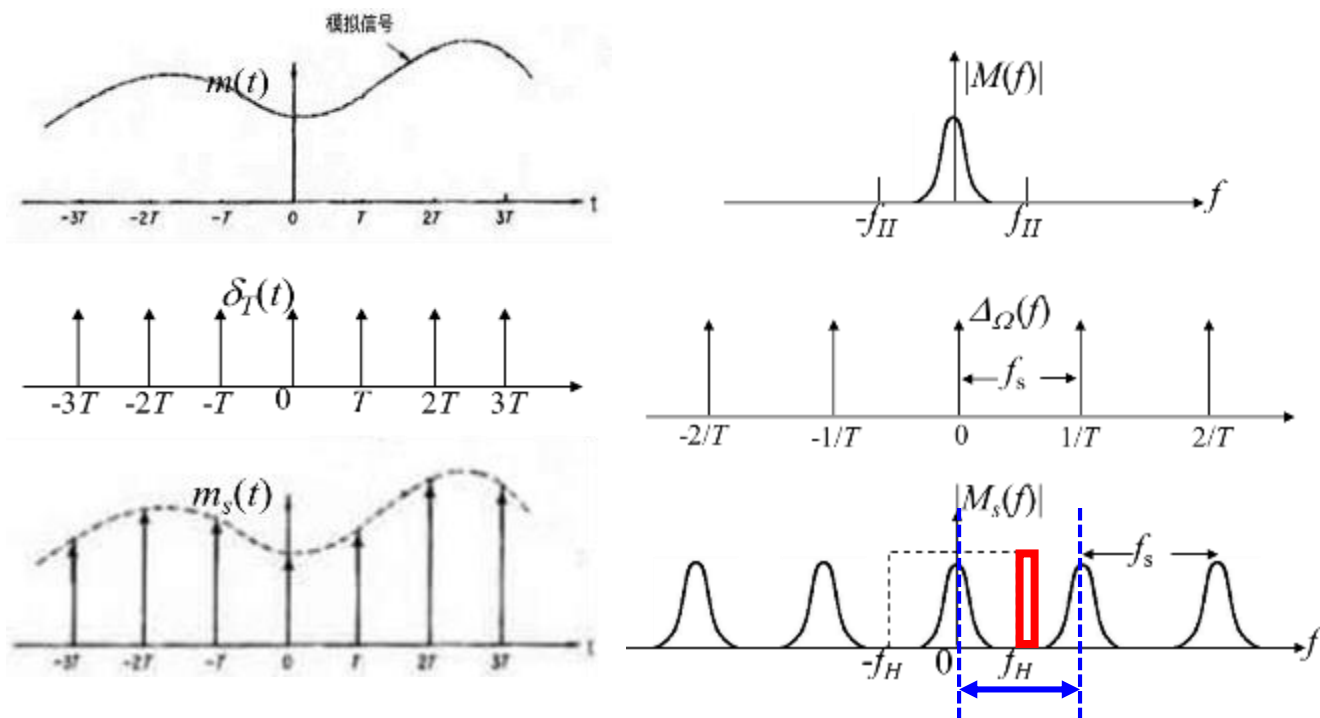
➤ 编解码器使用的主要两种技术：

- **脉码调制**
- **增量调制**

# 脉码调制

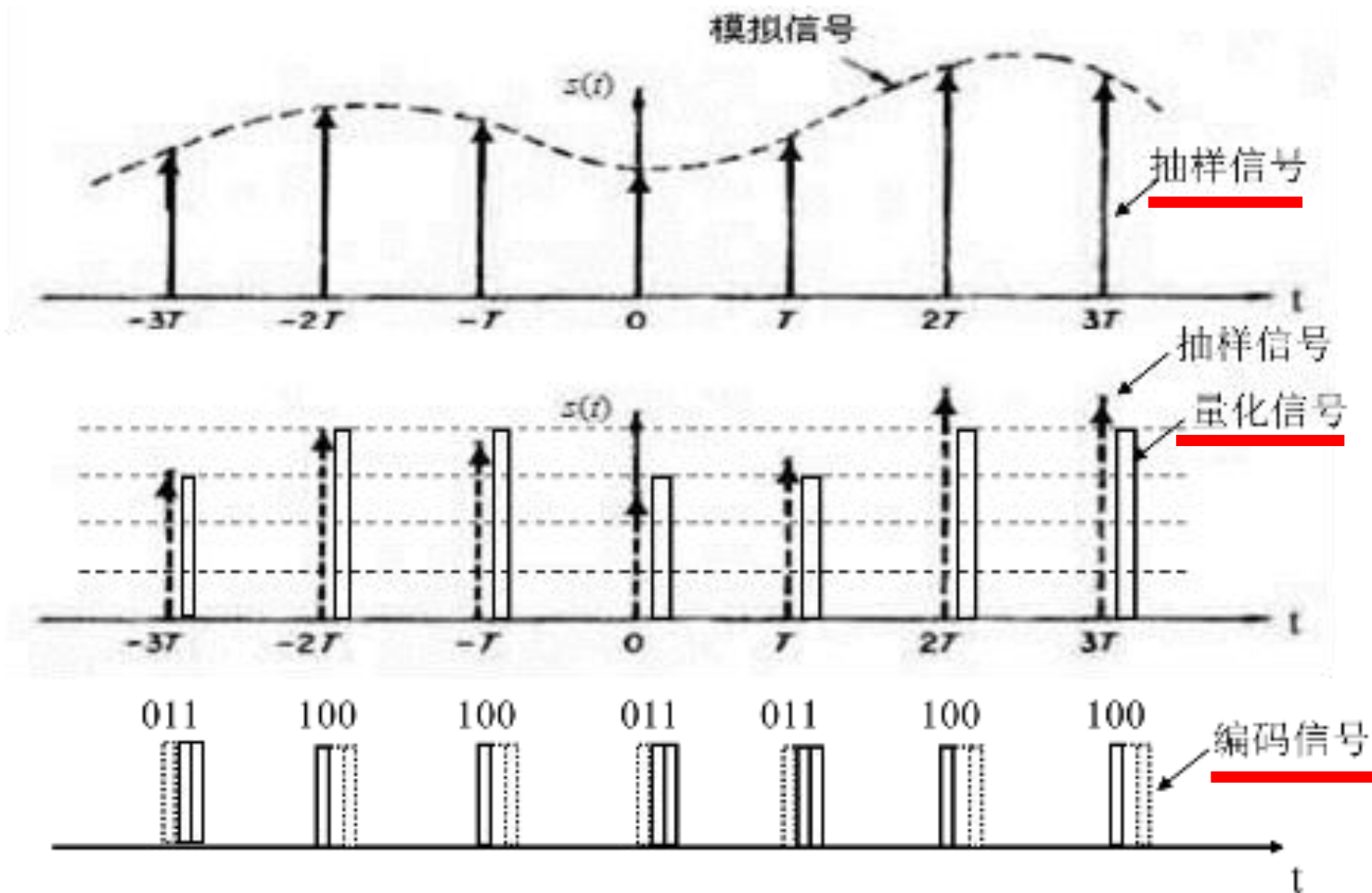
## ➤ 采样定理:

- 如果一个信号 $f(t)$ 以固定的时间间隔并以高于信号**最大主频率两倍的速率进行采样**，那么这些样本就包含了原始信号中的所有信息。根据这些样本，通过使用低通滤波，就可以重建函数 $f(t)$ 。
- 例如 4000Hz 音频数据要求采样8000个样本/秒



