以成为因果的。总结地看，设计的FIR（可以办到）是因果稳定的。

③ 同样因为$h(n)$有限长，所以可以用FFT快速算法实现信号过滤，这就给FIR的应用带来了很大的实用性。

④ 在相同性能要求的情况下，FIR滤波器的阶次要比同时的IIR滤波器高，这是其不足之处

⑤ FIR滤波器的系统函数是z^{-1}的多项式，IIR滤波器的系统函数是z^{-1}的有理分式，这是从$H(z)$结构上看出的不同

⑥ FIR滤波器可以更灵活地设计出正交变换器，线性微分器及其他任意频率特性的滤波器

FIR滤波器系统函数基本表征为

$$H(z)=\sum_{n=0}^{N-1}h(n)z^{-n} \tag{1}$$

这是z^{-1}的$N-1$阶多项式

下面我们从线性相位的约束出发，先讨论一下时域上的$h(n)$的特征。

取(1)式中$z=e^{j\omega}$即得$h(n)$的傅里叶变换，记$H\left(e^{jw}\right)$。将其写成幅值和相角两部分，为

$$H\left(e^{jw}\right)=\left|H\left(e^{jw}\right)\right|e^{j\theta(w)} \tag{2}$$

按线性相位要求，即

$$\frac{d\theta(w)}{dw}=-\tau,\tau\text{是常数}$$

可以细分为两类

$$\theta(w)=\begin{cases}-w\cdot\tau\\-w\cdot\tau+\beta\end{cases}\Bigg| \tag{3}$$

这里的τ,β都是常数

将(3)代入到(2)中，我们先讨论第一类线性相位，有

$$H\left(e^{jw}\right)=\sum_{n=0}^{N-1}h(n)e^{-jnw}=H(w)e^{j\theta(w)}=H(w)e^{-jw\tau} \tag{4}$$

将(4)按实部，虚部展开，则

$$\begin{gathered}\sum_{n=0}^{N-1}h(n)\cos wn=H(w)\cos w\tau\\\sum_{n=0}^{N-1}h(n)\sin wn=H(w)\sin w\tau\end{gathered} \tag{5}$$

将(5)中两式相除消去$H(w)$，可以得到

$$\sum_{n=0}^{N-1}h(n)\cos wn\cdot\sin w\tau=\sum_{n=0}^{N-1}h(n)\sin wn\cdot\cos w\tau \tag{6}$$

利用三角公式$sin(\alpha\pm\beta)=sin\alpha\ cos\beta\pm cos\alpha\ sin\beta$将(6)式再整理为

$$\sum_{n=0}^{N-1}h(n)sin(\tau-n)w=0\#(7)$$

所以说，第一类线性相位约束$\theta(w)=\ -w\cdot\tau$最终等价于(7)式所表明的，我们关注到：当$\tau=(N-1)/2$时，且$h(n)$关于中心点$(N-1)/2$偶对称时，对于序列$\{h(n)sin(\tau-n)w\}$来说总体是

装

订

线

装

订

线

对中心点$(N-1)/2$奇对称的，满足了(7)式——亦即符合第一类线性条件。

对于第二类线性条件$\theta(w) = -w\cdot\tau+\beta$，可以经由类似的过程得到对$h(n)$在时域上的约束结果，这里就不详细展开了，最终可等价地表示为

$$\sum_{n=0}^{N-1} h(n)\,sin[(\tau-n)w-\beta]=0 \tag{8}$$

通常的，对于FIR滤波器，90°移相作用也是常出现地一类应用（譬如希尔伯特变换器）。因此，取$\beta=\pm\pi/2$ 是常见的，在此补充条件下，(8)等效地表为

$$\sum_{n=0}^{N-1} h(n)cos(\tau-n)w=0 \tag{9}$$

这要求$h(n)$关于中心点$(N-1)/2$奇对称且$\tau=(N-1)/2$。总结一下，两类线性相位的约束约束条件为

第一类线性约束 $\theta(w) = -w\cdot\tau$	$h(n)=h(N-1-n),$ $0\le n\le N-1$	$\tau=\frac{N-1}{2}$
第二类线性约束 $\theta(w) = -w\cdot\tau\pm\pi/2$	$h(n)=-h(N-1-n),$ $0\le n\le N-1$	$\tau=\frac{N-1}{2}$

即将进一步看到，按照N的奇偶划分，又可以再细分为四类FIR线性相位滤波器。

以上是从时域角度，或者说是对$h(n)$的考察，基于此，讨论$H(e^{jw})$的不同情形，需要注意的是，由于线性相位已经得到了约束，仅需讨论$H(e^{jw})$的幅频函数$H(w)$即可（参考(2)式）

分析思路是这样的，由于已经知道$h(n)=\pm h(N-1-n)$，自然想到利用z变换性质，也就是$Z\{\pm h(N-1-n)\}=\pm z^{-(N-1)}H(z^{-1})$（利用了移位性质和翻褶性质），有

$$\begin{aligned}H(z)&=\frac{1}{2}Z\{h(n)\pm h(N-1-n)\}\\&=\frac{1}{2}\left[H(z)\pm z^{-(N-1)}H(z^{-1})\right]\\&=\frac{1}{2}\sum_{n=0}^{N-1}h(n)\left[z^{-n}\pm z^{-(N-1)}z^{n}\right]\\&=z^{-\frac{N-1}{2}}\sum_{n=0}^{N-1}h(n)\frac{z^{\frac{N-1}{2}-n}\pm z^{-\left(\frac{N-1}{2}-n\right)}}{2}\end{aligned} \tag{10}$$

将z以e^{jw}替换之，先对第一类线性相位做讨论，也就是(10)中±取+ 的情形，稍作整理，得到下式

$$H(e^{jw})=e^{-j\frac{N-1}{2}w}\cdot\sum_{n=0}^{N-1}h(n)cos\left[\left(\frac{N-1}{2}-n\right)w\right]\#(11)$$

马上可以观得$H(w)$的结构，我们利用(10)式，再对第二类线性相位做讨论（也就是对 ±取−)，可以得到类似的结论，相关结果记于下表中

TypeI	$\theta(w) = -w \cdot \tau$	*N 为奇数*	$H(w) = \sum_{n=0}^{N-1} a(n) \cos nw$ $a(n) = 2h\left(\frac{N-1}{2} - n\right)$, $a(0) = h\left(\frac{N-1}{2}\right)$, $n = 1, 2, \dots, \frac{N-1}{2}$
TypeII		*N 为偶数*	$H(w) = \sum_{n=0}^{N-1} b(n) \cos\left(n - \frac{1}{2}\right) w$ $b(n) = 2h\left(\frac{N}{2} - n\right)$, $n = 1, 2, \dots, \frac{N}{2}$
TypeIII	$\theta(w) = -w \cdot \tau$ $\pm\pi/2$	*N 为奇数*	$H(w) = \sum_{n=0}^{N-1} c(n) \sin nw$ $c(n) = 2h\left(\frac{N-1}{2} - n\right)$, $n = 1, 2, \dots, \frac{N-1}{2}$
TypeIV		*N 为偶数*	$H(w) = \sum_{n=0}^{N-1} d(n) \sin\left(n - \frac{1}{2}\right) w$ $d(n) = 2h\left(\frac{N}{2} - n\right)$, $n = 1, 2, \dots, \frac{N}{2}$

图表 1

(2) FIR窗函数设计法原理

窗函数设计法是一种FIR时域设计方法，通过对理想的低通/高通/带通/带阻滤波器的$h(n)$进行“加窗”处理使其变成有限长的，同时符合我们前面讨论的线性的线性相位条件。

毫无疑问，加窗过程是这里的核心问题，我们设理想的数字滤波器冲激响应为$h_d(n)$（马上会看到，这是一个无限长的），并有窗函数$w(n)$，所谓的“加窗”就是

$$h(n) = h_d(n) \cdot w(n) \tag{12}$$

表现在频域上，由卷积定理，有

$$H(e^{jw})=\frac{1}{2\pi}H_d(e^{jw})*W(e^{jw}) \tag{13}$$

无疑，实际的$H(e^{jw})$与理想情形——$H_d(e^{jw})$是有一定差别的，这与$W(e^{jw})$的选取有关，在这里，我们先考虑低通/高通/带通/带阻的各理想情况。

