西 安 电 子 科 技 大 学

数字信号处理 课程实验报告

实验名称 FIR 数字滤波器设计及结构

人工智能 学院 1920012 班

姓名 杨文韬 学号 18020100245

姓名 刘浩 学号 19069100088

姓名 周泽熙 学号 19069100126

实验日期 2021 年 12 月 30 日

成 绩

指导教师评语：

指导教师：

______ 年 ____ 月 ____ 日

实验报告内容基本要求及参考格式

一、实验目的

二、实验基本原理及步骤

三、实验仿真结果与分析

四、实验中遇到的问题及解决方法（至少 3 个，每人至少写 1 个，写清楚谁的问题和解决方法）

目录

FIR 数字滤波器设计及结构

1 实验目的

设计计算机程序，根据滤波器的主要技术指标设计线性相位 FIR 数字低通、高通、带通和带阻滤波器；绘制滤波器的幅频特性和相频特性曲线，验证滤波器的设计结果是否达到设计指标要求；画出线性相位 FIR 数字滤波器的结构信号流图。

2 实验原理

2.1 线性相位 FIR 数字滤波器

FIR 数字滤波器是指滤波器的单位脉冲响应 $h(n)$ 是有限长序列。$N-1$ 阶 FIR 数字滤波器的系统函数 $H(z)$ 可表示为

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

$H(z)$ 是 z^{-1} 的 $N-1$ 阶多项式，在 z 平面上有 $N-1$ 个零点，而它的 $N-1$ 个极点均位于 z 平面的原点 $z=0$。

FIR 数字滤波器的频率响应

$$H(e^{j\omega})=\sum_{n=0}^{N-1}h(n)e^{-j\omega n} \tag{2}$$

一般可将 $H(e^{j\omega})$ 表示成如下形式：

$$H(e^{j\omega})=H(\omega)e^{j\theta(\omega)} \tag{3}$$

式中，$H(\omega)$ 是一个可取正值也可取负值的实函数，称为幅度特性函数，它与 $H(e^{j\omega})=|H(e^{j\omega})|e^{j\phi(\omega)}$ 中的幅频响应函数 $|H(e^{j\omega})|$ 是不同的；$\theta(\omega)$ 也与相频响应函数 $\phi(\omega)$ 不同，称为相位特性函数。

2.2 FIR 数字滤波器的窗函数设计法

2.2.1 窗函数设计法的基本原理

设 $H_d(e^{j\omega})$ 是希望逼近滤波器的频率响应函数，则由其 IDTFT 可得出滤波器的单位脉冲响应

$$h_d(n)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi}H_d(e^{j\omega})e^{j\omega n}\mathrm{d}\omega \tag{4}$$

窗函数设计法的基本思想是用所设计的 FIR 滤波器频率响应特性去逼近希望滤波器的频率响应特性。为了设计方便，通常选择 $H_d(e^{j\omega})$ 为具有分段常数特性的理想滤波器，因此其 $h_d(n)$ 是无限长非因果序列。为了能用 FIR 滤波器来近似理想滤波器，需要将理想滤波器的无限长单位脉冲响应 $h_d(n)$，截取为长度为 N 的因果序列，并用合适的窗函数进行加权，结果作为 FIR 数字滤波器的单位脉冲响应 $h(n)(0 \le n \le N-1)$

这种在 $0 \le n \le N-1$ 范围内截取 $h_d(n)$ 的有限长序列作为所设计 FIR 数字滤波器的单位脉冲响应 $h(n)$，是基于最小均方误差准则。理想滤波器的频率响应 $H_d(e^{j\omega})$ 与设计滤波器的频率响应 $H(e^{j\omega})$ 的均方误差定义为

$$\epsilon^2 = \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} |H_d(e^{j\omega}) - H(e^{j\omega})|^2 \mathrm{d}\omega \tag{5}$$

根据帕塞瓦尔定理，ϵ^2 可表示为

$$\begin{aligned} \epsilon^2 &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} |h_d(n) - h(n)|^2 \\ &= \sum_{n=-\infty}^{-1} |h_d(n)|^2 \sum_{n=0}^{N-1} |h_d(n) - h(n)|^2 + \sum_{n=N}^{\infty} |h_d(n)|^2 \end{aligned} \tag{6}$$

式中，第一项和第三项与设计的滤波器参数无关，为使 ϵ^2 最小，应使式中第二项达到最小，于是可取

$$h(n) = h_d(n), \quad 0 \le n \le N-1 \tag{7}$$

所以用上述方法所设计的 FIR 数字滤波器是在均方误差最小下的最佳滤波器。

(7) 式表明，所设计的 FIR 数字滤波器单位脉冲响应 $h(n)(0 \le n \le N-1)$ 是理想滤波器的单位脉冲响应 $h_d(n)$ 加矩形窗函数 $R_N(n)$ 截断得到的，即

$$h(n) = h_d(n)R_N(n) \tag{8}$$

为了改善所设计的 FIR 数字滤波器的整体性能，对 $h_d(n)$ 截断的窗函数还可以采用其他的函数形式，记为 $w(n)$。这样，$h(n)$ 一般地表示为

$$h(n) = h_d(n)w(n) \tag{9}$$

所以我们把这种设计方法称为窗函数设计法。

一般来说，窗函数应满足如下两个要求:

