

## 数字信号处理实验报告 (六) ---- 高通滤波器和梳状滤波器

姓名: 杨承翰 学号: 210210226 班级: 通信 2 班

实验日期: 12.11 实验台号: K405-20

### 一、实验记录

#### 6.2.1 设计 IIR 数字高通滤波器

设计 IIR 数字高通滤波器, 主要设计指标: 通带截止频率  $f_p=2500\text{Hz}$ , 阻带截止频率  $f_s=1100\text{Hz}$ , 通带最大衰减  $\alpha_p=3\text{dB}$ , 阻带最小衰减  $\alpha_s=15\text{dB}$ , 采样频率  $F_s=20\text{kHz}$ 。

(1) 采用双线性不变法设计滤波器, 模拟滤波器采用巴特沃兹滤波器, 写出详细的设计过程, 给出数字滤波器的传递函数。设计和推导过程写在实验报告中。

步骤 1: 计算模拟高通滤波器的通带截止频率和阻带截止频率

给定参数:

通带截止频率  $f_p = 2500\text{Hz}$

阻带截止频率  $f_s = 1100\text{Hz}$

步骤 2: 预畸变校正计算模拟高通滤波器的技术指标  $\Omega_p$ 、 $\Omega_s$

根据预畸变校正公式, 我们可以计算出模拟高通滤波器的技术指标:

$$\Omega_p = \tan(\pi f_p/F_s) = \tan(\pi * 2500/20000) \approx 0.4142$$

$$\Omega_s = \tan(\pi f_s/F_s) = \tan(\pi * 1100/20000) \approx 0.1745$$

步骤 3: 将模拟高通滤波器的指标转化为归一化低通滤波器的技术指标  $\Omega_p$ 、 $\Omega_s$ 、 $\alpha_p$ 、 $\alpha_s$

根据归一化公式, 我们可以计算出归一化的技术指标:

$$\Omega_p' = \Omega_p / \Omega_s \approx 2.3700$$

$$\Omega_s' = 1.0000$$

$$\alpha_p' = \alpha_p$$

$$\alpha_s' = \alpha_s / \alpha_p \approx 5.0000$$

步骤 4: 设计归一化模拟低通滤波器  $G(p)$ , 计算滤波器阶数  $N$ , 根据阶数  $N$ , 查表得到归一化模拟滤波器传输函数 (设计类型为巴特沃斯型)

$N=2$

$$G(p) = \frac{1}{p^2 + 1.4142p + 1}$$

步骤 5: 去归一化, 将模拟低通系统函数转换为模拟高通系统函数

首先, 我们需要将查表得到的归一化截止频率  $\Omega_c'$  转换为实际截止频率  $\Omega_c$ :

$$\Omega_c = \Omega_s / \Omega_c' \approx 1.0000 / 1.2720 \approx 0.7862$$

然后, 我们利用预畸变校正公式将归一化模拟低通滤波器传输函数  $G(p)$  转换为实际模拟高通滤波器传输函数  $H(p)$ :

