

# 《数字信号处理》 实验手册

生命科学与技术学院  
生物医学工程系  
段君博、罗融 编



2020 年 10 月 19 日

# 目录

<b>1</b>	<b>实验一 熟悉 MATLAB 环境</b>	<b>5</b>
1.1	实验目的 . . . . .	5
1.2	实验内容 . . . . .	5
1.3	实验报告 . . . . .	7
1.4	用到的 MATLAB 命令 . . . . .	8
1.4.1	矩阵的数组运算 . . . . .	8
1.4.2	plot 及图形相关命令 . . . . .	9
1.4.3	基本信号序列 . . . . .	10
1.4.4	filter . . . . .	11
1.4.5	disp . . . . .	12
1.4.6	conv . . . . .	12
1.4.7	freqz . . . . .	12
1.4.8	freqs . . . . .	13
1.4.9	impz . . . . .	14
1.4.10	randn . . . . .	14
1.4.11	rand . . . . .	15
1.4.12	tic,toc . . . . .	15
1.4.13	help,doc . . . . .	15
1.4.14	M 脚本文件 . . . . .	15
1.5	选学内容 . . . . .	16
<b>2</b>	<b>实验二 音频信号的产生与采集</b>	<b>17</b>
2.1	实验目的 . . . . .	17
2.2	实验内容 . . . . .	17
2.3	实验报告 . . . . .	17
2.4	用到的 MATLAB 命令 . . . . .	18
2.4.1	audiorecorder . . . . .	18
2.4.2	audioplayer . . . . .	18
2.4.3	recordblocking . . . . .	18

2.4.4	getaudiodata . . . . .	18
2.4.5	play . . . . .	19
2.4.6	sound . . . . .	19
2.4.7	soundsc . . . . .	19
2.5	选学内容 . . . . .	19
<b>3</b>	<b>实验三 用 DFT 计算连续信号的谱</b>	<b>20</b>
3.1	实验目的 . . . . .	20
3.2	实验内容 . . . . .	20
3.3	实验报告 . . . . .	20
3.4	用到的 MATLAB 命令 . . . . .	21
3.4.1	fft . . . . .	21
3.5	选学内容 . . . . .	21
<b>4</b>	<b>实验四 IIR 及 FIR 滤波器设计</b>	<b>22</b>
4.1	实验目的 . . . . .	22
4.2	实验内容 . . . . .	22
4.3	思考问题 . . . . .	22
4.4	实验报告 . . . . .	22
4.5	用到的 MATLAB 命令 . . . . .	23
4.5.1	buttord . . . . .	23
4.5.2	buttap . . . . .	24
4.5.3	zp2tf . . . . .	24
4.5.4	lp2lp . . . . .	25
4.5.5	impinvar . . . . .	25
4.5.6	sinc . . . . .	25
4.5.7	boxcar . . . . .	25
4.5.8	hamming . . . . .	26
4.5.9	hanning . . . . .	26
4.5.10	fir1 . . . . .	26
4.6	选学内容 . . . . .	27

<b>5</b>	<b>实验五 综合实验：电话号码识别</b>	<b>28</b>
5.1	实验目的 . . . . .	28
5.2	实验内容 . . . . .	28
5.3	实验报告 . . . . .	28
5.4	用到的 MATLAB 命令 . . . . .	29
5.4.1	audioread . . . . .	29
5.4.2	image . . . . .	29
5.4.3	imagesc . . . . .	29
5.4.4	goertzel . . . . .	29
5.5	选学内容 . . . . .	29