# 脉码调制

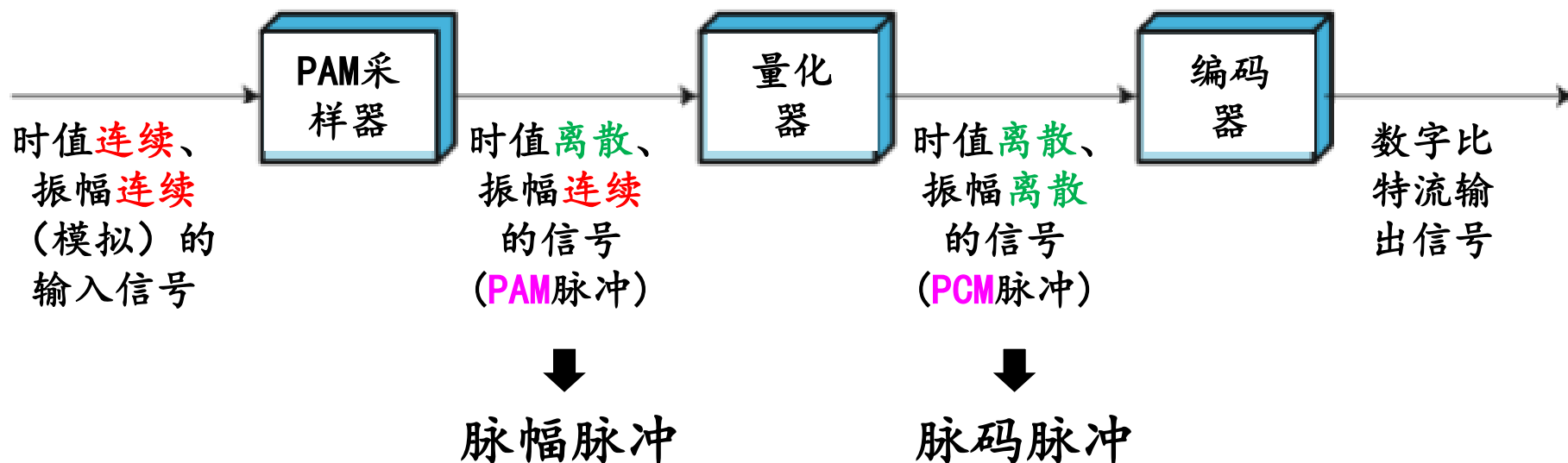
- 脉码调制：采样、量化、编码



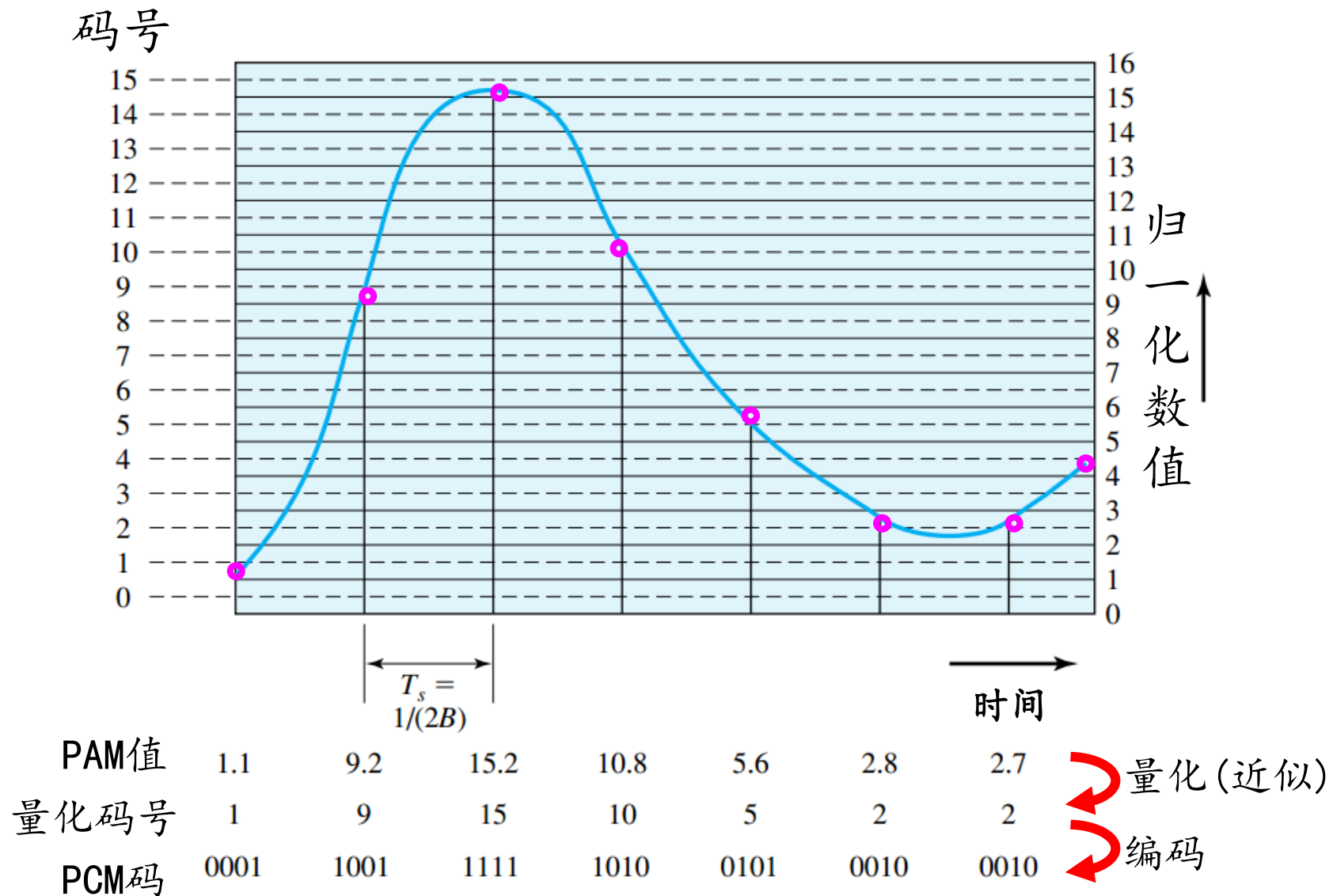
# 脉码调制



- **采样**：对模拟信号（脉幅调制/PAM样本）采样
- **量化**：每个脉幅调制样本被近似地量化为一个整数值
- **编码**：为每个样本赋予一个二进制码



