

第六章 抽 样

在一定条件下，一个连续时间信号完全可以用这个信号在等时间间隔上的瞬时值（样本值）表示，并且可以用这些样本值将该信号恢复出来。

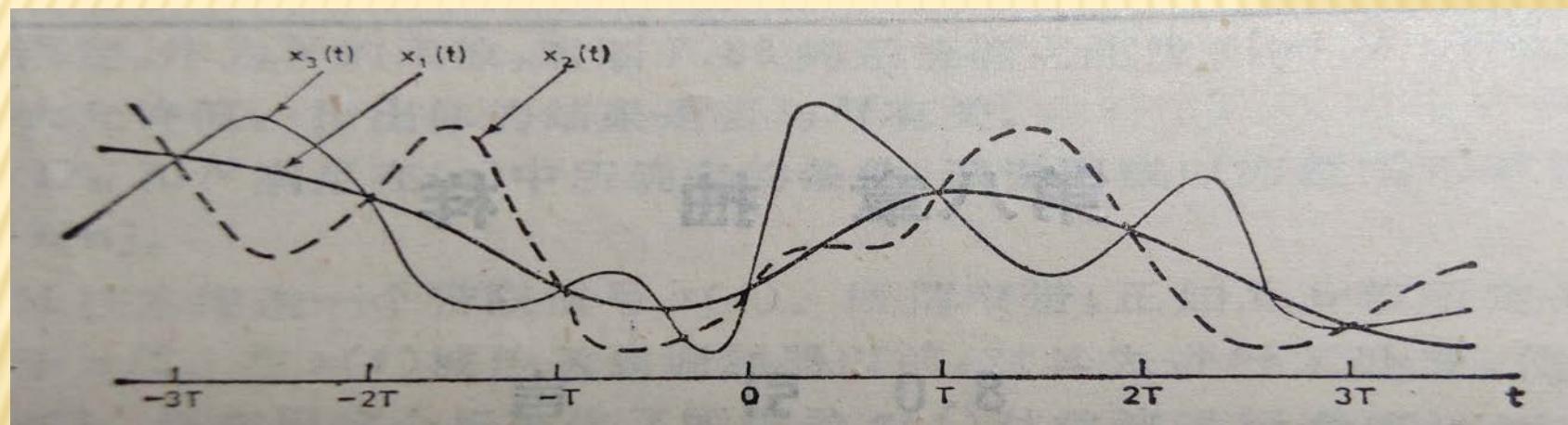
以上结论来自一个非常重要的定理：香农抽样定理。

抽样定理在连续时间信号和离散时间信号之间起到了桥梁的作用。

利用这个定理，我们可以将一个连续时间信号毫无损失的转变为离散时间信号，然后利用计算工具对数字化的信号进行处理，最后又将处理过的离散信号再转化为等效的连续信号。

§ 1 利用信号的样本表示连续信号—抽样定理

在一般情况下，利用一组等间距的样本值来唯一地表示一个连续信号，如果没有其他条件限制，其结果是不确定的。



3个信号： $x_1(t)$, $x_2(t)$, $x_3(t)$

从上图可以看出，如果以 T 做为时间间隔进行抽样，可以看到在所有的抽样点上都相等，即：

$$x_1(nT) = x_2(nT) = x_3(nT)$$

显然，以上的抽样点组不能准确的表示三个连续信号。

直观感觉：信号 $x_2(t)$, $x_3(t)$ 变化比较快，而相对的抽样点较少，时间间隔太大，即采样速度（频率）不够快。

如何确定采样频率？

一、冲击串抽样函数

定义冲击串函数： $p(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT)$

$p(t)$ 抽样函数， T 抽样周期。

$$f_s = \frac{1}{T} \quad \text{抽样频率。} \quad \omega_s = 2\pi f_s \quad \text{抽样角频率，又称为基波角频率。}$$

设 $x(t)$ 为一连续函数，经 $p(t)$ 抽样后的离散函数为：

$$x_p(t) = x(t) \cdot p(t) = x(t) \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(t) \delta(t - nT)$$

由傅里叶变换的性质得：

$$X_p(\omega) = \frac{1}{2\pi} X(\omega) * P(\omega)$$

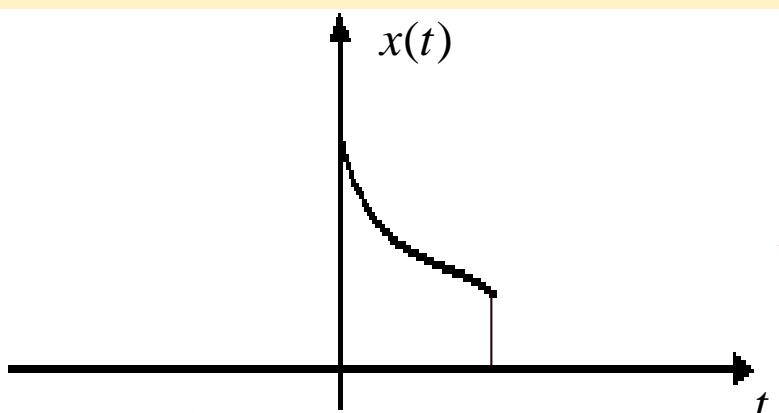
其中：

$$P(\omega) = \frac{2\pi}{T} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(\omega - k\omega_s)$$

则有：

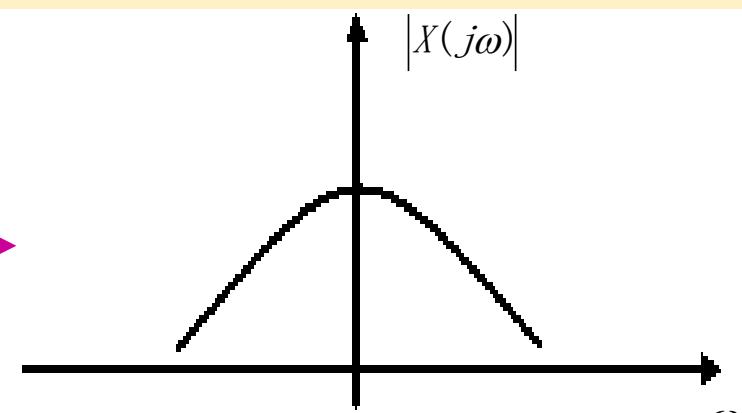
$$\begin{aligned} X_p(\omega) &= \frac{1}{T} X(\omega) * \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(\omega - k\omega_s) \\ &= \frac{1}{T} \sum_{k=-\infty}^{\infty} X(\omega) * \delta(\omega - k\omega_s) \\ &= \frac{1}{T} \sum_{k=-\infty}^{\infty} X(\omega - k\omega_s) \end{aligned}$$

