清华大学计算机科学与技术系

信号处理原理

贾珈

jjia@tsinghua.edu.cn

13651399048

2020.12.17

传递函数

离散时间LTI系统输入输出满足下列关系

$$y(n) = x(n) * h(n)$$

$$\boxed{Y(z) = X(z) \cdot H(z)}$$

$$\boxed{H(z) = Y(z) \,/\, X(z)}$$

H(z)与系统特性有一一对应关系，也可以说是系统特性的一种反映，所以通常称**H(z)**为**LTI**系统的传递函数，也称系统函数。

传递函数**H(z)**实际上是系统单位冲激响应**h(n)**的**Z**变换，可以直接由单位冲激响应求出来

$$H(z) = Z[h(n)] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} h(n)z^{-n}$$

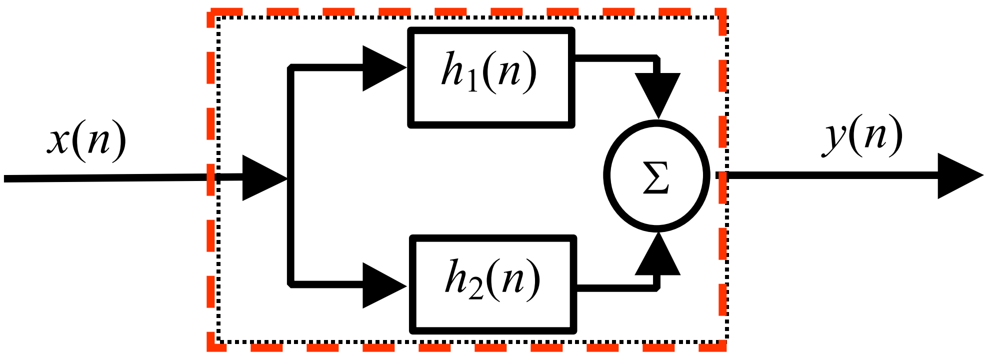
传递函数**H(z)**与单位冲激响应**h(n)**是一对**ZT**对

因为 $$y(n) = x(n) * h(n)$$

所以 $$Z[y(n)] = Z[x(n)] \cdot Z[h(n)]$$

于是 $$Z[h(n)] = \frac{Z[y(n)]}{Z[x(n)]} = \frac{Y(z)}{X(z)} = H(z)$$

系统的并联组合

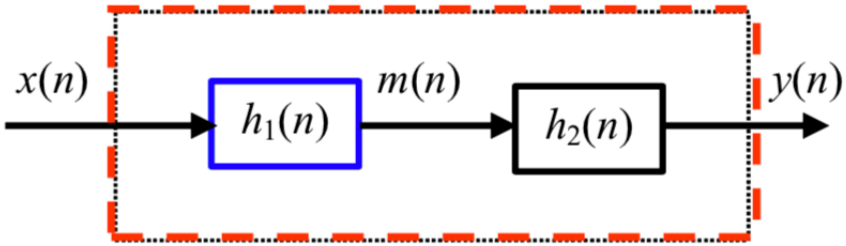


$$h(n) = h_1(n) + h_2(n)$$

$$H(z) = H_1(z) + H_2(z)$$

两个系统并联后新系统的单位冲激响应是并联子系统单位冲激响应的和，传递函数是并联子系统传递函数的和

系统的串联组合

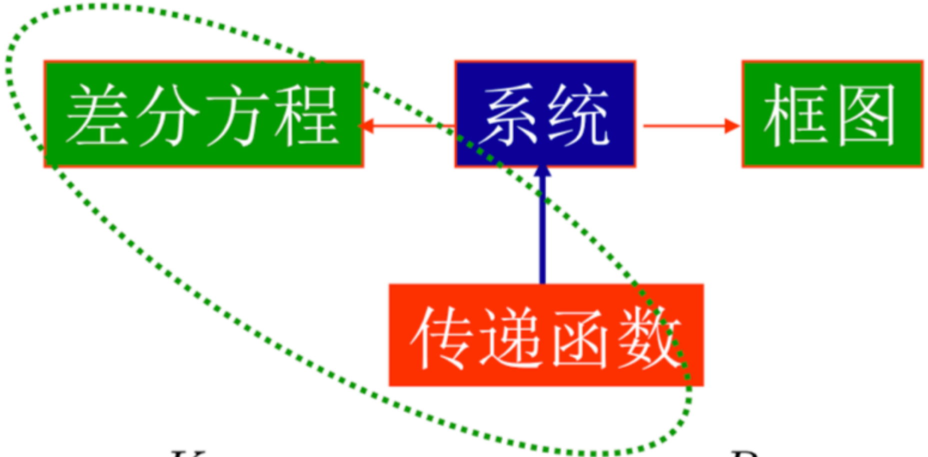


$$h(n) = h_1(n) * h_2(n)$$

$$H(z) = H_1(z) \cdot H_2(z)$$

两个系统串联后新系统的单位冲激响应是串联子系统单位冲激响应的卷积，传递函数是串联子系统传递函数的乘积

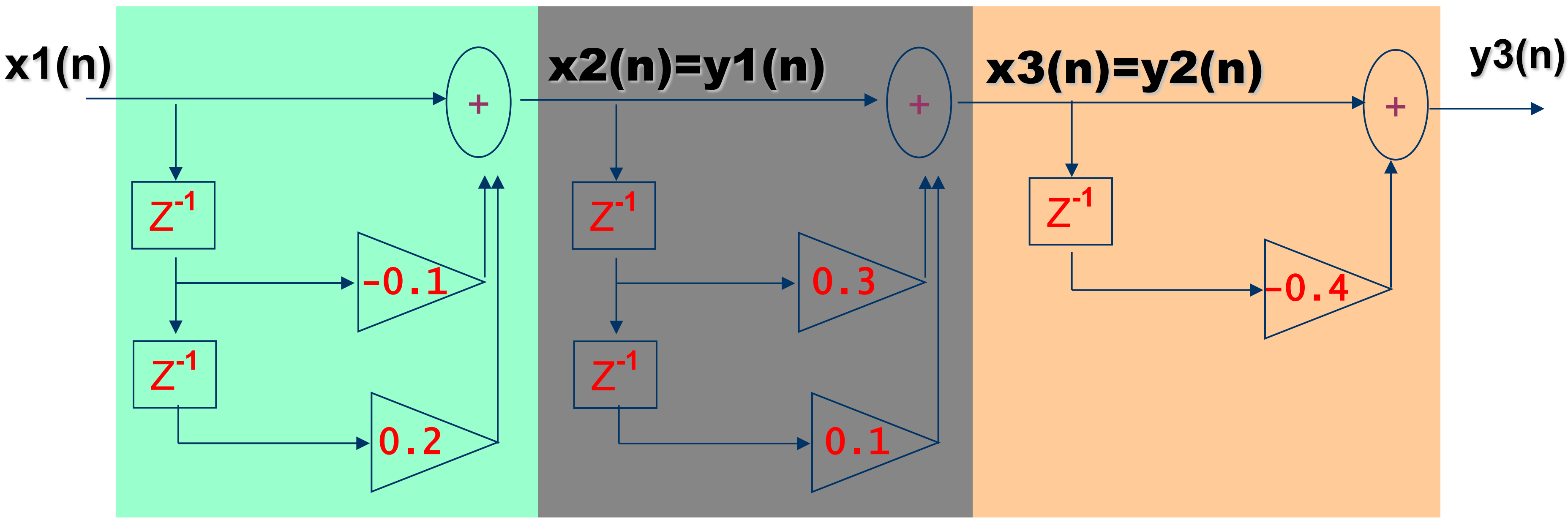
传递函数与差分方程的关系

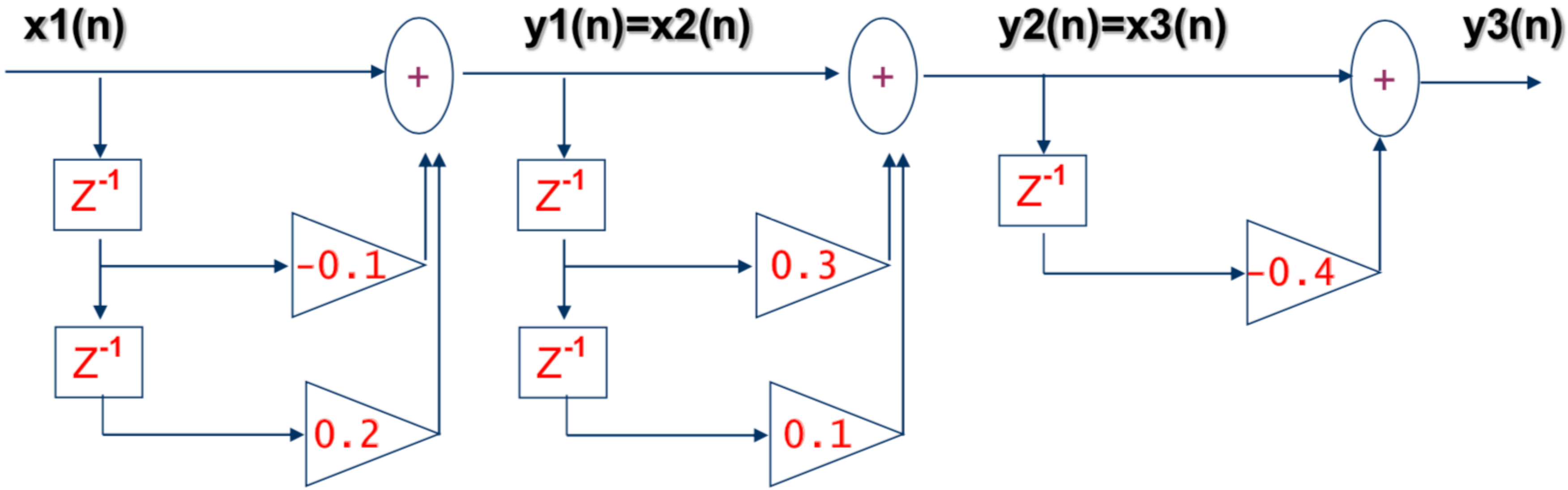


$$\sum_{k=0}^{K} b_k y(n-k) = \sum_{r=0}^{R} a_r x(n-r)$$

