

《数字信号处理》课程基本实验

实验1 信号及系统基本特性分析

1.1 实验目的

- 1、学习 Matlab 编程的基本方法；掌握常用函数用法。
- 2、了解不同信号的频域特性，理解时域特性与频域特性之间的关联性。
- 3、掌握典型信号序列的时域和频域基本特性。
- 4、熟悉理想采样的性质，了解信号采样前后的频谱变化，加深对采样定理的理解。
- 5、了解离散系统的时域/频域特性及其对输出信号的影响，掌握系统分析方法。

1.2 实验原理

1.2.1 连续时间信号的采样

采样是从连续时间信号到离散时间信号的过渡桥梁，对采样过程的研究不仅可以了采样前后信号时域和频域特性发生的变化以及信号内容不丢失的条件，而且有助于加深对拉氏变化、傅氏变换、z 变换和序列傅氏变换之间关系的理解。

对一个连续时间信号进行理想采样的过程可以表示为该信号的一个周期冲激脉冲的乘积，即

$$\hat{x}_a(t) = x_a(t)M(t) \quad (1-1)$$

其中 $\hat{x}_a(t)$ 是连续信号 $x_a(t)$ 的理想采样， $M(t)$ 是周期冲激脉冲

$$M(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT) \quad (1-2)$$

它也可以用傅立叶级数表示为：

$$M(t) = \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} e^{jm\Omega_s t} \quad (1-3)$$

其中 T 为采样周期， $\Omega_s = 2\pi/T$ 是采样角频率。设 $X_a(s)$ 是连续时间信号 $x_a(t)$ 的双边拉氏变换，即有：

$$X_a(s) = \int_{-\infty}^{+\infty} x_a(t)e^{-st} dt \quad (1-4)$$

此时理想采样信号 $\hat{x}_a(t)$ 的拉氏变换为

$$\begin{aligned}
 \hat{X}_a(s) &= \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{x}_a(t) e^{-st} dt \\
 &= \int_{-\infty}^{+\infty} x_a(t) \frac{1}{T} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} e^{jm\Omega_s t} e^{-st} dt \\
 &= \frac{1}{T} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} x_a(t) e^{-(s-jm\Omega_s)t} dt \\
 &= \frac{1}{T} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} X_a(s-jm\Omega_s)
 \end{aligned} \quad (1-5)$$

作为拉氏变换的一种特例，信号理想采样的傅立叶变换

$$\hat{X}_a(j\Omega) = \frac{1}{T} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} X_a[j(\Omega - m\Omega_s)] \quad (1-6)$$

由式(1-5)和式(1-6)可知，信号理想采样后的频谱是原信号频谱的周期延拓，其延拓周期等于采样频率。根据 Shannon 取样定理，如果原信号是带限信号，且采样频率高于原信号最高频率分量的 2 倍，则采样以后不会发生频谱混淆现象。

在计算机处理时，不采用式(1-6)计算信号的频谱，而是利用序列的傅立叶变换计算信号的频谱，定义序列 $x(n) = x_a(nT) = \hat{x}_a(t) = x_a(t)M(t)$ ，根据 Z 变换的定义，可以得到序列 $x(n)$ 的 Z 变换为：

$$X(z) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(n)z^{-n} \quad (1-7)$$

以 $e^{j\omega}$ 代替上式中的 z ，就可以得到序列 $x(n)$ 的傅立叶变换

$$X(e^{j\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(n)e^{-j\omega n} \quad (1-8)$$

式 (1-6) 和式 (1-8) 具有如下关系：

$$\hat{X}_a(j\Omega) = X(e^{j\omega})|_{\omega=\Omega T} \quad (1-9)$$

由式 (1-9) 可知，在分析一个连续时间信号的频谱时，可以通过取样将有关的计算转化为序列傅立叶变换的计算。

1.2.2 有限长序列分析

一般来说，在计算机上不可能，也不必要处理连续的曲线 $X(e^{j\omega})$ ，通常，我们只要观察、分析 $X(e^{j\omega})$ 在某些频率点上的值。对于长度为 N 的有限长序列

$$x(n) = \begin{cases} f(n), 0 \leq n \leq N-1 \\ 0, \text{其他}n \end{cases} \quad (1-10)$$

一般只需要在 $0-2\pi$ 之间均匀地取 M 个频率点，计算这些点上的序列傅立叶变换

$$X(e^{j\omega_k}) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\omega_k n} \quad (1-11)$$