假设 $x(t)$ 是有限带宽的， ω_h 是 $x(t)$ 中包含的最高频率分量。

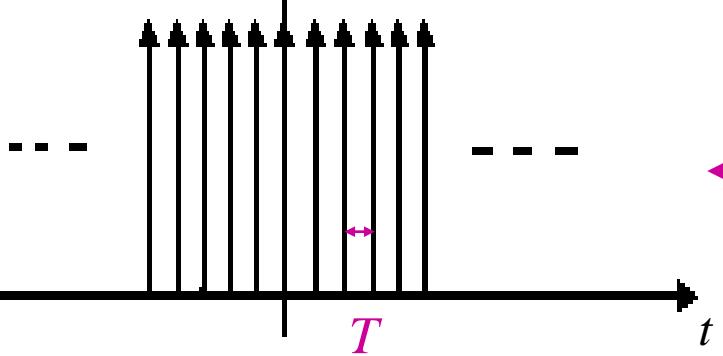


$$p(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT)$$

\mathcal{F}

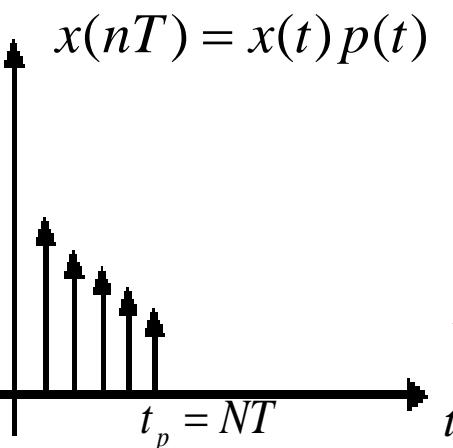


$$\omega_s = 2\pi f_s = \frac{2\pi}{T}$$



\mathcal{F}

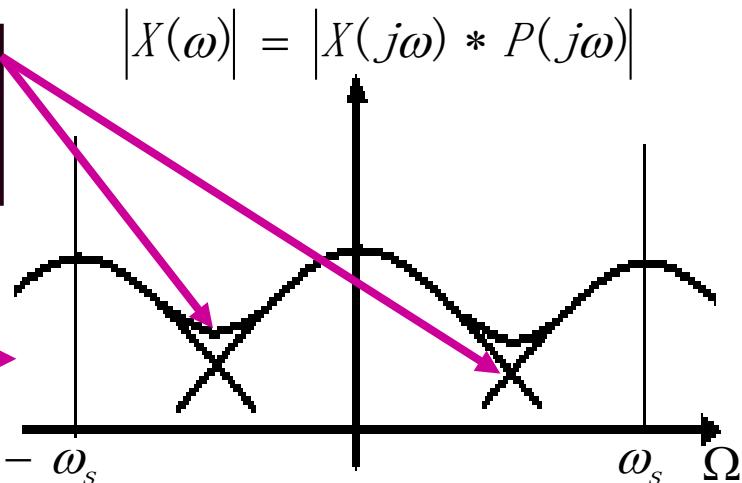
$$P(j\omega) = \omega_s \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \delta(\omega - k\omega_s)$$



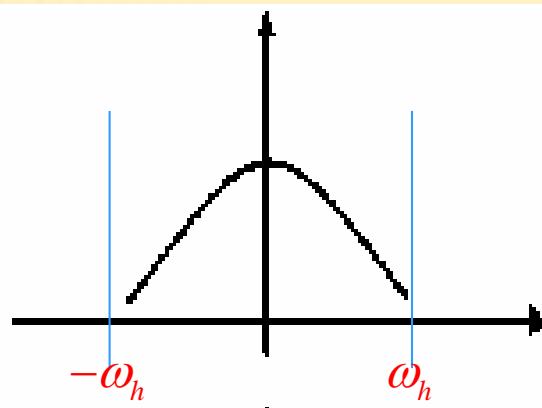
$x(nT) = x(t)p(t)$

混频
现象

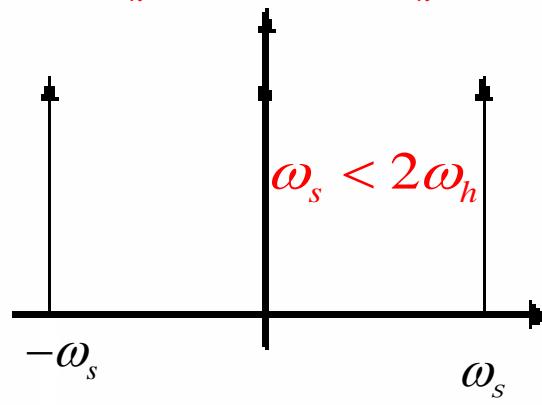
\mathcal{F}



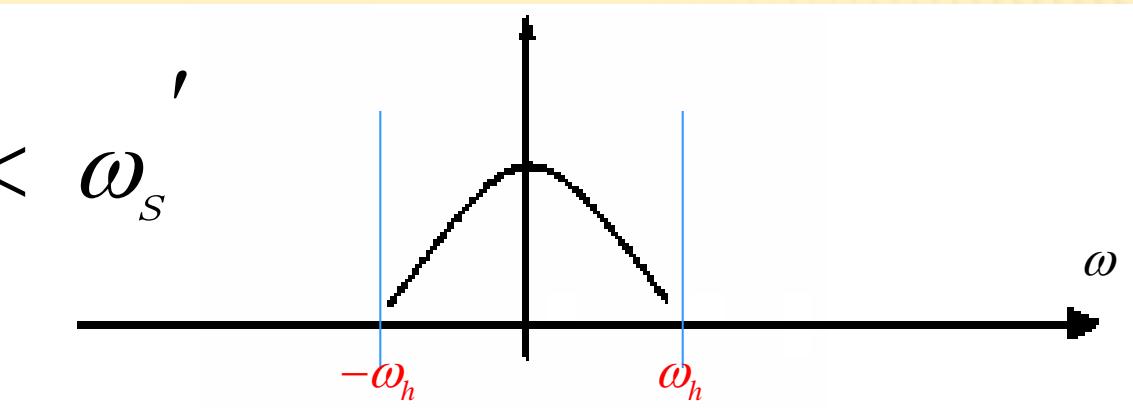
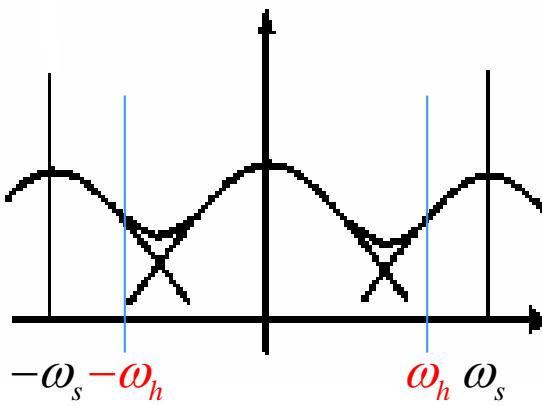
$$|X(\Omega)| = |X(j\omega) * P(j\omega)|$$