对于理想线性相位低通滤波器，应有

$$H_d(e^{jw})=\begin{cases}e^{-jw\tau}, & 0\le|w|\le w_c\\ 0, & w_c<|w|\le\pi\end{cases}$$

w_c是理想的截止频率，是通频带和阻带的交界。由离散傅里叶变换逆变换得

$$\begin{aligned}h_d(n)&=\frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi}H_d(e^{jw})e^{jwn}dw\\&=\frac{1}{2\pi}\int_{-w_c}^{w_c}e^{-jw\tau}e^{jwn}dw\\&=\begin{cases}\dfrac{\sin[w_c(n-\tau)]}{\pi(n-\tau)}, & n\ne\tau\\ \dfrac{w_c}{\pi}, & n=\tau(\tau\text{是整数})\end{cases}\end{aligned} \tag{14}$$

经过前面的讨论，可以知道$\tau=(N-1)/2$

对于带通滤波器，这可以理解为一个截止频率为w_2的低通滤波器减去一个截止频率为w_1的的低通滤波器；对于高通滤波器，可以认为是一个全通滤波器减去一个低通滤波器来实现；对于带阻滤波器，这可以认为是一个全通滤波器减去一个带通滤波器来实现。

例如截止频率为w_c的高通滤波器，它的单位抽样响应就为

$$h_d(n)=\begin{cases}-\dfrac{\sin[w_c(n-\tau)]}{\pi(n-\tau)}, & n\ne\tau\\ 1-\dfrac{w_c}{\pi}, & n=\tau(\tau\text{是整数})\end{cases} \tag{15}$$

(3)　窗函数的选择

在加窗处理后，原$h_d(n)$无线长被处理为N点长$h(n)$，由于我们使用的窗函数也是线性相位的，所以加窗后仍是线性相位的。

在实际设计中，需要的技术参数有阻带最小衰减A_s和过渡带宽$\Delta\omega$，这是由窗函数的类型和其点数N共同决定的，这一领域已经总结了基本的内容，如下表所示

装

订

线

窗函数	窗谱性能分析		加窗后滤波器性能指标		
	旁瓣峰值（dB）	主瓣宽度	过滤带宽	阻带最小衰减（dB）	通带边沿衰减（dB）
矩形窗	-13	$4\pi/N$	$1..8\pi/N$	21	.815
三角窗	-25	$8\pi/N$	$6.1\pi/N$	25	.503
升余弦窗	-31	$8\pi/N$	$6.2\pi/N$	44	.055
汉明窗	-41	$8\pi/N$	$6.6\pi/N$	53	.021

图表 2

有了表格中的总结，FIR滤波器窗函数设计变得有迹可循，首先是根据要求中阻带的最小衰减确定窗函数形状，再有过渡带宽确定窗长，也就是其点数N，为了频谱分析的方便，我们常将加窗后的序列补零到2 的整数幂长度。

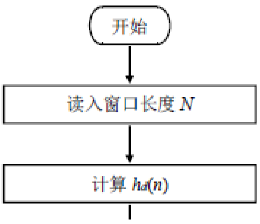
二、实验仪器设备（标注实验设备名称及设备号）

装有 Matlab R2018a 的计算机一台

三、实验线路示图、内容步骤

（1） 设计理想低通滤波器$h_d(n)$

从总体框架上看，程序的设计可以包括对三部分序列的产生与分析，也即是$h_d(n), w(n), h(n)$。我们首先产生理想低通滤波器的冲激序列$h_d(n)$



这部分的实现是基于式(14)的工作，需要注意，由于我们只能处理FIR序列，而(14)给出的序列自身是无限长的，所以隐含一个截断的过程——也就相当于加了一个平凡的矩形窗；还要注意，由于在$\tau = (N-1)/2$ 处$\sin[w_c(n-\tau)]/\pi(n-\tau)$是“分子分母同时为零”，所以我们在这里专门给出其值为w_c/π。在实际处理中，可以不必一定分段处理，而要使$n-\tau$加上一个小量 eps(1e-10)这样我们就可以利用$\sin[w_c(n-\tau)]/\pi(n-\tau)$一致求解$h_d(n)$了。下面就是本次用于产生理想低通的函数代码，N 是截断点数

```
function [hd, tau] = ideallp(wc, N)
% Ideal low-pass digital filter(with cut-off angular frenquency wc)
    tau = (N-1)/2;
    n = 0:N-1;
    m = n - tau + eps; % Avoid ZeroDivision Error
    hd = sin(wc * m)./(pi * m);
```

```
end
```

由于这里涉及到的FIR滤波器总是线性相位的，我们可以利用图表 1 中的结论，对四种类型的FIR滤波器求其幅值函数$H(\omega)$（当然也可以利用在实验二中编写的 fft_anylsis 进行分析），通过编写函数 amplres 完成对任一种FIR滤波器的分析

具体的编写参考了书本 P541 的内容，有较大的参考意义——因其写法简练，通过模余式 mod(N, 2)隐式地完成了分支处理，调用格式为

```
function [Hw, w, type] = amplres(h, M)
```

其中 h， M 分别对应于FIR滤波器的冲激响应和频域分析点数，Hw， w,分别是其幅频函数以及对应的频域向量（是一个 M 点向量），type 表明了FIR滤波器的类型，与图表 1 中的记法完全一致。

这个函数的具体实现过程见附录

再强调一下，由于本实验均是对FIR序列（$h_d(n), w(n), h(n)$）做处理，所以函数 amplres 在其频域分析有相当的通用性。从计算量角度来说，它的计算量也并不大（主要是进行余弦或正弦的运算，这在FFT快速算法同样出现）

(2) 设计窗函数$w(n)$

调用窗函数子程序求 $w(n)$

这里我们利用 Matlab 内置的函数

```
w = hanning(N);
w = hamming(N);
w = rectwin(N);
w = triang(N);
```

求解窗函数的时域FIR序列，上述各窗函数均接受窗长 N，并返回 w（这是一个列向量），即为对应的窗函数$w(n)$

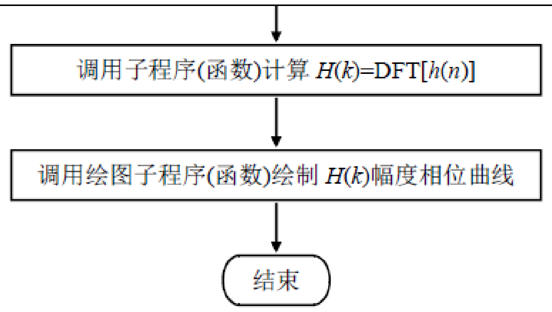
在实验的第二部分，要求用四种窗函数分别设计并分析，所以设计一个简单的分支程序完成处理

```
function w = choose_win_type(win_type, N)
```

win_type 是自定参数，决定窗函数的类型。

随后同样设计绘图程序打印序列 w 以及其幅度频谱（可由 amplres 生成）

(3) 加窗产生$h(n)$并作频域分析



如(12)式所表明的，我们加窗得到希望的FIR序列

```
h = wn.*hd; % Get your window
```

（在前面 wn 已经转置为一个行向量

```
wn = choose_win_type(win_type, N)';
```

）

这里需要得到其dB 表征的对数幅频曲线，可以利用之前实验使用到的自定函数

```
function [db, mag, pha, grd, w] = freqz_m(b, a, M)
```

其中的关键步骤是

```
    [H, w] = freqz(b, a, M*2, 'whole');
    H = H(1:M)'; w = w(1:M)';
    mag = abs(H);
    db = 20*log10((mag+eps)/max(mag));
```

还要注意，函数 `freqz_m` 接受的是一组多项式向量 `b`， `a` 以及频域抽样点数 `M`。我们在开头提到过，FIR滤波器的系统函数是z^{-1}的多项式——也就是说，它的分母多项式为`[1]`，分子多项式就为 h 自身