其中 $\omega_k = 2\pi k / M$ ， $k=0,1,\dots,M-1$ 。 $X(e^{j\omega_k})$ 是一个复函数，它的模就是幅频特性曲线。

1.2.3 信号卷积

一个线性时不变离散系统的响应 $y(n)$ 可以用它的单位冲激响应 $h(n)$ 和输入信号 $x(n)$ 的卷积来表示：

$$y(n) = x(n) * h(n) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} x(m)h(n-m) \quad (1-12)$$

根据傅立叶变换和 Z 变换的性质，与式 (1-12) 对应应该有

$$Y(z) = X(z)H(z) \quad (1-13)$$

$$Y(e^{j\omega}) = X(e^{j\omega})H(e^{j\omega}) \quad (1-14)$$

式 (1-12) 告诉我们可以通过对两个序列的移位、相乘、累加计算信号响应；而式 (1-14) 告诉我们卷积运算也可以在频域上用乘积实现。

1.3 实验内容

1.3.1 Matlab 操作与使用

根据所提供的 Matlab 操作指南学习 Matlab 的使用。完成文件操作；矩阵运算；绘图；图形界面的实现等功能，学会使用 Matlab 联机帮助查找信息。

1.3.2 理想采样信号序列的特性分析

对信号 $x_a(t) = Ae^{-\alpha t} \sin(\Omega_0 t)u(t)$ 进行理想采样，可以得到一个理想的采样信号序列：

$x_a(t) = Ae^{-\alpha t} \sin(\Omega_0 nT), 0 \leq n < 50$ ，其中 A 为幅度因子， α 是衰减因子， Ω_0 是频率。 T 为采样周期。

产生理想采样信号序列 $x_a(n)$ ，使 $A = 444.128$ ， $\alpha = 50\sqrt{2}\pi$ ， $\Omega_0 = 50\sqrt{2}\pi$ 。(1) 首先选用采样频率为 1000Hz， $T=1/1000$ ，观察所得理想采样信号的幅频特性，并做记录；(2) 改变采样频率为 300Hz， $T=1/300$ ，观察所得到的频谱特性曲线的变化，并做记录；(3) 进一步减小采样频率为 200Hz， $T=1/200$ ，观察频谱“混淆”现象是否明显存在，说明原因，并记录这时候的幅频特性曲线。

1.3.3 典型信号序列的特性分析

1.3.3.1 信号序列产生

产生如下基本信号：

$$(1) \text{ 高斯序列: } x_{aa}(n) = \begin{cases} e^{-\frac{(n-p)^2}{q}}, & 0 \leq n \leq 15 \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$

$$(2) \text{ 衰减正弦序列: } x_{bb}(n) = \begin{cases} e^{-\alpha n} \sin 2\pi f n, & 0 \leq n \leq 15 \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$

$$(3) \text{ 三角波序列: } x_{cc}(n) = \begin{cases} n+1, & 0 \leq n \leq 3 \\ 8-n, & 4 \leq n \leq 7 \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$

$$(4) \text{ 反三角序列: } x_{dd}(n) = \begin{cases} 4-n, & 0 \leq n \leq 3 \\ n-3, & 4 \leq n \leq 7 \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$

1.3.3.2 观察高斯序列的时域和频域特性

①固定信号 $x_{aa}(n)$ 中的参数 $p=8$ ，改变 q 的值，使 q 分别等于 2，4，8。观察它们的时域和幅频特性，了解 q 取不同值的时候，对信号时域特性和幅频特性的影响。②固定 $q=8$ ，改变 p ，使 p 分别等于 8，13，14，观察参数 p 变化对信号序列时域及幅频特性的影响。注意 p 等于多少时，会发生明显的泄漏现象，混淆现象是否也随之出现？记录实验中观察到的现象，绘制相应的时域序列和幅频特性曲线。

1.3.3.3 观察衰减正弦序列的时域和幅频特性

针对信号 $x_{bb}(n)$ ：①令 $\alpha = 0.1$ 并且 $f = 0.0625$ ，检查谱峰出现的位置是否正确，注意频

谱的形状，绘制幅频特性曲线。②改变 $f=0.4375$ ，再变化 $f=0.5625$ ，观察这两种情况下，频谱的形状和谱峰出现的位置，有无混淆和泄漏现象发生？说明产生现象的原因。