# 脉码调制举例





# 量化噪声



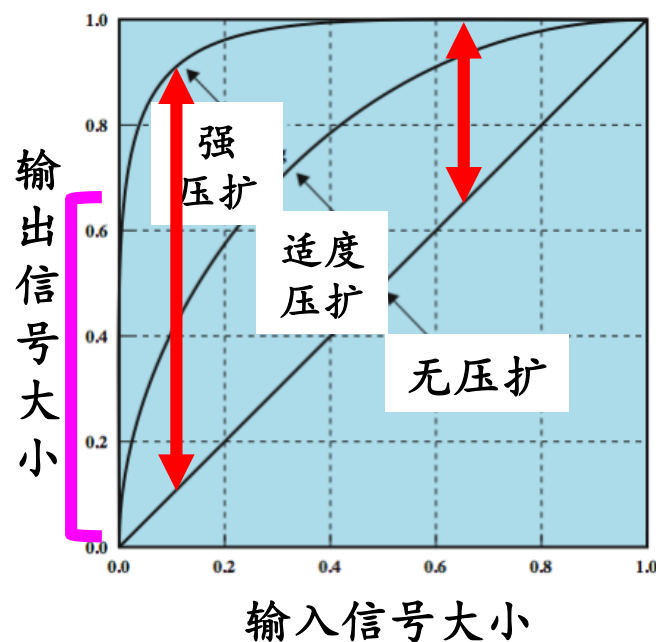
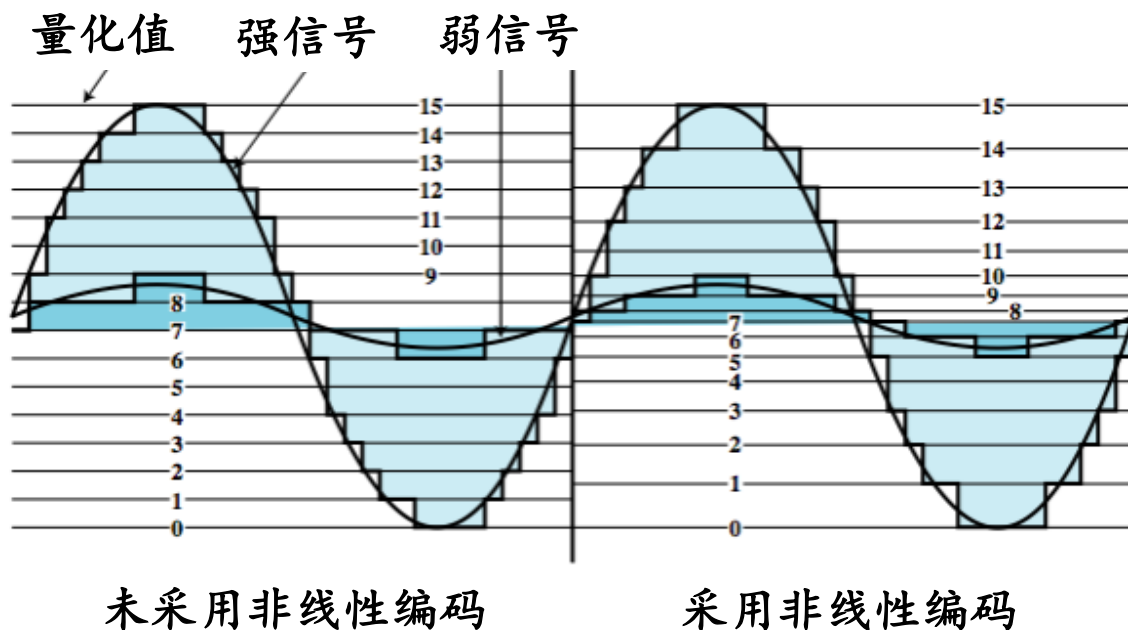
- 在脉码调制中，接收端再生模拟信号时，用量化PAM脉冲来再生原始信号，原始信号被近似，而不能完全准确地重新恢复，这个影响被称为量化误差或量化噪声：（n为比特数）

$$\text{SNR}_{\text{dB}} = 20 \lg 2^n + 1.76 \text{ dB} = 6.02n + 1.76 \text{ dB}$$

- 用于量化的比特数每增加1比特，信噪比就增加6dB，即增加4倍

# 非线性编码

- **等间距量化**：导致无论信号电平是多少，每个样本的绝对误差都相等，结果振幅较低的地方失真较严重。
- **非线性编码**：在信号振幅值较低时量化的次数较多，而在信号振幅值较高时量化的次数较少，则信号的整体失真就可大幅度降低。



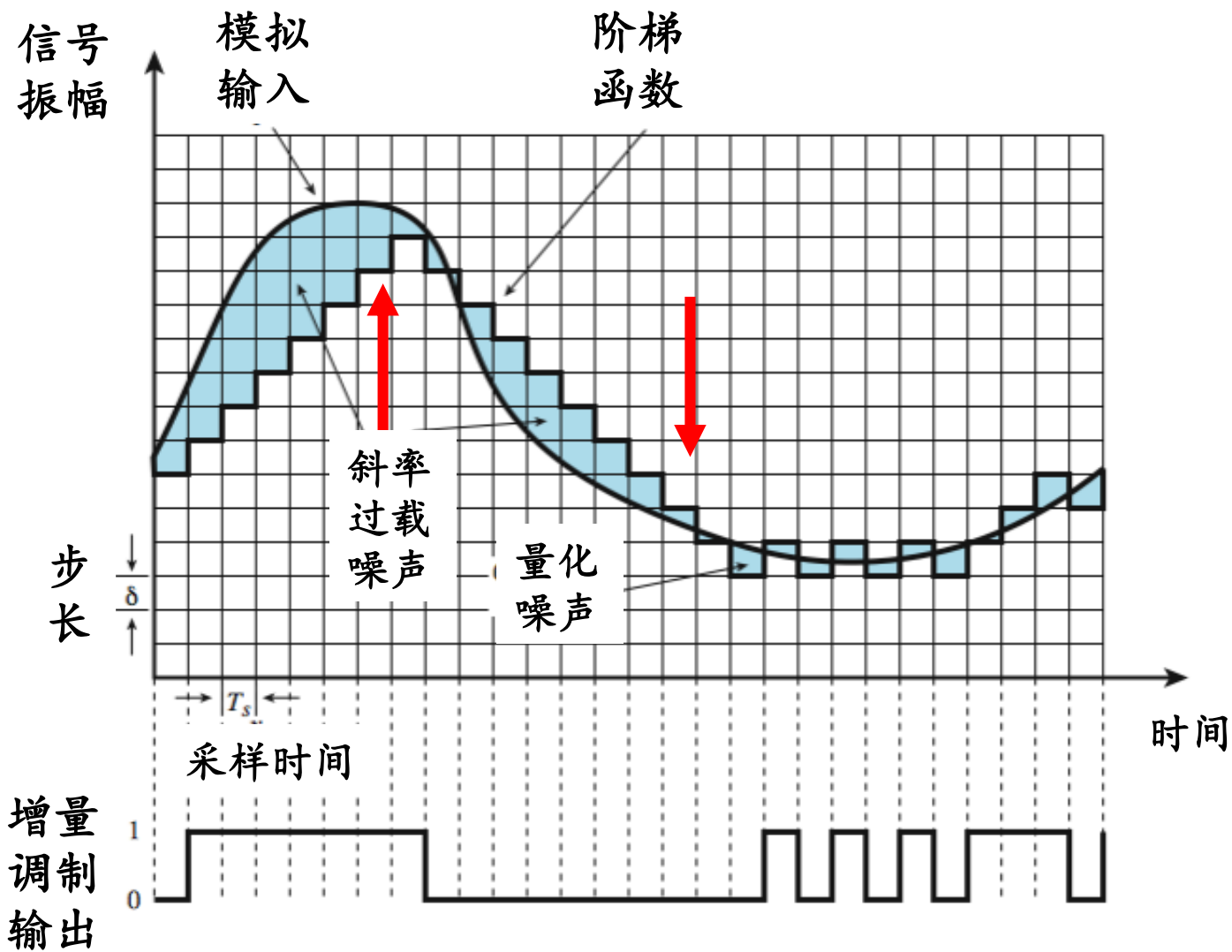
- **压缩-扩展**：压扩过程是指对信号的密度范围进行压缩，在压缩时输入的弱信号比强信号获得的增益要大，在输出端执行相反的过程。

