

《数字信号处理》上机手册

吴 涛

浙江工业大学信息工程学院

2016.4

说 明

1. 本手册用于课程《Digital Signal Processing》的课内上机仿真。上机包含三个内容，每个内容在 2 学时内完成。
2. 对计算机要求：
硬件：P4 1.0G 以上，内存 1GB 以上，硬盘空间 100M 以上
软件：WindowsXP 或者 Windows7 或者 Windows8 操作系统，Matlab7.0 以上版本
3. 学习者应具有 Matlab 基本编程能力。
4. 学习者在上机前必须复习相关理论知识，熟悉上机内容。
5. 上机结束，学习者需按照实验要求完成上机报告，1 周内上交。
6. 上机报告格式要求：
正文字体宋体，字号小四，行间距 1.25。图形长宽比例必须和原始图片保持一致。
单张图面积不得超过纸张大小的四分之一。

目 录

说 明	i
目 录	ii
实验一 FFT 与谱分析	1
实验二 IIR 数字滤波器设计	4
实验三 FIR 数字滤波器设计	9
实验四 综合实验（选做）	13
附录：部分 Matlab 函数	14
参考文献：	15

实验一 FFT 与谱分析

1. 实验目的

- (1) 加深对 DFT 算法原理和物理意义的理解。
- (2) 熟悉 FFT 算法，增强对 FFT 结果的分析能力。
- (3) 掌握用 FFT 对连续时间信号和离散时间信号进行谱分析的方法，了解误差及其产生的原因。

2. 实验原理

- (1) 复习 DFT 的定义、性质和用 DFT 作谱分析的有关内容。
- (2) 复习 FFT 算法原理与编程思想。
- (3) 查询 Matlab 中 fft 函数的用法，学会通过改变 fft 的参数计算不同 DFT。
- (4) 编制信号产生子程序，产生以下信号：

$$x_1[n] = R_4[n] = \begin{cases} 1 & n = 0, 1, 2, 3 \\ 0 & o.w. \end{cases}$$

$$x_2[n] = \begin{cases} n+1 & 0 \leq n \leq 3 \\ 8-n & 4 \leq n \leq 7 \\ 0 & o.w. \end{cases}$$

$$x_3[n] = \begin{cases} 4-n & 0 \leq n \leq 3 \\ n-3 & 4 \leq n \leq 7 \\ 0 & o.w. \end{cases}$$

$$x_4[n] = \cos \frac{\pi n}{4}$$

$$x_5[n] = \sin \frac{\pi n}{8}$$

$$x_6(t) = \cos(8\pi t) + \cos(16\pi t) + \cos(20\pi t)$$

$$x_7[n] = x_4[n] + x_5[n]$$

$$x_8[n] = x_4[n] + jx_5[n]$$

$$x_9[n] = \{1, 2, 3, 4, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0\}$$

$$x_{10}[n] = \{1, 2, 3, 4, 1, 2, 3, 4, 1, 2, 3, 4, 1, 2, 3, 4\}$$

$$x_{11}[n] = \{1, 0, 0, 0, 2, 0, 0, 0, 3, 0, 0, 0, 4, 0, 0, 0\}$$

(5) 编写实验程序。

参考图 1-1 所示的程序流程图，编写实验程序。

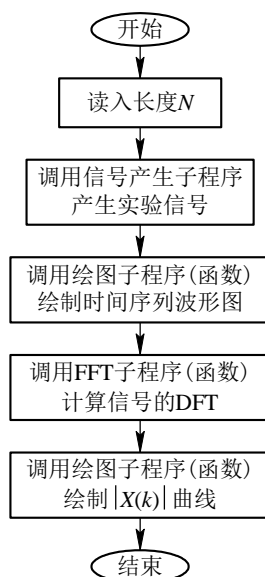


图 1-1 主程序流程图

3. 实验内容

对 2 中所给出的 11 个信号逐一进行谱分析。各信号的 FFT 变换区间 N 、连续时间信号 $x_6(t)$ 的采样频率 f_s 等参数的参考取值如下：

a) $x_1[n], x_2[n], x_3[n], x_4[n], x_5[n], x_7[n], x_8[n]$: $N=8, 16$

b) $x_6(t)$: $f_s=16\text{Hz}, 64\text{Hz}$, $N=16, 32, 64$

c) $x_9[n], x_{10}[n], x_{11}[n]$: $N=16$

4. 思考题

(1) 在 $N=8$ 时， $x_2[n]$ 和 $x_3[n]$ 的幅度谱会相同吗？为什么？ $N=16$ 时， $x_2[n]$ 和 $x_3[n]$ 的幅度谱会相同吗？为什么？