$$H_d(s) = \frac{1}{0.1716s^{-2} + 0.5858s^{-1} + 1}$$

步骤 6: 用双线性变换法将模拟高通滤波器  $H(p)$  转换成数字高通滤波器  $H(z)$

将双线性变换公式应用于模拟高通滤波器传输函数  $H(p)$ ，我们得到数字高通滤波器传输函数  $H(z)$ ：

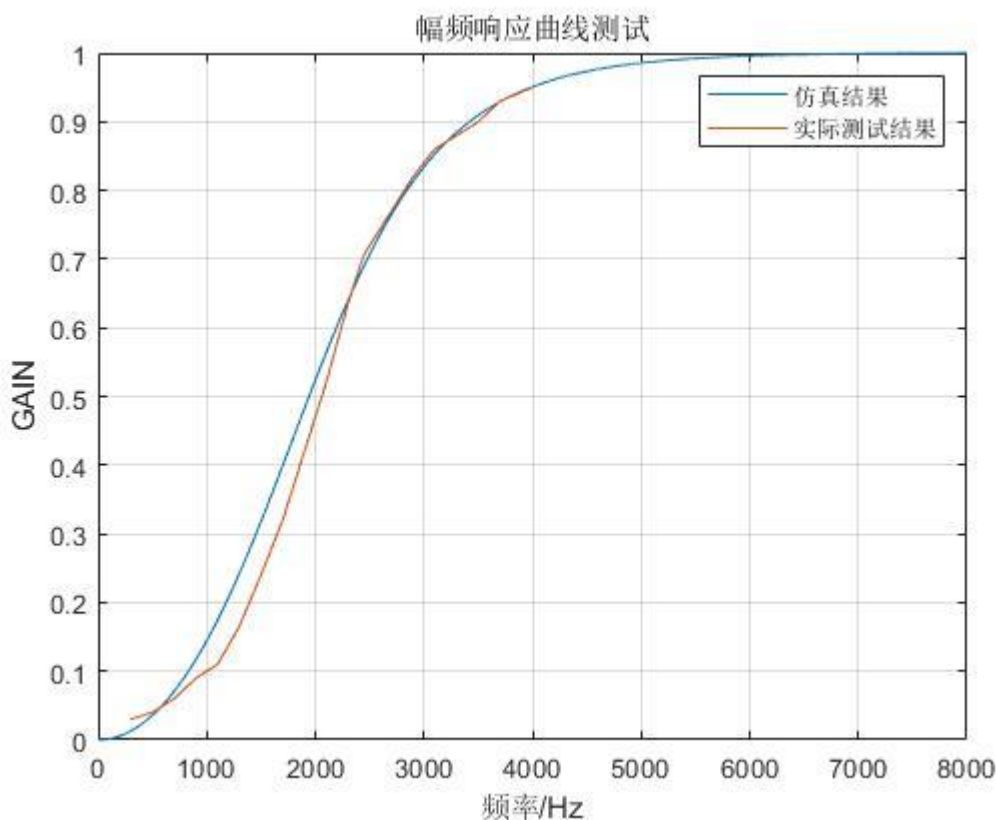
$$H(z) = H(s)|_{s = (2Fs(z-1))/(z+1)} = H((2Fs(z-1))/(z+1))$$

将实际模拟高通滤波器传输函数  $H(p)$  带入上式，我们得到最终的数字高通滤波器传输函数  $H(z)$ 。

根据设计指标，我们得到数字高通滤波器的传递函数为：

$$H(z) = \frac{0.5690 - 1.1380z^{-1} + 0.5690z^{-2}}{1 - 0.9427z^{-1} + 0.3333z^{-2}}$$

(3) 测量输出节点  $y$  的幅频响应。用函数发生器产生适当幅值的电压，保证内部节点不发生信号饱和，测量信号频率范围 300~4000Hz。用 MATLAB 将计算的理论幅频响应曲线和所搭建滤波器的测试幅频响应曲线画在同一图中，进行对比。



