



第五章 信号处理基础



§5-1 信号处理概述

信号处理是对信号进行提取、变换、分析、综合等处理过程的统称。

信号处理的目的：

- 1) 分离信号和噪声，提高信噪比；
- 2) 从信号中提取有用的特征信息；
- 3) 修正测试系统的某些误差；
- 4) 把信号转变为易于输出、传输的信号。

信号处理分为模拟信号处理和数字信号处理两类。



§ 5-2 模拟信号处理基础



§5-2-1 模拟信号处理概述

- 模拟信号处理是直接对连续信号进行分析处理的过程。
- 传感器输出的信号种类繁多，信号强度差异较大，许多都难以被显示、记录或分析仪器直接接收。
- 采用模拟信号处理技术对传感器输出信号进行预处理，是传感器到显示、记录或数字化分析仪器的前向通道中必不可少的重要环节，常称之为信号调理。
- 常用的信号调理环节有：**电桥、放大、滤波、调制与解调**等。



§5-2-2 信号放大

信号放大的目的：将传感器输出的微弱信号进行放大，以达到后续处理的要求。

放大电路应具有的性能：

- (1) 足够的放大倍数；
- (2) 高输入阻抗，低输出阻抗；
- (3) 高共模抑制能力；
- (4) 低漂移、低噪声、低失调电压和电流。

放大器特性比较

(P122 表 2-1)

放大器类型	工作特点	优缺点	传感器典型应用
直流放大器	对信号电压的幅值放大, 信号在某一电平上下波动	直流放大器的优点是失真小, 放大倍数可以很高。但其工作点会随温度等的变化而波动 (即, 零漂), 故电路的稳定性成为设计的重点	缓变信号传感器, 如电阻应变计、电阻式传感器、铂热电阻测温传感器等
交流放大器	对信号电压的幅值的变化放大, 信号在零点上下波动	因有电容的隔直作用, 可降低漂移及噪声, 电路的稳定性好, 结构简单	动态信号传感器, 差动变压器、电容式、电感式传感器等
电荷放大器	对电荷信号直接放大	输出电压与传感器的电荷量成正比, 并且与电缆分布电容无关	压电式传感器



直流放大和交流放大

直流放大—— 可对缓变信号进行直接放大，缺点：存在零漂，易受低频干扰。

交流放大—— 不能对缓变信号进行放大，应先将缓变信号变为频率适当的交流信号，然后用交流放大器放大。



§5-2-3 调制解调

(P.123)

调制的概念

- 调制——利用一个信号来控制或改变高频振荡信号的某些参数，使它随着被测信号作有规律变化的过程。
- 载波——受控的高频振荡信号
- 调制信号——控制信号（输入的缓变信号）

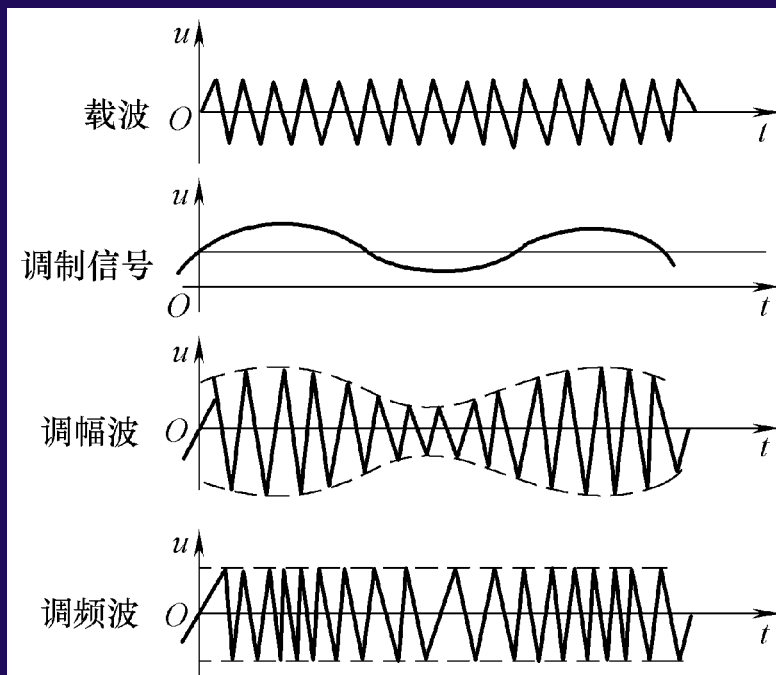


图3-1 载波、调制信号及调幅、调频波

分类

根据载波受调制的参数的不同

调制 { 幅值受控——调幅 (AM)
频率受控——调频 (FM)
相位受控——调相 (PM)

已调波
(经过调制的信号) { 调幅波
调频波
调相波

载波、调制信号及已调波

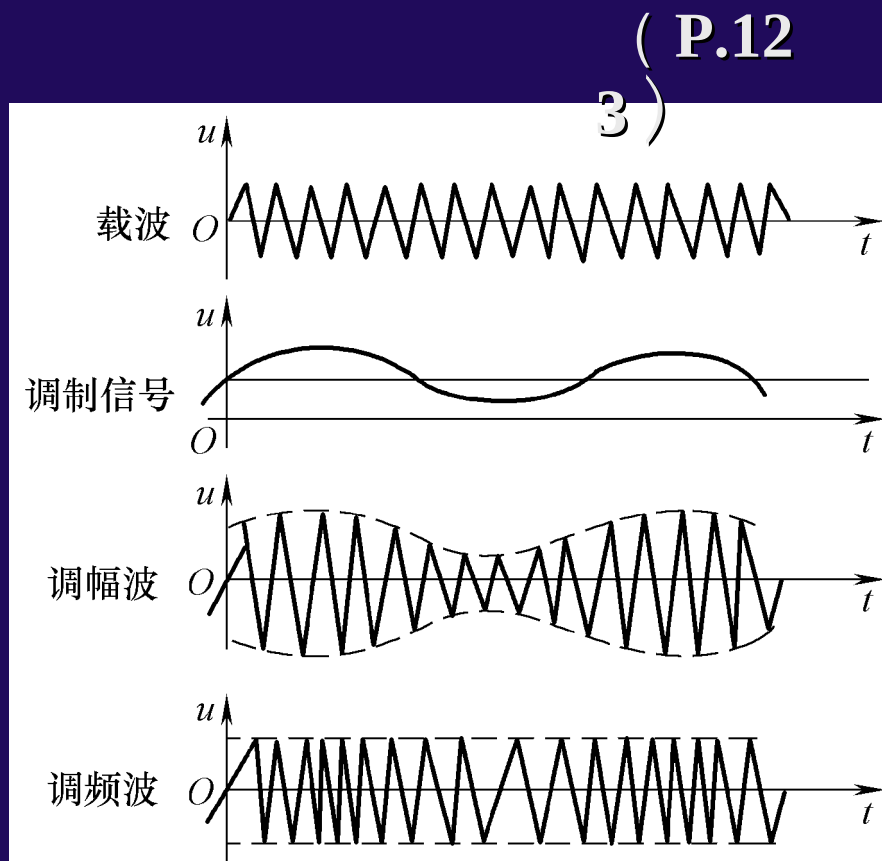
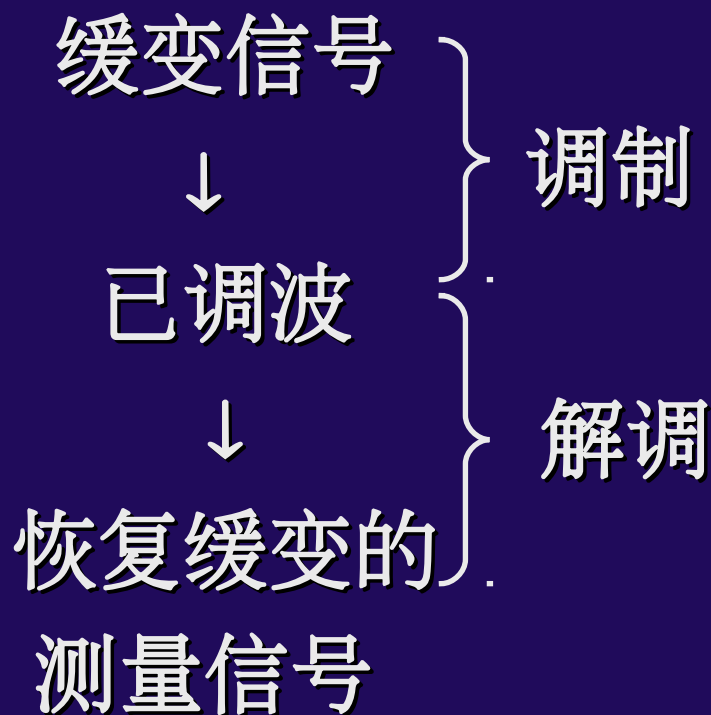
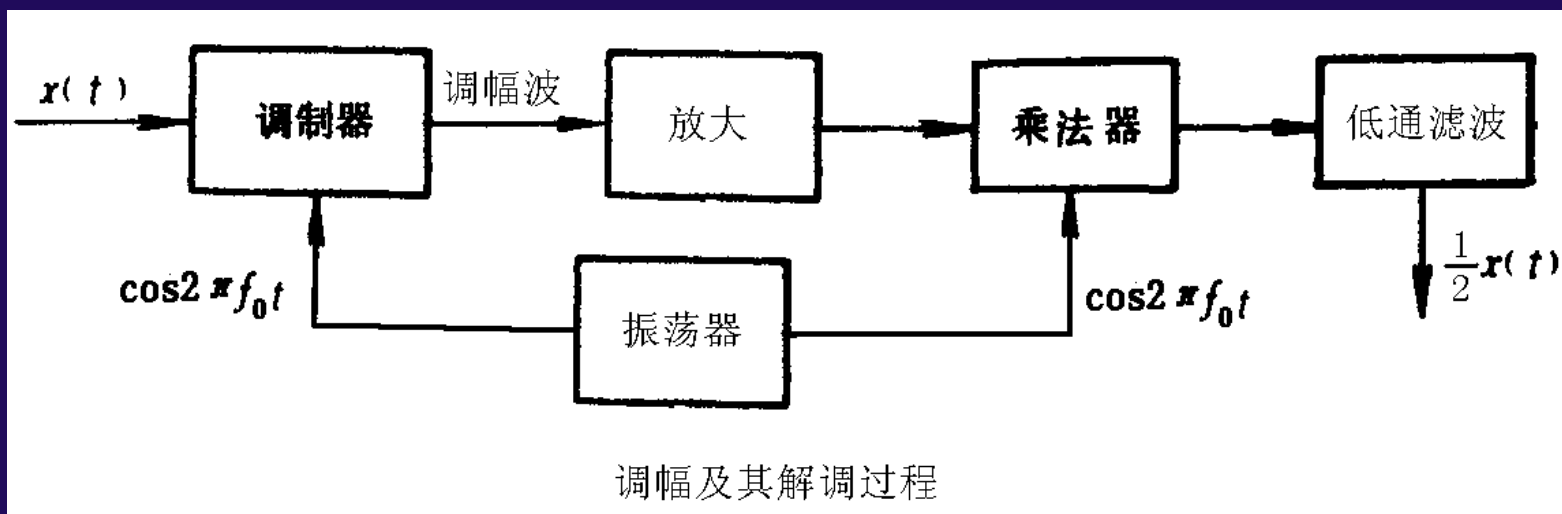


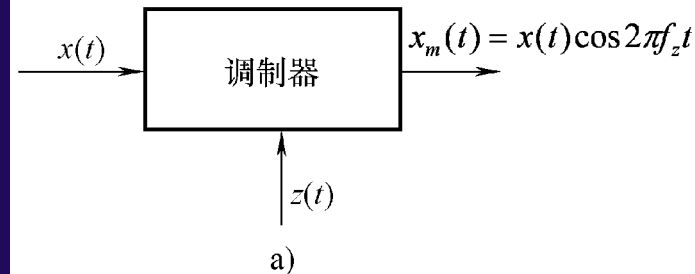
图3-1 载波、调制信号及调幅、调频波

一、调幅及其解调

调幅是将一个高频简谐信号（载波）与测试信号（调制信号）相乘，使高频信号的幅值随测试信号的变化而变化。



(一) 幅值调制原理



$$x(t)z(t) \Leftrightarrow X(f) * Z(f)$$

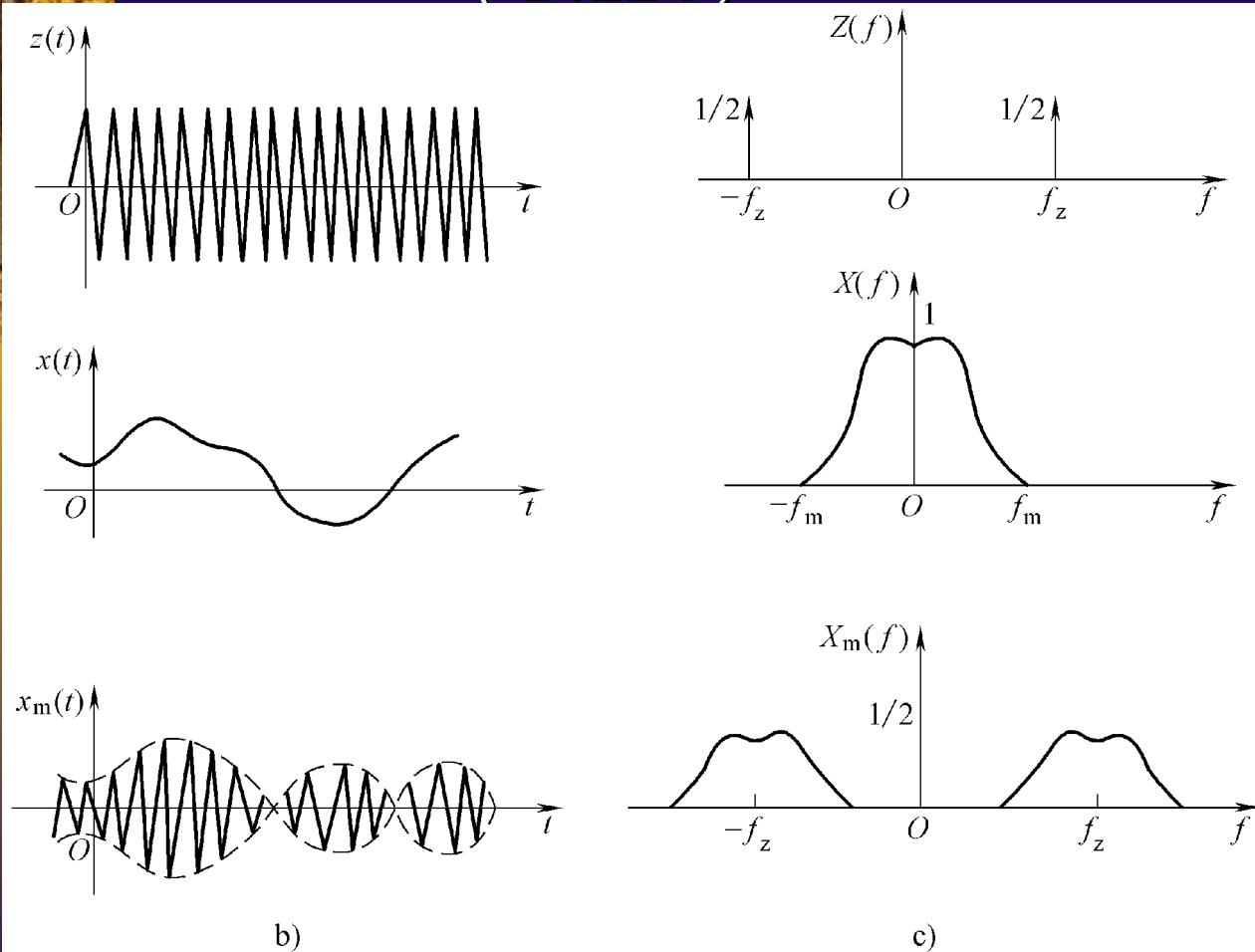
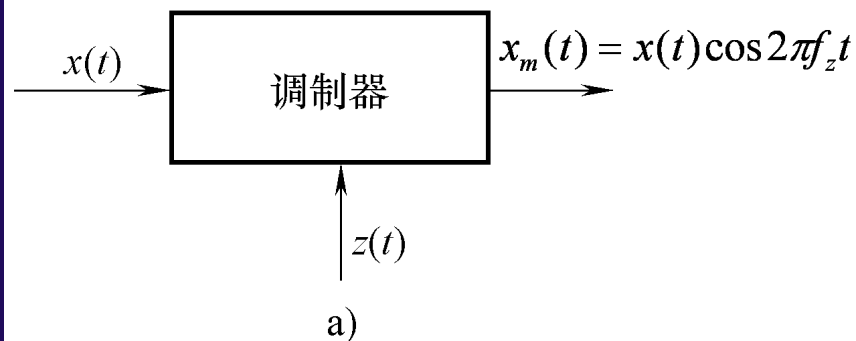
一个函数与单位脉冲函数卷积的结果，就是将其图形由坐标原点平移至该脉冲函数处。

$$\cos 2\pi f_z t \Leftrightarrow \frac{1}{2} \delta(f - f_z) + \frac{1}{2} \delta(f + f_z)$$

$$\begin{aligned} x(t) \cos 2\pi f_z t &\Leftrightarrow \frac{1}{2} X(f) * \delta(f - f_z) + \frac{1}{2} X(f) * \delta(f + f_z) \\ &= \frac{1}{2} X(f - f_z) + \frac{1}{2} X(f + f_z) \end{aligned}$$

调幅过程

(P.124)



调幅过程就相当于把调制信号的低频搬移到载波信号的高频上去的过程，成为高频调幅波。

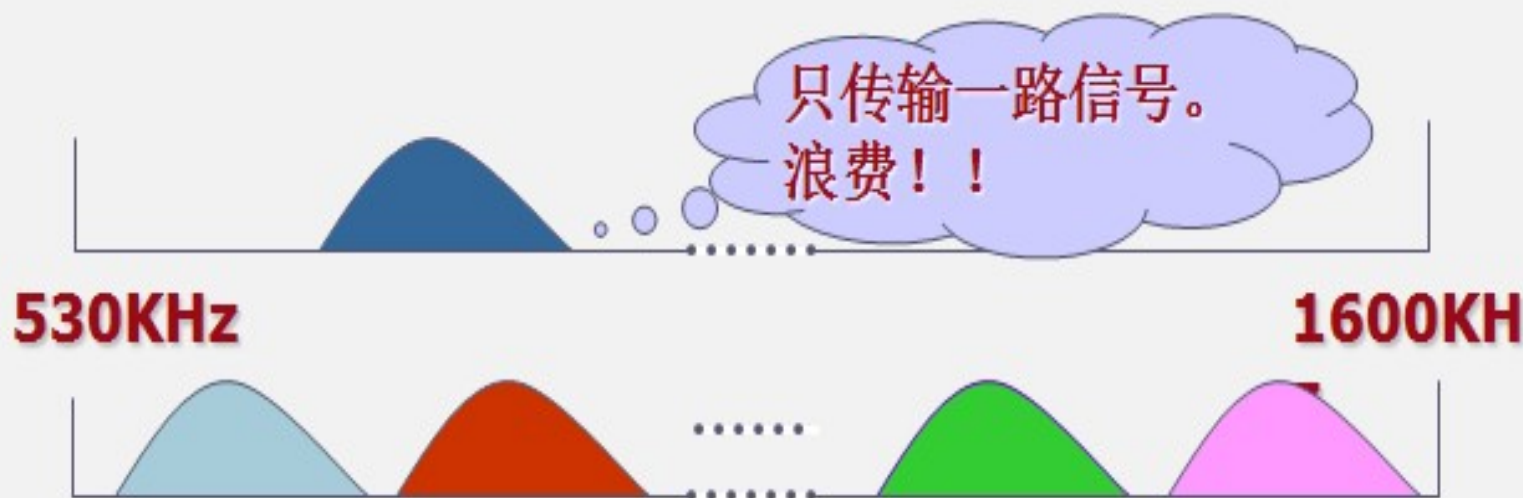
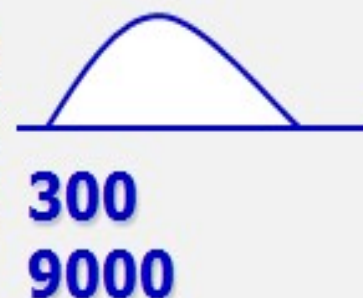
图3-2 信号幅度调制

a) 系统框图 b) 时域波形 c) 频域谱图



提高信道的利用率

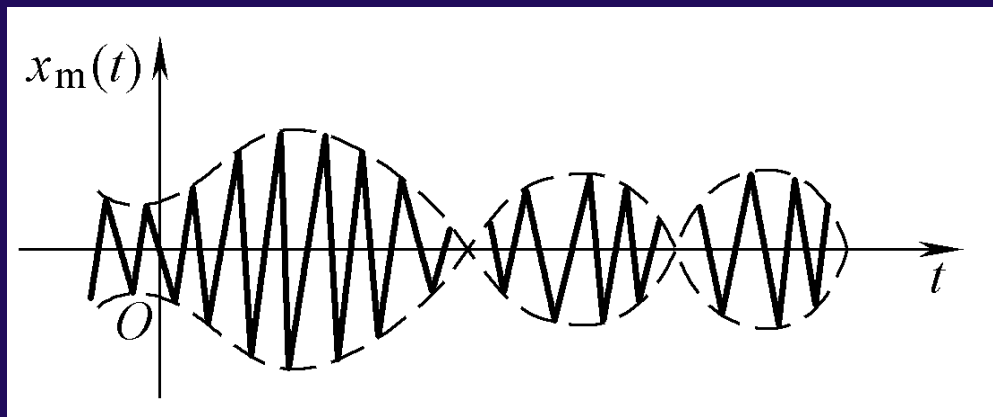
以无线电广播的中波波段为例：可用波段范围为 **530KHz~1600KHz**，而语音信号的频率范围为**300~3400Hz**，经调制后每一个广播电台频道的带宽为**9K**。



这一中波波段中就均匀分布着多个电台!!!

