

河南工业大学

# 课 程 设 计

课程设计名称： 信号处理类课程设计

专 业 班 级： 电信 2101 班

学 生 姓 名： 陈闯

学 号： 211040200102

指 导 教 师： 杨静

课程设计时间： 2023-09-04 至 2023-12-20

## 信号处理类 课程设计任务书

学生姓名	陈闯	专业班级	电信 2101	学号	211040200102
题 目	基于汉宁窗的 FIR 高通滤波器设计				
课题性质	其他	课题来源		自拟	
指导教师	杨静	同组姓名		无	
主要内容	<p>按要求设计数字滤波器，并对音频信号进行滤波。设计内容如下：</p> <p>选用给定音频信号，或自行录制一段音频，要求时长 5~10 秒。在音频信号中叠加单个或多个低频频率分量。</p> <p>用汉宁窗函数法设计 FIR 高通滤波器，通带截止频率、阻带截止频率自行设定，以能够滤除叠加的低频分量为准。通带最大衰减、阻带最小衰减依据所选窗函数，自行设定。</p> <p>利用所设计的 FIR 高通滤波器，对叠加了低频噪声的音频信号进行高通滤波，对比滤波前后音频信号的变化。</p> <p>利用 MATLAB 软件进行系统建模，编写程序实现设计方案。</p>				
任务要求	<ol style="list-style-type: none"> <li>1、掌握用汉宁窗函数法设计 FIR 高通滤波器的原理和设计方法。</li> <li>2、用 MATLAB 画出滤波前、后音频信号的时域波形和频谱图。</li> <li>3、用 MATLAB 画出 FIR 高通滤波器幅频特性、相频特性图。</li> <li>4、对音频信号进行滤波，验证所设计的滤波器。</li> <li>5、撰写规范的课程设计报告。</li> </ol>				
参考文献	<p>[1]程佩青. 数字信号处理教程（第五版）MATLAB 版[M]. 北京：清华大学出版社，2017.</p> <p>[2]史洁玉. MATLAB 信号处理超级学习手册[M]. 人民邮电出版社，2014.</p> <p>[3]陈中祥，熊莹霞. 基于 MATLAB/GUI 的 FIR 和 IIR 数字滤波器的设计实现[J]. 智能计算机与应用，2022，12(01): 80-83.</p> <p>[4]谢芳，陆文骏. 基于 MATLAB 的含噪语音信号降噪处理方法[J]. 九江学院学报（自然科学版），2022，37(03): 45-49.</p> <p>[5]徐帆云. 基于 Matlab 的音频降噪滤波器设计[J]. 电声技术，2017，41(02): 28-33.</p> <p>[6]S. K. Mitra. Digital Signal Processing: A Computer Based Approach, 3rd Edition [M], New York, USA: McGraw-Hill, 2011.</p> <p>[7]R. G. Lyons. Understanding Digital Signal Processing, 2nd Edition[M]. New Jersey, USA: Prentice Hall, 2005.</p>				
审查意见	<p>指导教师签字：</p> <p>教研室主任签字：2023 年 09 月 01 日</p>				

说明：本表由指导教师填写，由教研室主任审核后下达给选题学生，装订在设计（论文）首页

## 摘 要

本课程设计使用 MATLAB 对基于汉宁窗的 FIR 高通滤波器进行设计，并对采集的语音信号进行滤波，从而实现语音去噪。在设计过程中，首先选用自行录制的一段音频音乐作为输入信号，并对录制的信号进行采样，绘制出采样后音频信号的时域图和频谱图；然后，通过在音频信号中叠加多个低频正弦频率分量进行加噪，并利用设计的基于汉宁窗的 FIR 高通滤波器，对叠加了低频噪声的音频信号进行高通滤波；最后依据滤波器的性能指标对仿真结果进行分析，通过回放录音对比去噪效果，并对比滤波前后的信号时域频域图的波形变化，给出滤波器特性曲线。最终，本课程设计出的滤波器性能指标和降噪效果都可以满足要求，验证了所设计巴特沃斯滤波器的有效性。

**关键词：**MATALB 汉宁窗 FIR 高通滤波器 音频滤波 正弦噪声

# 目录

1 引言.....	1
2 设计内容及要求.....	2
2.1 设计内容.....	2
2.2 设计要求.....	2
3 设计原理.....	3
3.1 FFT 快速傅里叶变换.....	3
3.2 FIR 数字滤波器 .....	4
3.3 FIR 数字滤波器的基本原理 .....	5
3.4 窗函数法设计 FIR 数字滤波器的基本思想 .....	6
3.5 窗函数法设计 FIR 数字滤波器的设计步骤 .....	6
4 设计方案.....	8
4.1 设计方法.....	8
4.2 音频信号的采集与输入.....	9
4.3 含噪信号的生成.....	11
4.4 FFT 点数 N 的选择.....	12
4.5 过渡带宽及滤波器阶数.....	13
5 结果及分析.....	14
5.1 滤波器的幅度特性分析.....	14
5.2 滤波器的相位特性分析.....	15
5.3 滤波器滤波实现.....	17
6 总结.....	18
参考资料.....	19
附录：程序源代码.....	20

# 1 引言

数字信号处理在现代通信、音频和图像处理等领域中得到了广泛的应用，而数字滤波器是其中的重要组成部分。数字滤波器是一种用于信号处理的数学模型，其目的是将输入信号经过滤波器后输出所需的信号。一般数字滤波器从功能上分类，和模拟滤波器一样，可以分成低通、高通、带通和带阻等滤波器，它可以是时不变的或时变的、因果的或非因果的、线性的或非线性的。其中，高通 FIR 滤波器是数字滤波器的一种重要类型，其特点是通过去除低频分量并保留高频分量，可以提高信号的质量和准确性，被广泛应用于语音和图像处理等领域。

数字滤波器还可以分为 IIR 数字滤波器（Infinite Impulse Response Filter）和 FIR 数字滤波器（Finite Impulse Response Filter）两类。IIR 滤波器的特点是具有无限的脉冲响应，可以实现较高的滤波效果，在频域上具有光滑的过渡带宽。该滤波器常用于对模拟信号的数字化处理，具有较低的计算复杂度。FIR 滤波器的特点是有限的脉冲响应，其输出只取决于输入和滤波器的系数。该滤波器在频域上具有较为严格的过渡带宽和线性相位特性，常用于需要线性相位的应用。

本课程设计旨在研究和设计基于汉宁窗的高通 FIR 滤波器，以实现低频分量的去除和高频分量的保留，提高信号的质量和准确性。该设计方法具有简单、有效、实用的特点，在实际应用中具有广泛的应用前景。在本文中，将介绍高通 FIR 滤波器的基本原理，详细阐述汉宁窗的特性及其在高通 FIR 滤波器设计中的应用，进而给出基于汉宁窗的高通 FIR 滤波器的设计方法和实现步骤，并通过实验验证设计的有效性和性能。最后，将讨论该设计方法的优缺点及其在实际应用中的适用性和局限性。

## 2 设计内容及要求

### 2.1 设计内容

选用给定音频信号，或自行录制一段音频，要求时长 5~10 秒。在音频信号中叠加单个或多个低频频率分量。

用汉宁窗函数法设计 FIR 高通滤波器，通带截止频率、阻带截止频率自行设定，以能够滤除叠加的低频分量为准。通带最大衰减、阻带最小衰减依据所选窗函数，自行设定。

利用所设计的 FIR 高通滤波器，对叠加了低频噪声的音频信号进行高通滤波，对比滤波前后音频信号的变化。

利用 MATLAB 软件进行系统建模，编写程序实现设计方案。

### 2.2 设计要求

- 1、掌握用汉宁窗函数法设计 FIR 高通滤波器的原理和设计方法。
- 2、用 MATLAB 画出滤波前、后音频信号的时域波形和频谱图。
- 3、用 MATLAB 画出 FIR 高通滤波器幅频特性、相频特性图。
- 4、对音频信号进行滤波，验证所设计的滤波器。
- 5、撰写规范的课程设计报告。