(2) 比较 $x_4[n]$ 的 8 点和 16 点的 DFT 波形，这说明什么？再比较 $x_5[n]$ 的 8 点和 16 点的

DFT 波形，这说明了什么？分析 $x_4[n]$ 和 $x_5[n]$ 的这些频谱异同产生的原因。

- (3) 比较 $x_6(t)$ 的 64Hz 采样时 16, 32, 64 点 DFT 波形，分析它们的异同产生的原因。
- (4) 比较 $x_6(t)$ 的 16Hz 采样和 64Hz 采样时 64 点 DFT 波形，这说明什么？
- (5) 找出 $X_7[k]$ 与 $X_4[k]=\text{DFT}[x_4[n]]$ 、 $X_5[k]=\text{DFT}[x_5[n]]$ 的关系。
- (6) 找出 $X_8[k]$ 与 $X_4[k]=\text{DFT}[x_4[n]]$ 、 $X_5[k]=\text{DFT}[x_5[n]]$ 的关系。
- (7) 比较 $x_9[n]$ 、 $x_{10}[n]$ 和 $x_{11}[n]$ 的 DFT 结果，分析信号末尾补零、周期性延拓和时域插值在频谱上的变化。
- (8) 如果周期信号的周期预先不知道，如何用 FFT 进行谱分析？

5. 实验报告要求

- (1) 对实验中 11 个信号的频谱进行比较分析，参考思考题的提示，简述相应的 DFT 原理。
- (2) 结合对信号 $x_6(t)$ 的不同采样率下的频谱分析，简要说明对连续时间信号做谱分析应注意那些？
- (3) 结合实验内容，总结说明用 FFT 对周期信号作谱分析时，时域截取长度的选择应注意那些？
- (4) 总结实验所得主要结论。

实验二 IIR 数字滤波器设计

1. 实验目的

- (1) 熟悉用双线性变换法设计 IIR 数字滤波器的原理与方法。
- (2) 掌握数字滤波器的计算机仿真方法。
- (3) 通过观察对实际心电图信号的滤波作用，获得数字滤波的感性知识。

2. 实验原理

- (1) IIR 数字滤波器的系统函数可以写成

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \cdots + b_M z^{-M}}{1 + a_1 z^{-1} + \cdots + a_N z^{-N}}$$

设计经典的 IIR 数字滤波器，就是要确定该系统函数中的 2 组系数：

Num: b_0, b_1, \cdots, b_M

Den: a_1, a_2, \cdots, a_N

也就是说，这两组系数确定了，IIR 数字滤波器的理论设计就完成了。接下去可以进行结构变换和系数量化。

- (2) IIR 数字滤波器的设计可以借助模拟滤波器的设计方法。先设计一个模拟原型滤波器，然后转换成数字滤波器。
- (3) 模拟滤波器的原型有很多种。常用的低通模拟滤波器原型有四种：巴特沃斯 (Butterworth) 滤波器、切比雪夫 I 型 (Chebyshev I) 滤波器、切比雪夫 II 型 (Chebyshev II) 滤波器、椭圆 (Elliptic) 滤波器。这些滤波器的增益 (Gain) 曲线如图 2-1 所示。