(1) 主瓣宽度要窄, 以获得较窄的滤波器过渡带宽。

(2) 窗函数的时域波形平滑，与主瓣的幅度相比，旁瓣应尽可能小，以减小滤波器的通带衰减，增大阻带衰减，提高滤波器的性能。

为了描述方便并便于比较，需要定义表征窗函数特性的主要参数，简述如下。

旁瓣电平 α_e：窗函数幅度特性绝对值 $|W(\omega)|$ 的最大旁瓣的最大值相对于主瓣的最大值的比值 (dB)。过渡带宽度 ΔB：用窗函数所设计的 FIR 数字滤波器的过渡带宽度 (rad)。阻带最小衰减 α_s: 用窗函数所设计的 FIR 数字滤波器的阻带最小衰减 (dB)。

2.2.2 窗函数法设计 FIR 数字滤波器的步骤

(1) 根据所需设计的数字滤波器类型 (低通、高通、带通、带阻)，确定线性相位数字滤波器类型 (I 型、II 型、III 型、IV 型)。

(2) 选择合适的窗函数 $w(n)$。

根据滤波器阻带衰减 α_s，选择窗函数 $w(n)$ 的种类，然后根据滤波器过渡带宽度确定所选窗函数的长度 N，并可根据线性相位数字滤波器类型，对 N 向大修正。应当说明，用窗函数法设计的 FIR 数字滤波器的通带波纹幅度近似等于阻带波纹幅度。一般要求滤波器的阻带最小衰减达到 40dB($\delta_s \leq 0.01$) 以上，则通带最大衰减就小于 0.1dB($\delta_p \leq 0.01$)。所以用窗函数法设计 FIR 滤波器时，通常只考虑阻带最小衰减就可以了。

(3) 确定理想数字滤波器的频率响应函数 $H_d(e^{j\omega}) = H_d(\omega)e^{j\theta_d(\omega)}$，其中 $H_d(\omega)$ 是幅度特性函数, $\theta_d(\omega)$ 是相位特性函数.

对 I 型和 II 型严格线性相位 FIR 数字滤波器，$_d(\omega) = -\omega(N-1)/2$；对 III 型和 IV 型广义线性相位 FIR 数字滤波器，$_d(\omega) = -\pi/2 - \omega(N-1)/2$。一般取滤波器截止频率 $\omega_c = (\omega_p + \omega_s)/2$，其中 ω_p 和 ω_s 分别为通带边界频率和阻带边界频率。

(4) 计算理想滤波器的单位脉冲响应 $h_d(n)$，即

$$h_d(n) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} H_d(e^{j\omega})e^{j\omega n}\mathrm{d}\omega \tag{10}$$

(5) 加窗得到设计结果 $h(n)$，即:

$$h(n) = h_d(n)w(n) \tag{11}$$

3 实验过程

所有设计均为第一类线性相位数字滤波器。

Matlab 提供了窗函数法设计 FIR 数字滤波器的函数 fir1，格式为：`h=fir1(N,Wc,'ftype',window)`，其中 h 是数字滤波器的单位脉冲响应，长度为 $N+1$。Wc 是对 π 归一化的 6dB 数字截止频率，$0 \leq W_c \leq 1$。

ftype 是滤波器类型，当 ftype 缺省，并且 Wc 是标量时，设计低通滤波器；当 ftype 缺省，并且 Wc 是标量时，设计低通滤波器；当 ftype 缺省，并且 Wc=[Wcl,Wcu] 时，设计带通滤波器，其 -6dB 通带为 Wcl$\leq \omega \leq$Wcu；当 ftype=high 时，设计高通滤波器；当 ftype=stop，并且 Wc=[Wcl,Wcu] 时，设计带阻滤波器。在设计高通和带阻滤波器时，N 只能取偶数；如果将 N 设置为奇数，fir1 会自动对 N 加 1。

window 是窗函数的类型，当 window 缺省时，采用汉明窗函数；当 window=bartlett(N+1) 时，采用三角窗；当 window=hanning(N+1) 时，采用汉宁窗；当 window=blackman(N+1) 时，采用布莱克曼窗；当 window=kaiaer(N+1,beta) 时，采用 β =beta 的凯塞窗函数。

3.1 FIR 数字低通滤波器

假设指标要求为：通带截止频率 $\omega_p = 0.2\pi$rad，阻带截止频率 $\omega_p = 0.5\pi$rad，通带最大衰减 $\alpha_p = 1$dB，阻带最小衰减 $\alpha_s = 40$dB。

采用凯塞窗函数设计，凯塞窗函数的调整参数

$$\beta = 0.5842(\alpha_s - 21)^{0.4} + 0.07886(\alpha_s - 21) = 3.3953$$

滤波器的阶数

$$N - 1 = \frac{\alpha_s - 7.95}{2.285\Delta B} = \frac{40 - 7.95}{2.285 \times 0.3\pi} = 14.8823$$