### 3 设计原理

本课程设计使用 MATLAB 对基于汉宁窗的 FIR 高通滤波器进行设计，并对采集的语音信号进行滤波，从而实现语音去噪。

#### 3.1 FFT 快速傅里叶变换

由于计算机的发展，离散傅里叶变换（DFT）可谓是信号处理的杀手锏。但是离散傅里叶变换计算量巨大，通常在实时信号处理时是无法使用的，直到快速傅里叶变换（FFT）算法被发现。与 DFT 不同，FFT 是一种算法而非理论，因此它无法只靠一两个公式就描述出来。

快速傅里叶变换是一种计算离散傅里叶变换的高效算法。它在数字信号处理中广泛应用，可以快速计算出信号的频域信息。首先，我们来了解一下离散傅里叶变换（DFT）。对于一个长度为  $N$  的离散序列  $x(n)$ ，它的 DFT  $X(k)$  定义为：

$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) * e^{(-j2\pi kn/N)}$  其中， $k$  为频率索引， $n$  为时间索引， $e$

为自然对数的底。DFT 的计算复杂度为  $O(N^2)$ ，当  $N$  很大时计算量较大。而快速傅里叶变换（FFT）则通过分治策略将 DFT 计算递归地分解成多个子问题，从而减小计算量。FFT 使用蝶形运算结构，它将  $N$  个点的 DFT 分解成两个  $N/2$  点的 DFT，并重复这个过程直到最终得到 1 点的 DFT。FFT 算法的计算复杂度为  $O(N\log N)$ ，显著提高了计算效率。现在，我们来简要介绍一下快速傅里叶变换的推导过程。假设输入序列为  $x(n)$ ，其中  $n$  为时间索引， $N$  为序列的长度。首先，我们将输入序列划分为偶数索引和奇数索引的子序列： $x(n) = x_e(n) + x_o(n)$  其中， $x_e(n)$  为偶数索引的子序列， $x_o(n)$  为奇数索引的子序列。然后，我们可以将原始序列的 DFT 表示为两个子序列的 DFT 的线性组合： $X(k) = \sum_{n=0}^{N/2-1} x_e(n) * e^{(-j2\pi kn/N)} + e^{(-j2\pi k/N)} * \sum_{n=0}^{N/2-1} x_o(n) * e^{(-j2\pi kn/N)}$ ，接下来，我们将 DFT 的计算问题递归地分解成两个较小规模的 DFT 计算问题。对于两个子序列的 DFT，我们可以继续进行划分和递归计算，直到最终得到 1 点的 DFT。在递归计算的过程中，我们可以利用旋转因子的周期性质，通过预先计算一些旋转因子的值，并利用这些值来减少重复计算。这就是 FFT 算法的关键优化之一。

快速傅里叶变换在基于汉宁窗的 FIR 高通滤波器中的作用是将时域上的信号

转换到频域上进行滤波。首先，将时域上的输入信号通过 FFT 变换得到频域上的频谱信息。然后，在频域上进行滤波操作，通过选择一定范围内的频率分量进行增益调整或衰减，得到滤波后的频域信号。最后，通过逆 FFT 变换将频域上的滤波结果转换回时域上，得到最终的滤波信号。

通过快速傅里叶变换，我们可以高效地计算出信号的频域信息，并进行频域上的滤波操作，从而实现对输入信号的滤波处理。这在数字信号处理中有着广泛的应用。

## 3.2 FIR 数字滤波器

FIR 数字滤波器是一种常见的数字信号处理工具，用于对离散时间信号进行滤波处理。它的基本结构可以分为直接型和间接型两种。

### 一、直接型 FIR 数字滤波器结构

直接型 FIR 数字滤波器是一种简单直观的结构，其基本形式为串联的延时单元和加法器。下面将详细介绍直接型 FIR 数字滤波器的基本结构。

#### 1. 延时单元

延时单元是直接型 FIR 数字滤波器的核心组成部分，用于实现信号的延时操作。它将输入信号依次延时一个采样周期，延时单元的个数取决于滤波器的阶数。每个延时单元的输出为其输入信号的一个采样周期前的值。

#### 2. 加法器

加法器是直接型 FIR 数字滤波器的另一个重要组成部分，用于将延时单元的输出进行加权求和。加法器的输入为延时单元的输出，加法器根据预先设定的权值对其进行加权，并将加权求和的结果作为滤波器的输出。

#### 3. 系数寄存器

系数寄存器用于存储滤波器的权值系数，每个延时单元对应一个权值系数。这些系数可以通过设计滤波器时确定，也可以通过调整来改变滤波器的频率响应。

### 二、间接型 FIR 数字滤波器结构

间接型 FIR 数字滤波器是一种更加灵活的结构，它可以通过级联和并联来实现各种滤波器的结构。下面将介绍两种常见的间接型 FIR 数字滤波器结构。

#### 1. 级联结构



级联结构是指将多个 FIR 滤波器串联起来，形成一个更复杂的滤波器。每个 FIR 滤波器可以有不同的阶数和截止频率，通过级联它们可以实现更高阶、更陡峭的滤波器。

## 2. 并联结构

并联结构是指将多个 FIR 滤波器并联起来，形成一个更复杂的滤波器。每个 FIR 滤波器可以有不同的阶数和截止频率，通过并联它们可以实现不同频率范围的滤波效果。

## 三、FIR 数字滤波器的应用

FIR 数字滤波器在数字信号处理中有广泛的应用，例如音频处理、图像处理、通信系统等。它能够实现对信号的去噪、信号增强、频率选择等功能，具有较好的滤波性能和实时性。

在音频处理中，FIR 数字滤波器可以用于去除噪声、改善音质等。在图像处理中，FIR 数字滤波器可以用于图像去噪、边缘增强等。在通信系统中，FIR 数字滤波器可以用于信号解调、抗干扰等。

FIR 数字滤波器是一种常见的数字信号处理工具，具有直接型和间接型两种基本结构。直接型结构简单直观，由延时单元和加法器组成；间接型结构更灵活，可以通过级联和并联来实现各种滤波效果。FIR 数字滤波器在音频处理、图像处理、通信系统等领域有广泛的应用，能够实现滤波、去噪、信号增强等功能，具有较好的滤波性能和实时性。通过合理设计和调整滤波器的参数，可以满足不同应用场景的需求。

## 3.3 FIR 数字滤波器的基本原理

与 IIR 数字滤波器的设计不同，FIR 滤波器的设计与模拟滤波器的设计没有任何联系。因此，FIR 滤波器的设计基于对给定幅度响应的直接逼近，通常还需要相位响应是线性的。回想一个长度为  $N+1$  的因果 FIR 传输函数  $H(z)$  是  $z^{-1}$  的  $N$  次多项式

$$H(z) = \sum_{n=0}^N h[n]z^{-n} \quad (3.1)$$

其对应的频率响应函数为

$$H(e^{j\omega}) = h[n]e^{-j\omega n} \quad (3.2)$$

任何长度为  $N+1$  的有限长序列  $x[n]$  的特性可由其离散时间傅里叶变换  $X(e^{j\omega})$  的  $N+1$  个样本完全描述。因此, 要设计一个长度为  $N+1$  的 FIR 滤波器, 可以利用冲激响应序列  $|h[n]|$  或其频率响应  $H(e^{j\omega})$  的  $N+1$  个样本来进行。同时, 为了保证线性相位设计, 必须满足条件

$$h[n] = \pm h[N - n] \quad (3.3)$$

### 3.4 窗函数法设计 FIR 数字滤波器的基本思想

窗函数设计法的基本思想为, 首先选择一个适当的理想的滤波器  $H_d(e^{j\omega})$ , 然后用窗函数截取它的单位脉冲响应  $h_d(n)$ , 得到线性相位和因果的 FIR 滤波器。这种方法的重点是选择一个合适的窗函数和理想滤波器, 使设计的滤波器的单位脉冲响应逼近理想滤波器的单位脉冲响应<sup>[1]</sup>。

需要注意的是, 数字滤波器的传输函数  $H(e^{j\omega})$  都是以  $2\pi$  为周期的, 滤波器的低通频带处于  $2\pi$  的整数倍处, 而高频频带处于  $\pi$  的奇数倍附近。其次, 因录制的音频信号是模拟信号, 所以若使用数字滤波器对叠加了噪声的信号进行滤波, 则必须在设计数字滤波器之前首先要进行模数转换, 将模拟信号转换成数字信号。