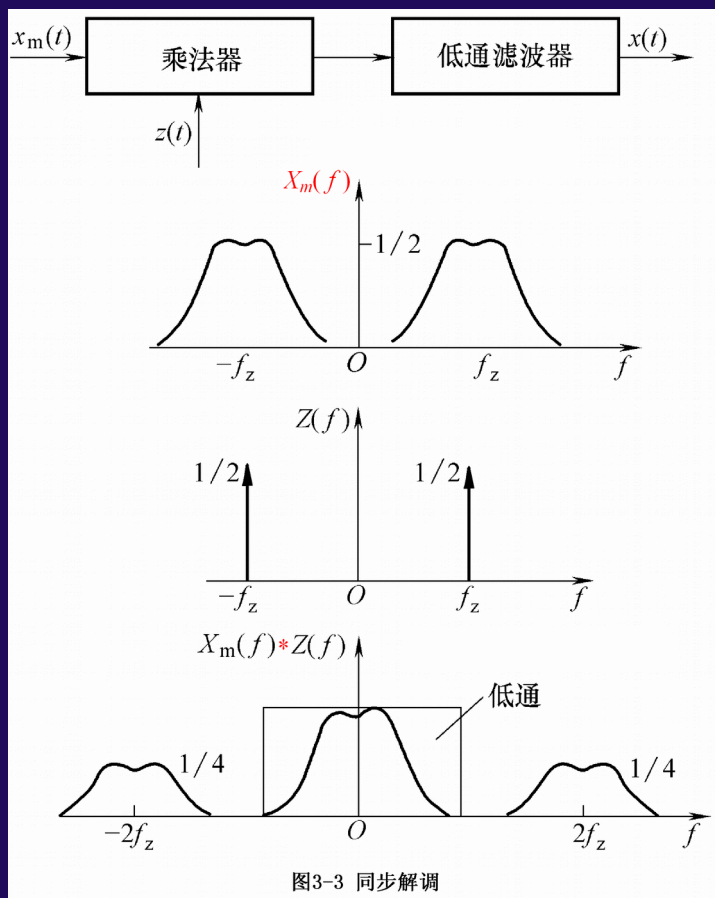
(二) 调幅信号的解调方法

- 上述这种调幅波具有**极性变化**，即在信号过零线时，其幅值发生突变，调幅波的相位（相对于载波）也相应地发生 **180°** 的相位变化。此种调制方法称为**抑制调幅**。
- 抑制调幅波须采用**同步解调**或**相敏检波**解调的方法，方能反映出原信号的幅值和极性。



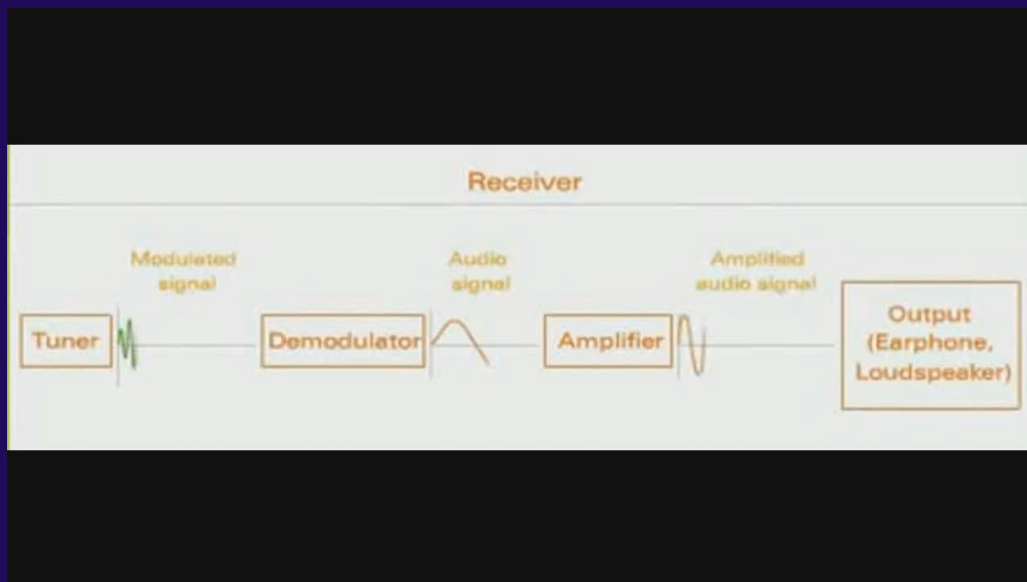
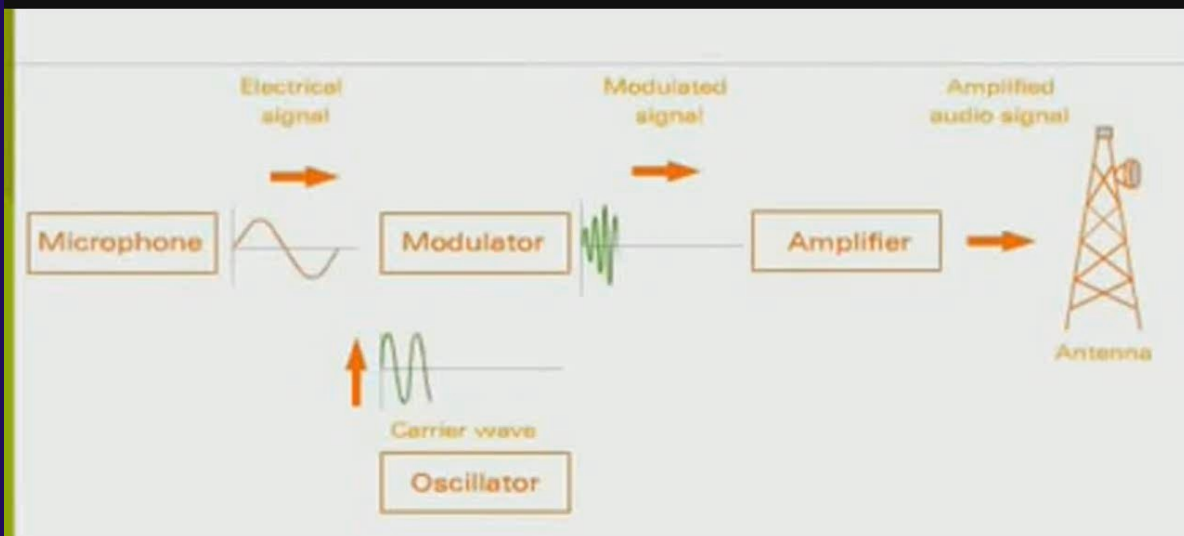
1. 同步解调

同步解调——把调幅波再次与原载波信号相乘，
则频域图形将再一次进行“搬移”。



“同步”——指解调时所乘的信号与调制时的载波信号具有相同的频率和相位。

(P.125)





时、频域分析

$$x(t) \cos 2\pi f_z t \cos 2\pi f_z t = \frac{1}{2} x(t) + \frac{1}{2} x(t) \cos 4\pi f_z t$$

低通滤波器将频率为 $2f_z$ 的高频信号滤去

$$\begin{aligned} F[x(t) \cos 2\pi f_z t \cos 2\pi f_z t] &= X(f) * [\frac{1}{2} \delta(f \pm f_z)] * [\frac{1}{2} \delta(f \pm f_z)] \\ &= \frac{1}{2} X(f) + \frac{1}{4} X(f + 2f_z) + \frac{1}{4} X(f - 2f_z) \end{aligned}$$

调幅的目的是使缓变信号便于放大和传输。
解调的目的则是为了恢复原信号。



注意:

载波频率 f_z 必须高于原信号中的最高频率 f_m 才能使已调波仍保持原信号的频谱图形, 不致重叠。

为了减小放大电路可能引起的失真, 信号的频宽 ($2f_m$) 相对中心频率 (载波频率 f_z) 应越小越好。

实际载波频率常至少数倍甚至数十倍于调制信号。

2. 整流检波（包络检波）

- 非抑制调幅（偏置调幅）——把调制信号 $x(t)$ 进行偏置，叠加一个直流分量 A ，使偏置后的信号都具有正电压。那么调幅波的包络线将具有原调制信号的形状。

$$x_m(t) = [A + x(t)] \cos 2\pi f_z t$$

$$x_m(t) = [A + mx(t)] \cos 2\pi f_z t$$

m ——调幅指数， $m \leq 1$

- 对于非抑制调幅波，一般采用整流、滤波（或称包络检波）以后，就可以恢复原信号。

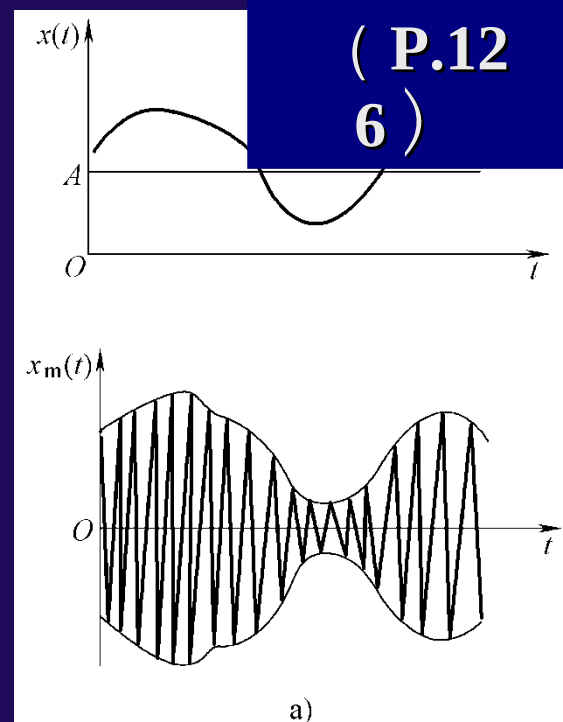
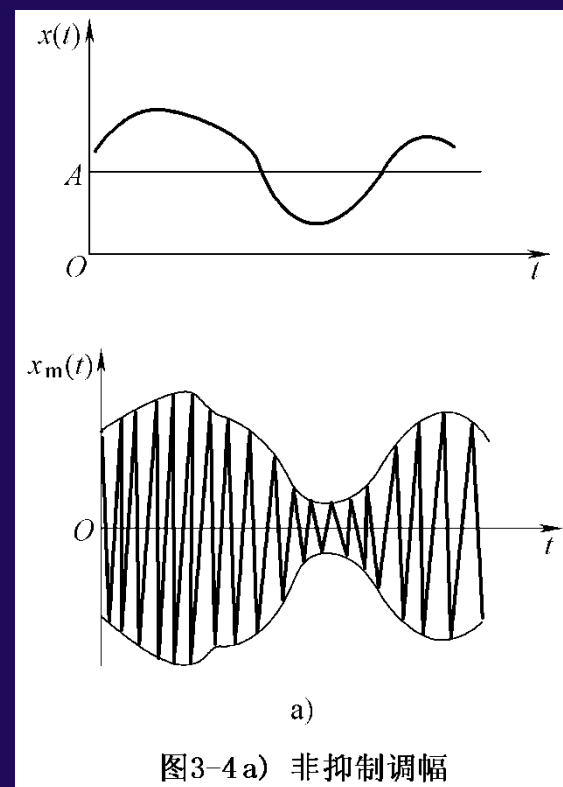


图3-4 a) 非抑制调幅

整流检波（包络检波）

(P.126)



3. 相敏检波 (参考其它书籍)

相敏检波的特点是可以鉴别调制信号的极性，所以采用相敏检波时，对原信号可不必再加偏置。

交变信号在其过零线时符号 (+、-) 发生突变，调幅波的相位 (与载波比较) 也相应地发生 180° 的相位跳变。利用载波信号与之比相，便既能反映出原信号的幅值又能反映其极性。

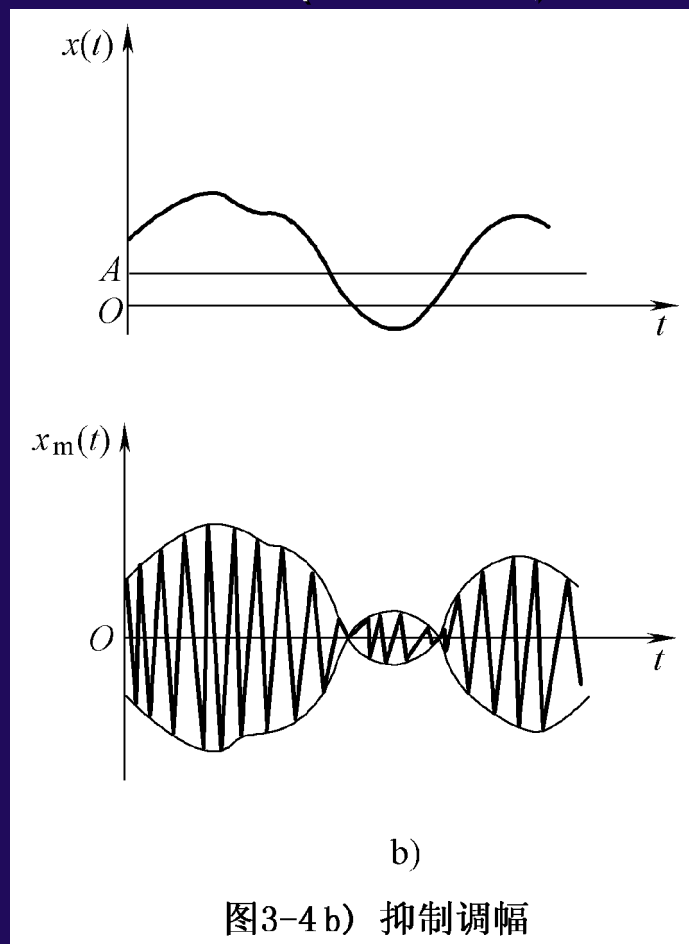
(三) 调幅波的波形失真

1. 过调失真

对于非抑制调幅，要求其直流偏置必须足够大，要求调幅指数 $m \leq 1$ 。

若所加的偏置电压不够，那么对于调幅之后的波形只进行简单的整流滤波不能恢复原调制信号，而会造成很大失真。

(P.126)



调幅波的波形失真

2. 重叠失真

当载波频率 f_z 较低时，会造成调幅波的正频端的下边带与负频端的下边带相重叠，从而导致失真。

(P.126)

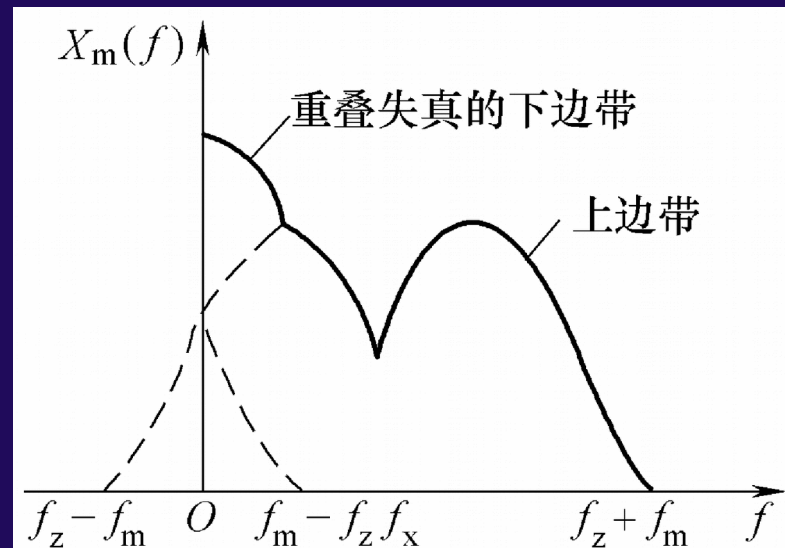
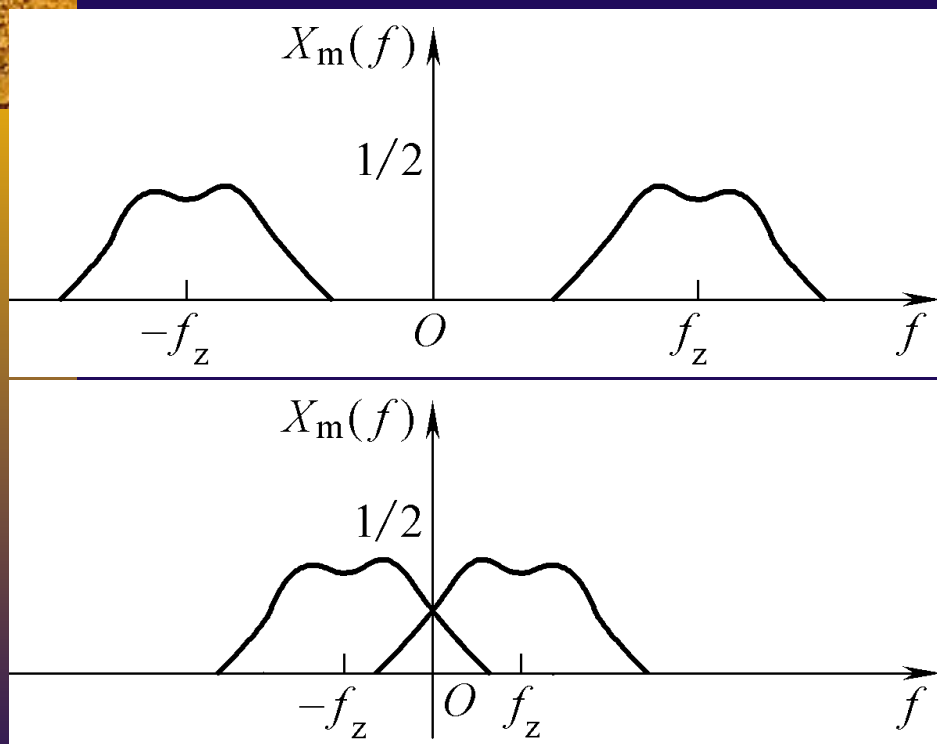


图3-5 调幅波的重叠失真

调幅波的波形失真

3. 调幅波经过系统时的波形失真

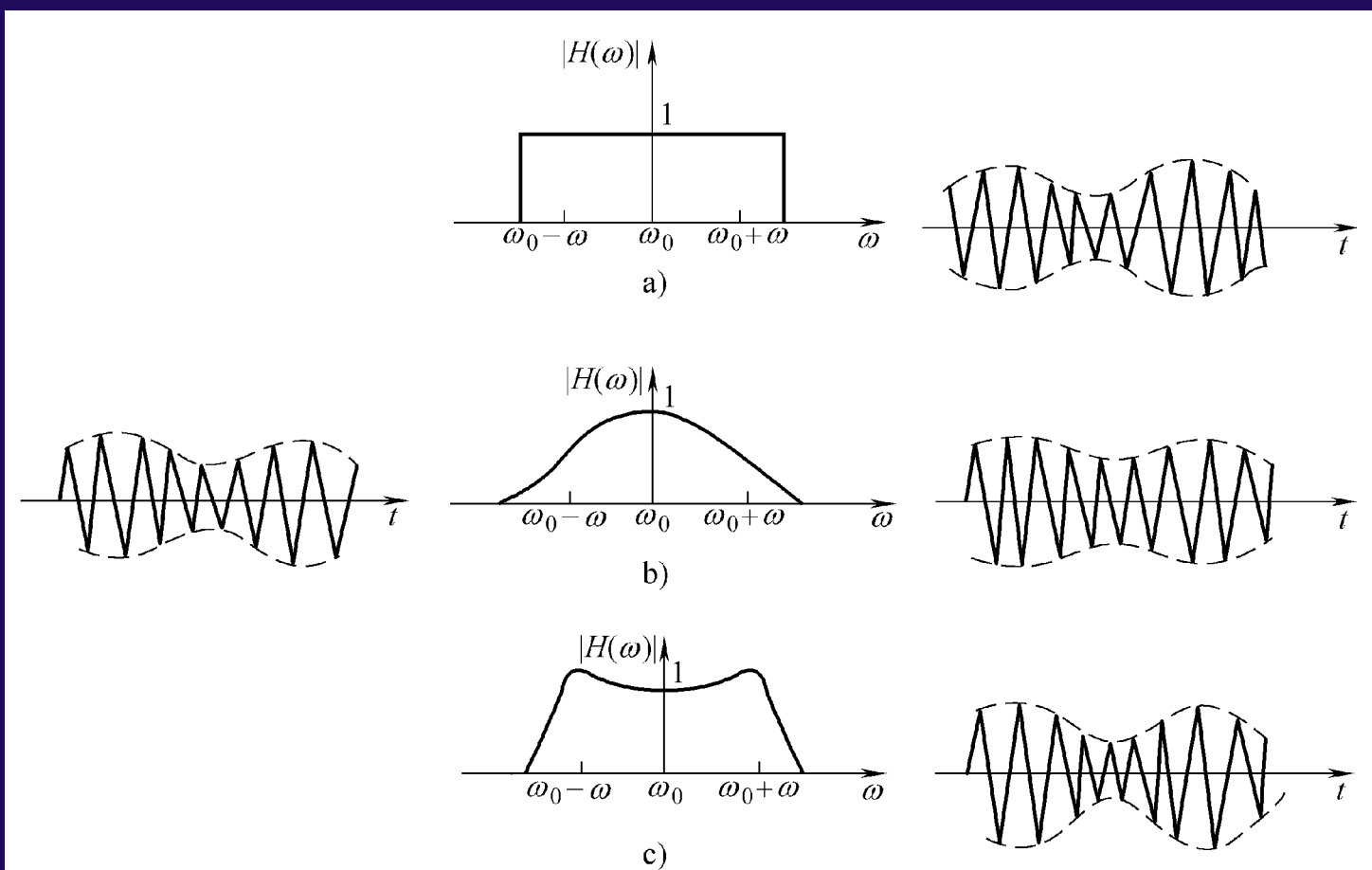


图3-6 调幅波通过系统时的波形变化

a) 理想情况 b) 边带波被衰减 c) 边带波被放大

(P.126)

(四) 典型调幅波及其频谱



(P.12
7)

典型调幅波及其频谱

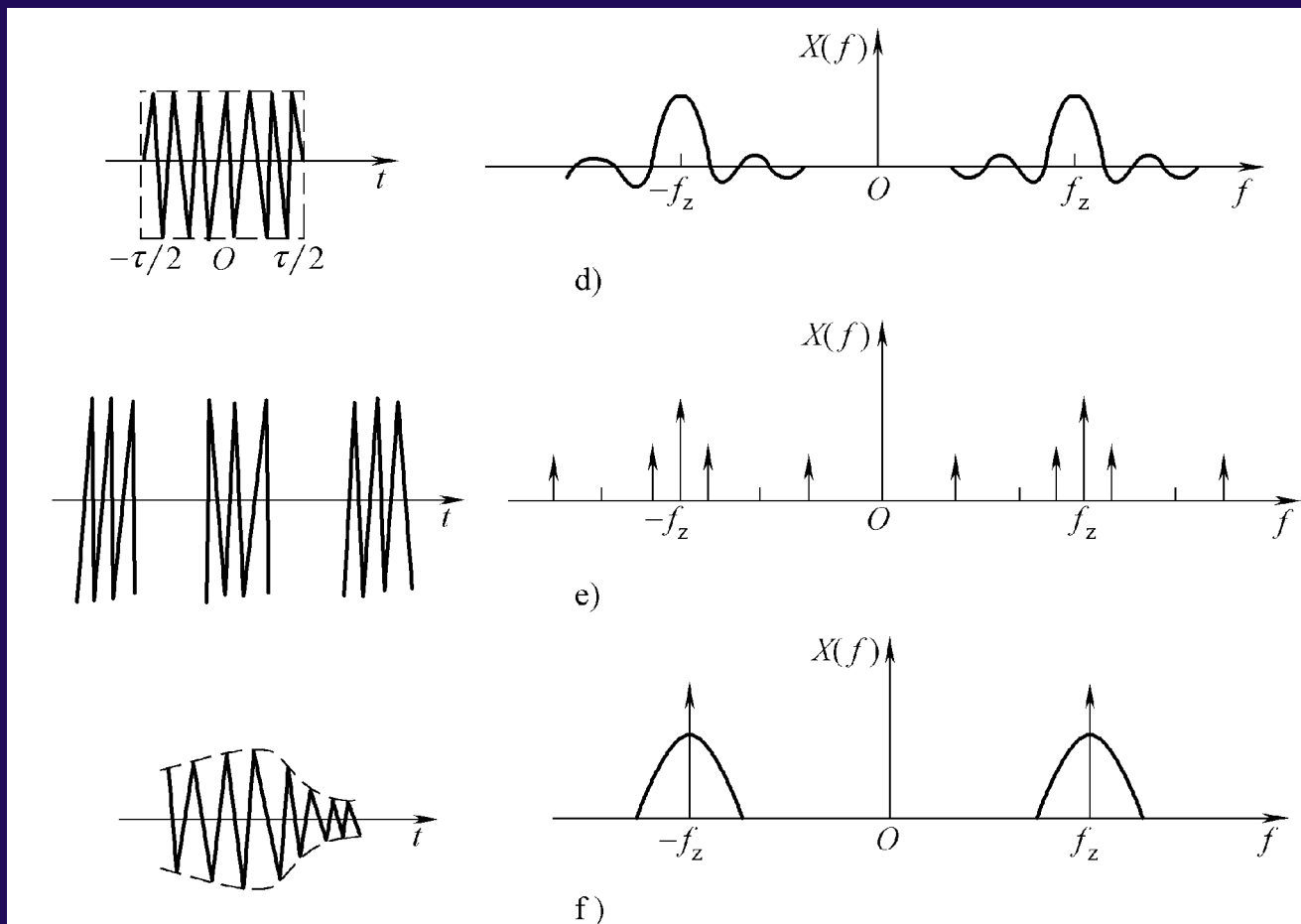


图3-7典型调幅波的波形及频谱

d) 矩形脉冲调制 e) 周期矩形脉冲调制 f) 任意频限偏置调制

(P.12
7)

(五) 调幅在测试仪器中的应用

动态电阻应变仪

(P.128)