# 增量调制

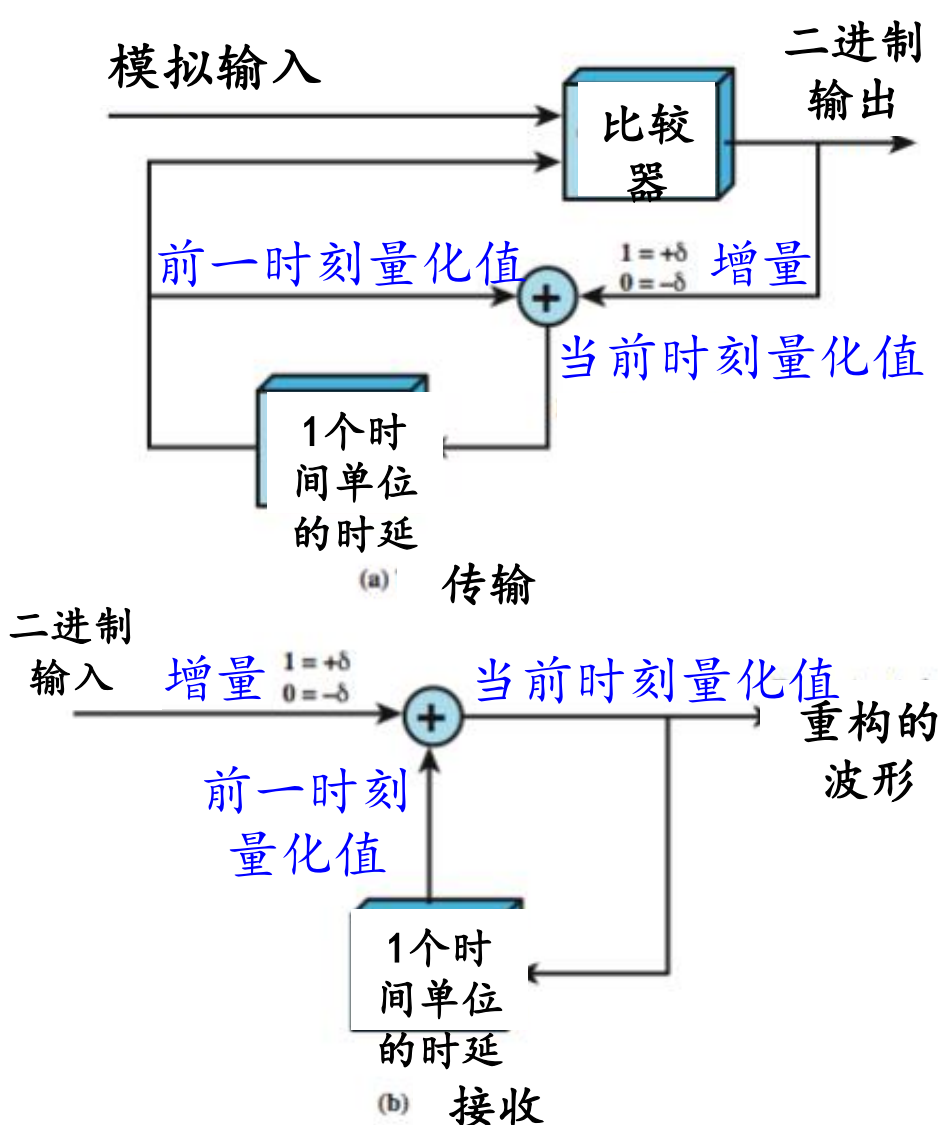


- 输入的模拟信号用一个**阶梯函数**来近似
  - 在每个采样周期**上升或下降**一个步长值
- 增量调制通过近似一个模拟信号的**导数**，而不是振幅值，产生一个数据流：
  - 具有二进制行为，即在每个采样时刻，函数**上升或下降**一个恒定的步长值  $\delta$
  - 输出可以用一个样本对应一个**二进制值表示**
  - 1表示上升，0表示下降

# 增量调制举例



# 增量调制



## ➤ 编码器:

预测误差  $e_k = m_k - m_k'$  被量化成两个电平  $+\delta$  和  $-\delta$ 。 $\delta$  值称为量化台阶。这就是说，**量化器输出信号  $r_k$  只取两个值  $+\delta$  或  $-\delta$** 。因此， $r_k$  可以用一个二进制符号表示。例如，用“1”表示“ $+\delta$ ”，及用“0”表示“ $-\delta$ ”。

## ➤ 译码器:

译码器由“延迟相加电路”组成，它和编码器中的相同。

# 脉码调制 (PCM) 和增量调制 (DM)



- DM和PCM相比实现简单，在数据率相同的条件下PCM具有较好的信噪比
- PCM编码表示话音数据，需要更多的带宽
  - 话音带宽 4kHz，128 级量化 (7 bit)
  - 数据率  $8000 \times 7 = 56\text{kbps}$
  - 数字信号传输带宽  $56/2=28\text{kHz}$
- 对于代表数字数据的模拟信号数字化时，PCM比DM更可取

# 信号编码技术



1. 数字数据，数字信号
2. 数字数据，模拟信号
3. 模拟数据，数字信号
4. 模拟数据，模拟信号

# 模拟调制系统



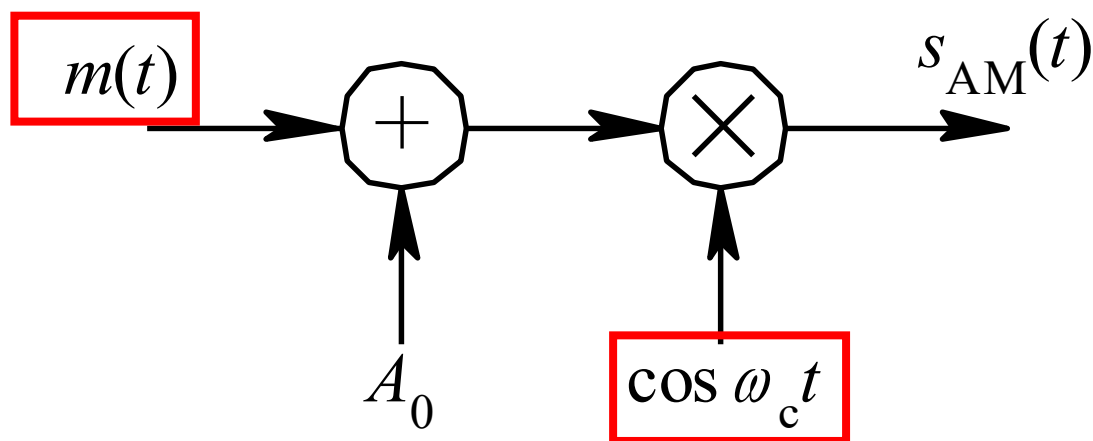
- 将数据信号与载波信号合并的过程
- 为什么调制模拟信号？
  - 高频信号更适于有效信号传输（如 天线长度要求）
  - 允许使用频分复用
  - 扩展信号带宽，提高系统抗干扰能力，还可实现传输带与信噪比之间的转换
- 模拟数据调制技术
  - 调幅
  - 调频
  - 调相



# 调幅



幅度调制是用调制信号去控制高频载波的振幅，使其按调制信号的规律而变化的过程。



时域表示式

$$s_{AM}(t) = [A_0 + m(t)] \cos \omega_c t = A_0 \cos \omega_c t + m(t) \cos \omega_c t$$