1.3.3.4 观察三角波序列和反三角波序列的时域和幅频特性

针对信号 $x_{cc}(n)$ 和 $x_{dd}(n)$ ：①用 8 点 FFT 分析信号 $x_{cc}(n)$ 和 $x_{dd}(n)$ 的幅频特性，观察两者的序列形状和频谱曲线有什么异同？（注意：这时候的 $x_{dd}(n)$ 可以看作是 $x_{cc}(n)$ 经过圆周移位以后得到的）绘制两者的序列和幅频特性曲线。②在的 $x_{cc}(n)$ 和 $x_{dd}(n)$ 末尾补零，用 16 点 FFT 分析这两个信号的幅频特性，观察幅频特性发生了什么变化？两个信号之间的 FFT 频谱还有没有相同之处？这些变化说明了什么？

1.3.3.5 * 选作内容

将 $x_b(n)$ 信号的长度 N 设为 63，用 MatLab 中 `randn(1,N)` 函数产生一个噪声信号 $w(n)$ ，计算将这个噪声信号叠加到 $x_b(n)$ 上以后新信号 $y(n) = x_b(n) + w(n)$ 的频谱，观察发生的变化并记录。

在步骤 2 的基础上，改变参数 α 和 f ，观察在出现混淆现象和泄漏现象的时候有噪声的 $y(n)$ 信号的频谱有什么变化，是否明显？

1.3.4 离散信号、系统和系统响应的分析

1.3.4.1 信号序列产生

产生如下信号序列：

（1）理想采样信号序列：对信号 $x_a(t) = Ae^{-\alpha t} \sin(\Omega_0 t)u(t)$ 进行理想采样，可以得到一个理想的采样信号序列： $x_a(t) = Ae^{-\alpha nT} \sin(\Omega_0 nT), 0 \leq n < 50$ ，其中 A 为幅度因子， α 是衰减因子， Ω_0 是频率。 T 为采样周期。

（2）单位脉冲序列 $x_b(n) = \delta(n) = \begin{cases} 1, n=0 \\ 0, n \neq 0 \end{cases}$

（3）矩形序列 $x_c(n) = R_N(n) = \begin{cases} 1, 0 \leq n < N-1 \\ 0, \text{其他} \end{cases}$ ，其中 $N=10$

产生如下系统单位脉冲响应序列，本实验中用到两种 FIR 系统：

$$(1) \quad h_a(n) = R_{10}(n)$$

$$(2) \quad h_b(n) = \delta(n) + 2.5\delta(n-1) + 2.5\delta(n-2) + \delta(n-3)$$

1.3.4.2 离散信号、系统和系统响应的分析

(1) 观察信号 $x_b(n)$ 和系统 $h_b(n)$ 的时域和幅频特性；利用线性卷积求信号通过系统以后的响应。比较系统响应和系统 $h_b(n)$ 的时域及幅频特性。注意它们之间有无差异，绘出图形。

(2) 观察信号 $x_c(n)$ 和系统 $h_a(n)$ 的时域和幅频特性，利用线性卷积求系统响应。判断响应序列图形及序列非零值长度是否与理论结果一致，说出一种定性判断响应序列图形正确与否的方法（提示： $x_c(n) = h_a(n) = R_{10}(n)$ ）。利用序列的傅立叶变换数值计算子程序求出 $Y(e^{j\omega_k})$ ，观察响应序列的幅频特性。定性判断结果正确与否。改变信号 $x_c(n)$ 的矩形宽度，使 $N=5$ ，重复以上动作，观察变化，记录改变参数前后的差异。

(3) 将实验步骤 2-（2）中的信号换为 $x_a(n)$ ，其中 $A=1, \alpha=0.4, \Omega_0=2.0734, T=1$ 。重复实验 2-（2）各步骤，改变 $x_a(n)$ 的参数 $\alpha=0.1$ 再重复实验 2-（2）各步骤；改变参数 $\Omega_0=1.2516$ ，重复实验 2-（2）各步骤。在实验中观察改变 α 和 Ω_0 对信号及系统响应的时域和幅频特性的影响，绘制相应的图形。

1.3.4.3 卷积定律的验证

利用式（1-14）将 $x_a(n)$ 和系统 $h_a(n)$ 的傅氏变换相乘，直接求得 $Y(e^{j\omega_k})$ ，将得到的幅频特性曲线和实验 2-（3）中得到的曲线进行比较，观察二者有无差异。验证卷积定律。