所以这里的调用过程为

```
[db, mag, pha, grd, w] = freqz_m(h, [1], M);
```

此外，由于频域抽样响应函数 `freqz` 有关DFT的内容，所以隐含涉及到FFT快速算法，不再需要额外实现。

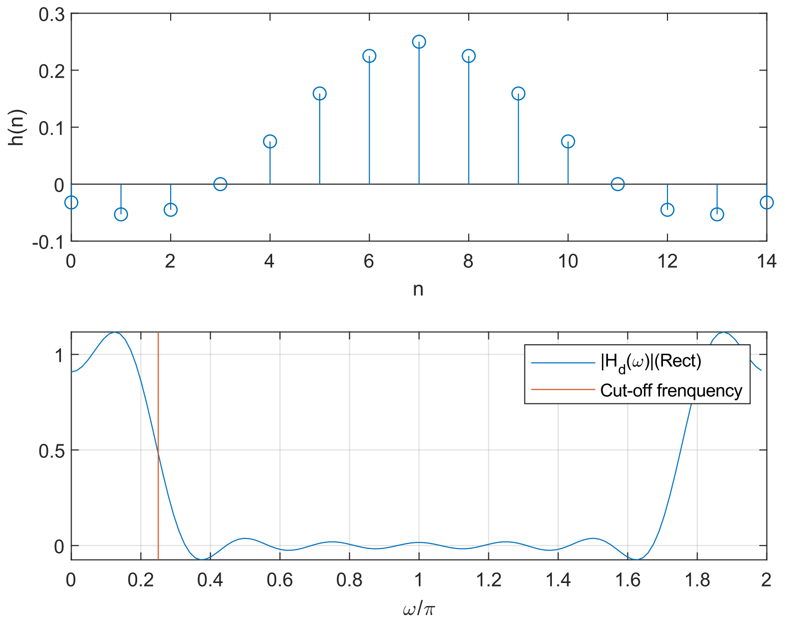
四、实验数据记录及数据处理

并参考附录代码中的 experiment recipe 部分

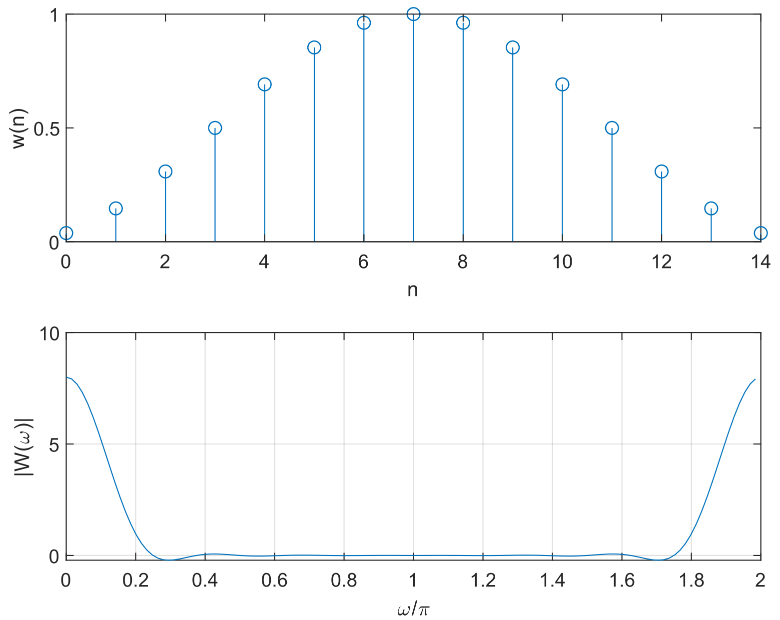
(1) EXP1

实验的第一部分的主要内容是，用升余弦窗（即 hanning 窗）设计一个 N 点长低通FIR滤波器，分别取 N=15 和 N=33(由于 N 是奇数，结合 hd 序列关于 tau 偶对称的特点，得知这总是 **TypeI**)，

当 N=15 时候，$h_d(n), w(n), h(n)$分别为



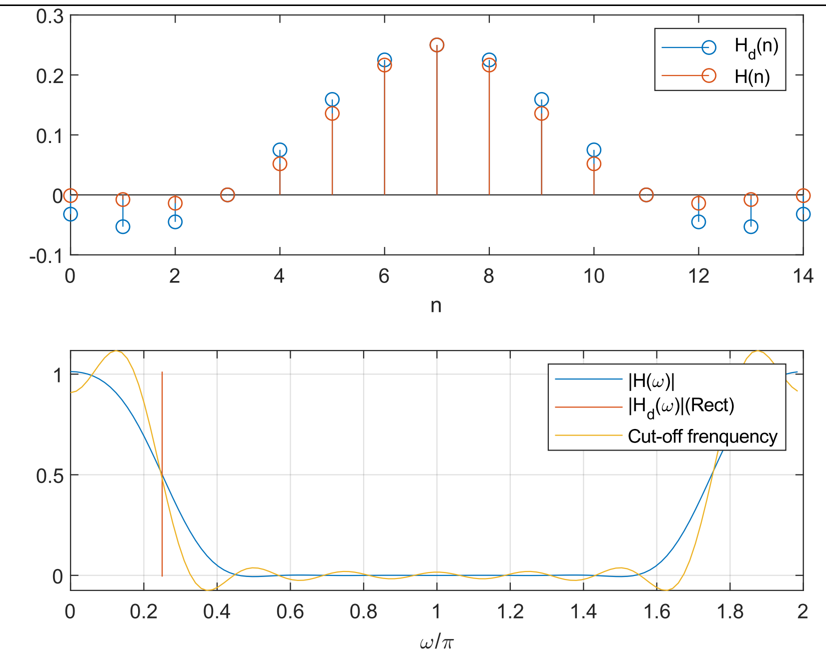
从图中也可看出，由于 hd 被截断到 N 点长，相当于加了平凡的矩形窗，得到的幅频曲线有了明显的过渡带，且有波纹波动。而在设计的$w_c(\pi/4)$处是其三分贝点。