**问题 1** 实测 3dB 处通带截止频率和 15dB 处阻带截止频率分别是多少？是否与设计指标一致？

实测 3dB 处通带截止频率为 2450Hz 和 15dB 处阻带截止频率为 1150Hz。

是否与设计指标一致？

观察实测曲线，与设计指标一致

## 6.4.3 设计梳状滤波器

(1) 根据梳状滤波器的系统函数，利用实验板上的延时器分别设计 3 阶 FIR 梳状滤波器及 3 阶 IIR 梳状滤

波器，输入信号的采样频率为  $F_s=20\text{kHz}$ 。

**问题 2** 在图 6-4 (a) 中完成 3 阶 FIR 梳状滤波器实验接线图，在图 6-4 (b) 中完成 3 阶 IIR 梳状滤波器实验接线图，并在实验板上连线。

**问题 3** 根据图 6-4 (a) 中的接线图，写出此时 FIR 梳状滤波器的系统函数  $H_1(z)$ 。

$$H(z)=1-z^{-3}$$

**问题 4** 根据图 6-4 (b) 中的接线图，写出此时 IIR 梳状滤波器的系统函数  $H_2(z)$ 。

$$H(z) = \frac{1 - z^{-3}}{1 - 0.5z^{-3}}$$

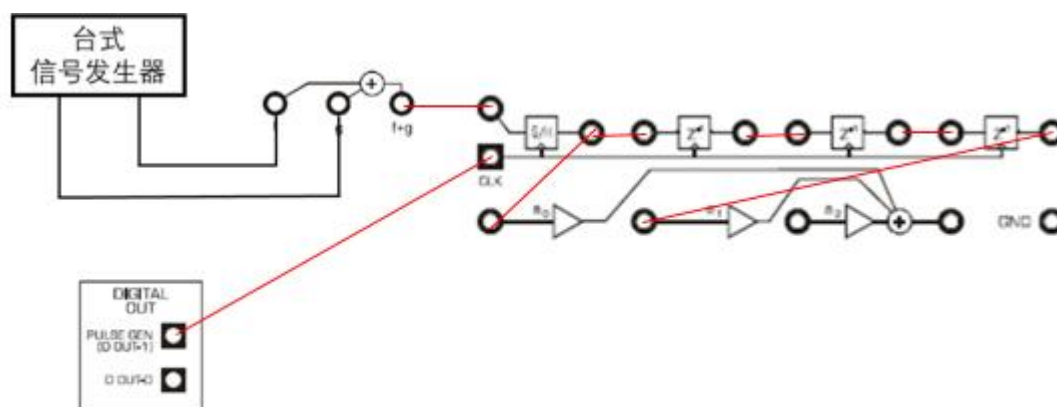


图 6-4(a): 3 阶 FIR 梳状滤波器实验接线图

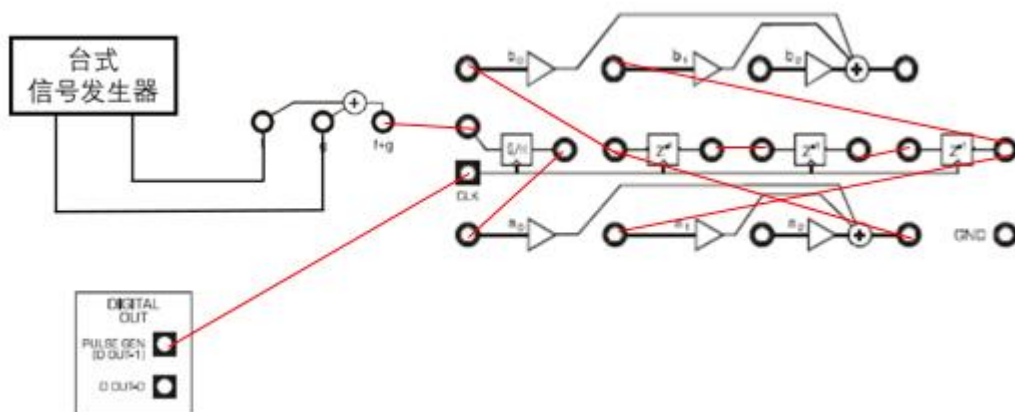
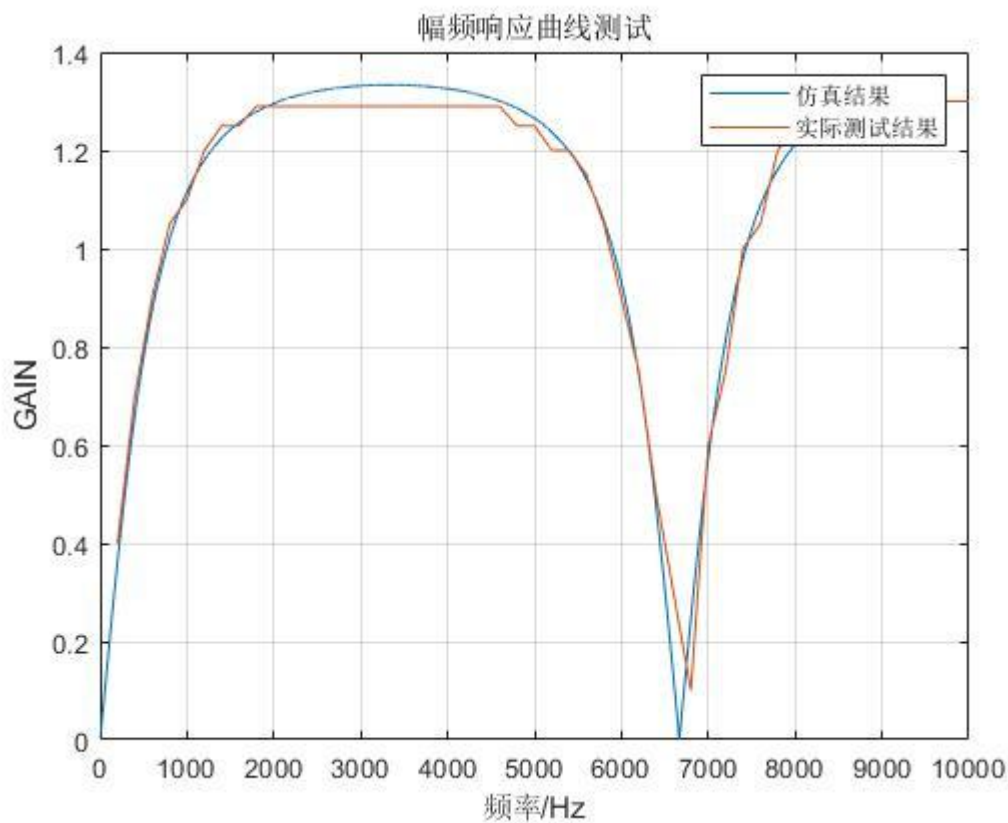
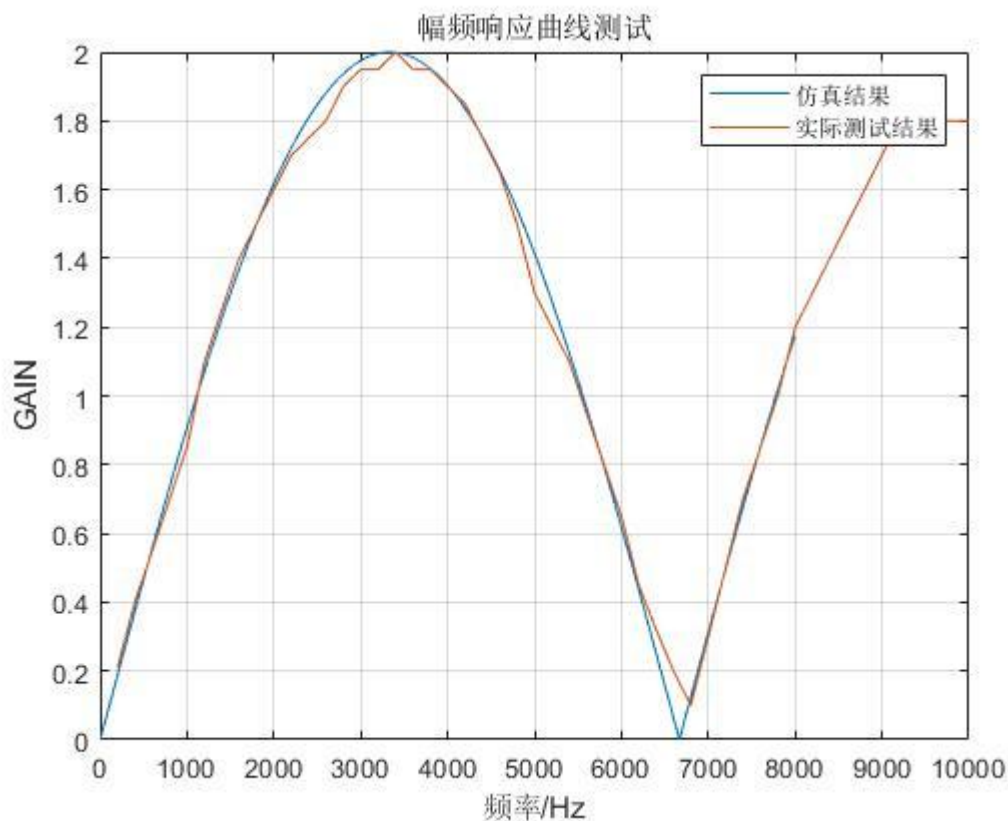