取满足要求的最小整数 $N - 1 = 15$，由于 I 型线性相位数字滤波器阶数必须为偶数，N 为奇数，取 $N = 17$。

理想低通滤波器的 6dB 截止频率 $\omega = (\omega_s + \omega_p)/2 = 0.35\pi$rad。FIR 数字低通滤波器单位脉冲响应如图 1 所示。频率响应曲线如图 2 所示。$\omega = 0.2$ 时幅度为 0dB，$\omega = 0.5$ 时幅度为 -47.7dB，通带满足指标要求，阻带满足指标要求，过渡带比指标要求的窄。(查看幅度修改代码 `[H,W] = freqz(h,1,512);` 中的参数 512 为 1000，并使用 Matlab 中图像的数据游标功能)

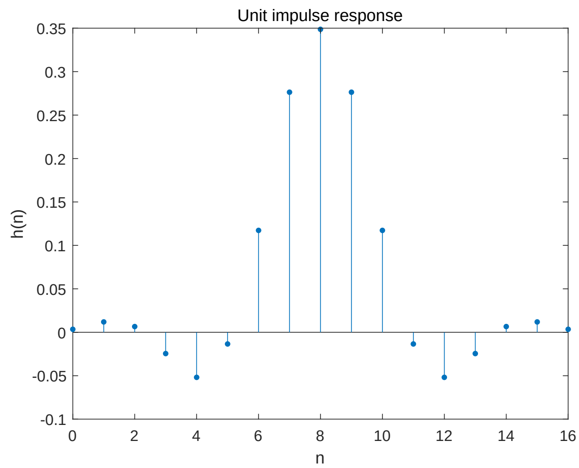

图 1: FIR 数字低通滤波器单位脉冲响应

3.2 FIR 数字高通滤波器

假设指标要求为：通带截止频率 $\omega_p = 0.5\pi$rad，阻带截止频率 $\omega_p = 0.2\pi$rad，通带最大衰减 $\alpha_p = 1$dB，阻带最小衰减 $\alpha_s = 40$dB。

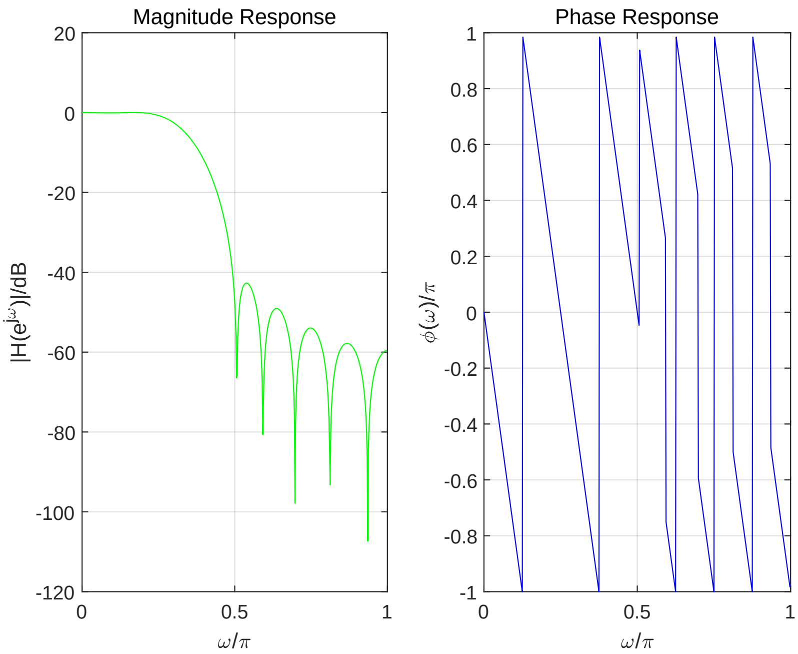

图 2: FIR 数字低通滤波器单位频率响应曲线

采用汉宁窗函数设计，要求过渡带宽度 $\Delta B=\frac{6.2\pi}{N}\leq 0.3\pi$，解得 $N\geq 20.7$。I 型滤波器的 N 必须取奇数，取 $N=21$，汉宁函数为

$$w(n)=\begin{cases}0.5\left[1-\cos\left(\frac{\pi n}{10}\right)\right], & 0\leq n\leq 20\\ 0, & others\end{cases}$$

理想高通滤波器的 6dB 截止频率 $\omega=(\omega_s+\omega_p)/2=0.35\pi\text{rad}$。FIR 数字高通滤波器单位脉冲响应如图 3 所示。频率响应曲线如图 4 所示。$\omega=0.2$ 时幅度为 -60.9dB，$\omega=0.5$ 时幅度为 0dB，通带满足指标要求，阻带满足指标要求，过渡带比指标要求的窄。