$m(t)$  — 调制信号； $A_0$  — 直流分量。

# 调幅

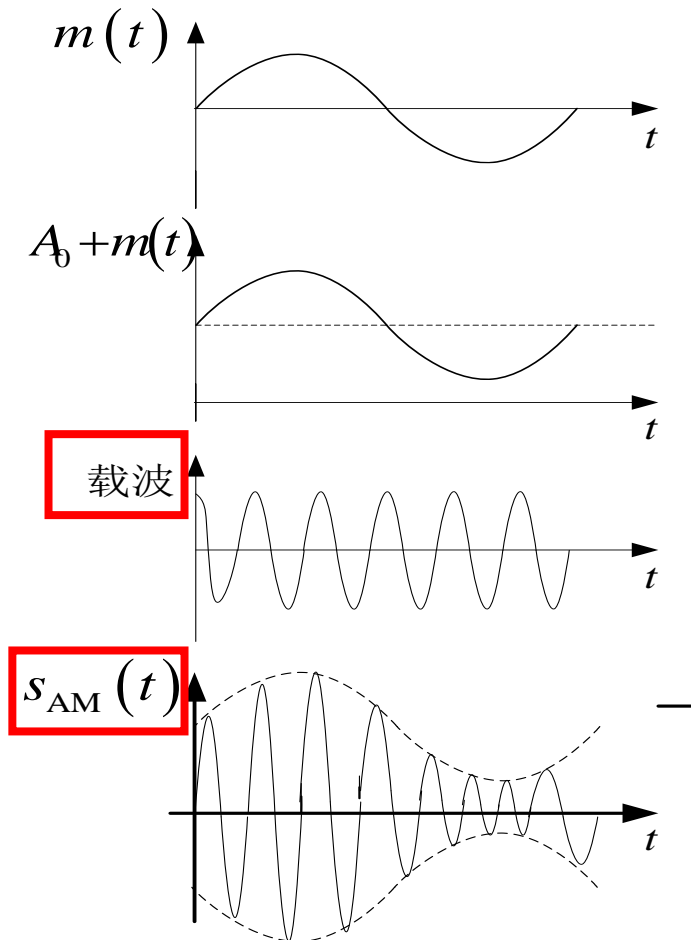


幅度调制是用调制信号去控制高频载波的振幅，使其按调制信号的规律而变化的过程。

时域表示式

$$s_{AM}(t) = [A_0 + m(t)] \cos \omega_c t = \underline{A_0 \cos \omega_c t} + \underline{m(t) \cos \omega_c t}$$

$m(t)$  — 调制信号； $A_0$  — 直流分量。



# 调幅



幅度调制是用调制信号去控制高频载波的振幅，使其按调制信号的规律而变化的过程。

时域表示式

$$s_{AM}(t) = [A_0 + m(t)] \cos \omega_c t = \underbrace{A_0}_{\text{直流分量}} \cos \omega_c t + \underbrace{m(t)}_{\text{调制信号}} \cos \omega_c t$$

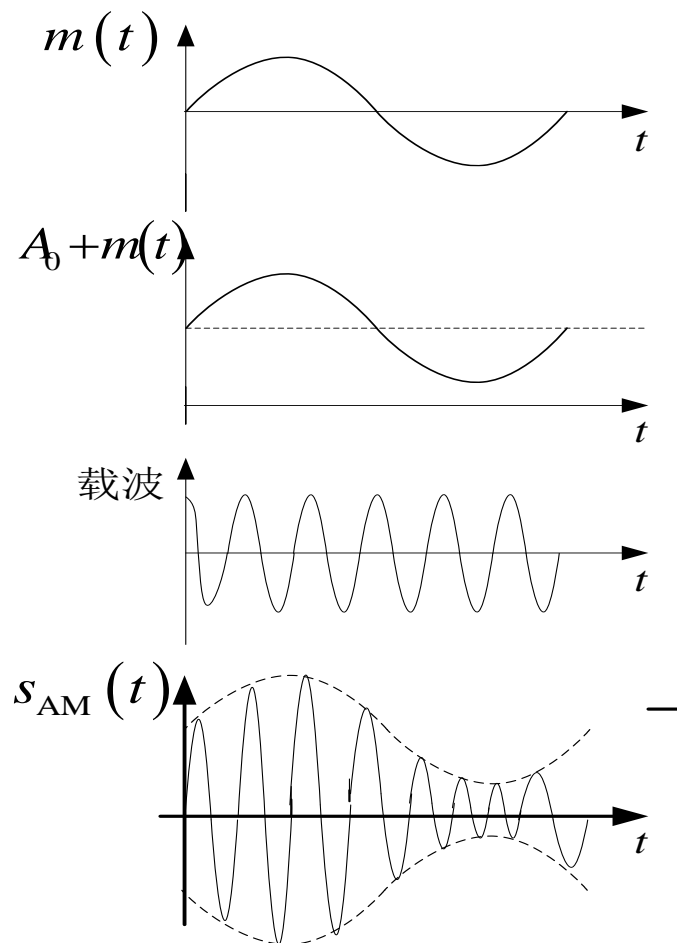
$m(t)$  — 调制信号； $A_0$  — 直流分量。

归一化的载波和输入信号

$$s(t) = [1 + n_a x(t)] \cos 2\pi f_c t$$

$x(t)$  = 归一化输入信号

$n_a$  = 输入信号与载波振幅比  
(调制系数  $n_a < 1$ )



# 调幅



归一化的载波和输入信号

$$s(t) = [1 + n_a x(t)] \cos 2\pi f_c t$$

双边带载波传输:

$$s(t) = [1 + n_a \cos 2\pi f_m t] \cos 2\pi f_c t$$

$$= \cos 2\pi f_c t$$

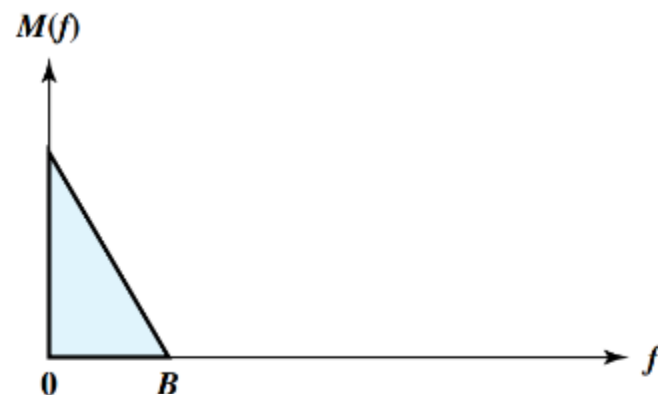
$$+ \frac{n_a}{2} \cos 2\pi(f_m - f_c)t$$

$$+ \frac{n_a}{2} \cos 2\pi(f_m + f_c)t$$

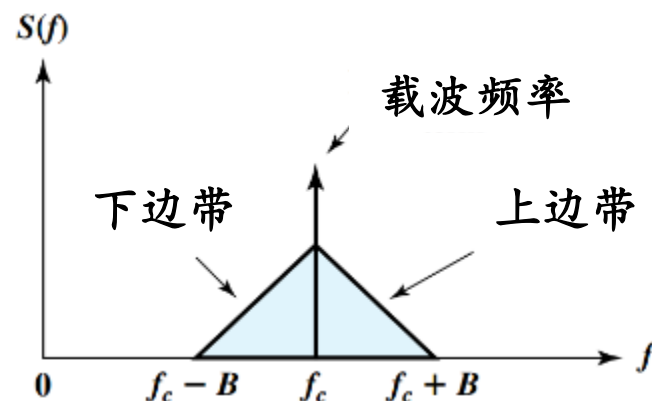
包含

(1) 载波频率

(2) 一对频率成分, 分别与载波 $f_c$ 偏移  $f_m$  Hz



输入信号的频谱



# DSB调制



- AM信号中，载波分量不携带信息，可以**将载波抑制，减少功率消耗**（抑制载波双边带调制DSB-SC，简称DSB）
- 时域表示式：**无直流分量** $A_0$

