



第十七讲 从傅里叶变换的相乘性质到信号的调制

杜清河
西安交通大学
信息与通信工程学院
2025

本讲覆盖章节



❖ 8.0-8.6

内容提要



❖ 引言

❖ 复指数与正弦幅度调制

❖ 用脉冲串作载波的幅度调制

❖ 脉冲幅度调制

❖ 离散

调制的概念



- 将某一个载有信息的信号嵌入另一个信号的过程称为**调制**；而将这个载有信息的信号提取出来的过程称为**解调**
- 更具体一点，调制是指用一个信号去控制另一个信号的某个参量的过程
- A 调制 B：
 - A 表示**载有信息的信号**，称为**调制信号**；
 - B 表示**载体**，通常称为**载波**

调制的意义

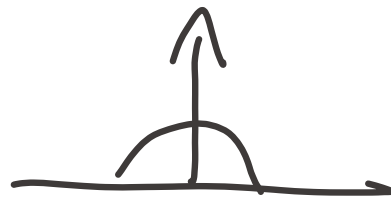


- 使信号特性与信道特性相匹配
- 能将频谱重叠的信号通过复用在同一信道中同时传输
- 无线通信中天线尺寸的限制
- 有线通信中使用较高的频率可以减少信号泄漏

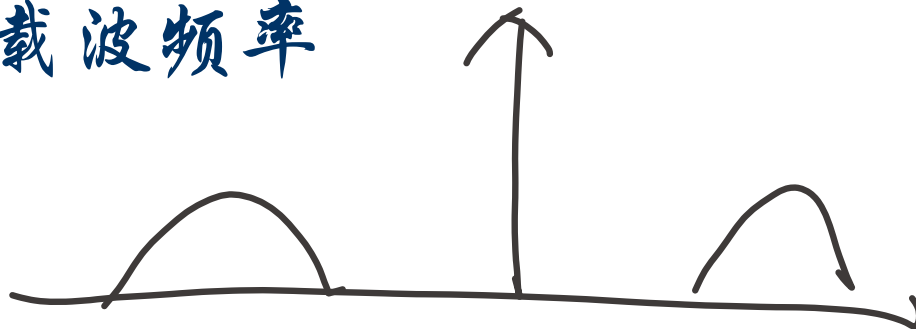
基带信号与通带信号



❖ 基带信号：信源产生的消息信号，能量集中在零频附近



➤ 通带信号：经载波调制之后的信号。通常，带宽远小于载波频率



调制的分类



❖ 正弦调制

- 幅度调制 (AM)*
 - 双边带 (DSB)*
 - 单边带 (SSB)*
 - 残留边带 (VSB)
- 频率调制 (FM)
- 相位调制 (PM)

❖ 脉冲幅度调制 – PAM*

注：带*的为本文所讲内容。

内容提要



❖ 引言

❖ 复指数与正弦幅度调制

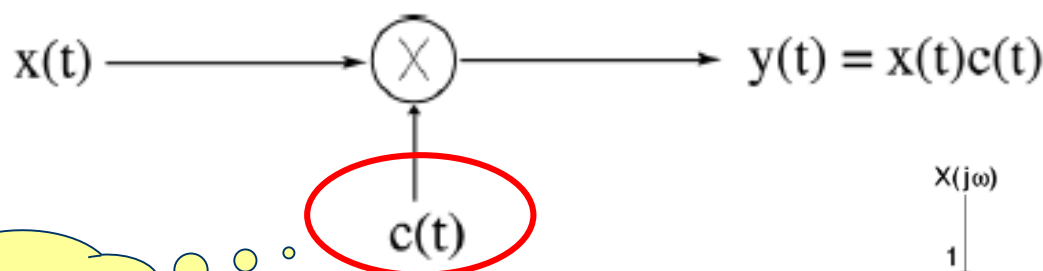
❖ 用脉冲串作载波的幅度调制

❖ 脉冲幅度调制

复指数载波的幅度调制

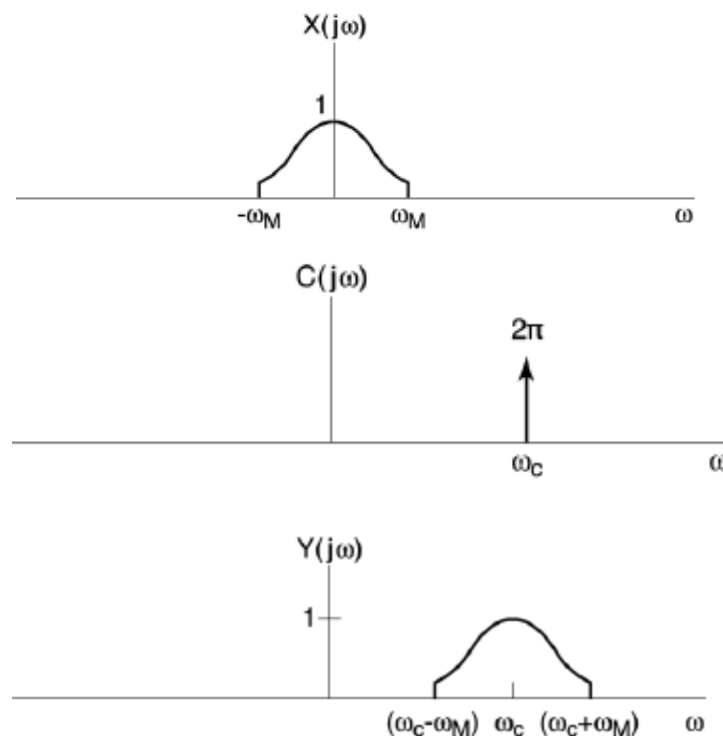


➤ 幅度调制模型 (Amplitude Modulation, AM)



$$c(t) = e^{j\omega_c t}$$

正弦

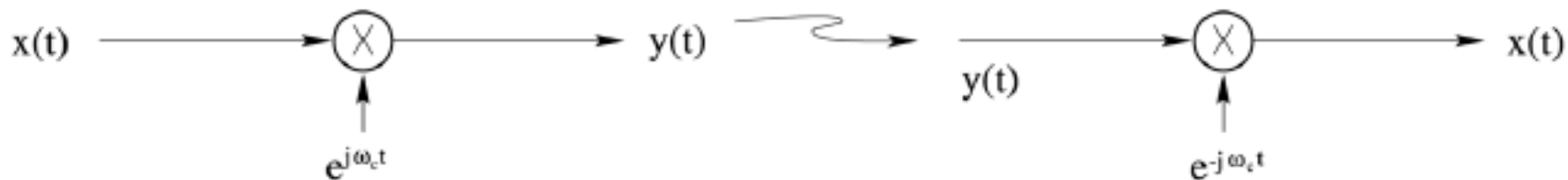
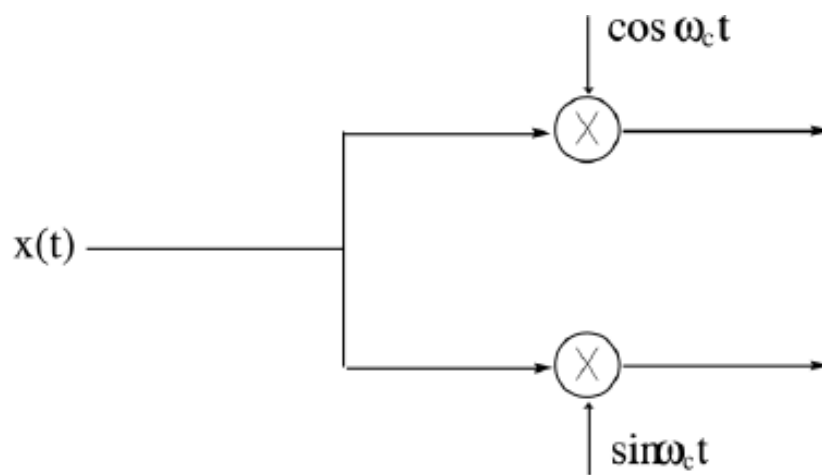


$$\begin{aligned} Y(j\omega) &= \frac{1}{2\pi} X(j\omega) * C(j\omega) \\ &= \frac{1}{2\pi} X(j\omega) * 2\pi\delta(\omega - \omega_c) \\ &= X(j(\omega - \omega_c)) \end{aligned}$$

复指数载波的幅度调制

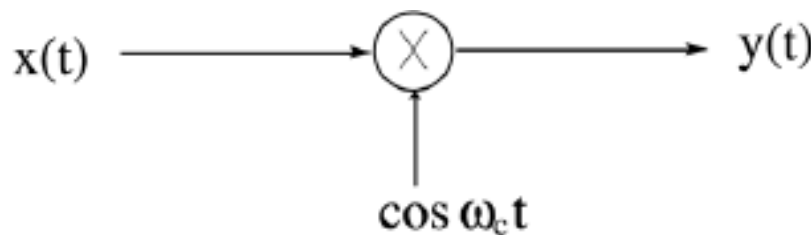


➤ 复指数载波幅度调制的实现及解调



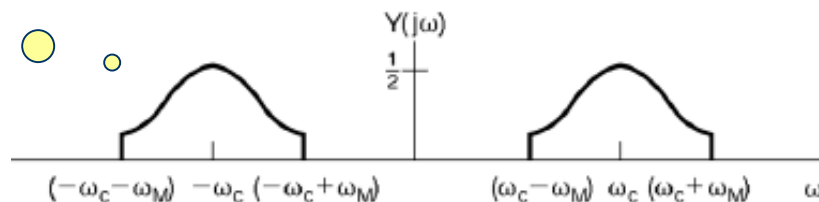
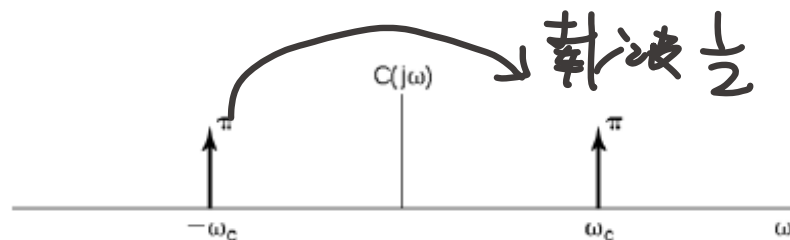
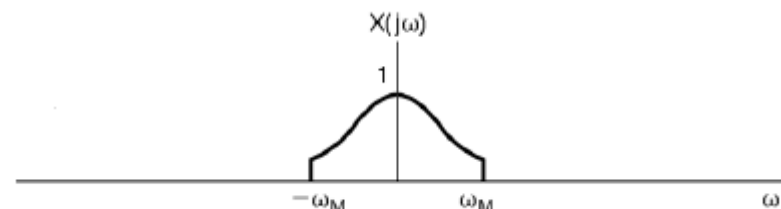