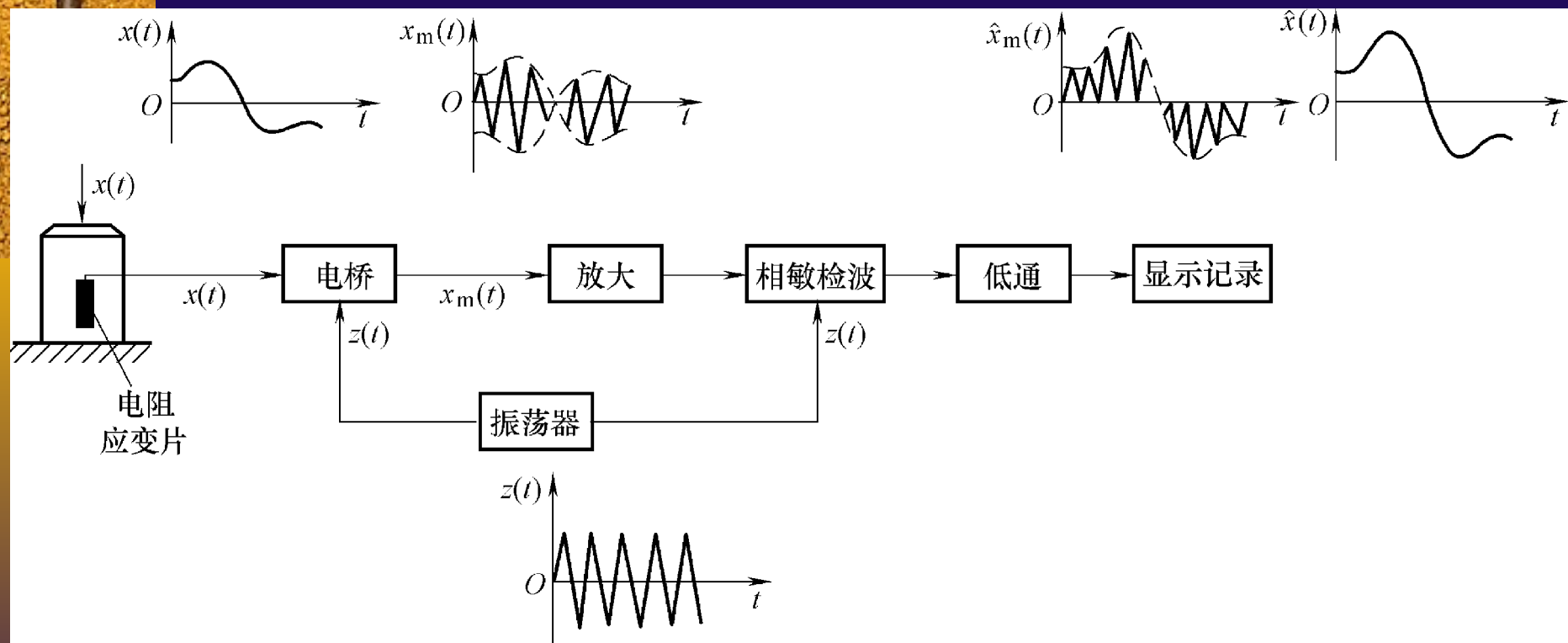
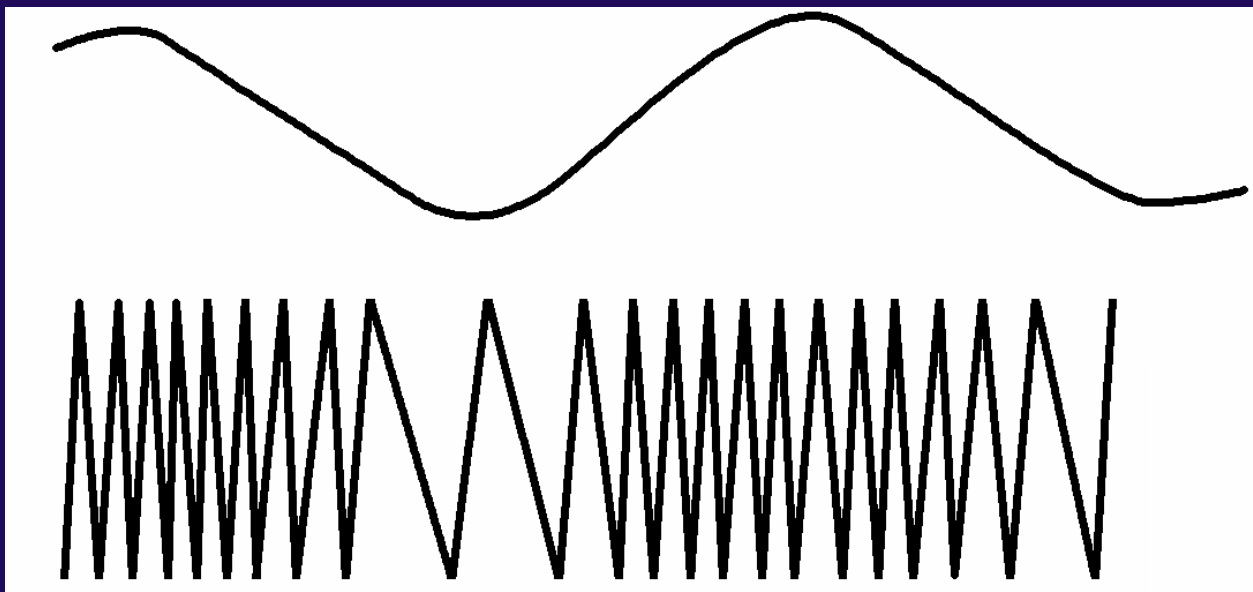


图3-8 动态电阻应变仪方框图

二、调频及其解调

调频是指利用调制信号控制高频载波信号频率变化的过程。

在频率调制中载波幅值保持不变，仅载波的频率随调制信号的幅值成比例变化。



调频的基本概念

载波

$$y(t) = A \cos(\omega_0 t + \theta_0)$$

载波瞬时角频率 $\omega(t)$
随调制信号 $x(t)$ 作线性变化

$$\omega(t) = \omega_0 + kx(t)$$

$$\text{调制信号 } x_f(t) = A \cos[\omega_0 t + k \int x(t) dt + \theta_0]$$

- 信号电压为零 $\rightarrow f_0$ (中心频率) : $f = f_0$
- 电压为正或幅值 $\uparrow \rightarrow f \uparrow$: $f = f_0 + \Delta f$
- 电压为负或幅值 $\downarrow \rightarrow f \downarrow$: $f = f_0 - \Delta f$

调频波

调频波是随信号而变化的疏密不等的等幅波。

(P.128)

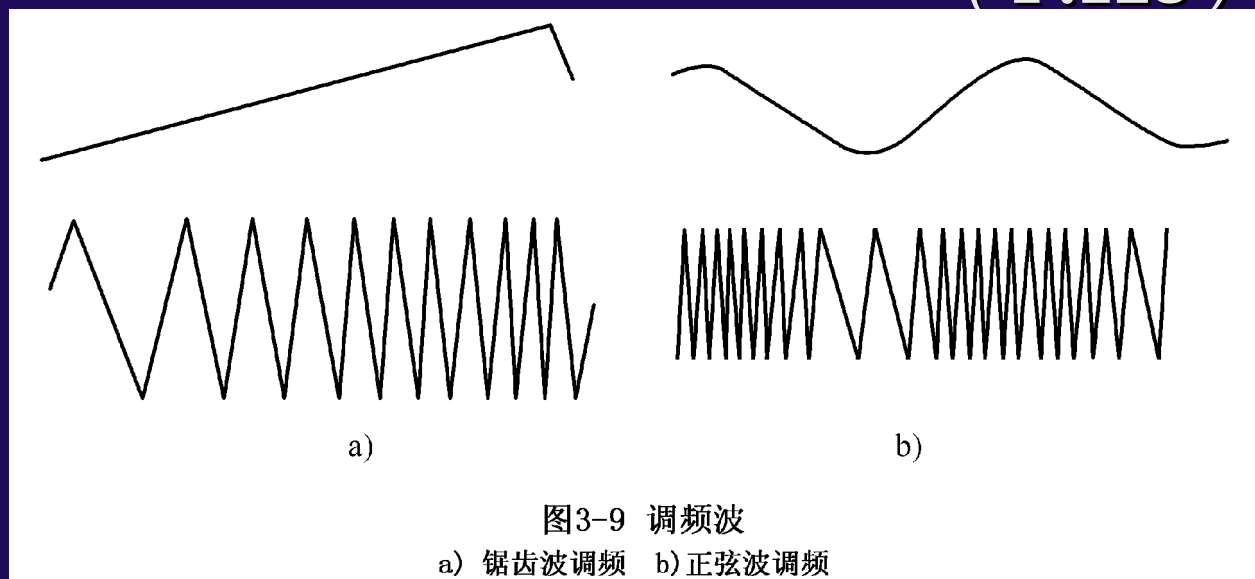


图3-9 调频波

a) 锯齿波调频 b) 正弦波调频

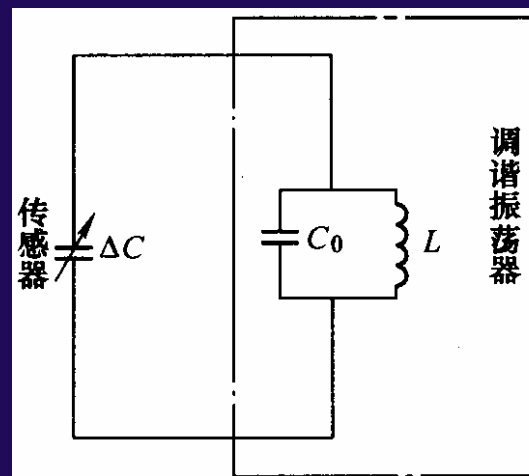
调频波与调幅波相比抗干扰能力强，因为它的变化是在频率上的，而调幅波是幅值受控制，而幅值较易受到干扰，频率尤其是高频则不容易受到干扰。

(一) 频率调制方法

直接调频式测量电路——把被测量的变化直接转换为振荡频率的变化

在电容、电感、涡流等传感器中，若把 C 或 L 作为自激振荡器的谐振回路中的一个调谐参数，那么谐振频率为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_0}}$$



LC 振荡器

振荡频率和调谐参数的关系

以电容传感器为例，电容作为调谐参数。

$$\frac{\partial f}{\partial C} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2\pi} (LC)^{-\frac{3}{2}} L = -\frac{1}{2} \cdot \frac{f}{C}$$

在 f_0 附近， $C = C_0 + \Delta C$ ，而 $\Delta C \ll C_0$ ，所以 $C \approx C_0$ ，则

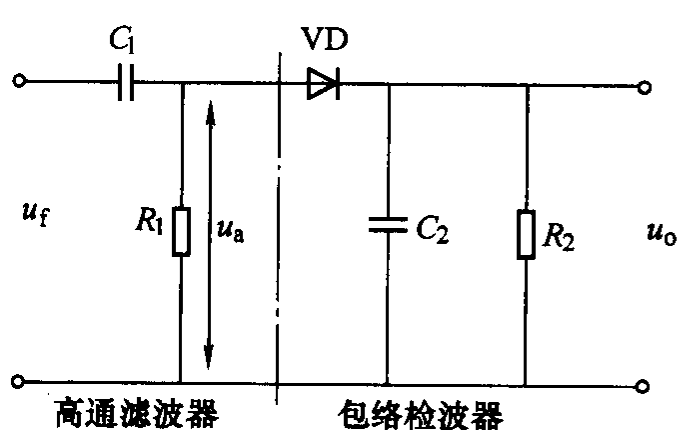
$$\Delta f = -\frac{f_0}{2} \cdot \frac{\Delta C}{C_0}$$

$$f = f_0 + \Delta f = f_0 \left(1 - \frac{\Delta C}{2C_0}\right) = f_0 (1 - k_c x(t))$$

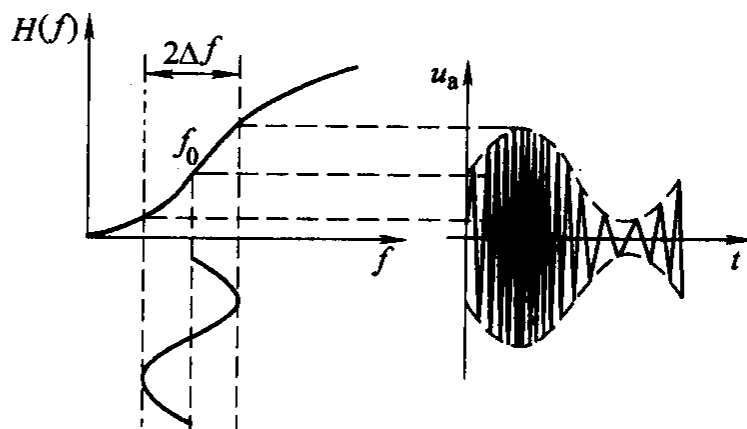
振荡频率和调谐参数的变化呈线性关系，也就是说，在小范围内， f 和被测量的变化有线性关系。

(二) 调频信号的解调

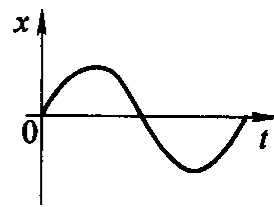
调频波的解调又称为鉴频，是将频率变化恢复成调制信号电压幅值变化的过程。



a)



b)



c)

鉴频器原理

由于调频信号的瞬时频率正比于调制信号 $x(t)$ ，它经过高通滤波器后，使原来等幅的调频信号的幅值变为随调制信号 $x(t)$ 变化的“调幅”信号，但频率仍与调频信号保持一致。



§5-2-4 滤波器

(P.128)



概述

滤波器是一种选频装置，可以使信号中特定的频率成分通过，而极大地衰减其它频率成分。

在测试装置中，利用滤波器的这种筛选作用，可以滤除干扰噪声或进行频谱分析。

一、滤波器分类

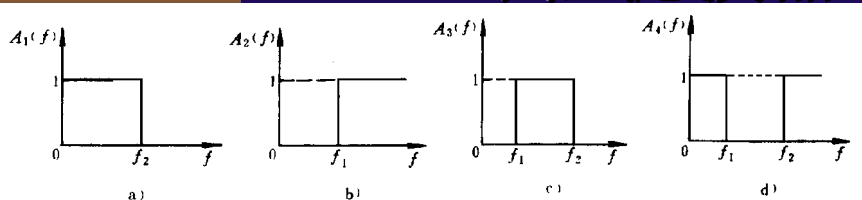
按选频作用分类

低通滤波器：低于 f_2 的频率成分几乎不受衰减的通过

高通滤波器：高于 f_1 的频率成分几乎不受衰减的通过

带通滤波器：高于 f_1 但低于 f_2 的频率成分几乎不受衰减的通过

带阻滤波器：高于 f_1 但低于 f_2 的频率成分受到极大衰减，其余频率成分几乎不受衰减的通过

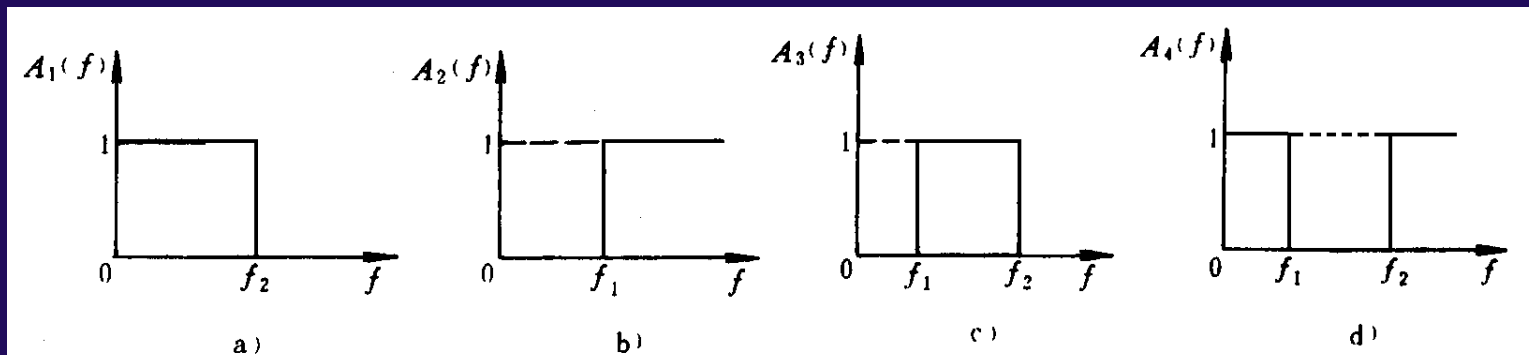


四类理想滤波器的幅频特性

a) 低通 b) 高通 c) 带通 d) 带阻

理想滤波器和实际滤波器的幅频特性

(P.129)



四类理想滤波器的幅频特性

a) 低通 b) 高通 c) 带通 d) 带阻

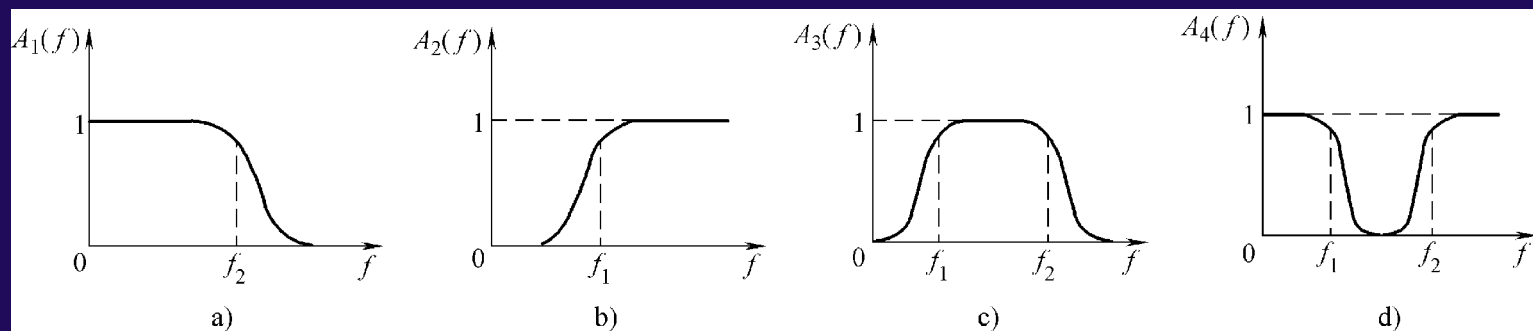


图3-10 滤波器的幅频特性

a) 低通 b) 高通 c) 带通 d) 带阻

其它几种分类方法

根据构成滤波器的元件类型分

RC 谐振滤波器

LC 谐振滤波器

晶体谐振滤波器

根据构成滤波器的电路性质

有源滤波器

无源滤波器

根据滤波器所处理的信号性质

模拟滤波器

数字滤波器



二、理想滤波器

1. 理想滤波器的频率响应

根据线性系统的不失真传输条件，
理想测量系统的频率响应函数：

$$H(f) = A_0 e^{-j2\pi f t_0}$$

理想滤波器的频率响应 $H(f)$ 应满足下列条件

$$H(f) = \begin{cases} A_0 e^{-j2\pi f t_0} & |f| < f_c \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

理想滤波器幅、相 - 频率特性

这种理想低通滤波器，将信号中低于截止频率 f_c 的频率成分予以传输，无任何失真；而将高于 f_c 的频率成分完全衰减掉。

(P.130)

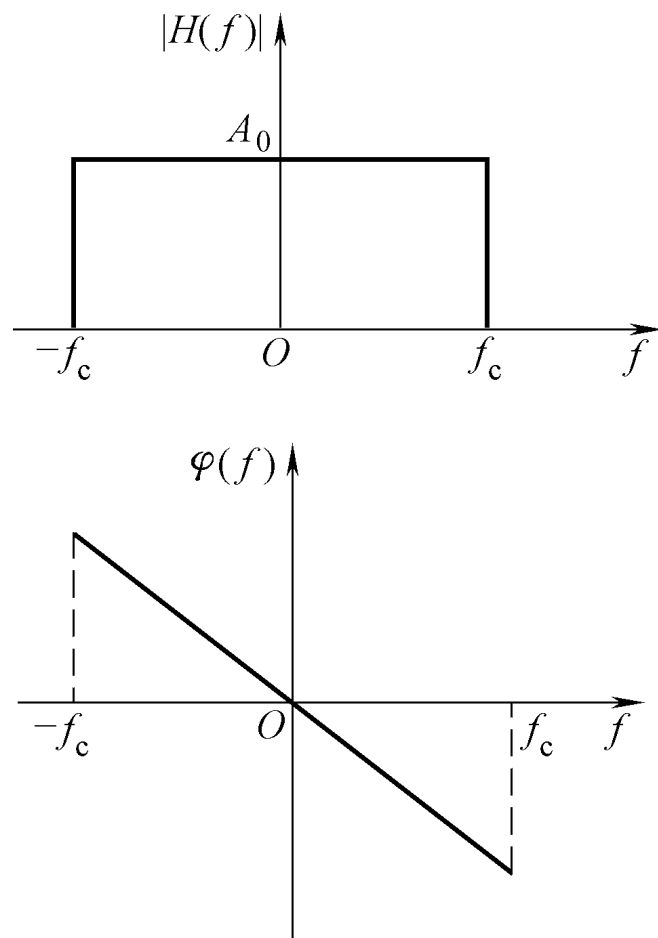


图3-11 理想滤波器的幅、相频特性

2. 理想滤波器的脉冲响应

(P.130)

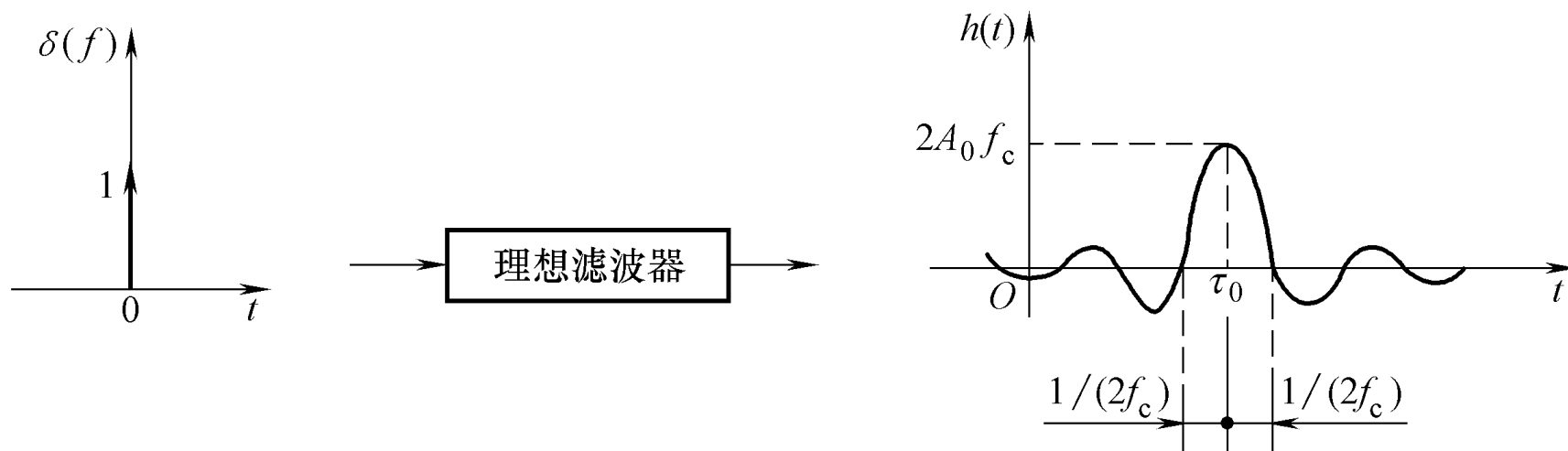


图3-12 理想滤波器的脉冲响应

$h(t)$ 的波形表明，在输入 $\delta(t)$ 到来之前，滤波器就有与该输入相对应的输出，显然，任何滤波器都不可能具有这种“先知”，所以，理想滤波器是不可能存在的。