$$\Rightarrow \quad H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{\sum_{r=0}^{R} a_r z^{-r}}{\sum_{k=0}^{K} b_k z^{-k}}$$

写出如图所示级联流图的差分方程





$$y_1(n) = x_1(n) - 0.1x_1(n-1) + 0.2x_1(n-2)$$

$$y_2(n) = x_2(n) + 0.3x_2(n-1) + 0.1x_2(n-2)$$

$$y_3(n) = x_3(n) - 0.4x_3(n-1)$$

$$\begin{aligned} y_3(n) = {} & x_1(n) - 0.2x_1(n-1) + 0.19x_1(n-2) \\ & - 0.058x_1(n-3) - 0.008x_1(n-5) \end{aligned}$$

使用ZT方法

$$y_1(n) = x_1(n) - 0.1x_1(n-1) + 0.2x_1(n-2)$$

$$y_2(n) = x_2(n) + 0.3x_2(n-1) + 0.1x_2(n-2)$$

$$y_3(n) = x_3(n) - 0.4x_3(n-1)$$

$$\Rightarrow \boxed{\begin{aligned} H_1(z) &= 1 - 0.1z^{-1} + 0.2z^{-2} \\ H_2(z) &= 1 + 0.3z^{-1} + 0.1z^{-2} \\ H_3(z) &= 1 - 0.4z^{-1} \end{aligned}}$$

$$H(z) = H_1(z)H_2(z)H_3(z)$$

这是三个子系统级联！

$$= 1 - 0.2z^{-1} + 0.19z^{-2} - 0.058z^{-3} - 0.008z^{-5}$$

$$\Rightarrow y_3(n) = x_1(n) - 0.2x_1(n-1) + 0.19x_1(n-2) - 0.058x_1(n-3) - 0.008x_1(n-5)$$

系统的稳定性和因果性判定

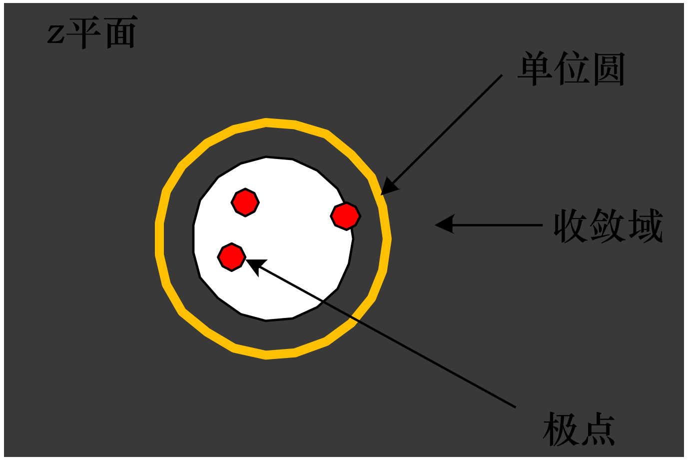
结论1 离散线性时不变系统是**因果系统**的充要条件是：传递函数**ROC**是某个圆外部的区域，包括无穷远点。

?

结论2 离散线性时不变系统是**稳定系统**的充要条件是：传递函数的**ROC**包括单位圆。

?

