

# 实验一：基于 DFT 的信号识别系统

班级：22 通信 2 班

姓名：姜恩泽

学号：2228410056

## 一、实验目的

- (1)通过实验巩固离散傅里叶变换 DFT 的认识和理解。
- (2)熟练掌握应用 DFT 进行频谱分析的方法。
- (3)了解 DFT 离散频谱分析的应用价值。

## 二、实验背景

本实验主要目标是通过频谱分析对不同信号样本进行分析与识别，应用离散傅里叶变换（DFT）相关知识，识别信号的频率成分，并分析频谱的时变特性。实验涉及的信号通过不同的技术（如跳频技术）进行调制和传输，实验目的是通过 MATLAB 编程对这些信号的频率特征进行提取和识别。

无线通信系统中的频谱资源划分是通过不同频率上的信道进行的，而跳频技术作为一种常见的频谱管理方法，允许信号在一系列频率上快速切换。实验中，信号样本来自于使用跳频技术的发射机，在接收端通过高带宽接收机和频谱分析仪获取信号的瞬时频谱和时频谱图，反映了信号随时间变化的频谱特性。

总体来看，实验的核心是通过时域、频域和时频域的信号分析，理解频谱分析的应用及其在无线通信中的重要性，尤其是在频谱资源划分与跳频技术中的实际应用。

## 三、实验方案

### 理论基础：

离散傅里叶变换

信号的离散傅里叶变换定义如下

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}, \quad k = 0 \sim N-1$$

离散傅里叶变换（DFT）是一种将离散时间信号从时域转换到频域的数学工具。它通过对信号进行加权求和，计算出信号在不同频率上的频率成分。DFT 的输出是一个复数序列，表示信号在不同频率分量上的幅度和相位。DFT 广泛应用于信号处理、图像处理和频谱分析等领域，用于提取信号的频率信息。其计算复杂度较高，常通过快速傅里叶变换（FFT）算法提高效率。

### MATLAB 工具：

- 1.load: 用于加载 .mat 格式的数据文件。data = load('signal3.mat') 将 signal3.mat 文件中的数据加载到变量 data 中。
- 2.fft: 用于计算信号的快速傅里叶变换（FFT）。fft\_signal = fft(signal, nfft) 对信号 signal 进行 FFT 变换，nfft 是 FFT 的点数。
- 3.nextpow2: 用于返回最小的整数 n，使得 2^n 大于或等于输入值。nfft = 2^nextpow2(N) 将信号长度扩展为 2 的幂次，有助于提高 FFT 计算效率。

4.abs: 计算复数的模。`amplitude_spectrum = abs(fft_signal(1:nfft/2))` 提取 FFT 的幅度谱，通常取前半部分（正频率部分）。

5.subplot: 在同一图形窗口中创建多个子图。`subplot(3, 1, 1)` 表示将图形窗口分成 3 行 1 列的子图，并在第一个位置绘图。

6.plot: 绘制二维线性图。用于绘制时域波形、幅度谱和时频谱图。

7.spectrogram: 用于计算信号的时频谱。`spectrogram(signal, window_length, overlap, nfft, fs, 'yaxis')` 生成时频谱图，`window_length`、`overlap` 和 `nfft` 控制频谱的时间分辨率、重叠部分和频率分辨率。

8.findpeaks: 用于从信号中检测峰值。`[pks, locs] = findpeaks(amplitude_spectrum, 'MinPeakProminence', 0.1)` 查找幅度谱中的峰值，并返回它们的幅度和位置。

这些工具和函数协同工作，帮助实现信号的时域、频域和时频域分析，并可视化结果。

## 四、实验内容

### 实验 1:

信号一（采样率=10 kHz）

设窗口长度为 1000，编写 MATLAB 程序，画出信号时域波形、信号幅度谱，并自动识别信号中 4 个最为主要的频率成分，返回其频率值（Hz）。

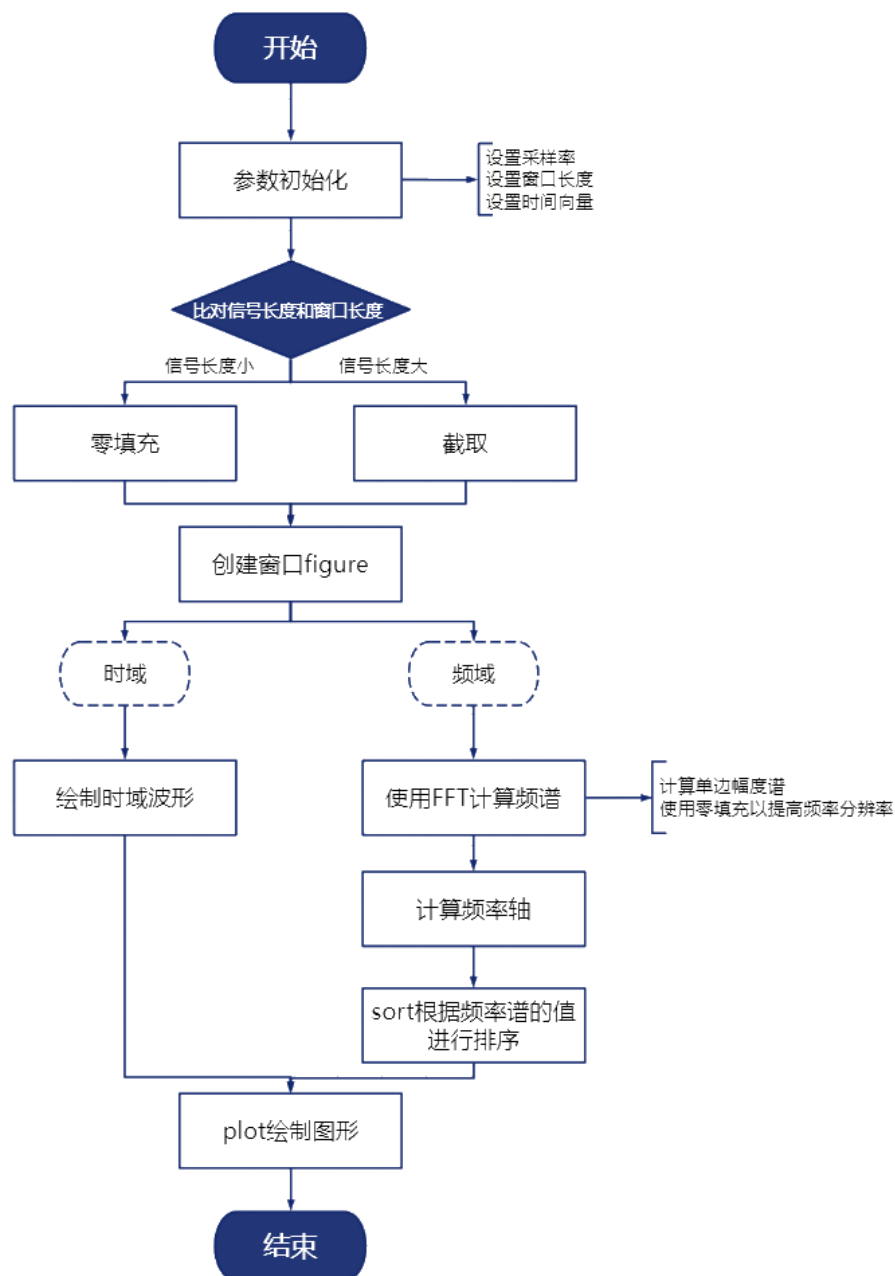


图 1 实验 1 流程图

编写代码，首先从 `signal.mat` 文件中加载信号数据，并设置采样率为 10 kHz 和窗口长度为 1000。接着，它对信号进行预处理，如果信号长度小于窗口长度，则用零填充至窗口长度；如果信号长度大于或等于窗口长度，则截取前 1000 个数据点。然后，代码绘制信号的时域波形，并计算信号的幅度谱。为提高频率分辨率，信号通过快速傅里叶变换（FFT）计算得到频谱，并使用零填充来扩展 FFT 点数。接着，代码绘制幅度谱，展示信号的频率与幅值关系。最后，通过排序幅度谱的值，自动识别信号中幅度最大的四个频率成分，并输出这些频率值。整个过程包括信号的时域分析、频域分析以及频率成分的自动识别，帮助分析信号的主要频率特征。

## 实验 2:

- 1) 已知信号二中包含 4 个主要频率成分，用 1 的程序对信号二进行分析，是否能 准确识别信号二中所有频率分量？（要求检测峰值间有谷点）
- 2) 选取合适的窗口长度，画出信号幅度谱，并自动识别信号中 4 个最为主要的频率成分，返回其频率值（Hz）。分析窗口长度与频率分辨率的关系。