正弦载波的幅度调制

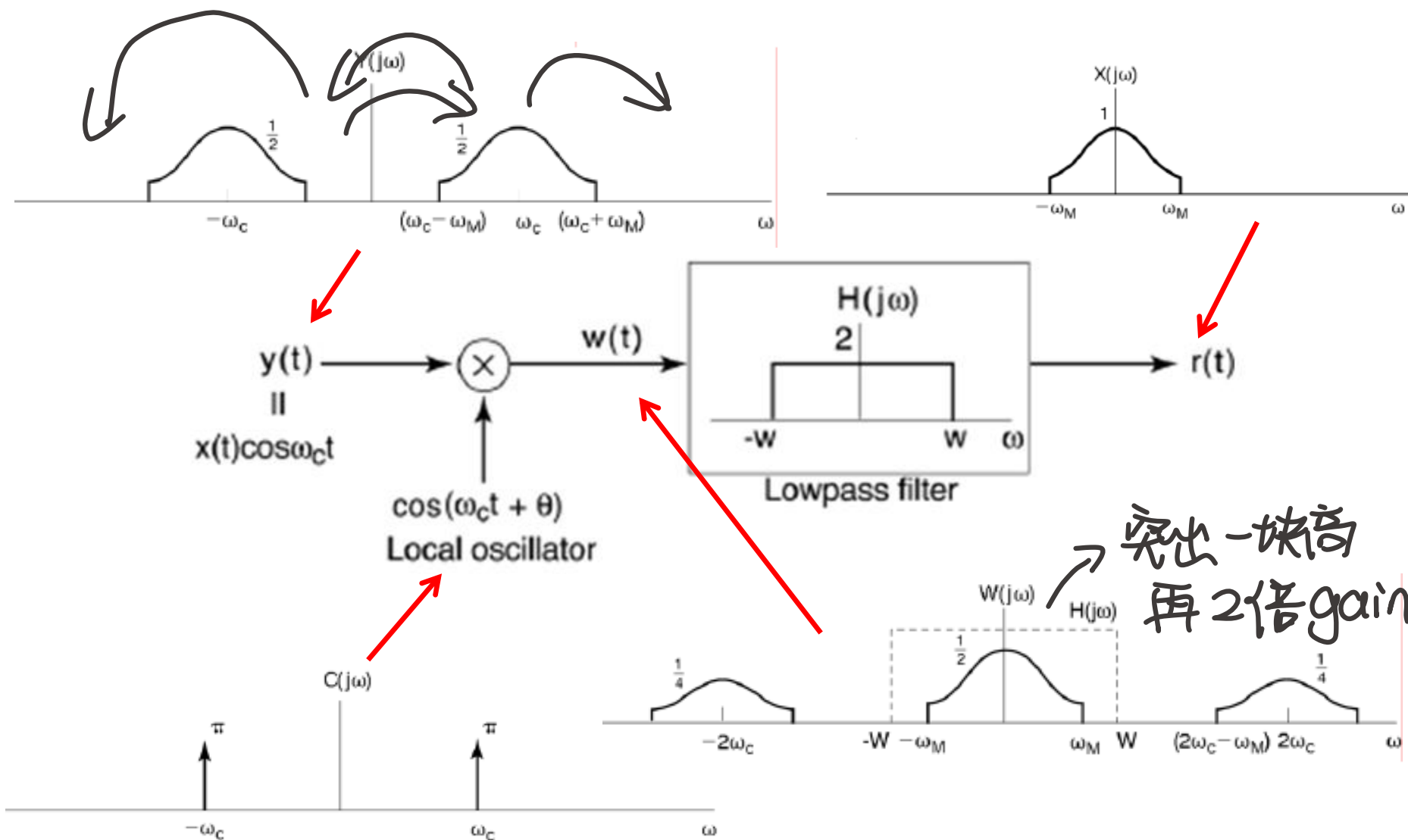


$$\begin{aligned} Y(j\omega) &= \frac{1}{2\pi} X(j\omega) * \pi \{ \delta(\omega - \omega_c) + \delta(\omega + \omega_c) \} \\ &= \frac{1}{2} X(j(\omega - \omega_c)) + \frac{1}{2} X(j(\omega + \omega_c)) \end{aligned}$$

不发生频谱混叠
的条件: $\omega_c > \omega_M$



正弦AM的同步解调



正弦AM的同步解调



高频分量

➤ 同步解调过程的数学描述

1) $\theta = 0$:

$$w(t) = y(t) \cos \omega_c t = x(t) \cos^2 \omega_c t = \frac{1}{2}x(t) + \frac{1}{2}x(t) \cos 2\omega_c t$$



$$r(t) = x(t)$$

2) $\theta \neq 0$:

$$\begin{aligned} w(t) &= y(t) \cos(\omega_c t + \theta) = x(t) \cos \omega_c t \cos(\omega_c t + \theta) \\ &= \frac{1}{2}x(t) \cos \theta + \frac{1}{2}x(t) (\cos(2\omega_c t + \theta)) \end{aligned}$$



$$r(t) = x(t) \cos \theta$$



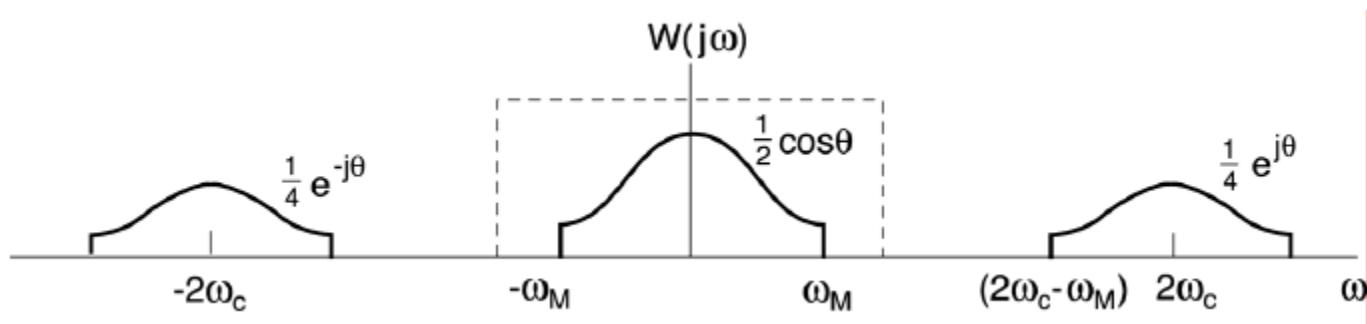
正弦AM的同步解调

➤ 同步解调过程的频域分析

$$\cos(\omega_c t + \theta) = \frac{1}{2}e^{j\theta}e^{j\omega_c t} + \frac{1}{2}e^{-j\theta}e^{-j\omega_c t}$$

其傅里叶变换为：

$$\pi e^{j\theta} \delta(\omega - \omega_c) + \pi e^{-j\theta} \delta(\omega + \omega_c)$$



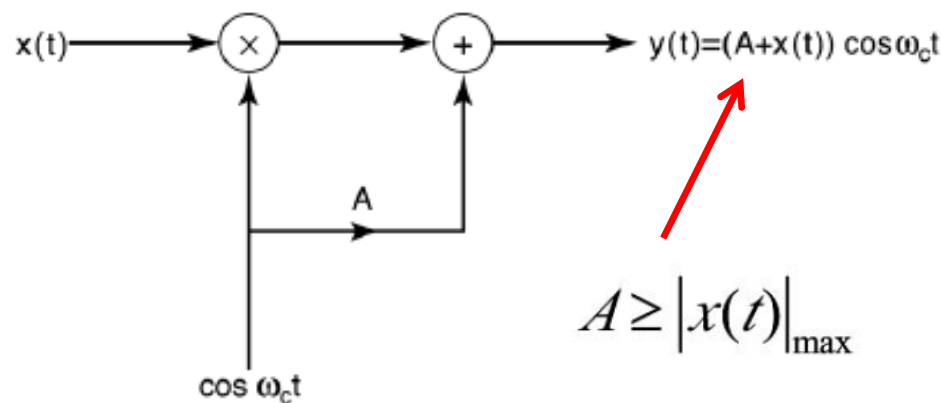
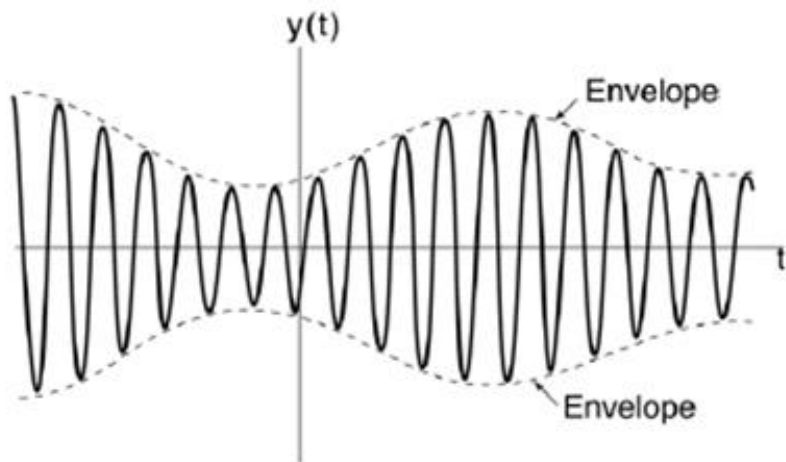
正弦AM的非同步解调



➤ 非同步解调的目的

为了克服同步解调要求收发端载波频率和相位同步所带来的接收机实现上的困难

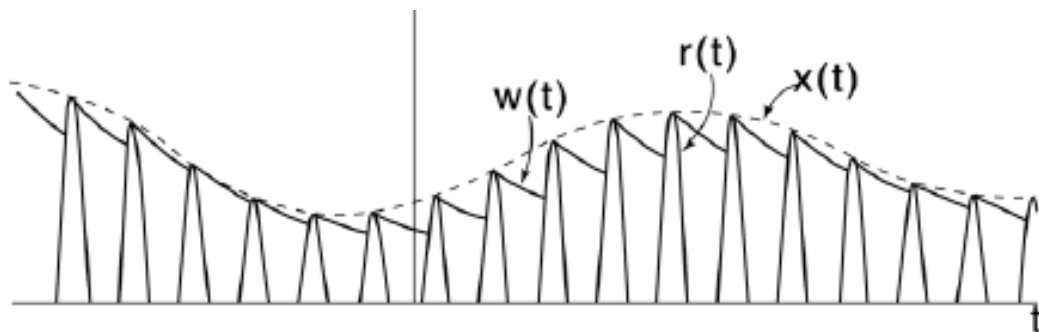
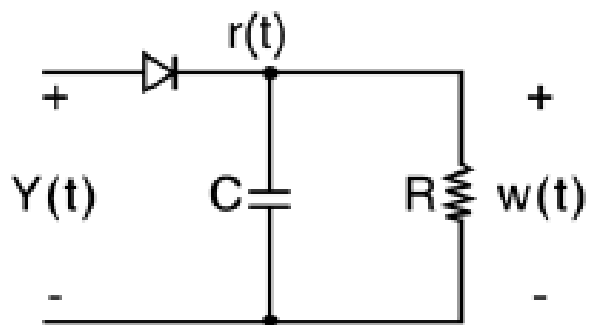
➤ 非同步解调的方法



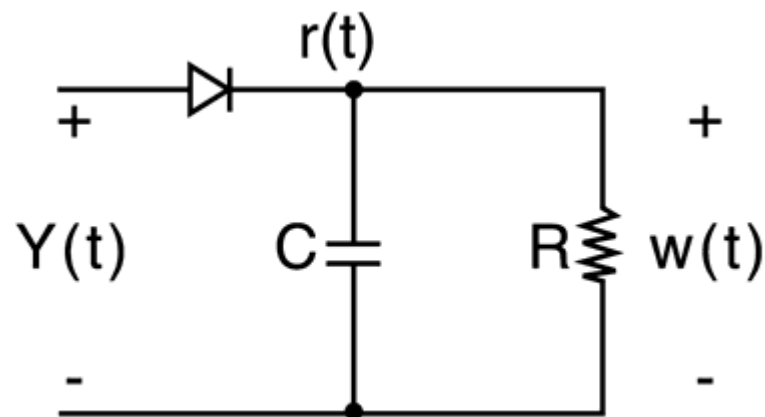
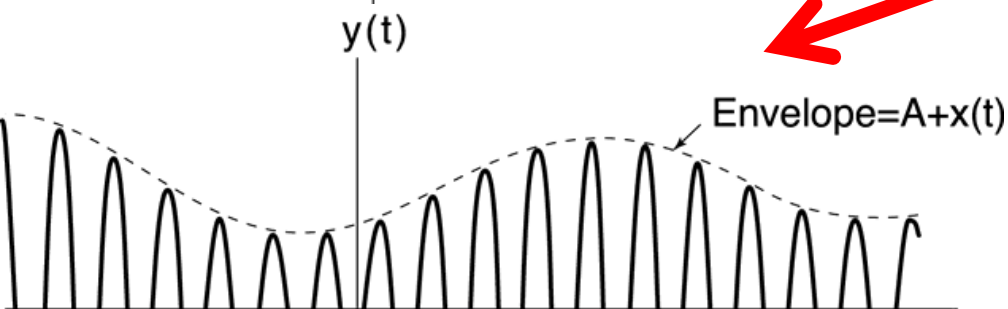
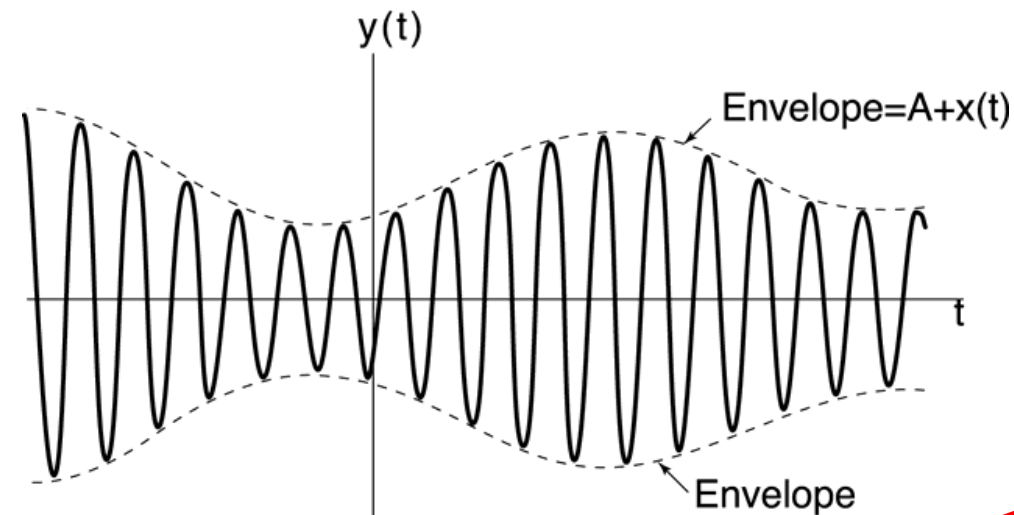
正弦AM的非同步解调