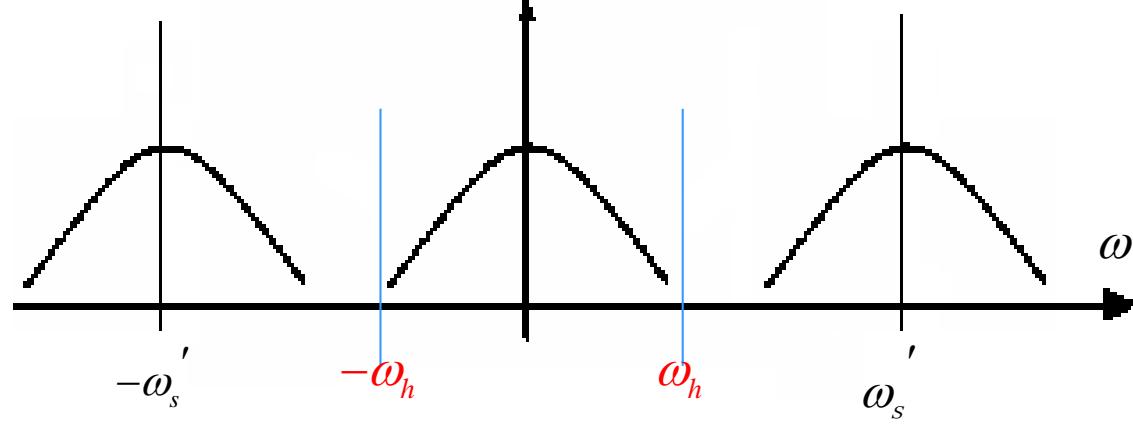
$$\omega_s < \omega_s'$$



$$\omega_s' \geq 2\omega_h$$



$$\omega_s' \geq 2\omega_h$$



从中可以看出，如果 $\omega_s \geq 2\omega_h$ ，频谱就不会发生混叠现象，也就是信号没有发生失真（变形）。

只要用一个低通滤波器，就可以将 $x(t)$ 从 $x_p(t)$ 中恢复出来。

抽样定理：

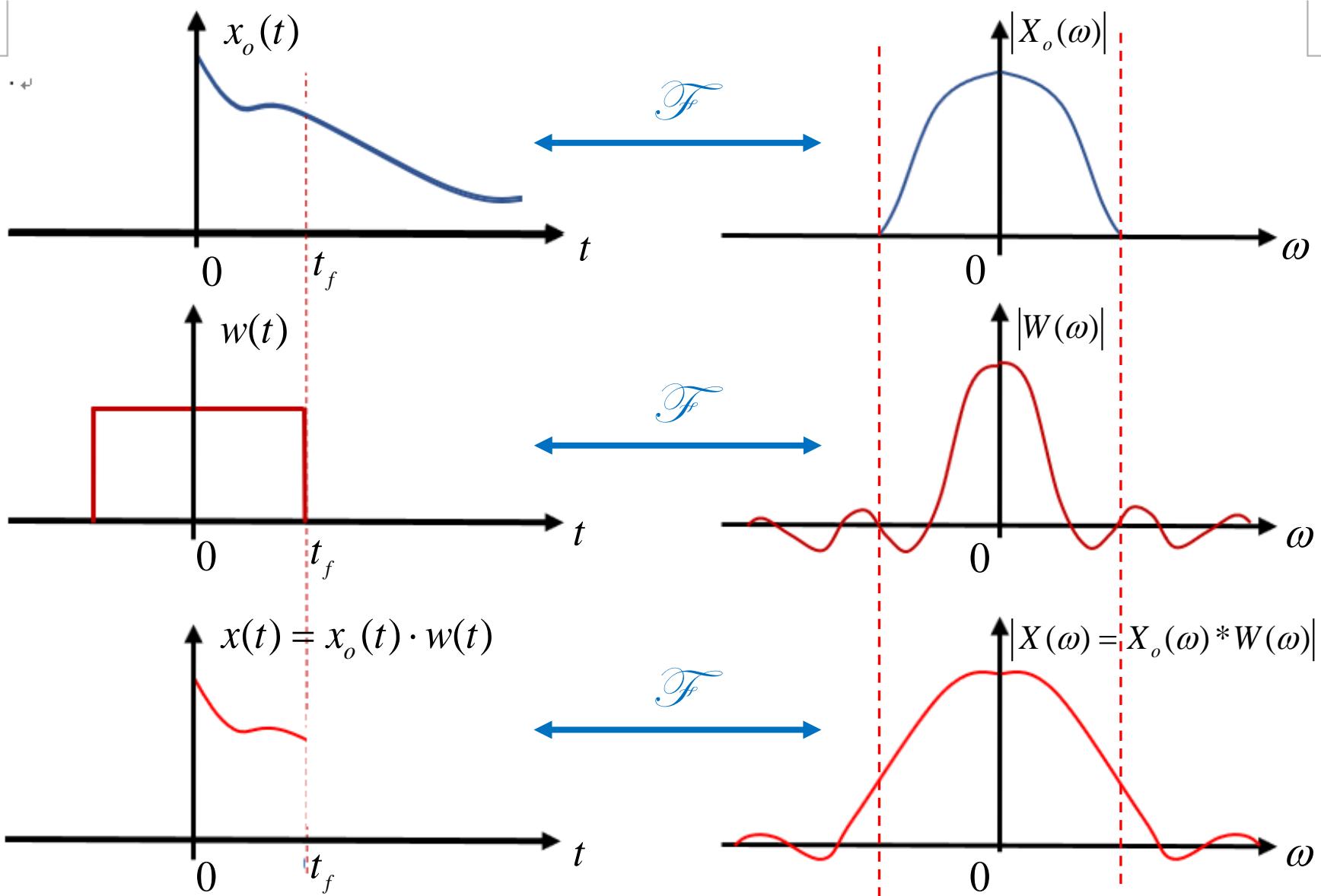
设 $x(t)$ 是某一带限信号，在 $|\omega| > \omega_M$ 时， $X(\omega) = 0$ 。如果 $\omega_s \geq 2\omega_M$ ，其中 $\omega_s = \frac{2\pi}{T}$ ，则 $x(t)$ 就能够唯一地由其样本 $x(nT)$ 所确定。

已知一组样本值，将样本值做为一个冲击串的脉冲强度，通过一个理想的低通滤波器，滤波器的增益为 T ，截止频率为：

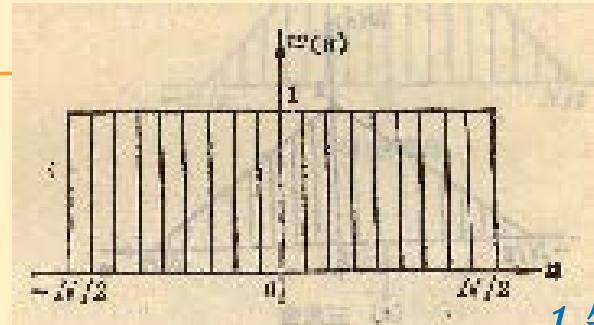
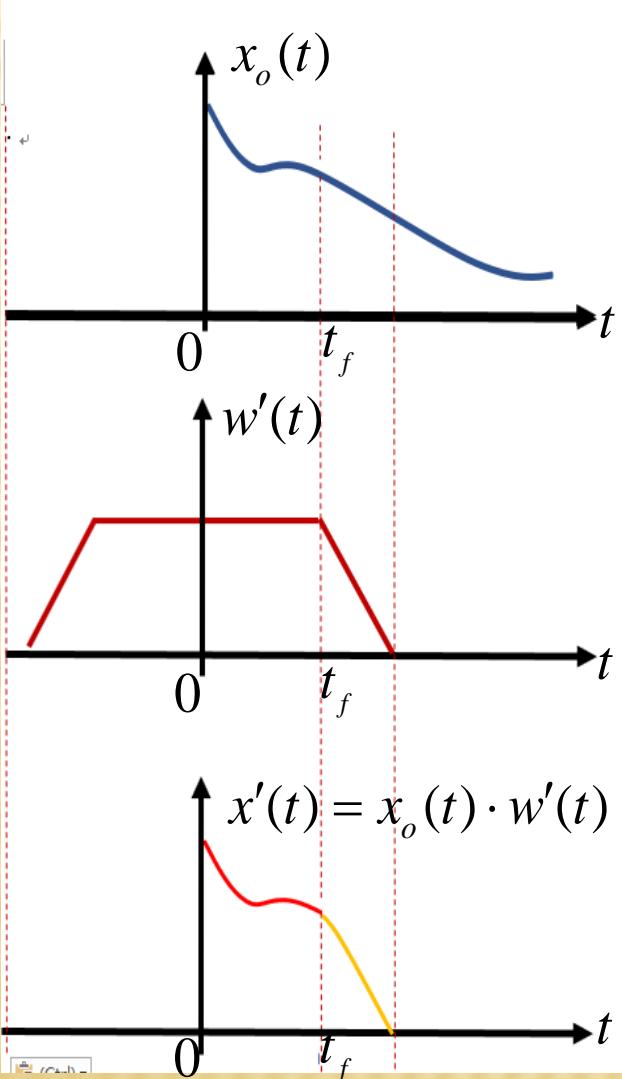
$$\omega_c, \quad \omega_h < \omega_c < \omega_s - \omega_h$$

得到的滤波结果即为 $x(t)$ ，抽样（角）频率 ω_s 称为奈奎斯特频率。

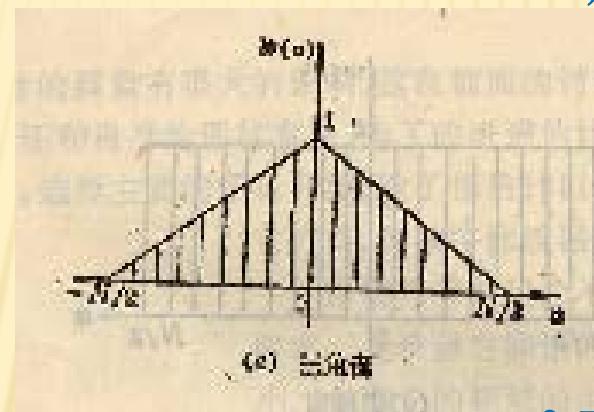
$$\omega_s \geq 2\omega_h \quad f_s \geq 2f_h$$