### 3.5 窗函数法设计 FIR 数字滤波器的设计步骤

(1) 给定理想滤波器的频率响应  $H_d(e^{j\omega})$ , 在通带上具有单位增益和线性相位, 在阻带上具有零响应。一个带宽为  $\omega_c$  ( $\omega_c < \pi$ ) 的低通滤波器由下式给定

$$H_d(e^{j\omega}) = \begin{cases} 1 \cdot e^{-j\omega\alpha} & |\omega| \leq \omega_c \\ 0 & \omega_c < |\omega| \leq \pi \end{cases} \quad (3.4)$$

其中  $\alpha$  为采样延迟, 其作用是为了得到因果的系统。

(2) 确定这个滤波器的单位脉冲响应

$$h_d(n) = \frac{\sin[\omega_c(n - \alpha)]}{\pi(n - \alpha)} \quad (3.5)$$

为了得到一个  $h(n)$  长度为  $N$  的因果的线性相位 FIR 滤波器, 令  $\alpha = \frac{N-1}{2}$ , 得到

$$h_d(n) = \frac{\sin\left[w_c\left(n - \frac{N-1}{2}\right)\right]}{\pi\left(n - \frac{N-1}{2}\right)} \quad (3.6)$$

(3) 用窗函数截取 $h_d(n)$ 得到所设计的 FIR 数字滤波器  $h(n)$

$$h_{(n)} = h_d(n)w(n) \quad (3.7)$$

据过渡带宽及阻带衰减要求如表 3-1，选择窗函数的类型并估计窗口长度  $N$ （或阶数  $M=N-1$ ），窗函数类型可根据最小阻带衰减  $A_s$  独立选择，因为窗口长度  $N$  对最小阻带衰减  $A_s$  没有影响，在确定窗函数类型以后，可根据过渡带宽小于给定指标确定所拟用的窗函数的窗口长度  $N$ ，设待求滤波器的过渡带宽为  $\Delta w$ ，它与窗口长度  $N$  近似成反比，窗函数类型确定后，其计算公式即可确定，但这些公式是近似的，得出的窗口长度还要在计算中逐步修正，原则是在保证阻带衰减满足要求的情况下，尽量选择较小的  $N$ ，在  $N$  和窗函数类型确定后，即可调用 MATLAB 中的窗函数求出窗函数  $w(n)$ 。

窗函数	窗函数频率特性		加窗后滤波器指标	
	旁瓣峰值 (dB)	主瓣宽度	过渡带宽	最小阻带衰减 (dB)
矩形窗	-13	$\frac{4\pi}{N}$	$\frac{1.8\pi}{N}$	-21
汉宁窗	-31	$\frac{8\pi}{N}$	$\frac{6.2\pi}{N}$	-44
海明窗	-41	$\frac{8\pi}{N}$	$\frac{6.6\pi}{N}$	-53
布莱克曼窗	-57	$\frac{12\pi}{N}$	$\frac{11\pi}{N}$	-74

表 3-1 常用窗函数的特性

(4) 验算技术指标是否满足要求。

在使用窗函数法设计 FIR 滤波器时要满足窗谱主瓣尽可能地窄，以获得较陡的过渡带；尽量减少窗谱的最大旁瓣的相对幅度，也就是使能量尽量集中于主瓣，减小峰肩和纹波，进而增加阻带的衰减<sup>[2]</sup>。

## 4 设计方案

本课程设计首先完成对音频信号的采集，并对所采集的音频信号加入不同的干扰噪声，对加入噪声的信号进行频谱分析，针对受干扰音频信号的特点设计不同的滤波器，然后利用窗函数法设计低通、高通、带通等滤波器对采集到的音频信号进行滤波处理，分析音频信号各频率段的特性。对加噪信号进行滤波，回复原始信号。将原始音频信号、加噪音频信号和滤波器后的信号进行时域分析和频域分析，画出它们的时域波形和频域波形图，从视觉角度比较分析滤波的效果。本课程设计的系统实现框图如图 4-1 所示：

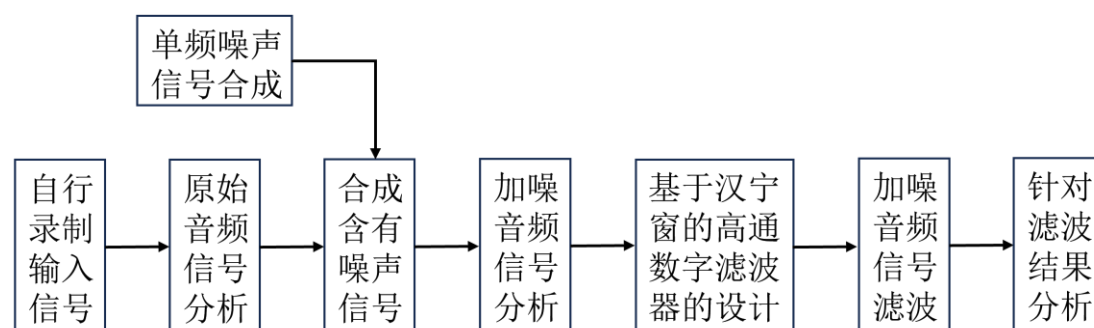


图 4-1 设计流程图

### 4.1 设计方法

设计一个基于汉宁窗的 FIR 高通滤波器涉及以下几个步骤：

#### 1. 确定设计参数

**截止频率：**确定所需的高通滤波截止频率，并将其转换为数字频率。通常，截止频率是以 Hz 为单位给出的，而数字频率是以信号采样率的一半表示。

**滤波器阶数：**根据设计要求选择适当的滤波器阶数，阶数越高，滤波器的衰减越陡峭。

#### 2. 计算滤波器系数

**确定滤波器的长度：**根据截止频率和滤波器阶数，使用公式进行计算， $N$  为滤波器长度， $\Delta f$  是数字频率对应的间隔。

**计算理想的高通滤波器频率响应：**使用离散频率的单位圆上的高通滤波器函

数，在截止频率与采样率之间的频率段上将其响应设置为 1，其他频率段上设置为 0。

计算归一化的高通滤波器频率响应：将理想频率响应除以滤波器长度  $N$  得到归一化的响应。

### 3. 应用汉宁窗函数：

汉宁窗函数是一种常用的窗函数用于设计 FIR 滤波器。它可以平衡主瓣宽度和抑制旁瓣的能力。将归一化的高通滤波器频率响应与汉宁窗函数相乘，得到最终的频率响应。

### 4. 计算滤波器系数：

将得到的频率响应进行反变换，得到滤波器的时域冲激响应，即滤波器系数。

设计一个基于汉宁窗的 FIR 高通滤波器时，需要注意其滤波器系数的长度和截止频率的选择，以满足设计要求。

## 4.2 音频信号的采集与输入

音频信号是一种非平稳的时变信号，它携带着各种信息。在音频处理中无一例外需要提取音频中包含的各种信息。音频信号分析方便有效的提取并表示音频信号所携带的信息。音频信号分析可以分为时域和变换域等处理方法，其中时域分析是最简单的方法，直接对音频信号的时域波形进行分析，提取的特征参数主要有音频的短时能量，短时平均过零率，短时自相关函数等<sup>[3]</sup>。

本课程设计利用一段公开的音频信号作为输入信号，命名为 `High.wav`。使用 MATLAB 中的 `audioread()` 函数对该音频进行读取，并将得到的采样值放入向量  $y$  中，用  $F_s$  表示采样频率(Hz)， $bits$  表示采样位数。

在 MATLAB 中，实现音频的读入，并绘出了音频信号的原始信号图如图 4-2，根据 MATLAB 的输出可以得知音频信号的采样频率为 44100Hz。这段密密麻麻的波形即本课程设计的输入信号