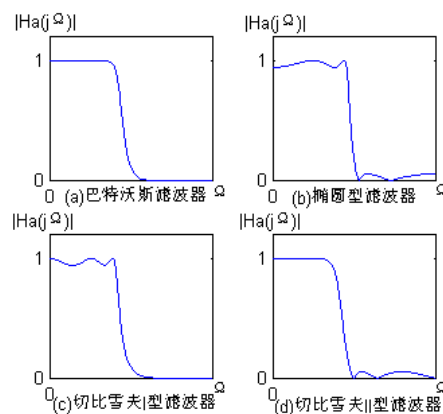
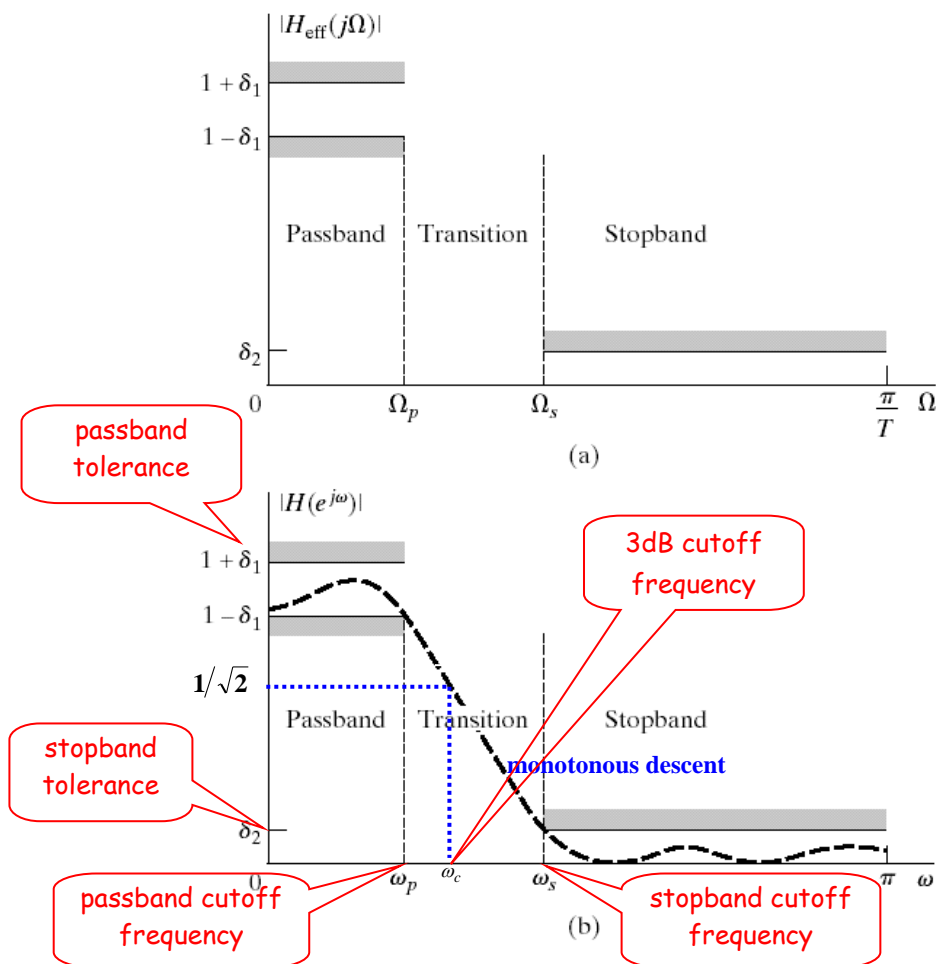


图 2-1 四种滤波器幅频特性曲线

- (4) 滤波器设计指标可分为模拟指标和数字指标，绝对指标和相对指标。一般来说，具体指标有通带的边界频率、阻带的边界频率，通带最大衰减，阻带最小衰减四种。低通滤波器指标具体含义如图 2-2 所示。



(a) 模拟频域指标 (b) 数字频域指标

图 2-2 低通滤波器指标

- (5) 根据指标设计模拟滤波器，得到传输函数 $H_c(s)$ 。用双线性变换法，

$$H(z) = H_c(s) \Big|_{s = \frac{2}{T_d} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}}$$

其中，为了防止频响曲线发生畸变，设计指标的模拟频率与数字频率间的关系需做预畸变：

$$\omega = 2 \arctan\left(\frac{T_d}{2} \Omega\right) \text{ 或者 } \Omega = \frac{2}{T_d} \tan\left(\frac{\omega}{2}\right)$$

3. 实验步骤

- (1) 复习有关巴特沃斯、切比雪夫 I 型、切比雪夫 II 型、椭圆四种模拟滤波器设计和用双线性变换法设计 IIR 数字滤波器的内容。
- (2) 人体心电图信号在测量过程中往往受到工业高频（主要是 50Hz 市电及其高次谐波）干扰，所以必须经过低通滤波处理后，才能作为判断心脏功能的有用信息。

$x[n]$ 为一实际心电图信号采样序列样本：

$\{x[n]\} = \{-4, -2, 0, -4, -6, -4, -2, -4, -6, -6, -4, -4, -6, -6, -2, 6, 12, 8, 0, -16, -38, -60, -84, -90, -66, -32, -4, -2, -4, 8, 12, 12, 10, 6, 6, 6, 4, 0, 0, 0, 0, 0, -2, -4, 0, 0, 0, -2, -2, 0, 0, -2, -2, -2, -2, 0\}$,