➤ 非同步解调的实现电路：包络检波器

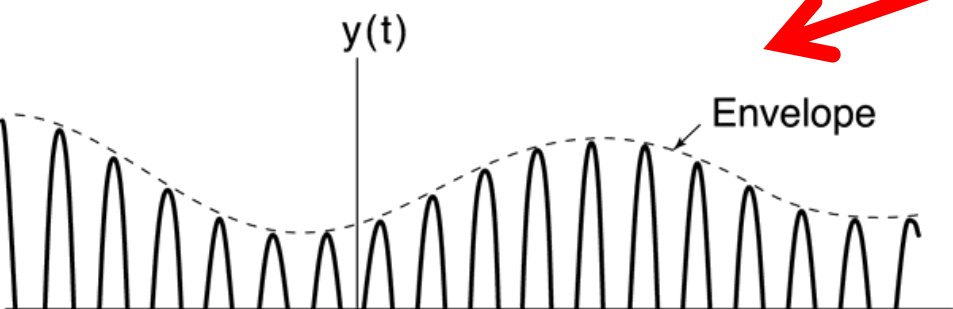
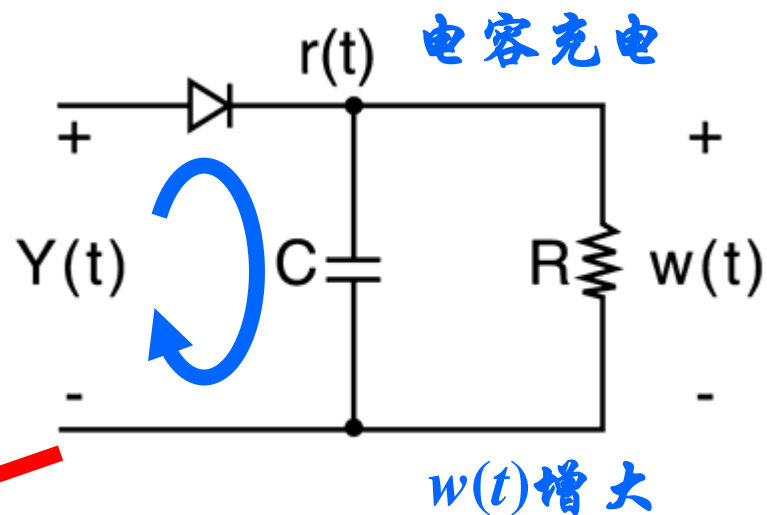


正弦AM的非同步解调



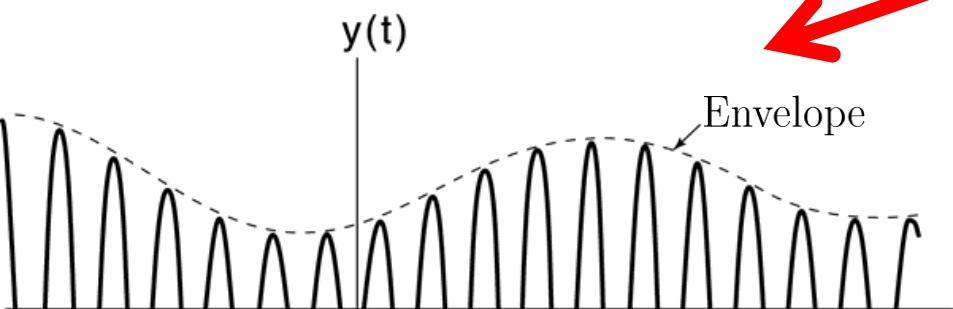
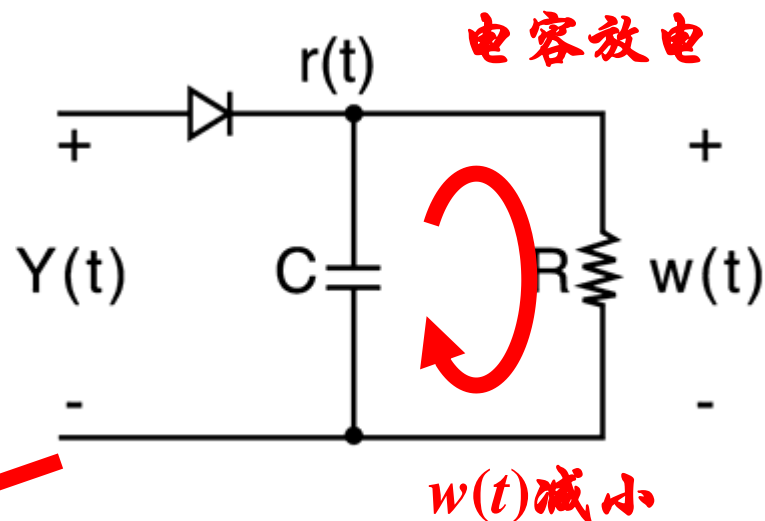
单向导通

正弦AM的非同步解调



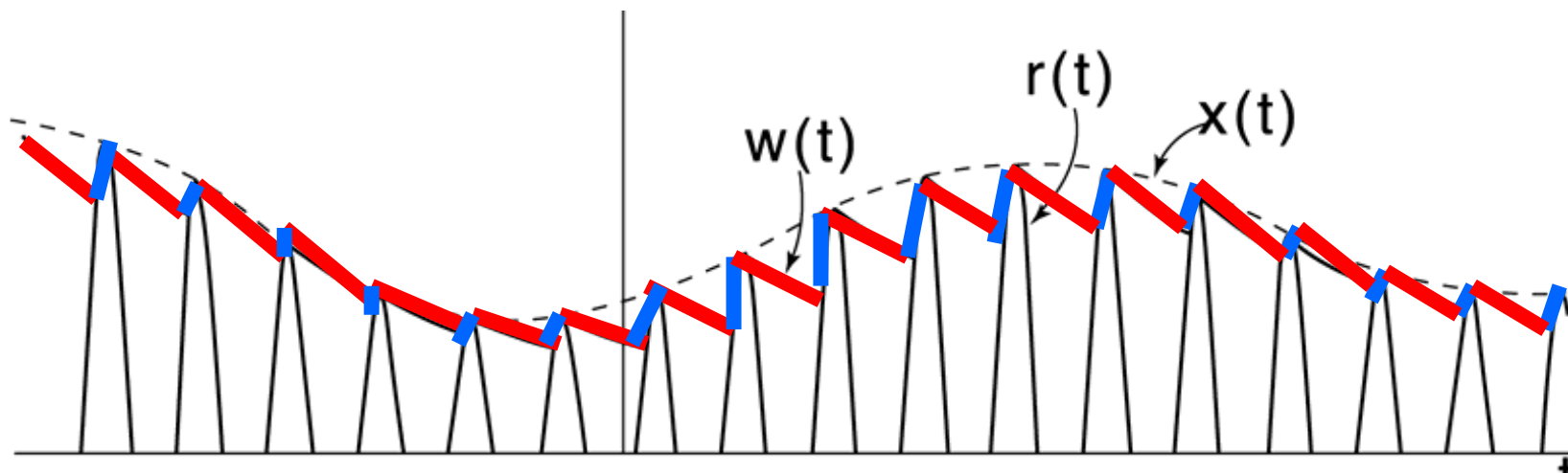
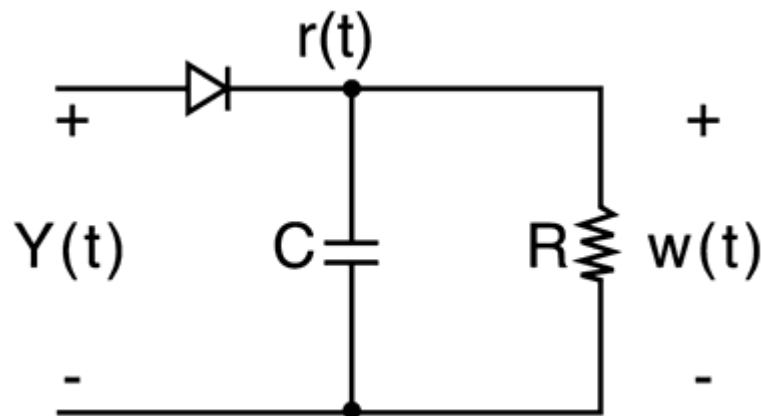
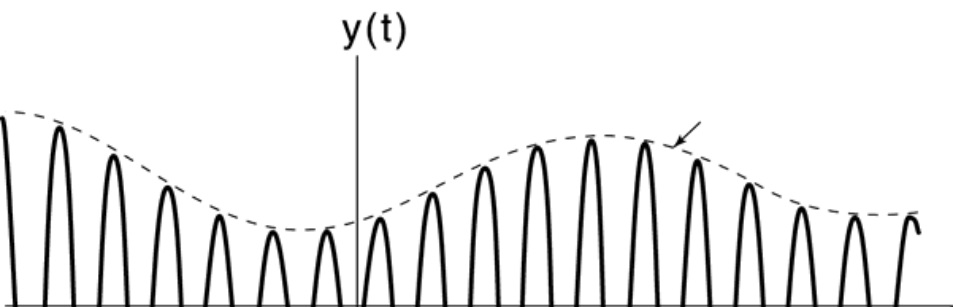
$y(t) > 0$:
二极管导通

正弦AM的非同步解调



$y(t) \leq 0$:
二极管不导通

正弦AM的非同步解调

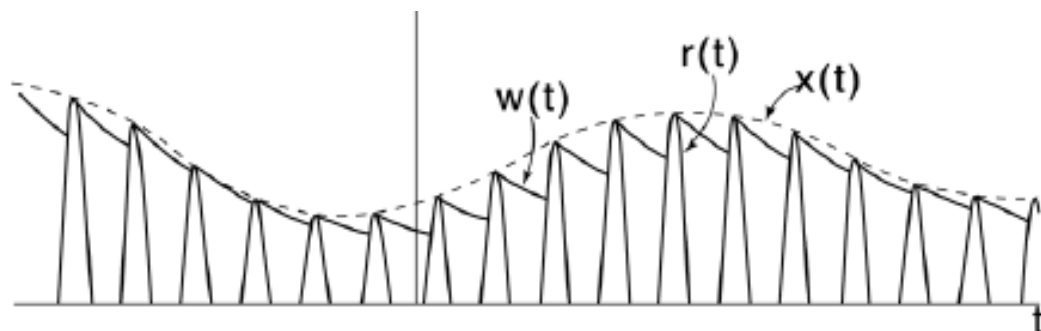
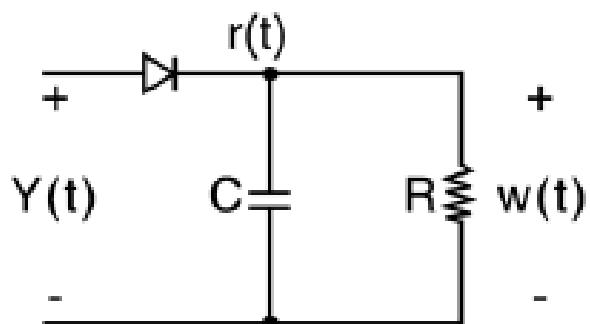