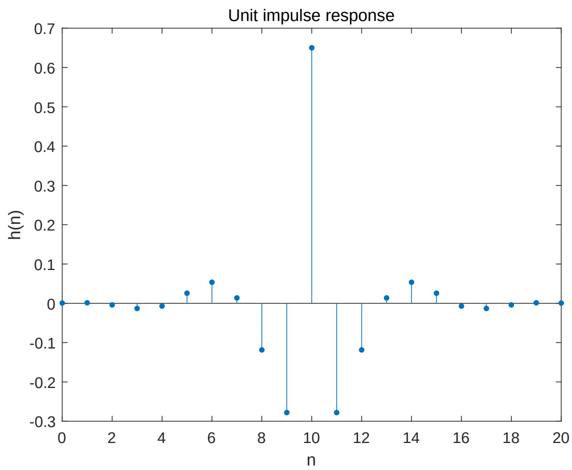

图 3: FIR 数字高通滤波器单位脉冲响应

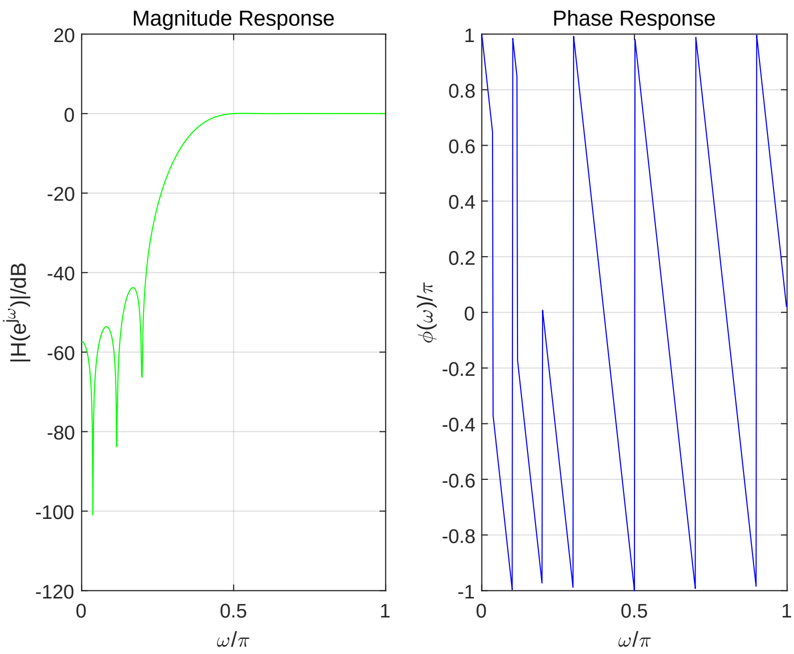

图 4: FIR 数字高通滤波器单位频率响应曲线

3.3 FIR 数字带通滤波器

假设指标要求为:通带截止频率 $\omega_p = [0.4\pi, 0.6\pi]$rad,阻带截止频率 $\omega_p = [0.2\pi, 0.8\pi]$rad,通带最大衰减 $\alpha_p = 1$dB,阻带最小衰减 $\alpha_s = 40$dB。

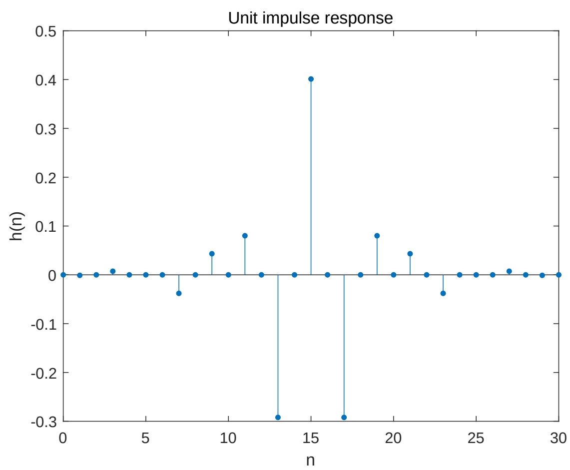

图 5: FIR 数字带通滤波器单位脉冲响应

采用汉宁窗函数设计,要求过渡带宽度 $\Delta B = \frac{6.2\pi}{N} \leq 0.2\pi$,解得 $N \geq 31$。取 $N = 31$,汉宁函数为

$$w(n) = \begin{cases} 0.5\left[1 - \cos\left(\frac{\pi n}{15}\right)\right], & 0 \leq n \leq 30 \\ 0, & others \end{cases}$$

理想带通滤波器的 6dB 截止频率 $\omega = (\omega_s + \omega_p)/2 = [0.3\pi, 0.7\pi]$rad。FIR 数字带通滤波器单位脉冲响应如图 5 所示。频率响应曲线如图 6 所示。$\omega = 0.2$ 时幅度为 -48.2dB,

$\omega = 0.8$ 时幅度为 -48.2dB，$\omega = 0.4$ 时幅度为 0dB，$\omega = 0.6$ 时幅度为 0dB，通带满足指标要求，阻带满足指标要求，过渡带比指标要求的窄。