画出该信号的时域波形和频谱。从频谱图中可以看到该信号存在高频干扰，噪声主要集中在大于 0.36π rad 的频段。

- (3) 用双线性变换法设计低通 IIR 数字滤波器，滤除信号 $x[n]$ 中的干扰成分。根据待处理信号的频谱，确定滤波器的设计指标。例如：

通带 $[0, 0.2\pi]$ 内，最大衰减小于 1dB，

阻带 $[0.3\pi, \pi]$ 内，最小衰减大于 15dB。

- (4) 利用 Matlab 函数设计 IIR 滤波器

- a. 先采用巴特沃兹原型设计。根据设计指标，调用 Matlab 信号处理工具箱函数 $buttord()$ 和 $butter()$ ，得到以巴特沃兹模拟低通为原型的数字滤波器 $H(z)$ 。

以 0.02π 为采样间隔，画出数字滤波器在频率区间 $[0, \pi]$ 上的频率响应特性曲线。

- b. 编写滤波器仿真程序，调用 $filter()$ 函数计算 $H(z)$ 对心电图信号采样序列 $x[n]$ 的响应 $y[n]$ 。画出滤波后心电图信号的时域波形和频谱。
- c. 调用 Matlab 的 $cheb1ord()$, $cheby1()$, $cheb2ord()$, $cheby2()$, $ellipord()$, $ellip()$ 等函数，分别得到切比雪夫 I 型、切比雪夫 II 型、椭圆滤波器为模拟原型的数字滤波器。重复步骤(4)a, (4)b。

- (5) 利用 Matlab 的滤波器设计分析工具 FDATool (Filter Design & Analysis Tool) 设计 IIR 滤波器。

- a. 在 Matlab 的 “Command Window” 里输入 `fdatool`，打开滤波器设计分析工具。
- b. 在设计窗口中输入设计指标，如图 2-3 所示：