# 1 实验一 熟悉 MATLAB 环境

## 1.1 实验目的

1. 熟悉 MATLAB 的主要操作命令；
2. 学会简单的矩阵输入和数据读写；
3. 掌握简单的绘图命令；
4. 学习用 MATLAB 编程。

## 1.2 实验内容

1. 已知位置向量同为  $n=0:6$  的以下三个序列：

$$x=[2,-1,4,7,0,-3,5];$$

$$y=[-2,8,0,-3,6,2,-4];$$

$$w=[7,0,-9,-3,4,2,-1];$$

请用 MATLAB 计算

(a)  $u=x+y$

(b)  $v=x.*w$

(c)  $z=x-y.*w$

2. 用 MATLAB 计算下列序列的线性卷积并作图：（可用 `conv` 函数求卷积，用 `stem` 函数作图）

(a)  $x(n)=\delta(n), h(n)=R_5(n)$

(b)  $x(n)=R_3(n), h(n)=R_4(n)$

(c)  $x(n)=\delta(n-2), h(n)=0.5^n R_3(n)$

3. 设滤波器差分方程为

$$y(n)=x(n)+x(n-1)+1/3y(n-1)+1/4y(n-2),$$

请用 MATLAB 计算并作图：

(a) 系统的频率响应 ( $0 \sim \pi$  共 512 点的图形)。(可用 `freqz` 函数)

(b) 设抽样频率为 10kHz, 输入正弦波幅度为 5, 频率为 1kHz, 记录长度 5ms, 求系统输出。(可用 `filter` 函数)

4. 一个特定的线性时不变系统, 描述它的差分方程为

$$y(n)+0.1y(n-1)-0.06y(n-2)=x(n)-2x(n-1),$$

(a) 在  $0 \leq n \leq 10$  之间求得并画出系统得单位脉冲响应, 从脉冲响应确定系统的稳定性。(可用 `impz` 函数)

(b) 如果此系统的输入为

$$x(n)=[5+3\cos(0.2\pi n)+4\sin(0.6\pi n)]u(n), 0 \leq n \leq 20,$$

求响应  $y(n)$  并将  $x(n)$  与  $y(n)$  作图。(可用 `stem` 函数作图)

5. 噪声信号的产生: 试生成两个 10000 点的噪声信号  $b_1(n), b_2(n)$ ,  $b_1(n)$  服从期望为 1、方差为 4 的正态分布,  $b_2(n)$  服从  $(-3, 3)$  区间上的均匀分布。

6. MATLAB 是按列优先, 因此按列操作可提升运行速度。另外, 如果可以使用向量及矩阵运算, 应尽量避免 `for` 循环。比较如下五种求和方法的运行时间:

```
N=2000;
x=randn(N);
y=randn(N);

tic;
for i=1:N
    for j=1:N
        z(i,j)=x(i,j)+y(i,j);
    end
end
```

```

toc;

tic;
for j=1:N
    for i=1:N
        z(i,j)=x(i,j)+y(i,j);
    end
end
toc;

tic;
for i=1:N
    z(i,:)=x(i,:)+y(i,:);
end
toc;

tic;
for j=1:N
    z(:,j)=x(:,j)+y(:,j);
end
toc;

tic;
z=x+y;
toc;

```

### 1.3 实验报告

要求报告格式如下：

## 西安交通大学实验报告

成绩	
----	--

课 程 数字信号处理 第 页 共 页  
系 别 生物医学工程 实 验 日 期 年 月 日  
专业班级                      交报告日期 年 月 日  
姓 名                      报告退发(订正、重做)  
学 号                       
同 组 人                      教师审批签字

报告内容应包含实验名称、实验目的、实验内容、程序及结果、实验结果分析与讨论等。

### 1.4 用到的 MATLAB 命令

#### 1.4.1 矩阵的数组运算

数组运算指元素对元素的算术运算，与通常意义上的由符号表示的线性代数矩阵运算不同。a、b 两数组必须有相同的行和列。

数组加减 (., -)

a.+b: 元素对元素的相加。(与矩阵加法等效)

a.-b: 元素对元素的相减。(与矩阵减法等效)

数组乘法 (.\*)

a.\*b: 元素对元素的相乘。(与矩阵乘法不等效)

```
a=[1 2 3;4 5 6;7 8 9];  
b=[2 4 6;1 3 5;7 9 10];  
a.*b  
ans =
```



2	8	18
4	15	30
49	72	90

数组除法 (./, .\)