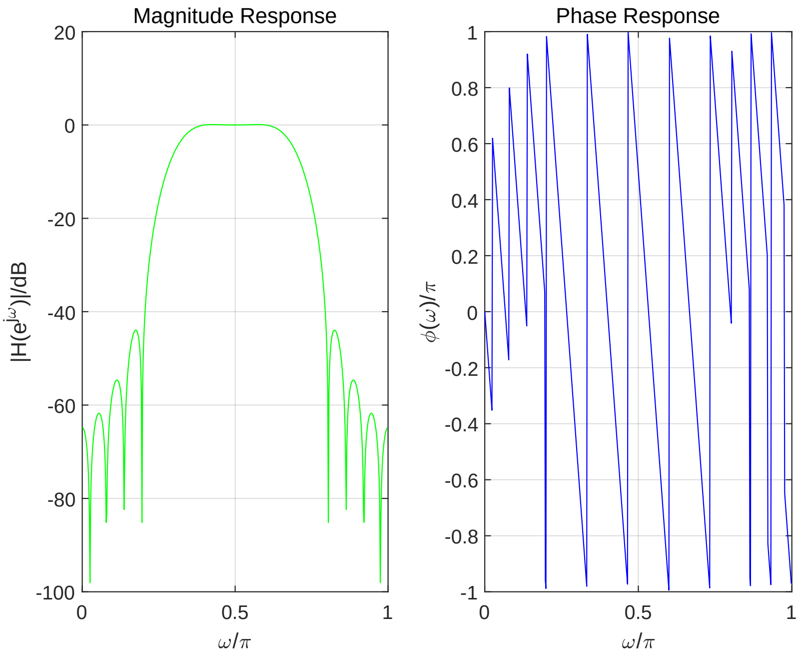

图 6: FIR 数字带通滤波器单位频率响应曲线

3.4 FIR 数字带阻滤波器

假设指标要求为:通带截止频率 $\omega_p = [0.2\pi, 0.8\pi]$rad,阻带截止频率 $\omega_p = [0.4\pi, 0.6\pi]$rad，通带最大衰减 $\alpha_p = 1$dB，阻带最小衰减 $\alpha_s = 40$dB。

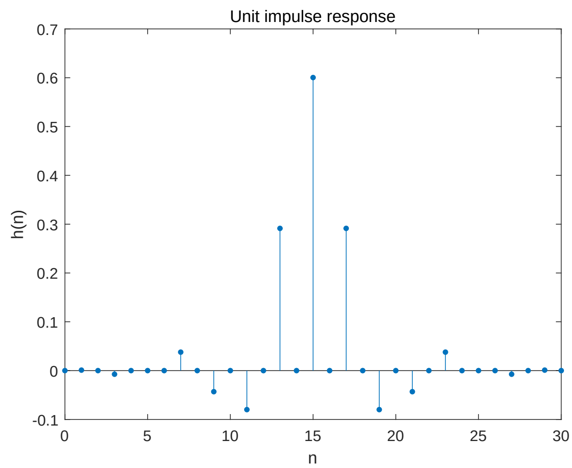

图 7: FIR 数字带阻滤波器单位脉冲响应

采用汉宁窗函数设计，要求过渡带宽度 $\Delta B = \frac{6.2\pi}{N} \leq 0.2\pi$，解得 $N \geq 31$。取 $N = 31$，汉宁函数为

$$w(n) = \begin{cases} 0.5\left[1 - \cos\left(\frac{\pi n}{15}\right)\right], & 0 \leq n \leq 30 \\ 0, & others \end{cases}$$

理想带阻滤波器的 6dB 截止频率 $\omega = (\omega_s + \omega_p)/2 = [0.3\pi, 0.7\pi]$rad。FIR 数字带阻滤波器单位脉冲响应如图 7 所示。频率响应曲线如图 8 所示。$\omega = 0.2$ 时幅度为 0dB，$\omega = 0.8$ 时幅度为 0dB，$\omega = 0.4$ 时幅度为 -47.6dB，$\omega = 0.6$ 时幅度为 -47.6dB，通带满足指标要求，阻带满足指标要求，过渡带比指标要求的窄。