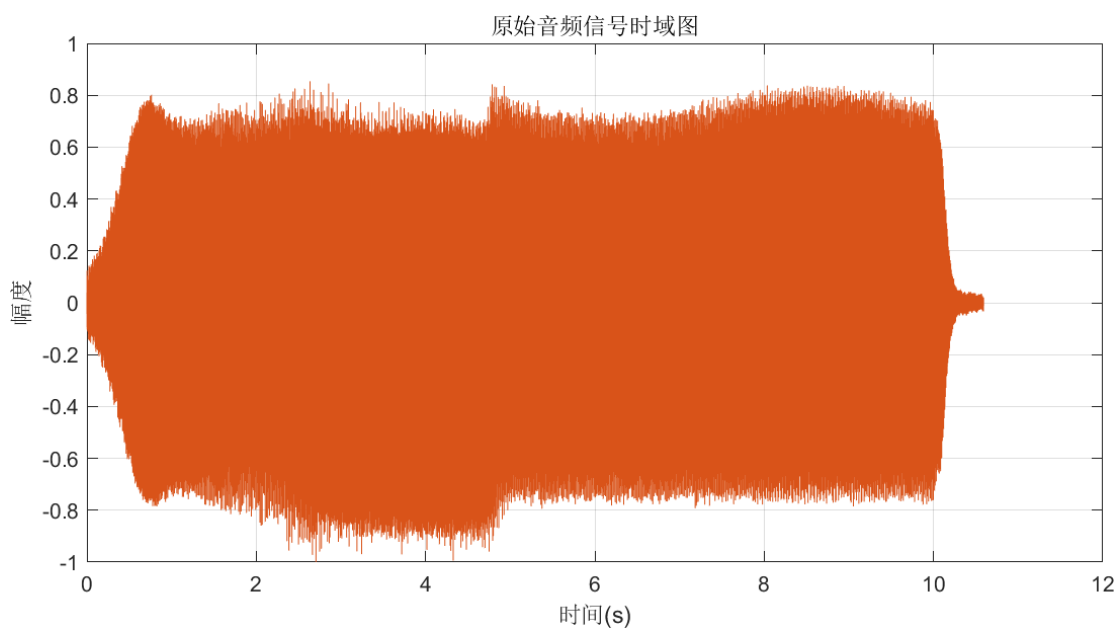


图 4-2 原始音频信号时域图

FFT 即为快速傅氏变换，是离散傅氏变换的快速算法，它根据离散傅氏变换的奇、偶、虚、实等特性，对离散傅立叶变换的算法进行改进获得的。对音频信号进行 FFT 变换就是得到它的频域的图形，便于从图中观察出信号的幅度等特性。如图 4-3 所示即为原始音频信号频谱图

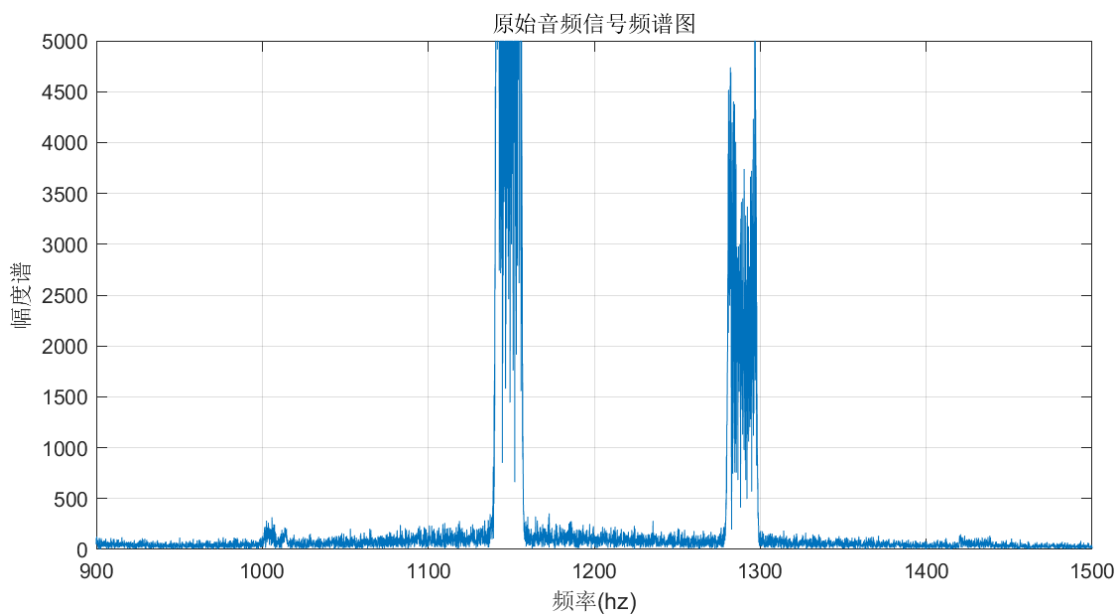


图 4-3 原始音频信号频域图

从频谱图可以看出，分布频率在 1000Hz 以下存在很小的幅度，可以利用此低幅度频率来计算截止频率，从而设计出高通滤波器，减小原音频的损失。

### 4.3 含噪信号的生成

在 MATLAB 软件平台下，给原始的音频信号叠加上噪声，噪声类型分为如下几种：白噪声、单频噪声（正弦干扰）、多频噪声（多正弦干扰）、其他干扰，可设置为低频、高频、带限噪声、冲激干扰。本课程设计选择四个单频正弦噪声，频率  $f$  设置为 930、950、970、1000Hz，与原音频相加即可得加噪声后的音频，即得到含噪信号。含噪音频信号的时域和频域图分别如图 4-4、图 4-5 所示。