振荡频率非常高，电容来不及充分放电，因而可以保留包络信息

正弦AM的非同步解调



➤ 非同步解调的实现电路：包络检波器



➤ 非同步解调的优缺点

优点：成本低廉，易于实现

缺点：额外的功率消耗导致功率效率低

正弦AM的非同步解调



➤ 调制指数

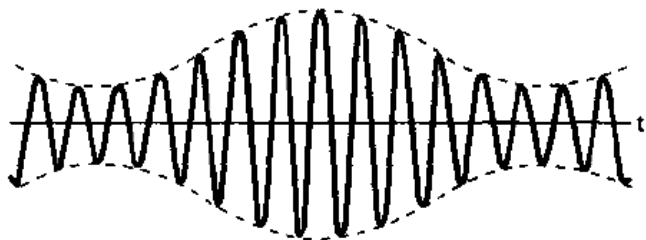
$$y(t) = [A + x(t)] \cos \omega_c t$$

设 $x(t)$ 的最大幅值为 K ，即 $K = |x(t)|_{\max}$ ，则调制指数定义为：

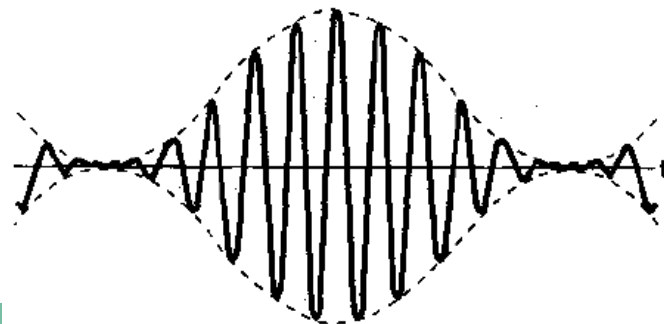
$$m = K / A$$

m 越大，功率的利用效率越高； m 越小，跟踪包络线以提取 $x(t)$ 就越容易。

$m=0.5$



$m=1$



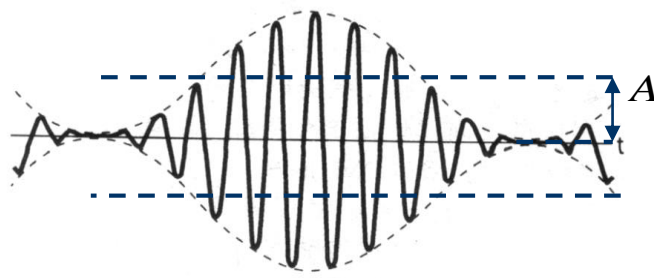
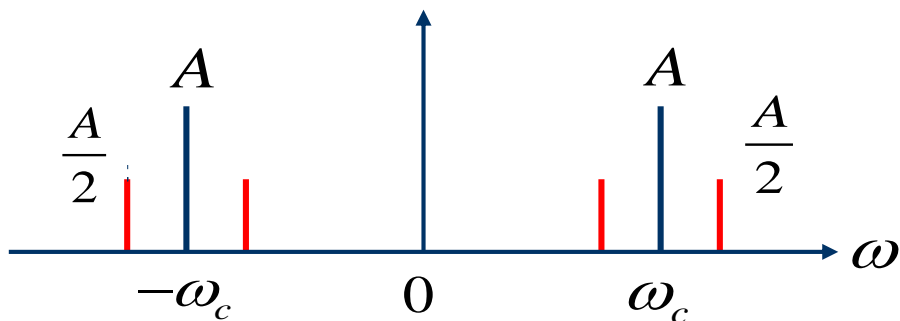


正弦AM的非同步解调

- 包络解调付出的代价是发送功率的浪费。因为加入的载波并不携带任何有用信息，这部分功率的发射对有用信息的传输是无益的。

$$y(t) = [A + x(t)] \cos \omega_c t$$

- 当调制信号是单音正弦时，在 $m=1$ 的情况下，已调信号的频谱如下：

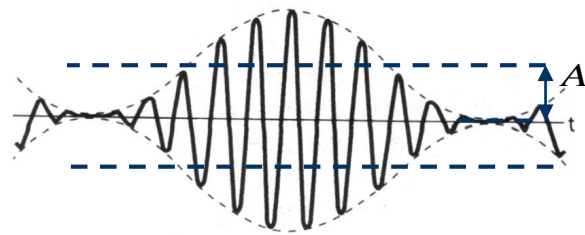
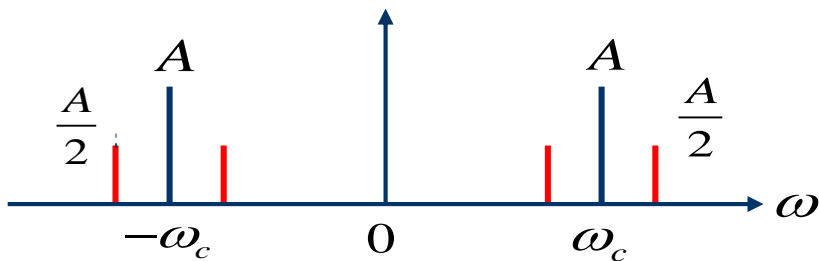




正弦AM的非同步解调

- 当调制信号是单音正弦时，在 $m=1$ 的情况下，已调信号及其频谱为：

$$y(t) = [A + A \cos \omega_s t] \cos \omega_c t$$



- 此时，已调信号的平均功率是载波功率的1.5倍，而这些功率中真正用于传输有用信息的边带功率是载波功率的1/2，占整个已调信号总功率的1/3。

同步解调与非同步解调



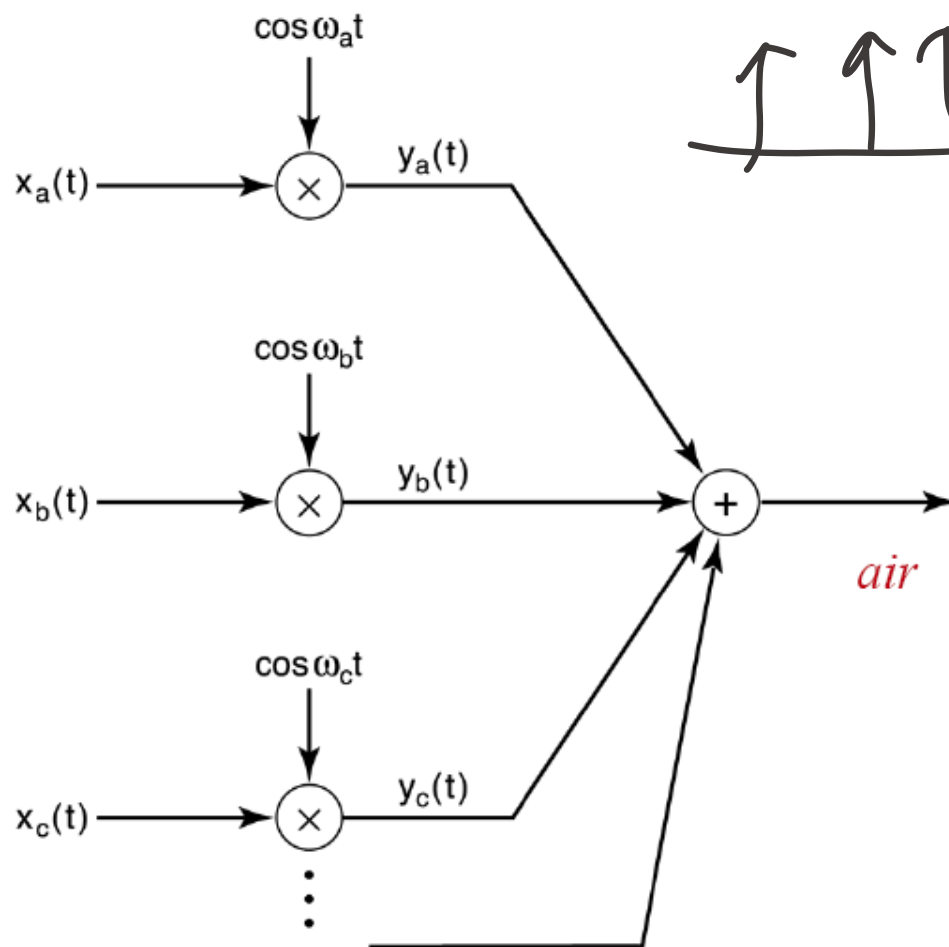
- 同步和非同步调制/解调系统各有优缺点：
同步系统需要有一个高档的解调器，而非同步系统的调制器比同步系统的调制器要求有更大的输出功率
- 两类技术的应用场景不同，例如：广播通信系统中采用非同步解调，而卫星通信系统中采用的就是同步解调

频分多路复用

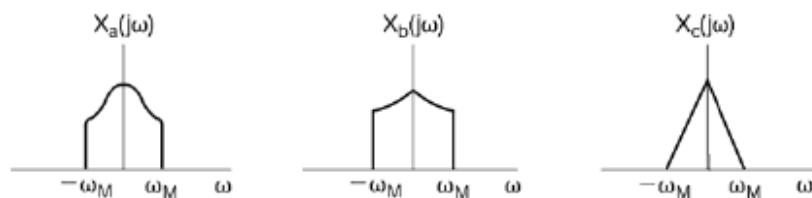


- 在通信系统中，传输媒质的带宽或容量往往会超过传输单一信号的需求
- 为了更有效地利用系统资源，希望在同一信道上同时传输多路信号，这就是**多路复用技术**
- 利用正弦幅度调制把不同信号的频谱在频率域搬移，使得这些已调信号的频谱不再重叠，那么就能在同一个宽带信道上同时传输这些信号。这也就是所谓的**频分多路复用(FDM)**的概念