装

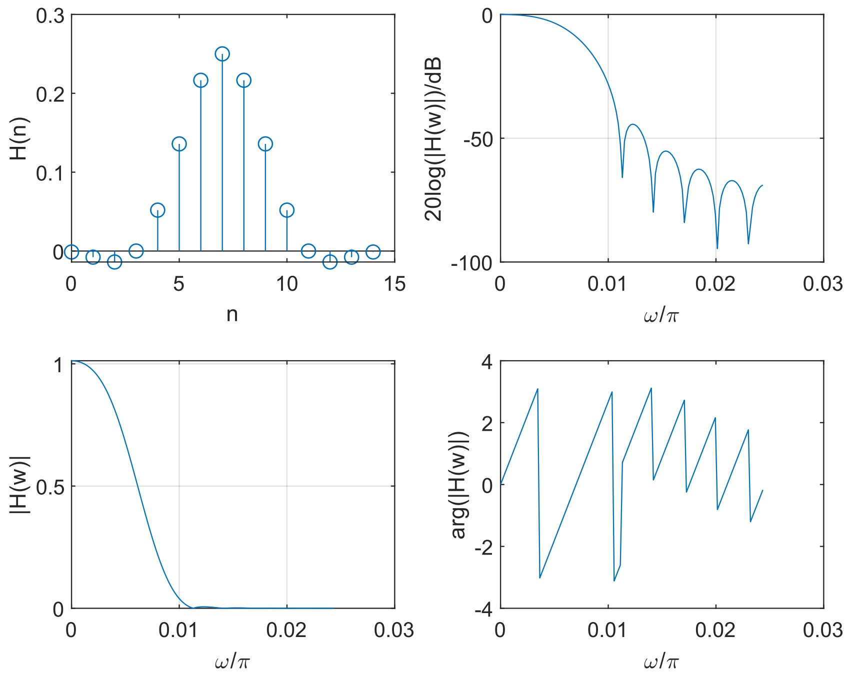
订

线

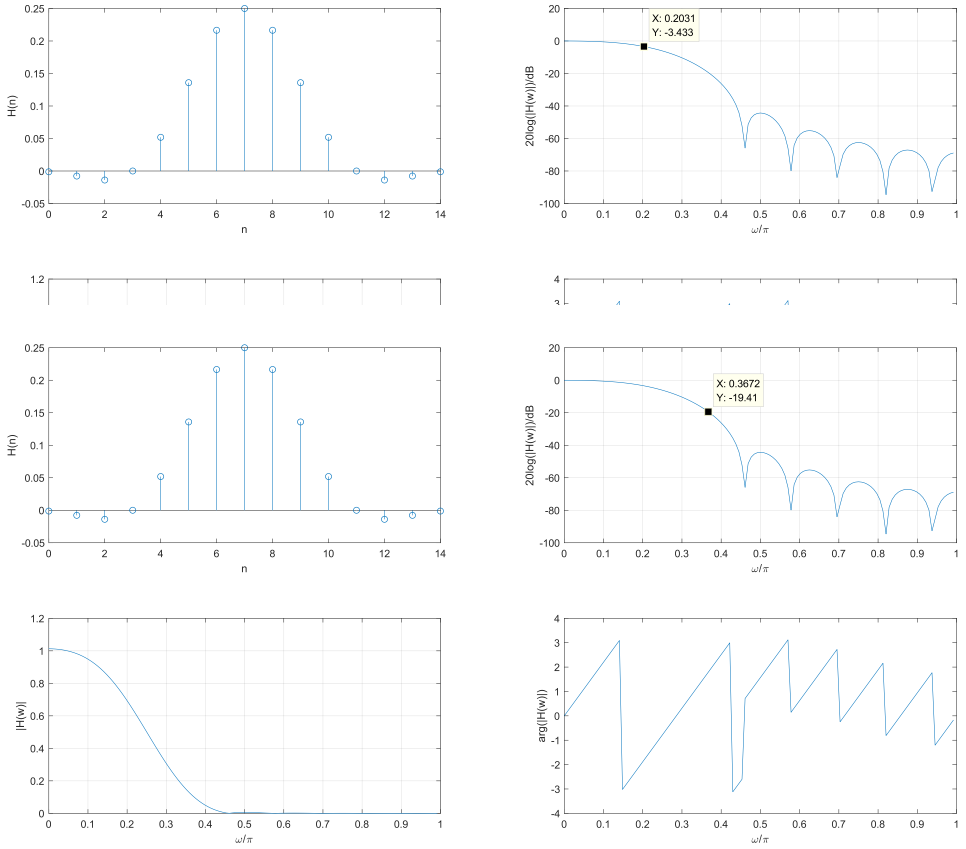


上图中$H_d(\omega)$与$Cut-off\ frenquency$标注应交换一下

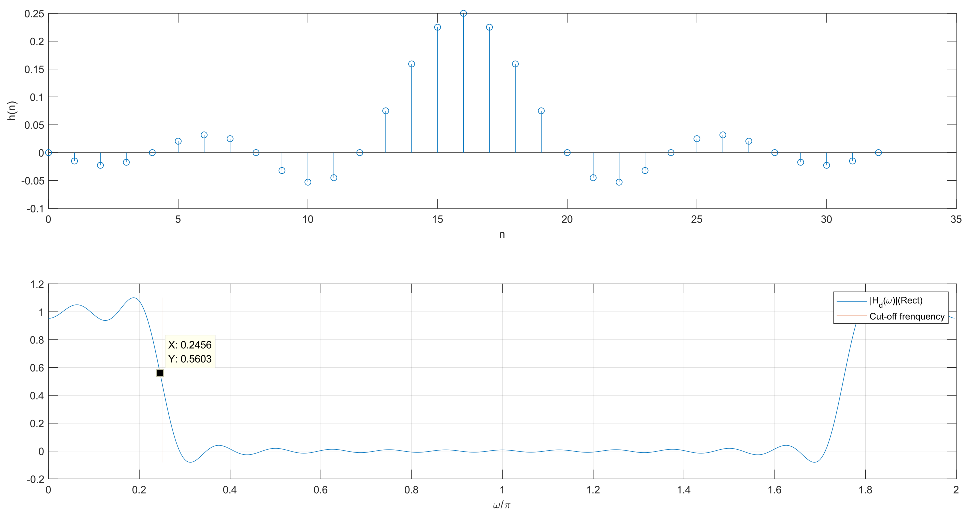
设计出的窗函数幅频曲线为



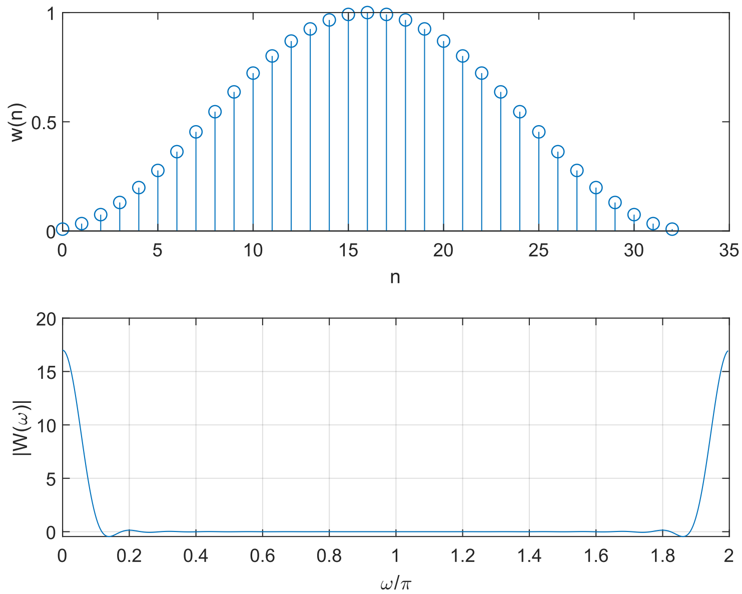
特别观察$3dB$ 和$20dB$点



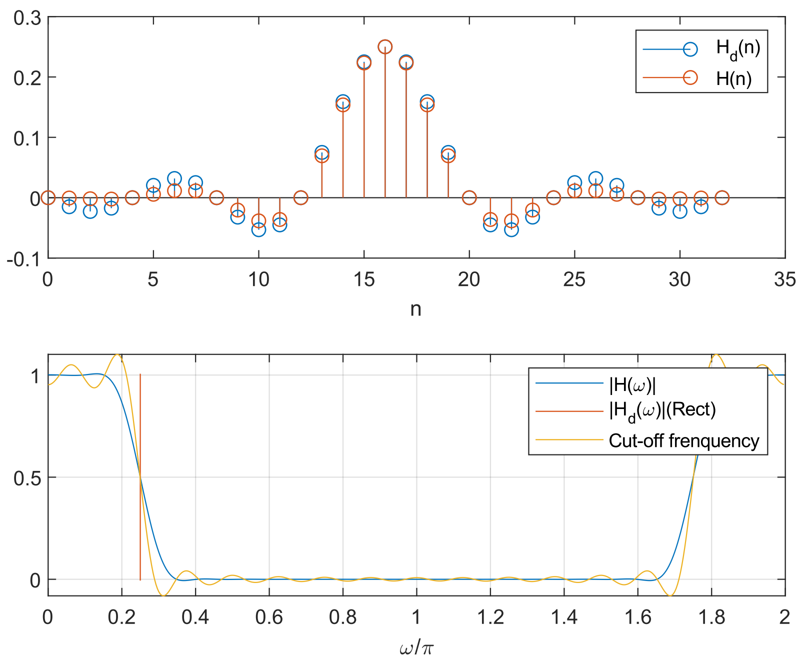
当 N=33 时，再做设计，有



相较于 N=15 时的情形，可直观地感受到阻带衰减变快了，同时w_c的三分贝点特征并未改变(注意这是未加汉宁窗的情形)