**a./b=b.\a:** a 的元素被 b 的对应元素除。

**a.\b=b./a:** b 的元素被 a 的对应元素除。

```
a=[1 2 3];b=[4 5 6];
c1=a.\b
c1 =
    4.0000    2.5000    2.0000
c2=b./a
c2 =
    4.0000    2.5000    2.0000
```

数组乘方 (.^)

**a.^b:** 元素对元素的幂。

```
a=[1 2 3];b=[4 5 6];
z=a.^2
z =
    1    4    9
z=a.^b
z =
    1   32  729
```

### 1.4.2 plot 及图形相关命令

**功能:** 最基本的二维图形指令。该命令可以自动打开一个图形窗口, 用直线连接相邻两数据点来绘制图形, 根据图形坐标大小自动缩扩坐标轴, 将数据标尺及单位标注自动加到两个坐标轴上, 可自定坐标轴, 可把 x, y 轴用对数坐标表示。

**格式:**

plot(x)

plot(x,y)

plot(x1,y1,x2,y2)

plot(x) 是缺省自变量绘图格式，x 为向量，以 x 元素值为纵坐标，以相应元素下标为横坐标绘图。

plot(x,y) 是基本格式，以 y(x) 的函数关系作出直角坐标图，如果 y 为  $n \times m$  的矩阵，则以 x 为自变量，作出 m 条曲线。

plot(x1,y1,x2,y2) 是多条曲线绘图格式。

其他图形相关命令：

subplot(m,n,p) 可将图形窗口分割成 m 行 n 列，并设 p 所指定的子窗口为当前窗口。子窗口按行由左至右，由上至下进行编号。

axis 用行向量中给出的值，设置坐标轴的最大和最小值，对于二维图形，该向量中含有元素： $[x_{min}, x_{max}, y_{min}, y_{max}]$ 。

title(txt) 在图形窗口顶端的中间位置输出字符串 txt 作为标题。

xlabel(txt) 在 x 轴下的中间位置输出字符串 txt 作为标注。

ylabel(txt) 在 y 轴边上的中间位置输出字符串 txt 作为标注。

### 1.4.3 基本信号序列

单位抽样序列：

$$\delta(n) = \begin{cases} 1, & n = 0; \\ 0, & n \neq 0. \end{cases}$$

这一序列可用 MATLAB 中的函数实现：

`x=[1 zeros(1,n-1)];`

单位阶跃序列

$$u(n) = \begin{cases} 1, & n \geq 0; \\ 0, & n < 0. \end{cases}$$

这一序列可用 MATLAB 中的函数实现：

`x=ones(1,N);`

其他相关命令：

ones(n) 可建立一个  $n \times n$  的 1 矩阵。

ones(m,n,...,p) 可建立一个  $m \times n \times \dots \times p$  的 1 矩阵。

ones(size(A)) 可建立一个和矩阵 A 同样大小的 1 矩阵。

zeros(n) 可建立一个  $n \times n$  的 0 矩阵。

zeros(m,n,...,p) 可建立一个  $m \times n \times \dots \times p$  的 0 矩阵。

zeros(size(A)) 可建立一个和矩阵 A 同样大小的 0 矩阵。

#### 1.4.4 filter

一般数字滤波器输出  $y(n)$  的  $z$  变换形式  $Y(z)$  与输入  $x(n)$  的  $z$  变换形式  $X(z)$  之间的关系如下：

$$Y(z) = H(z)X(z) = \frac{b(1) + b(2)z^{-1} + \dots + b(n_b + 1)z^{-n_b}}{a(1) + a(2)z^{-1} + \dots + a(n_a + 1)z^{-n_a}} X(z)$$

这里  $H(z)$  就是线性系统建模中提到过的传递函数。常数  $b(i)$  和  $a(i)$  是滤波器系数， $\max(n_a, n_b)$  为滤波器阶数。