3. 理想滤波器的阶跃响应

任意输入的响应就是该信号与系统单位脉冲响应的卷积。

$$u(t) = \begin{cases} 1 & t > 0 \\ \frac{1}{2} & t = 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad y(t) = h(t) \star u(t) = \int_{-\infty}^{\infty} u(\tau) h(t - \tau) d\tau$$

(P.131)

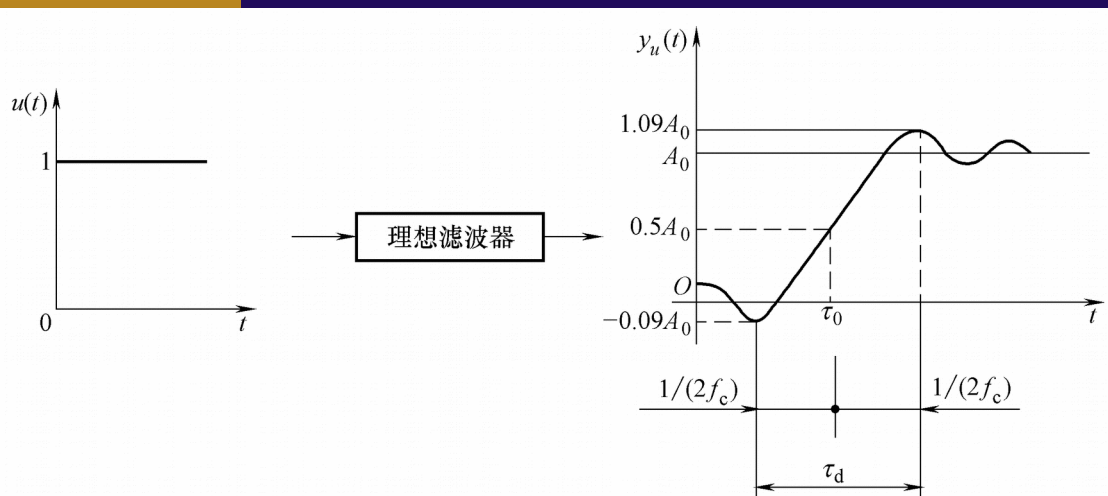
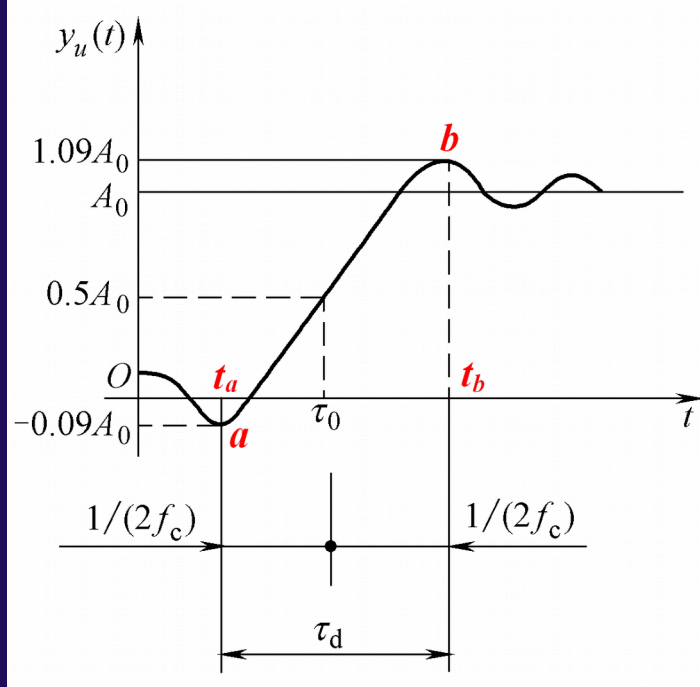


图3-13 理想滤波器对单位阶跃输入的响应

讨论理想滤波器的阶跃响应，是为了进一步了解滤波器的传输特性，确立关于滤波器的通频带宽和上升时间之间的关系。

上升时间和带宽

上升时间 τ_d ——输出从响应值 A_0 的-9%(a点)到稳定值 A_0 的109%(b点)需要的时间。



$$t_b - t_a = \frac{1}{f_c}$$

带宽 $B = f_c$

滤波器频带越宽，则响应的上升时间越短；
滤波器频带越窄，则响应的上升时间越长。



带宽和上升时间的关系

$$B\tau_d = 1$$

滤波器的带宽表示着它的频率分辨力，通带越窄则分辨力越高。

滤波器的高分辨能力和测量时快速响应的要求是互相矛盾的。

三、实际 RC 调谐式滤波器

(一) 实际滤波器的基本参数

- 纹波幅度 d
- 截止频率 f_c
- 带宽 B
- 品质因数 Q 值
- 倍频程选择性 W
- 滤波器系数
(矩形系数) λ

(P.132)

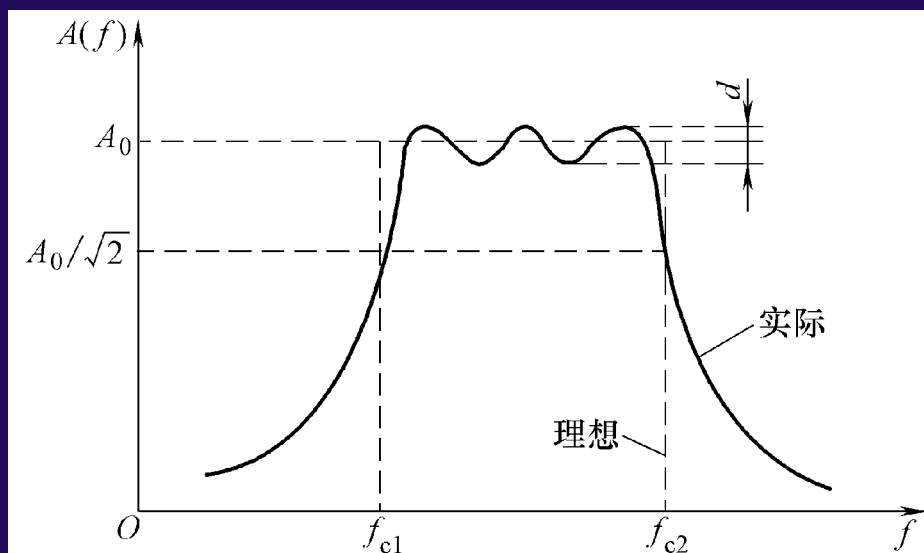
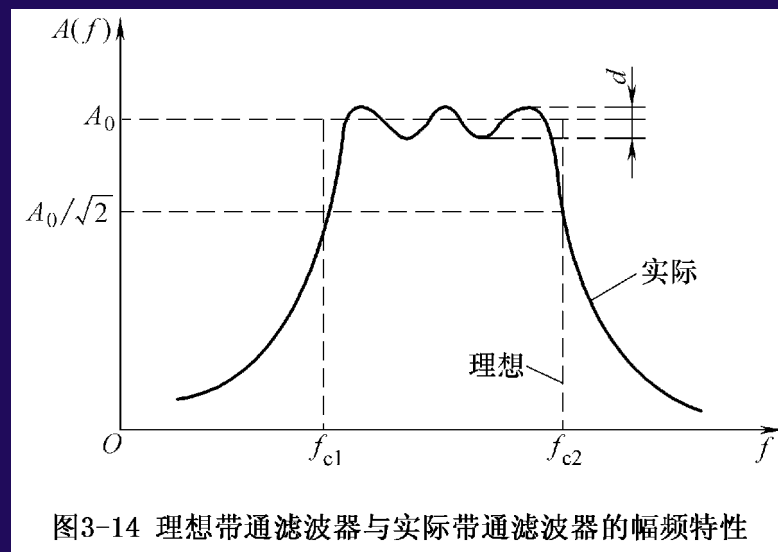


图3-14 理想带通滤波器与实际带通滤波器的幅频特性

1. 纹波幅度 d

在一定频率范围内，实际滤波器的幅频特性可能呈波纹变化。其波动幅度 d 与幅频特性的平均值 A_0 相比，越小越好，一般应远小于 -3dB，即

$$d \ll A_0 / \sqrt{2}$$



2. 截止频率 f_c

截止频率 f_c ——幅频特性值等于 $A_0/\sqrt{2}$ 所对应的频率。

截止频率也可说是半功率点所对应的频率。

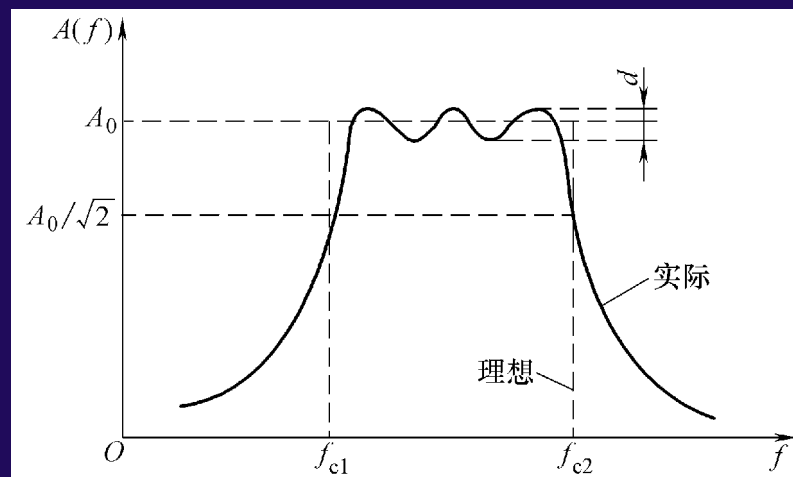


图3-14 理想带通滤波器与实际带通滤波器的幅频特性



3. 带宽 B

➤ B ——上下截止频率间的频率范围

$$B = f_{c_2} - f_{c_1}$$

带宽决定了频率分辨力——滤波器分离信号中相邻频率成分的能力。



4. 品质因数 Q

➤ Q ——中心频率 f_0 与带宽 B 之比

$$Q = \frac{f_0}{B} \quad f_0 = \sqrt{f_{c_1} f_{c_2}}$$

Q 越大，表明滤波器的分辨力越高



5. 倍频程选择性 W

倍频程选择性——在上截止频率 f_{c2} 与 $2f_{c2}$ 之间，或者在下截止频率 f_{c1} 与 $f_{c1}/2$ 之间幅频特性的衰减量，即频率变化一个倍频程时的衰减量，以 dB 为单位。

$$W = -20 \lg \frac{A(2f_{c2})}{A(f_{c2})} \quad \text{或} \quad W = -20 \lg \frac{A(f_{c1}/2)}{A(f_{c1})}$$

衰减的快慢，决定着滤波器对带外频率成分衰阻的能力。

衰减越快，滤波器选择性越好。



6. 滤波器系数（矩形系数） λ

滤波器选择性的另一种表示方法。

$$\lambda = \frac{B_{-60dB}}{B_{-3dB}}$$

对于理想滤波器： $\lambda = 1$

通常使用的滤波器： $1 < \lambda < 5$ 。



(二) RC 调谐式滤波器的基本特性

在测试系统中，常用 RC 滤波器。因为在这一领域中，信号频率相对讲是不高的，而 RC 滤波器电路简单，抗干扰性强，有较好的低频性能，并且选用标准阻容元件也容易实现。

1. 一阶 RC 低通滤波器 (P.133)

$$RC \frac{de_y}{dt} + e_y = e_x$$

令 $\tau = RC$, 则其传递函数为

$$H(s) = \frac{E_y(s)}{E_x(s)} = \frac{1}{\tau s + 1}$$

幅频特性和相频特性

$$A(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi f\tau)^2}}$$

$$\varphi(f) = -\arctan(2\pi f\tau)$$

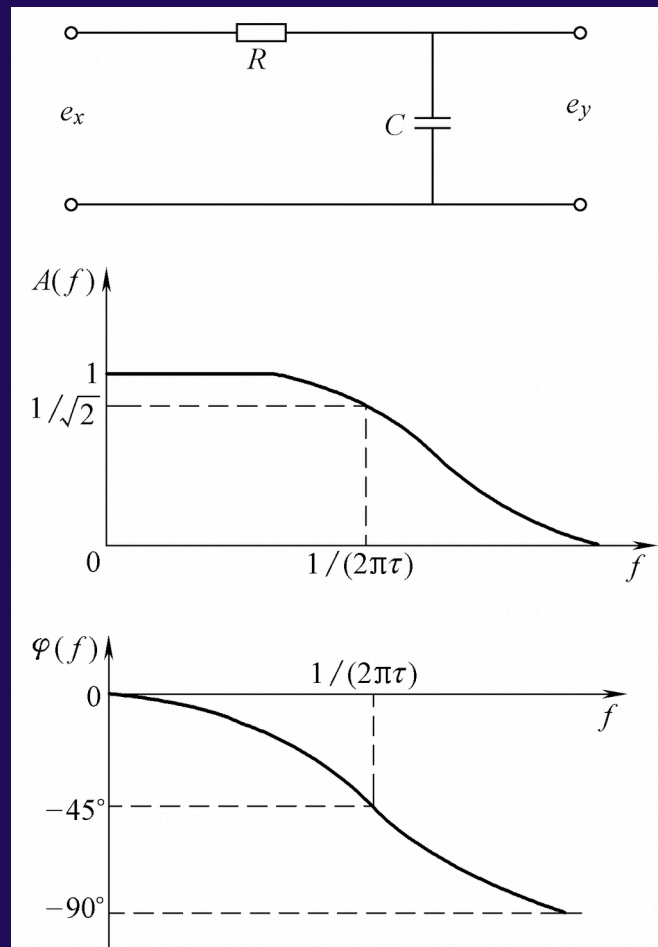


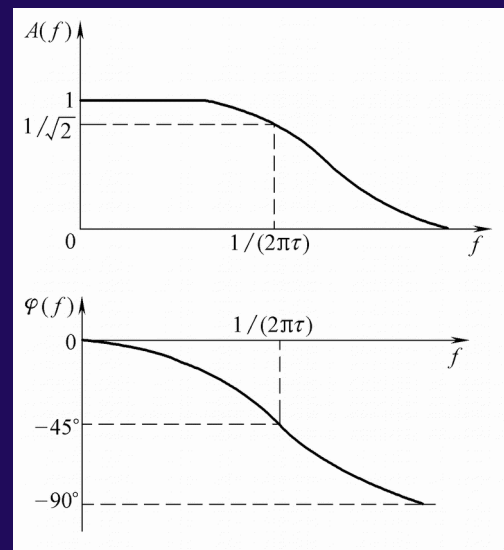
图3-15 RC低通滤波器的电路
及其幅频、相频特性

讨论

- 当 $f \ll 1/2\pi\tau$ 时, $A(f)=1$, RC 低通滤波器是一个不失真传输系统。
- 当 $f=1/2\pi\tau$ 时, $A(f)=\frac{1}{\sqrt{2}}$

$$f_{c_2} = \frac{1}{2\pi\tau}$$

RC 值决定着上截止频率
因此, 适当改变 RC 数值时,
就可以改变滤波器的截止频率。



2.RC 高通滤波器

$$e_y + \frac{1}{RC} \int e_y dt = e_x$$

令 $\tau = RC$ ，则其传递函数为

$$H(s) = \frac{\tau s}{\tau s + 1}$$

幅频特性和相频特性

$$A(f) = \frac{2\pi f\tau}{\sqrt{1 + (2\pi f\tau)^2}}$$

$$\varphi(f) = \arctan \frac{1}{2\pi f\tau}$$

(P.134)

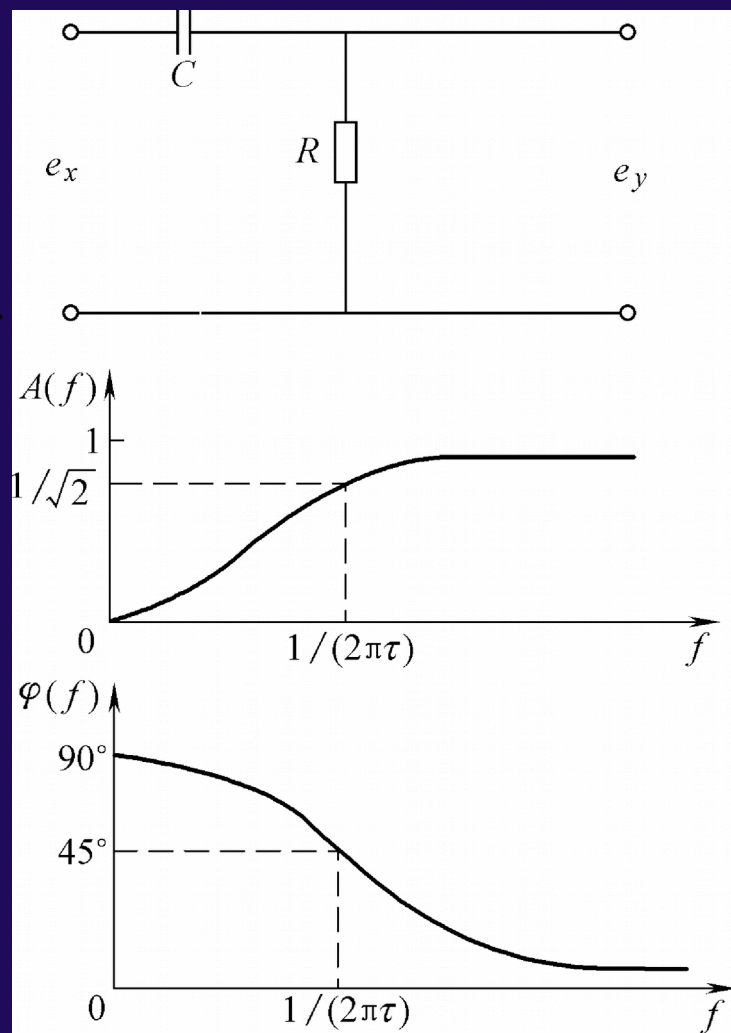


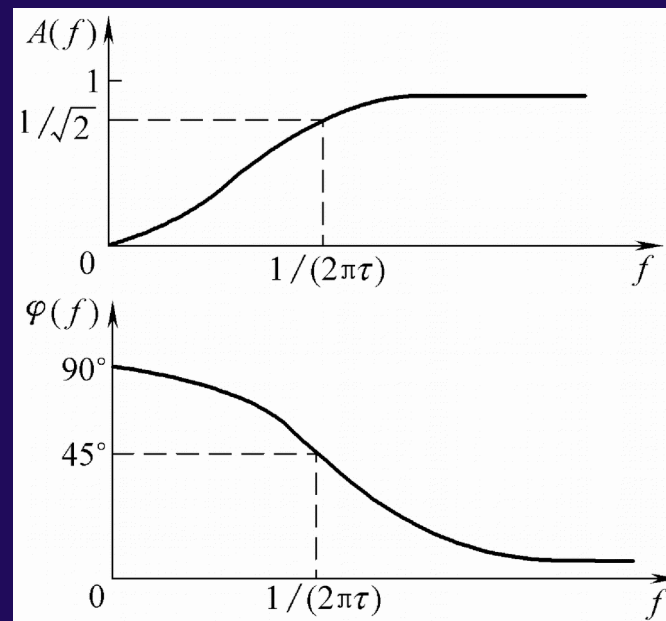
图3-16 RC高通滤波器及其幅频、相频特性

讨论

- 当 $f \gg 1/2\pi\tau$ 时, $A(f) \approx 1$, RC 高通滤波器是一个不失真传输系统。
- 当 $f = 1/2\pi\tau$ 时, $A(f) = \frac{1}{\sqrt{2}}$

$$f_{c_1} = \frac{1}{2\pi\tau}$$

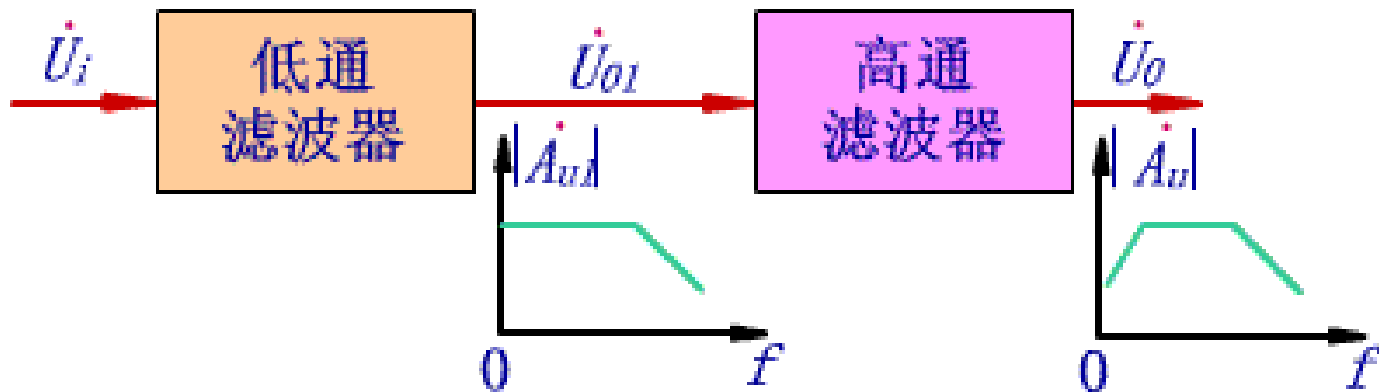
RC 值决定着下截止频率。



3. RC 带通滤波器

带通滤波器可以看成是低通滤波器和高通滤波器串联组成。

其中低通滤波器的上截止频率应大于高通滤波器的下截止频率。



带通滤波器的方框图

RC 带通滤波器

(P.134)

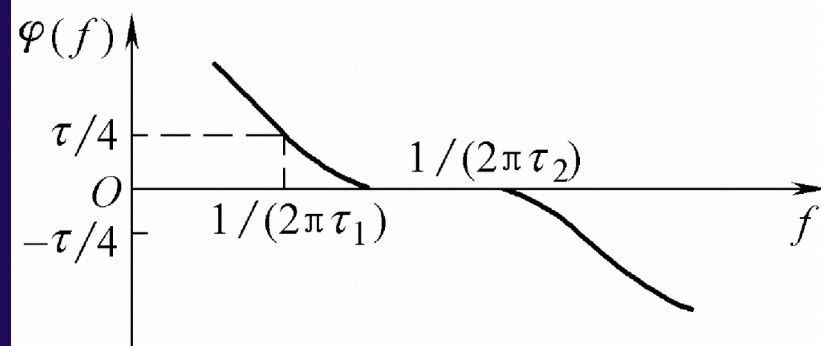
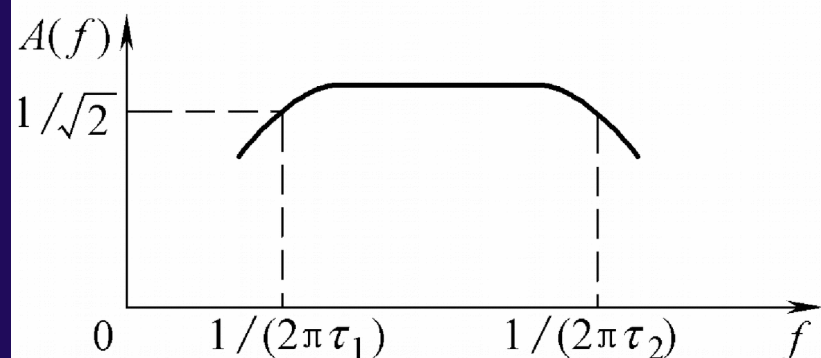
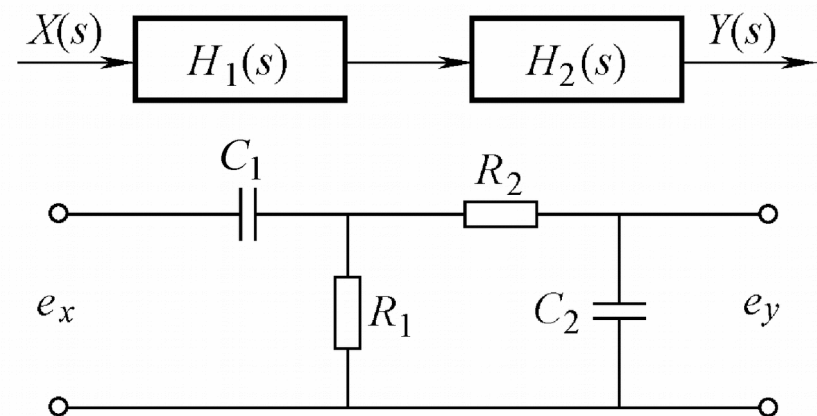