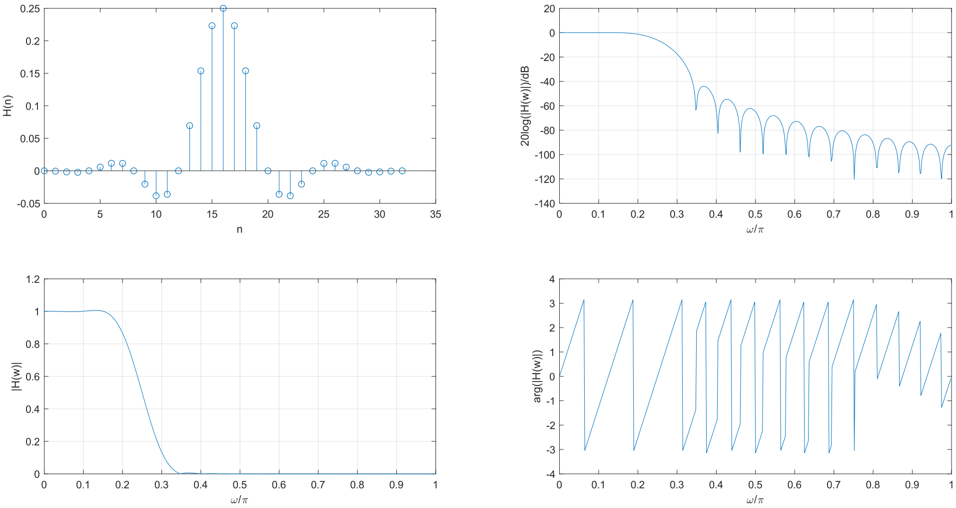


加窗后为:

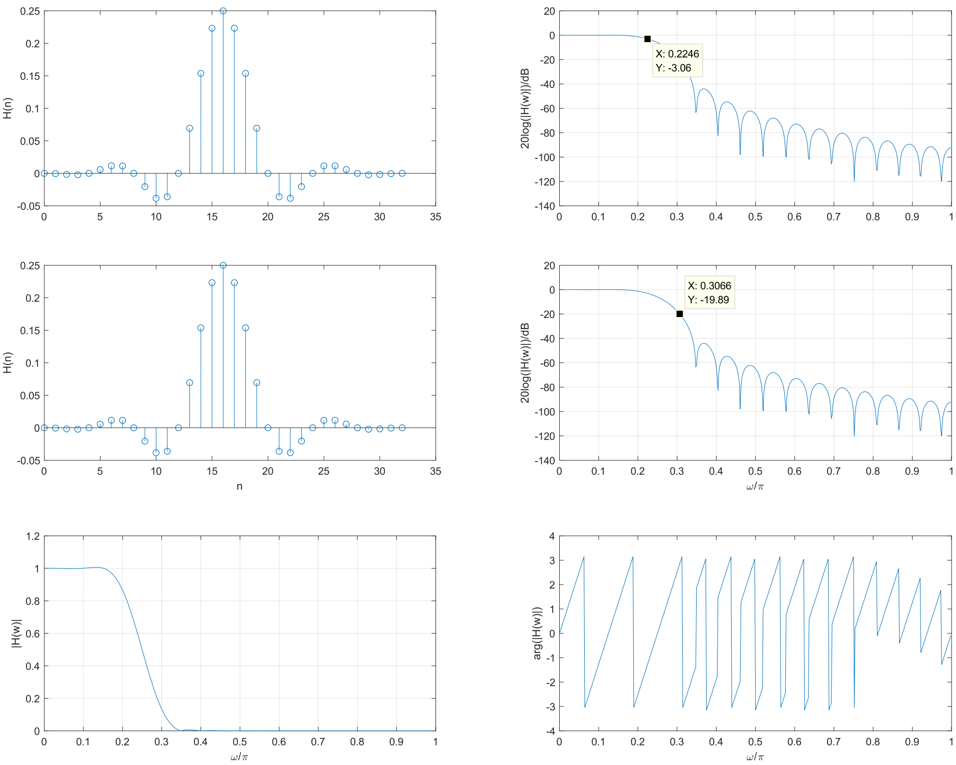


上图中$H_d(\omega)$与$Cut-off\ frenquency$标注应交换一下

同样从幅频角度分析，作图为



再次观察$3dB$ 和$20dB$点



明显注意到，$3dB$ ~$20dB$这一段的带宽，相较于点数更少的 N=15 的情形，已经收窄了。

从中我们可以定性地说，窗长 N 越大，过渡带宽就越窄，另外从阻带衰减的角度看，两次加升余弦窗，阻带衰减都略大于 40dB，没有明显差别。这也说明了阻带衰减要依靠窗函数的类型决定，且与图表 2 给出的技术指标是一致的。