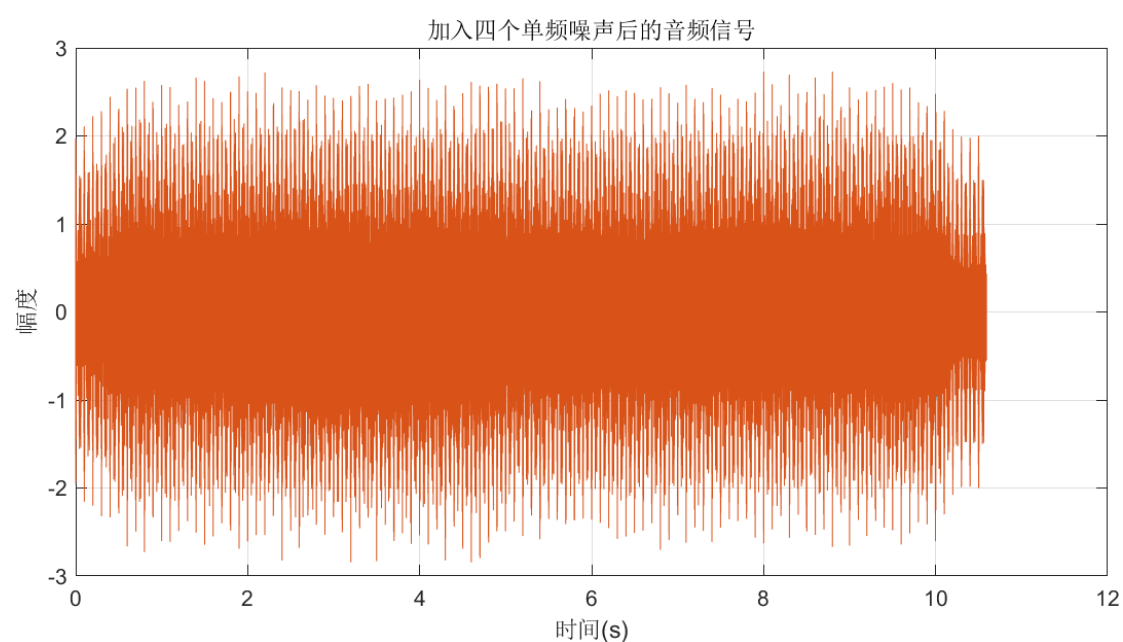


图 4-4 含噪音频信号时域图

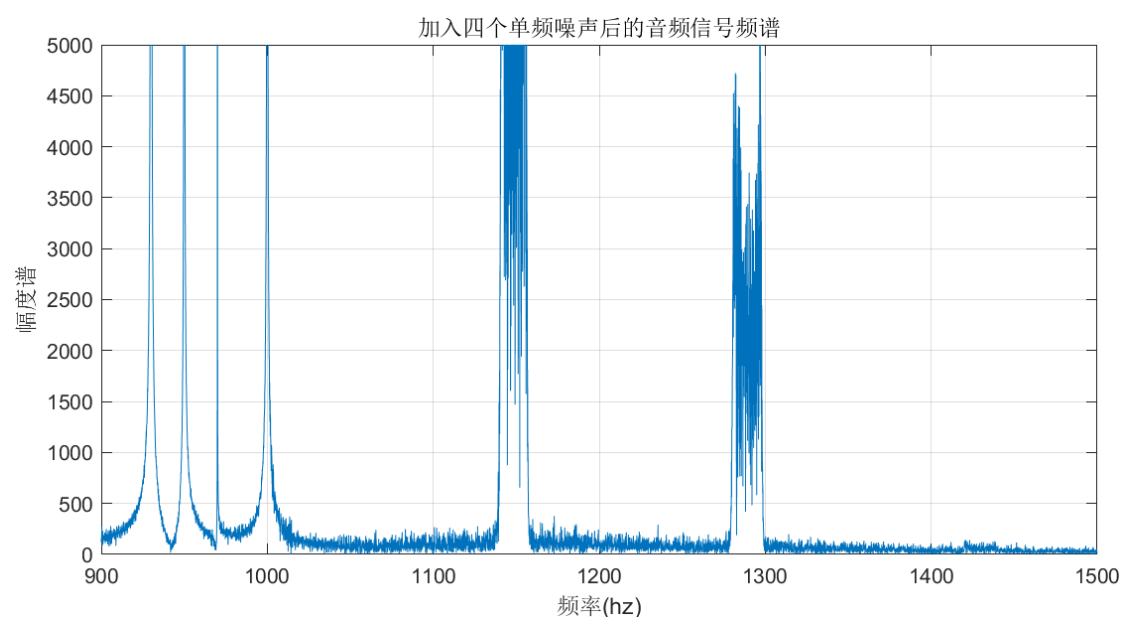


图 4-5 含噪音频信号频域图

## 4.4 FFT 点数 N 的选择

针对 FFT 点数  $N$  的选择，若  $N$  过小会存在栅栏效应，即频域频率分辨率不够，无法区分出某些频率成分。若  $N$  过大，则会增加额外的计算量，同时可能导致频谱不对。选取 FFT 点数  $N$  主要取决于要求的频率分辨率  $F$ （能够用 FFT 算法分析得到的最靠近的两个信号频率的频率间隔）。

FFT 点数和频率分辨率的关系： $N \geq f_s/F$ ，其中  $f_s$  为采样频率，由于 FFT 一般要求  $N$  是 2 的整数幂，所以要把  $N$  扩大到最接近的 2 的整数幂。 $N$  越大  $F$  越高，但  $N$  并不是越大越好<sup>[4]</sup>。

本课程设计使用软件 MATLAB 自带 FFT 函数对原始信号及含噪信号进行 FFT 变换。在 MATLAB 中，默认情况下，如果不设置变换长度（即不指定  $N$ ），FFT 函数会根据输入信号的长度自动选择一个最小的 2 的幂次作为变换长度。这意味着 FFT 将对输入信号进行等长的点数为  $2^{\text{nextpow2}(L)}$ ，其中  $L$  是输入信号的长度。例如，如果输入信号长度为 100，那么默认的 FFT 变换长度将为 128。如果希望使用实际的信号长度进行 FFT 变换，可以通过指定变换长度  $N$  为输入信号的长度来避免零填充，例如使用 `fft(x, N)`。值得一提的是，对于非零填充的 FFT，频率分辨率将会增加，而时间或空间分辨率将会下降。因此，在选择 FFT 变换长度时，需要权衡频率分辨率和计算效率之间的关系。经过代码验证，本课程设计采用的原始信号长度为 467097，通过 MATLAB 做 524288 点傅里叶变换，得到如下频谱图如图 4-6 所示

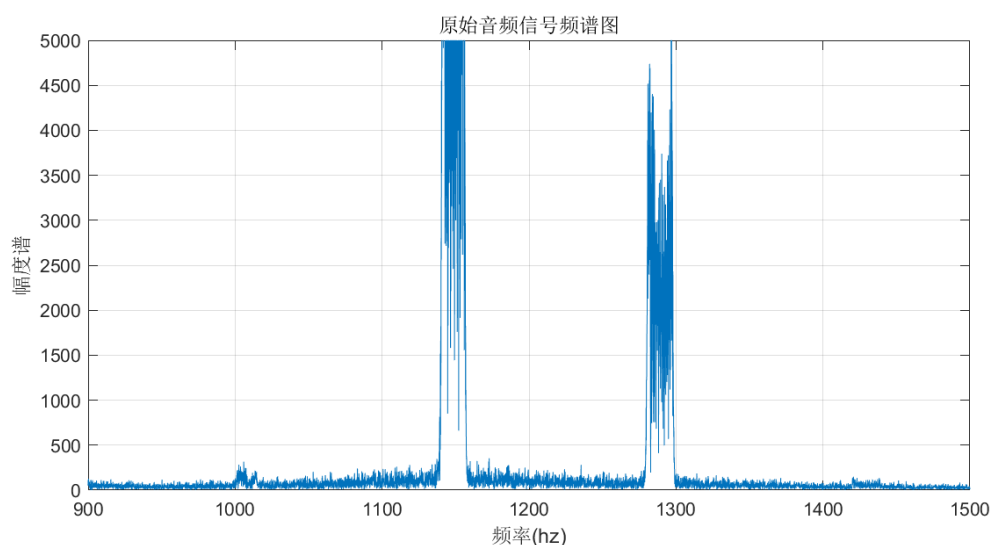


图 4-6 524288 点 FFT 变换



## 4.5 过渡带宽及滤波器阶数

在本课程设计中，滤波器阶数的计算是一项重要的步骤。滤波器阶数取决于滤波器的截止频率、过渡带宽同时它决定了滤波器的衰减特性等特性。在设计滤波器时，首先需要确定滤波器的截止频率和过渡带宽。截止频率是指滤波器开始起作用的频率点，过渡带宽是指从通带到阻带之间的频率范围。根据设计要求，可以确定截止频率  $f_p$  和阻带频率  $f_s$ 。使用汉宁窗来设计滤波器时，需要计算汉宁窗函数的参数。其中包括截止频率  $f_{cd}$ （通带和阻带的中心频率），频率间隔  $dw$ （频率分辨率）和窗函数宽度  $wsd$ 。计算滤波器阶数：根据汉宁窗的设计规则，可以通过以下公式计算滤波器的阶数  $M = \text{ceil}(6.2 * \pi / dw) + 1$ ，根据阶数  $M$ ，可以定义时间范围  $n$  为 0 到  $M-1$ 。然后产生  $M$  阶的汉宁窗。

根据本课程设计所选择的原始信号其频谱图如图 4-6 所示，同时为了满足课程设计所要求的滤波器衰减特性，本设计人为规定通带截至频率为 1110Hz，阻带截至频率为 1000Hz，这样我们得到过渡带宽为 110Hz，利用 MATLAB 自动计算得到所设计的 FIR 高通滤波器的阶数为 1244。

滤波器阶数的大小会直接影响滤波器的性能，包括截止频率的准确性、过渡带宽的宽窄以及滤波器的衰减特性。滤波器阶数对通带平稳度有一定影响。通带平稳度是指滤波器在通带内能否保持较为均匀的频率响应<sup>[5]</sup>。

一般来说，增加滤波器的阶数可以提高通带平稳度。较高的阶数意味着滤波器有更多的自由度来调整频率响应，从而可以更好地逼近理想的平坦响应。通过增加阶数，滤波器可以更精细地调整通带内的频率响应，减小通带波纹的幅度，进而提高通带平稳度。但较高的阶数可以提供更陡峭的滤波特性和更窄的过渡带宽，但也会增加计算复杂度和延迟。因此，在设计滤波器时，需要根据具体需求权衡阶数的选择。

## 5 结果及分析

### 5.1 滤波器的幅度特性分析

依据上面所给原理，在 MATLAB 实现之后，进行画图检验性能指标，即滤波器的幅频特性曲线如下图 5-1 所示分别展示了滤波器阶数在 685, 1244, 1520, 1710 不同阶数下的幅度特性及幅频特性曲线，通过对比我们选择滤波器阶数为 1244 的 FIR 高通滤波器，具体分析如下。