若系统是稳定的因果系统，则其传递函数**ROC**如下所示



回顾

特定序列的ROC

右边序列 序列$x(n)$在$n<n_1$时为零

$$X(z)=\sum_{n=n_1}^{\infty}x(n)z^{-n}$$

由根值法，若有 $\lim_{n\to\infty}\sqrt[n]{|x(n)z^{-n}|}<1$ 则 $|z|>\lim_{n\to\infty}\sqrt[n]{|x(n)|}=R_{x1}$

右边序列的收敛域是半径为R_{x1}的圆外部分

端点只影响无穷远处的收敛情况
$$\begin{cases} n_1\geq 0 & R_{x1}<|z|\leq\infty \\ n_1<0 & R_{x1}<|z|<\infty \end{cases}$$

为什么可以用H(z)的ROC的情况来确定系统的因果性？

反过来想这个问题：

一个因果系统的**h(n)**有何特点？

因果系统的单位冲激响应h(n)是**因果序列**

n = 0, 1, 2, …

h(n)是右边序列的一种（下标无负值）！

一般的右边序列ZT的ROC是圆外部分，

若下标无负值，则ROC还包含无穷远点

所以，根据ROC的情况，就可以知道系统是不是因果的

为什么H(z)的ROC只有包含单位圆，系统才稳定？

稳定系统 $\Leftrightarrow$ $$\sum_{n=-\infty}^{\infty} |h(n)| < \infty$$

为什么呢？BIBO原则！

$\Leftrightarrow$ $$\boxed{\sum_{n=-\infty}^{\infty} |h(n)z^{-n}|\bigg|_{|z|=1} < \infty}$$

$\Leftrightarrow$ H(z)的ROC包含单位圆

为什么可以用H(z)的极点位置来判定系统的稳定性？

其实，一个系统是不是稳定的，

只取决于它的H(z)的ROC是否包含单位圆。

根据ZT的ROC与其极点的关系（ROC不含极点），

有下面的结论：

1. 若系统是 **因果系统**，其ROC是某圆外部分，所以全部极点须在单位圆内，这样ROC才能包含单位圆，系统才稳定。
2. 若系统是**反因果系统**，其ROC是某圆内部分，所以全部极点须在单位圆外，这样ROC才能包含单位圆，系统才稳定。

数字滤波器的设计

FIR 数字滤波器的设计

（有限脉冲响应滤波器）

IIR 数字滤波器的设计

（无限脉冲响应滤波器）

有限脉冲响应FIR和FIR滤波器

（复习）

$$y(n)=\sum_{k=0}^{M}a(k)x(n-k)$$

上述系统的脉冲响应在有限个非零采样值后下降到零。这种响应被称为有限脉冲响应（finite impulse response, FIR），这种滤波器称为FIR滤波器。

无限脉冲响应IIR和IIR滤波器

$$y(n)=\sum_{k=0}^{M}a(k)x(n-k)+\sum_{k=1}^{N}b(k)y(n-k)$$

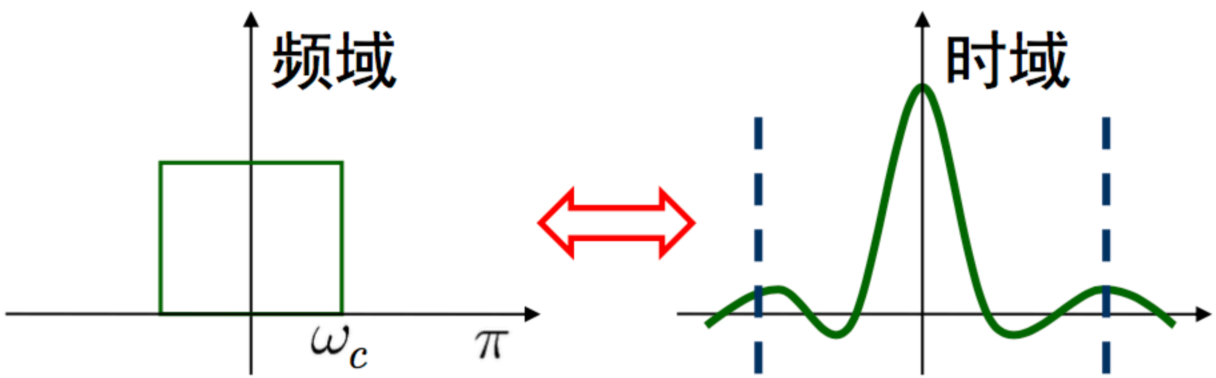
显然，新的输出取决于过去的输出，所以脉冲响应永远不会消失，这种响应被称为无限脉冲响应（infinite impulse response, IIR），这种滤波器称为IIR滤波器。

FIR 数字滤波器的设计

系统（滤波器）的作用 $X(\omega) \rightarrow Y(\omega)$

滤波器对输入信号的频率分量进行处理

$$Y(\omega) = X(\omega) \cdot H(\omega) \qquad y(n) = x(n) * h(n)$$



离散化

$$h(n) = \frac{\sin(n\omega_c)}{n\pi}$$

1. 滤波器的单位冲激响应h(n)可以表征系统
2. 理想低通滤波器的h(n)无限长，且有负值下标，是物理不可实现的
3. FIR滤波器的单位冲激响应h'(n)是有限长（只有有限个非零值）的因果序列

FIR 数字滤波器的窗函数设计法

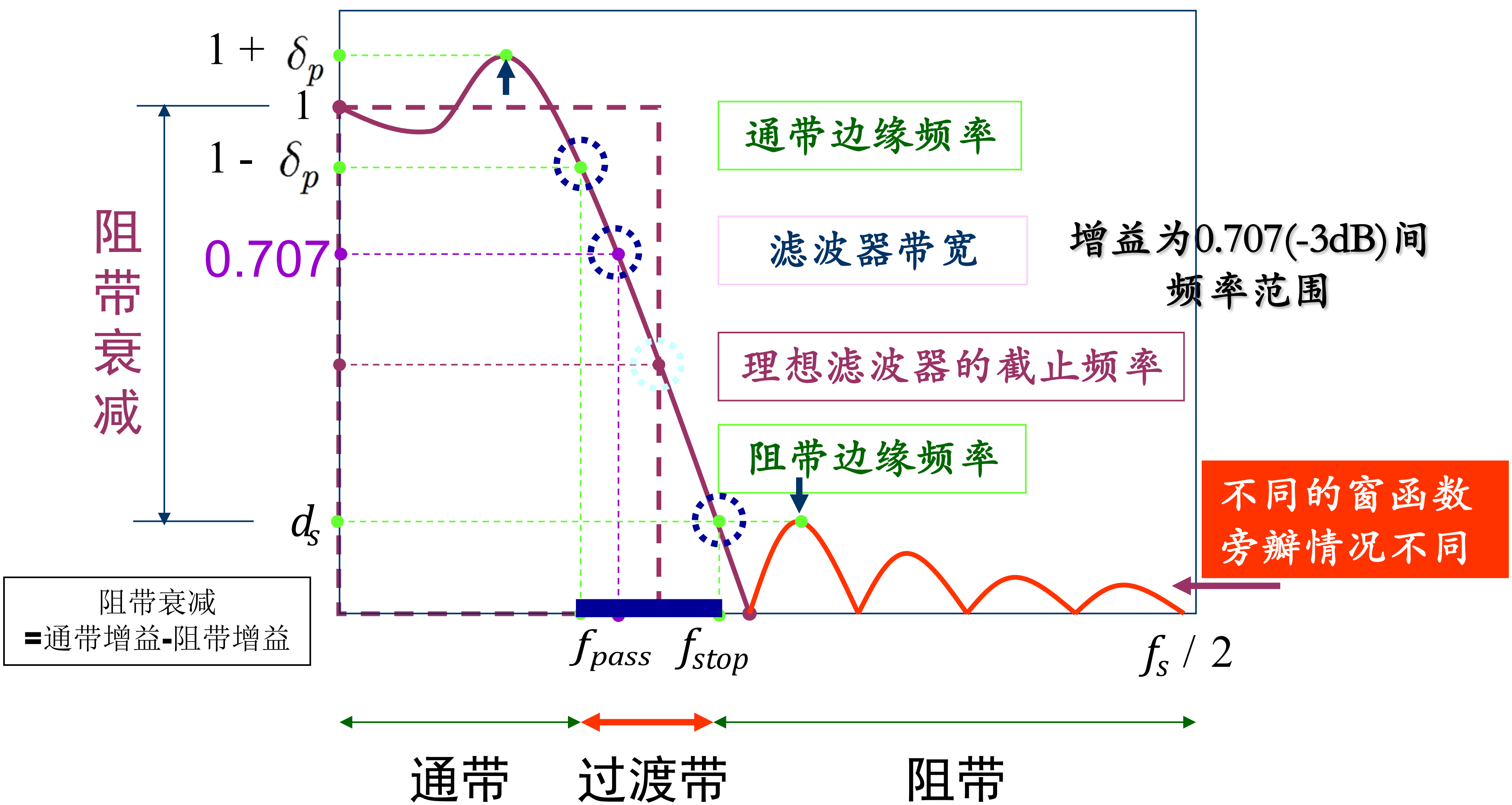
1. h’(n)将满足要求的理想低通滤波器的h(n)截断
2. 因为时域平移只影响相位，所以可以将截断后的h(n)平移成因果序列（而不影响系统的幅频响应特性）
3. 用所得h(n)实现的滤波器即为所需FIR的h’(n)