图 6-4(b): 3 阶 IIR 梳状滤波器实验接线图

要求测量 3 阶 FIR 梳状滤波器和 3 阶 IIR 梳状滤波器的幅频特性曲线，其中式 (1) 中  $a$  取 0.5。利用 MATLAB 计算 3 阶 FIR 梳状滤波器及 3 阶 IIR 梳状滤波器的理论幅频响应曲线，与测量的滤波器幅频特性曲线分别画在一个图上，进行比较。（建议在滤波器的过渡段密集测量）



问题 5 对比 3 阶 FIR 梳状滤波器和 3 阶 IIR 梳状滤波器的输出特性。

## 1. FIR 梳状滤波器的输出特性:

频率响应: FIR 梳状滤波器具有平坦的频率响应, 不会引入频率选择性失真。

相位响应: FIR 梳状滤波器具有线性相位响应, 即输出信号的相位延迟与频率无关。

稳定性: 由于没有反馈路径, FIR 滤波器始终是稳定的。

窗函数: FIR 梳状滤波器可以使用窗函数来设计, 不同的窗函数会影响其频率响应和滚降特性。

## 2. IIR 梳状滤波器的输出特性:

频率响应: IIR 梳状滤波器的频率响应可能具有更复杂的形状, 由于反馈路径的存在, 其响应可能出现波纹或振荡。

相位响应: IIR 梳状滤波器的相位响应是非线性的, 即输出信号的相位延迟与频率有关。在频域中, 它会引入相位畸变。

稳定性: IIR 梳状滤波器的稳定性取决于滤波器的极点和零点位置, 需要仔细设计以确保稳定性。

极点位置: IIR 梳状滤波器的频率响应和滚降特性受到极点位置的影响。不同的极点位置可以导致不同的频率选择性。

FIR 梳状滤波器具有更简单的输出特性, 频率响应平坦且相位响应线性。而 IIR 梳状滤波器的输出特性较为复杂, 具有非线性相位响应和可能出现波纹的频率响应。

## 问题 6 FIR 梳状滤波器和 IIR 梳状滤波器的梳齿数分别与什么参数有关?

对于 FIR 梳状滤波器:

梳齿数与采样频率有关: 梳齿数通常是根据采样频率和期望的滤波效果来确定的。一般来说, 梳齿数应该足够大, 以使得滤波器能够有效地减弱所需滤波频率附近的信号。梳齿数与采样频率成正比关系。

梳齿数与滤波效果有关: 梳齿数越大, 滤波器的滚降特性 (降低所需滤波频率附近的信号强度) 越明显。因此, 梳齿数会影响滤波器的频率选择性。

对于 IIR 梳状滤波器:

梳齿数与采样频率有关: 梳齿数仍然与采样频率相关, 但与 FIR 滤波器不同, IIR 滤波器的梳齿数可以是整数或者非整数。这是因为 IIR 滤波器使用了反馈路径, 其梳齿数与采样频率的关系相对复杂。

梳齿数与滤波效果有关: 梳齿数同样会影响 IIR 滤波器的频率选择性和滚降特性。不同的梳齿数可以导致不同的频率响应形状和截止特性。

## 问题 7 FIR 梳状滤波器和 IIR 梳状滤波器的梳齿频率分别与什么参数有关?

对于 FIR 梳状滤波器:

梳齿频率与采样频率有关: 梳齿频率通常是采样频率的倒数, 即梳齿频率等于采样周期。例如, 如果采样频率是  $F_s$ , 则梳齿频率为  $1/F_s$ 。

梳齿频率与滤波效果有关: 梳齿频率决定了滤波器的滚降特性 (降低所需滤波频率附近的信号强度)。较小的梳齿频率可以提供更宽的滚降带宽, 从而减小所需滤波频率的影响。

对于 IIR 梳状滤波器:

梳齿频率与采样频率有关: 梳齿频率仍然与采样频率相关, 但与 FIR 滤波器不同, IIR 滤波器的梳齿频率可以是整数或者非整数倍的采样频率。具体的梳齿频率与采样频率的关系需要根据滤波器结构和设计参数来确定。