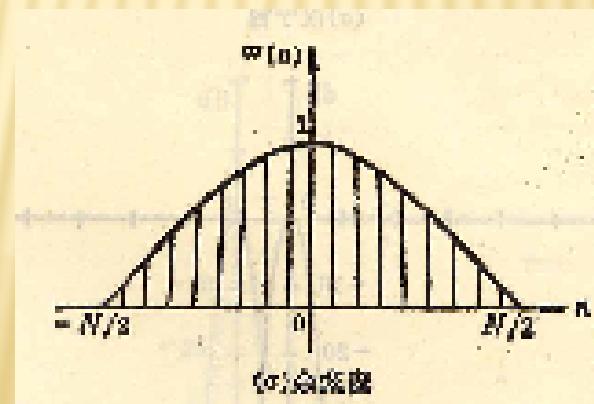
窗函数



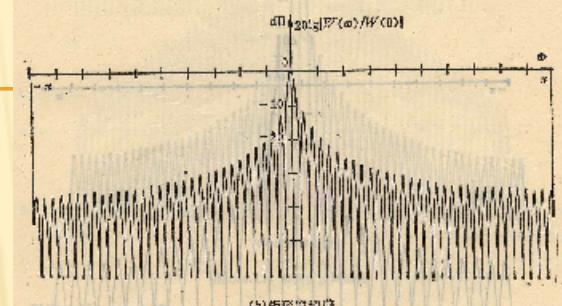
1. 矩形窗



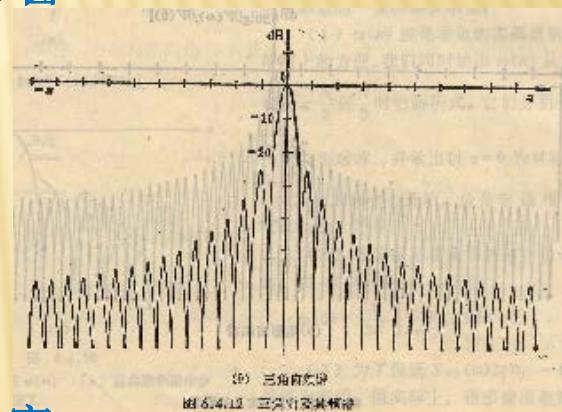
2. 三角窗



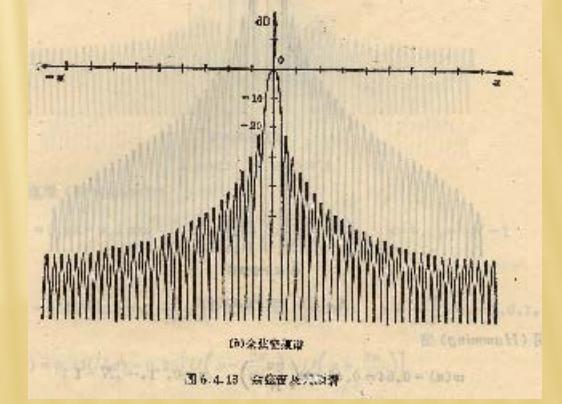
3. 余弦窗



(a) 矩形窗频谱



(b) 三角窗频谱
图 6.4.12 三种窗及其频谱



(c) 余弦窗频谱
图 6.4.13 余弦窗及其频谱

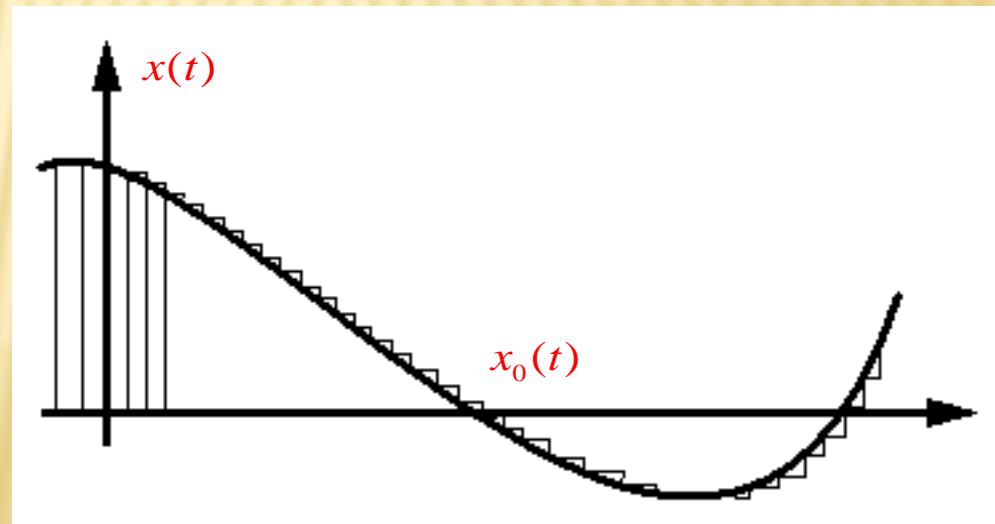
二、用零阶保持器抽样

抽样定理中定义的抽样函数如下：

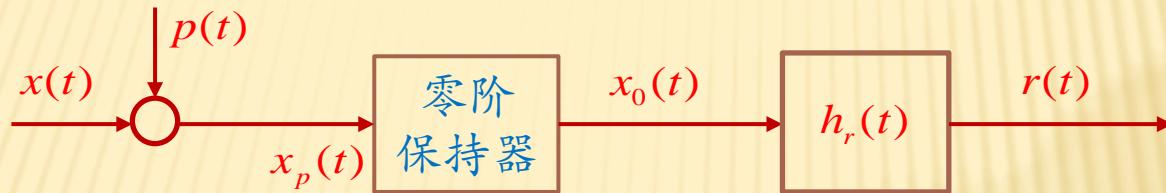
$$p(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT)$$

其中 $\delta(t)$ 是一个理想的函数，在实际系统中很难得到。因此，为方便使用，在实际操作时采用零阶保持器来代替 $\delta(t)$ 函数。

零阶保持器是将一个连续变化的信号变为“台阶”形式变化的。两种采样的去别：



将 $x_0(t)$ 通过一个低通滤波器，仍然可以恢复 $x(t)$ 。但该滤波器不能是恒定的增益。设如下结构：



重建 $x(t)$ ，就要求：

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

零阶保持器与 $h_r(t)$ 的综合做用，就相当于一个理想的低通滤波器 $H(\omega)$ 。

零阶保持器的频率特性：

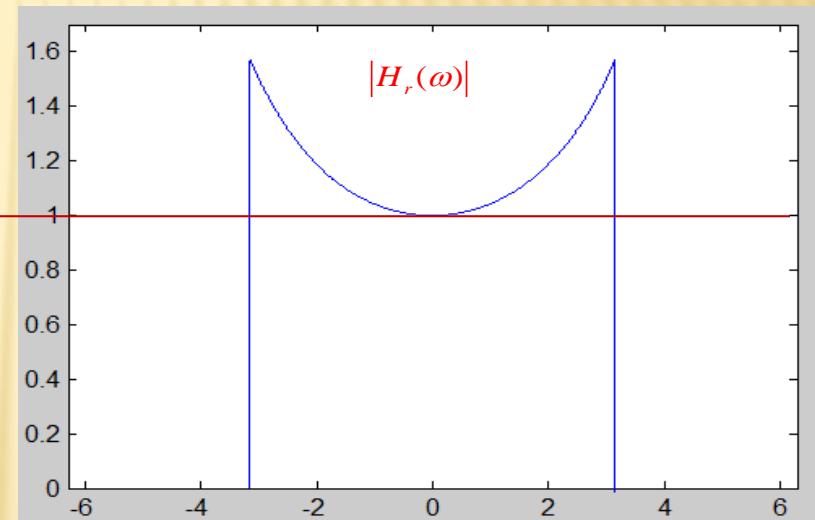
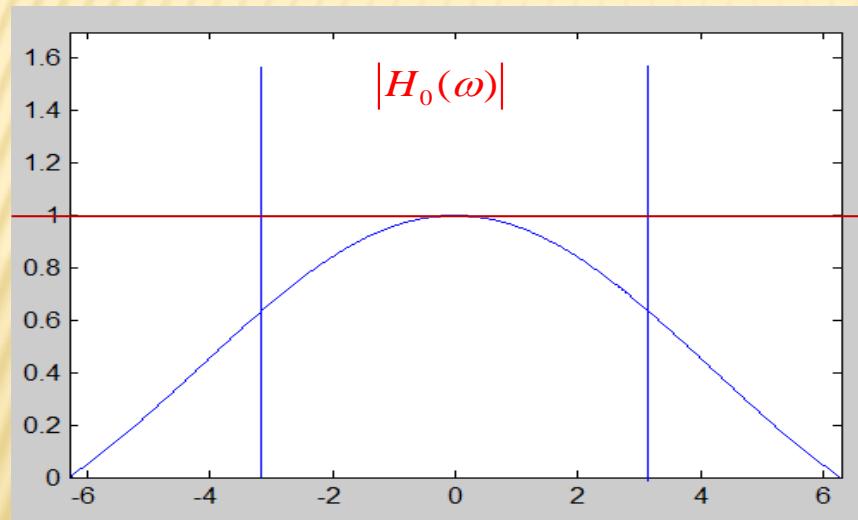
$$H_0(\omega) = e^{-j\frac{T}{2}\omega} \left(\frac{2 \sin(\frac{T}{2}\omega)}{\omega} \right)$$