$$h(n) = \frac{\sin(n\omega_c)}{n\pi}$$ （理想的低通滤波器）

$$\rightarrow h'(n) = h(n)w(n)$$

时域截断，频域H(w)与截取窗函数作卷积，滤波器的滤波性能**(滤波器形状)发生改变**。

需求分析→滤波器的滤波特性参数（低通滤波器）



虚线表示的是理想低通滤波器；实线表示的是窗函数法得到的实际的低通滤波器

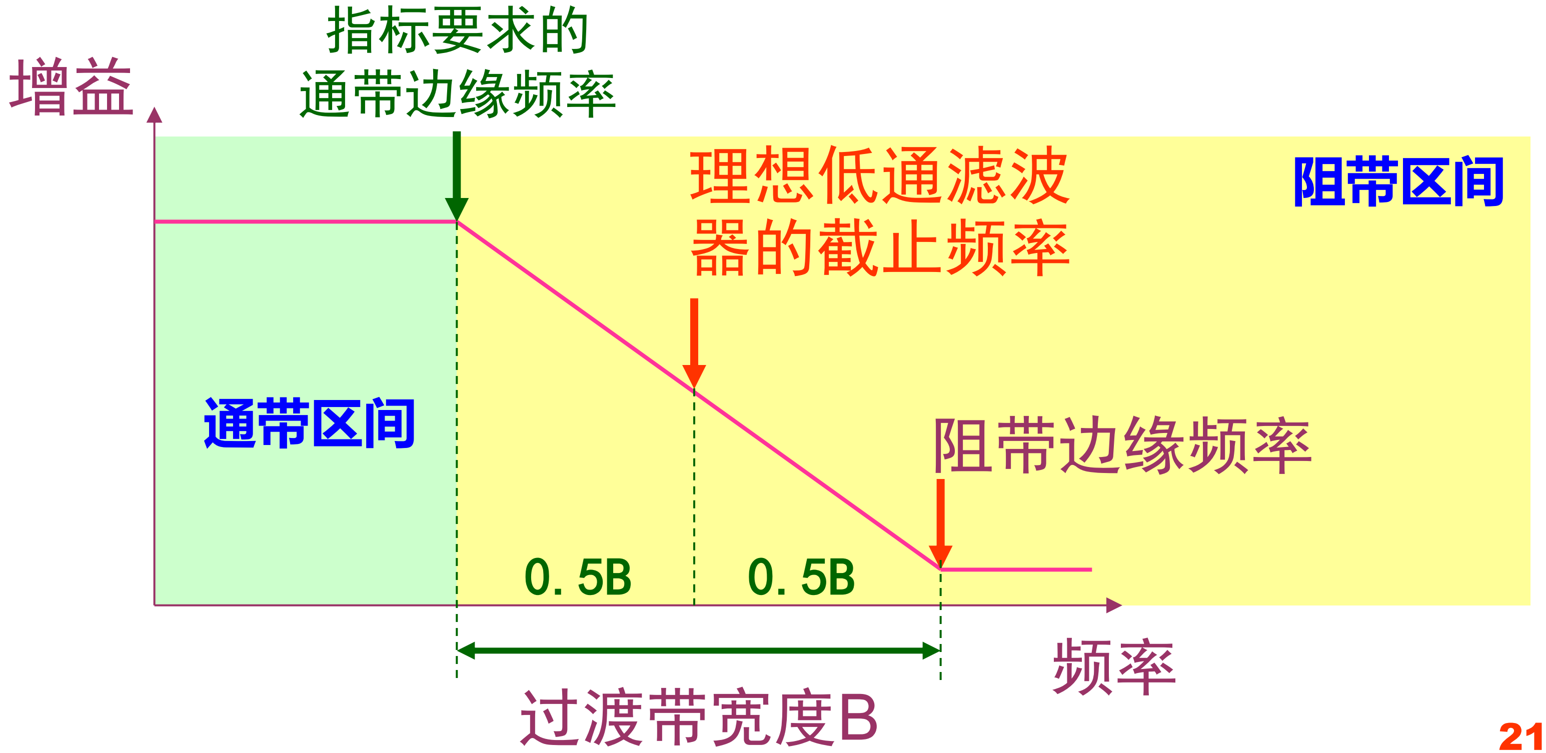
理想低通滤波器的h(n)被不同的窗函数截断时性能

窗类型	窗函数 $\lvert n \rvert \le \frac{N-1}{2}$	窗内项数 T.W.是过渡带宽度	阻带衰减dB	通带边缘增益dB $20\log(1-\delta_p)$
矩形	1	$0.91\frac{f_s}{T.W.}$	21	-0.9
汉宁	$0.5+0.5\cos\frac{2\pi n}{N-1}$	$3.32\frac{f_s}{T.W.}$	44	-0.06
哈明	$0.54+0.46\cos\frac{2\pi n}{N-1}$	$3.44\frac{f_s}{T.W.}$	55	-0.02
布莱克曼	$0.42+0.5\cos\frac{2\pi n}{N-1}$ $+0.08\cos\frac{4\pi n}{N-1}$	$5.98\frac{f_s}{T.W.}$	75	-0.0014
凯塞	$\frac{I_0\left(\beta\sqrt{1-\left(\frac{2n}{N-1}\right)^2}\right)}{I_0(\beta)}$	$4.33\frac{f_s}{T.W.}(\beta=6)$	64	-0.0057
		$5.25\frac{f_s}{T.W.}(\beta=8)$	81	-0.00087
		$6.36\frac{f_s}{T.W.}(\beta=10)$	100	-0.000013