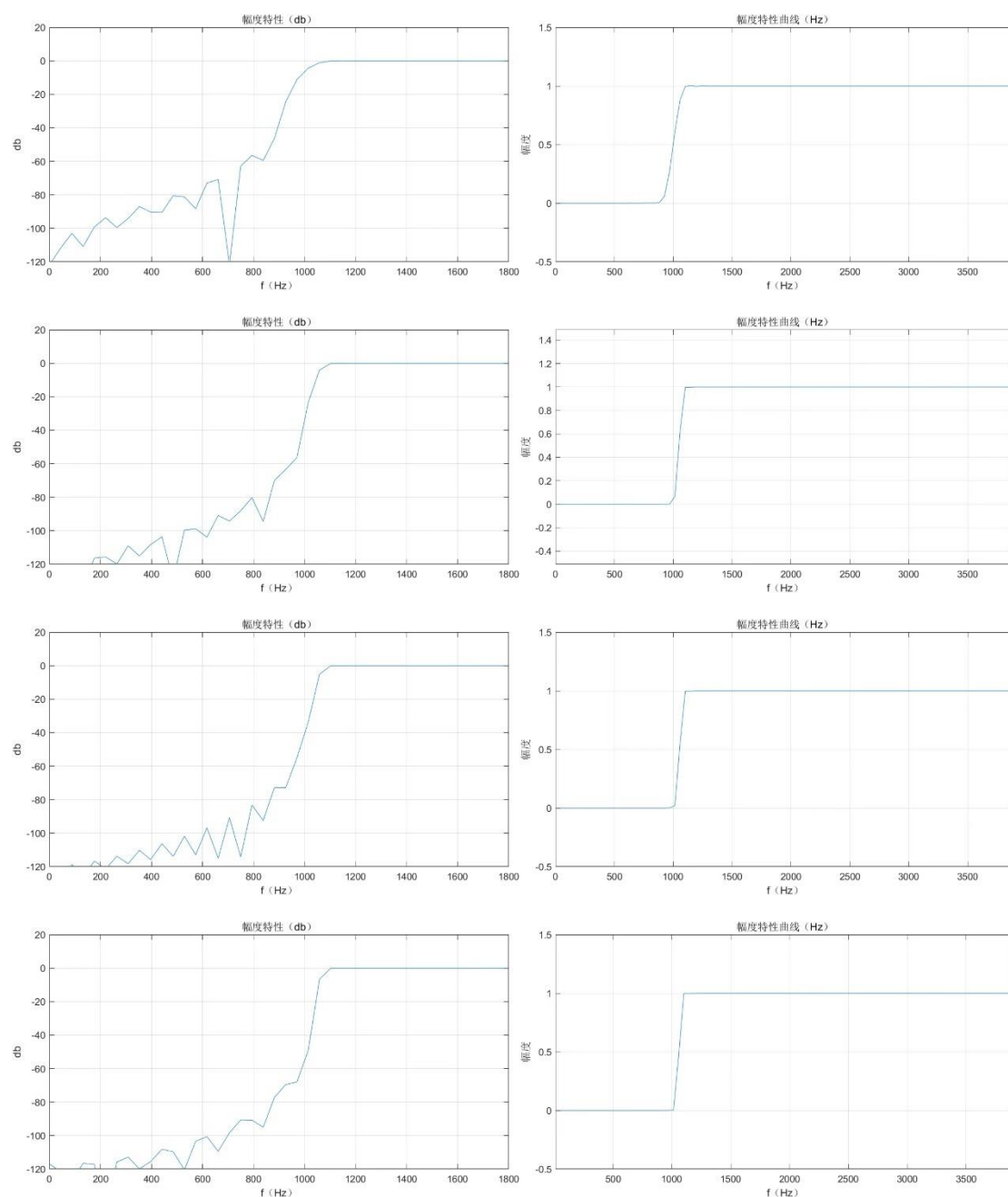


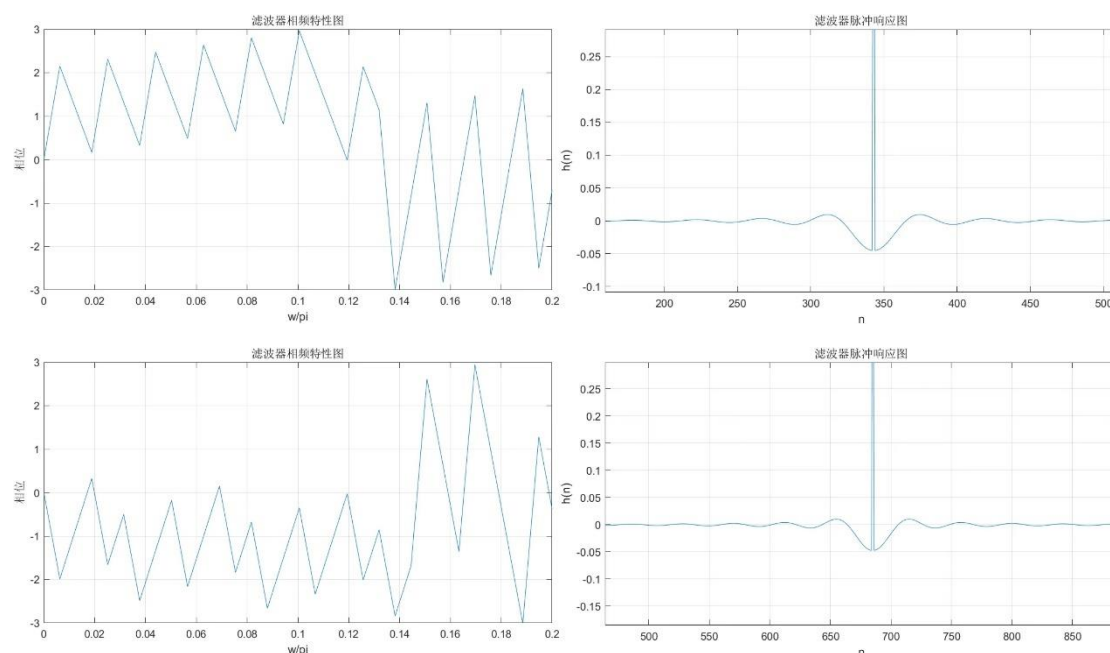
图 5-1 幅频特性曲线

滤波器阶数与滤波器的幅频特性密切相关。它可以用来描述滤波器对不同频率分量的响应情况<sup>[6]</sup>。从图中可以看出增加滤波器的阶数后滤波器的幅频特性在通带内变得更平坦。这意味着更多的滤波器系数可以用来调整频率响应，从而减小通带内的幅度波动。然后随着滤波器阶数的升高实现了更窄的过渡带宽，同时可以提高滤波器在阻带内的衰减能力，可以更为有效地抑制阻带内的频率分量。

滤波器的阶数决定了滤波器的复杂程度和性能。根据具体设计需求，当滤波器阶数为 1244 时最大衰减大于 43.9db 则验证成功，从幅频曲线（Hz）其通带截止频率为 1110Hz，阻带截止频率为 1000Hz，滤波器截止频率为 1030Hz，且由于滤波器的阶数高，所得曲线比较陡峭，说明验证成功，考虑到更高的阶数也可实现同样的效果，但消耗资源较多，故选用 1244 阶数下生成的滤波器。

## 5.2 滤波器的相位特性分析

在 MATLAB 实现之后，进行画图检验性能指标，即滤波器的相频特性曲线如下图 5-2 所示分别展示了滤波器阶数在 685，1244，1520，1710 不同阶数下的相频特性曲线及脉冲响应图，具体分析如下。