1.3.5 *选作内容

改变信号 $x_a(t)$ 中的衰减因子 α ，先定性估计频谱可能产生的变化，然后观察其频谱的变化，记录结果，变化是否你所想的一致，这说明了什么？

一个 LTI 系统的冲激响应为 $h(n) = (0.9)^n u(n)$ ，输入序列为 $x_c(n)$ ，求系统响应 $H(e^{j\omega})$ 和输出信号 $y(n)$ 及其频谱 $Y(e^{j\omega})$ ；如果 $h(n) = x_c(n)$ ，其结果又如何？

编写一个程序，将 $x_c(n)$ 分解为奇偶序列，绘制奇偶序列时域图形并求出它们频谱

$Xe(e^{j\omega})$ 和 $Xo(e^{j\omega})$ ，同 $x_c(n)$ 的频谱 $Xc(e^{j\omega})$ 进行比较，可以得出什么结论？

针对信号 $x(t) = \cos 6000\pi t + \cos 1000\pi t$ 分析采样率、信号功率。

1.4 实验报告要求

- 1、记录实验内容中要求观察、分析、比较的内容及结果并进行分析。
- 2、总结在上机实验内容中要求比较时域、幅频曲线差异部分内容的结果，定性分析它们正确与否，并简要说明这些结果的含义。
- 3、在实验报告中附上在实验过程中记录的各个典型信号序列的时域和幅频特性曲线，分析所得到的结果图形，说明各个信号的参数变化对其时域和幅频特性的影响。
- 4、总结一下你在用 MatLab 进行数字信号处理实验项目的时候常用的函数及其功能。
- 5、总结实验中根据实验现象得到的其他个人结论。

实验2 FFT 算法实现

2.1 实验目的

- 1、加深对快速傅里叶变换的理解。
- 2、掌握 FFT 算法及其程序的编写。
- 3、掌握算法性能评测的方法。

2.2 实验原理

一个连续信号 $x_a(t)$ 的频谱可以用它的傅立叶变换表示为

$$X_a(j\Omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x_a(t) e^{-j\Omega t} dt \quad (2-1)$$

如果对该信号进行理想采样，可以得到采样序列

$$x(n) = x_a(nT) \quad (2-2)$$

同样可以对该序列进行 z 变换，其中 T 为采样周期

$$X(z) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(n) z^{-n} \quad (2-3)$$

当 $z = e^{j\omega}$ 的时候，我们就得到了序列的傅立叶变换

$$X(e^{j\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(n)e^{j\omega n} \quad (2-4)$$

其中 ω 称为数字频率，它和模拟域频率的关系为

$$\omega = \Omega T = \Omega / f_s \quad (2-5)$$

式中的 f_s 是采样频率。上式说明数字频率是模拟频率对采样率 f_s 的归一化。同模拟域的情况相似，数字频率代表了序列值变化的速率，而序列的傅立叶变换称为序列的频谱。序列的傅立叶变换和对应的采样信号频谱具有下式的对应关系。

$$X(e^{j\omega}) = \frac{1}{T} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} X_a(j\frac{\omega - 2\pi m}{T}) \quad (2-6)$$

即序列的频谱是采样信号频谱的周期延拓。从式 (2-6) 可以看出，只要分析采样序列的频谱，就可以得到相应的连续信号的频谱。注意：这里的信号必须是带限信号，采样也必须满足 Nyquist 定理。

在各种信号序列中，有限长序列在数字信号处理中占有很重要的地位。无限长的序列也往往可以用有限长序列来逼近。对于有限长的序列我们可以使用离散傅立叶变换 (DFT)，这一变换可以很好地反应序列的频域特性，并且容易利用快速算法在计算机上实现当序列的长度是 N 时，我们定义离散傅立叶变换为：

$$X(k) = DFT[x(n)] = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W_N^{kn} \quad (2-7)$$

其中 $W_N = e^{-j\frac{2\pi}{N}}$ ，它的反变换定义为：

$$x(n) = IDFT[X(k)] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k)W_N^{-kn} \quad (2-8)$$

根据式 (2-3) 和 (2-7) 令 $z = W_N^{-k}$ ，则有

$$X(z) \big|_{z=W_N^{-k}} = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W_N^{nk} = DFT[x(n)] \quad (2-9)$$

可以得到 $X(k) = X(z) \big|_{z=W_N^{-k}} = e^{j\frac{2\pi}{N}k}$ ， W_N^{-k} 是 z 平面单位圆上幅角为 $\omega = \frac{2\pi}{N}k$ 的

点，就是将单位圆进行 N 等分以后第 k 个点。所以， $X(k)$ 是 z 变换在单位圆上的等距采样，或者说是序列傅立叶变换的等距采样。时域采样在满足 Nyquist 定理时，就不会发生频谱混淆；同样地，在频率域进行采样的时候，只要采样间隔足够小，也不会发生时域序列的混淆。