$$s_{DSB}(t) = m(t) \cos \omega_c t$$

- 频谱：**无载频分量**

$$S_{DSB}(\omega) = \frac{1}{2} [M(\omega + \omega_c) + M(\omega - \omega_c)]$$

# DSB调制



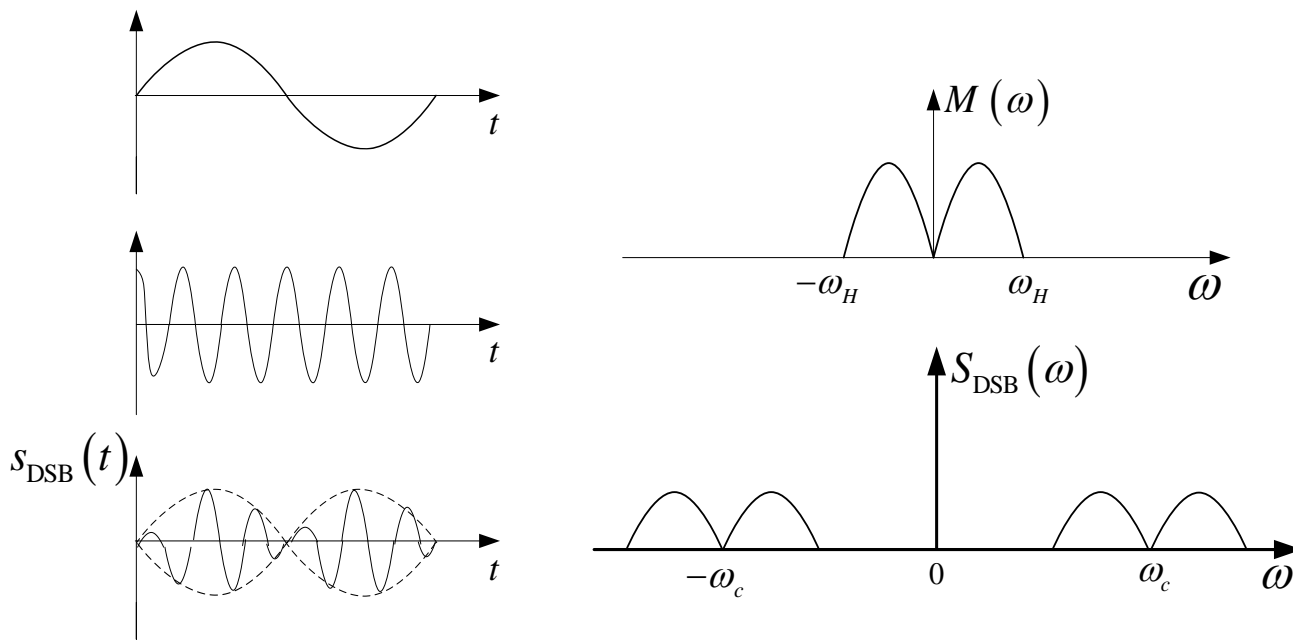
- 时域表示式：无直流分量 $A_0$

$$s_{DSB}(t) = m(t) \cos \omega_c t$$

- 频谱：无载频分量

$$S_{DSB}(\omega) = \frac{1}{2} [M(\omega + \omega_c) + M(\omega - \omega_c)]$$

- 曲线：



# DSB调制



- 时域表示式：无直流分量 $A_0$

$$s_{DSB}(t) = m(t) \cos \omega_c t$$

- 频谱：无载频分量

$$S_{DSB}(\omega) = \frac{1}{2} [M(\omega + \omega_c) + M(\omega - \omega_c)]$$

- 特点：

1. 调制效率 100%

2. 节省载波功率

3. 缺点：不能用包络检波，需要使用相干解调，较复杂  
无法从载波中提取同步信息

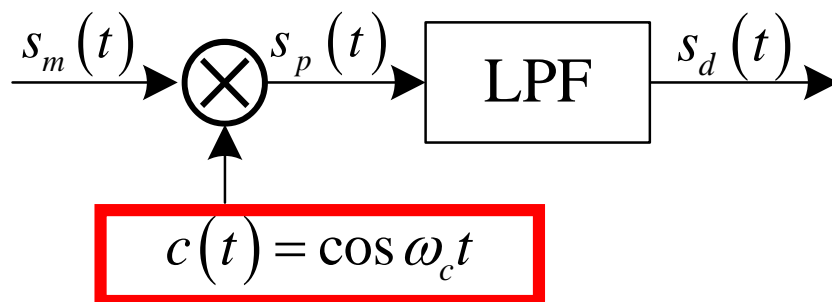
# DSB解调



- 时域表示式：无直流分量 $A_0$

$$s_{DSB}(t) = m(t) \cos \omega_c t$$

- DSB相干解调



$$s_p(t) = s_m(t) \cos \omega_c t$$

$$= \frac{1}{2} m(t) + \frac{1}{2} m(t) \cos 2\omega_c t$$

$$s_d(t) = \frac{1}{2} m(t) \propto m(t)$$



# SSB调制



- 单边带调制 (SSB)

- 原理:

双边带信号两个边带中的任意一个都包含了调制信号频谱 $M(\omega)$ 的所有频谱成分，因此仅传输其中一个边带即可。这样既节省发送功率，还可节省一半传输频带，这种方式称为单边带调制。

- 产生SSB信号的方法:

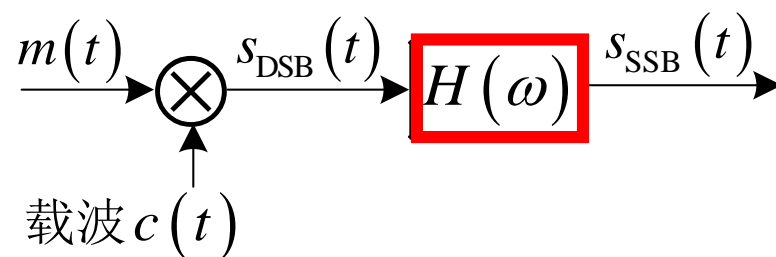
滤波法和相移法。

# SSB调制



- 滤波法及SSB信号的频域表示

— 滤波法的原理方框图 — 用边带滤波器，滤除不要的边带：



图中， $H(\omega)$ 为单边带滤波器的传输函数，若它具有如下理想高通特性，则可滤除下边带：

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

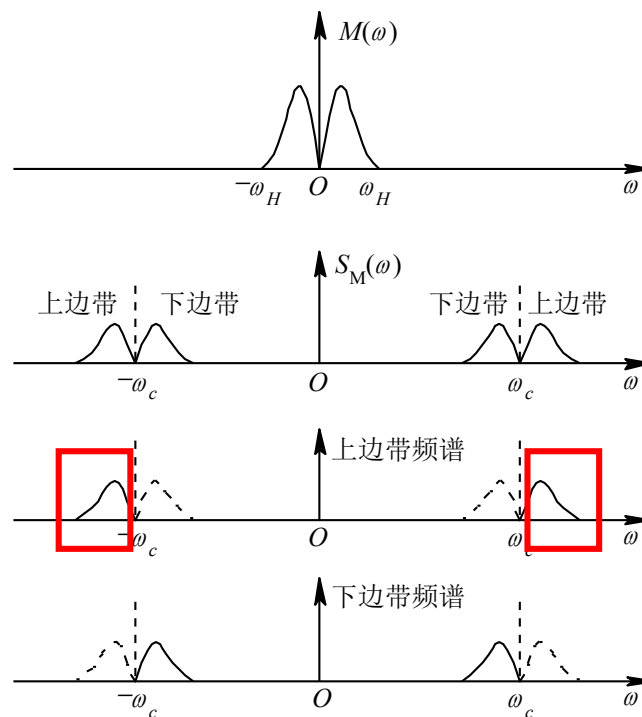
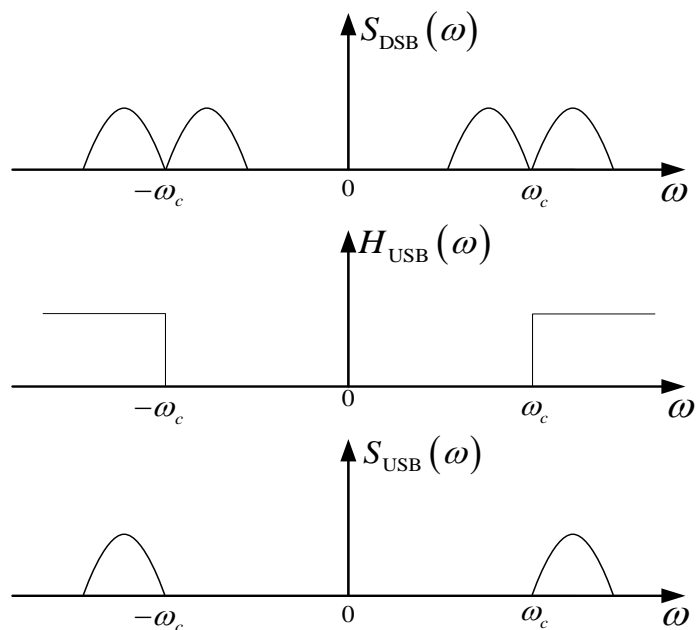
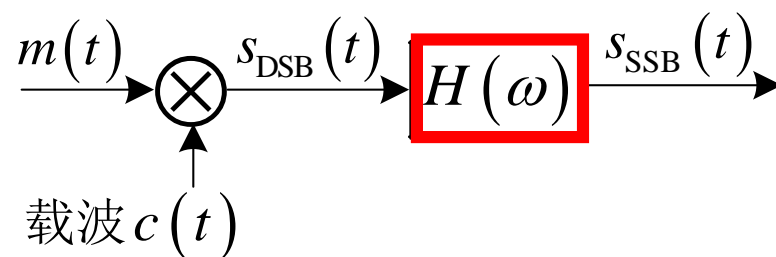
若具有如下理想低通特性：  $H(\omega) = H_{LSB}(\omega) = \begin{cases} 1, & |\omega| < \omega_c \\ 0, & |\omega| \geq \omega_c \end{cases}$   
则可滤除上边带。

# SSB调制



- 滤波法及SSB信号的频域表示

— 滤波法的原理方框图 — 用边带滤波器，滤除不要的边带：  
带:



# SSB调制



- SSB信号的解调

SSB信号的解调和DSB一样，不能采用简单的包络检波，因为SSB信号也是抑制载波的已调信号，它的包络不能直接反映调制信号的变化，所以仍需采用相干解调。

- SSB信号的性能

SSB信号的实现比AM、DSB要复杂，但SSB调制方式在传输信息时，不仅可节省发射功率，而且它所占用的频带宽度比AM、DSB减少了一半。它目前已成为短波通信中一种重要的调制方式。

# 角度调制



- 角度调制信号的一般表达式为：

$$s_m(t) = A \cos[\omega_c t + \varphi(t)]$$

式中， $A$  — 载波的恒定振幅

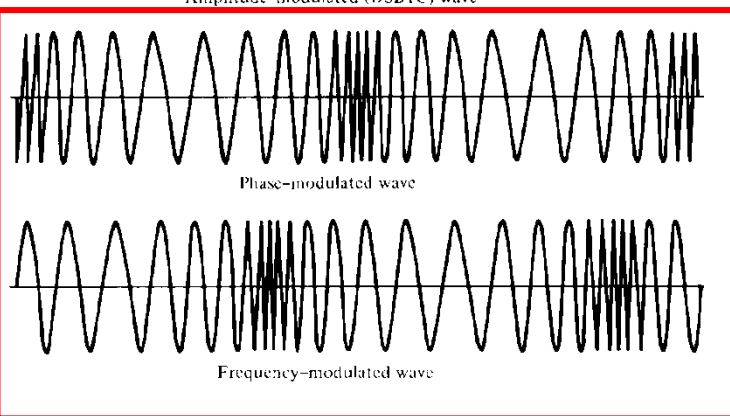
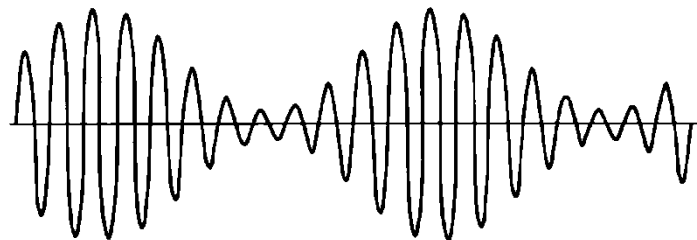
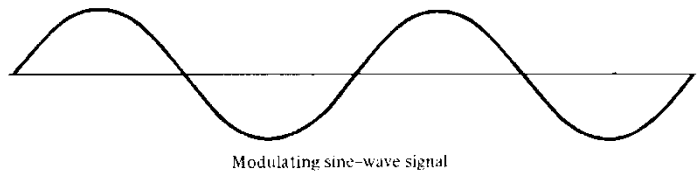
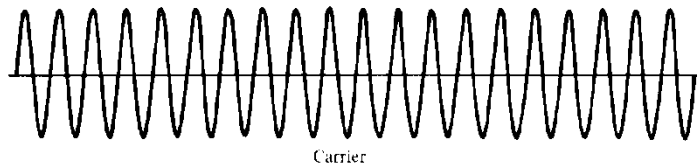
$[\omega_c t + \varphi(t)] = \theta(t)$  — 信号的瞬时相位

$\varphi(t)$  — 瞬时相位偏移

$d[\omega_c t + \varphi(t)]/dt = \omega(t)$  — 瞬时角频率

$d\varphi(t)/dt$  — 瞬时频率偏移

# 角度调制



- PM-调相

$$S(t) = A_c \cos[2\pi f_c t + \varphi(t)]$$

$$\varphi(t) = n_p m(t)$$

- FM-调频

$$S(t) = A_c \cos[2\pi f_c t + \varphi(t)]$$

$$\varphi'(t) = n_f m(t)$$

- 频率可以被定义为信号相位的变化速率

$$s_{PM}(t) = A \cos[\omega_c t + \underline{n_p m(t)}]$$

$$s_{FM}(t) = A \cos[\omega_c t + \underline{n_f \int m(\tau) d\tau}]$$

# 角度调制



- 调频FM与调相PM之间的关系

- 由于频率和相位之间存在微分与积分的关系，所以FM与PM之间是可以相互转换的。
- 比较下面两式

$$s_{PM}(t) = A \cos[\omega_c t + n_p m(t)]$$

$$s_{FM}(t) = A \cos[\omega_c t + n_f \int m(\tau) d\tau]$$

- 如果将调制信号先微分，而后进行调频，则得到的是调相波，这种方式叫间接调相；同样，如果将调制信号先积分，而后进行调相，则得到的是调频波，这种方式叫间接调频。

# 角度调制

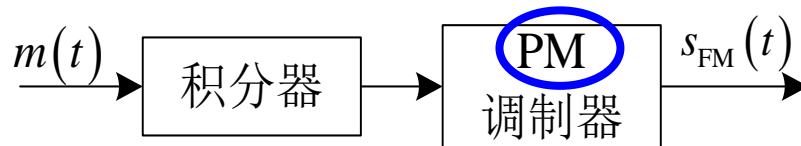


- FM与PM之间的关系

— 如果将调制信号先微分，而后进行调频，则得到的是调相波，这种方式叫间接调相；同样，如果将调制信号先积分，而后进行调相，则得到的是调频波，这种方式叫间接调频。



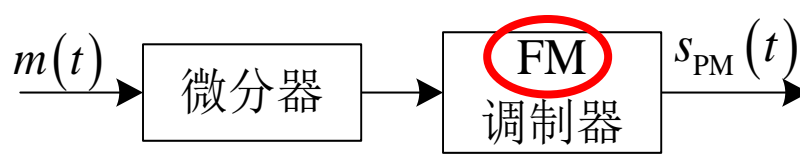
(a) 直接调频



(b) 间接调频



(c) 直接调相



(d) 间接调相



# 特点与应用



- **AM**: 优点是接收设备**简单**；缺点是功率利用率低，抗干扰能力差。主要用在中波和短波调幅广播。
- **DSB**调制：优点是**功率利用率高**，且带宽与AM相同，但设备较复杂。应用较少，一般用于点对点专用通信。
- **SSB**调制：优点是**功率利用率和频带利用率都较高**，抗干扰能力和抗选择性衰落能力均优于AM，而带宽只有AM的一半；缺点是发送和接收设备都复杂。SSB常用于频分多路复用系统中。
- **FM**: FM的**抗干扰能力强**，广泛应用于长距离高质量的通信系统中。缺点是频带利用率低，存在门限效应。