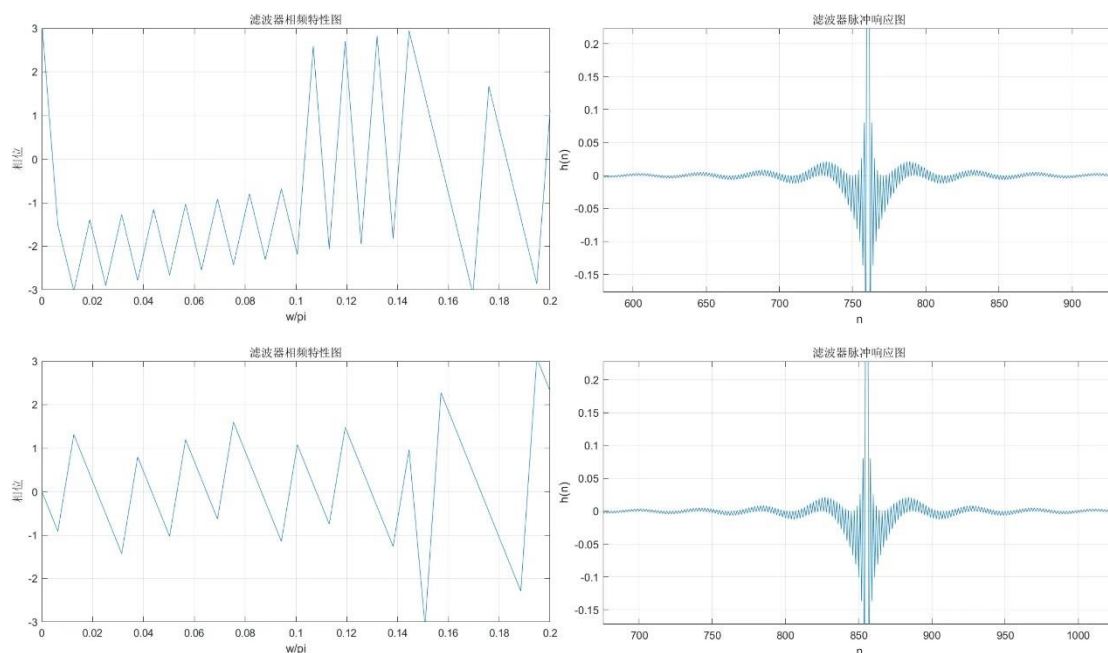


图 5-2 相频、冲击响应曲线图

滤波器的相频特性曲线反映了滤波器对不同频率分量的相位延迟响应。相位延迟是指信号通过滤波器后，相对于原始输入信号所引入的时间延迟。相频特性曲线可以用来评估滤波器对信号处理中的相位信息的影响。通过图 5-2 可知在某些频率范围内，随着滤波器阶数的增加，相频特性曲线变得更加平坦。这意味着滤波器对这些频率的相位延迟更为稳定，不会引入过多的相位失真。并且随着滤波器阶数的增加可以减小相频特性曲线中的相位失真。得出结论较高阶的滤波器通常具有更小的相位失真。

从相频曲线图 5-2 可以看出我们选择的滤波器，其相位呈现线性相位，则为 FIR 滤波器，对不同频率的相位特征不同，则验证成功。冲击响应曲线图显示了滤波器对于单位冲击信号的输出响应。单位冲击信号是一个短时持续幅值为 1 的信号，当该信号经过滤波器后，滤波器的冲击响应曲线图显示出滤波器对该冲击信号的处理效果。通过观察冲击响应曲线，我们可以得到随着滤波器阶数的增加滤波器通常会引入更多的延迟，使得滤波器的冲击响应曲线中的主要响应持续时间更长，较高阶的滤波器通常具有更大的衰减特性，即能更好地抑制不需要的频率分量。根据所选滤波器的脉冲响应图可以看出此冲激响应大概位于序列 420-440 之间，很好的解释了高通滤波器的前项序列过滤，后项序列保留的特征，说明验证成功。

## 5.3 滤波器滤波实现

将加噪声之后的音频在 MATLAB 中用 `filter` 函数进行滤波，所得结果进行可视化展示，与滤波结果和加噪声之后的结果进行对比。

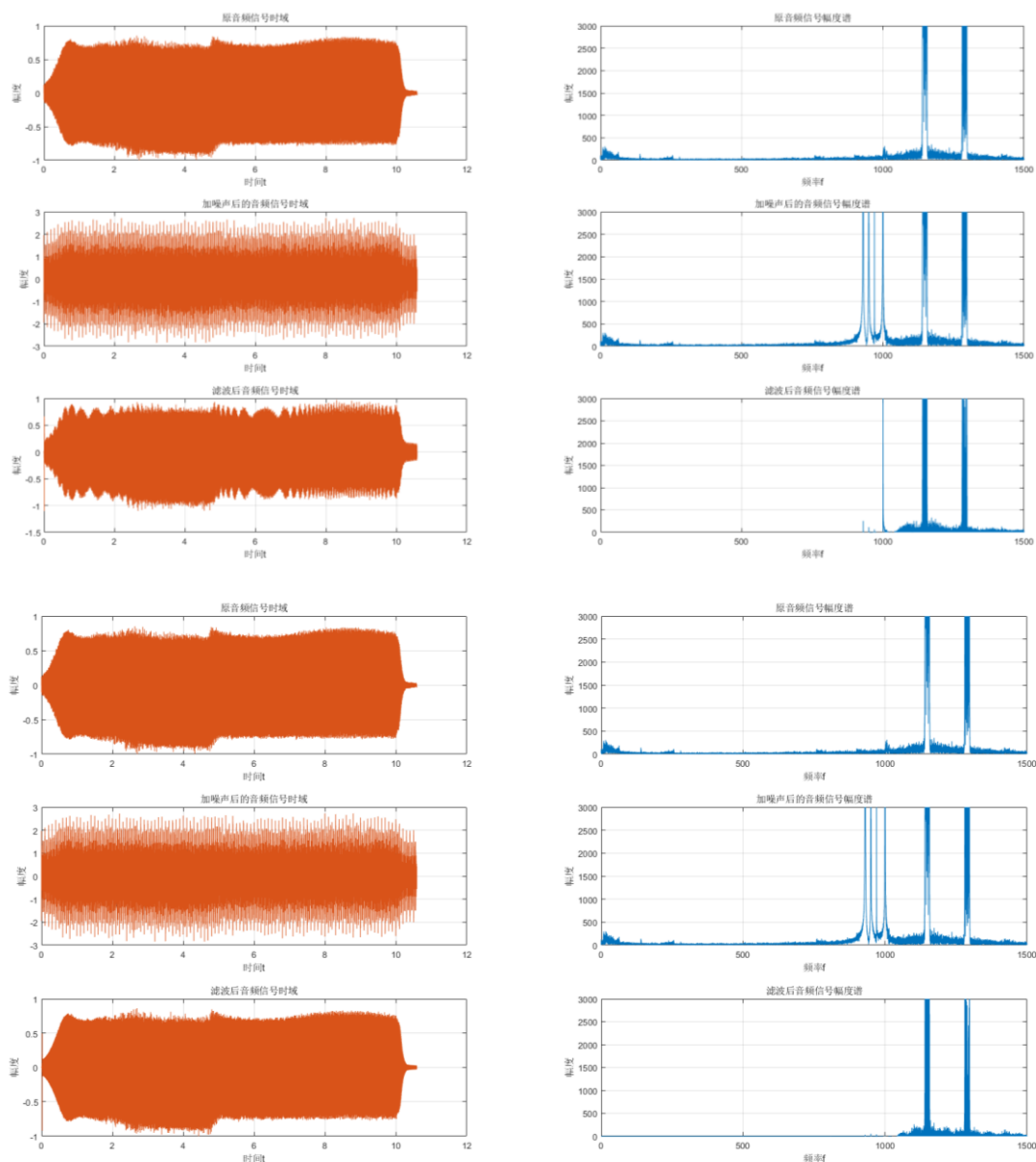


图 5-4 滤波结果对比图

图一、二分别为 685、1244 阶滤波器的滤波前后对比结果。对比出，该滤波器可以更好的实现滤波，原始音频信号和加噪信号音频在 1030Hz 之前都有小幅度，但经过滤波器的过滤之后，截止频率为 1030Hz 的音频全部过滤去，音频的时域图也恢复的和原始音频大致相同，进行播放对比，音频无失真，实验成功。

## 6 总结

本课程设计要求录制一段音频信号，要求长度不小于 6 秒，并对录制的信号进行采样。在 MATLAB 中 `[y,fs,bits]=wavread()`；用于读取音频，`sound()`；用于音频播放。

音频信号是一种非平稳的时变信号，它携带着各种信息。音频信号分析的目的就在与方便有效的提取并表示音频信号所携带的信息。音频信号分析可以分为时域和变换域等处理方法，其中时域分析是最简单的方法，直接对音频信号的时域波形进行分析，提取的特征参数。音频信号经过 FFT 变换之后，就可以得到信号的频域图形，另外，频域图形使信号的某些特性变得更明显，信号的傅立叶表示在信号的分析与处理中起着重要的作用<sup>[4]</sup>。因为对于线性系统来说，可以很方便地确定其对正弦或复指数和的响应，所以傅立叶分析方法能完善地解决许多信号分析和处理问题。