图3-17 RC带通滤波器及其幅频、
相频特性



RC 带通滤波器的截止频率

$$H(s) = H_1(s)H_2(s) \quad \begin{cases} H_1(s) = \frac{\tau_1 s}{\tau_1 s + 1} \\ H_2(s) = \frac{1}{\tau_2 s + 1} \end{cases}$$

$$A(f) = A_1(f)A_2(f)$$

$$\varphi(f) = \varphi_1(f) + \varphi_2(f)$$

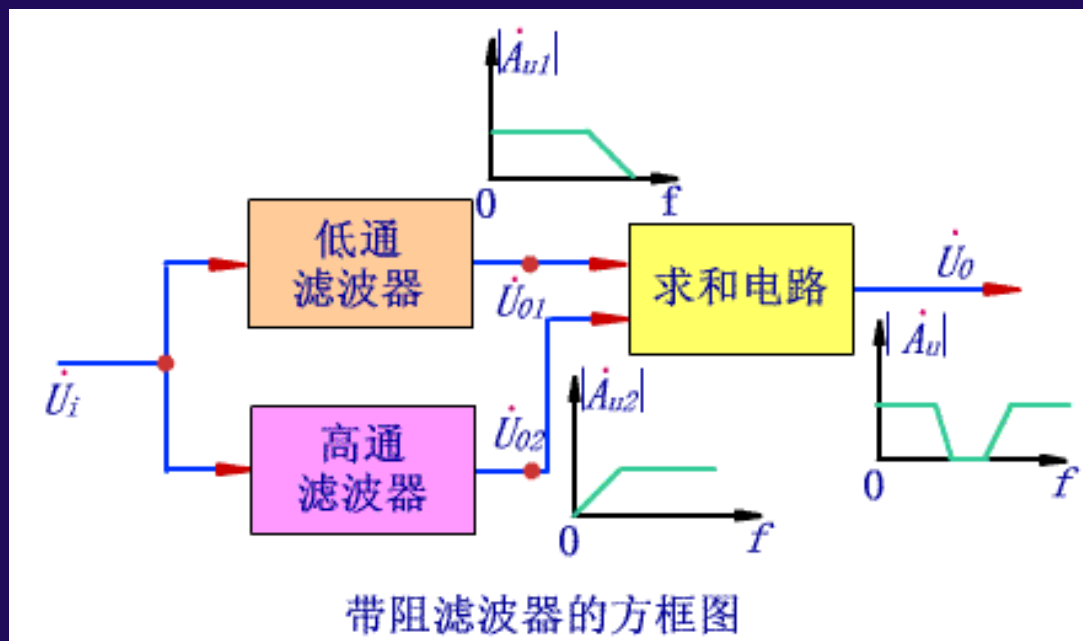
下截止频率 $f_{c_1} = \frac{1}{2\pi\tau_1}$

上截止频率 $f_{c_2} = \frac{1}{2\pi\tau_2}$

4. RC 带阻滤波器

带阻滤波器可以看成是低通滤波器和高通滤波器并联组成。

其中低通滤波器的上截止频率应小于高通滤波器的下截止频率。





四、带通滤波器在信号频谱分析中的应用

(参阅其它教材)

为了对信号做频谱分析，或者摘取信号中某些特殊频率成分，可将信号通过放大倍数相同而中心频率各个不同的多个带通滤波器，各个滤波器的输出主要反映信号中在该通带频率范围内的量值。



两种做法:

- 1 采用多只带通滤波器组成滤波器组，其各自中心频率固定的、但又按一定规律相隔的滤波器组。
- 2 使带通滤波器的中心频率是可调的，通过改变 RC 调谐参数而使其中心频率跟随所需要量测的信号频段。其可调范围一般是有限的。



§ 5-3 数字信号处理基础

一、数字信号处理的基本步骤

数字式传感器

(P.135)

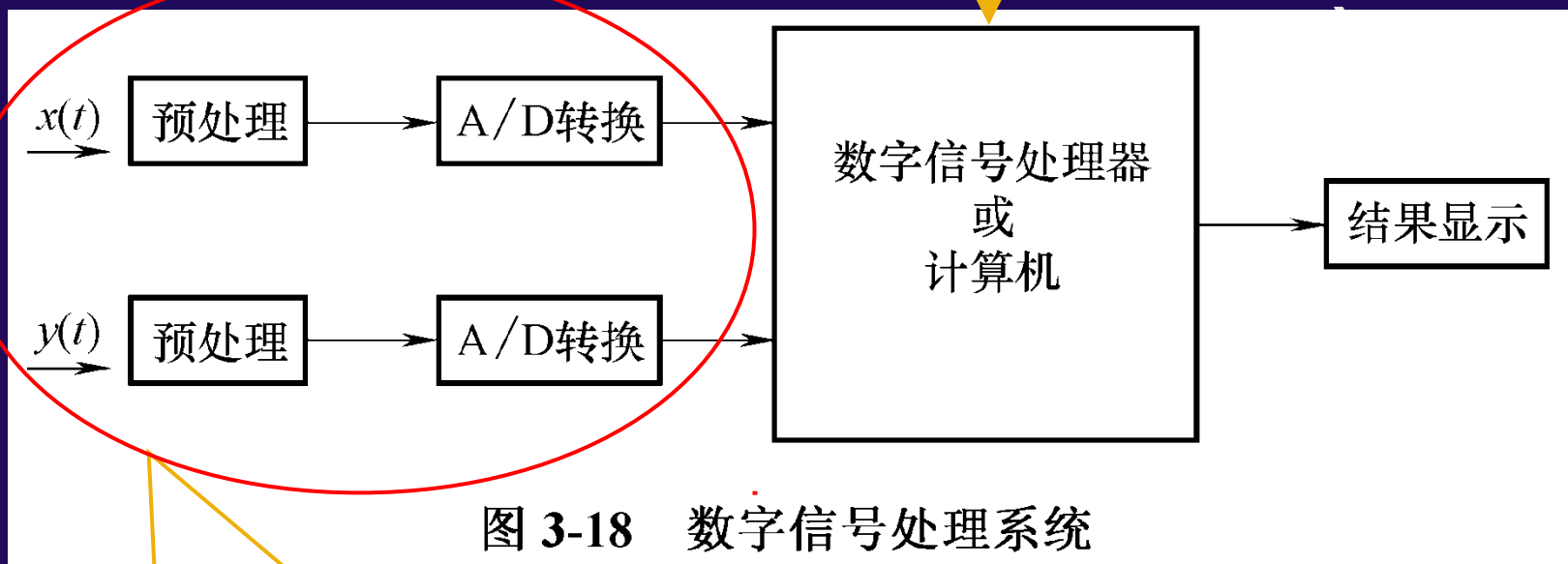


图 3-18 数字信号处理系统

从传感器获取的测试信号中大多为模拟信号



1. 预处理

预处理——把信号变成适于数字处理的形式，以减轻数字处理的困难。

- 电压幅值调理，以便适宜于采样。
- 滤波，以提高信噪比，并滤去信号中的高频噪声。
- 隔离信号中的直流分量
- 如原信号经过调制，则应先行解调。



2 模-数 (A/D) 转换

模-数 (A/D) 转换——模拟信号经采样、量化并转化为二进制数的过程。



3 对离散时间序列进行运算处理

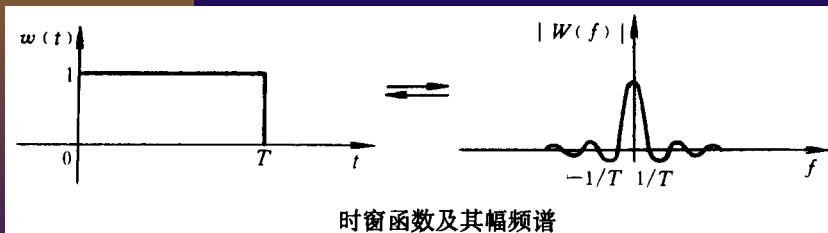
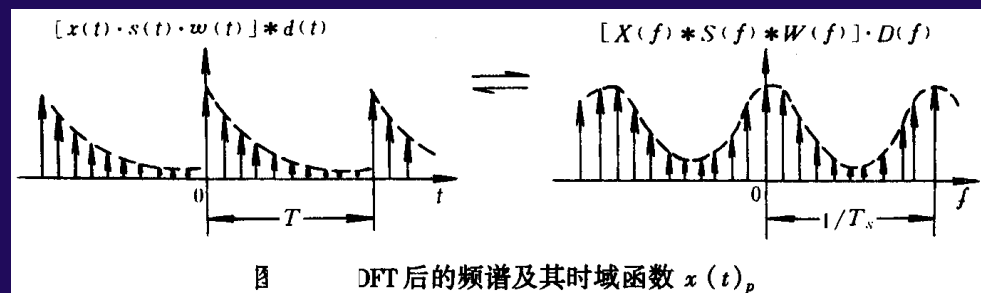
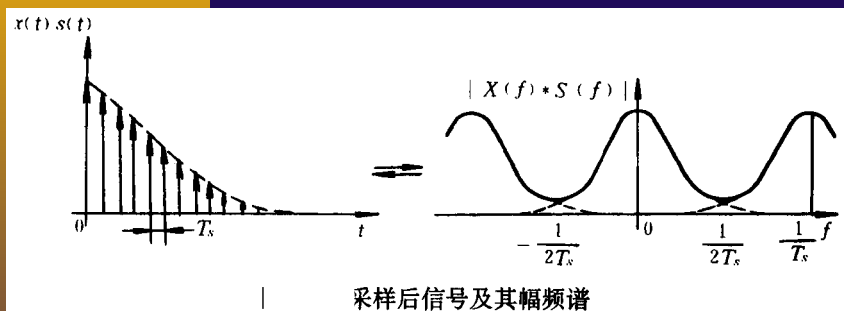
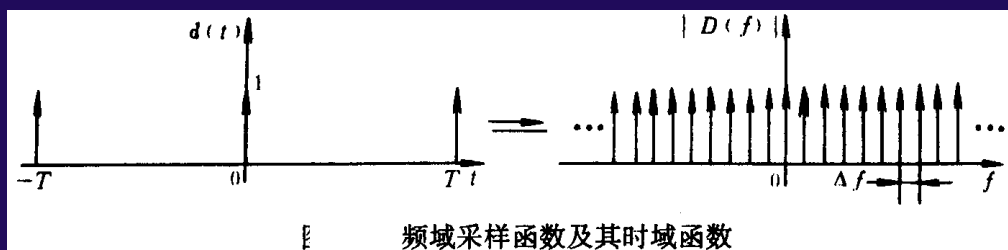
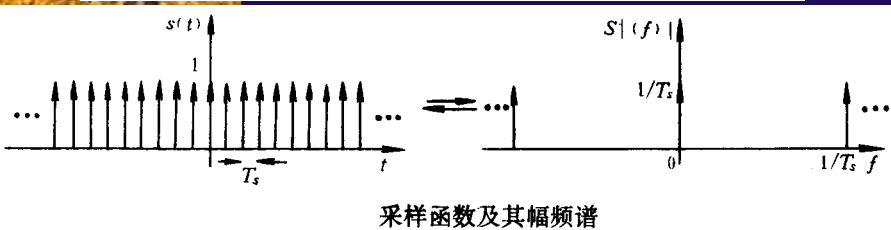
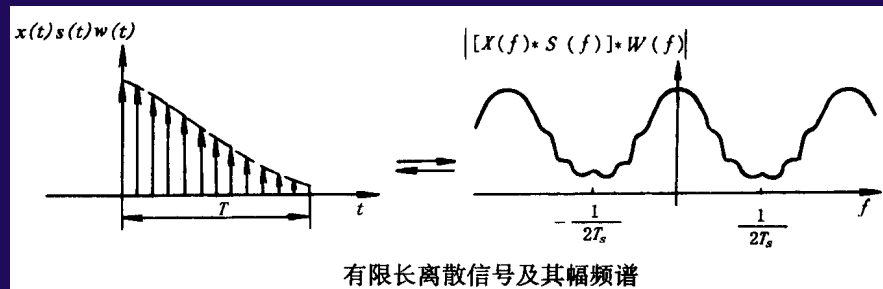
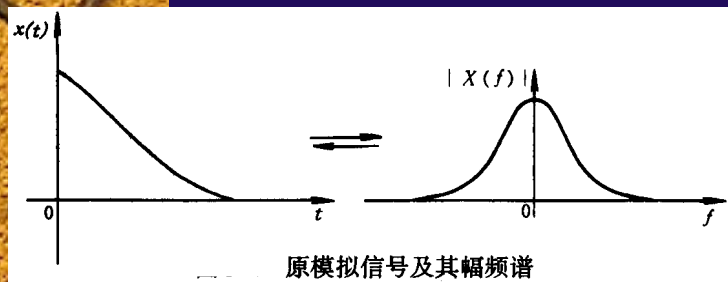
- 截断：把长时间的序列截断（因为计算机只能处理有限长度的数据）
- 加窗：人为的进行加权（乘以窗函数）以成为新的有限长的序列
- 把数据按给定的程序进行运算，如概率统计、相关分析、频谱分析等。



4 直接显示或打印运算结果

后接 **D/A** 和记录仪则可以绘制频谱图、奈奎斯特图等。

二、信号数字化出现的问题



如何恰当地运用数字信号处理这一技术，使之能够比较准确地提取原信号中的有用信息。



三、A/D、D/A 转换器

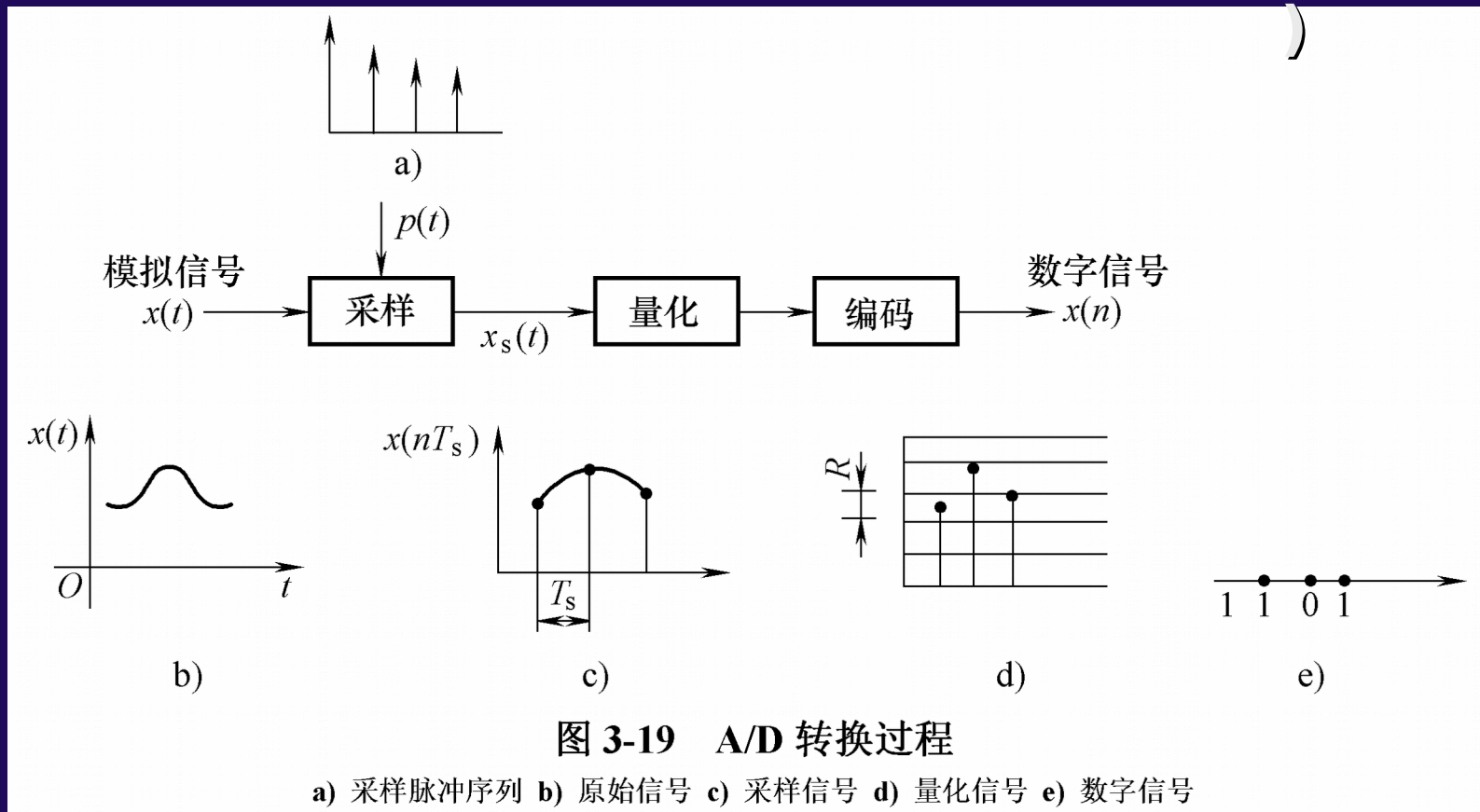
1. A/D 转换器

A/D 转换器是将连续模拟量转换成离散数字量的模 / 数转换装置，即把连续时间信号转换为与其相对应的数字信号的过程。

包括：采样、保持、量化、编码

A/D 转换工作原理

(P.136)



信号 $x(t)$ 经过上述变换以后，即变成了时间上离散、幅值上量化的数字信号。

1) 时域采样

- 采样——把连续时间信号变成离散时间序列的过程。

$$\text{采样} = x(t) \times g(t)$$

$g(t)$ ——等时距的单位脉冲序列，称为采样信号。

- 采样得到的离散时间序列

$$x(n) = x(nT_s)$$

$$= x(n/f_s) \quad n=0, 1, \dots, N-1$$

式中 $x(nT_s) = x(t)|_{t=nT_s}$

T_s ——采样间隔

N ——序列长度, $N = T/T_s$

f_s ——采样频率, $f_s = 1/T_s$

(P.140)

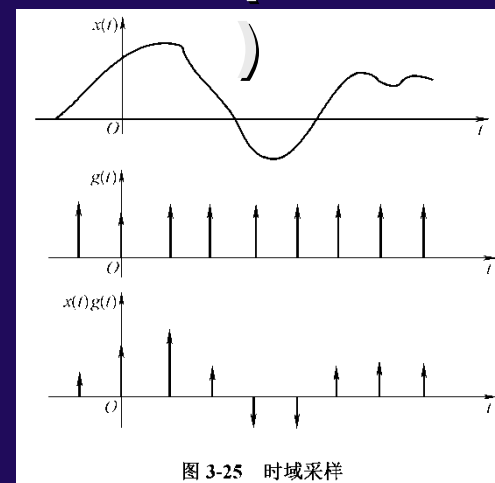


图 3-25 时域采样



2) 采样保持

- 由于采样后续的量化过程需要一定的时间 τ ，对于随时间变化的模拟输入信号，要求瞬时采样值在时间 τ 内保持不变，这样才能保证转换的正确性和转换精度，这个过程就是采样保持。
- 实际采样保持后的信号是阶梯形的连续函数。
- 采样保持是在 A/D 转换器前级设置采样保持电路。

3) 量化

量化（幅值量化）——采用二进制数码组来表示采样所得的离散信号的电压幅值，使离散信号变成数字信号的过程。

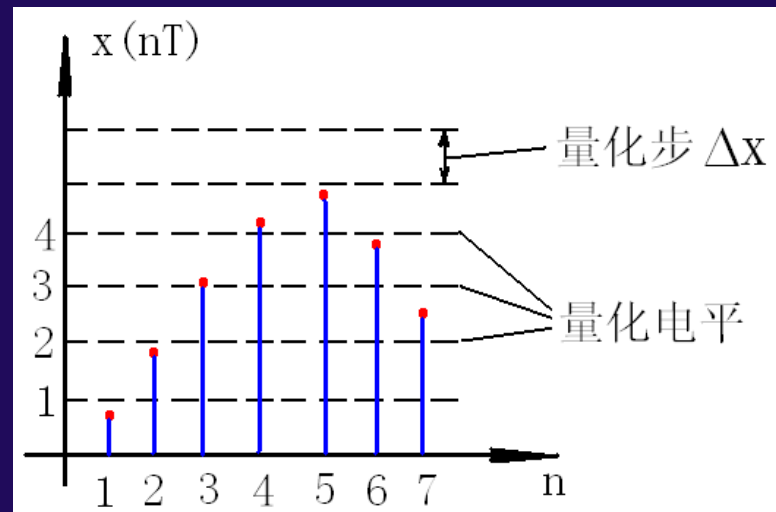
两相邻量化电平之间间隔 Δx

$$\Delta x = \frac{E}{2^b}$$

E —— A / D 转换器允许的
的

动态工作范围

b —— A / D 转换器的位
数



量化误差

量化误差 e —— 量化电平与信号实际电平之间的差值。

量化误差的最大值:

$$\pm \frac{\Delta x}{2}$$

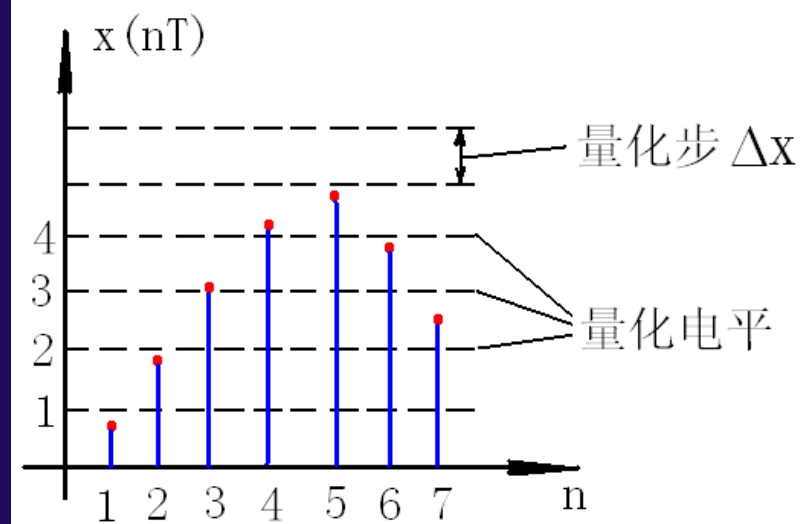
概率密度分布: $\frac{1}{\Delta x}$

均方值:

$$\sigma_e^2 = \int_{\Delta x/2}^{\Delta x/2} e^2 \frac{1}{\Delta x} de = \frac{\Delta x^2}{12}$$

标准误差:

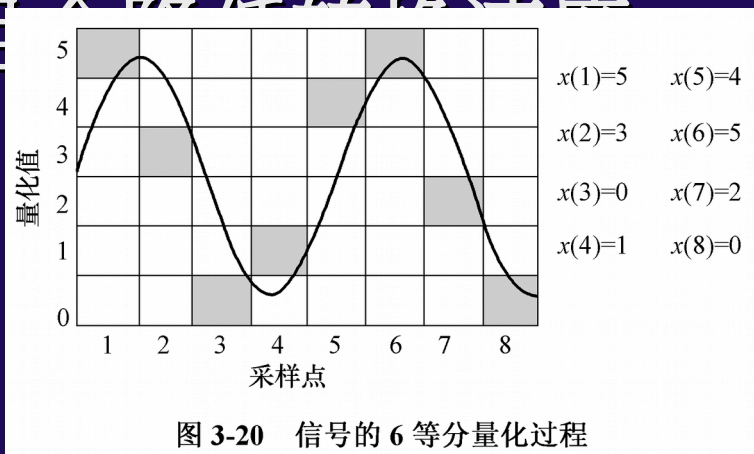
$$\sigma_e = 0.29 \Delta x$$



Δx 在一定程度上表示了相对量化精度

量化误差引入的噪声

- 量化误差是叠加在信号采样值 $x(nT_s)$ 上的随机噪声，量化误差的大小取决于 A/D 转换器的位数，位数越高，量化误差越小。
- A/D 转换器的位数选择应视信号的具体情况量化的精度要求而定。但位数高，则价格贵，而且会降低抽样速率。