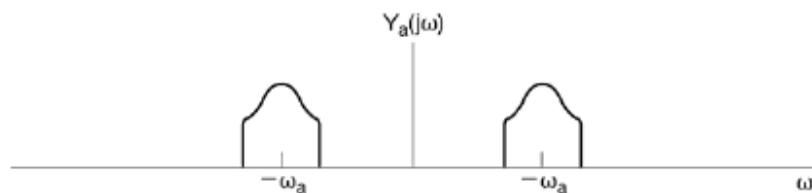
频分多路复用的实现



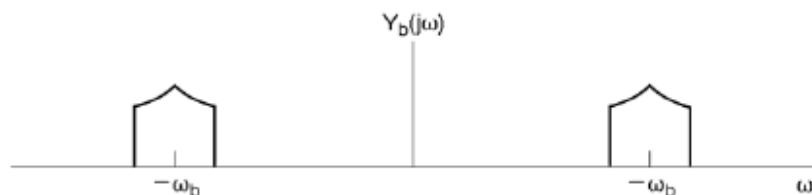
频分多路复用的实现



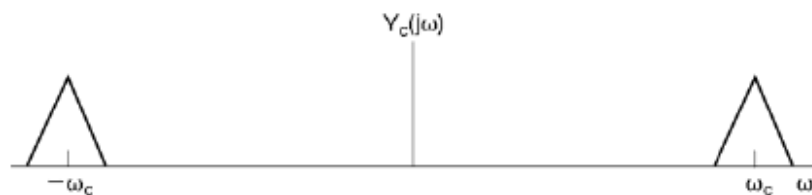
“Baseband”
signals



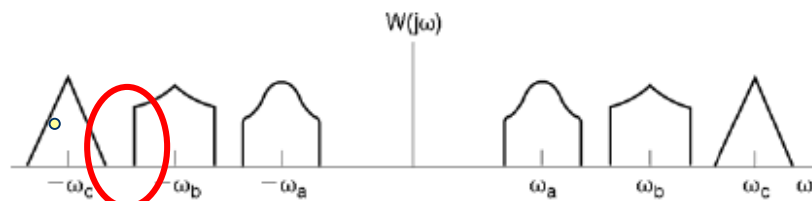
Channel a



Channel b



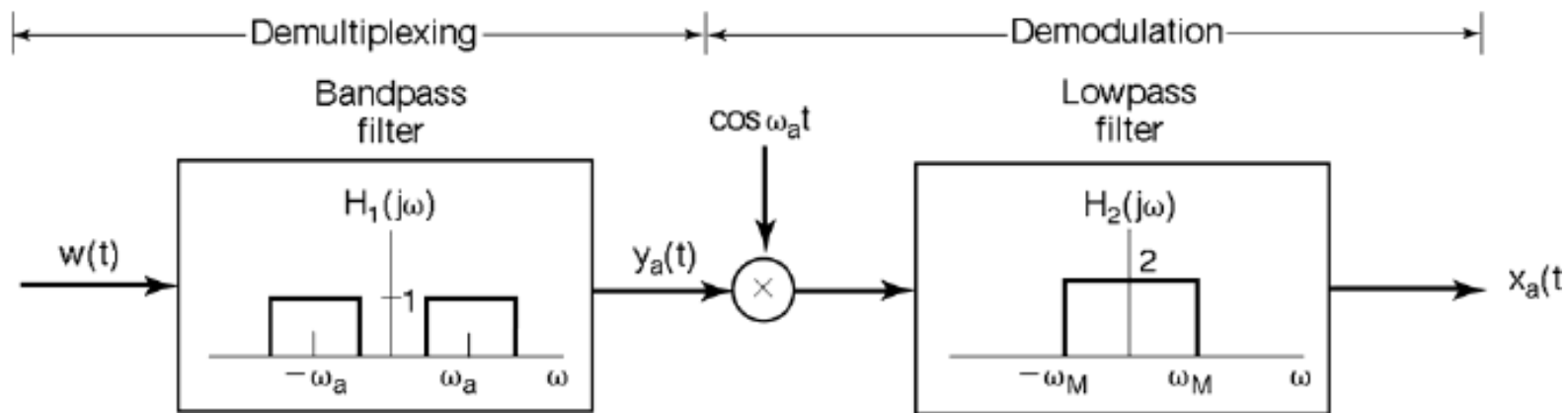
Channel c



Multiplexed
signals

保护频带

解复用与解调



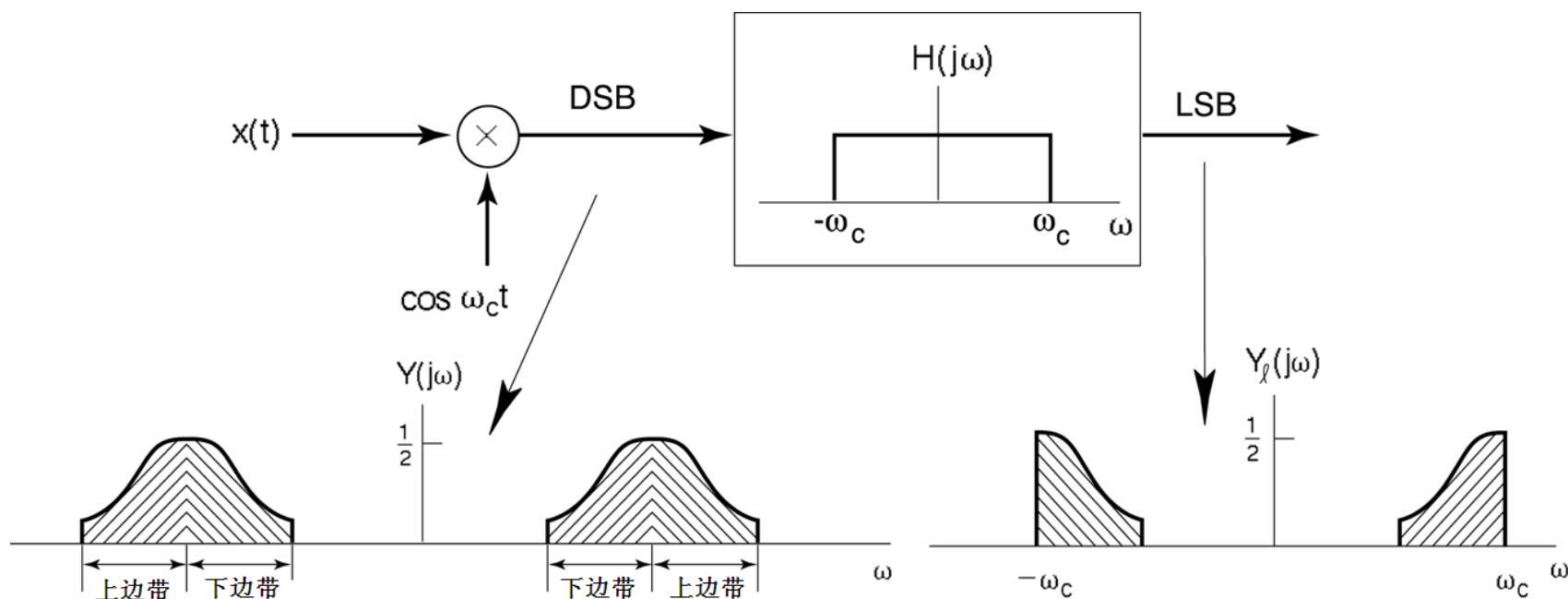
单边带正弦幅度调制(SSB)



Single-Sideband Sinusoidal Amplitude Modulation

➤ SSB信号的产生:

1. 滤波法: 利用边带滤波器, 滤除一个边带。



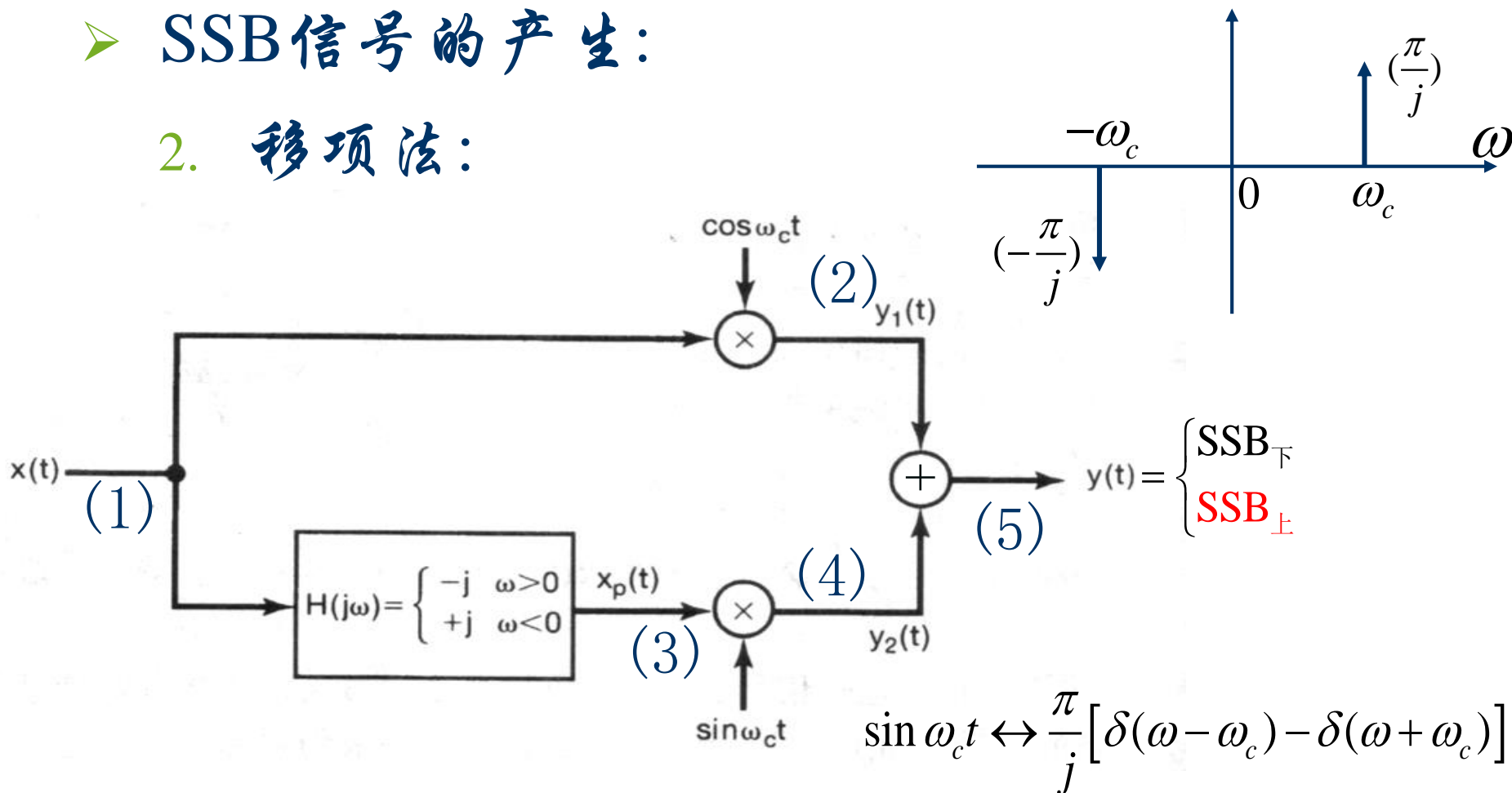
单边带正弦幅度调制(SSB)



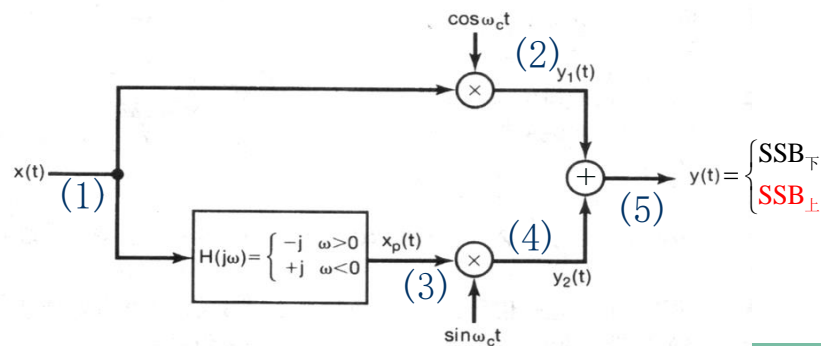
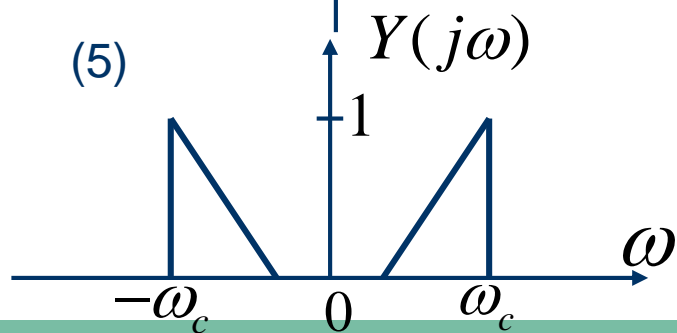
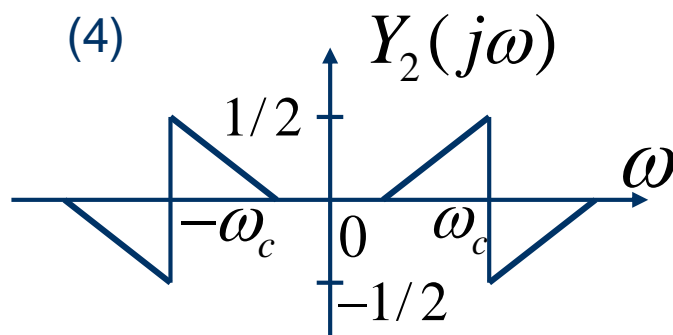
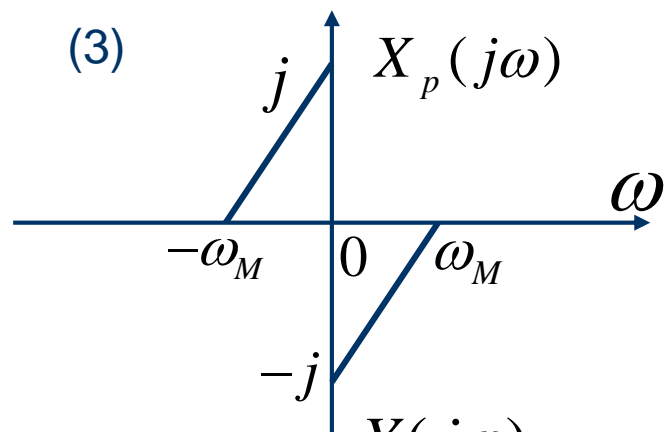
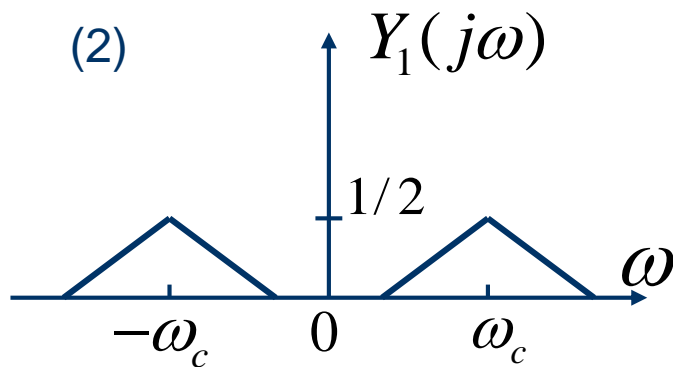
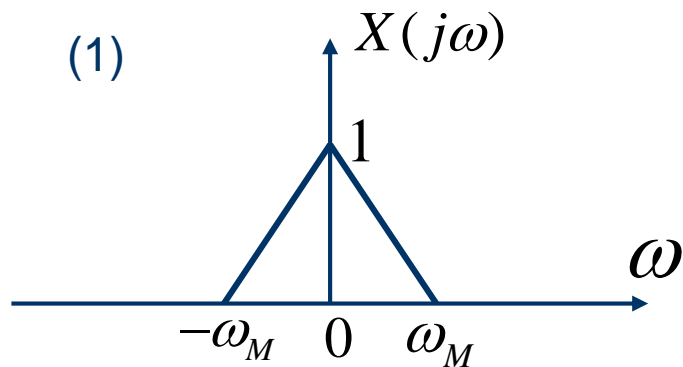
Single-Sideband Sinusoidal Amplitude Modulation