梳齿频率与滤波效果有关: 梳齿频率同样会影响 IIR 滤波器的滚降特性和频率选择性。较小的梳齿频率可以提供更宽的滚降带宽, 从而减小所需滤波频率的影响。

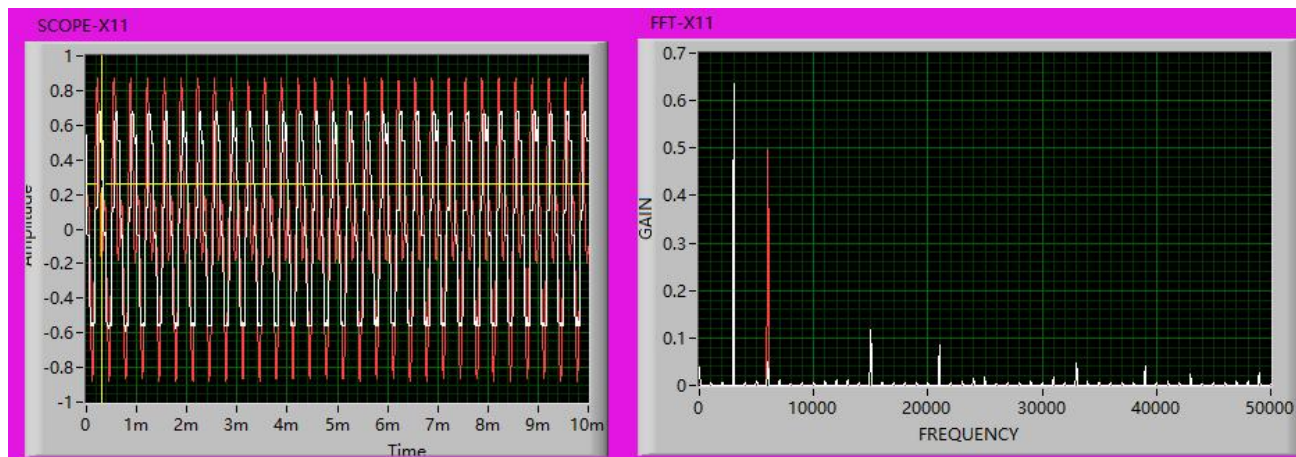
(2) 假定有用信号  $f_1=3000\text{Hz}$ , 噪声信号为  $f_2=6000\text{Hz}$ , 设计一个 3 阶 IIR 梳状滤波器, 使其中的一个梳齿频率对准干扰频率, 对干扰信号进行抑制。给出所设计的梳状滤波器参数。

参数为:  $a_0=$  1 ;  $a_1=$  0.5 ;  $a_2=$  0

$b_0=$  1 ;  $b_1=$  -1 ;  $b_2=$  0

采样频率为: 18000Hz

记录采样保持器与梳状滤波器输出端的**时域和频域波形**, 观察两个端点信号的频谱成份, 分析对干扰信号的抑制效果。



## 1. 时域波形观察:

在采样保持器的输出端, 时域波形将显示原始信号的抽样值, 而梳状滤波器的输出端将显示经过滤波后的信号波形。如果梳齿频率对准了干扰频率, 观察到 6000Hz 噪声信号的幅度被显著降低, 而 3000Hz 信号得以保留。

## 2. 频域波形观察:

在采样保持器的输出端频域波形中, 看到 3000Hz 和 6000Hz 两个频率成分。然而, 在梳状滤波器的输出端频域波形中, 观察到 6000Hz 的噪声成分被显著抑制, 而 3000Hz 信号得以保留。

通过设计一个 3 阶 IIR 梳状滤波器, 使其中一个梳齿频率对准干扰频率, 可以有效地抑制 6000Hz 的噪声信号, 同时保留 3000Hz 的有用信号。

## 三、实验体会与建议

本实验让我收获颇丰, 动手能力增强的同时理论基础更加扎实, 在此次实验中, 我加深了对于数字信号处理知识的理解, 而且锻炼了我的实验思维, 可以拓展课本之外的能力, 让自己不仅仅依靠书本上的知识发展自己的认知, 我认为本课程极具教育意义。