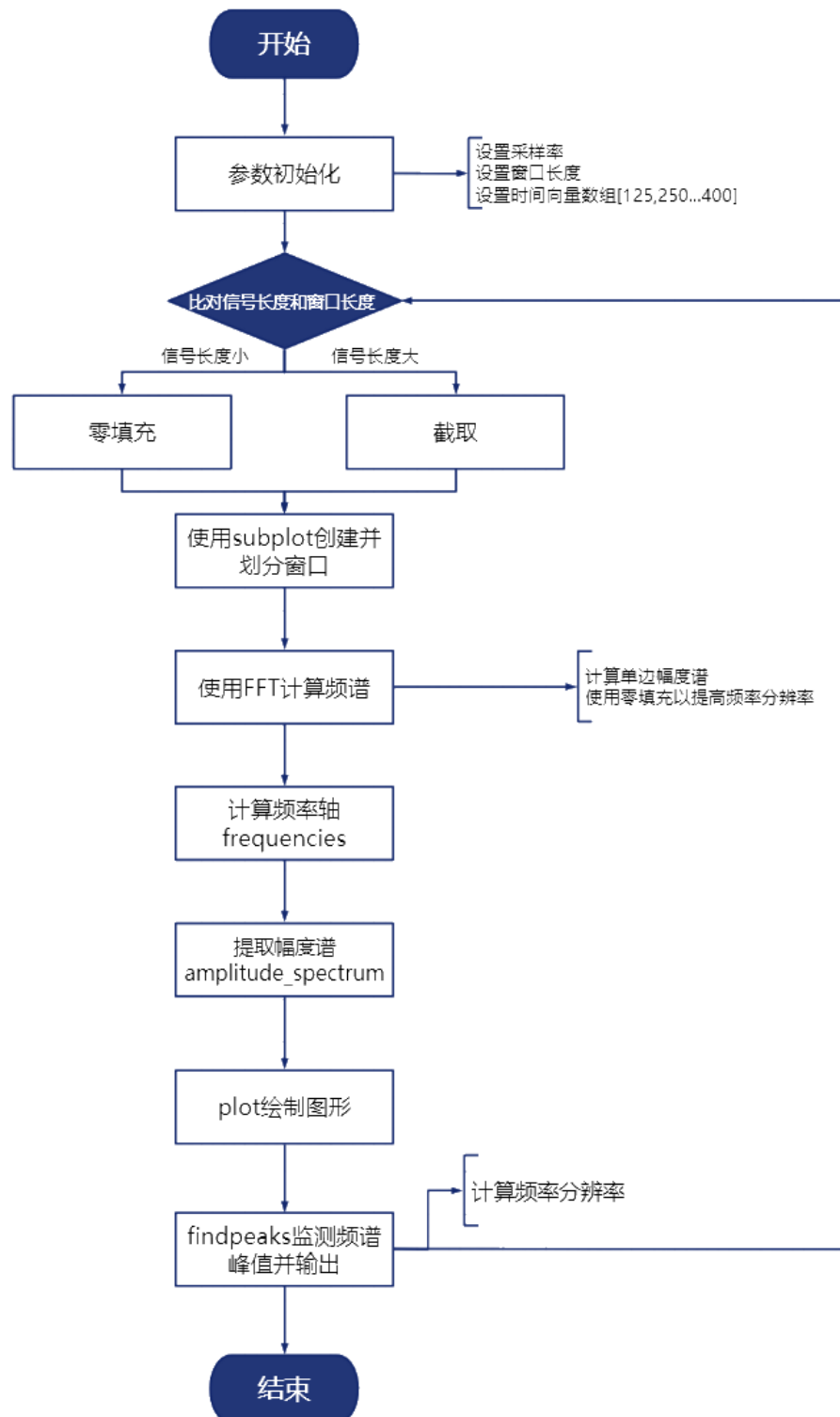


图 2 实验 2 流程图

该代码旨在分析不同窗口长度对信号频谱分析的影响，并识别信号的主要频率成分。首先，从 `signal2.mat` 文件中加载信号数据，设置采样率为 10 kHz，并定义六种不同的窗口长度（125、250、500、1000、2000、4000）。随后，程序对每种窗口长度分别进行循环分析：截取或填充信号以匹配当前窗口长度，利用快速傅里叶变换（FFT）计算幅度谱，绘制频率与幅值的关系图（幅度谱）。同时，使用峰值检测方法自动识别幅度谱中最主要的四个频率成分并输出。此外，程序还计算每种窗口长度对应的频率分辨率，并展示窗口长度与频率分辨率的关系。

### 实验 3:

信号三（采样率=10 kHz）

1) 现有一较长信号（ $N=4000$ ），信号随时间发生频率跳变，画出信号时域波形、信号幅度谱，与信号一进行比较分析

2) 绘制时频谱图来体现该信号频谱随时间的变化情况。（设置不同参数，画出宽带、窄带谱图，进行对比分析）

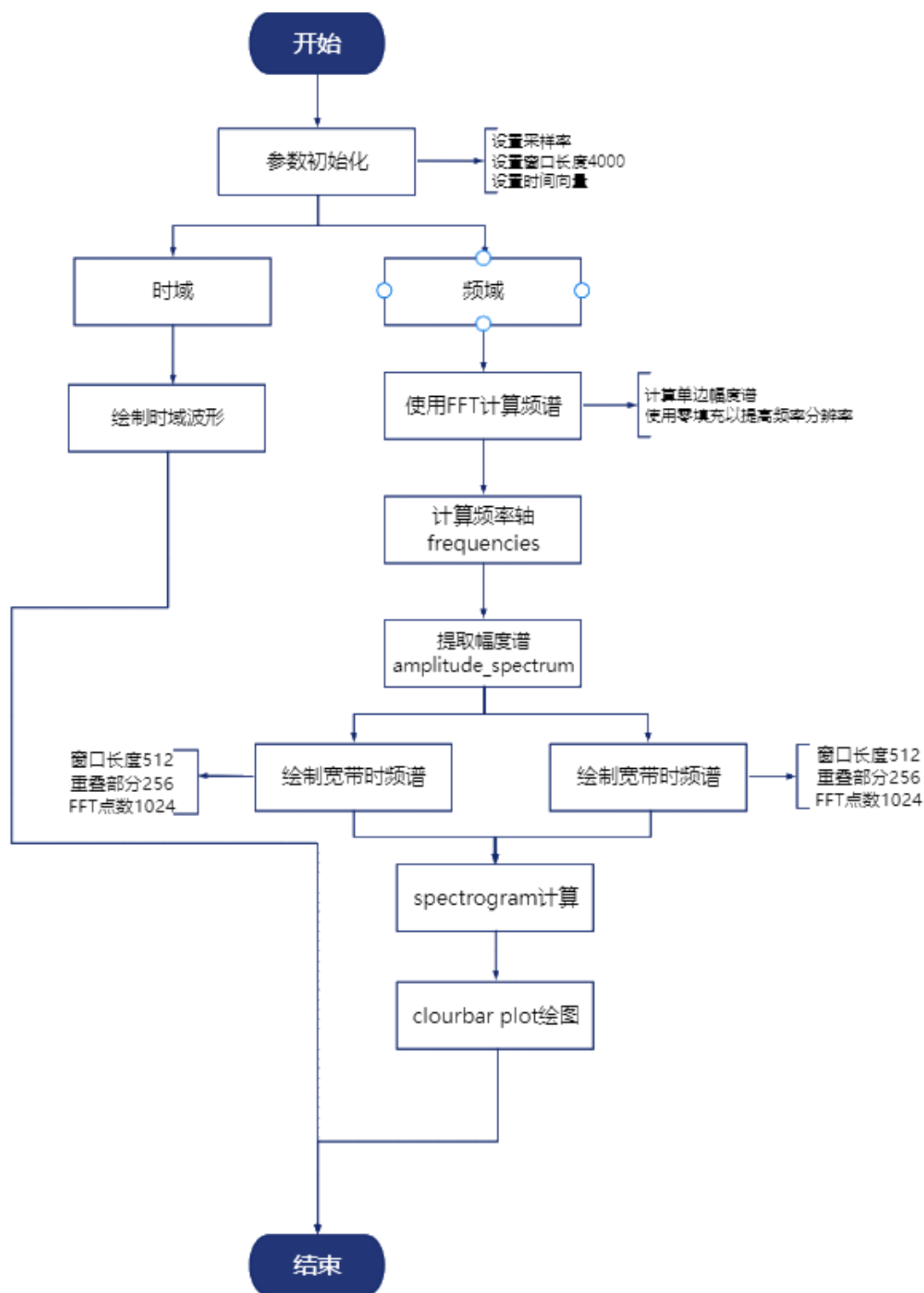


图 3 实验 3 流程图

该代码的主要功能是对信号数据“signal3.mat”进行时域、频域和时频域分析，深入了解信号的特性。首先，代码加载信号数据，并设置采样率和信号长度，生成相应的时间向量。接着，代码绘制信号的时域波形图，通过快速傅里叶变换（FFT）计算信号的幅度谱，并绘制幅度谱图，展示信号在频域中的能量分布。