装

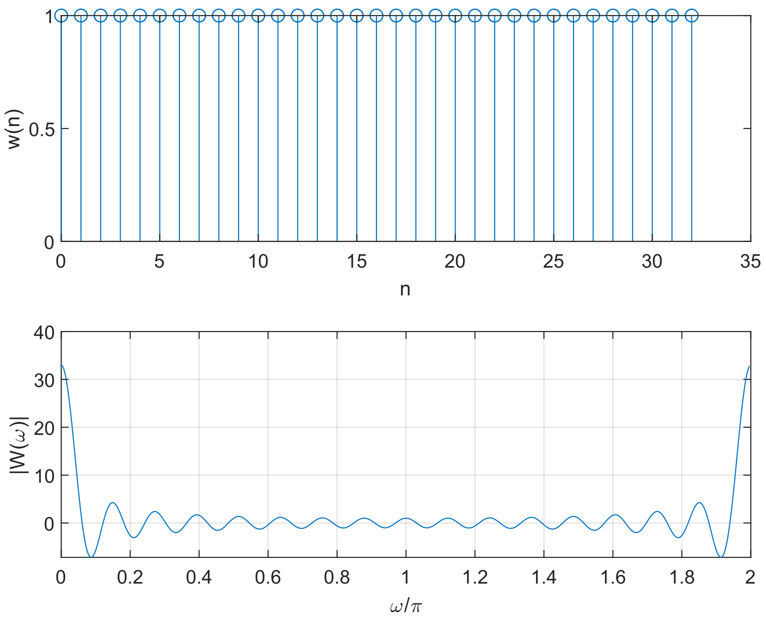
订

线

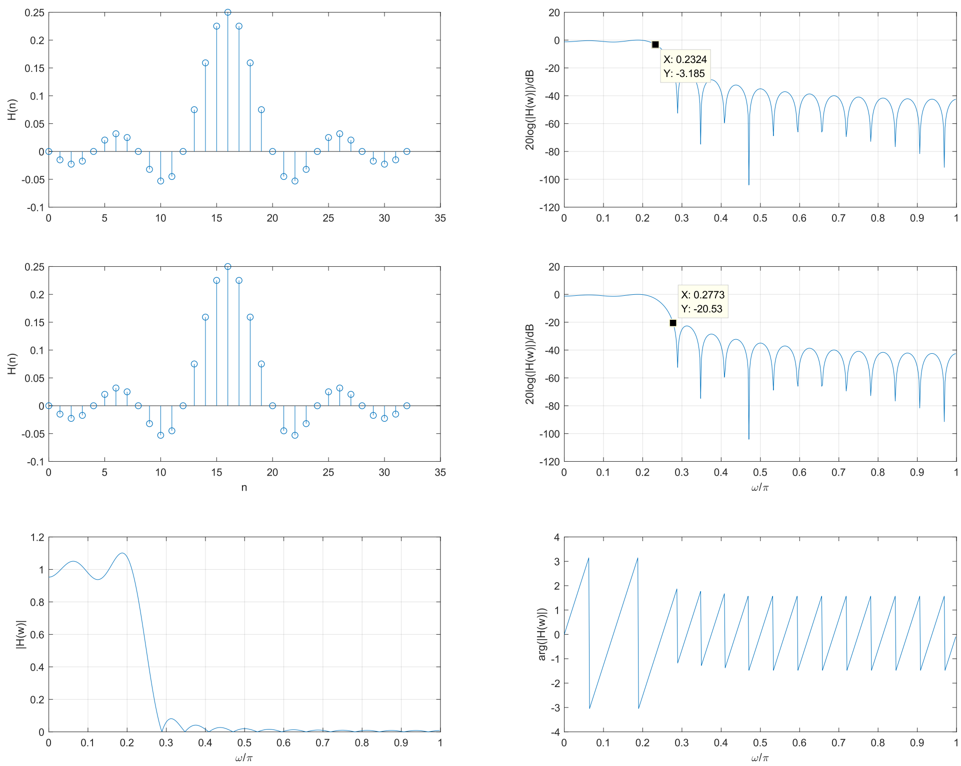
(2) EXP2

实验的第二部分，要求我们取定 N=33，$w_c=\pi/4$不变，考察不同窗类型的影响。

先来看最简单的矩形窗，如前所述，我们对 hd 的自然 N 点截断事实上就是加过矩形窗的了，单独给出矩形窗的特性



其幅频特性为



装

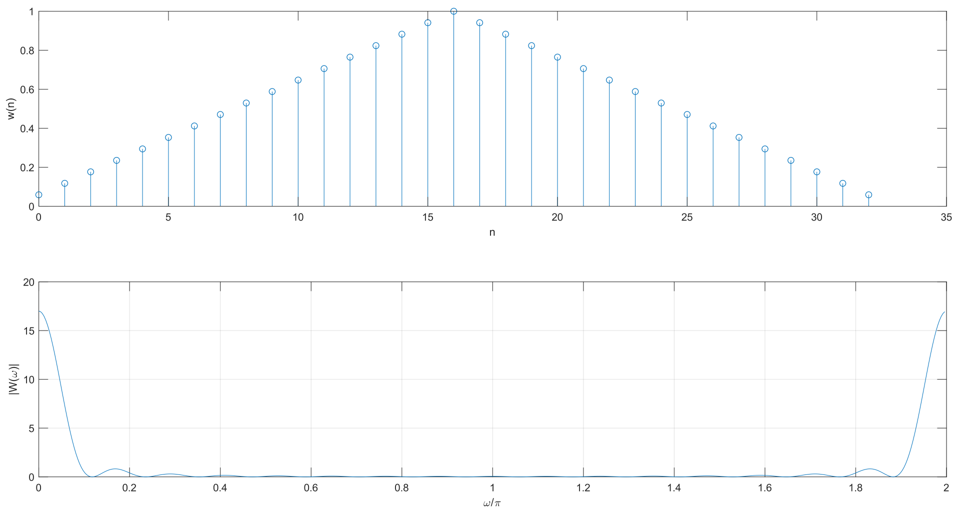
订

线

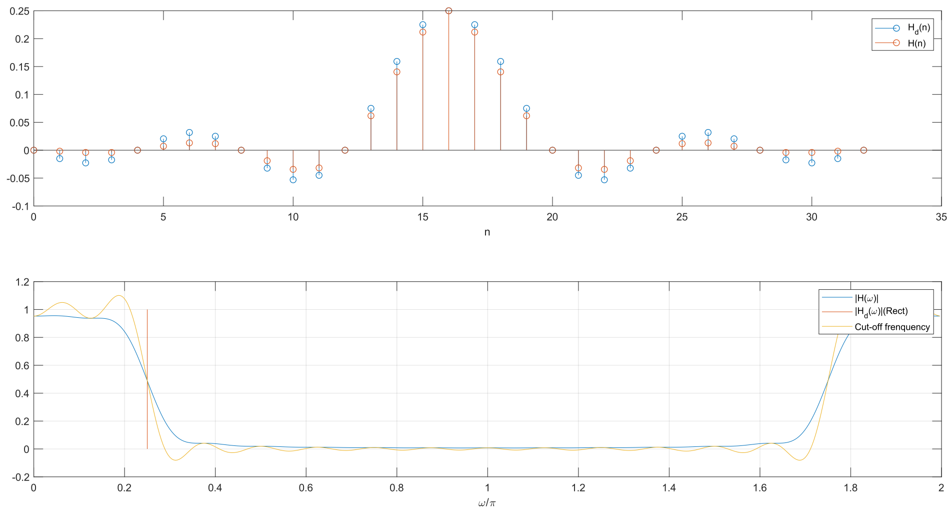
观察得到矩形窗的阻带衰减只有 20dB 左右（21dB），过渡带带宽约在.04π左右（0.0545π）