$$H_0(\omega) \cdot H_r(\omega) = H(\omega) = \begin{cases} 1 & |\omega| < \frac{\omega_s}{2} \\ 0 & \text{others} \end{cases}$$

则有：

$$H_r(\omega) = \frac{e^{j\frac{T}{2}\omega}}{\frac{2 \sin(\frac{T}{2}\omega)}{\omega}} H(\omega)$$

根据以上条件得出 $H_0(\omega)$, $H_r(\omega)$ 的频谱如下：



但是在实际应用中，零阶保持器的输出就认为是对 $x_p(t)$ 的一个比较好的近似，满足一般工程上的要求，不再需要加上后续的 $H_r(\omega)$ 环节了。当然，这时恢复出来的 $x'(t)$ 与原始的 $x(t)$ 有一定的误差。

§ 2 利用内插值从样本值重建信号

内插是一个常用的由样本值重建某一个函数的过程，重建结果即可以是近似的，也可以是完全准确的。

0阶保持器是一种简单的内插计算。

1阶保持器是另一种内插计算，线性内插。即用直线将相邻的两点连接起来。

以此类推，还可以有更加复杂的内插形式，相邻的若干个样本点通过高阶多项式曲线光滑的连接。

上节讨论的内容：

一个带限信号，如果抽样足够多，信号就能够完全恢复。从另一个角度讲，通过一个低通滤波器，在样本点之间的真正内插就可以实现。

在时域中这个低通滤波器的滤波过程，就是实现了内插计算的过程。

设某低通滤波器的输出为：

$$x_r(t) = x_p(t) * h(t)$$

$x_p(t)$ ：采样值， $h(t)$ ：低通滤波器的单位冲激响应

$$x_r(t) = x_p(t) * h(t)$$

$$= \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(nT)h(t - nT)$$

样本值

加权函数

对于一个理想的低通滤波器：

所以：
$$h(t) = \frac{1}{\pi t} \sin(\omega_c t) \quad \Rightarrow \quad h(t) = T \frac{\omega_c}{\pi} \sin c\left(\frac{\omega_c t}{\pi}\right)$$

$$x_r(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(nT) T \frac{\omega_c}{\pi} \sin c\left(\frac{\omega_c(t - nT)}{\pi}\right)$$

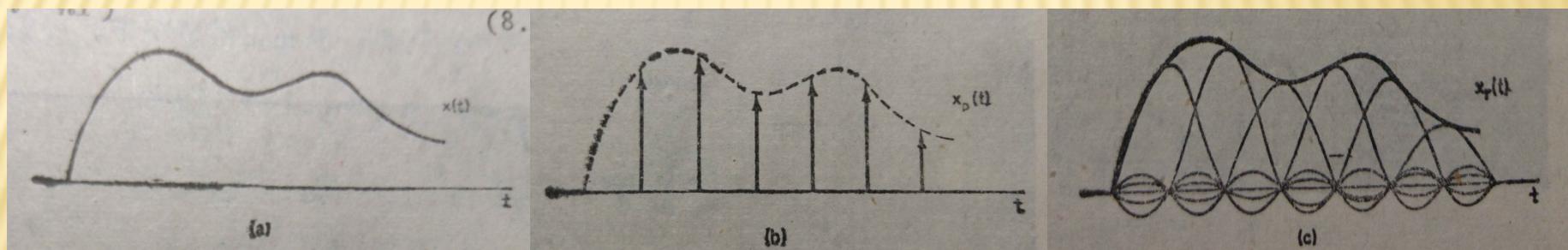
由抽样定理可得，当 $\omega_s \geq 2\omega_c$ 时，系统就不会产生叠加效应。

理想的低通滤波实现很困难，实际应用中则采用略有误差，但实现方便的低通滤波器，即内插函数简单的低通滤波器，其中0阶保持器就是一个很广泛的选择。

设0阶保持器的单位冲激响应为 $h_0(t)$ ，其输出为 $x_0(t)$ 。

则 $x_0(t)$ 是 $x(t)$ 的近似， $h_0(t)$ 是对一个能实现真正内插的理想低通滤波器的近似。

实例，利用Sinc函数的理想带限内插：

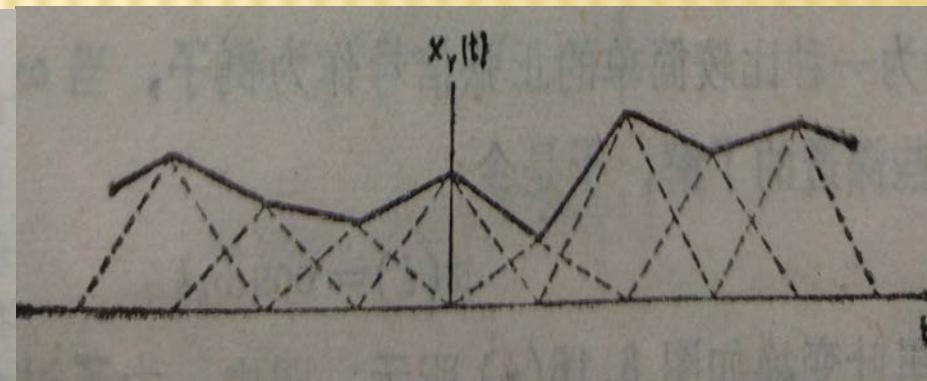
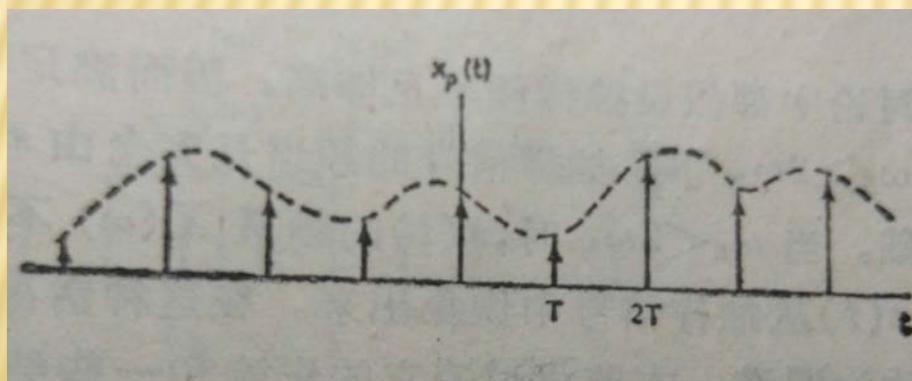
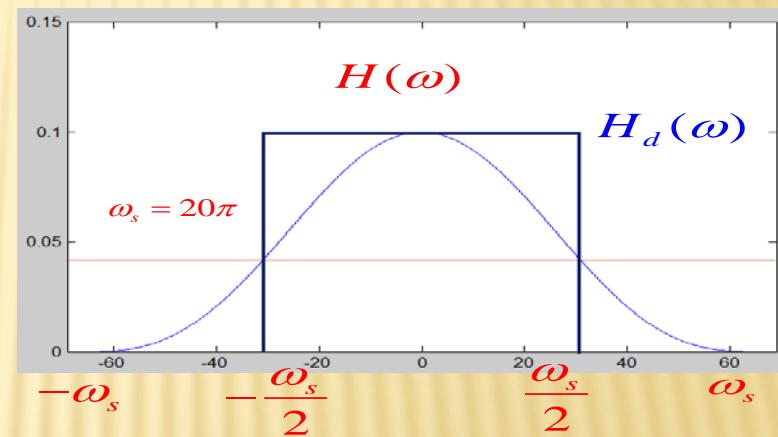
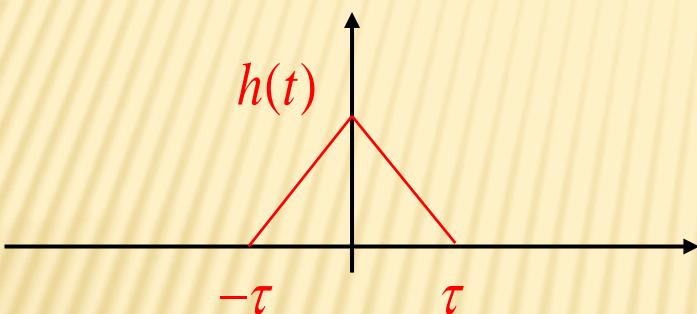