随后，代码进行时频谱分析，采用两种不同的参数设置绘制信号的时频谱：宽带时频谱和窄带时频谱。宽带时频谱使用较小的窗口长度和较少的重叠，适用

于观察信号的宽频带特性；窄带时频谱使用较长的窗口和更多的重叠，适用于细致地分析信号的频谱变化。这些时频图帮助分析信号随时间变化的频率成分。

最后，代码输出与信号一的比较分析，主要检查信号频率成分是否匹配，并探讨信号三中时频变化的特性。

**实验 4:**

请尝试获取一种一维时域信号样本（如音频、通信、震动、温度等），尝试利用 MATLAB 编程获得其频谱并分析其特点。

实验一对一段信号进行频域分析，得到了其幅频和相频特性曲线。进一步引发了思考：日常生活中（尤其是音乐中）的音高和频率之间有什么联系？

查阅资料可知，钢琴及音乐领域的音高是根据国际标准音调确定的。国际标准音调是一种音乐标准，由国际标准化组织（ISO）确定，通常用于确定音乐中各个音符的准确频率，广泛用于音乐制作、音乐教育以及音乐技术领域。

音高与频率的主要对应关系如下：

（1）中央 C 的频率：ISO 标准将中央 C 的频率确定为 261.63 赫兹（Hz）。这个频率是在中央 C 附近的音符的基准，其他音符的频率可以根据这个基准计算出来。

（2）基于半音间隔：ISO 标准音调是基于半音间隔的，其中每个半音间隔对应着一个固定的频率比率。例如，从一个音符升高一个半音会将频率增加约 6%，而降低一个半音则会将频率减小约 6%。

因此我使用 matlab 对基本音阶和普通歌曲进行分析，尝试得到音高与频率的关系。

**五、实验结果与分析**

**实验 1:**

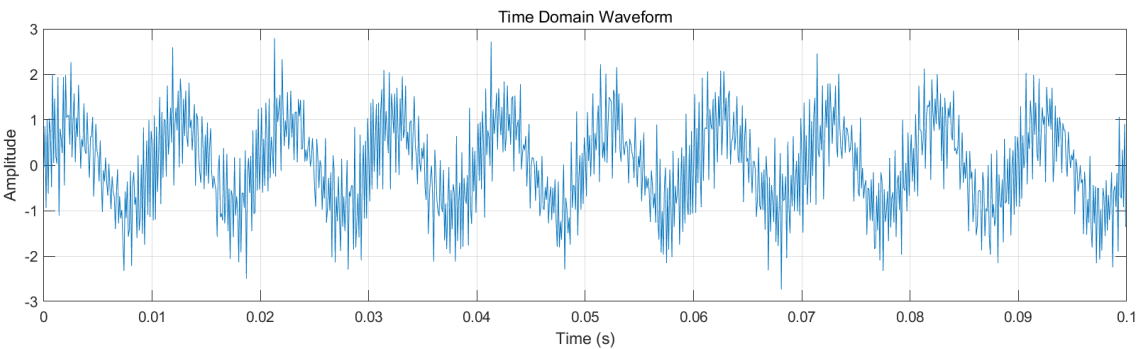


图 4 信号 1 时域波形

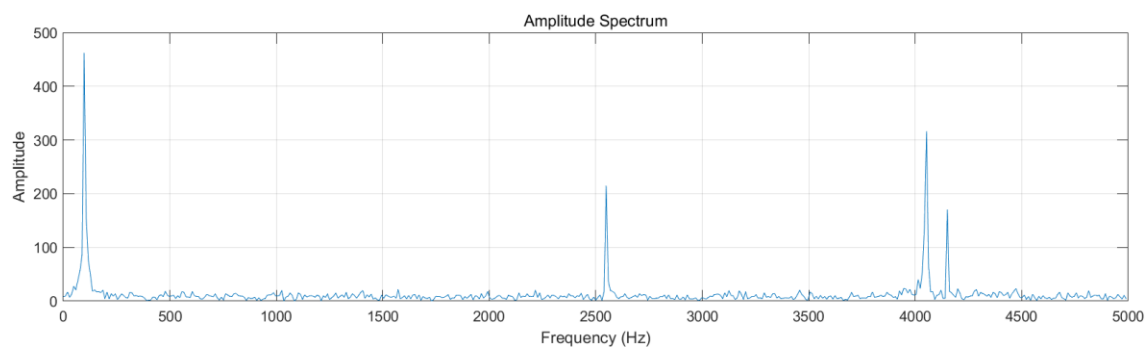


图 5 信号 1 频域波形



图 6 信号 1 输出结果

分析时域波形图，能观察到波形有明显的周期性特征。程序经过自动识别可得四个主要的频率成分分别为 97.7Hz，2548.8Hz，4052.7Hz，4150.4Hz。

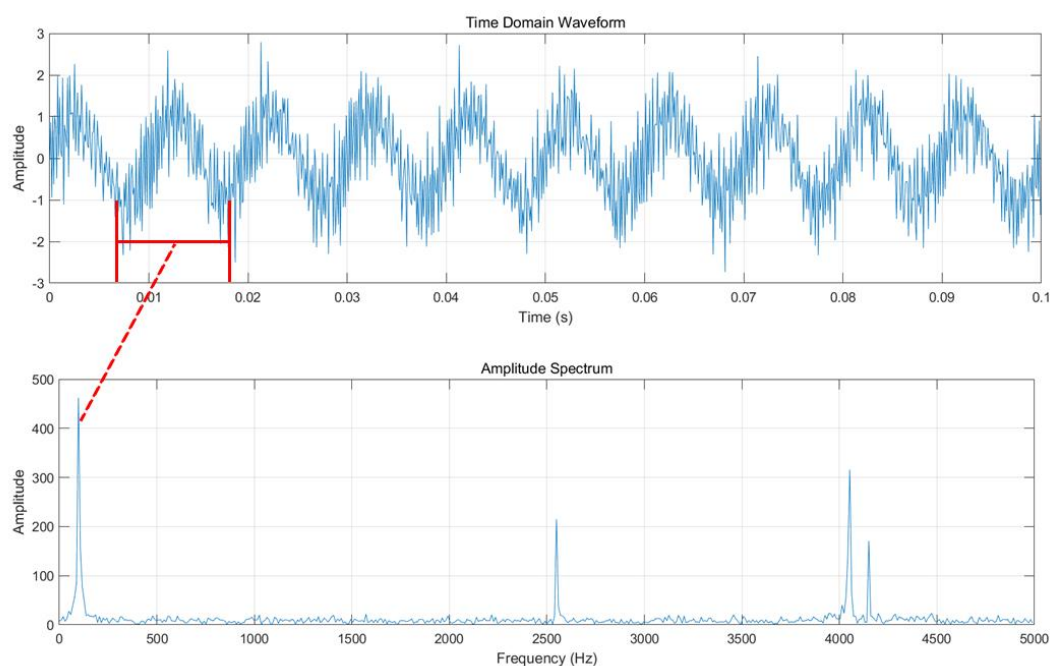


图 7 信号 1 时频对应关系

如图 7 所示，从幅值上来看，能够粗略看出时域波形的一个周期约为 0.01s，其对应频率约 100Hz，这与频谱图中  $f=97.7\text{Hz}$  时频谱幅度取最大值的结论一致。这验证了结果的正确性。