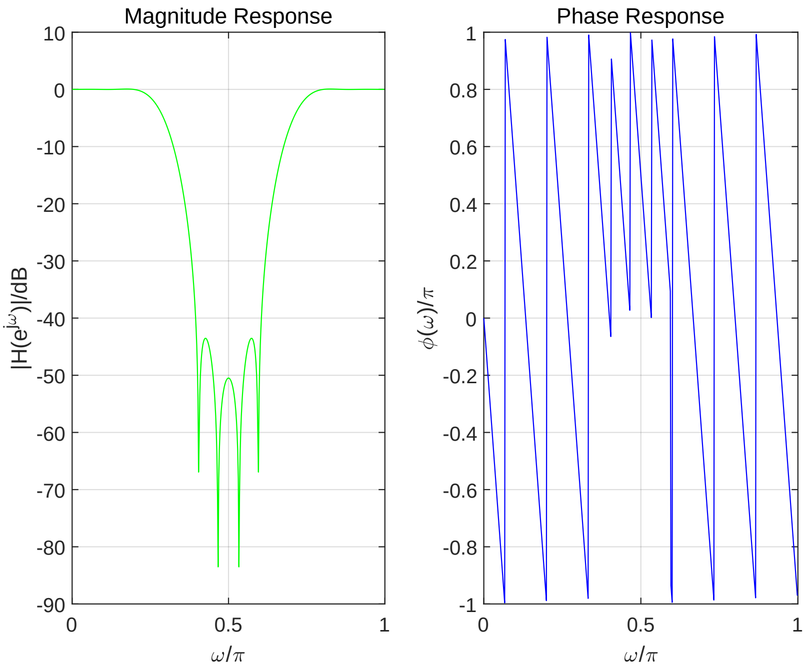

图 8: FIR 数字带阻滤波器单位频率响应曲线

3.5 FIR 数字滤波器的结构信号流图

3.5.1 直接型

FIR 数字滤波器的系统函数和差分方程分别为

$$H(z) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n) z^{-n} \tag{12}$$

和

$$y(n) = \sum_{m=0}^{N-1} h(m) x(n-m) \tag{13}$$

直接由差分方程可画出 FIR 数字滤波器的直接型结构如图 9 所示。

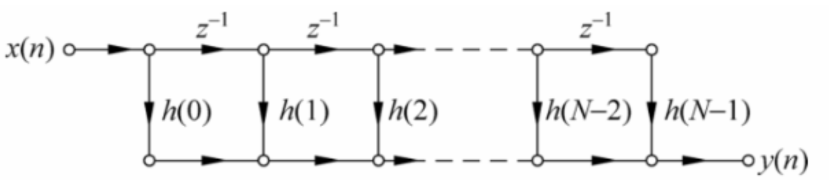

图 9: FIR 数字滤波器的直接型结构

3.5.2 级联型

当需要控制滤波器的传输零点时，可将系统函数分解为二阶实系数因子的形式：

$$H(z)=\sum_{n=0}^{N-1}h(n)z^{-n}=\prod_{i=1}^{M}\left(a_{0i}+a_{1i}z^{-1}+a_{2i}z^{-2}\right) \tag{14}$$

于是可用二阶节级联构成，每一个二阶节控制一对零点，画出 FIR 数字滤波器的级联型结构如图 10 所示。

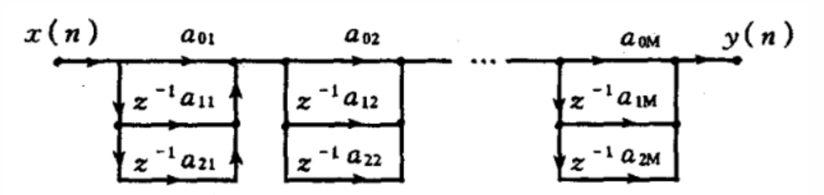

图 10: FIR 数字滤波器的级联型结构

3.5.3 线性相位型

线性相位是指滤波器产生的相移与输入信号频率成线性关系。如果 FIR 数字滤波器具有线性相位特性，它的单位脉冲响应满足下式：

$$h(n)=\pm h(N-n-1) \tag{15}$$

其中：$h(n)$ 偶对称时，为第一类线性相位；$h(n)$ 及对称时，为第二类线性相位。

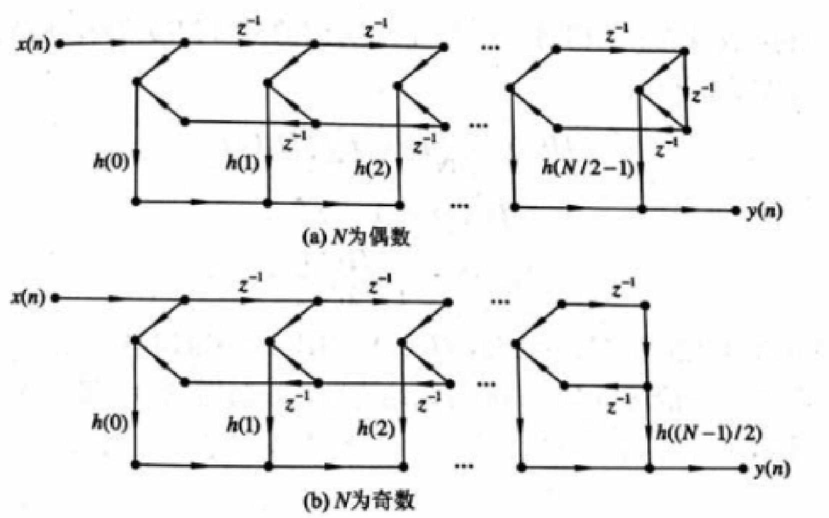

图 11: FIR 数字滤波器的第一类线性相位型结构

当 N 为偶数时

$$H(z)=\sum_{n=0}^{N-1}h(n)z^{-n}=\sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1}h(n)\left[z^{-n}\pm z^{-(N-n-1)}\right] \tag{16}$$

当 N 为奇数时

$$H(z)=\sum_{n=0}^{N-1}h(n)z^{-n}=\sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1}h(n)\left[z^{-n}\pm z^{-(N-n-1)}\right]+h\left(\frac{N-1}{2}\right)z^{-\frac{N-1}{2}} \tag{17}$$