另一种常用的内插近似是线性内插，其特点是信号的重建数值是连续的，但一阶导数还不连续，所以又称为一阶保持。相应的单位冲激响应为：

$$h(t) = \begin{cases} -\frac{t}{\tau} + 1 & 0 \leq t \leq \tau \\ \frac{t}{\tau} + 1 & -\tau \leq t < 0 \end{cases}$$

频率特性：

$$H_r(\omega) = \frac{1}{T} \left[\frac{\sin(\frac{\omega T}{2})}{\frac{\omega}{2}} \right]$$

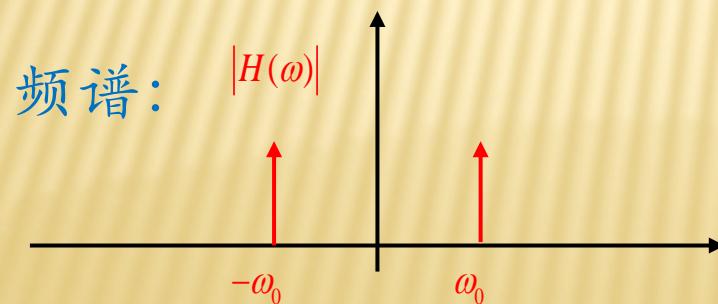


§ 3 欠抽样的效果，混叠效应

抽样定理要求 $\omega_s \geq 2\omega_h$ ，抽样信号的频谱与原信号的频谱完全相同，即： $X_p(\omega) = X(\omega)$

当 $\omega_s < 2\omega_h$ 时， $X_p(\omega) \neq X(\omega)$ ，即产生了混叠现象。由此重建的信号与原信号相比，具有很大的变形。但是在采样点处是相等的，即： $x_p(nT) = x(nT)$

实例： $x(t) = \cos(\omega_0 t)$

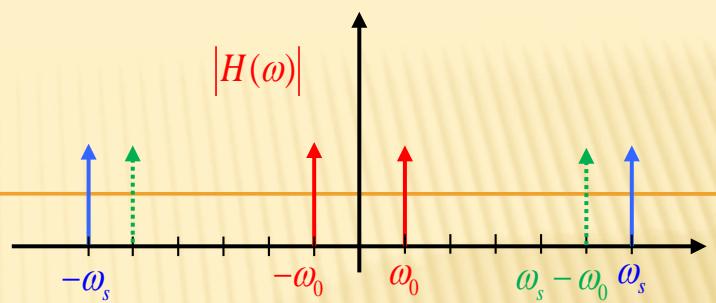
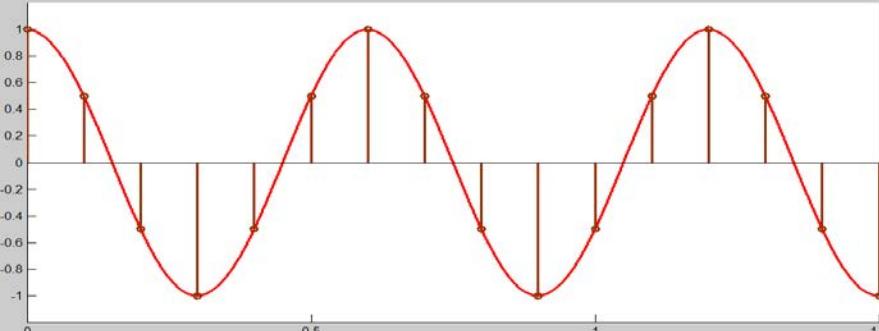


设采样角频率： $\omega_s = 20\pi$

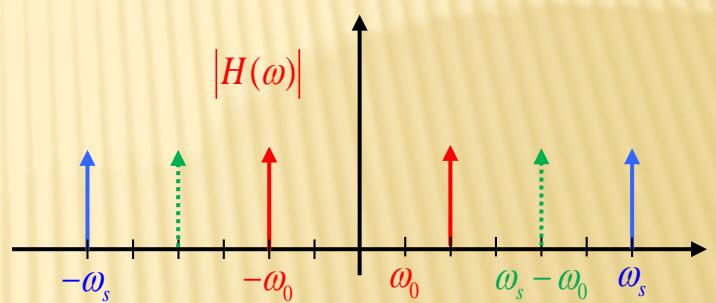
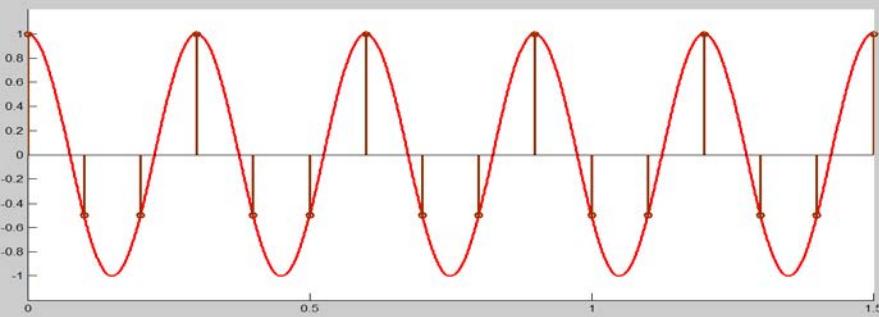
采样频率： $f_s = \frac{20\pi}{2\pi} = 10 \text{ Hz}$

采样周期： $T = \frac{1}{f_s} = 0.1 \text{ s}$

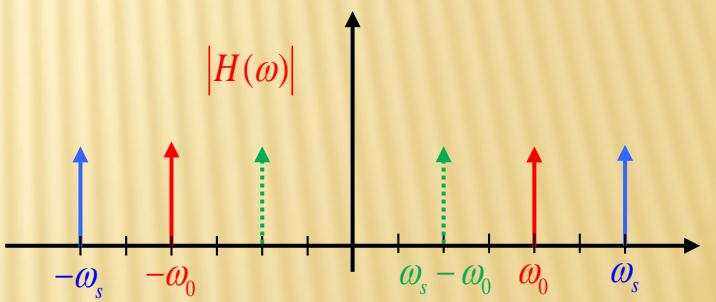
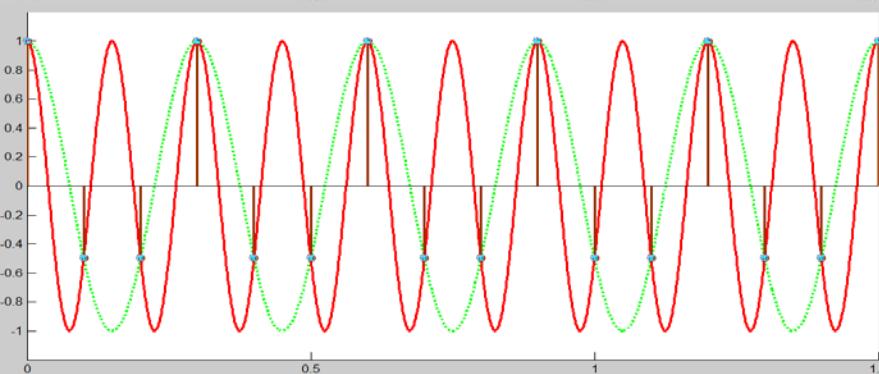
$$\omega_0 = \frac{\omega_s}{6}$$