## 实验 2:

- (1) 使用实验 1 的代码分析，得到波形图，频谱图如图所示



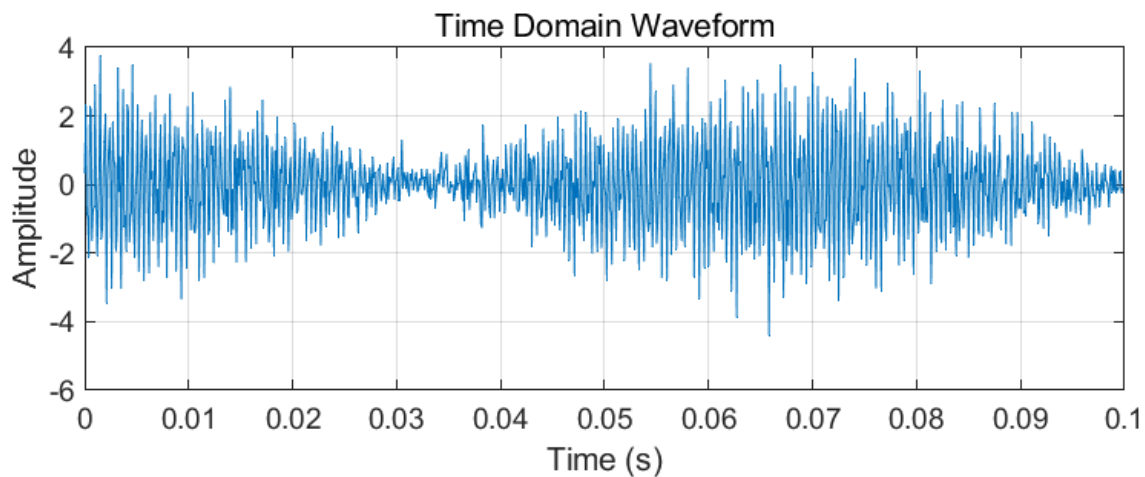


图 8 信号 2 时域波形

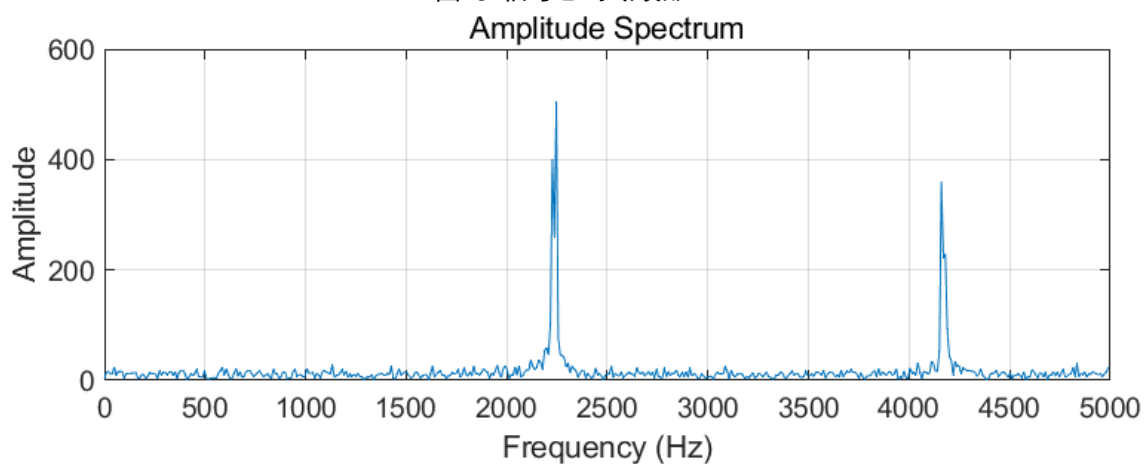


图 9 信号 2 频域波形

通过频谱分析得到输出，四个频率分量分别为：  
2246.1Hz, 2226.6Hz, 4160.2Hz, 2236.3Hz

(2) 将窗口长度设置为 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000，设置 for 循环，观察幅度谱随窗口长度的变化如图所示