由此可画出 FIR 数字滤波器的第一类和第二类线性相位型结构分别如图 11 和图 12 所示。

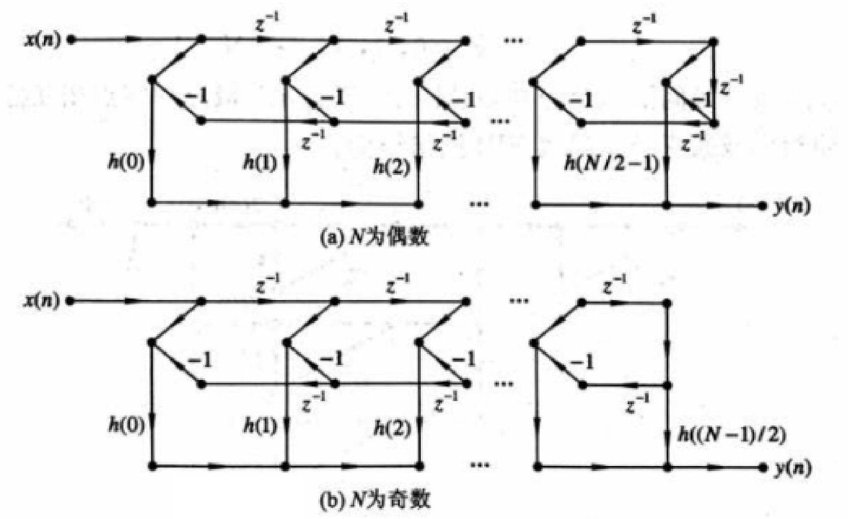

图 12: FIR 数字滤波器的第二类线性相位型结构

3.5.4 频率采样型

对系统函数取样可得：

$$H(k)=H(z)\big|_{z=e^{j\frac{2\pi}{N}k}} \tag{18}$$

系统函数可由采样值 $H(k)$ 通过内插公式来表示，即

$$H(z)=\frac{1-z^{-N}}{N}\sum_{k=0}^{N-1}\frac{H(k)}{1-W_N^{-k}z^{-1}} \tag{19}$$

可改写成：

$$H(z)=\frac{1}{N}H_c(z)\sum_{k=0}^{N-1}H_k(z) \tag{20}$$

式中

$$H_c(z)=1-z^{-N} \tag{21}$$

$$H_k(z)=\frac{H(k)}{1-W_N^{-k}z^{-1}} \tag{22}$$

$H_c(z)$ 是一个梳状滤波器，它的零点在 $z_k=W_N^{-k}(0\le k\le N-1)$ 处；$H_k(z)$ 是一个一阶子系统，极点在 $p_k=W_N^{-k}(0\le k\le N-1)$ 处。FIR 数字滤波器的频率采样结构由一个 N 阶梳状滤波器与 N 个一阶子系统的并联网络级联而成，如图 13 所示。

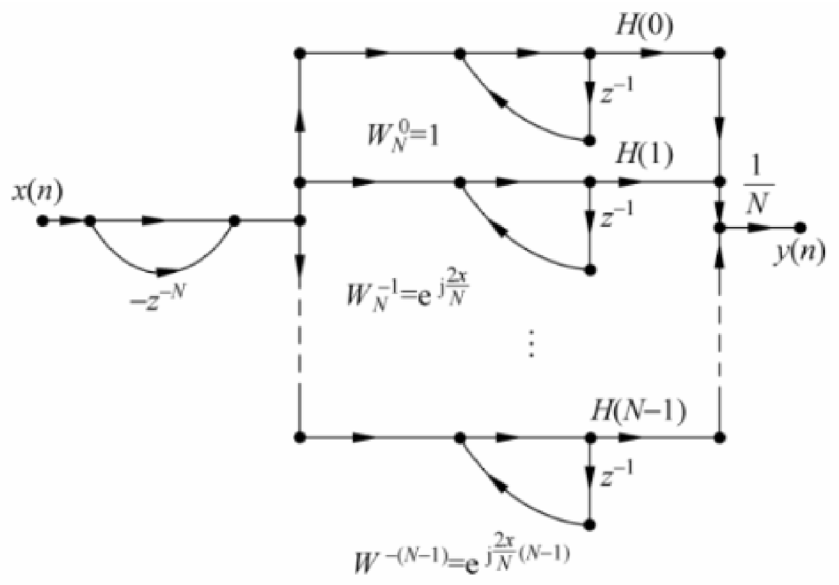

图 13: FIR 数字滤波器的频率采样型结构

4 总结

4.1 杨文韬

- 问题 1：相比 IIR 数字滤波器，FIR 数字滤波器有什么优势？
  - 不需要反馈，因此舍去误差不会因为连续的加总而累计。每一次的计算其相对误差都是一样的，因此在实现上比较简单。
  - 在本质上稳定，因为其输出是有限个输入值乘以有限倍数的和。
  - 若让系数对称，可以设计成线性相位，这在一些相位很重要的应用（例如资料通讯、地震学或分音器）中是很好的特性。

- 问题 2：从实验结果可用看出哪些结论?

  从结果来看，滤波类型的不同，更多表现在频域上的不同，而在时域上不易看出什么不同。窗函数的长度主要影响的是滤波器的过渡带宽度。窗函数的长度 N 越大，对应的主瓣宽度越窄，所以相应的滤波器的过渡带宽度越窄。

- 问题 3：Python 中是否有类似的利用窗函数设计 FIR 数字滤波器函数？

  scipy.signal 库中有类似函数,`scipy.signal.firwin(numtaps, cutoff, width=None, window='hamming', pass_zero=True, scale=True, nyq=None, fs=None)`。numtaps 指滤波器的长度；cutoff 指滤波器的截止频率或一组截止频率；可选参数 width 若不为 None，则假定它是过渡区域的近似宽度 (用与 fs 相同的单位表示)，用于 Kaiser FIR 滤波器设计；window 指希望使用的窗口。

4.2 刘浩

- 问题：FIR 数字滤波器信号流图各有什么特点？
  - **直接型**：简单直观，乘法运算量较少，但调整零点较难。
  - **级联型**：调整零点比直接型方便。但 $H(z)$ 中的系数比直接型多，因而需要的乘法器多。当 $H(z)$ 的阶次高时，也不易分解。
  - **线性相位型**：在本质上是直接型，但乘法次数比直接型省了一半。
  - **频率采样型**：系数 $H(k)$ 直接就是滤波器在 $\omega = \frac{2\pi}{N}k$ 处的响应，因此，控制滤波器响应很直接。但所有系数 W_N^{-k} 和 $H(k)$ 都是复数，计算复杂。有些极点实际上不能与梳状滤波器的零点相抵消，使系统的稳定性变差。

4.3 周泽熙

- 问题：在使用相关函数如何正确理解参数?