下面来看使用三角窗的结果

三角窗自身为



加窗后



装

订

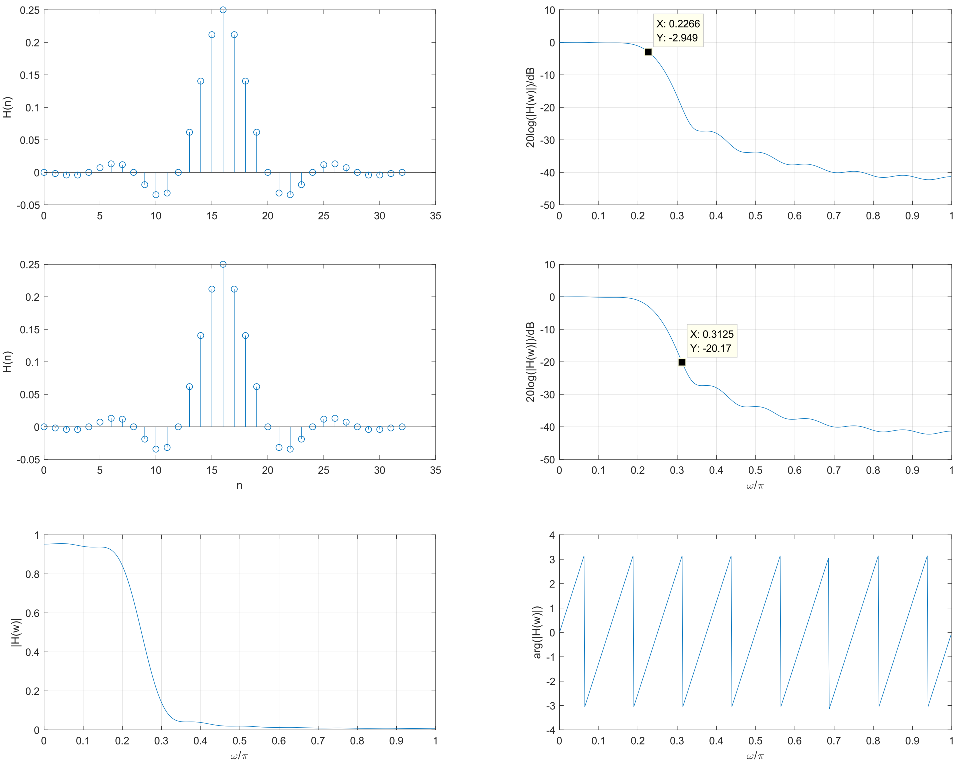
线

装

订

线

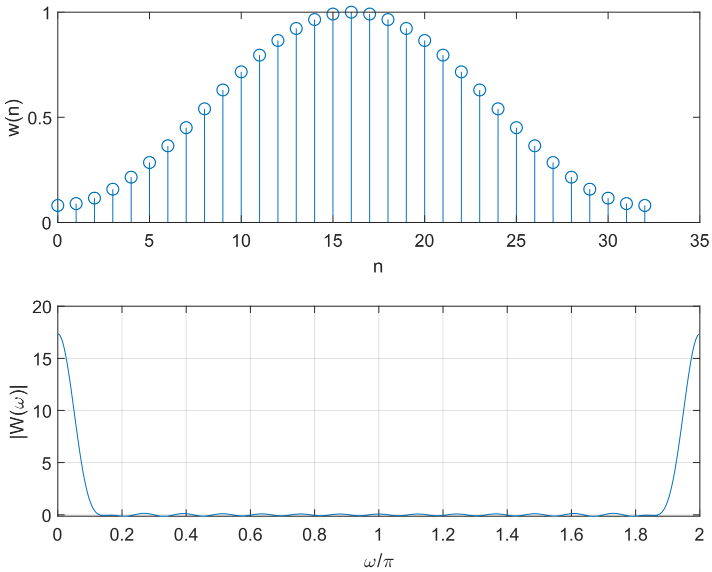
幅频特征为



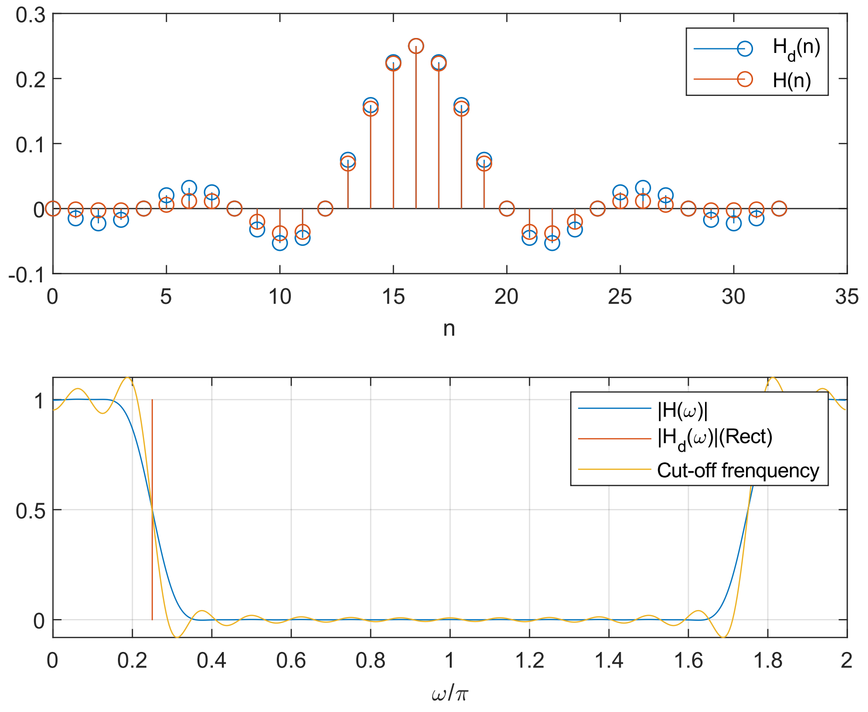
可以观看到其阻带衰减也不大（25dB），过渡带带宽大致为.18π（0.01848π）

最后来看使用汉明窗的结果

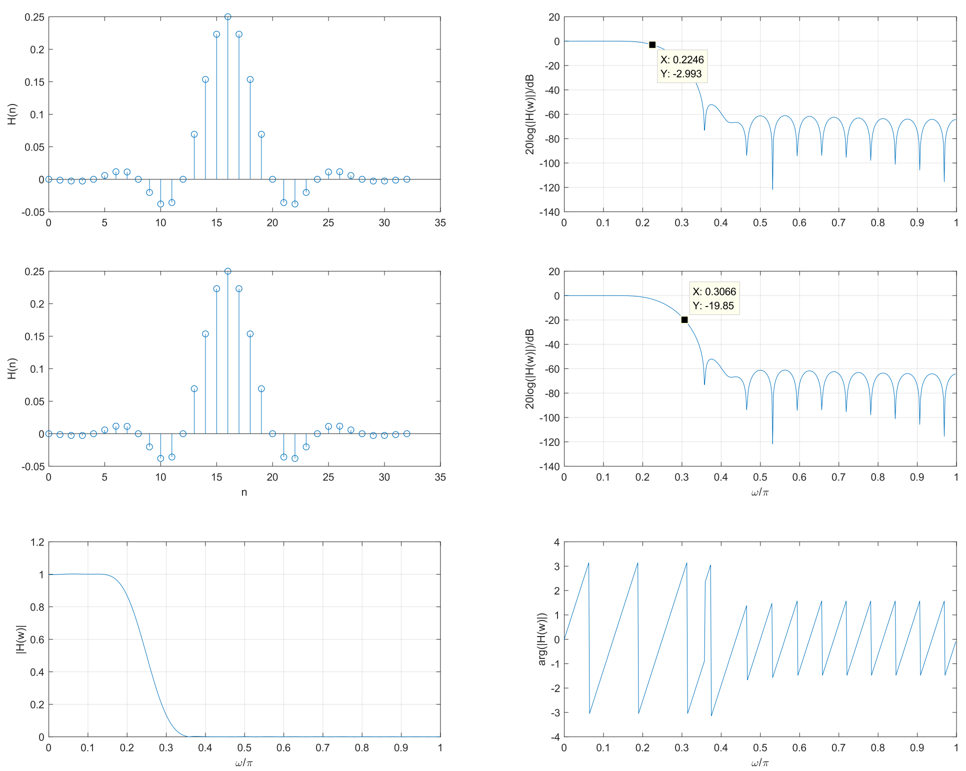
其自身为



加窗后



幅频特征为



可以观察汉明窗的阻带也介于 40dB 与 60dB 之间，比升余弦窗的要大一点（53dB），过渡带宽约

为$.16\pi$($.20\pi$)

五、实验结论探讨及分析

通过本实验，我们掌握了FIR数字滤波器窗函数设计法基本设计方法，首先我们由理想低通/高通/带通/带阻数字滤波器原型求出截断为 N 点长的$h_d(n)$，随后按照选定窗函数类型，有$w(n)$加窗得到$h_d(n)w(n)$。在频域上，根据(13)式阐明的基本原理，可以知道加窗后的频谱将与原理想情形不同，并有过渡带宽，阻带最小衰减等技术参数。

窗函数法是一种基本的FIR数字滤波器时域设计办法，效果与窗长和窗口类型有关。通常地说，当窗口类型越缓变，其旁瓣峰值越小，带来的阻带衰减就越大，于此同时主瓣宽度也会随之增大，导致过渡带宽的增加。为了进一步减小过渡带宽（到我们希望的范围），基于同一种窗口类型，窗长 N 越大，带来的过渡带宽越小。在实验中，同样印证了这一点，先后取 N=15，33 并有四种不同窗类型选择，给我们对其设计带来了总体上的认识。

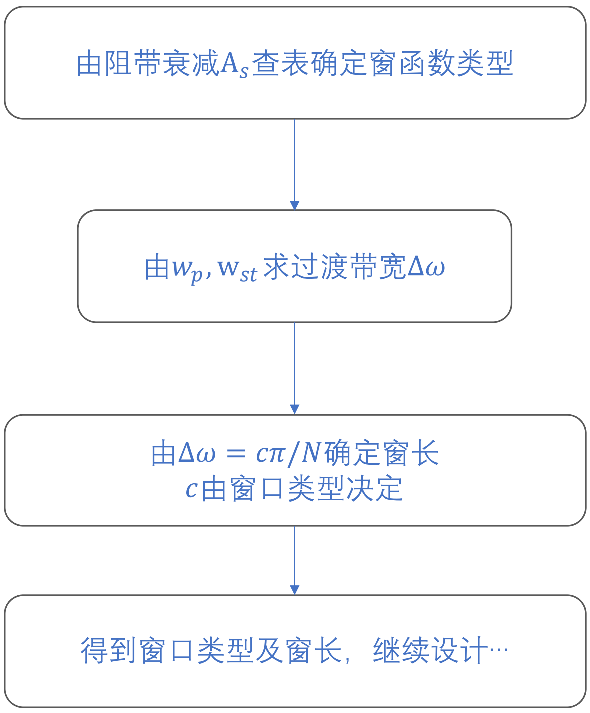
总的来看，窗函数设计法是一种模式固定的FIR设计办法，通过“求解参数->设计窗函数->加窗->验证”一系列流程，得到需要的滤波器类型。（基于技术参数的确定参考思考题 1）

思考题：

1. 如果给定通带截止频率w_p和阻带衰减频率w_{st}，以及阻带最小衰减A_s，如何用窗函数法进行设计？

   通过实验我们可以知道，在设计过程中，我们只需要窗长N和窗口类型就足以完成。实验中 N 和 omegaC 均已事先给出，在本问中则并没有出现，所以我们需要根据技术参数w_p, w_{st}, A_s共同决定