➤ SSB信号的产生:

2. 移项法:



单边带正弦幅度调制 (SSB)



内容提要



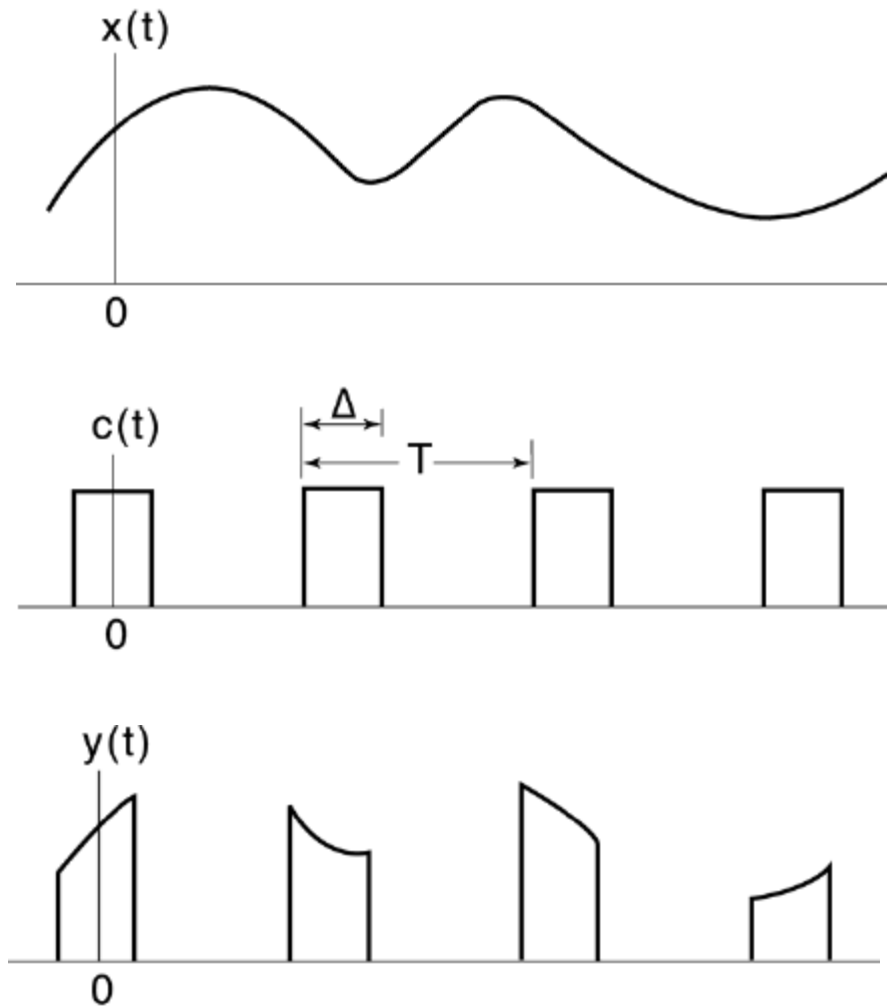
❖ 引言

❖ 复指数与正弦幅度调制

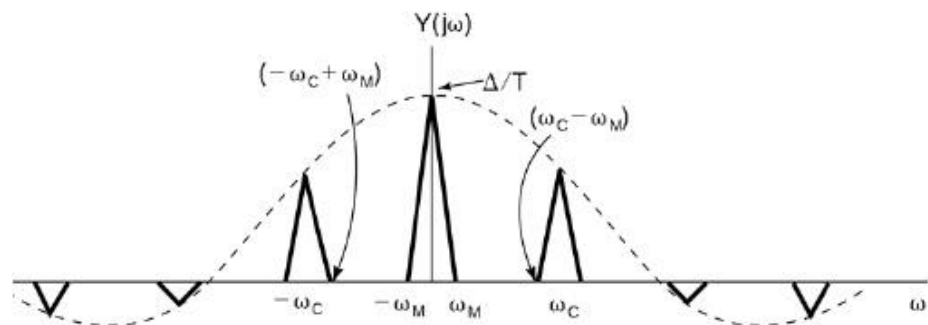
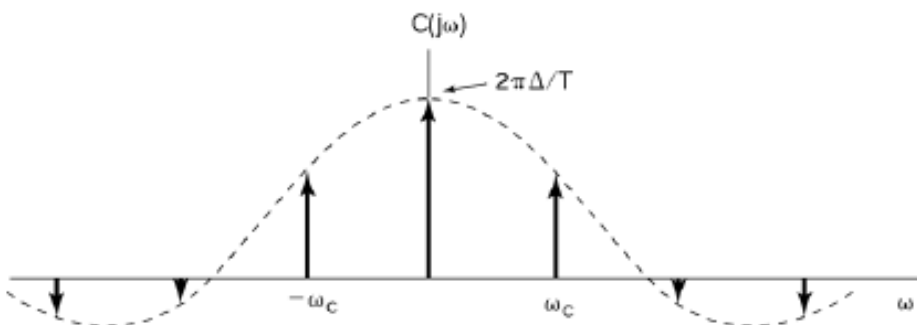
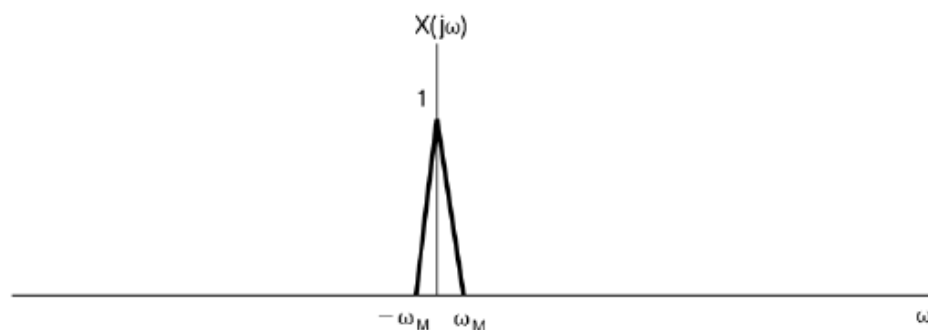
❖ 用脉冲串作载波的幅度调制

❖ 脉冲幅度调制

脉冲串载波调制



脉冲串载波调制



因为：

$$Y(j\omega) = \frac{1}{2\pi} X(j\omega) * C(j\omega)$$

而：

$$C(j\omega) = 2\pi \sum_{k=-\infty}^{+\infty} a_k \delta(\omega - k\omega_c)$$

$$a_k = \frac{\sin(k\omega_c \Delta/2)}{\pi k}$$

所以：

$$Y(j\omega) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} a_k X(j(\omega - k\omega_c))$$

脉冲串载波调制

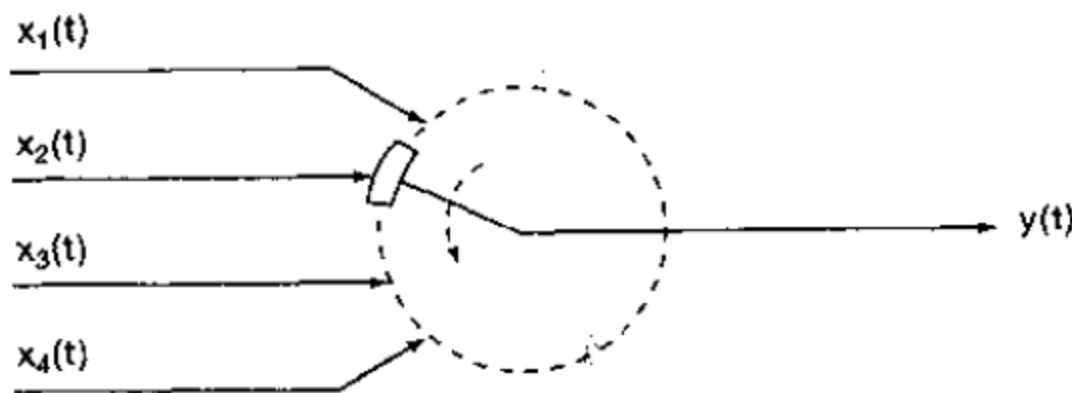


- 当满足 $\omega_c > 2\omega_M$ 时，可以通过理想低通滤波器从 $y(t)$ 中恢复出 $x(t)$ ，这就告诉我们，如何对脉冲串调制后的信号解调。
- 脉冲宽度 Δ 的大小与信号能否被恢复无关， Δ 只影响调制和解调时信号的幅度。
- 上述结论对于其他各种形状的脉冲载波波都成立：信号恢复的条件相同；恢复的方法相似

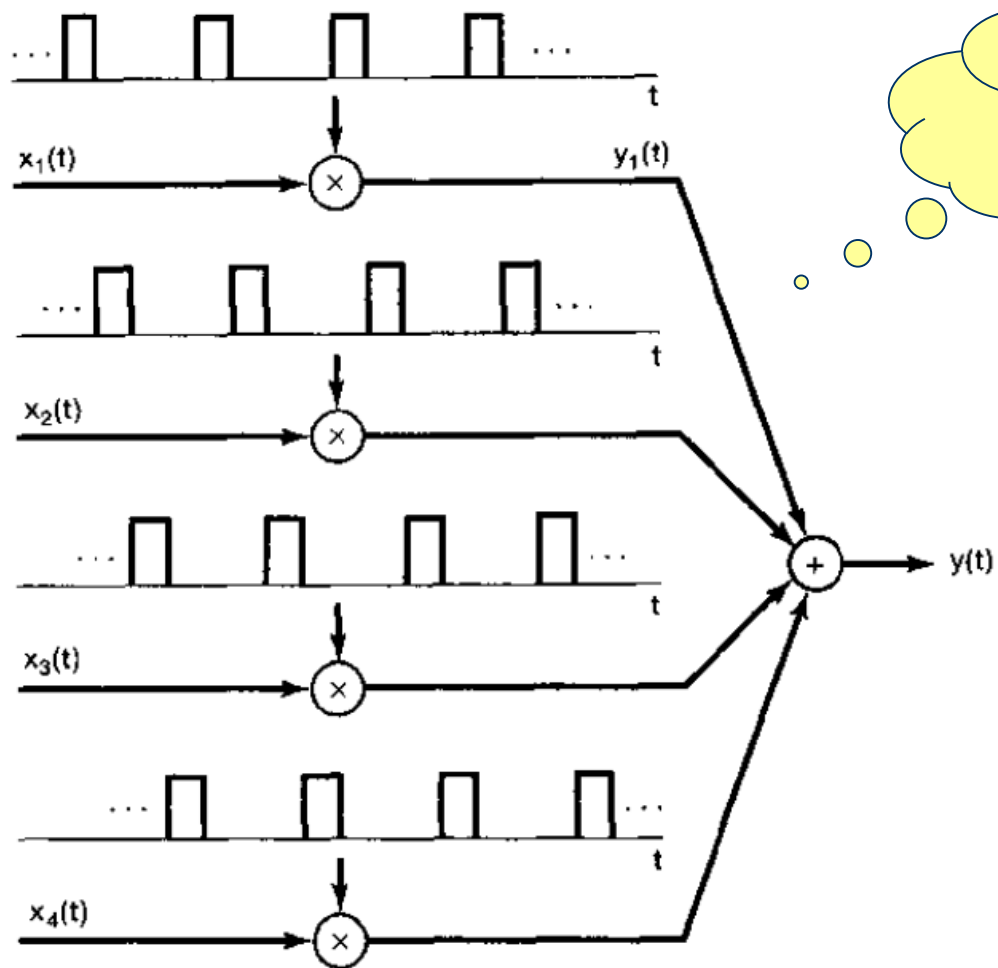
时分多路复用



脉冲串幅度调制在时域的效果就是对信号的定时选通。因此，可以利用脉冲位置的不同来实现对不同路信号的选择，从而达到在单一信道上传输多路信号的目的。这就是**时分多路复用 (TDM)** 的概念。



时分多路复用



Δ 的作用?