理想低通滤波器的截止频率，由于单位冲激响应被截短成了有限项，所以滤波器的频率响应特性会发生改变。根据经验，在设计滤波器时，**理想低通滤波器的截止频率**不使用**通带边缘频率**，而是使用**过渡带中点的频率**。即：

理想低通滤波器的截止频率（设计用） =

设计指标要求的通带边缘频率 + (过渡带宽度) / 2



低通FIR滤波器的设计步骤

1. 在过渡带宽度中间，选择理想低通滤波器的截止频率 f_c(Hz) = 设计指标要求的通带边缘频率 + (过渡带宽度) / 2

2. 计算截止频率的**数字频率**，并代入

$$h(n) = \frac{\sin(n\omega_c)}{n\pi} \qquad \omega_c = 2\pi f_c / f_s$$

3. 从表中选择满足阻带衰减及其他要求的窗函数，计算窗内非零项的数目，选择奇数项（好处：脉冲响应完全对称，相位没有失真），计算出窗函数的表达式

4. 用窗函数与h(n)相乘，计算有限长脉冲响应

5. 将脉冲响应右移(N-1)/2，使第一个非零值在n=0处

数字滤波器的实现

自学

数字滤波器实现 → 程序设计实现、DSP算法实现

$$y(n) = x(n) * h(n) = \sum_{k=0}^{M} h(k)x(n-k)$$

```
double* FIR(double h[M+1], double x[N])
{
    double* y = new double[M+N];
    for (int n=0; n<M+N-1; n++) {
        y[n] = 0;
        for (int k=0; k<M; k++) {
            if (n>=k) y[n] += h[k]*x[n-k];
            else break;
        }
    }
    return y;
} // 由调用者负责删除y
```

根据下列指标设计低通FIR滤波器

通带边缘频率	10kHz	阻带边缘频率	22kHz
阻带衰减	75dB	采样频率	50kHz

窗类型	窗函数 $\|n\| \le \frac{N-1}{2}$	窗内项数 T. W. 是过渡带宽度	阻带衰减dB	通带边缘增益dB
布莱克曼	$0.42 + 0.5\cos\frac{2\pi n}{N-1} + 0.08\cos\frac{4\pi n}{N-1}$	$5.98\frac{f_s}{T.W.}$	75	-0.0014

正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

作答

【课堂练习1】根据下列指标设计低通FIR滤波器

通带边缘频率	10kHz	阻带边缘频率	22kHz
阻带衰减	75dB	采样频率	50kHz

过渡带宽度 = 22-10 = 12 kHz

➔ T.W.=12

理想低通滤波器的截止频率

f1 = 10k + 12K/2 = 16 kHz

相应的数字频率 $\omega_1 = 2\pi f_1 / f_s = 2\pi 16 / 50 = 0.64\pi$

理想滤波器的脉冲响应为

$$\boxed{h(n) = \frac{sin(n\omega_1)}{n\pi} = \frac{sin(0.64\pi n)}{n\pi}}$$

窗类型	窗函数 $\|n\| \le \frac{N-1}{2}$	窗内项数 T.W.是过渡带宽度	阻带衰减dB	通带边缘增益dB
布莱克曼	$0.42 + 0.5\cos\frac{2\pi n}{N-1} + 0.08\cos\frac{4\pi n}{N-1}$	$5.98\frac{f_s}{T.W.}$	75	-0.0014
凯塞	$\frac{I_0\left(\beta\sqrt{1-\left(\frac{2n}{N-1}\right)^2}\right)}{I_0(\beta)}$	$4.33\frac{f_s}{T.W.}(\beta=6)$ $5.25\frac{f_s}{T.W.}(\beta=8)$ $6.36\frac{f_s}{T.W.}(\beta=10)$	64 81 100	-0.0057 -0.00087 -0.000013

布莱克曼窗和凯塞窗都可以达到阻带衰减75dB的要求。
尽管凯塞窗的长度短，但**布莱克曼窗**计算简单。

$$N = 5.98\frac{f_s}{T.W.} = 5.98 \times \frac{50}{12} = 24.9 \to 25$$

窗长取25

窗函数为：

$$w(n) = 0.42 + 0.5\cos\frac{2\pi n}{24} + 0.08\cos\frac{4\pi n}{24}$$

滤波器脉冲响应为：

$$h'(n) = h(n)\omega(n) \quad (|n| \le 12)$$

将脉冲响应右移(N-1)/2，使第一个非零值在n=0处：

$$h'(n) = h(n-12)\omega(n-12) \quad (0 \le n \le 24)$$

根据下列指标设计低通FIR滤波器

通带边缘频率	2kHz	阻带边缘频率	3kHz
阻带衰减	40dB	采样频率	10kHz

窗类型	窗函数 $\lvert n\rvert \le \frac{N-1}{2}$	窗内项数 T.W.是过渡带宽度	阻带衰减dB	通带边缘增益dB $20\log(1-\delta_p)$
矩形	1	$0.91\frac{f_s}{T.W.}$	21	-0.9
汉宁	$0.5+0.5\cos\frac{2\pi n}{N-1}$	$3.32\frac{f_s}{T.W.}$	44	-0.06
哈明	$0.54+0.46\cos\frac{2\pi n}{N-1}$	$3.44\frac{f_s}{T.W.}$	55	-0.02