   在实验原理部分窗函数的选择中我们已经介绍了基本方法，这里通过流程图再引述一遍



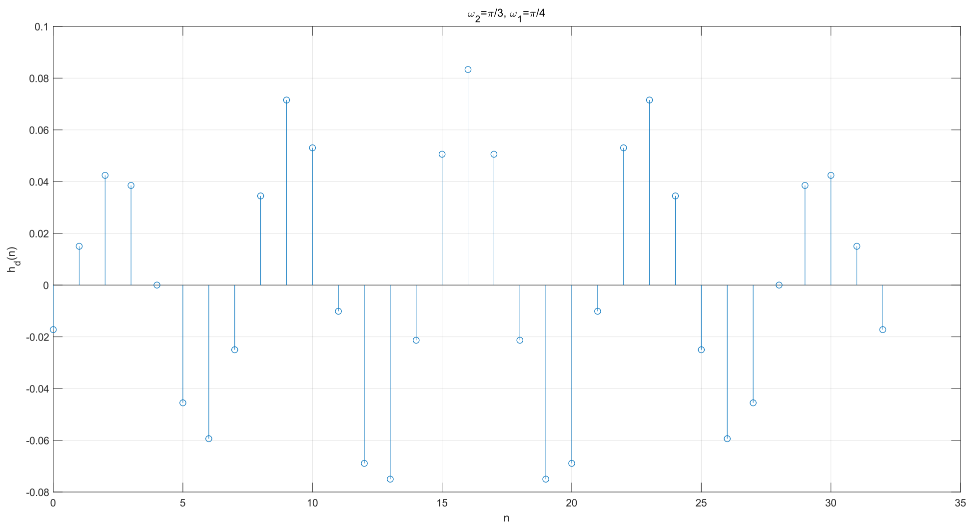
其中，图表 2 已经列出了常见的几种窗函数及其技术指标类型，确定窗长N和窗口类型之后进而可按本实验步骤进行下去。

2. 如果要求窗函数设计法设计带通滤波器，给定上下边截止频率为w_1, w_2，求其理想带通的单位脉冲响应

在本报告 P4 页简单说明了如何将带通/带阻/高通滤波器理解为低通滤波器与全通滤波器的组合，按照说明"带通滤波器，这可以理解为一个截止频率为w_2的低通滤波器减去一个截止频率为w_1的的低通滤波器"（保证$w_2 > w_1$），我们容易得到其理想冲激响应为

$$h_d(n) = \begin{cases} \dfrac{sin[w_2(n-\tau)]}{\pi(n-\tau)} - \dfrac{sin[w_1(n-\tau)]}{\pi(n-\tau)}, & n \neq \tau \\ \dfrac{w_2}{\pi} - \dfrac{w_1}{\pi}, & n = \tau(\tau\text{是整数}) \end{cases}$$

我们同样绘制一下时域上的表现（按 N=33 截断）



参考代码为（不在附录中列出）

```
x_bp = ideallp(pi/3, N2) - ideallp(pi/4, N2);
figure
stem(0:N2-1, x_bp);
grid on
xlabel('n')
ylabel('h_d(n)')
title('\omega_2=\pi/3, \omega_1=\pi/4')
```

六、附录

代码地址见 https://github.com/pacria/MatlabExp/blob/master/MatlabExp/DSP/exp4/Demo.m

图片地址见 https://github.com/pacria/MatlabExp/tree/master/MatlabExp/DSP/exp4/checkedSVG

装

订

线

```
% EXPERIMENT RECIPE HERE
% EXP1
% Choose N = N1, N2; win_type = hanning

% EXP2
% Choose N = N2;
%win_type = rect; win_type = triang; win_type = hamming
```

预设变量区

```
% Pre-defined
N1 = 15;
N2 = 33;
N = N2;
omegaC = pi/4;
hanning = 'hn';
hamming = 'hm';
rect = 'r'; % Do nothing(Because it's already fixed to N point)
triang = 'tr'
win_type = hamming; % Choose one type (DEFAULT: hanning)
bianer = 3;
M = 2^ceil(log2(N)+bianer);
n = 0:N-1;
```

函数定义区

```
function [hd, tau] = ideallp(wc, N)
% Ideal low-pass digital filter(with cut-off angular frenquency wc)
    tau = (N-1)/2;
    n = 0:N-1;
    m = n - tau + eps; % Avoid ZeroDivision Error
    hd = sin(wc * m)./(pi * m);
end
```

```
function [Hw, w, type] = amplres(h, M)

    N = length(h);
    L = floor((N-1)/2);
    h = h(:)';

    n = 1:L+1;
    w = (0:M)* 2 *pi /(M+1);

    if all(abs(h(n) - h(N - n + 1))<1e-10)
        % Class I(Type I or Type II)
        Hw = 2 * h(n) * cos(((N+1)/2 - n)' * w) - mod(N, 2) * h(L+1);
```

```
        type = 2 - mod(N, 2); %N - Even, type->2, N - Odd, type -> 1.
    elseif all(abs(h(n) - h(N - n + 1))<1e-10)&&(h(L+1) * mod(N, 2) == 0)
        Hw = 2 * h(n) * sin(((N+1)/2 - n)' * w);
        type = 4 - mod(N, 2); %N - Even, type->4, N - Odd, type -> 3.

    else error('Not a linear phase FIR filter');
    end
end
```

```
function w = choose_win_type(win_type, N)
    switch win_type
        case 'hn'
            w = hanning(N);
        case 'hm'
            w = hamming(N);
        case 'r'
            w = rectwin(N);
        case 'tr'
            w = triang(N);
    end
end
```

```
function [db, mag, pha, grd, w] = freqz_m(b, a, M)
    [H, w] = freqz(b, a, M*2, 'whole');
    H = H(1:M)'; w = w(1:M)';
    mag = abs(H);
    db = 20*log10((mag+eps)/max(mag));
    pha = angle(H);
    grd = grpdelay(b, a, w);

end
```

IDEAL LOWPASS

```
[hd, tau] = ideallp(omegaC, N);
[hdw, w, ~] = amplres(hd, M);
figure
subplot(2, 1, 1)
stem(n, hd)
xlabel('n')
ylabel('h(n)')
subplot(2, 1, 2)
plot(w/pi, hdw)
grid on
hold on
plot([omegaC/pi omegaC/pi], ylim)
hold off
```

装

订

线

```
xlabel('\omega/\pi')
legend('|H_d(\omega)|(Rect)', 'Cut-off frenquency')
```

GET WINDOW

```
% Get window
wn = choose_win_type(win_type, N)';
[Hww, w, ~] = amplres(wn, M);
figure
subplot(2, 1, 1)
stem(n, wn)
xlabel('n')
ylabel('w(n)')
subplot(2, 1, 2)
plot(w/pi, Hww)
grid on
xlabel('\omega/\pi')
ylabel('|W(\omega)|')
```

FIR & ANLYSIS

```
% Get -h
h = wn.*hd; % Get your window
[hw, w, ~] = amplres(h, M);
figure
subplot(2, 1, 1)
stem(n, hd)
hold on
stem(n, h)
hold off
xlabel('n')
legend('H_d(n)', 'H(n)')
subplot(2, 1, 2)
plot(w/pi, hw)
grid on
hold on
plot([omegaC/pi omegaC/pi], ylim)
plot(w/pi, hdw)
hold off
xlabel('\omega/\pi')
legend('|H(\omega)|', '|H_d(\omega)|(Rect)', 'Cut-off frenquency')
[db, mag, pha, grd, w] = freqz_m(h, [1], M);

figure
subplot(2, 2, 1)
stem(n, h)
xlabel('n')
ylabel('H(n)')
subplot(2, 2, 2)
```

```
plot(w/pi, db)
grid on
xlabel('\omega/\pi');
ylabel('20log(|H(w)|)/dB')
subplot(2, 2, 3)
plot(w/pi, mag)
grid on
xlabel('\omega/\pi')
ylabel('|H(w)|')
subplot(2, 2, 4)
plot(w/pi, pha)
xlabel('\omega/\pi')
ylabel('arg(|H(w)|)')
```

装

订

线