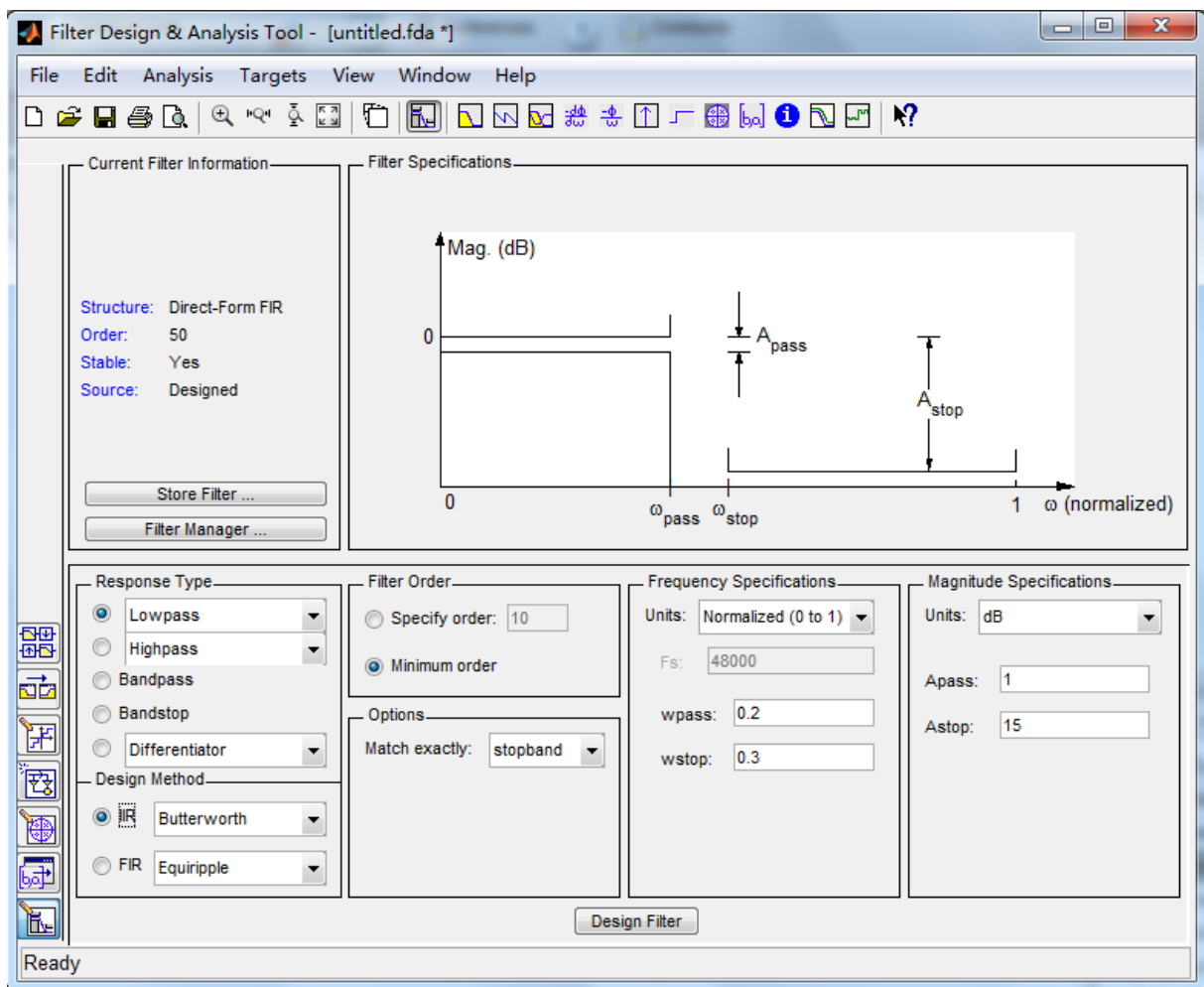


图 2-3 FDATool 中 IIR 滤波器指标的设置

其中“Match exactly”这项，如果选择“stopband”，则得到的滤波器阻带指标正好匹配，通带留有裕量；如果选择“passband”，则得到的滤波器通带指标正好匹配，阻带留有裕量。

- c. 点击 **Design Filter**，就可以得到 IIR 滤波器。设计窗口中会显示设计得到的滤波器的频响曲线。
- d. 在“Current Filter Information”一栏里，可以看到滤波器的结构信息，IIR 滤波器可以有很多种结构，选择不同的结构，得到的滤波器系数形式也各不相同。滤波器的结构可以通过菜单“Edit”转换。如同一个 6 阶直接 II 型转置型 IIR 滤波器，图 2-4 是单一节点结构（Single Section），设计结果为 2 组系数，分子分母各 7 个系数；而图 2-5 是二阶节点级联结构（Second-Order Sections, SOS），设计结果为 3 个二阶节点，每个节点分子分母各 3 个系数。

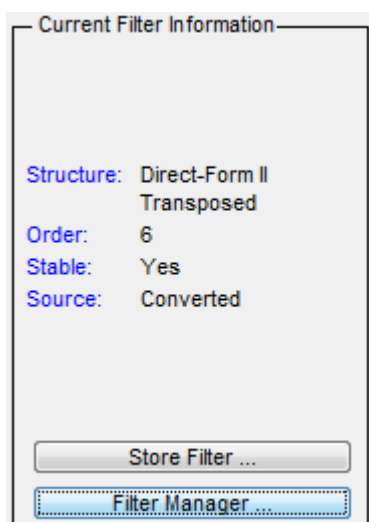


图 2-4 滤波器结构 1

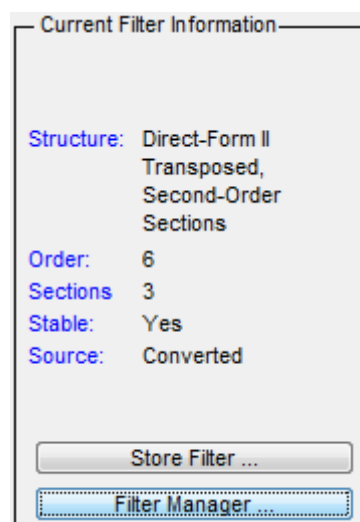


图 2-5 滤波器结构 2

- e. 点击菜单“File” - “Export...”，可以把设计得到的滤波器系数导出到 Matlab 的工作空间（Workspace）或者存为文件。
- f. 使用设计得到的滤波器对心电图信号做滤波。可参考步骤(4)b。
- g. 在“Design Method”的下拉菜单中选用不同的模拟滤波器原型，分别设计相应的 IIR 数字滤波器。分别画出这些数字滤波器在频率区间 $[0, \pi)$ 上的频率响应特性曲线。

4. 思考题

- (1) 用双线性变换法设计数字滤波器过程中, 变换公式 $s = \frac{2}{T} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}$ 中采样间隔 T 的取值,

对设计结果有无影响? 为什么?

- (2) 设计过程中, 双线性变换法得到的数字滤波器的频响曲线与模拟滤波器的频响曲线是否存在畸变? 是什么原因造成的?