(P.138)



4) 编码

- 编码——把量化信号（量化后的信号）的数值用二进制代码表示。
- 编码有多种形式，最常用的是二进制编码，在数据采集中，被采集的模拟信号是有极性的，因此编码也分为单极性编码和双极性编码两大类。



2、A/D 转换器的技术指标

1 分辨力

一般第一位用来表示正、负符号

$$\text{最小模拟电压} = \frac{\text{模拟电压变化范围}}{2^{b-1}}$$

A/D 转换器的分辨力与其输出二进制数码的位数有关。

位数越多，则量化增量越小，量化误差越小，分辨力也就越高。

常用有 8 位、10 位、12 位、16 位、24 位、32 位等。



A/D 转换器的技术指标 (2)

2 转换精度

A / D 转换器数字转换的精度由最大量化误差决定。

$$\text{全量程相对误差} = \frac{\text{最大量化误差}}{\text{模拟电压变化范围}} \times 100\%$$

由于含有 A / D 转换器的模数转换模块通常包括有模拟处理和数字转换两部分，因此整个转换器的精度还应考虑模拟处理部分（如积分器、比较器等）的误差。

一般转换器的模拟处理误差与数字转换误差应尽量处在同一数量级，总误差则是这些误差的累加和。



A/D 转换器的技术指标 (3)

3. 转换速度

- 转换速度是指完成一次转换所用的时间，即从发出转换控制信号开始，直到输出端得到稳定的数字输出为止所用的时间。
- 转换时间越长，转换速度就越低。
- 转换速度与转换原理和转换器的位数有关，一般在几微秒至几百毫秒之间。
- 由于转换器必须在采样间隔 T_s 内完成一次转换工作，因此转换器能处理的最高信号频率就受到转换速度的限制。



A/D 转换器的技术指标 (3)

4. 模拟信号的输入范围

A / D 转换器的模拟信号的输入有一定的范围，如 $5V$ 、 $-5V$ 、 $\pm 5V$ 、 $10V$ 、 $-10V$ 、 $\pm 10V$ 等，根据具体的使用情况恰当的选择 A/D 转换器模拟信号的输入范围。

3、D/A 转换器

- D/A 转换器是把数字信号转换为电压或电流信号的装置。

(P.139)

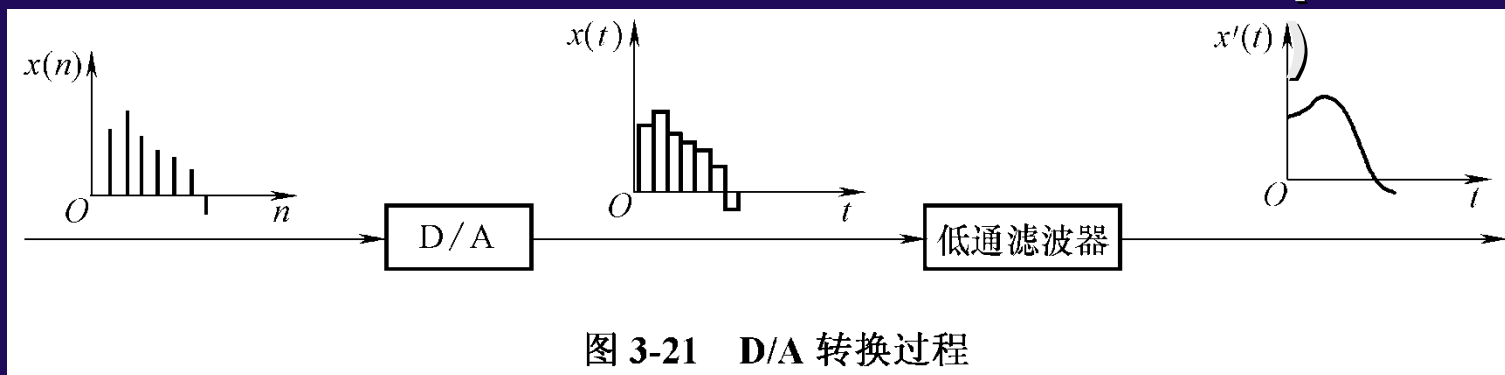


图 3-21 D/A 转换过程

- 只要采样间隔足够密，就可以精确地复现原信号。
- 为减小零阶保持电路带来的电噪声，还可以在其后接一个低通滤波器。



4、D/A 转换器的技术指标

自学 (P.139)

- 分辨力
- 转换精度
- 转换速度
- 模拟信号的输出范围

四、采样定理

采样间隔的选择是一个重要的问题。

- 采样间隔太小（采样频率高），则采样效果很好，但计算工作量非常大；
- 若采样间隔过大（采样频率低），则可能丢掉有用的信息。

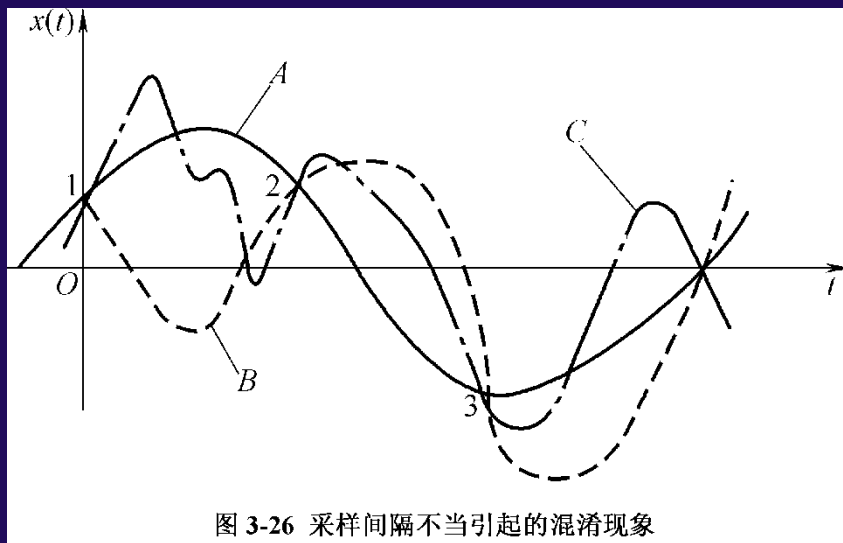


图 3-26 采样间隔不当引起的混淆现象

(P.141
)

1. 混叠现象

(P.141)

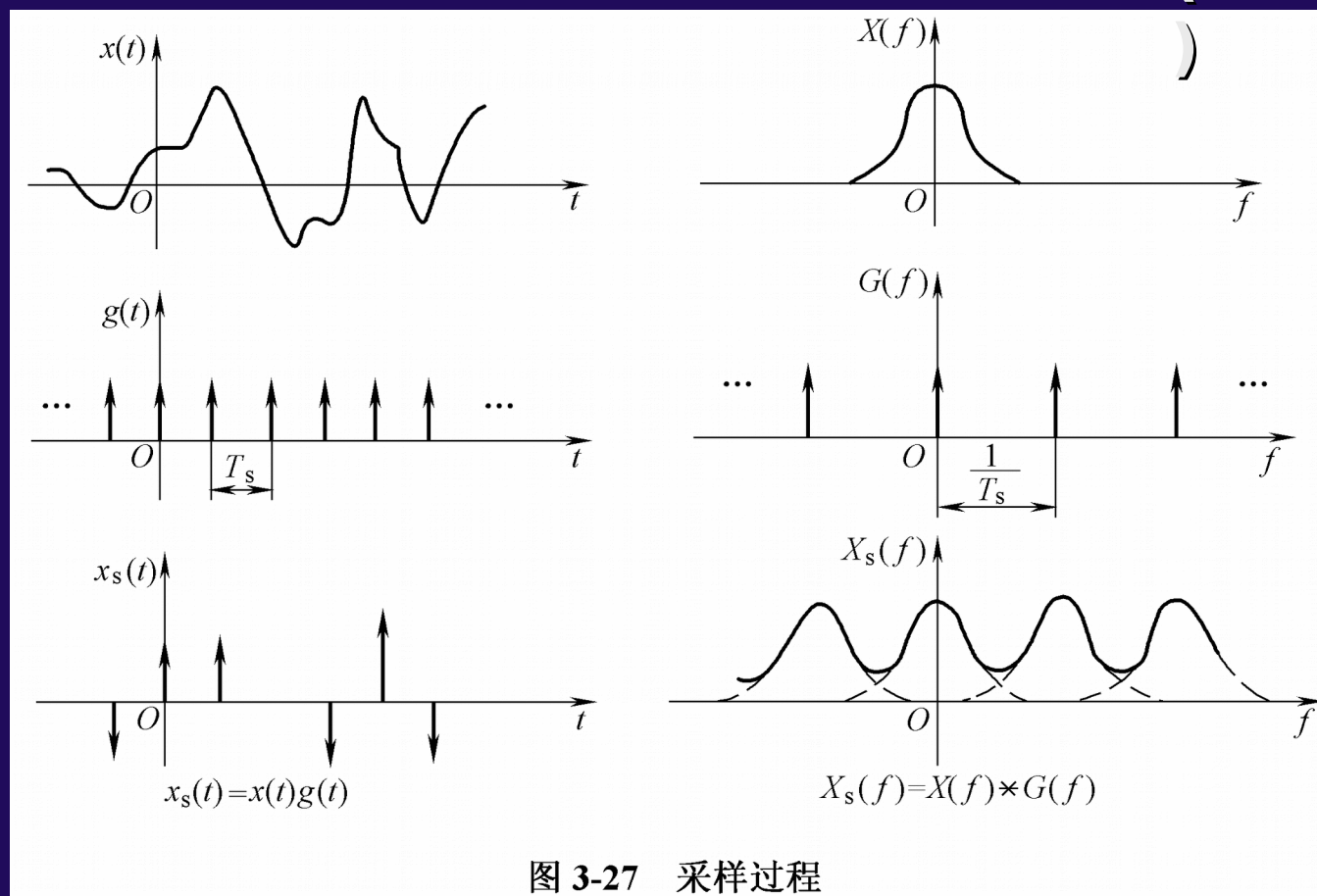


图 3-27 采样过程

混叠现象——由于采样频率 f_s 不够而产生频谱混叠。

2. 采样间隔的选择

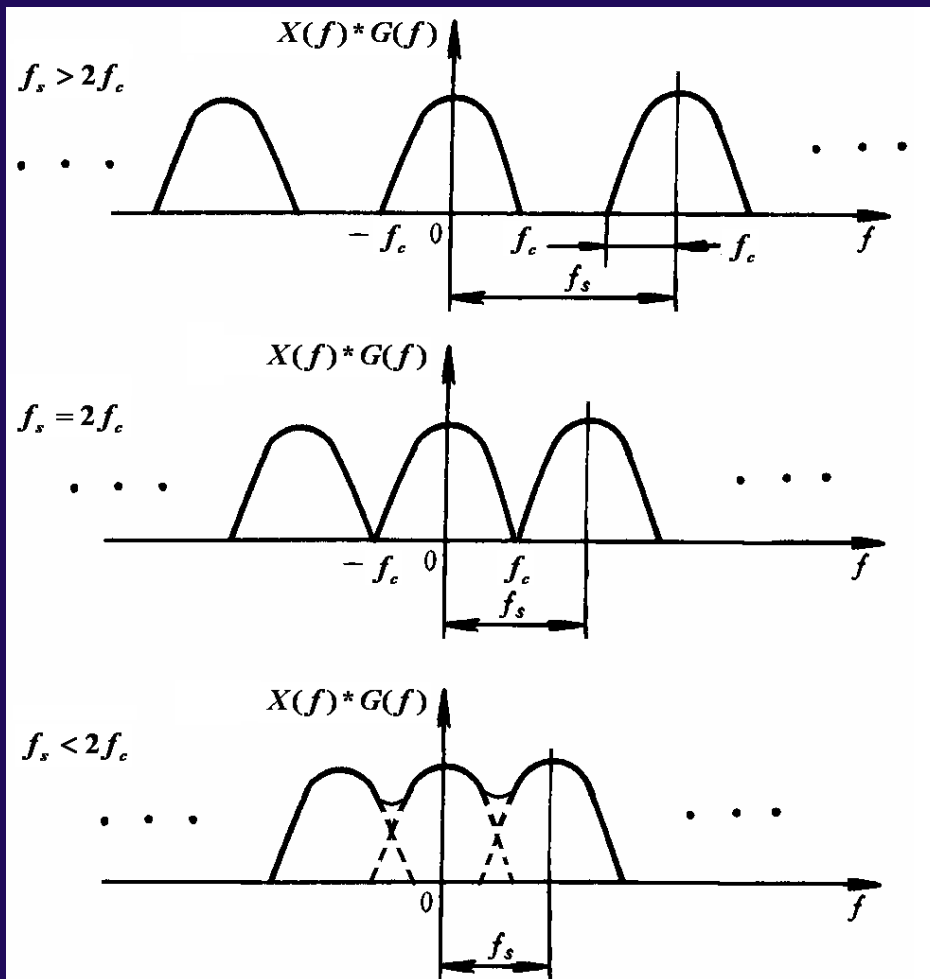


图3-28 不产生混叠的条件

(P.141)

可用理想滤波器恢复原信号，而不改变原频谱

恢复不了原信号，因为频谱有了歧（部分幅值发生歧变）



3. 采样定理

采样频率应大于两倍的信号最高频率。

$$f_s = \frac{1}{T_s} > 2f_c$$

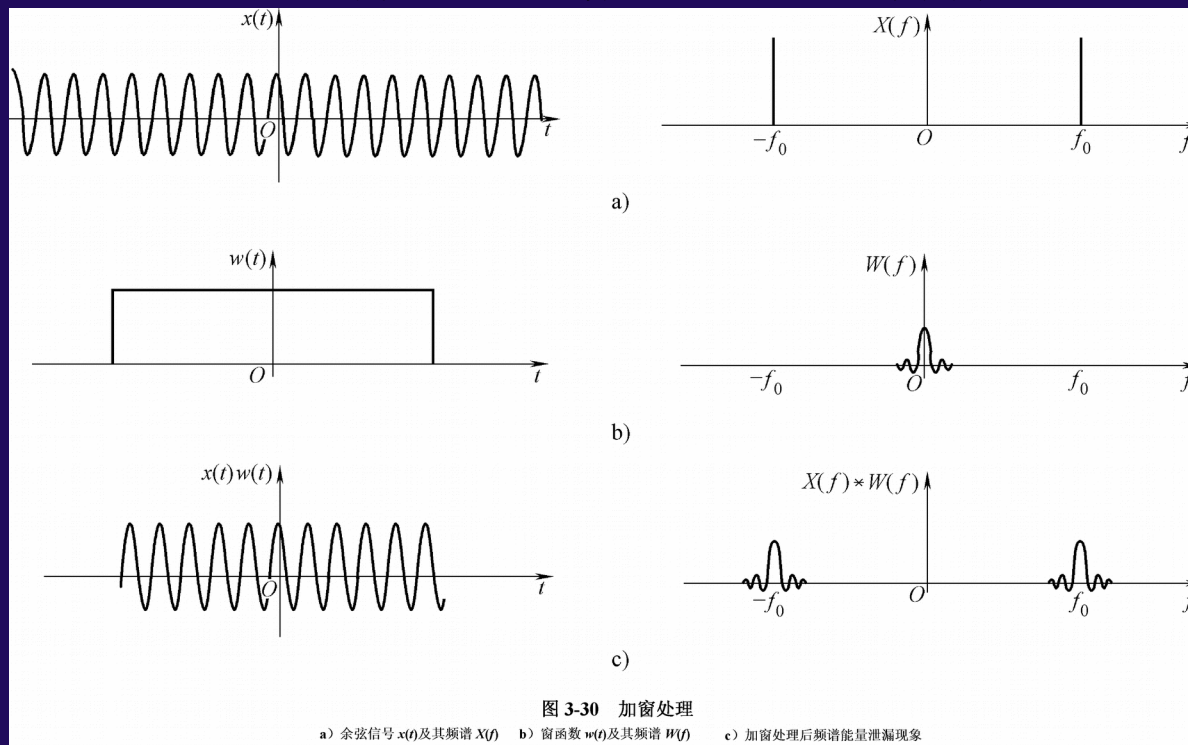
讨论:

- 1) 实际工作中, 由于不是理想滤波器, 即不可能有理想的截止特性, 故 $f_s = 2f_c$ 是不够的, 所以一般 $f_s = (3 \sim 5)f_c$;
- 2) 一般信号不是有限带宽而是无限带宽的信号, 可先通过模拟低通滤波器滤去部分高频信号。

五、截断、泄漏和窗函数

1

截断——将无限长的信号乘以有限宽的窗函数。



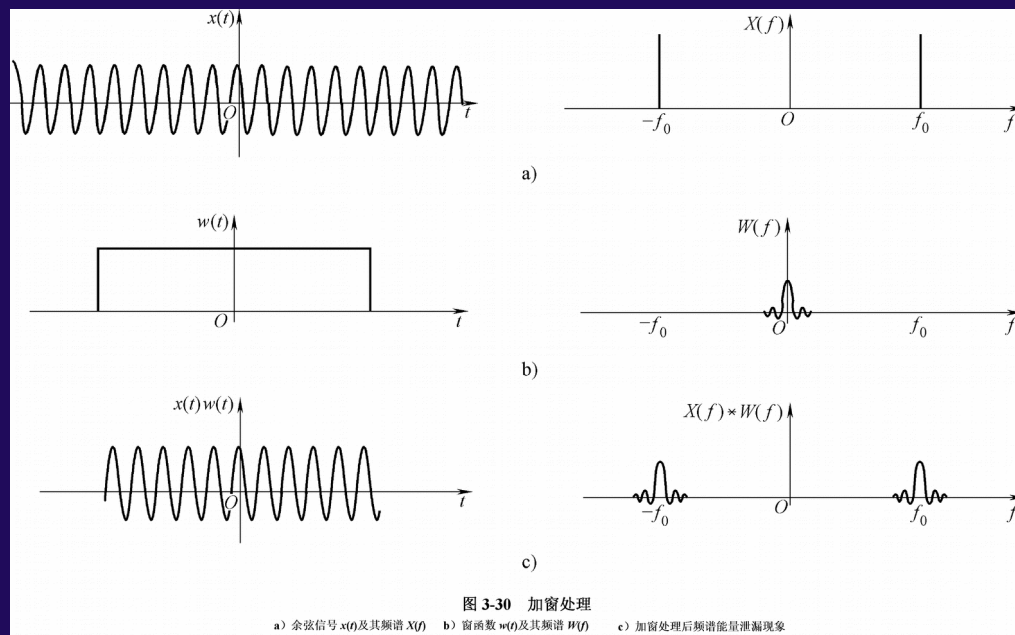
(P.143)

截断后造成的影响:

- 1) 原先能量集中→能量分散
- 2) 频谱有限宽信号→频域无限宽信号

2. 泄漏

泄漏——将无限长信号截取后，其频谱中除了主要频率分量外，出现了许多附加频率分量，从而造成能量不是集中于确定频率上，部分能量泄漏到其它频率上。





2. 泄漏

泄漏大小与两个因素有关：

1) 与截断长度 T 有关

时间尺度改变特性： T 增大，频谱变窄，中心频率以外的频率分量衰减较快，误差小，但工作量大。

2) 与主瓣和旁瓣比例有关

对于窗函数的基本要求为：窗谱的主瓣要窄且高，以提高分辨率；旁瓣高度与主瓣高度之比尽可能小，旁瓣衰减快，正负交替接近相等，以减少泄漏或负谱现象。

从减少泄漏的角度来说，汉宁窗为最佳，因为它的旁瓣较小。

3. 窗函数

(P.144-146)



图 3-32 时窗函数及其幅频谱

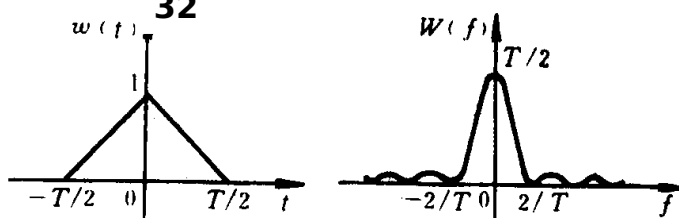


图 3-33 三角窗函数及其幅频谱

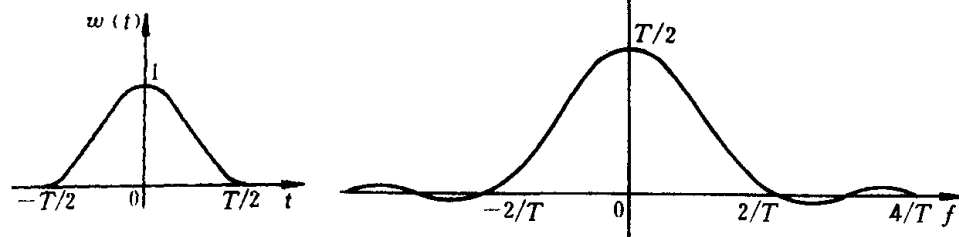
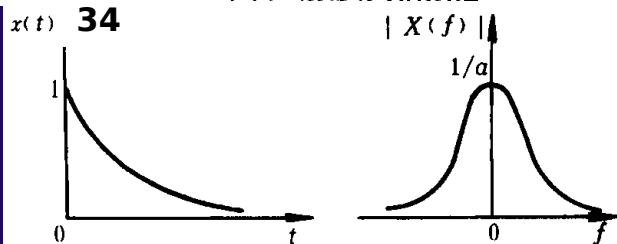


图 3-34 汉宁窗函数及其幅频谱



指数窗及其幅频谱

➤ 矩形窗的特点：主瓣最窄，旁瓣则较高，泄漏较大

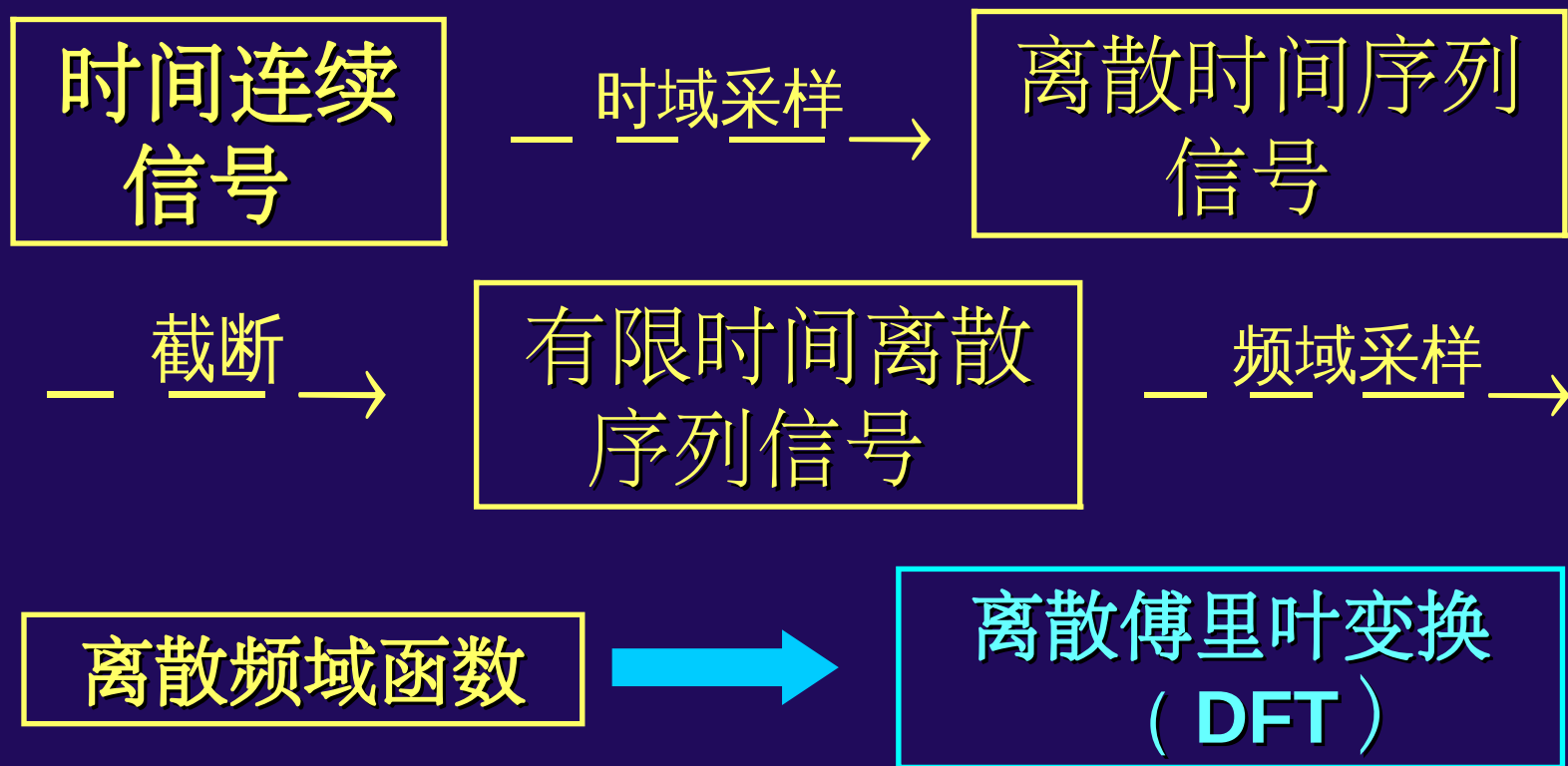
➤ 三角窗的特点：主瓣宽度约为矩形窗的两倍，但旁瓣低并且不会出现负值。

➤ 汉宁窗的特点：旁瓣明显降低，具有抑制泄漏的作用；但主瓣较宽，致使频率分辨能力较差。

➤ 指数窗的特点：无旁瓣，但主瓣很宽，其频率分辨能力低。

六、离散傅里叶变换及其快速算法

离散傅里叶变换的整个过程包括三大部分：
时域采样、时域截断和频域采样



离散傅里叶变换的图解过程

(P.148)