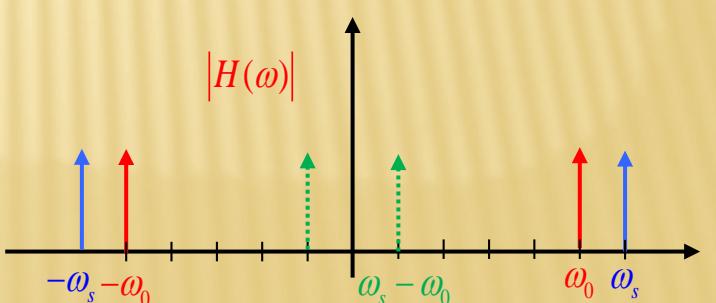
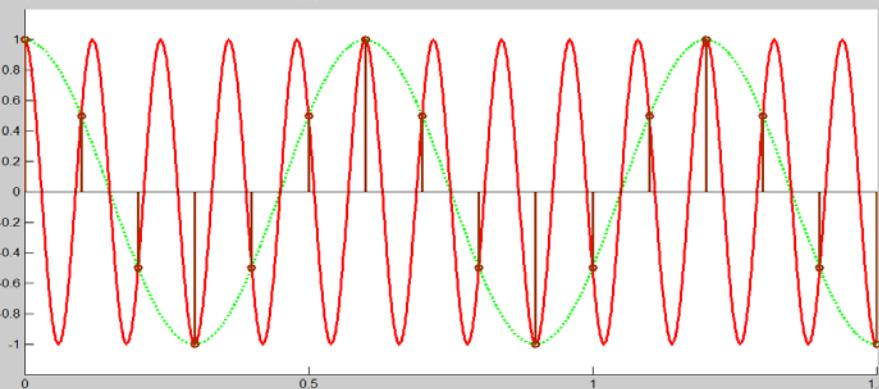
$$\omega_0 = \frac{2\omega_s}{6}$$



$$\omega_0 = \frac{4\omega_s}{6}$$



$$\omega_0 = \frac{5\omega_s}{6}$$



前两种情况满足 $\omega_s \geq 2\omega_h$ 的条件，原始信号可以被恢复。

后两种情况不满足条件，产生了混叠现象。原有的频率 ω_0 被抽样点合成为一个较低的频率 $\omega_s - \omega_0$ 所代替，高频转变为低频。但是两个信号的所有采样点都相同。

抽样的效果就是频闪效应所基于的原理。

§ 4 连续时间信号的离散时间处理

在许多应用中，面临的第一项工作就是将连续信号转变为离散信号，然后利用数字设备（计算机等）进行数据处理（计算），然后再转化为连续信号。



依据以上讨论结果： $\begin{cases} x_c(nT) = x(n) \\ y_c(nT) = y(n) \end{cases}$

其中A/D环节代表一个抽样过程：



对应的频率特性：

$$x_p(t) = x(t) \cdot p(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(nT) \delta(t - nT)$$

$$X_p(\omega) = X_c(\omega) * P(\omega) = \frac{1}{T} \sum_{k=-\infty}^{\infty} X_c(\omega - k\omega_s)$$

$$X_p(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(nT) e^{-j\omega nT}$$

又因为： $x_p(t) = x_c(nT) = x(n)$

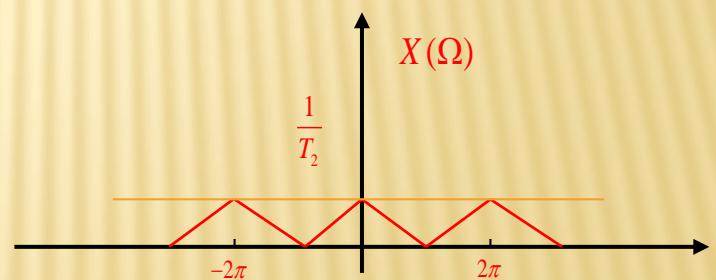
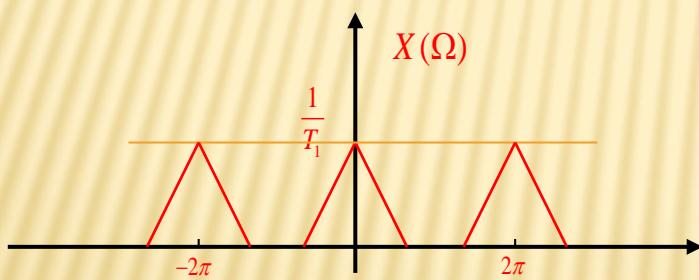
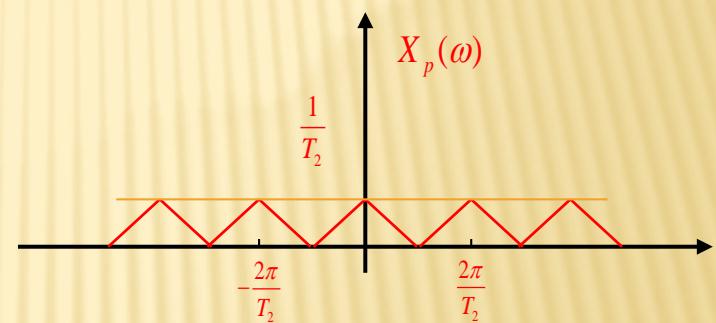
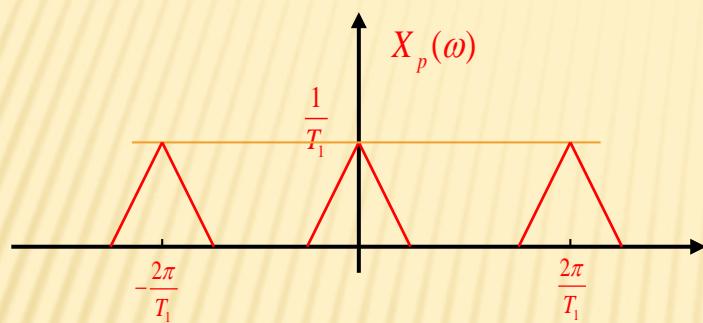
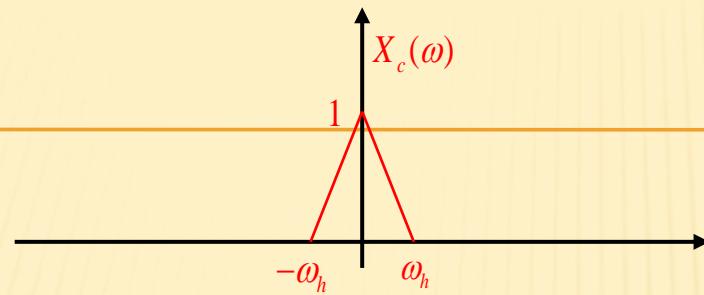
$$X(\Omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x_c(nT) e^{-j\Omega n}$$



$$\Omega = \omega T$$

$$X(\Omega) = X_p\left(\frac{\Omega}{T}\right)$$

实例，两种不同抽样率的输出序列：



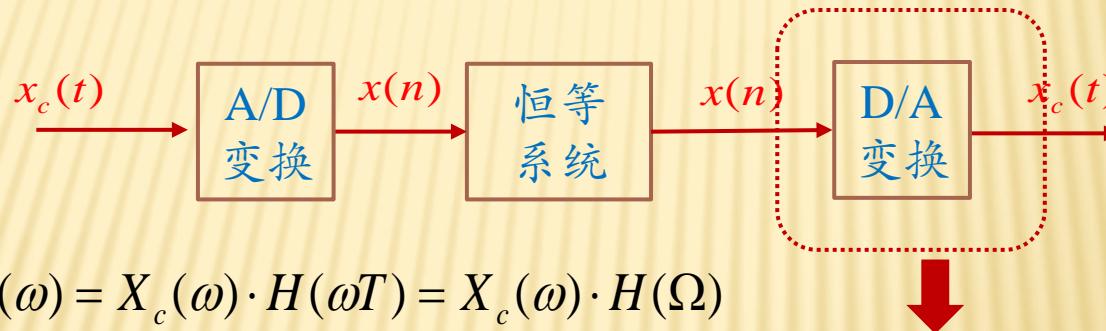
从以上过程可以看出： $X(\Omega)$ 是 $X_p(\omega)$ 的重复，但是有一个尺度的变化（由 T 引起），而且 $X(\Omega)$ 是一个周期函数，周期为 2π 。