5. 实验报告要求

- (1) 简述双线性变换法的特点。
- (2) 对比滤波前后的心电图信号的时域波形和频谱, 说明数字滤波器的滤波过程与滤波作用。
- (3) 从设计的数字滤波器幅频响应曲线上验证所设计的滤波器是否达到设计指标。

实验三 FIR 数字滤波器设计

1. 实验目的

- (1) 掌握用窗函数法设计 FIR 数字滤波器的原理和方法。
- (2) 熟悉线性相位 FIR 数字滤波器特性。
- (3) 了解窗函数类型及窗口长度对滤波器特性的影响。

2. 实验原理

顾名思义，FIR 数字滤波器的单位冲激响应（Impulse Reponse） $h[n]$ 是有限长的，所以设计任务就是确定单位冲激响应 $h[n]$ 的 N 个值（滤波器的阶数为 $M = N - 1$ ）。FIR 数字滤波器处理信号的基本算法就是 $h[n]$ 的 N 个值和输入信号做卷积运算。FIR 数字滤波器的设计方法有很多种，比较常用的有窗函数法。

窗函数法设计 FIR 滤波器步骤：

- (4) 根据设计指标写出理想滤波器的频响函数 $H_d(e^{j\omega})$

$$\omega_c = \frac{\omega_p + \omega_s}{2}$$
$$H_d(e^{j\omega}) = \begin{cases} e^{-j\frac{M}{2}\omega} & \text{passband} \\ 0 & \text{stopband} \end{cases}$$

其中 M 为滤波器阶数。

- (5) 求出理想滤波器的脉冲响应

$$h_d[n] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} H_d(e^{j\omega}) e^{j\omega n} d\omega$$

- (6) 根据阻带衰减确定窗函数形状

$$\delta = \min(\delta_p, \delta_s)$$

阻带衰减

$$A = -20 \lg \delta \text{ (dB)}$$

- a. 如果使用 Blackman 族的窗函数，查表 3-1，选择最大逼近误差绝对值大于阻带衰减 A ，同时近似过渡带宽最小的窗函数类型。

b. 如果使用 Kaiser 窗，计算参数 β

$$\beta = \begin{cases} 0.1102(A-8.7) & A > 50 \\ 0.584(A-21)^{0.4} + 0.07886(A-21) & 21 \leq A \leq 50 \\ 0 & A < 21 \end{cases}$$

表 3-1 Blackman 族窗函数

窗的类型	窗口函数 $w[n]$ $0 \leq n \leq M$	最大逼近误差 (dB)	近似过渡带宽 $\Delta\omega$
Rectangular	1	-21	$1.8\pi/M$
Bartlett	$\begin{cases} \frac{2n}{M}, & 0 \leq n \leq \frac{M}{2} \\ 2 - \frac{2n}{M}, & \frac{M}{2} \leq n \leq M \end{cases}$	-25	$6.1\pi/M$
Hanning	$0.5 - 0.5\cos\left(\frac{2\pi n}{M}\right)$	-44	$6.2\pi/M$
Hamming	$0.54 - 0.46\cos\left(\frac{2\pi n}{M}\right)$	-53	$6.6\pi/M$
Blackman	$0.42 - 0.5\cos\left(\frac{2\pi n}{M}\right) + 0.08\cos\left(\frac{4\pi n}{M}\right)$	-74	$11\pi/M$

(7) 根据过渡带宽 $\Delta\omega$ 计算窗函数长度

过渡带宽

$$\Delta\omega = |\omega_s - \omega_p|$$

假设滤波器阶数为 M ，即窗函数长度 $N=M+1$ 。

- 如果使用 Blackman 族的窗函数，查表 3-1，通过近似过渡带宽 $\Delta\omega$ 求出 M 的值。
- 如果使用 Kaiser 窗，

$$M = \frac{A-8}{2.285\Delta\omega}$$

根据线性相位理论，设计 LPF 或者 BPF， M 取整数即可。设计 HPF 或带 BSF， M 必须取偶数。

(8) 给理想滤波器的脉冲响应加窗，得到实际滤波器的系数。

$$h[n] = h_d[n]w[n]$$

- 计算实际滤波器的频响 $H(e^{j\omega})$ ，验证是否达到设计指标。如果达到指标，涉及结束；如果没有达到，返回步骤(3)，更改窗函数类型或者长度，重新设计。

3. 实验内容及步骤

- (1) 复习用窗函数法设计 FIR 数字滤波器的方法，阅读本实验原理，掌握设计步骤。
- (2) 分别 Blackman Family 中的最合适的窗设计 FIR 滤波器，要求：

- a. 高通滤波器
- b. 滤波器指标

$$\omega_p = 0.7\pi \text{ rad}, \omega_s = 0.54\pi \text{ rad}, \alpha_p = 3\text{dB}, \alpha_s = 40\text{dB}$$