注意：滤波器系数不是从 0 开始的，而是从 1 开始的，这就反映出 MATLAB 中向量的标准索引方案。

在 MATLAB 中，把系数保存在两个向量中，一个保存分子系数，另一个保存分母系数。为方便起见，MATLAB 采用行向量保存滤波器系数。

从上边的  $z$  变换关系可以很容易得出滤波器的差分方程表示形式。假定  $a(1)=1$ ，把分母移到等号左边，进行  $z$  反变换，可得：

$$y(n) + a(2)y(n-1) + \dots + a(n_a+1)y(n-n_a) = b(1)x(n) + b(2)x(n-1) + \dots + b(n_b+1)x(n-n_b)$$

$y(n)$  用输入和输出的延时来表示：

$$y(n) = b(1)x(n) + b(2)x(n-1) + \dots + b(n_b+1)x(n-n_b) - a(2)y(n-1) - \dots - a(n_a+1)y(n-n_a)$$

上式为数字滤波器的标准时域表示方法。假设零初始状态，从计算  $y(i)$  开始。这一过程表示为：

$$y(1) = b(1)x(1)$$

$$y(2) = b(1)x(2) + b(2)x(1) - a(2)y(1)$$

$$y(3) = b(1)x(3) + b(2)x(2) + b(3)x(1) - a(2)y(2) - a(3)y(1)$$

一个这种形式表示的滤波器可以很容易用 filter 函数实现。例如，一单极点低通滤波器是：

$$b=1; a=[1 \ -0.9];$$

这里向量  $a$ ， $b$  表示传递函数形式的滤波器的分子系数和分母系数。应用该滤波器对数据进行滤波：

`y=filter(b,a,x);`

`filter` 函数的输出抽样点数与输入的抽样点数相同，即 `y` 的长度与 `x` 的长度相同。对于 `a(1)` 不等于 1 的情况，`filter` 函数先在等号两边都除以 `a(1)`，再进行差分方程计算。

### 1.4.5 disp

功能：输出文字或者数据。

格式：

`disp('Hello !')`

`disp(x)`

### 1.4.6 conv

功能：求卷积。

格式：`c=conv(a,b)`

说明：`c=conv(a,b)` 用于求向量 `a` 和 `b` 的卷积，即

$$c(n+1) = \sum_{k=0}^{N-1} a(k+1)b(n-k)$$

其中 `N` 为向量 `a` 和 `b` 的最大长度。

举例：求向量 `a=[1 2 3]` 和 `b=[4 5 6]` 的卷积。

`c=conv(a,b)`

`c =`

4      13      28      27      18

### 1.4.7 freqz

功能：数字滤波器的频率响应。

格式：

`[h,w]=freqz(b,a,n)`

`[h,f]=freqz(b,a,n,Fs)`

`[h,w]=freqz(b,a,n,'whole')`

`[h,w]=freqz(b,a,n,'whole',Fs)`

`h=freqz(b,a,w)`

`h=freqz(b,a,f,Fs)`

`freqz(b,a)`

说明：`freqz` 用于计算向量 **a** 和 **b** 构成的数字滤波器的复频响应  $H(e^{jw})$ 。

`[h,w]=freqz(b,a,n)` 可得到数字滤波器的 **n** 点的复频响应，这 **n** 个点均匀地分布在上半单位圆（即  $0 \sim \pi$ ），并将这 **n** 点频率记录在 **w** 中，相应的频率响应记录在 **h** 中。**n** 的默认值为 512。

`[h,f]=freqz(b,a,n,Fs)` 允许指定抽样频率 **Fs** 以 Hz 为单位，也即在  $0 \sim Fs/2$  频率范围内选取 **n** 个频率点（记录在 **f** 中），并计算相应的频率响应 **h**。