作答

【课堂练习2】根据下列指标设计低通FIR滤波器

通带边缘频率	2kHz
阻带边缘频率	3kHz
阻带衰减	40dB
采样频率	10kHz

过渡带宽度 = 3-2 = 1 kHz

理想低通滤波器截止频率 fc = 2k + 1K/2 = 2.5 kHz

截止数字频率 $\omega_c = 2\pi \cdot 2.5/10 = 0.5\pi$

理想滤波器的脉冲响应为

$$\boxed{h(n) = \frac{\sin(n\omega_c)}{n\pi} = \frac{\sin(0.5\pi n)}{n\pi}}$$

阻带衰减40dB，可以选择**汉宁窗**。窗长为：

$$N = 3.32\frac{f_s}{T.W.} = 3.32 \times \frac{10}{1} = 33.2 \rightarrow 35$$

窗函数为：

$$w(n) = 0.5 + 0.5\cos\ \frac{2\pi n}{34}$$

滤波器脉冲响应为：

$$h'(n) = h(n)w(n)\ \ (|n| \leq 17)$$

将脉冲响应右移(N-1)/2，使第一个非零值在n=0处：

$$h'(n) = h(n-17)\omega(n-17), (0 \leq n \leq 34)$$

自学

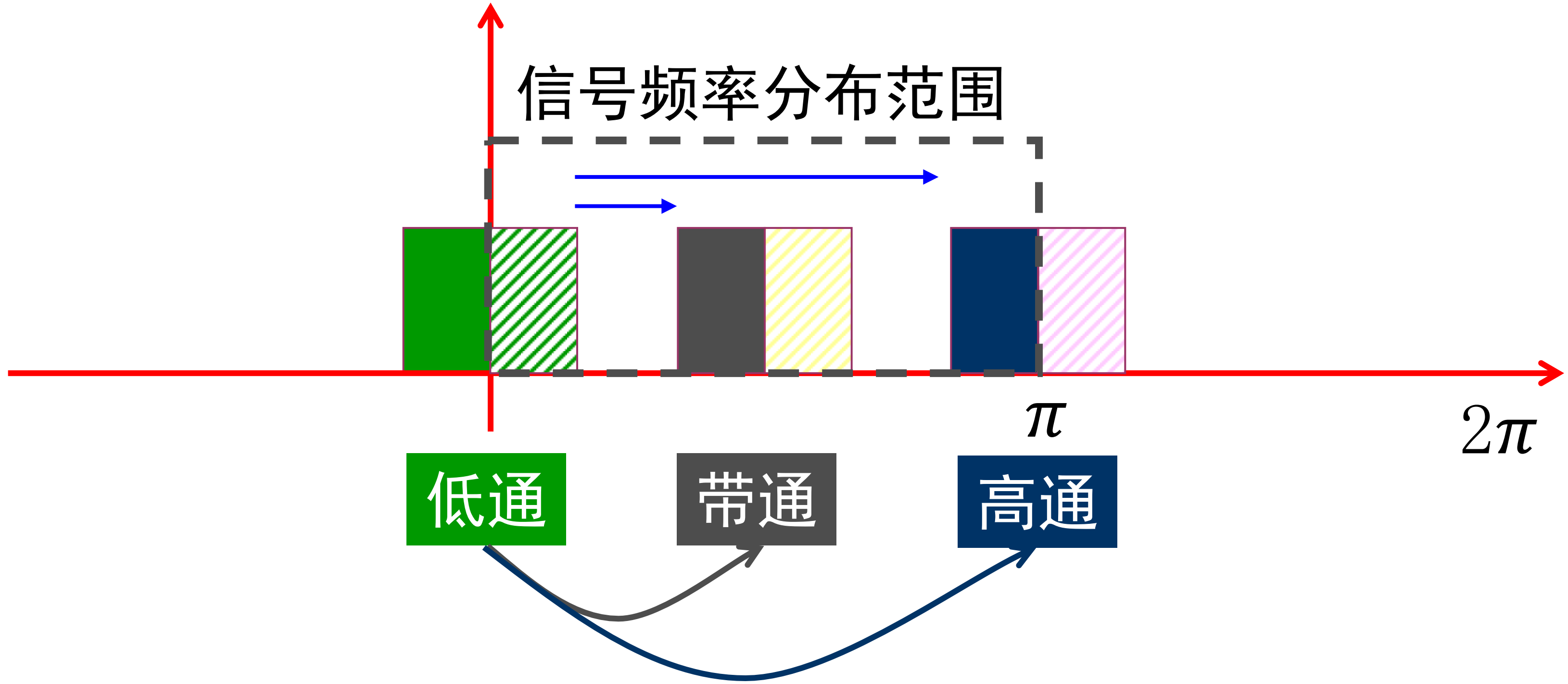
FIR1(N, Wn, WIN): N是FIR的阶次，Wn是截止频率，WIN是窗函数

```
>> fir1(32, 0.5, hann(33))
ans =
         0   -0.0002    0.0000    0.0021   -0.0000
   -0.0064    0.0000    0.0142   -0.0000   -0.0272
    0.0000    0.0495   -0.0000   -0.0971    0.0000
    0.3152    0.4999    0.3152    0.0000   -0.0971
   -0.0000    0.0495    0.0000   -0.0272   -0.0000
    0.0142    0.0000   -0.0064   -0.0000    0.0021
    0.0000   -0.0002         0
```

截止频率Wn的变化范围是0--1

返回值表示滤波器的系数

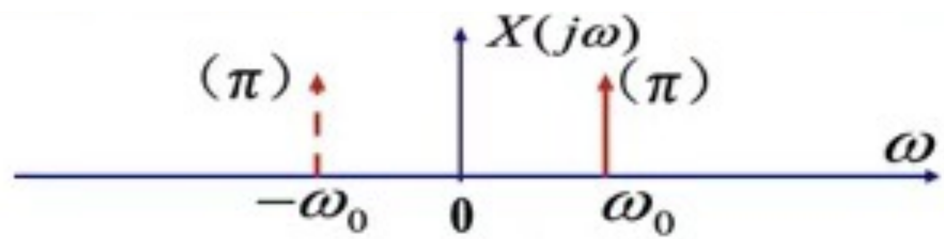
幅频响应为其他类型的FIR滤波器，如高通、带通、带阻，又该如何设计呢？



频率响应函数在频域移动到新位置，频移的办法：脉冲响应与余弦函数相乘 $h'(n) = \underbrace{h(n)w(n)}_{\text{低通滤波器}} \cos(n w_0)$

$x(t) = \cos\omega_0 t$

$x(t)$的频谱 $X(j\omega)$



其它数字滤波器如何设计？

根据下列指标设计带通FIR滤波器

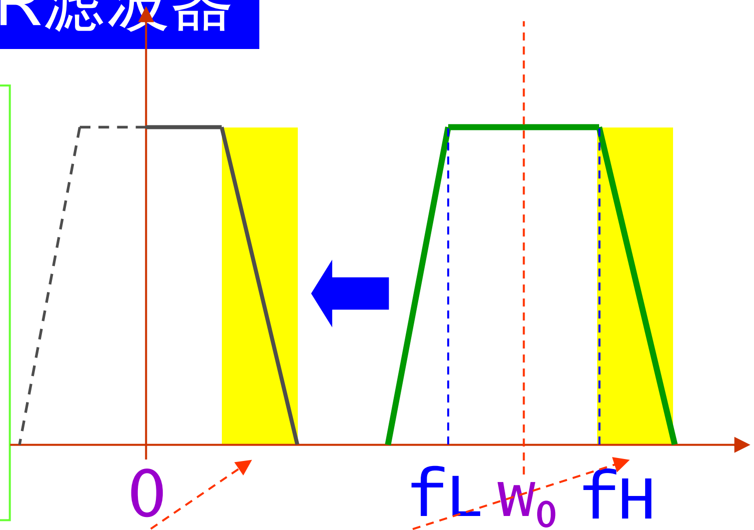
带通中心频率	4kHZ	过渡带宽度	500Hz
通带边缘频率	3. 5kHz, 4. 5kHz		
阻带衰减	50dB	采样频率	22kHz