根据指标设计滤波器，绘制相应的幅频特性曲线，观察是否达到设计指标。如果没有达到指标，则更改窗口类型或者窗口长度，重新设计。

- (3) 设计指标不变，换用 Kaiser 窗设计。绘制相应的幅频特性曲线，观察是否达到设计指标。如果没有达到指标，则更改窗口类型或者窗口长度，重新设计。
- (4) 将步骤(2)中窗口类型改为 Blackman Family 中的其他 4 种，窗口长度选用 $N=41$ (即 $M=40$)，设计滤波器。
- (5) 使用 FDATool 设计 FIR 滤波器。
 - a. 在 Matlab 的 “Command Window” 里输入 fdatool，打开滤波器设计分析工具。
 - b. 设置方法如图 3-1 所示。其中 “Frequency Specifications” 用于设置频率指标。如果不知道模拟的采样频率大小，设置频率指标的单位 Units 可在下拉菜单中选择归一化的数字频率 “Normalized(0 to 1)”，这样区间 $[0, 1]$ 表示数字频率 $[0, \pi]$ 弧度。
 - c. 点击菜单 “File” - “Export...”，可以把设计得到的滤波器系数导出到 Matlab 的工作空间 (Workspace) 或者存为文件。

- (6) 观察窗函数长度对滤波器性能的影响

在使用 fdatool 设计滤波器时，窗函数类型不变，人工指定滤波器阶数值。

选定滤波器为低通 FIR，采用 Hanning 窗，在 “Filter Order” 选项框中 (如图 3-1)，点选 “Specify order”，输入你要指定的阶数，然后设计滤波器。取几种不同的阶数，通过幅频特性曲线观察阶数对滤波器的过渡带宽和通带、阻带衰减的影响。