`[h,w]=freqz(b,a,n,'whole')` 表示在  $0 \sim 2\pi$  之间均匀选取 **n** 个点计算频率响应。

`[h,f]=freqz(b,a,n,'whole',Fs)` 则表示在  $0 \sim Fs$  之间均匀选取 **n** 个点计算频率响应。

`h=freqz(b,a,w)` 计算在向量 **w** 中指定的频率处的频率响应，但必须注意，指定的频率必须介于  $0 \sim 2\pi$  之间。

`h=freqz(b,a,f,Fs)` 计算在向量 **f** 中指定的频率处的频率响应，但必须注意，指定的频率必须介于  $0 \sim Fs$  之间。

不带输出变量的 `freqz` 函数可在当前图形窗口中绘制出幅频和相频特性曲线。

#### 1.4.8 freqs

功能：模拟滤波器的复频响应。

格式：

`h=freqs(b,a,w)`

`[h,w]=freqs(b,a)`

`[h,w]=freqs(b,a,n)`

`freqs(b,a)`

说明：`h=freqs(b,a,w)` 用于计算模拟滤波器的复频响应，其中实向量 **w** 用于指定频率值，即 `freqs` 沿虚轴计算频率响应。

`[h,w]=freqs(b,a)` 自动设定 200 个频率点来计算频率响应，这 200 个频率值记录在 `w` 中。

`[h,w] = freqs(b,a,n)` 设定 `n` 个频率点计算频率响应。

不带输出变量的 `freqs` 函数，将在当前图形窗口中绘制出幅频和相频曲线。

#### 1.4.9 `impz`

功能：数字滤波器的冲激响应。

格式：

`[h,t]=impz(b,a)`

`[h,t]=impz(b,a,n)`

`[h,t]=impz(b,a,n,Fs)`

`impz(b,a)`

说明：由向量 `a` 和 `b` 构成数字滤波器，即 `[h,t]=impz(b,a)` 计算出滤波器的冲激响应 `h`，抽样点数 `n` 由 `impz` 函数自动选取，并记录在向量 `t` 中。

`[h,t]=impz(b,a,n)` 可由用户指定抽样点或抽样时刻。当 `n` 为标量时，`t=[0:n-1]'`，即在  $0 \sim n-1$  时刻计算冲激响应，0 时刻表示滤波器的起始点；当 `n` 为向量（其值应为整数），则表示 `t=n`，即在这些指定的时刻计算冲激响应。

`[h,t]=impz(b,a,n,Fs)` 表示抽样间隔为  $1/Fs$ ，`Fs` 的默认值为 1。

不带输出变量的 `impz` 将在当前图形窗口中利用 `stem(t,h)` 函数绘出冲激响应。

举例：见如下代码

```
b = [0.2 0.1 0.4 0.2 0.3];
```

```
a = [1 -1.2 1.4 -0.8 0.4];
```

```
impz(b,a,50);
```

#### 1.4.10 `randn`

功能：生成服从标准正态分布的伪随机数矩阵。

格式：

```
x=randn(M,N)
```

说明：生成尺寸为  $M \times N$  的伪随机数矩阵，每个元素服从标准正态分布  $\mathcal{N}(0, 1)$ 。

#### 1.4.11 rand

功能：生成服从均匀分布的伪随机数矩阵。

格式：

`x=rand(M,N)`

说明：生成尺寸为  $M \times N$  的伪随机数矩阵，每个元素服从区间  $(0, 1)$  上的均匀分布。

#### 1.4.12 tic,toc

功能：查看某段代码的运行时间。

格式：

`tic`

代码

`toc`

#### 1.4.13 help,doc

功能：查看某命令的使用说明。

格式：

`help 命令`

`doc 命令`

#### 1.4.14 M 脚本文件

对于一些比较简单的问题，从指令窗中直接输入指令进行计算是十分轻松简单的事。但随指令数的增加或随控制流复杂度的增加，以及重复计算的要求，直接从指令窗进行计算就显得繁琐。此时，脚本文件最为适宜。脚本本身反映这样一个事实：**MATLAB** 只是按文件所写的指令执行。这种文件的构成比较简单，其特点是：