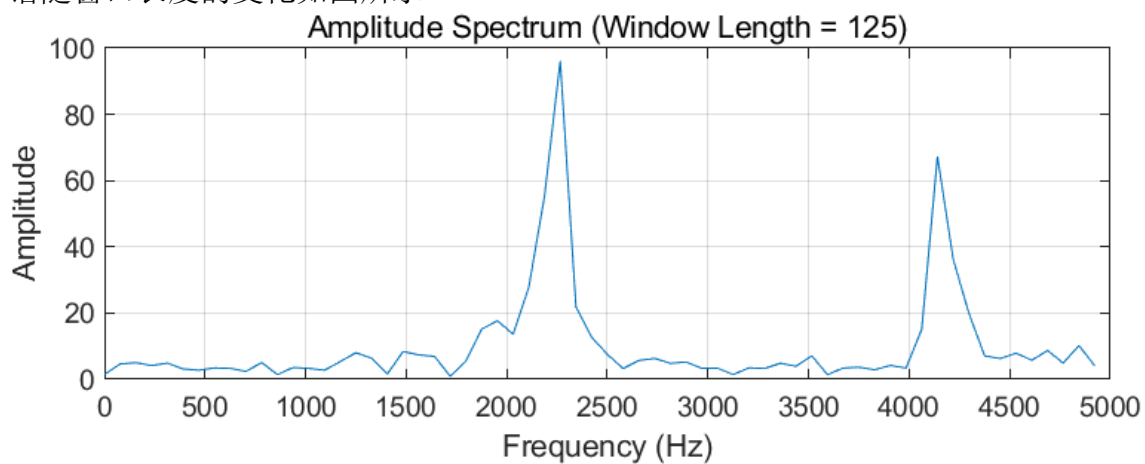


图 10 窗口长度 125 时的 FFT 结果

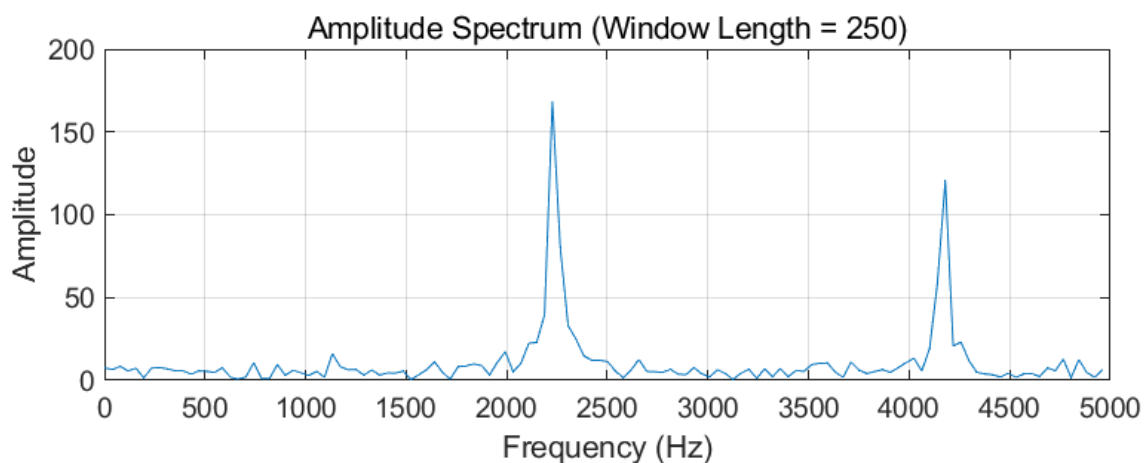


图 11 窗口长度 250 时的 FFT 结果

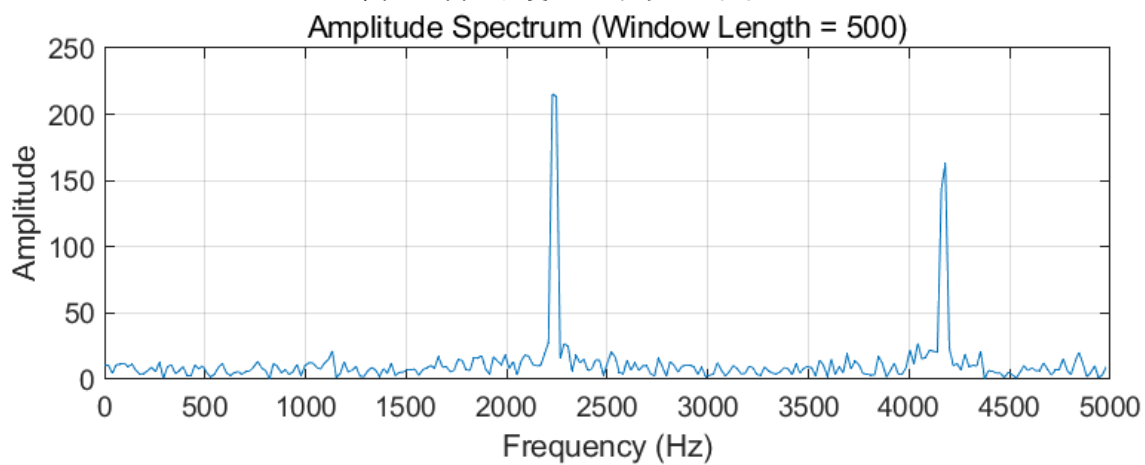


图 12 窗口长度 500 时的 FFT 结果

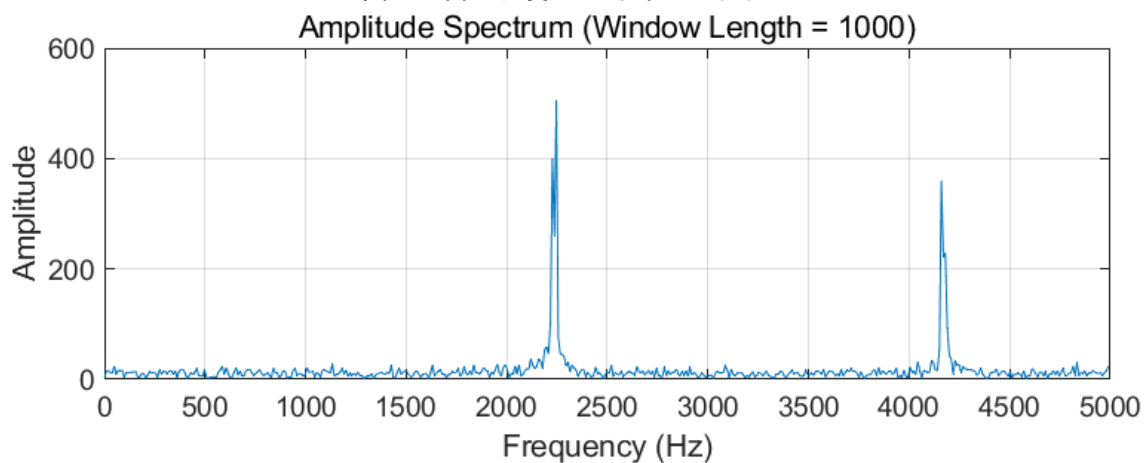


图 13 窗口长度 1000 时的 FFT 结果

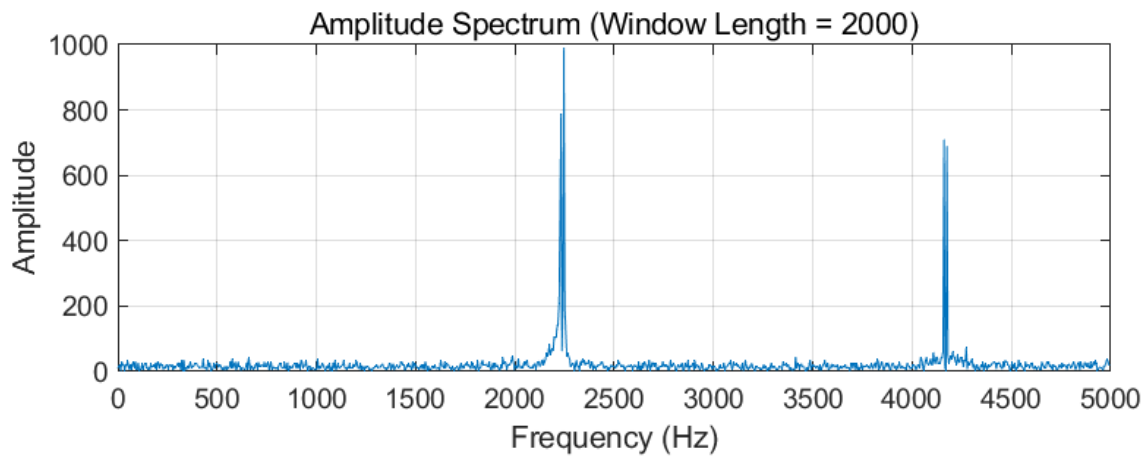


图 14 窗口长度 2000 时的 FFT 结果

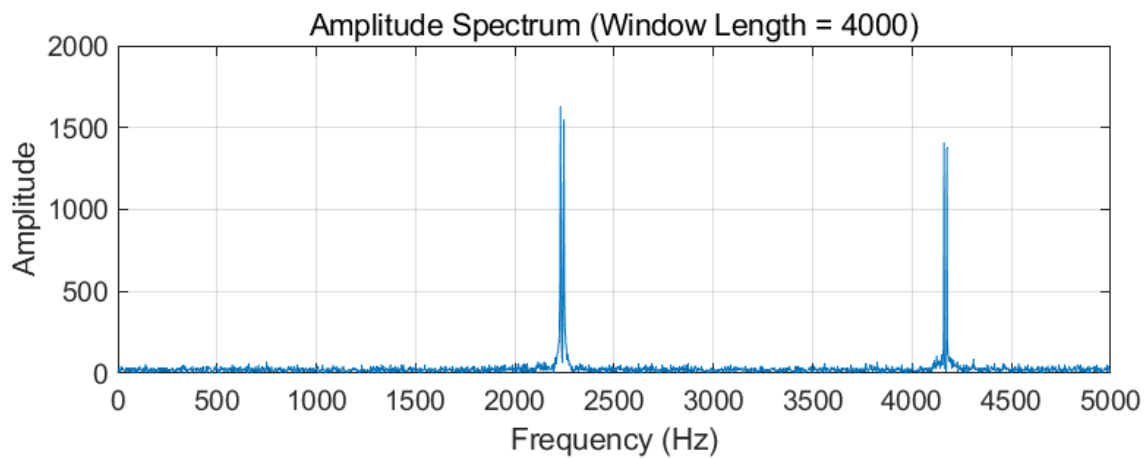


图 15 窗口长度 4000 时的 FFT 结果

Findpeaks 频率识别结果:

窗口长度	频率 1 / $\times 10^3\text{HZ}$	频率 2 / $\times 10^3\text{HZ}$	频率 3 / $\times 10^3\text{HZ}$	频率 4 / $\times 10^3\text{HZ}$
125	1.9531	2.2656	4.1406	4.8438
250	1.9922	2.2266	4.1797	4.2578
500	2.2266	2.2852	4.0430	4.1797
1000	2.2266	2.2461	4.1602	4.1797
2000	2.2314	2.2461	4.1602	4.1748
4000	2.2290	2.2461	4.1602	4.1748

表 1 不同窗口长度的频率识别结果

观察图，表能够发现，随着窗口长度的增大，主要频率趋向于一个恒定值，这体现了采样范围越大，频率的识别越精确，但这样运算量也越大，这与理论情形相符合。

为进一步验证结论，编写一个 matlab 程序（additon.m），将窗口值 x 设置为 100-4000，步长为 100，对于每个窗口值进行 FFT 变换，取出从幅值从大至小的四个频率分量值  $f_1(x)$ ,  $f_2(x)$ ,  $f_3(x)$ ,  $f_4(x)$ ，以 x 为横坐标，f 为纵坐标绘制四条曲线

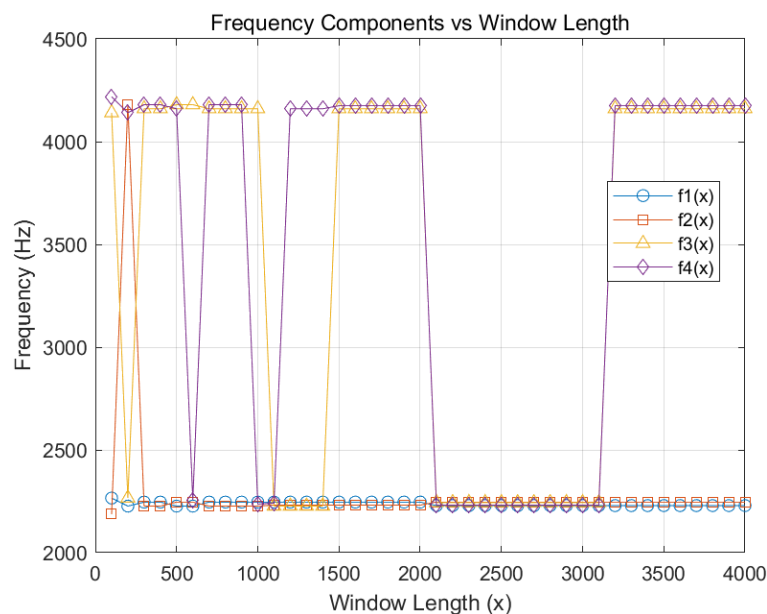


图 16 频率识别结果随窗口长度的变化

由此可见，窗口长度较小时识别结果较混乱，较大的窗口长度能够增加识别的精度，但同时也会增大计算的复杂性。

(3) 频率分辨率和窗口值间的关系:

$$\text{频率分辨率} = \frac{\text{采样率}}{\text{窗口长度}}$$

由此可见在采样率为 10kHz 不变的情况下，窗口长度越长，频率分辨率越低，频率成分识别越准确，在窗口长度取 125,250,500,1000,2000,4000 时，频率分辨率分别为 80Hz,40Hz,20Hz,10Hz,5Hz,2.5Hz.