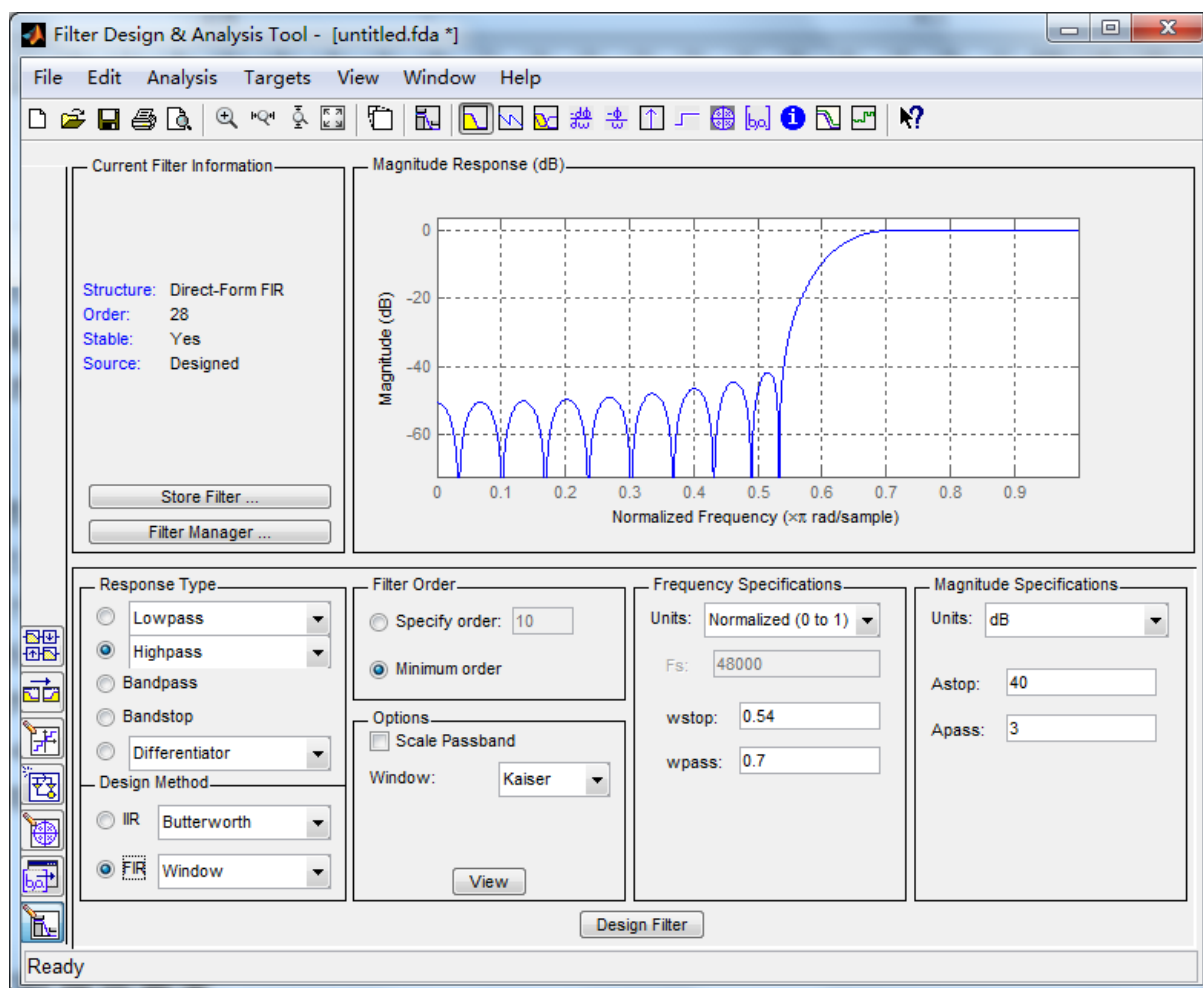


图 3-1 Fdatool 中 FIR 滤波器指标的设置

4. 实验报告要求

- (1) 编写程序，得到滤波器系数。
- (2) 对于实验步骤中(2)从 Blackman 族中选用窗口设计滤波器与步骤(3)中用 Kaiser 窗设计的滤波器，绘制相应的幅频特性曲线，比较两种滤波器的阻带衰减和过渡带宽大小。
- (3) 对于实验步骤(2)与(4)中用 Blackman 族窗口设计的阶数相同的 5 个滤波器，绘制相应的幅频特性曲线，比较它们的阻带衰减和过渡带宽大小。分析窗函数类型对滤波器性能的影响。
- (4) 根据实验步骤(6)的内容，分析滤波器阶数 M （或者窗函数长度 N ）对滤波器性能的影响。
- (5) 总结用窗函数法设计 FIR 滤波器的方法和主要特点。

实验四 综合实验（选做）

请登陆 wljx.zjut.edu.cn，在本课程网站（课号 14305）的“上机实验”栏目中有一个声音信号。播放这个信号，你可以听到一片噪声。实际上这段噪声里隐藏着一个用 Morse code 编码的口令。

综合运用本手册前面实验所涉及的分析和设计方法，分析该信号。设计合适的数字滤波器，提取出该口令。

在得到口令的第一时间，把口令内容编辑短信并署上自己姓名，发送到任课教师手机。然后尽快把详细的分析和设计过程总结成报告，发送到任课教师邮箱。最先完成的前 5 位的同学，你的期末成绩会有一个小惊喜，越早惊喜越大。注意，做出来要保密，不要告诉别人哦。

附录：部分 Matlab 函数

以下 Matlab 函数在实验中可能被用到，可以在 Matlab 的帮助系统（按键盘 F1 键或者在 Help 菜单中点击“Documentation”打开）中搜索这些函数，可以看到函数的具体解释与用法实例。

fft	Discrete Fourier transform
buttord	Butterworth filter order and cutoff frequency
butter	Butterworth filter design
cheb1ord	Chebyshev Type I filter order
cheby1	Chebyshev Type I filter design (passband ripple)
cheb2ord	Chebyshev Type II filter order
cheby2	Chebyshev Type II filter design (stopband ripple)
ellipord	Minimum order for elliptic filters
ellip	Elliptic filter design
filter	Filter data with an infinite impulse response (IIR) or finite impulse response (FIR) filter
freqz	Compute the frequency response of quantized filters
angle	Phase angle
boxcar	Boxcar (Rectangular) window.
bartlett	Bartlett window
hamming	Hamming window.
hanning	Hanning window.
blackman	Blackman window.
kaiser	Kaiser window.

参考文献

- [1] Alan V. Oppenheim, Ronald W. Schaffer, John R. Buck. Discrete-time Signal Processing[M], Second Edition. 北京: 清华大学出版社, 2005.1.
- [2] 高西全, 丁玉美. 数字信号处理[M], 第三版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008.
- [3] 罗华飞. MATLAB GUI 设计学习手记[M]. 北京: 北京航空航天大学, 2011.
- [4] 刘树棠 译, John R. Buck, Michael M. Daniel, Andrew C. Singer. Computer Explorations in Signals And Systems[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2000.6.
- [5] 李人厚, 张平安 等译, 精通 Matlab 综合辅导与指南[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1998.1.
- [6] 胡光锐, 吴小滔. “信号与系统”上机实验[M]. 北京: 科学出版社, 1999.9