连续化过程 (D/A 变换) :

为简化问题，不考虑中间的数据处理过程，设下式成立：

$$x(n) = y(n) \quad \text{系统满足香农抽样定理，则有：}$$

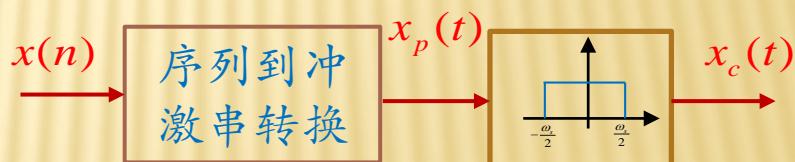
$$x_c(t) = y_c(t) \quad \text{一个恒等系统}$$



$$Y_c(\omega) = X_c(\omega) \cdot H(\omega T) = X_c(\omega) \cdot H(\Omega)$$

$H(\omega)$: 恒等系统的频率响应。

$$Y_p(\omega) = X_p(\omega) \cdot H_p(\omega)$$



$$Y_c(\omega) = X_c(\omega) \cdot H_c(\omega)$$



$$H_c(\omega) = \begin{cases} H(\omega T), & |\omega| \leq \frac{\omega_s}{2} \\ 0, & |\omega| > \frac{\omega_s}{2} \end{cases}$$

§ 5 频域抽样

香农抽样定理是对有限带宽的连续时间信号在时域中的抽样，但是连续时间信号在时域和频域间存在着对偶关系。因此与时域抽样定理相对应，在频域中存在着相应的对偶定理，借此一个时限信号可以从其频域样本中重建。

一、频域中抽样函数（抽样序列）

$$P(\omega) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(\omega - k\omega_0)$$

设某一时域信号的频率特性为： $X(\omega)$

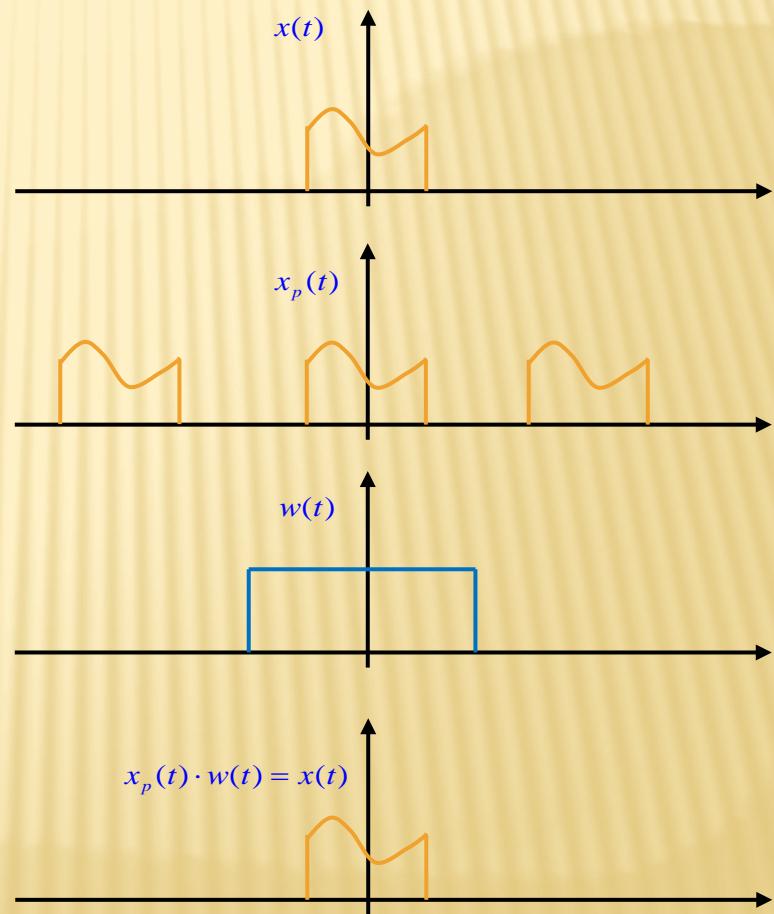
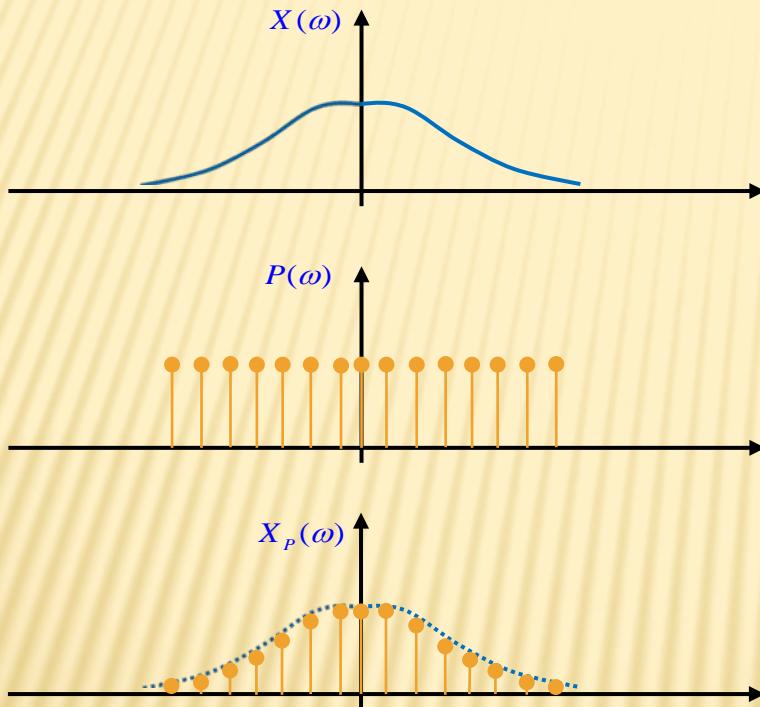
对该特性在频域中的抽样为： $X_p(\omega) = X(\omega)P(\omega)$

在时域中则有： $x_p(t) = x(t) * p(t)$ $p(t) = \frac{1}{\omega_0} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t - \frac{2\pi}{\omega_0}k)$

则有:
$$x_p(t) = \frac{1}{\omega_0} \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(t - \frac{2\pi k}{\omega_0})$$

$$X_P(\omega) = \frac{1}{T} \sum_{k=-\infty}^{\infty} X(\omega - k\omega_s)$$

对偶公式: 时域中的周期性。



同样可以得到如下结论：

因为：

$$x(t) = x_p(t)w(t)$$

则有：
$$X(\omega) = \frac{1}{2\pi} X_p(\omega) * W(\omega)$$

其中：
$$X_p(\omega) = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=-\infty}^{\infty} X(k\omega_0) \delta(\omega - k\omega_0)$$

$$W(\omega) = 2\pi \sin c\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)$$

则有：

$$X(\omega) = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=-\infty}^{\infty} X(k\omega_0) \sin c\left(\frac{\omega - k\omega_0}{\omega_0}\right)$$

$$x_r(t) = T \frac{\omega_c}{\pi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(nT) \sin\left(\frac{\omega_c(t - nT)}{\pi}\right)$$

对偶公式：频域中采样点的内插计算。

§ 6 离散时间信号抽样（略）

§ 7 离散时间抽取与内插（略）

第六章结束