- 它只是一串按用户意图排列而成的（包括控制流向指令在内的）**MATLAB** 指令集合。
- 脚本文件运行后，所产生的所有变量都贮留在 **MATLAB** 基本工作空间 (Base workspace) 中。只要用户不使用 **clear** 指令加以清除，且 **MATLAB** 指令窗不关闭，这些变量将一直保存在基本工作空间中。基本空间随 **MATLAB** 的启动而产生；只有关闭 **MATLAB** 时，该基本空间才被删除。

## 1.5 选学内容

《Experiments with MATLAB》第一章。

<https://www.mathworks.com/moler/exm.html>



## 2 实验二 音频信号的产生与采集

### 2.1 实验目的

1. 学习用 MATLAB 产生及采集音频信号；
2. 了解模拟信号与数字信号的关系，数字信号的采样与存储，以及双音多频信号。

### 2.2 实验内容

1. 电话拨号音的合成。

电话拨号音使用双音多频信号（Dual-Tone Multi-Frequency, DTMF），即用两个特定的单音频率信号的组合来代表电话上的一个按键，如下表所示：

(Hz)	1209	1336	1477
697	1	2	3
770	4	5	6
852	7	8	9
941	*	0	#

编写程序，能够仿真电话拨号信号，并由耳机输出。

2. 使用 MATLAB 通过话筒录制一段音频信号，并画出时域波形。

### 2.3 实验报告

实验报告格式同实验一。

报告内容应包含实验名称、实验目的、实验内容、程序及结果、实验结果分析与讨论等。

## 2.4 用到的 MATLAB 命令

### 2.4.1 audiorecorder

功能：生成一个音频录制对象。

格式：

`recorder = audiorecorder`

`recorder = audiorecorder(Fs,nBits,nChannels)`

说明：Fs 是采样频率，大多数声卡支持的典型值是 8000, 11025, 22050, 44100, 48000, 及 96000 Hz，默认值是 8000。nBits 是采样精度，即每个采样点的比特数，大多数声卡支持的典型值是 8、16 及 24 bit，默认值是 8。nChannels 是声道数，1 表示单声，2 表示立体声，默认值是 1。

注意：某些情况下 nBits 设置为 8 会导致采样信号幅度异常小，这时需要增大该值。

### 2.4.2 audioplayer

功能：生成一个音频播放对象。

格式：

`player = audioplayer(Y,Fs,nBits)`

说明：Y 是需要播放的音频信号。

### 2.4.3 recordblocking

功能：录制音频到音频录制对象，阻塞直到录制完成。

格式：`recordblocking(recorder, length)`

说明：录制长度为 length 秒的音频到 recorder 对象。

### 2.4.4 getaudiodata

功能：从音频录制对象提取数据。

格式：`Y = getaudiodata(recorder)`

### 2.4.5 play

功能：播放音频对象。Play audio from audioplayer object

Syntax

格式：play(player)

说明：播放 player 对象。

### 2.4.6 sound

功能：将信号作为音频播放。

格式：sound(y,Fs,nBits)

说明：播放信号 y。

### 2.4.7 soundsc

功能：类似于 sound 命令，但会对信号进行归一化。

格式：soundsc(y,Fs,nBits)