DFT 是对序列傅立叶变换的等距采样，因此可以用于序列的频谱分析。在运用 DFT 进行频谱分析的时候可能有三种误差，分析如下：

(1) 混淆现象

从式(2-6)中可以看出,序列的频谱是采样信号频谱的周期延拓,周期是 $2\pi/T$,因此当采样速率不满足 Nyquist 定理,即采样频率 $f_s = 1/T$ 小于两倍的信号(这里指的是实信号)频率时,经过采样就会发生频谱混淆。这导致采样后的信号序列频谱不能真实地反映原信号的频谱。所以,在利用 DFT 分析连续信号频谱的时候,必须注意这一问题。避免混淆现象的唯一方法是保证采样的速率足够高,使频谱交叠的现象不出现。这就告诉我们,在确定信号的采样频率之前,需要对频谱的性质有所了解。在一般的情况下,为了保证高于折叠频率的分量不会出现,在采样之前,先用低通模拟滤波器对信号进行滤波。

(2) 泄漏现象

实际中的信号序列往往很长,甚至是无限长序列。为了方便,我们往往用截短的序列来近似它们。这样可以使使用较短的 DFT 来对信号进行频谱分析。这种截短等价于给原信号序列乘以一个矩形窗函数。而矩形窗函数的频谱不是有限带宽的,从而它和原信号的频谱进行卷积以后会扩展原信号的频谱。值得一提的是,泄漏是不能和混淆完全分离开的,因为泄露导致频谱的扩展,从而造成混淆。为了减小泄漏的影响,可以选择适当的窗函数使频谱的扩散减到最小。

(3) 栅栏效应

因为 DFT 是对单位圆上 z 变换的均匀采样,所以它不可能将频谱视为一个连续函数。这样就产生了栅栏效应,从某种角度来看,用 DFT 来观看频谱就好像通过一个栅栏来观看一幅景象,只能在离散点上看到真实的频谱。这样的话就会有一些频谱的峰点或谷点被“栅栏”挡住,不能被我们观察到。减小栅栏效应的一个方法是在源序列的末端补一些零值,从而变动 DFT 的点数。这种方法的实质是认为地改变了对真实频谱采样的点数和位置,相当于搬动了“栅栏”的位置,从而使得原来被挡住的一些频谱的峰点或谷点显露出来。注意,这时候每根谱线多对应的频率和原来的已经不相同了。

从上面的分析过程可以看出, DFT 可以用于信号的频谱分析,但必须注意可能产生的误差,在应用过程中要尽可能减小和消除这些误差的影响。

快速傅立叶变换 FFT 并不是与 DFT 不相同的另一种变换,而是为了减少 DFT 运算次数的一种快速算法。它是对变换式(2-7)进行一二次的分解,使其成为若干小点数 DFT 的组合,从而减小运算量。常用的 FFT 是以 2 为基数,其长度 $N = 2^M$ 。它的运算效率高,程序比较简单,使用也十分地方便。当需要进行变换的序列的长度不是 2 的整数次方的时候,为了使用以 2 为基的 FFT,可以用末尾补零的方法,使其长度延长至 2 的整数次方。IFFT 一般可以通过 FFT 程序来完成,比较式(2-7)和(2-8),只要对 $X(k)$ 取共轭,进行 FFT 运算,然后再取共轭,并乘以因子 $1/N$,就可以完成 IFFT。

2.3 实验内容

- 1、编制自己的 FFT 算法。
- 2、选取实验 1 中的典型信号序列验证算法的有效性。
- 3、对所编制 FFT 算法进行性能评估。

2.4 实验报告要求

- 1、总结自己实现 FFT 算法时候采用了哪些方法减小了运算量。
- 2、给出自己的 FFT 算法与实验 1 中自己的 DFT 算法的性能比较结果。
- 3、给出自己的 FFT 算法与 Matlab 中 FFT 算法的性能比较结果。
- 4、总结实验中根据实验现象得到的其他个人结论。

实验3 滤波器设计与滤波器特性分析

3.1 实验目的

- 1、掌握 Matlab 下滤波器设计工具（fdatool）的使用方法。
- 2、掌握 IIR 滤波器设计方法与 FIR 滤波器设计方法。
- 3、了解 IIR 滤波器设计与 FIR 滤波器设计方法的差异。
- 4、掌握滤波器特性分析的方法。