应用 MATLAB 根据给定的技术指标进行 FIR 数字滤波器设计时，根据设计要求，以高通滤波器的冲激响应函数进行设计滤波器，可以加深对 MATLAB 的使用和对数字信号的理解。使用汉宁窗设计高通滤波器，并对正弦噪声后的音频信号进行滤波。比较滤波前后的时域波形和频谱并进行分析。在频域波形中，我们可以明显的看到设计的滤波器对音频信号进行了滤波处理，将噪声进行了滤除。此次滤波基本达到了要求，完成了设计指标。

总之，加噪声的后的音频信号经过 FIR 滤波器的滤波处理，时域和频域图与原始信号都几乎一样，这说明噪声几乎全被滤掉了，同时也说明 FIR 滤波器设计还算理想，能满足所要求。

本课程设计的主要目的是在 MATLAB 环境下，使用汉宁窗函数设计法设计一个 FIR 高通滤波器，并对叠加了正弦噪声后的音频信号进行滤波去噪。此次滤波基本达到了要求，完成了设计指标。

本次课设中遇到了很多问题，基础知识的不牢固，MATLAB 程序编写函数的使用不熟悉都是问题，希望以后逐渐改进。

## 参考资料

- [1] 程佩青. 数字信号处理教程 (第五版) MATLAB 版[M]. 北京: 清华大学出版社, 2017.
- [2] 王艳文, 崔志娟, 张静. (2013). 基于 matlab 凯泽窗的 fir 数字滤波器设计. 黑龙江科技信息, 000(018), 152-152.
- [3] 李茂清. (2008). 基于 matlab 程序的 fir 滤波器设计实现. 电力学报, 23(2), 4.
- [4] 杨玲, 李东新. (2011). 基于 dsp 的 fir 数字滤波器设计与实现.
- [5] GUO Tian-xing, 郭天兴, WANG Jian-hui, 王建辉, XIONG Hu, & 熊虎等. (2014). 高通滤波器性能研究. 陕西省电网节能与电能质量技术学会 2014 年学术交流会论文集. 陕西省电网节能与电能质量技术学会.
- [6] 王帅, 陈亮, 徐童锋. (2009). Fir 数字滤波器设计中各种窗函数的比较. 科技创新导报(15), 2.

## 附录：程序源代码

```
% 基于汉宁窗的 FIR 高通滤波器

clear

[x, Fs] = audioread("High_Frequency.wav");

sound(x, Fs);

pause(7);

% 原始信号初始分析

N=length(x);          % 计算信号 x 的长度

t=0:1/Fs:(N-1)/Fs; % 计算时间范围，样本数除以采样频率

X=abs(fft(x));

X=X(1:N/2);

df=Fs/ N;              % 计算频谱的谱线间隔

f=0:df:Fs/2-df;       % 计算频谱频率范围


subplot(2, 2, 1);

plot(t, x);

title("原始音频信号时域图");

xlabel("时间(s)");

ylabel("幅度");

grid on;


subplot(2, 2, 2);

plot(f, X);

axis([900, 1500, 0, 5000]);

title('原始音频信号频谱图');

xlabel('频率(hz)');

ylabel('幅度谱');

grid on;
```



```

% 加噪

fn1=930;      % 单频噪声频率

fn2=950;

fn3=970;

fn4=1000;

noise=0.5*sin(fn1*2*pi*t)+0.5*sin(fn2*2*pi*t)+0.5*sin(fn3*2*pi*t)+0.5*sin(fn4*2
*pi*t);

% 将噪声向量重复两次以形成 467097x2 的矩阵

noise_matrix = repmat(noise', 1, 2);

y=x+noise_matrix; % 加入一个多频噪声

sound(y, Fs);

pause(7);

% 加噪信号分析

Y=abs(fft(y)); % 对加噪信号进行 fft 变换

Y=Y(1:N/2);      % 截取前半部分


subplot(2,2,3);

plot(t,y);

title('加入四个单频噪声后的音频信号');

xlabel('时间(s)');

ylabel('幅度');

grid on;


subplot(2,2,4);

plot(f,Y);

axis([900,1500,0,5000]);

title('加入四个单频噪声后的音频信号频谱');

```

```

xlabel(' 频率(hz)');
ylabel(' 幅度谱');
grid on;

% 计算汉宁窗所需要的参数
fp=1110;fs=950;%通带和阻带截止频率
Rp=1;As=43.9;%通带和阻带衰减
fcd=(fp+fs)/2;% 高通滤波器设计指标，截止频率
df=fp-fs;    % 计算频率间隔
wc=fcd/Fs*2*pi;% 截止频率(弧度)
dw=df/Fs*2*pi;
wsd=fs/Fs*2*pi;
M=ceil(6.2*pi/dw)+1;                                % 计算汉宁窗设计该滤波器时需要的阶数

n=0:M-1;                % 定义时间范围
w_ham=hann(M);          % 产生 M 阶的汉宁窗

% M = 理想滤波器的长度
alpha = (M-1)/2;
n = 0:1:(M-1);
m = n - alpha + eps;
hd_bs=(sin(pi*m) - sin(wc*m))./(pi*m);

%%%%滤波器的形成
h_bs=w_ham'.*hd_bs;                                % 用窗口法计算实际滤波器脉冲响应

[H,w] = freqz(h_bs,1,1000,'whole');
H = (H(1:1:501))';

```

```

w = (w(1:1:501))';
mag = abs(H);
db = 20*log10((mag+eps)/max(mag));
pha = angle(H);
grd = grpdelay(h_bs, 1, w);

% % % % 滤波器的性能指标
figure(2)
subplot(2,2,1);plot(w*Fs/(2*pi), db);
axis([0, 1800, -120, 20]);
title('幅度特性 (db) ');
xlabel('f (Hz) ');ylabel('db');
grid on;

subplot(2,2,2);plot(w*Fs/(2*pi), mag);
axis([0, 3900, -0.5, 1.5]);
title('幅度特性曲线 (Hz) ');
xlabel('f (Hz) ');ylabel('幅度');
grid on;

subplot(2,2,3);plot(w, pha);
axis([0, 0.2, -3, 3])
title('滤波器相频特性图');
xlabel('w/pi');ylabel('相位');
grid on;

subplot(2,2,4);plot(h_bs);
axis([250, 600, -0.2, 0.2]);
title('滤波器脉冲响应图');

```

```

xlabel('n');ylabel('h(n)');

grid on;

%%%%开始滤波
y_fil=filter(h_bs,1,y);% 用设计好的滤波器对 y 进行滤波
Y_fil=fft(y_fil);Y_fil=Y_fil(1:N/2); % 计算频谱取前一半
% % % 检验滤波
figure(3)
subplot(3,2,1);plot(t,x);
title('原音频信号时域');
xlabel('时间 t');ylabel('幅度');
grid on;
subplot(3,2,2);plot(f,X);
axis([0,1500,0,3000]);
title('原音频信号幅度谱');
xlabel('频率 f');ylabel('幅度');
grid on;
subplot(3,2,3);plot(t,y);
% axis([0,2.1,-0.05,0.1]);
title('加噪声后的音频信号时域');
xlabel('时间 t');ylabel('幅度');
grid on;
subplot(3,2,4);plot(f,Y);
axis([0,1500,0,3000]);
title('加噪声后的音频信号幅度谱');
xlabel('频率 f');ylabel('幅度');
grid on;
subplot(3,2,5);plot(t,y_fil);

```

```

% axis([0,2.1,-0.05,0.1]);
title('滤波后音频信号时域');
xlabel('时间 t');ylabel('幅度');
grid on;
sound(y_fil,Fs)
subplot(3,2,6);plot(f,Y_fil);
axis([0,1500,0,3000]);
title('滤波后音频信号幅度谱');
xlabel('频率 f');ylabel('幅度');
grid on;
figure(4)
zplane(h_bs,1);
xlabel('rez'); ylabel('jImz');
title('传输零极点');

```