说明：归一化信号 y（-1 到 +1）并播放。

## 2.5 选学内容

《Experiments with MATLAB》第二十章。

### 3 实验三 用 DFT 计算连续信号的谱

#### 3.1 实验目的

1. 学习用 MATLAB 计算信号的 DFT;
2. 了解用 DFT 对连续周期信号进行谱分析可能产生的误差;
3. 理解重叠相加法。

#### 3.2 实验内容

1. 有一单频信号  $x(t) = \sin(2\pi ft)$ , 若 (1) $f = 15\text{Hz}$ , (2) $f = 2\text{Hz}$ , 分别用 DFT 求  $x(t)$  的谱。要求:
  - (a) 抽样频率  $f_s$  以不发生混叠为宜;
  - (b) 记录长度  $t_p$  应取整数周期;
  - (c) 用 stem 语句绘出幅度谱, 横坐标为模拟频率  $f$ 。用 plot 画出时域波形。
2. 有一复频信号  $x(t)=\sin(2\pi f_1 t)+\sin(2\pi f_2 t)$ , 其中  $f_1=15\text{Hz}, f_2=2\text{Hz}$ , 当  $T=0.01\text{s}$  时, 求:
  - (a)  $N=100$  时  $x(t)$  的幅度谱并图示; (用 stem 语句绘出幅度谱)
  - (b)  $N=50$  时  $x(t)$  的幅度谱并图示。(用 stem 语句绘出幅度谱)请分别预测 (a) 与 (b) 是否逼近真实的谱? 如有误差, 请分析原因。
3. 根据重叠相加法的原理编写程序, 并仿真数据进行测试(信号为 `randn(1000,1)`, 滤波器为 `randn(10,1)`, 分段长度 100, 与 `conv` 结果对比)。

#### 3.3 实验报告

实验报告格式同实验一。

报告内容应包含实验名称、实验目的、实验内容、程序及结果、实验结果分析与讨论等。

## 3.4 用到的 MATLAB 命令

### 3.4.1 fft

功能：一维快速傅里叶变换

格式：

`y = fft(x)`

`y = fft(x,n)`

说明：fft 函数用于计算向量或矩阵的离散傅里叶变换，这可通过

$$X(k+1) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n+1)W_N^{kn} \quad (1)$$

实现，其中  $N = \text{length}(x)$ ,  $W_N = e^{-j2\pi/N}$ 。

`y=fft(x)` 利用 FFT 算法计算向量  $x$  的离散傅里叶变换，当  $x$  为矩阵时， $y$  为矩阵  $x$  每一列的 FFT。当  $x$  的长度为 2 的幂次方时，则 fft 函数采用基 2 的算法，否则采用稍慢的混合基算法。

`x=fft(x,n)` 采用  $n$  点 FFT。当  $x$  的长度小于  $n$  时，fft 数在  $x$  的尾部补零，以构成  $n$  点数据；当  $x$  的长度大于  $n$  时，fft 函数会截断序列  $x$ 。当  $x$  为矩阵时，fft 函数按类似的方式处理列长度。

## 3.5 选学内容

《Experiments with MATLAB》第三章。

## 4 实验四 IIR 及 FIR 滤波器设计

### 4.1 实验目的

1. 学习用 MATLAB 完成 IIR 及 FIR 数字滤波器的设计。
2. 了解 IIR 及 FIR 数字滤波器的设计方法；

### 4.2 实验内容

1. 用冲激响应不变法设计 Butterworth IIR 数字低通滤波器。其中通带边界频率  $f_p=1000\text{Hz}$ ，阻带边界频率  $f_{st}=4000\text{Hz}$ ，通带最大波动  $R_p=3\text{dB}$ ，阻带最小衰减  $A_s=15\text{dB}$ ，抽样频率  $f_s=20\text{kHz}$ ，求  $H(z)$  及频率响应  $H(e^{j\omega})$  并画出幅频曲线。
2. 已知输入信号  $x=\sin(2\pi 20t)+\sin(2\pi 5000t)$ ，抽样频率  $f_s=20\text{kHz}$ ，请用步骤 1 设计的滤波器过滤该信号，要求画出输入与输出信号的时域波形并求它们的谱。
3. 用窗函数法设计 FIR 数字低通滤波器。设通带边界频率  $f_p=50\text{Hz}$ ，阻带边界频率  $f_{st}=100\text{Hz}$ ，抽样频率  $f_s=400\text{Hz}$ ，阻带最小衰减  $A_s=40\text{dB}$ 。请选择合适的窗函数及阶数  $n$  进行设计，求出  $h(n)$  与  $H(z)$  及频率响应  $H(e^{j\omega})$  并画出幅频曲线。