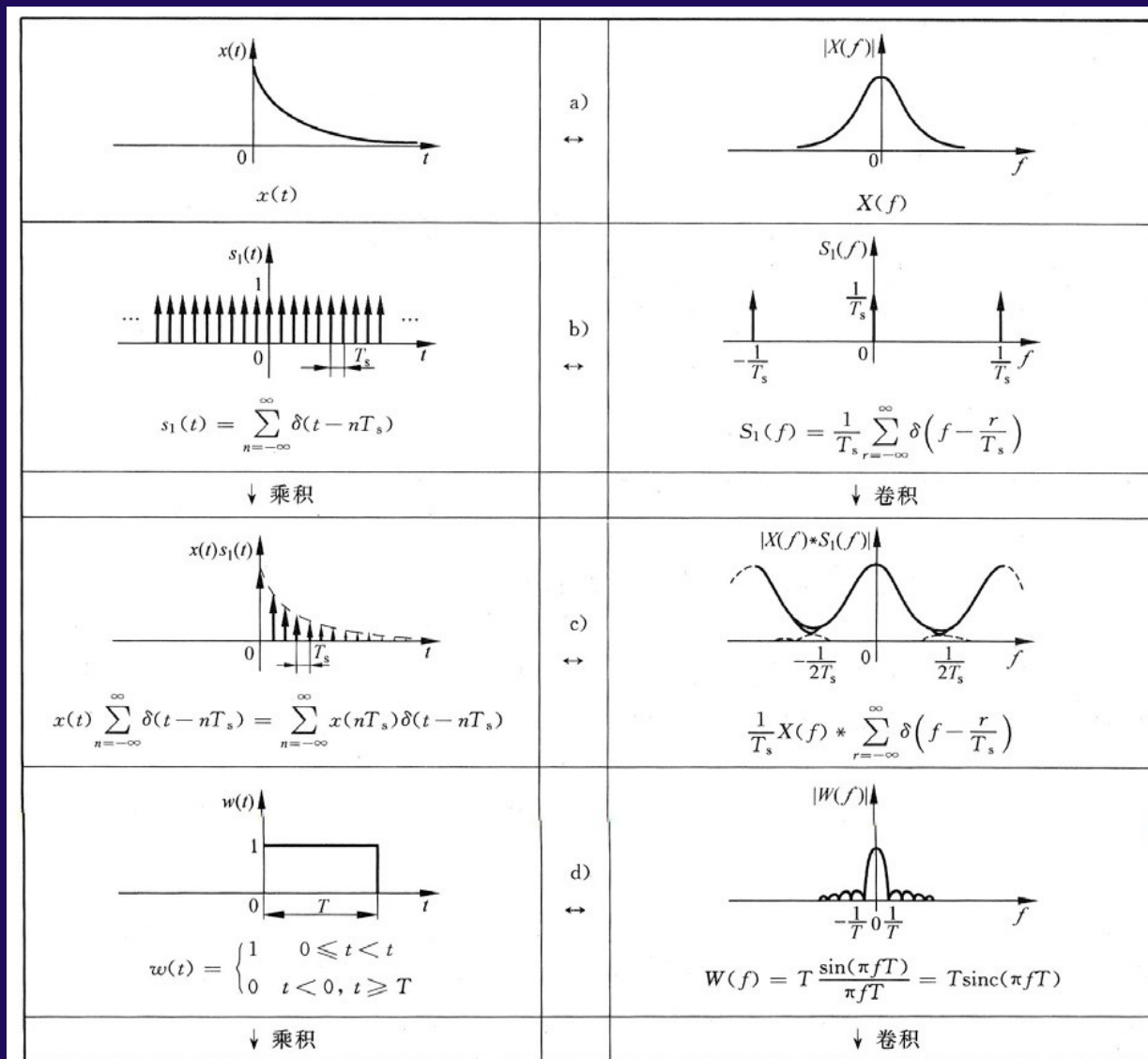


图 3-39 离散傅里叶变换的图解过程

离散傅里叶变换的图解过程

(P.149)

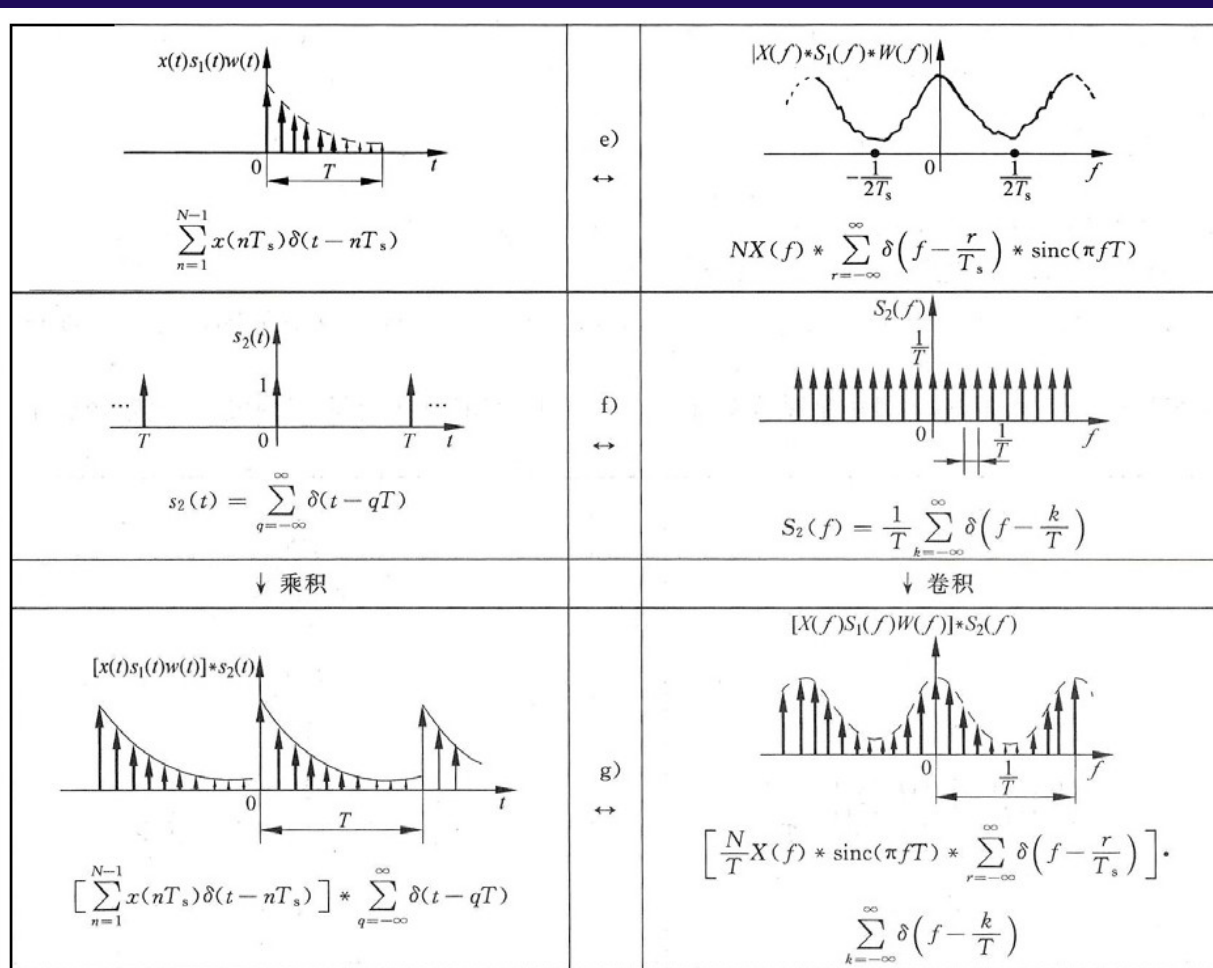


图 3-39 离散傅里叶变换的图解过程 (续)

离散傅里叶变换 (DFT)

FFT——快速傅里叶变

换

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi nk/N} = X(k+N) \quad \text{简称 } DFT$$

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{j2\pi nk/N} \quad \text{简称 } IDFT$$

式中 N ——样本数, $N=T_o/T_s$,

T_o ——时窗函数宽度,

T_s ——采样间隔

n ——时序号 ($n=0, 1, 2, \dots, N-1$)

k ——频序号 ($k=0, 1, 2, \dots, N-1$)

七、栅栏效应

(P.150)

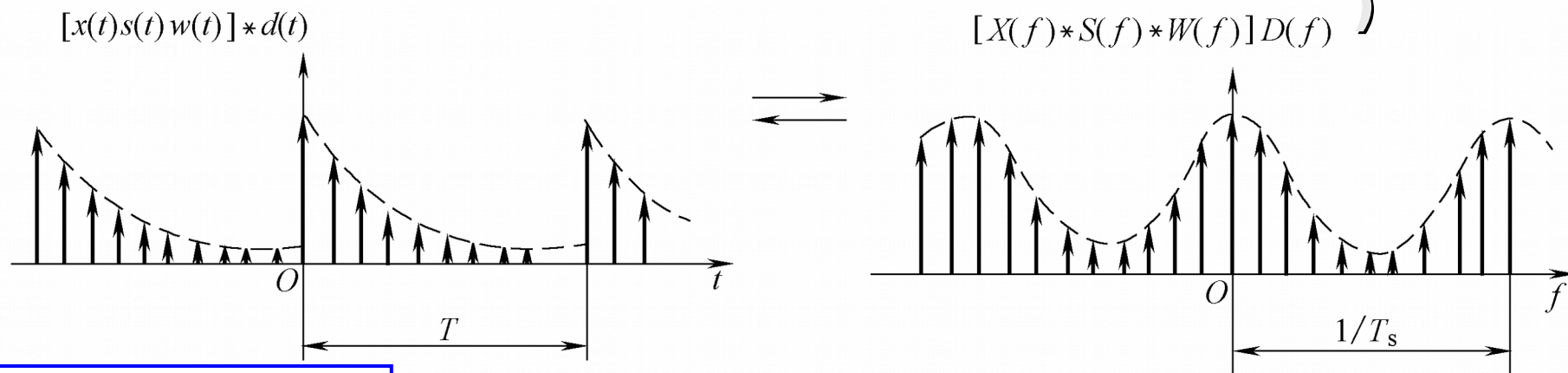


图 3-40 频域采样后的频谱及其时域函数

频率离散化后，将时域信号“改造”成周期信号。

在频率区间上对信号频谱进行 N 点等间隔采样，得到的是若干个离散的频谱点 $X(k)$ ，且它们限制在基频的整数倍上，这就好像在栅栏的一边通过缝隙看另一边的景象一样，只能在离散点处看到真实的景象，其余部分频谱成分被遮挡，所以称之为**栅栏效应**。

栅栏效应的影响

- 频谱的离散取样造成了栅栏效应，谱峰越尖锐，产生误差的可能性就越大。
- 减小栅栏效应方法：尾部补零，使谱线变密，增加频域采样点数
- 时域采样和频域采样都有相应的栅栏效应。
 - 时域采样如满足采样定理要求，栅栏效应不会有什么影响。
 - 频域采样的栅栏效应则影响颇大，“挡住”或丢失的频率成分有可能是重要的或具有特征的成分，以致于整个处理失去意义。



总结——模拟信号处理基础

- 采用模拟信号处理技术对传感器输出信号进行预处理，是传感器到显示、记录或数字化分析仪器的前向通道中必不可少的重要环节，常称之为信号调理。
- 常用的信号调理环节有：电桥、放大、滤波、调制与解调等。

总结——调制与解调

1. 调制与解调的概念

- 调制——利用调制信号（测试信号）来控制或改变高频振荡信号（载波信号）的某些参数（如幅值、频率、相位），使它随着被测信号作有规律变化的过程。
- 解调——从已调制波中恢复出调制信号的过程。

调制 { 幅值受控——调幅 (AM)
频率受控——调频 (FM)
相位受控——调相 (PM)

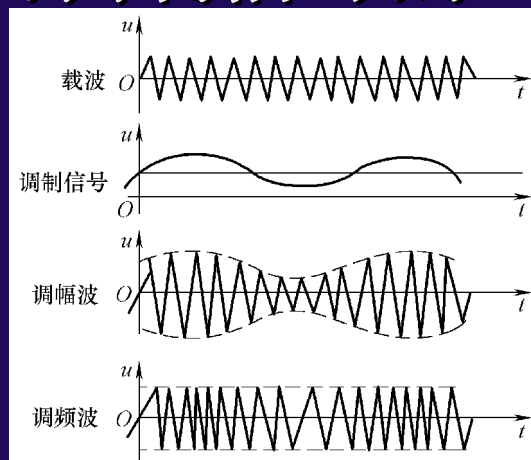
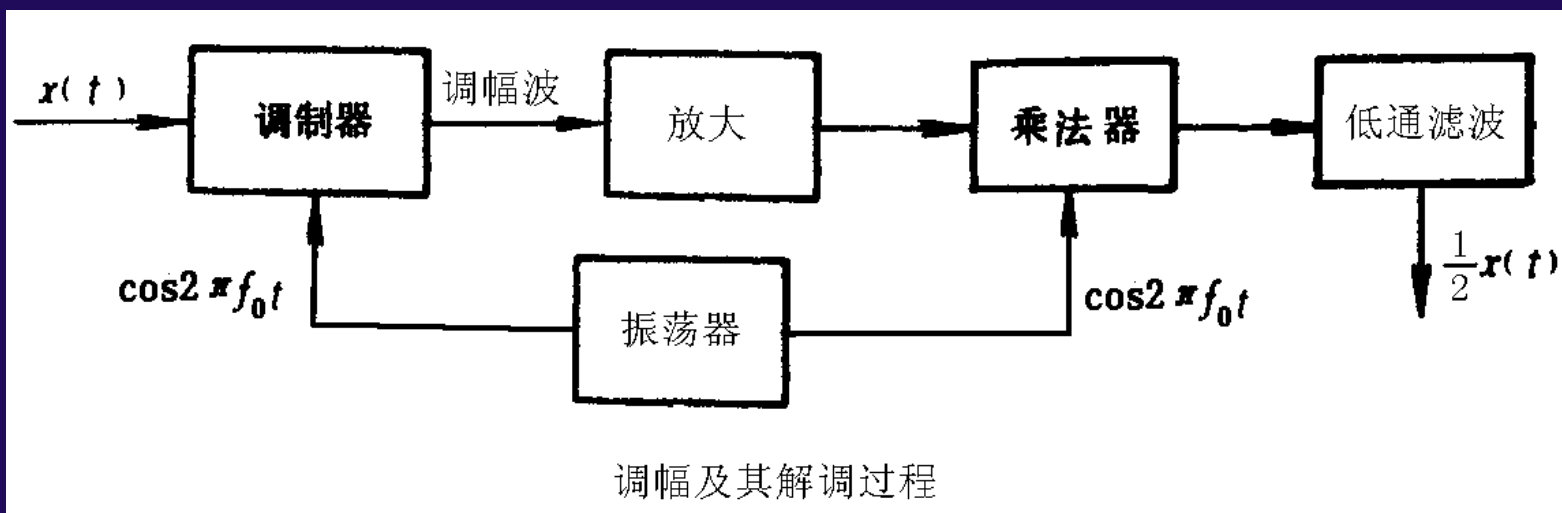


图3-1 载波、调制信号及调幅、调频波

2、调幅及同步解调

- 调幅是将一个高频简谐信号（载波）与测试信号（调制信号）相乘，使高频信号的幅值随测试信号的变化而变化。





1) 调幅与同步解调原理

$$x(t)z(t) \Leftrightarrow X(f) * Z(f)$$

$$F[x(t) \cos 2\pi f_z t] = \frac{1}{2} X(f - f_z) + \frac{1}{2} X(f + f_z)$$

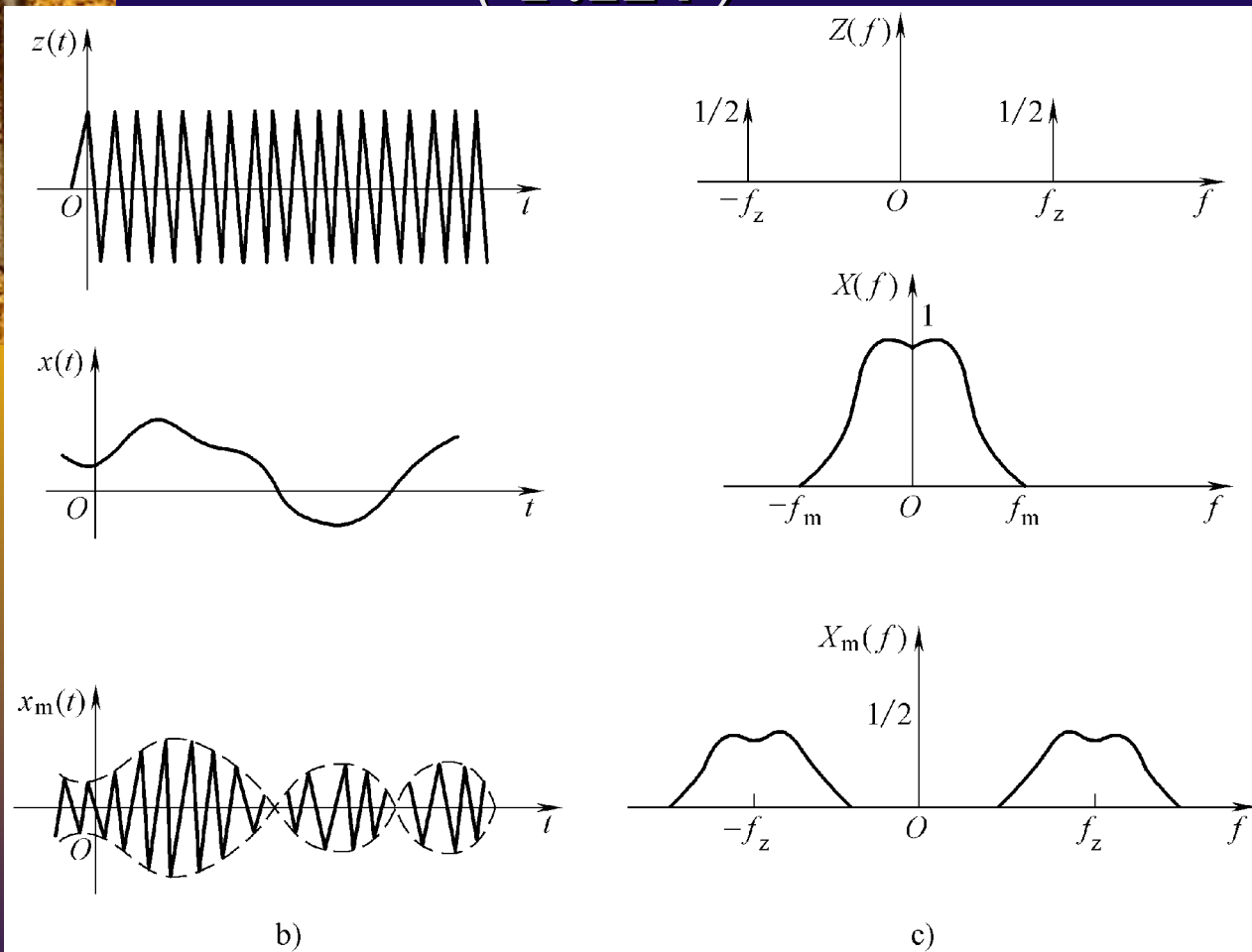
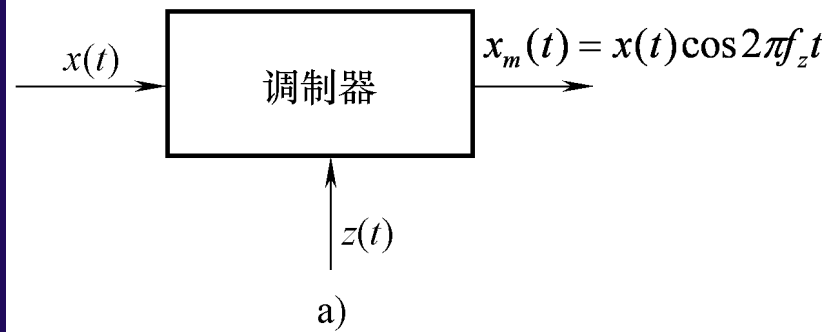
$$x(t) \cos 2\pi f_z t \cos 2\pi f_z t = \frac{1}{2} x(t) + \frac{1}{2} x(t) \cos 4\pi f_z t$$

低通滤波器将频率为 $2f_z$ 的高频信号滤去

$$F[x(t) \cos 2\pi f_z t \cos 2\pi f_z t] = \frac{1}{2} X(f) + \frac{1}{4} X(f + 2f_z) + \frac{1}{4} X(f - 2f_z)$$

2) 调幅过程图解

(P.124)



调幅过程就相当于把调制信号的低频搬移到载波信号的高频上去的过程，成为高频调幅波。

图3-2 信号幅度调制

a) 系统框图 b) 时域波形 c) 频域谱图

4) 同步解调过程图解 (P.125)