  `h=fir1(N-1,Wc,'ftype',window)`，其中 Wc 是关于 π 的归一化的 6dB 数字截止频率，所以 Wc 在区间 $(0,1)$ 内。同时应注意 ftpye=high，设计高通滤波器，ftype=stop，设计带阻滤波器。当 window 缺省时，采用汉明窗；添加 bartlett(N) 改为三角窗；blackman(N) 布莱克曼窗；hanning(N) 汉宁；kaiser(N+1,beta)，β=beta 的凯赛窗

Appendices

附录 A 实验代码

A.1 FIR 数字低通滤波器

```
% Low-pass filter
Wp=0.2*pi; Ws=pi/2; Rs=40; B=Ws-Wp;
beta=0.5842*(Rs-21)^0.4+0.07886*(Rs-21)
N0=ceil((Rs-7.95)/2.285/B)+1;
N=N0+mod(N0+1,2)
Wc=(Wp+Ws)/2/pi

h=fir1(N-1,Wc,kaiser(N,beta));

figure(1)
n=0:1:N-1;
stem(n, h, 'filled', 'MarkerSize', 3);
xlabel('n'); ylabel('h(n)');
title('Unit impulse response');

[H,W] = freqz(h,1,512);
figure(2)
subplot(1,2,1);
plot(W/pi,20*log10(abs(H)),'g'); grid on;
xlabel('\omega/\pi'); ylabel('|H(e^j^\omega)|/dB');
title('Magnitude Response');
subplot(1,2,2);
plot(W/pi,angle(H)/pi,'b');grid on;
xlabel('\omega/\pi'); ylabel('\phi(\omega)/\pi');
title('Phase Response');
```

A.2 FIR 数字高通滤波器

```
% High-pass filter
Wp=pi/2; Ws=0.2*pi; B=Wp-Ws;
N0=ceil(6.2*pi/B);
N=N0+mod(N0+1,2)
Wc=(Wp+Ws)/2/pi

h=fir1(N-1,Wc,'high',hanning(N));

figure(1)
```

```
n=0:1:N-1;
stem(n, h, 'filled', 'MarkerSize', 3);
xlabel('n'); ylabel('h(n)');
title('Unit impulse response');

[H,W] = freqz(h,1,512);
figure(2)
subplot(1,2,1);
plot(W/pi,20*log10(abs(H)),'g');grid on;
xlabel('\omega/\pi'); ylabel('|H(e^j^\omega)|/dB');
title('Magnitude Response');
subplot(1,2,2);
plot(W/pi,angle(H)/pi,'b');grid on;
xlabel('\omega/\pi'); ylabel('\phi(\omega)/\pi');
title('Phase Response');
```

A.3 FIR 数字带通滤波器

```
% Band-pass filter
Wp1=0.4*pi; Ws1=0.2*pi;
Wp2=0.6*pi; Ws2=0.8*pi;
B=Wp1-Ws1;
N0=ceil(6.2*pi/B);
N=N0+mod(N0+1,2)
Wc=[(Wp1+Ws1)/2/pi,(Wp2+Ws2)/2/pi]

h=fir1(N-1,Wc,hanning(N));

figure(1)
n=0:1:N-1;
stem(n, h, 'filled', 'MarkerSize', 3);
xlabel('n'); ylabel('h(n)');
title('Unit impulse response');

[H,W] = freqz(h,1,512);
figure(2)
subplot(1,2,1);
plot(W/pi,20*log10(abs(H)),'g');grid on;
xlabel('\omega/\pi'); ylabel('|H(e^j^\omega)|/dB');
title('Magnitude Response');
subplot(1,2,2);
plot(W/pi,angle(H)/pi,'b');grid on;
xlabel('\omega/\pi'); ylabel('\phi(\omega)/\pi');
title('Phase Response');
```

A.4 FIR 数字带阻滤波器

```
% Band-stop filter
Wp1=0.2*pi; Ws1=0.4*pi;
Wp2=0.8*pi; Ws2=0.6*pi;
B=Ws1-Wp1;
N0=ceil(6.2*pi/B);
N=N0+mod(N0+1,2)
Wc=[(Wp1+Ws1)/2/pi,(Wp2+Ws2)/2/pi]

h=fir1(N-1,Wc,'stop',hanning(N));

figure(1)
n=0:1:N-1;
stem(n, h, 'filled', 'MarkerSize', 3);
xlabel('n'); ylabel('h(n)');
title('Unit impulse response');

[H,W] = freqz(h,1,512);
figure(2)
subplot(1,2,1);
plot(W/pi,20*log10(abs(H)),'g');grid on;
xlabel('\omega/\pi'); ylabel('|H(e^j^\omega)|/dB');
title('Magnitude Response');
subplot(1,2,2);
plot(W/pi,angle(H)/pi,'b');grid on;
xlabel('\omega/\pi'); ylabel('\phi(\omega)/\pi');
title('Phase Response');
```