窗类型	窗函数 $\lvert n\rvert \le \frac{N-1}{2}$	窗内项数 T.W.是过渡带宽度	阻带衰减dB	通带边缘增益dB $20\log(1-\delta_p)$
矩形	1	$0.91\frac{f_s}{T.W.}$	21	-0.9
汉宁	$0.5+0.5\cos\frac{2\pi n}{N-1}$	$3.32\frac{f_s}{T.W.}$	44	-0.06
哈明	$0.54+0.46\cos\frac{2\pi n}{N-1}$	$3.44\frac{f_s}{T.W.}$	55	-0.02

作答

【课堂练习3】根据下列指标设计带通FIR滤波器

带通中心频率	4kHZ
通带边缘频率	3.5kHz， 4.5kHZ
过渡带宽度	500Hz
阻带衰减	50dB
采样频率	22kHz



低通通带边缘 = 4.5-4 = 0.5kHz

低通过渡带宽 = **带通过渡带宽** = 500 Hz

理想低通滤波器的截止频率 f1=500+500/2=750 Hz

截止数字频率 $\omega_c = 2\pi \cdot 750 / 22000 = 0.06818\pi$

理想滤波器的脉冲响应为

$$\boxed{h(n) = \frac{\sin(n\omega_c)}{n\pi} = \frac{\sin(0.06818\pi n)}{n\pi}}$$

阻带衰减50dB，按此要求，可以选用**哈明窗**。窗长为：

$$N = 3.44\frac{f_s}{T.W.} = 3.44 \times \frac{22}{0.5} = 151.4 \rightarrow 153$$

窗函数为：

$$w(n) = 0.54 + 0.46\cos\frac{2\pi n}{152}$$

带通中心频率为4kHZ，余弦函数为：

$$\cos(n\omega_0) \qquad \omega_0 = 2\pi\frac{f_0}{f_s} = 2\pi\frac{4}{22} = 0.3636\pi$$

滤波器脉冲响应为：

$$h'(n) = h(n)w(n)\cos(n\omega_0), \quad (|n| \le 76)$$

将脉冲响应右移(N-1)/2，使第一个非零值在n=0处：

$$h'(n) = h(n-76)\omega(n-76)cos((n-76)\omega_0), (0 \le n \le 152)$$

0.06818：截止数字频率

```
>> fir1(150, 0.06818, hamming(151))

ans =

-0.0001   -0.0000    0.0000    0.0001    0.0002    0.0003    0.0003    0.0004    0.0005    0.0005
 0.0006    0.0006    0.0006    0.0005    0.0004    0.0003    0.0001   -0.0001   -0.0004   -0.0007
-0.0009   -0.0012   -0.0015   -0.0017   -0.0018   -0.0019   -0.0019   -0.0017   -0.0015   -0.0011
-0.0006    0.0000    0.0007    0.0014    0.0022    0.0030    0.0037    0.0043    0.0047    0.0050
 0.0050    0.0048    0.0043    0.0035    0.0024    0.0010   -0.0005   -0.0023   -0.0041   -0.0060
-0.0078   -0.0095   -0.0108   -0.0118   -0.0123   -0.0122   -0.0115   -0.0101   -0.0080   -0.0050
-0.0014    0.0030    0.0080    0.0135    0.0194    0.0257    0.0320    0.0383    0.0444    0.0501
 0.0552    0.0596    0.0632    0.0659    0.0675    0.0680    0.0675    0.0659    0.0632    0.0596
 0.0552    0.0501    0.0444    0.0383    0.0320    0.0257    0.0194    0.0135    0.0080    0.0030
-0.0014   -0.0050   -0.0080   -0.0101   -0.0115   -0.0122   -0.0123   -0.0118   -0.0108   -0.0095
-0.0078   -0.0060   -0.0041   -0.0023   -0.0005    0.0010    0.0024    0.0035    0.0043    0.0048
 0.0050    0.0050    0.0047    0.0043    0.0037    0.0030    0.0022    0.0014    0.0007    0.0000
-0.0006   -0.0011   -0.0015   -0.0017   -0.0019   -0.0019   -0.0018   -0.0017   -0.0015   -0.0012
-0.0009   -0.0007   -0.0004   -0.0001    0.0001    0.0003    0.0004    0.0005    0.0006    0.0006
 0.0006    0.0005    0.0005    0.0004    0.0003    0.0003    0.0002    0.0001    0.0000   -0.0000
-0.0001
```

设置

根据下列指标设计高通FIR滤波器

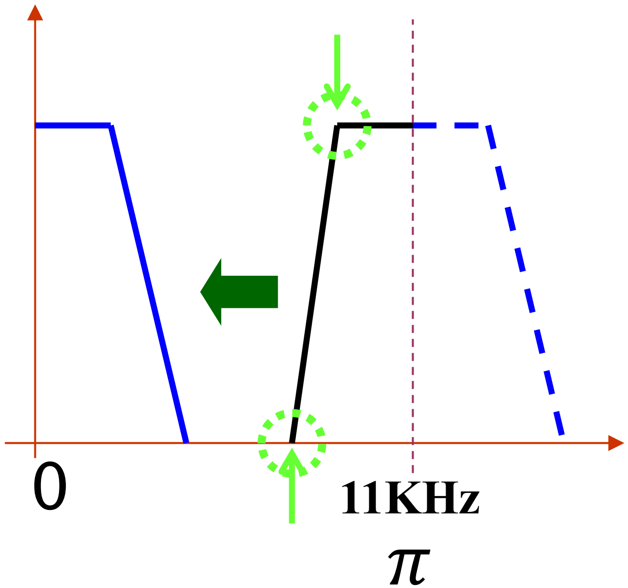
通带边缘频率	8kHz	阻带边缘频率	6kHz
阻带增益至少比通带增益低	40dB	采样频率	22kHz

窗类型	窗函数 $\lvert n\rvert \le \frac{N-1}{2}$	窗内项数 T.W.是过渡带宽度	阻带衰减dB	通带边缘增益dB $20\log(1-\delta_p)$
矩形	1	$0.91\frac{f_s}{T.W.}$	21	-0.9
汉宁	$0.5+0.5\cos\frac{2\pi n}{N-1}$	$3.32\frac{f_s}{T.W.}$	44	-0.06
哈明	$0.54+0.46\cos\frac{2\pi n}{N-1}$	$3.44\frac{f_s}{T.W.}$	55	-0.02