FDM与TDM



- TDM和FDM都可以用来在一个信道中同时传输多路信号
- TDM系统的实现电路比FDM系统的实现电路要简单很多
- TDM系统具有相当小的串话干扰
- TDM系统要求系统的接收端和发送端保持严格的时间同步

内容提要



❖ 引言

❖ 复指数与正弦幅度调制

❖ 用脉冲串作载波的幅度调制

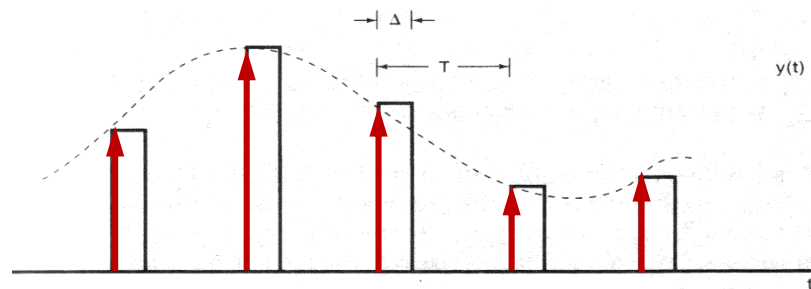
❖ 脉冲幅度调制

脉冲幅度调制 (PAM, Pulse-Amplitude Modulation)

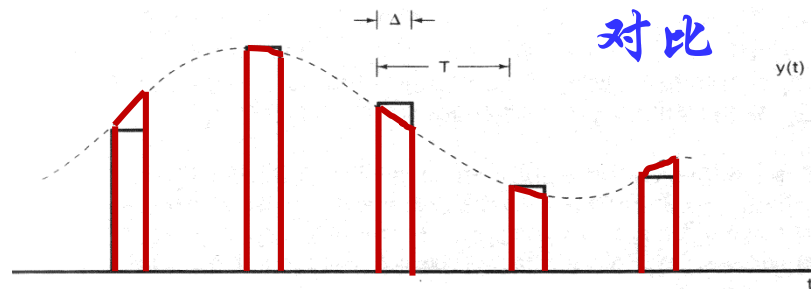


❖ 以脉冲串作载波的幅度调制，在载波的宽度 Δ 内是以调制信号的原始波形为传送对象的。由于此时 $\omega_c = (2\pi/T) > 2\omega_M$ 满足Nyquist抽样率，因此，在 Δ 时隙内只需要传送 $x(t)$ 的一个样本值即可。

❖ PAM调制就是用 $x(t)$ 在各时隙的样本值去调制载波脉冲的幅度。



脉冲
幅度
调制



对比

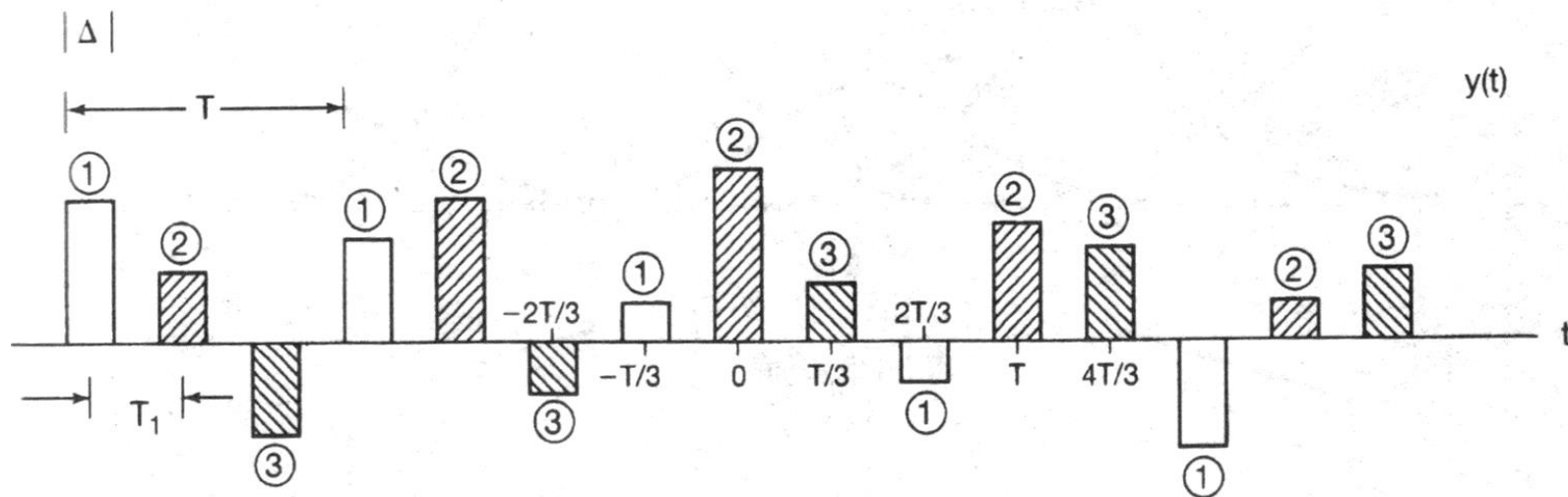
脉冲串
为载波
的幅度
调制

脉冲幅度调制 (PAM, Pulse-Amplitude Modulation)



❖ PAM系统中的码间干扰

- 对时分复用的PAM信号，在理想情况下，各路信号在传输过程中不发生波形失真，在接收端只要通过采样判决就可以实现对各路信号的解复用。

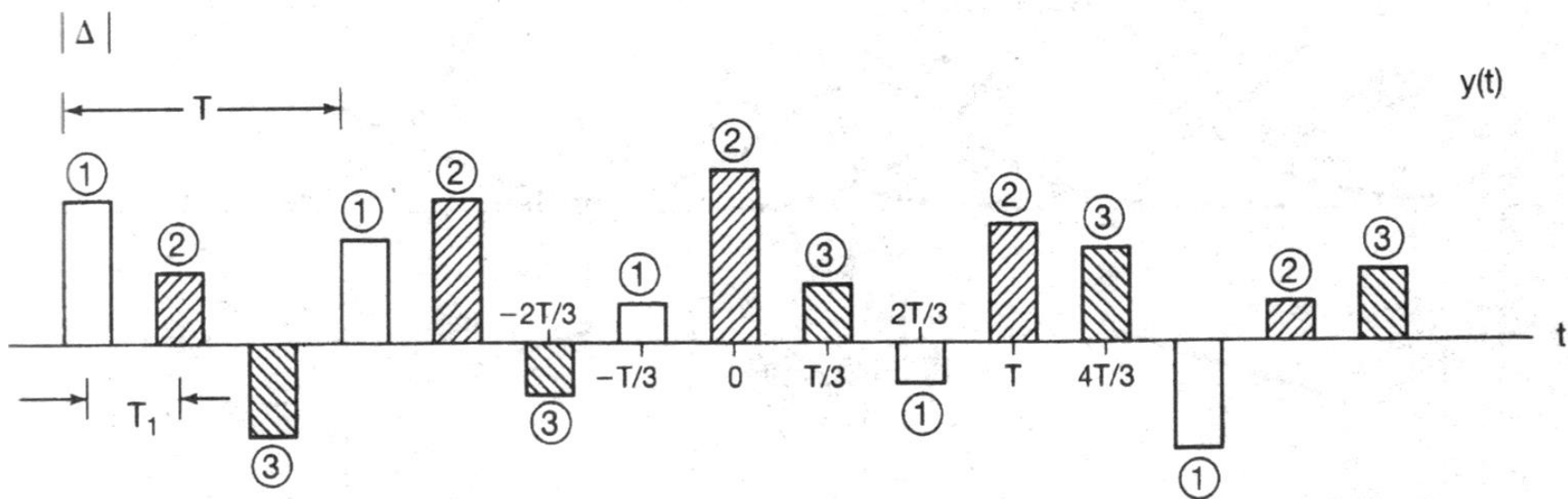


脉冲幅度调制 (PAM, Pulse-Amplitude Modulation)



❖ PAM系统中的码间干扰

- 对时分复用的PAM信号，在理想情况下，各路信号在传输过程中不发生波形失真，在接收端只要通过采样判决就可以实现对各路信号的解复用。

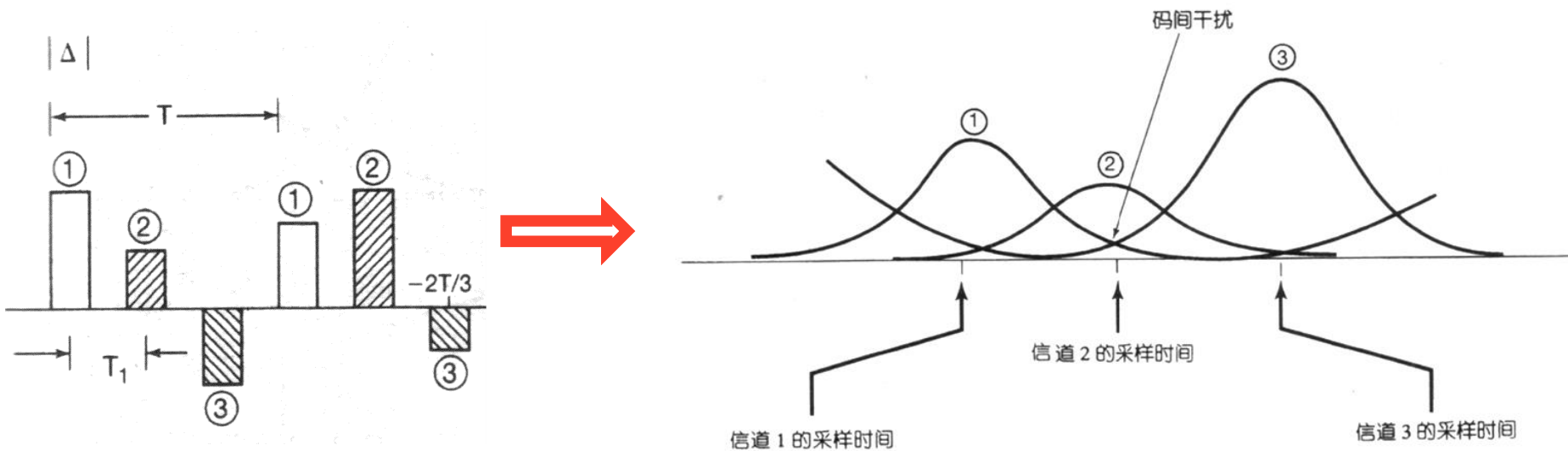


脉冲幅度调制 (PAM, Pulse-Amplitude Modulation)



❖ PAM系统中的码间干扰

- 但是，在工程实际中，由于信道的非理想频率特性及加性噪声的引入，总会造成PAM信号的波形发生失真。从而产生码间干扰，使采样判决时刻得到的样本值并非是该路信号应该有的样本值。



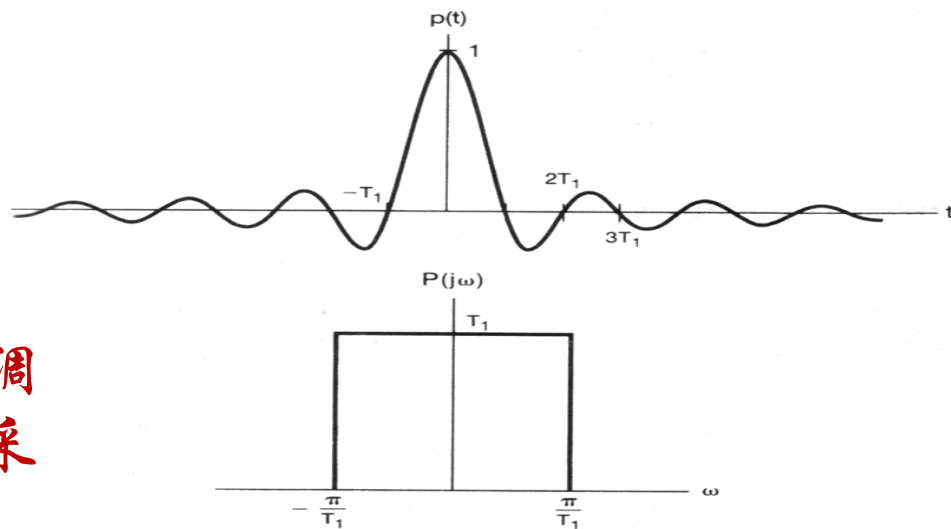
脉冲幅度调制 (PAM, Pulse-Amplitude Modulation)