### 实验 3:

(1) 使用实验 1 的代码绘制时域，频域波形如图所示

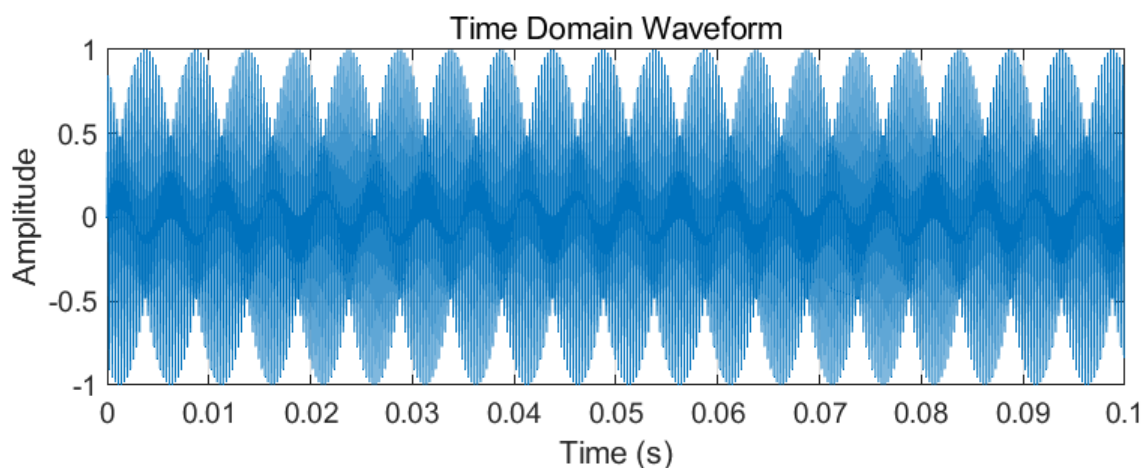


图 17 信号 3 时域波形

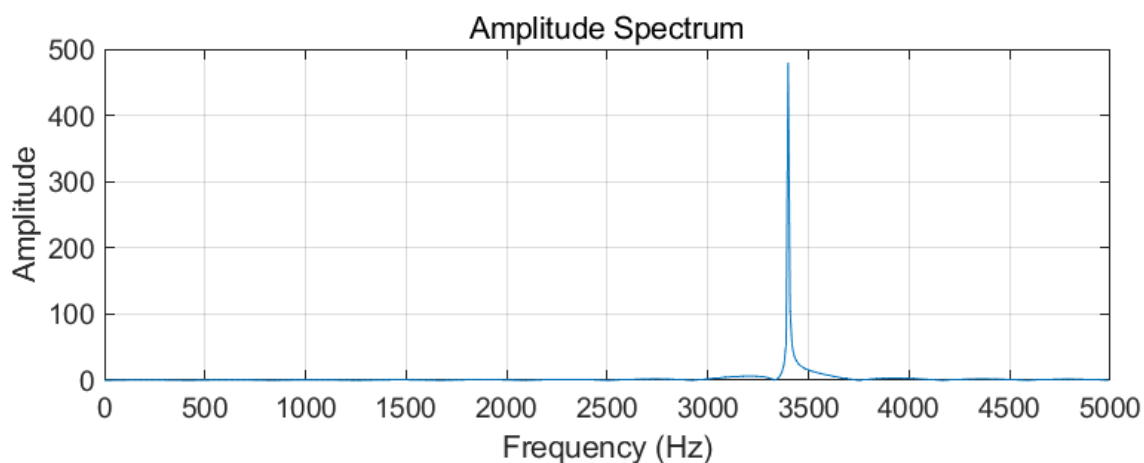


图 18 信号 3 频域波形

(2) 宽带频谱、窄带频谱的分析

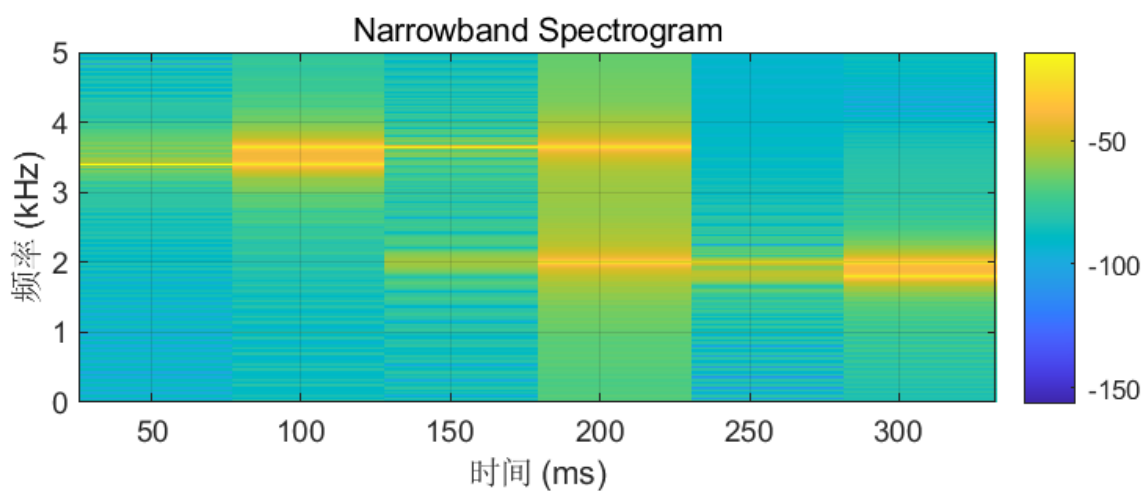


图 19 信号 3 窄带频谱

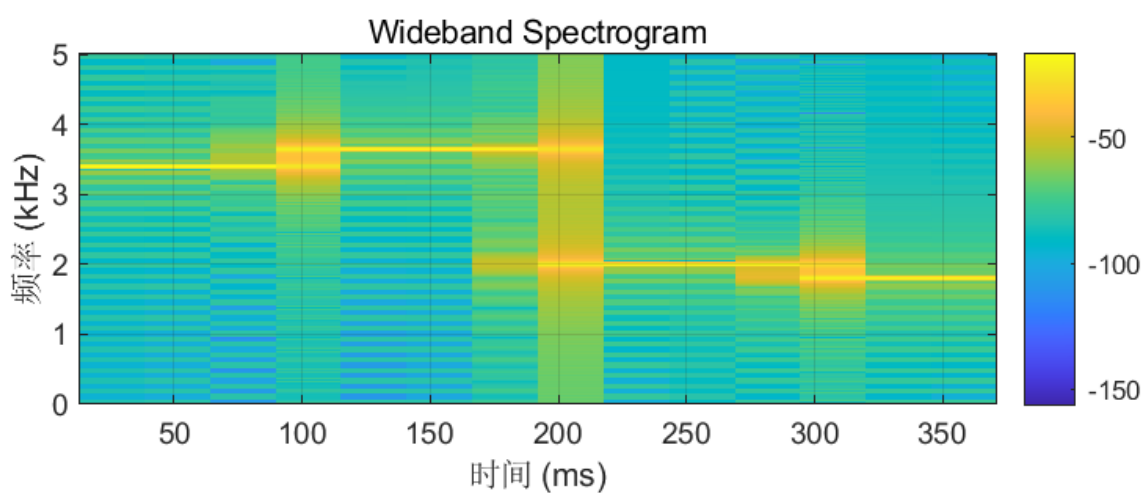


图 20 信号 3 宽带频谱

绘制频谱时设置的特征参数如下：

	宽带	窄带
窗口长度	1024	512
重叠部分	512	256

FFT 点数	2048	1024
--------	------	------

表 2 频谱图参数设置

相同点：  
 原信号是由多个不同的频率分量叠加而成。从频谱图中可以看出，随时间推移，信号的主频在发生变化，由 3.5kHz 附近逐渐转换为 2kHz 附件

不同点：  
 宽带频谱使用较短的窗口长度，提供较高的时间分辨率，能够更准确地显示信号的快速变化，但频率分辨率较低，难以区分接近的频率成分。因此，宽带频谱图上的频率成分较为模糊，显示的频率范围较广。相反，窄带频谱使用较长的窗口长度，具有较高的频率分辨率，能够精确区分相邻的频率成分，但时间分辨率较低，可能无法捕捉信号中的快速变化。窄带频谱图上的频率成分更为集中且清晰，适用于需要详细频率分析的场景。因此，宽带频谱更适合观察信号的整体频率分布，而窄带频谱则适合精确分析特定频率成分。

实验 4:

（1）音乐的七个基本音 do,rue,mi,fa,sou,la,xi 由 C,D,E,F,G,A,B 表示，包括 12 个半音或 7 个全音，其中 E 和 F，B 和 C 之间为半音，其他的均为全音，查阅资料整理其频率对应关系如表 1 所示。

音高	A2	B2	C3	D3	E3	F3	G3
频率(Hz)	110.0	123.5	130.8	146.8	164.8	174.6	196.0
音高	A3	B3	C4	D4	E4	F4	G4
频率(Hz)	220	246.9	261.6	293.7	329.6	349.2	392
音高	A4	B4	C5	D5	E5	F5	G5
频率(Hz)	440.0	493.8	523.3	587.2	659.3	698.5	783.9
音高	A5	B5	C6	D6	E6	F6	G6
频率(Hz)	880.0	987.7	1046.5	1174.6	1318.5	1396.6	1567.0
音高	A6	B6	C7	D7	E7	F7	G7
频率(Hz)	1760.0	1975.5	2093.0	2349.4	2637,0	2793,8	3135.96
	音频“中音音阶.mp3”中 7 个音对应的标准频率						
	音频“高音音阶.mp3”中 7 个音对应的标准频率						

表 3 音高和频率对照表

材料中给出了两段钢琴弹奏的音阶，分别对应着表 3 中的着色部分，从听觉上看，是两段音调不同的连续标准音。

标准钢琴的中央键位的一组八度音的频率如上图黄色部分所示。通过代码 zhongyin.m 对音频“中音音阶.mp3”分析，绘制时域波形和频域波形，如图 21,22 所示