作答

【课堂练习4】根据下列指标设计高通FIR滤波器

通带边缘频率	8kHz
阻带边缘频率	6kHz
阻带增益至少比通带增益低	40dB
采样频率	22kHz



高通FIR的过渡带宽=8-6 = 2 k

高通FIR的中心频率=22/2 = 11 k

低通滤波器通带边缘频率=11-8=3k，阻带边缘频率=11-6=5k

理想低通滤波器的截止频率 = 3+2/2 = 4 k

截止数字频率 $\omega_c = 2\pi \cdot 4/22 = 0.3636\pi$

理想滤波器的脉冲响应为

$$\boxed{h(n) = \frac{\sin(n\omega_c)}{n\pi} = \frac{\sin(0.3636\pi n)}{n\pi}}$$

查表可知：**汉宁窗**可以提供所要求的阻带衰减。窗长为：

$$N = 3.44\frac{f_s}{T.W.} = 3.44 \times \frac{22}{2} = 36.5 \to 37$$

窗函数为：

$$w(n) = 0.5 + 0.5\cos\frac{2\pi n}{36}$$

高通中心频率为11kHZ，余弦函数为：

$$\cos(n\omega_0)$$

$$\omega_0 = 2\pi\frac{f_0}{f_s} = 2\pi\frac{11}{22} = \pi$$

滤波器脉冲响应为：

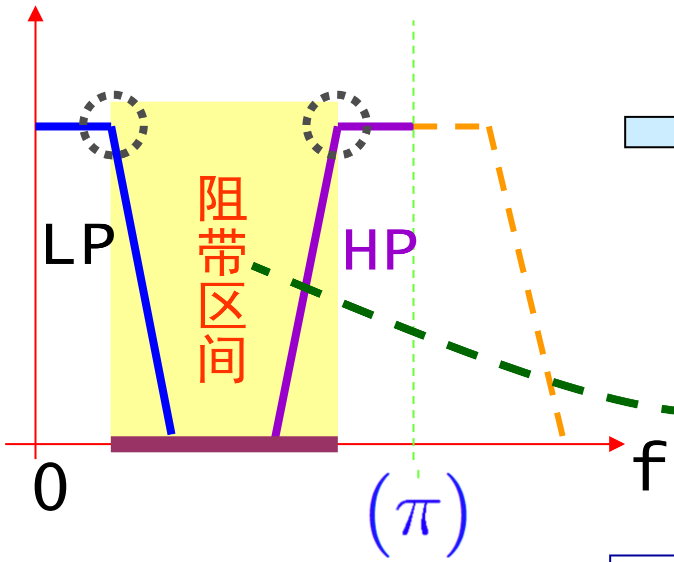
$$h'(n) = h(n)w(n)\cos(n\omega_0),\ (|n| \le 18)$$

将脉冲响应右移(N-1)/2，使第一个非零值在n=0处：

$$h'(n) = h(n-18)\omega(n-18)cos((n-18)\omega_0),(0 \le n \le 36)$$

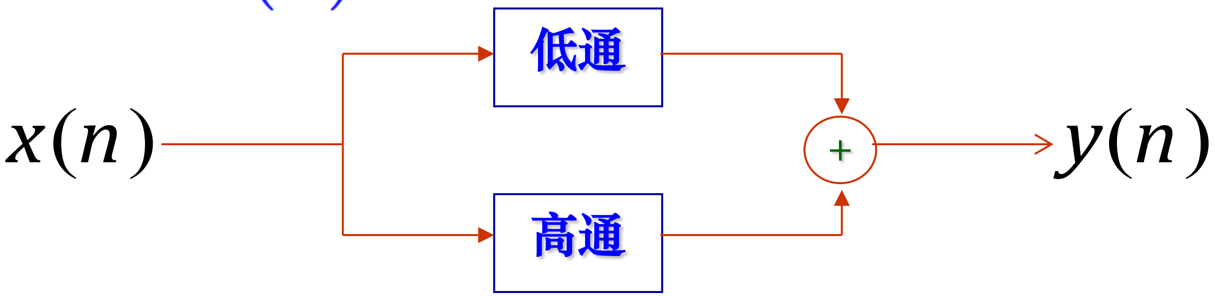
带阻FIR滤波器设计

带阻数字滤波器如何设计？



带阻FIR＝低通FIR＋高通FIR

阻带区间：低通通带边缘频率 ～ 高通通带边缘频率

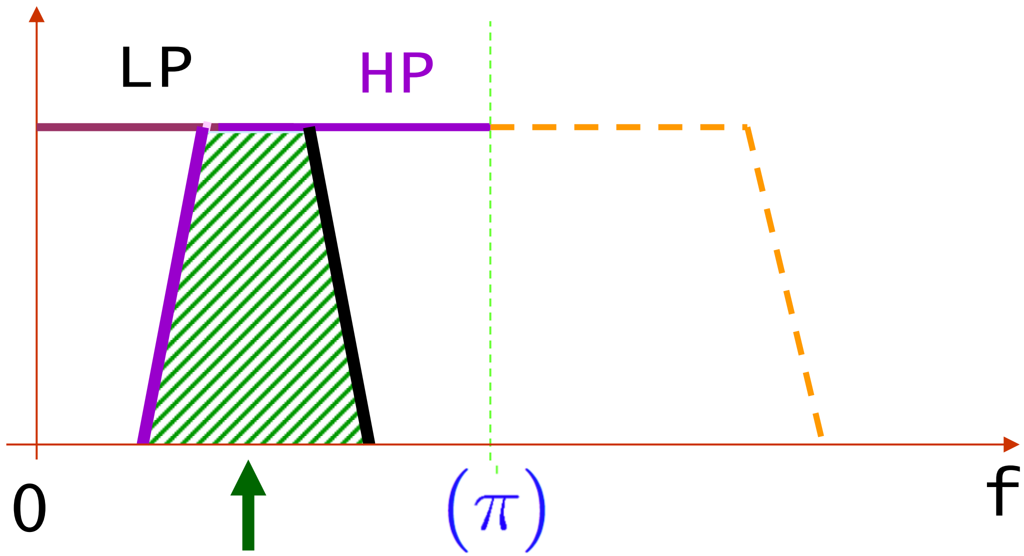


$$\boxed{h_{\mathrm{BS}}(n) = h_{\mathrm{LP}}(n) + h_{\mathrm{HP}}(n)}$$

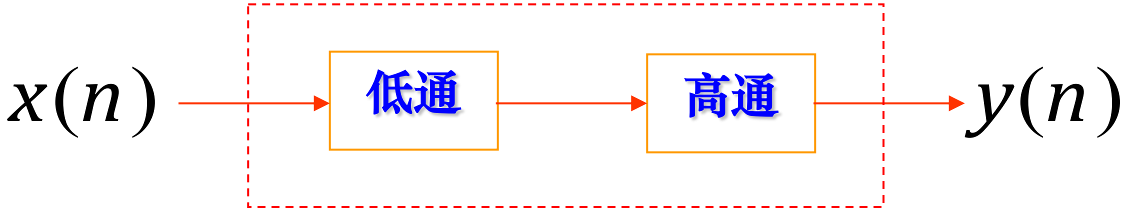
带通数字滤波器是否可以借鉴呢？

带通FIR滤波器设计

带通数字滤波器如何设计？



信号中这个频带的分量，既能通过低通滤波器，又能通过高通滤波器



$$H_{\mathrm{BP}}(\omega) = H_{\mathrm{LP}}(\omega) \cdot H_{\mathrm{HP}}(\omega)$$

$$h_{\mathrm{BP}}(n) = h_{\mathrm{LP}}(n) * h_{\mathrm{HP}}(n)$$

结束