# 课程习题（作业）

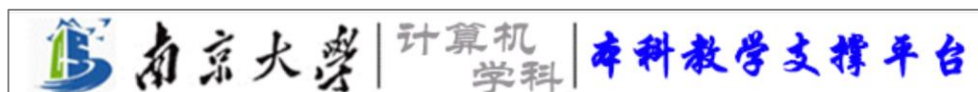


课本（截止日期：习题课前/4月21日晚23:55）：

5. 12； 5. 16； 5. 17； 5. 21； 5. 23 (a) (b) (c)； 5. 25

提交方式：<http://cslabcms.nju.edu.cn>（本科教学支撑平台）

▼ 第 6 周 04月05日-04月11日	
主题	
数据通信作业-第5章(2)	



提交截止时间	2021年04月21日 星期三 23:55
--------	-----------------------

- 命名：学号+姓名+第\*章。
- 若提交遇到问题请及时发邮件或在下一次上课时反馈。

# 课程习题（作业）



5.11 假设有一个比特序列为01100，请将此数据分别用振幅键控（ASK）、二进制频移键控（BFSK）和二进制相移键控（BPSK）编码。

5.12 一个正弦波用于两种不同的信号传输机制：(a) PSK；(b) QPSK。信号元素的持续时间为  $10^{-5}$  s。如果接收到信号形式如下：

$$s(t) = 0.0025 \sin(2\pi 10^6 t + \theta) \text{ V}$$

并且假设在接收器处测得噪声功率为  $2.5 \times 10^{-8}$  W，分别计算这两种情况下的  $E_b/N_0$  (dB)。

# 课程习题（作业）



- 5.16 分别计算在ASK和FSK情况下的带宽。假设FSK使用的两个频率分别为500 Hz和1500 Hz。有效的假设电话线路信道经过均衡后允许带通数据在600 ~ 3000 Hz的频率范围内传输。有效的带宽为2400 Hz。当 $r = 1$ 时，分别计算数据率为2400 bps的QPSK和数据率为4800 bps的8相位的多值信号所要求的带宽大小。电话线信道能否满足它们的要求？
- 5.17 图5.25所示的QAM解调器对应于图5.14中的QAM调制器。说明这种设置确实能够恢复信号 $d_1(t)$ 和 $d_2(t)$ ，这两个信号结合后可以恢复原始的输入信号。

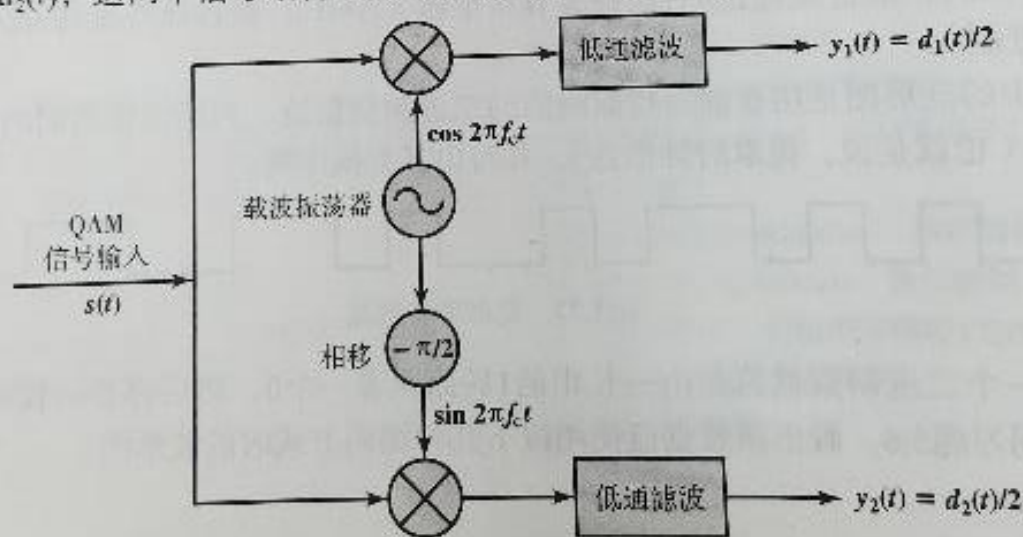


图5.25 QAM解调器

# 课程习题（作业）



5.21 考虑这样一个声音信号，它的频谱成分在300 ~ 3000 Hz之间。假设使用每秒7000个样本的采样速率来生成PCM信号。

- 当 $\text{SNR} = 30 \text{ dB}$ 时，需要多少个单位量化值？
- 所要求的数据率是多少？

5.23 一个PCM编码器接收到的信号具有10 V的满标（full-scale）电压，并且使用均匀量化生成8比特编码。最大归一量化电压为 $1-2^{-8}$ 。试求：a. 归一步长值；b. 实际步长值（V）；c. 实际最大量化电平（V）；d. 归一化的分辨率；e. 实际分辨率；f. 信噪比分辨率。

5.24 假设对图5.26所示的模拟波形进行增量调制，调制时的采样周期及步长值在图中以网格表示。并且图中还显示了第一个DM输出以及在这个周期中的阶梯函数。请画出其余的阶梯函数和DM输出，并指出存在斜率过载现象的区域。



# 课程习题（作业）



5.25 脉位调制（PPM）是一种通过数字输入值来确定窄脉冲的时钟相对位置的编码方案。此方法多应用于光通信系统，如光纤、红外局域网和红外遥控。这些系统对效率的要求很高，但很少或不存在外部干扰。传输采用的是强度调制机制，即信号存在则对应于二进制1，信号不存在则对应于二进制0。

a. IEEE 802.11的1 Mbps红外标准使用了16-PPM机制。其中每4个数据位视为一组，被映射成一个16-PPM符号，每个符号是一个16比特的二进制串。这个16比特二进制串由15个0和一个1组成，因此根据二进制1在串中的位置就能对0 ~ 15之间的某个值进行编码。

a1. 此传输的周期（比特与比特之间的时间）是多少？

对于相应的红外脉冲传输：

a2. 脉冲（1值）与脉冲之间的平均时间间隔是多少？相应的脉冲传输平均速率是多少？

a3. 相邻脉冲之间的最小时间间隔是多少？

a4. 脉冲与脉冲之间的最大时间间隔是多少？

b. 对2 Mbps红外标准使用的4-PPM机制重复a题。在这种机制中，每两个数据位被视为一组，映射成一个4比特的序列。

# 总结



## 问题？

殷亚凤

[yafeng@nju.edu.cn](mailto:yafeng@nju.edu.cn)

<http://cs.nju.edu.cn/yafeng/>

Room 901, Building of CS