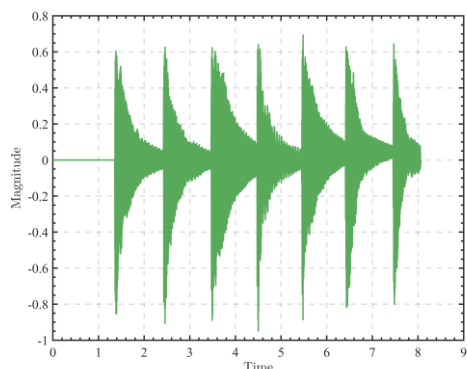


图 21 中音音阶的时域波形

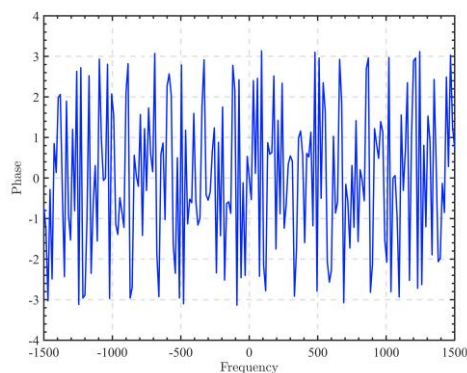


图 22 中音音阶的相频特性

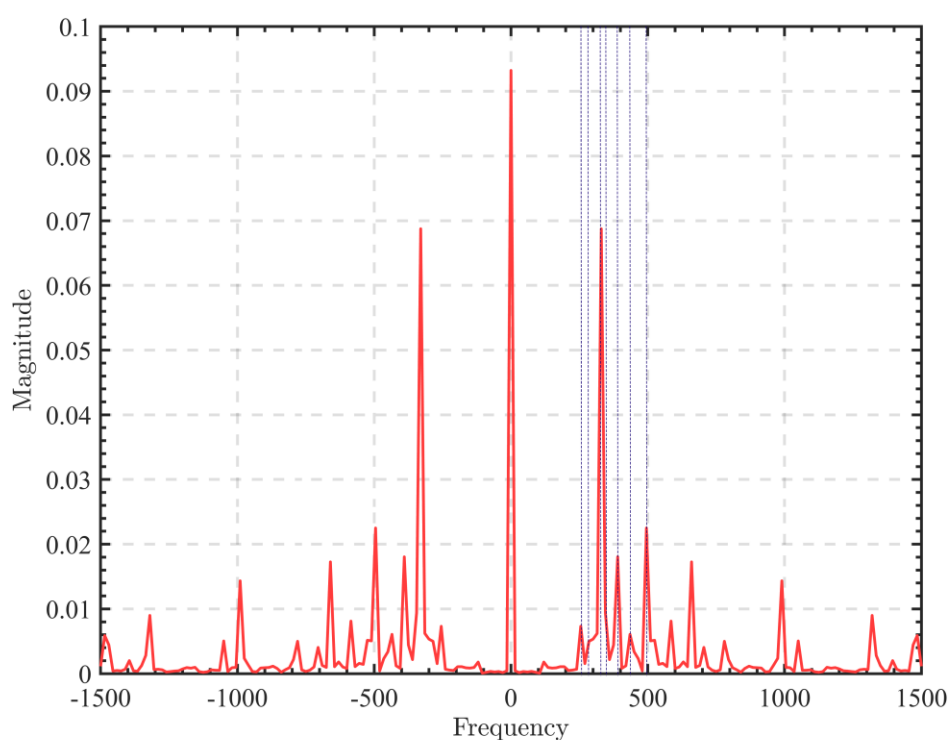


图 23 中音音阶的幅频特性

图 23 中虚线部分标识的 7 个峰值即为钢琴的 7 个标准音 C4,D4,E4,F4,A5,B5 读出它们的频率，并与标准频率比较如表 4 所示

	C4	D4	E4	F4	G4	A4	B4
标准值	261.6	293.7	329.6	349.2	392	440.0	493.8
实际值	255	300	330	345	390	435	495

表 4 中音音阶的声音频率对照

观察发现，音频“中音音阶.mp3”幅值较大的部分集中在我们听到的钢琴音的频率上。同时还伴有许多噪声。

用同样的方法，通过程序“gaoyin.m”扫描音频“高音音阶.mp3”，得到如图 24，

图 25 所示的时域，频域特性曲线

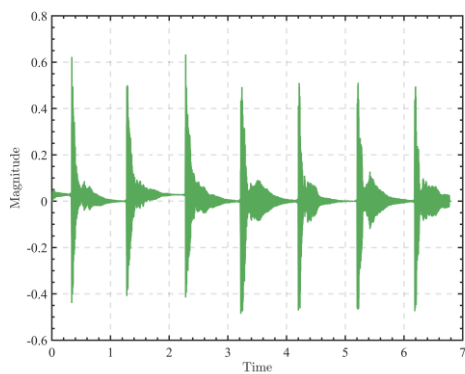


图 24 高音音阶的时域波形

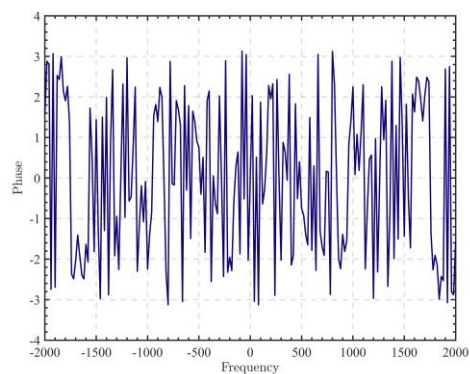


图 25 高音音阶的相频特性

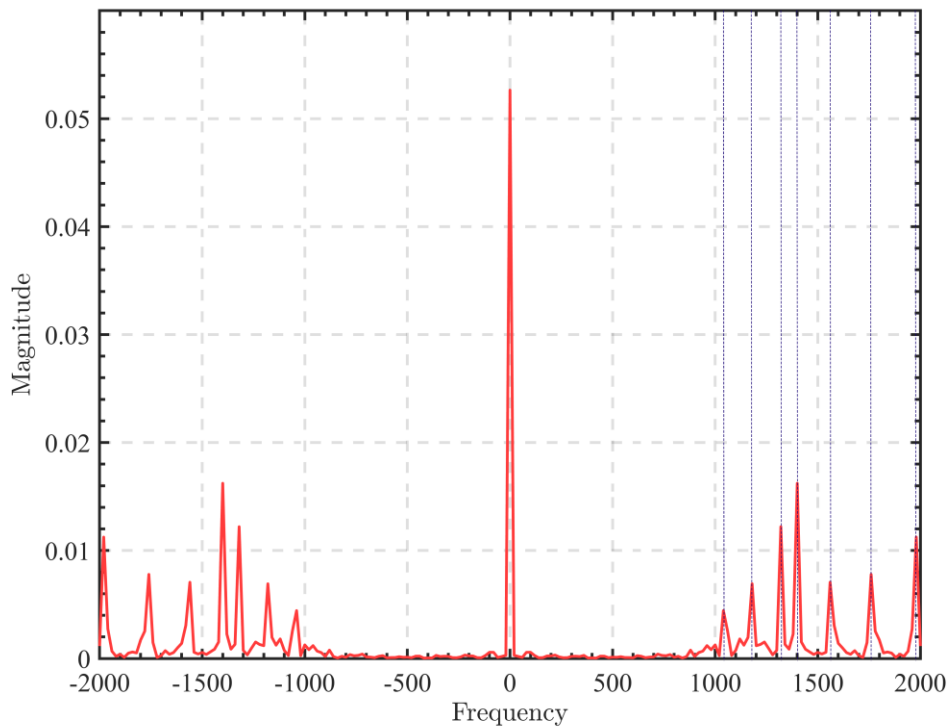


图 26 中音音阶的幅频特性

图 26 中虚线部分标识的 7 个峰值即为钢琴的 7 个标准音 C6,D6,E6,F6,A7,B7 读出它们的频率，并与标准频率比较如表 5 所示

	C6	D6	E6	F6	G6	A6	B6
标准值	1046.5	1174.6	1318.5	1396.6	1567.0	1760.0	1975.5
实际值	1040	1180	1320	1400	1560	1760	1980

表 5 高音音阶的声音频率对照

观察发现，频域特性和已知特性基本一致。  
频域特性和听觉效果的关系：



听觉上，两段音频都是连续的标准音，音高有所区别，因为录制的原因，包含一些噪声。从频谱图上看，幅值较大的部分是标准音的频率，包括了音频的主要内容，幅值较小的部分是噪声频率。高音音阶的频谱展开比中音音阶效果好，可能是因为噪声主要集中在中频。

(2) 对一段乐曲的分析:

调式是音乐中一种基本的组织方式，它指定了一组音符的顺序和关系，和作品的音乐性质和情感色彩。调式通常由一个根音（也称为主音）和与其相关的音阶组成。一个调式的音阶是由一系列按照特定音程关系排列的音符组成的。