❖ 消除码间干扰的方法

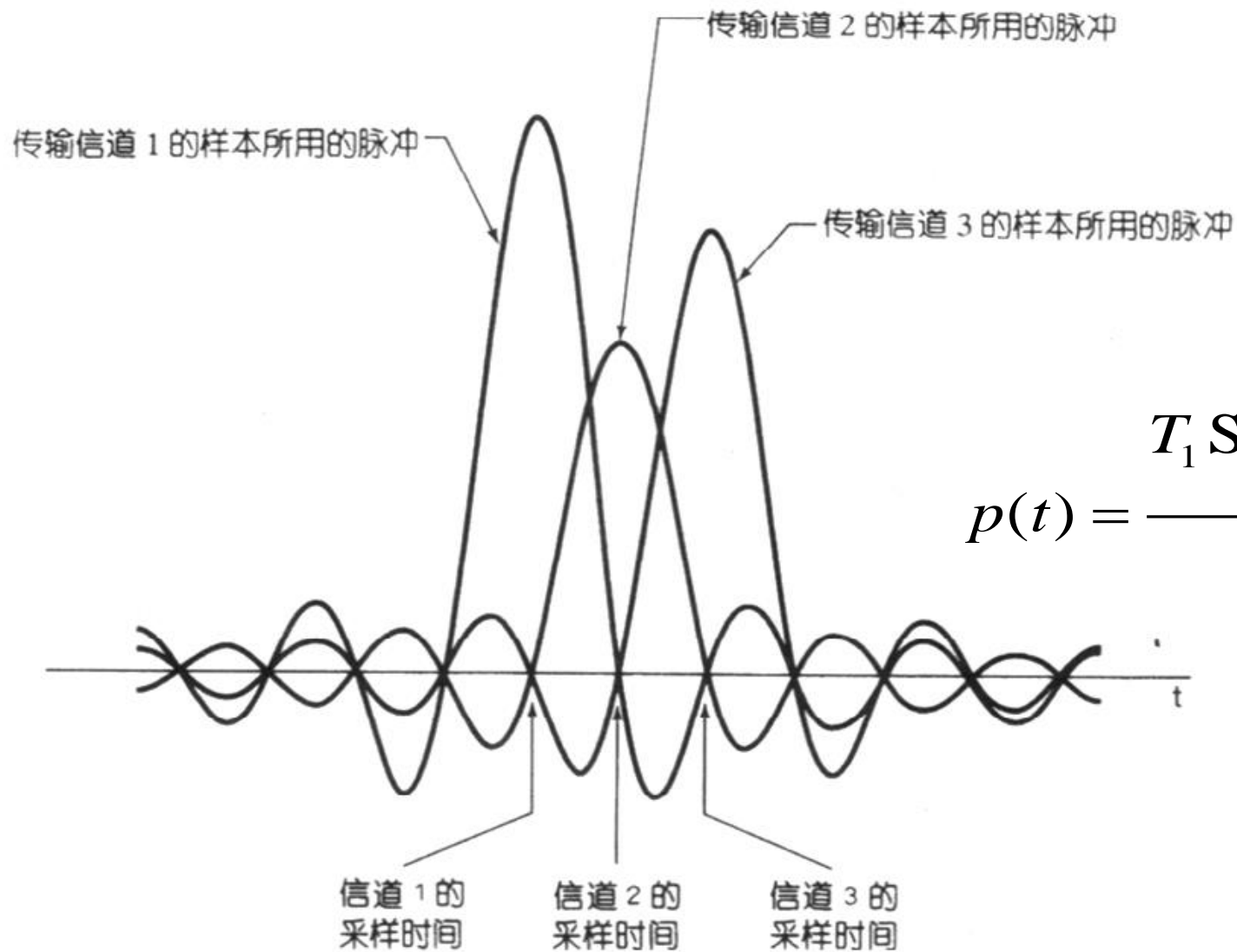
- 针对由于信道带宽有限而产生的码间干扰，应该在形成 PAM 信号时，使用一种非矩形的脉冲作为载波。这种脉冲在所有采样判决时刻都过零点，而且是带限的，其最高频率在信道的通带内。例如采用如下脉冲：

$$p(t) = \frac{T_1 \sin(\frac{\pi t}{T_1})}{\pi t}$$



当以这样的脉冲作为 PAM 调制的载波时，就不会造成采样判决时的码间干扰。

脉冲幅度调制 (PAM, Pulse-Amplitude Modulation)



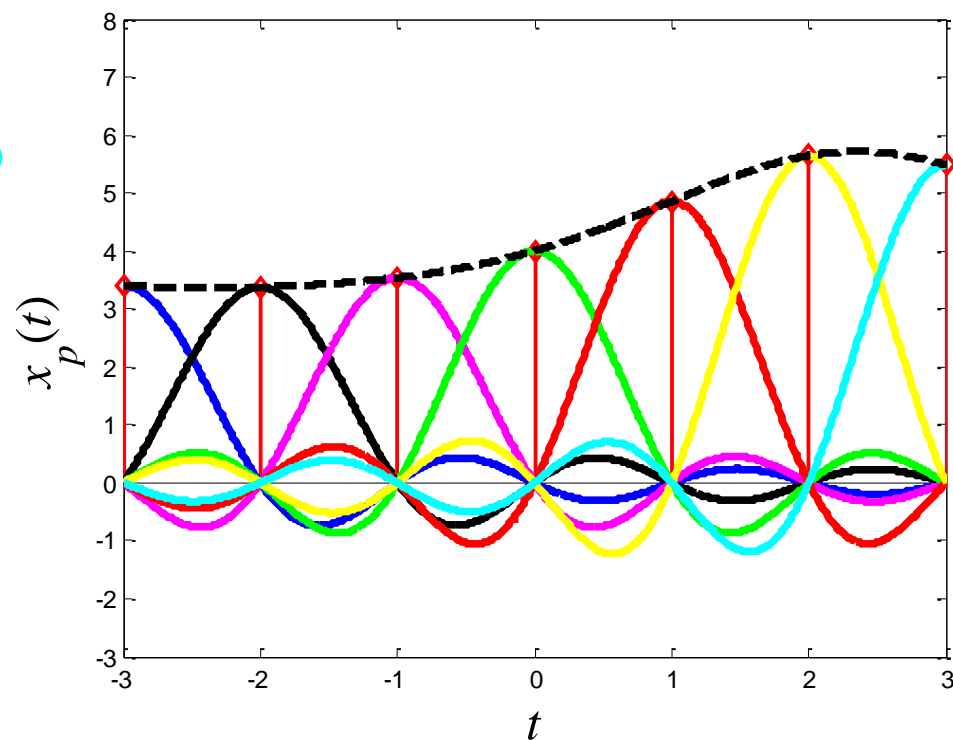
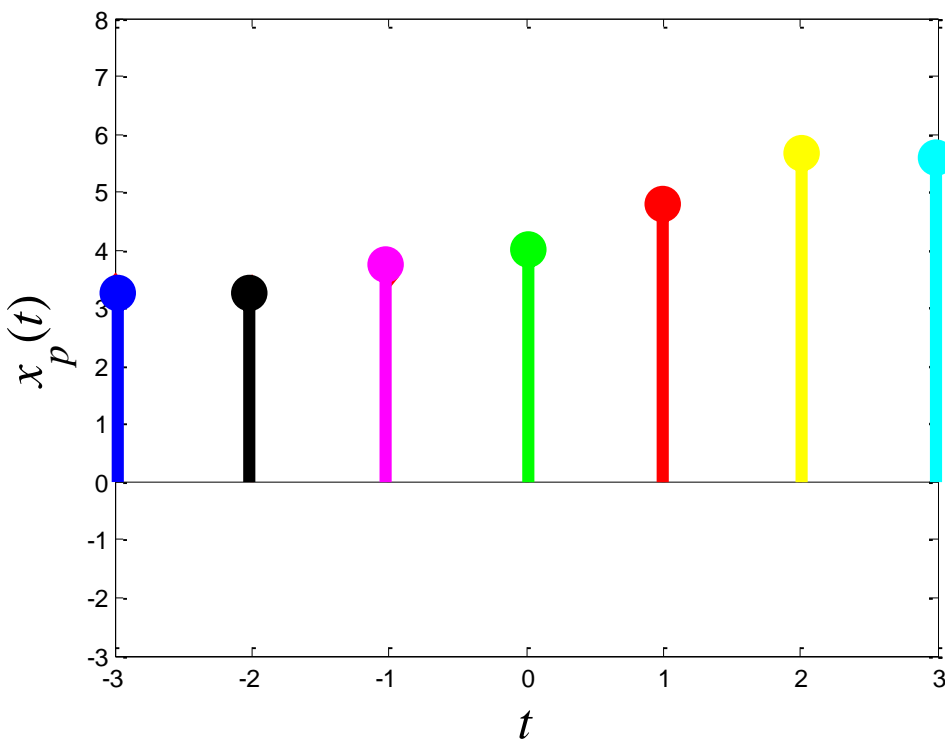
$$p(t) = \frac{T_1 \sin\left(\frac{\pi t}{T_1}\right)}{\pi t}$$

脉冲幅度调制 (PAM, Pulse-Amplitude Modulation)



❖ 无码间串扰传输

$$p(t) = \frac{T_1 \sin\left(\frac{\pi t}{T_1}\right)}{\pi t}$$

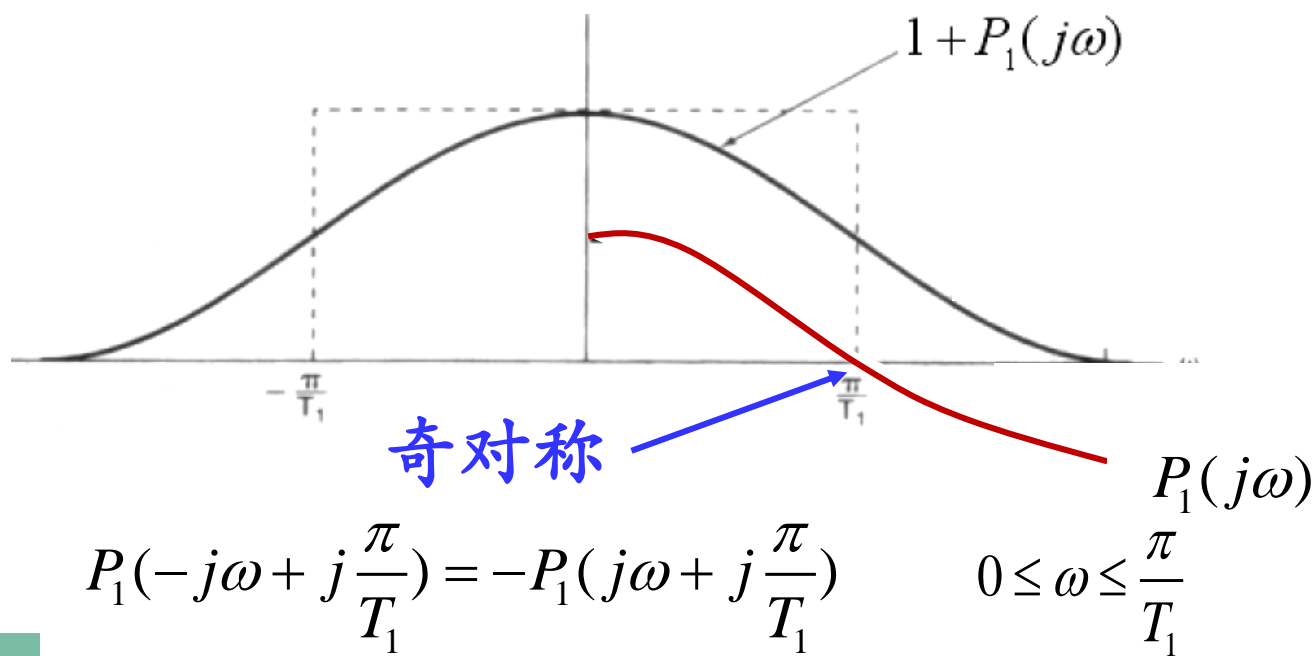


脉冲幅度调制 (PAM, Pulse-Amplitude Modulation)



❖ 无码间串扰传输条件

$$P(j\omega) = \begin{cases} 1 + P_1(j\omega) & |\omega| \leq \pi / T_1 \\ 1 + P_1(j\omega) & \pi / T_1 < |\omega| \leq 2\pi / T_1 \\ 0 & \text{其它 } \omega \end{cases}$$





谢谢大家！