同步解调——把调幅波再次与原载波信号相乘，
则频域图形将再一次进行“搬移”。

“同步”——指
解调时所乘的信
号与调制时的载
波信号具有相同
的频率和相位。

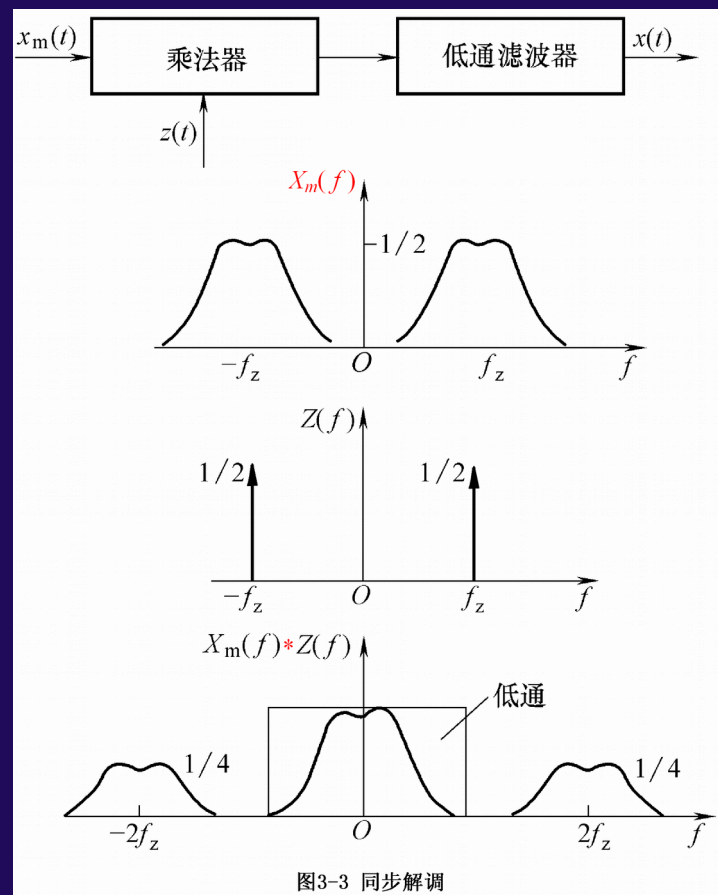


图3-3 同步解调



注意:

载波频率 f_z 必须高于原信号中的最高频率 f_m 才能使已调波仍保持原信号的频谱图形, 不致重叠。

为了减小放大电路可能引起的失真, 信号的频宽 ($2f_m$) 相对中心频率 (载波频率 f_z) 应越小越好。

实际载波频率常至少数倍甚至数十倍于调制信号。

总结——滤波器

1. 滤波器的分类

基本类型

由低通滤波器和高通滤波器串联组成

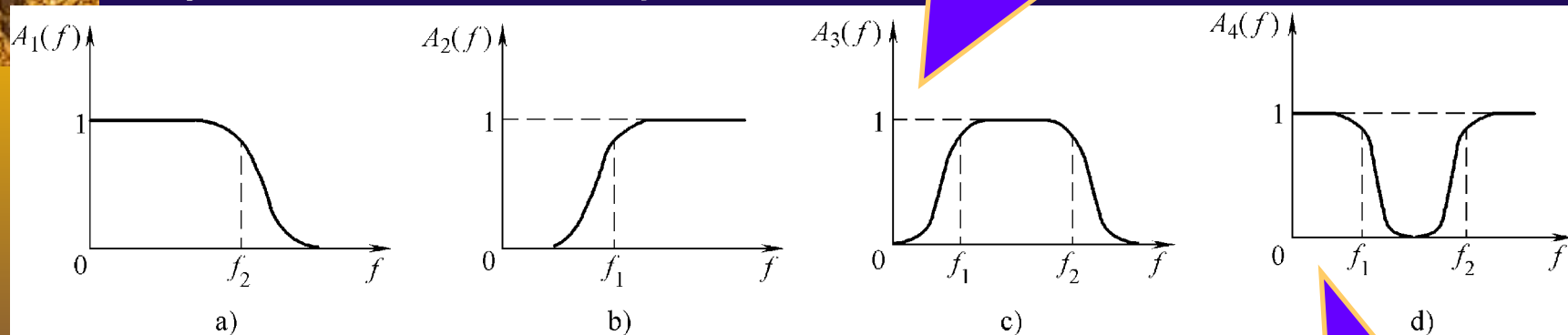


图3-10 滤波器的幅频特性
a) 低通 b) 高通 c) 带通 d) 带阻

由低通滤波器和高通滤波器并联组成



2. 带宽和建立时间的关系

$$B\tau_d = 1$$

滤波器的带宽表示着它的频率分辨力，通带越窄则分辨力越高。

滤波器的高分辨能力和测量时快速响应的要求是互相矛盾的。

3. 实际滤波器的基本参数

- 纹波幅度 d ——通频带中幅频特性值的起伏变化大小
- 截止频率 f_c ——幅频特性值等于 $A_0/\sqrt{2}$ 所对应的频率。
- 带宽 B ——上下截止频率间的频率范围

$$B = f_{c_2} - f_{c_1}$$

带宽决定了频率分辨力

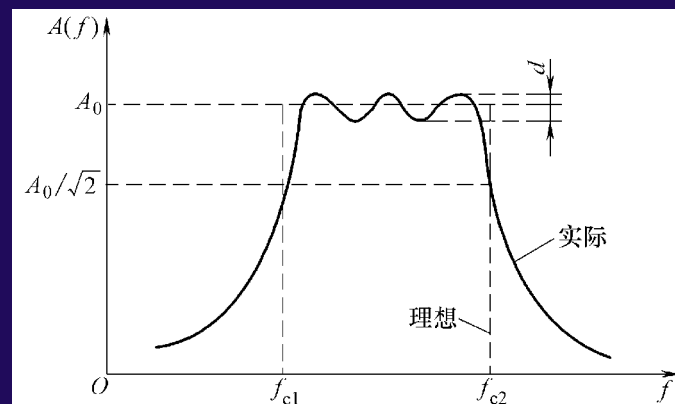


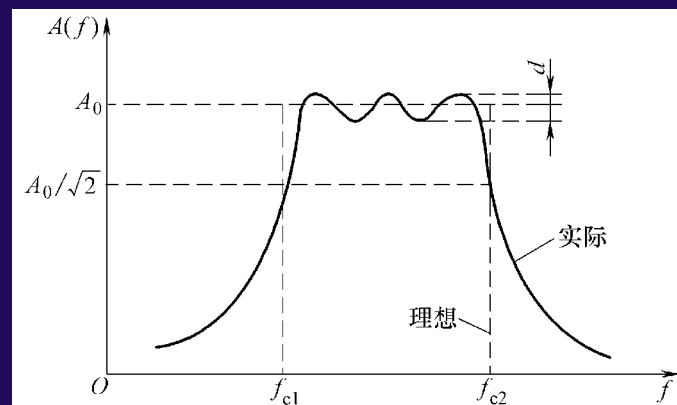
图3-14 理想带通滤波器与实际带通滤波器的幅频特性

实际滤波器的基本参数 (2)

- 品质因数 Q 值—— Q 越大，滤波器的分辨率越高

$$Q = \frac{f_0}{B} \quad f_0 = \sqrt{f_{c1} f_{c2}}$$

- 倍频程选择性 W ——衰减越快，滤波器选择性越好
- 滤波器因数 (矩形系数) λ



5. 滤波器的基本特性

1) 一阶 RC 低通滤波器 (P.133)

幅频特性和相频特性

$$A(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi f\tau)^2}}$$

$$\varphi(f) = -\arctan(2\pi f\tau)$$

下截止频率

$$f_{c_2} = \frac{1}{2\pi\tau}$$

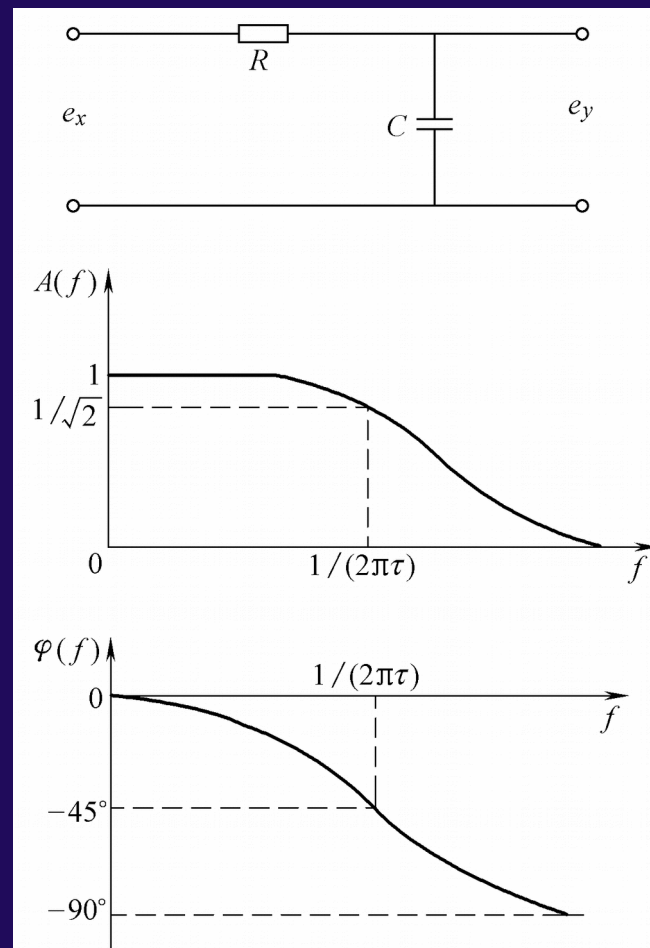


图3-15 RC 低通滤波器的电路
及其幅频、相频特性

2) RC 高通滤波器

(P.134)

幅频特性和相频特性

$$A(f) = \frac{2\pi f\tau}{\sqrt{1 + (2\pi f\tau)^2}}$$

$$\varphi(f) = -\arctan \frac{1}{2\pi f\tau}$$

上截止频率

$$f_{c_1} = \frac{1}{2\pi\tau}$$

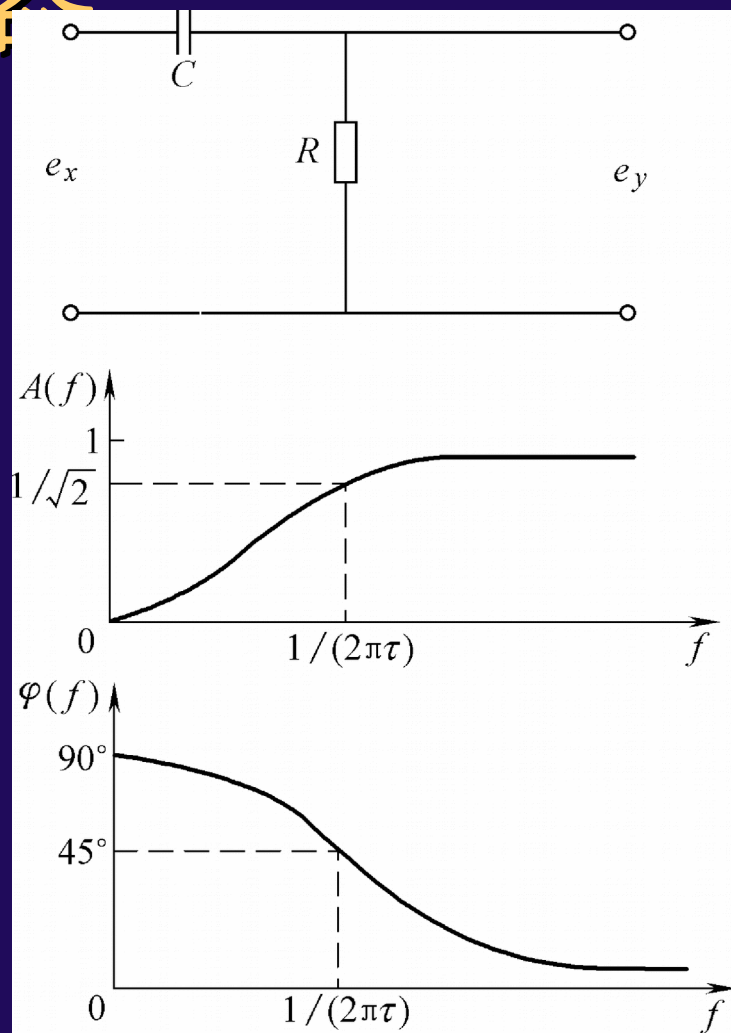
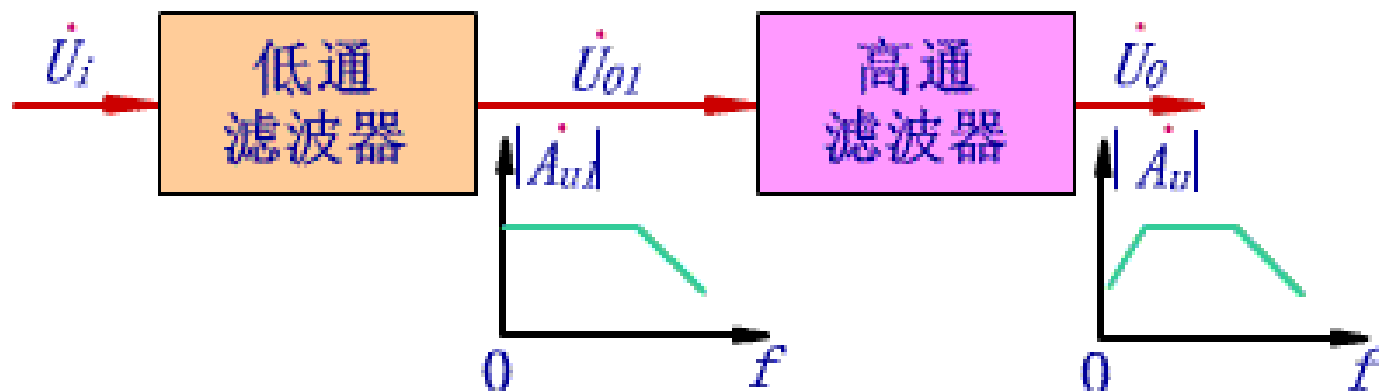


图3-16 RC高通滤波器及其幅频、相频特性

3) *RC* 带通滤波器

带通滤波器可以看成是低通滤波器和高通滤波器串联组成。

其中低通滤波器的上截止频率应大于高通滤波器的下截止频率。

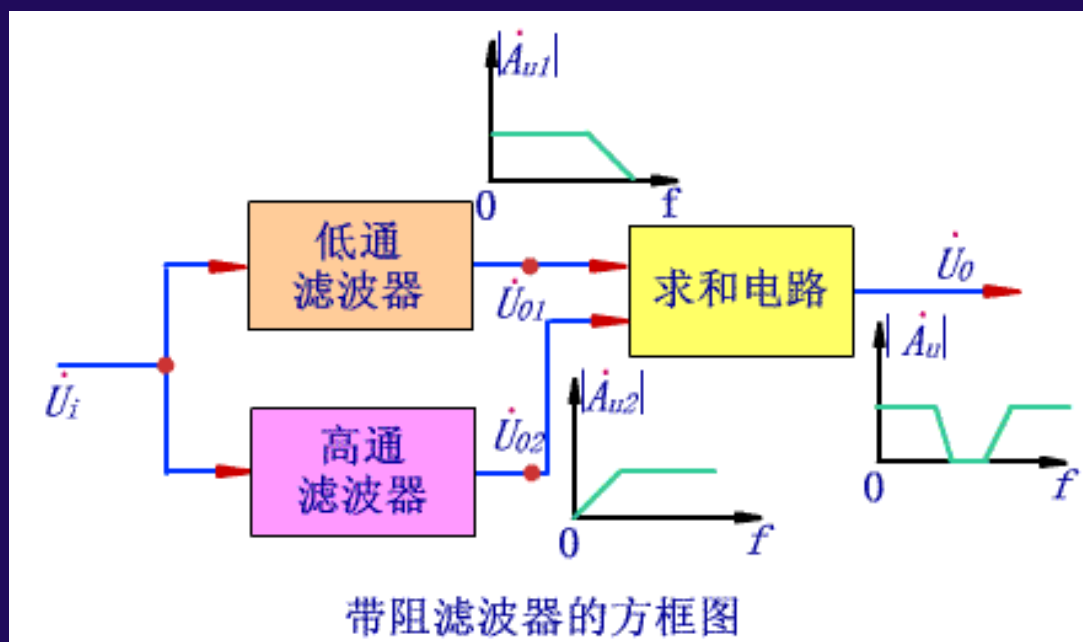


带通滤波器的方框图

4) RC 带阻滤波器

带阻滤波器可以看成是低通滤波器和高通滤波器并联组成。

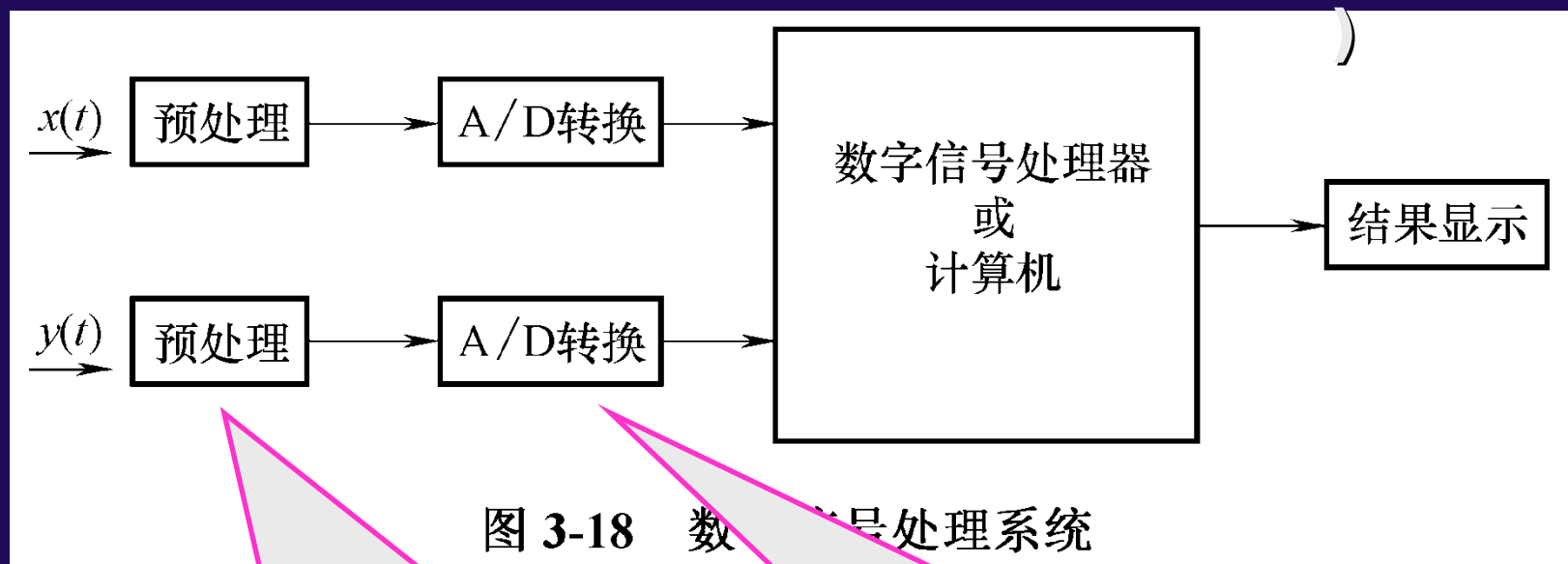
其中低通滤波器的上截止频率应小于高通滤波器的下截止频率。



总结——数字信号处理基础

1、数字信号处理的基本步骤

(P.135)



预处理——把信号变成适于数字处理的形式，以减轻数字处理的困难。

A/D 转换器是把连续的模拟信号转换成离散的数字信号输出。

2、时域采样和采样定理

(1). 采样——把连续时间信号变成离散时间序列的过程。

$$\text{采样} = x(t) \times g(t)$$

$g(t)$ ——等时距的单位脉冲序列，称为采样信号。

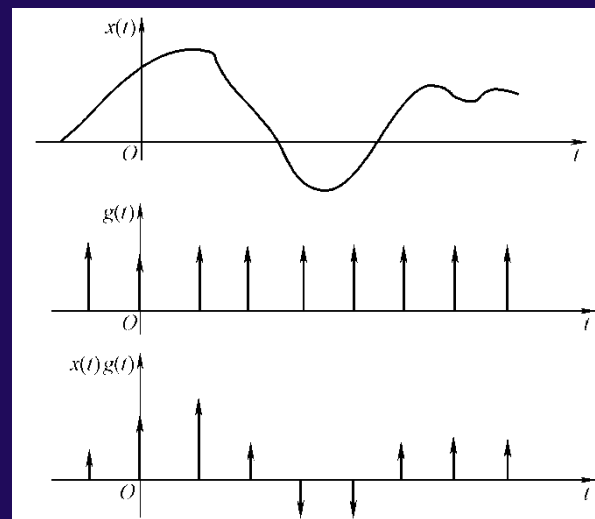
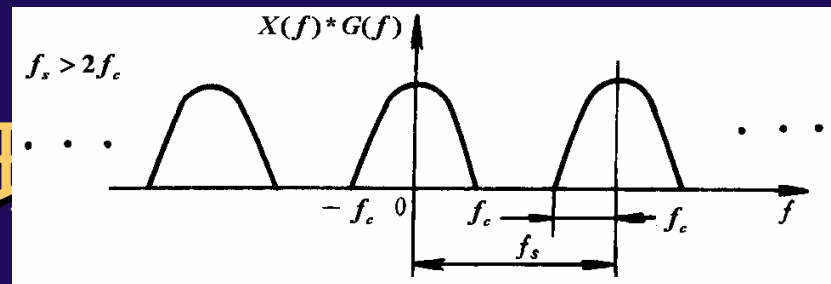


图 3-25 时域采样

(2) . 采样定理



采样频率应大于两倍的信号最高频率。

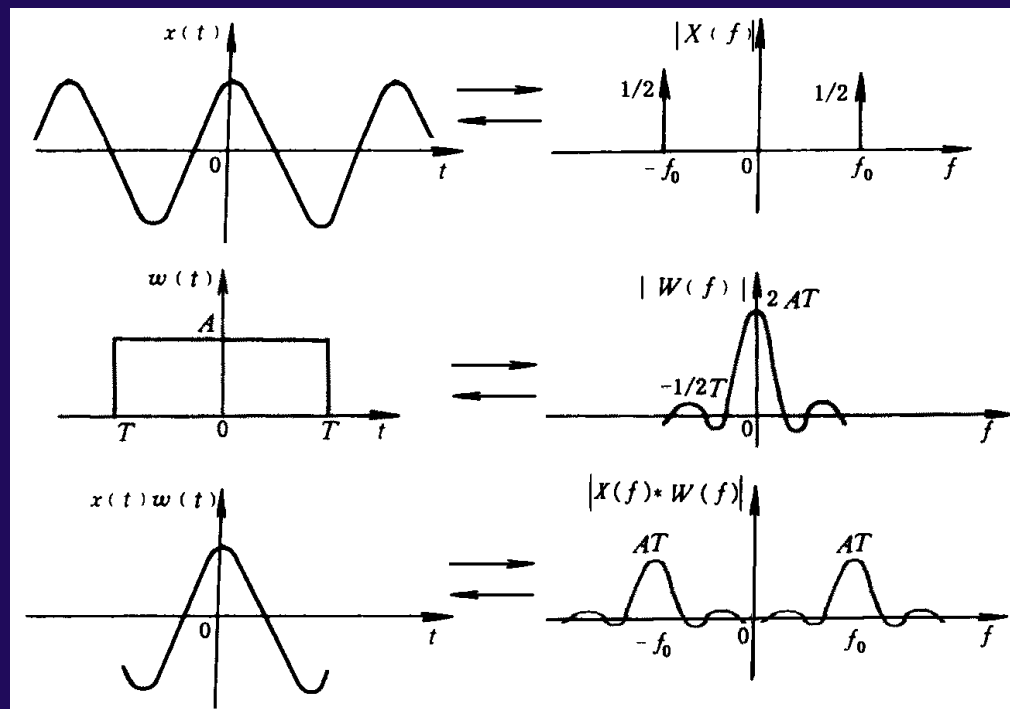
$$f_s = \frac{1}{T_s} > 2f_c$$

讨论:

- 1) 实际工作中, 由于不是理想滤波器, 即不可能有理想的截止特性, 故 $f_s = 2f_c$ 是不够的, 所以一般 $f_s = (3 \sim 5)f_c$;
- 2) 一般信号不是有限带宽而是无限带宽的信号, 可先通过模拟低通滤波器滤去部分高频信号。

3 截断和泄漏

- 截断——将无限长的信号乘以有限宽的窗函数。



(P.143
)

截断后造成的影响:

- 1) 原先能量集中→能量分散
- 2) 频谱有限宽信号→频域无限宽信号



能量泄漏

能量泄漏——将无限长信号截取后，其频谱中除了主要频率分量外，出现了许多附加频率分量，从而造成能量不是集中于确定频率上，部分能量泄漏到其它频率上。