简单的说，某些标准音按照既有规则（大调和小调）组合，能够相互协调，发出悦耳的音乐，这是音乐编排的重要依据

同样对典型 C 大调音乐“送别.mp3”进行频谱分析（代码 songbie.m），得到幅频特性曲线如图 27 所示。已知 C 调的三个标准音为 C,E,G。

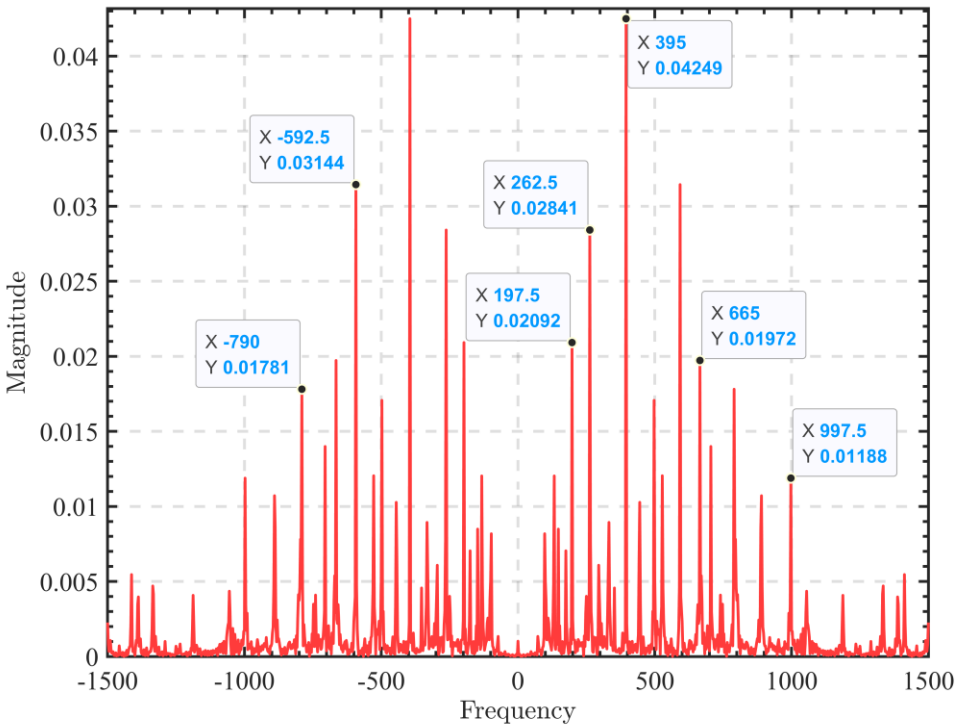


图 27 音乐《送别》的幅频特性

在频谱图中，标识振幅较高音的频率并寻找对应值，如表 6 所示。

音高	A2	B2	C3	D3	E3	F3	G3
频率(Hz)	110.0	123.5	130.8	146.8	164.8	174.6	196.0
音高	A3	B3	C4	D4	E4	F4	G4
频率(Hz)	220	246.9	261.6	293.7	329.6	349.2	392
音高	A4	B4	C5	D5	E5	F5	G5
频率(Hz)	440.0	493.8	523.3	587.2	659.3	698.5	783.9
音高	A5	B5	C6	D6	E6	F6	G6
频率(Hz)	880.0	987.7	1046.5	1174.6	1318.5	1396.6	1567.0
音高	A6	B6	C7	D7	E7	F7	G7

频率(Hz)	1760.0	1975.5	2093.0	2349.4	2637,0	2793,8	3135.96
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	---------

表 6 音乐《送别》的声音和频率对照

我们对典型 A 大调音乐“外婆的澎湖湾.mp3”进行频谱分析（代码 waipo.m），得到幅频特性曲线如图所示。已知 A 调的三个标准音为 A,D,E

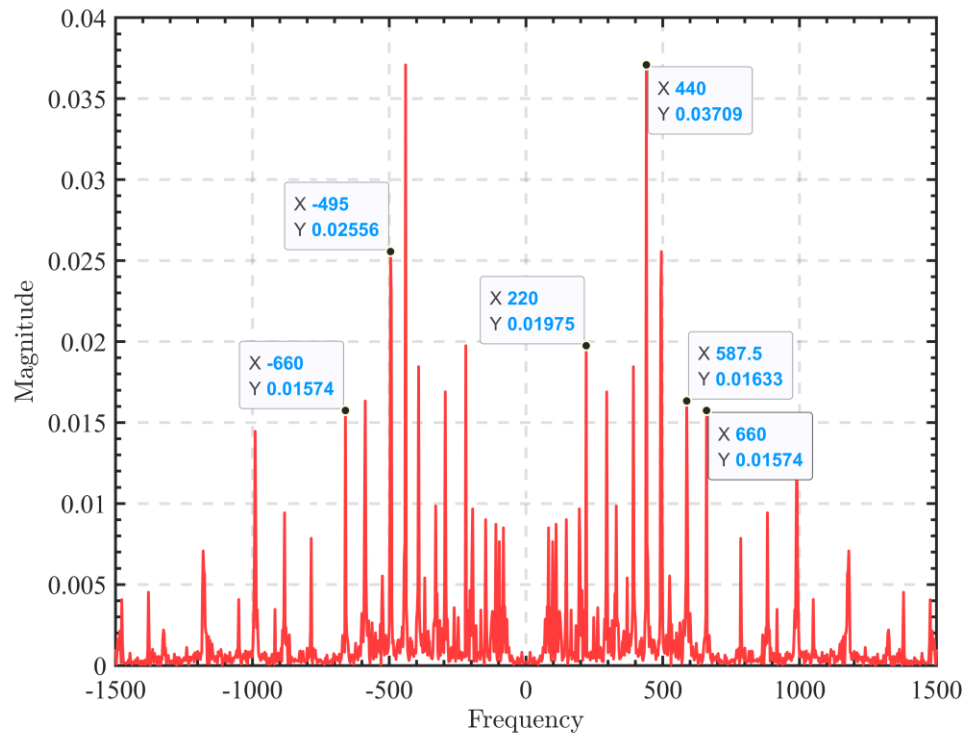


图 28 音乐《外婆的澎湖湾》的幅频特性

在频谱图中，标识振幅较高音的频率并寻找对应值，如表 7 所示。

音高	A2	B2	C3	D3	E3	F3	G3
频率(Hz)	110.0	123.5	130.8	146.8	164.8	174.6	196.0
音高	A3	B3	C4	D4	E4	F4	G4
频率(Hz)	220	246.9	261.6	293.7	329.6	349.2	392
音高	A4	B4	C5	D5	E5	F5	G5
频率(Hz)	440.0	493.8	523.3	587.2	659.3	698.5	783.9
音高	A5	B5	C6	D6	E6	F6	G6
频率(Hz)	880.0	987.7	1046.5	1174.6	1318.5	1396.6	1567.0
音高	A6	B6	C7	D7	E7	F7	G7
频率(Hz)	1760.0	1975.5	2093.0	2349.4	2637,0	2793,8	3135.96

表 7 音乐《送别》的声音和频率对照

频域特征和听觉效果的关系：

容易发现，一段音乐包含着各个频率的分量，而幅值较高的频率分量代表着音乐的主要内容，不同调式的音乐，频率在若干个对应的标准音附近集中。

至此，已完成对一个普通样本的分析。

## 五、总结


本实验旨在通过离散傅里叶变换（DFT）对信号进行频谱分析，深入理解 DFT 的应用，尤其是对无线通信中频谱资源划分和跳频技术的分析。实验内容涵盖信号的时域、频域和时频域分析，通过 MATLAB 编程实现信号的频率成分提取与识别。实验一中，我们利用 DFT 对信号进行时域波形绘制、幅度谱计算，并自动识别信号中的四个主要频率成分，帮助加深对频谱分析的理解。在实验二中，通过对不同窗口长度下的频谱分析，探讨了窗口长度与频率分辨率的关系，验证了较大窗口长度可以提高频率识别精度，但会增加计算复杂度。实验三则通过时频谱分析，比较了宽带与窄带频谱的差异，进一步加深了对频率分辨率和时间分辨率之间权衡的认识。在实验四中，我们通过对音频信号的频谱分析，探索了音高与频率的关系，结合实际音频样本进行验证，深化了对频谱分析在音频处理中的应用。实验结果显示，DFT 作为信号处理的重要工具，能够有效提取信号的频率成分，为无线通信、音频分析等领域提供了关键的技术支持。

## 参考文献：

[1] 俞一彪, 孙兵. 数字信号处理. 东南大学出版社  
[2] 董维三. 快速傅里叶变换辨识时域离散数学模型的频率特性[J]. 导弹与航天运载技术, 1993 (02) :36-41+7-8.  
[3] 蔡倩. 音乐的时频分析与音高估计算法[D]. 吉林大学, 2009.

## 附录：

所用源程序即材料如下

 addition.m	2024/11/28 18:51	M 文件	2 KB
 experiment1.m	2024/11/28 22:14	M 文件	2 KB
 experiment2.m	2024/11/28 18:26	M 文件	3 KB
 experiment3.m	2024/11/18 14:48	M 文件	2 KB
 gaoyin.m	2024/5/12 21:47	M 文件	1 KB
 signal.mat	2024/11/8 21:51	MAT 文件	31 KB
 signal2.mat	2024/11/10 13:11	MAT 文件	31 KB
 signal3.mat	2024/11/9 11:06	MAT 文件	15 KB
 songbie.m	2024/5/13 19:20	M 文件	1 KB
 waipo.m	2024/5/12 22:07	M 文件	1 KB
 zhongyin.m	2024/5/12 21:44	M 文件	1 KB
 高音音阶.mp3	2024/5/11 16:44	MP3 文件	116 KB
 送别.mp3	2024/5/11 16:48	MP3 文件	208 KB
 外婆的澎湖湾.mp3	2024/5/11 16:46	MP3 文件	167 KB
 中音音阶.mp3	2024/5/11 18:01	MP3 文件	136 KB