3.2 实验原理

本实验利用 Matlab 的工具 fdatool 完成,请仔细阅读 Matlab 中滤波器设计工具箱 fdatool 的联机帮助。IIR 与 FIR 滤波器设计的原理请参考课程内容。

3.3 实验内容

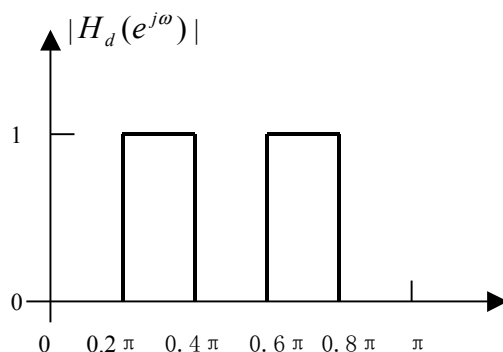
3.3.1 IIR 滤波器设计

- 1、采样频率为 1Hz, 设计一个 Chebyshev 高通数字滤波器, 其中通带临界频率 $f_p = 0.3Hz$, 通带内衰减小于 0.8dB ($\alpha_p = 0.8dB$), 阻带临界频率 $f_s = 0.2Hz$, 阻带内衰减大于 20dB ($\alpha_s = 20dB$)。求这个数字滤波器的传递函数 $H(z)$, 输出它的幅频特性曲线, 观察其通带衰减和阻带衰减是否满足要求。
- 2、采样频率为 1Hz, 设计一个数字低通滤波器, 要求其通带临界频率 $f_p = 0.2Hz$, 通带内衰减小于 1dB ($\alpha_p = 1dB$), 阻带临界频率 $f_s = 0.3Hz$, 阻带内衰减大于 25dB

- ($\alpha_s = 25dB$)。求这个数字滤波器的传递函数 $H(z)$ ，输出它的幅频特性曲线。
- 3、设计 Butterworth 带通数字滤波器，其上下边带 1dB 处的通带临界频率分别为 20kHz 和 30kHz ($f_{p1} = 20kHz$, $f_{p2} = 30kHz$, $\alpha_p = 1dB$)，当频率低于 15kHz 时，衰减要大于 40dB ($f_s = 15kHz$, $\alpha_s = 40dB$)，采样周期为 $10\mu s$ ，求这个数字滤波器的传递函数 $H(z)$ ，输出它的幅频特性曲线，观察其通带衰减和阻带衰减是否满足要求。

3.3.2 FIR 滤波器设计

- 1、用 Hanning 窗设计一个线性相位带通滤波器，其长度 $N=15$ ，上下边带截至频率分别为 $\omega_1 = 0.3\pi$, $\omega_2 = 0.5\pi$ ，求 $h(n)$ ，绘制它的幅频和相位特性曲线，观察它的实际 3dB 和 20dB 带宽。如果 $N=45$ ，重复这一设计，观察幅频和相位特性的变化，注意长度 N 变化对结果的影响。
- 2、改用矩形窗和 Blackman 窗，设计步骤 (1) 中的带通滤波器，观察并记录窗函数对滤波器幅频和相位特性的影响，比较这三种窗函数的特点。
- 3、用 Kaiser 窗设计一个专用的线性相位滤波器。 $N=40$ ，理想的幅频特性如下图所示：



当 β 值分别 4,6,8 时，设计相应的滤波器，比较它们的幅频和相位特性，观察并分析 β 值不同的时候对结果有什么影响。

3.3.3 滤波器特性分析

针对 IIR 滤波器设计实验内容中的三款滤波器 (低通、高通和带通)，采用基于 Blackman 窗函数的 FIR 设计方法重新设计，比较用 IIR 与 FIR 方法得到的滤波器的幅频特性、相频特性、零极点、群延时、相位延时。

对比较的结论进行原理性解释。

3.4 实验报告要求

- 1、记录在上机实验内容中所设计的 IIR 滤波器的传递函数 $H(z)$ 及对应的幅频特性曲线定

性分析它们的性能，判断设计是否满足要求。

- 2、记录在实验过程中 FIR 滤波器设计结果的 $h(n)$ 的幅频和相位特性曲线，比较它们的性能，说明滤波器 N 和窗函数对滤波器性能的影响。
- 3、记录滤波器特性分析中滤波器特性比较的结论并进行解释。
- 4、对 IIR 滤波器设计和 FIR 滤波器设计的优缺点进行总结。
- 5、总结实验中根据实验现象得到的其他个人结论。