### 4.3 思考问题

1. 步骤 1 设计的数字滤波器有无混叠？为什么？
2. 步骤 2 中，为使谱分析不产生泄漏，信号时域截取长度应为多少才合适？

### 4.4 实验报告

实验报告格式同实验一。

报告内容应包含实验名称、实验目的、实验内容、程序及结果、实验结果分析与讨论等，并回答思考题。

## 4.5 用到的 MATLAB 命令

### 4.5.1 buttord

功能：函数 `buttord` 可在给定滤波器性能情况下，选择模拟或数字 Butterworth 滤波器最小的阶数。

格式：

`[n,Wn]=buttord(Wp,Ws,Rp,Rs)`

`[n,Wn]=buttord(Wp,Ws,Rp,Rs,'s')`

说明：其中  $W_p$  和  $W_s$  分别是通带和阻带的截止频率， $R_p$  和  $R_s$  分别是通带和阻带内的波纹系数。

数字域

`[n,Wn]=buttord(Wp,Ws,Rp,Rs)` 可得到数字 Butterworth 滤波器的最小阶数  $n$ ，并使在通带  $(0, W_p)$  内波纹系数小于  $R_p$ ，在阻带  $(W_s, 1)$  内衰减系数大于  $R_s$ 。 $0 \leq W_p$  (或  $W_s$ )  $\leq 1$ ，当其值为 1 时，表示  $0.5F_s$ 。Buttord 还得到截止频率  $W_n$ ，这样再利用 Butterworth 滤波器设计函数就可产生满足指定性能的滤波器。

模拟域

`[n,Wn]=buttord(Wp,Ws,Rp,Rs,'s')` 可得到满足指定性能的模拟滤波器的阶数和截止频率，从而可以利用 Butterworth 滤波器设计函数设计滤波器。

请同学注意：

根据 Matlab 说明文档，模拟域（加 's'） $W_p/W_s$  应为模拟角频率  $\Omega_p, \Omega_s$ ，而数字域  $W_p, W_s$  应为  $\omega_p, \omega_s$  除以  $\pi$ 。但经如下例子测试：

```
wp=0.2*pi;ws=0.3*pi;fs=1e4;Wp=wp*fs;Ws=ws*fs;Rp=1;
As=15;
n=buttord(Ws,Wp,Rp,As,'s')
n =
    6
n=buttord(wp/pi,ws/pi,Rp,As)
```

```

n =
    6
n=buttord(wp/pi/2,ws/pi/2,Rp,As)
n =
    6
As=150;
n=buttord(Ws,Wp,Rp,As,'s')
n =
   45
n=buttord(wp/pi,ws/pi,Rp,As)
n =
   40
n=buttord(wp/pi/2,ws/pi/2,Rp,As)
n =
   44

```

可以看到，阶数  $n$  较小时无差别；但阶数大时，除以  $2\pi$  的结果更为准确。

#### 4.5.2 buttap

功能：设计低通模拟 Butterworth 滤波器。

格式：[z,p,k]=buttap(n)

说明：返回一个  $n$  阶 Butterworth 滤波器的零点、极点和增益。

#### 4.5.3 zp2tf

功能：零极点增益模型转换为传递函数模型。

格式：[b,a]=zp2tf(z,p,k)

说明：将零极点增益模型 (z,p,k) 转换为传递函数模型 (b,a)，z、p、k 分别表示零点向量、极点向量和增益系数。



#### 4.5.4 lp2lp

功能：可将截止频率为 1rad/s 的模拟低通滤波器原型变换成截止频率为  $W_n$  的低通滤波器。

格式：[bt,at]=lp2lp(b,a,Wn)

说明：可将传递函数表示的模拟低通滤波器原型转换成低通滤波器，其截止频率为  $W_n$ ，模拟低通滤波器原型可表示成

$$H(s) = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{b(1)s^{n_b} + b(2)s^{n_b-1} + \dots + b(n_b + 1)}{a(1)s^{n_a} + a(2)s^{n_a-1} + \dots + a(n_a + 1)}$$

#### 4.5.5 impinvar

功能：采用冲激响应不变法来实现模拟滤波器到数字滤波器的转换。

格式：[bz,az]=impinvar(b,a,Fs)

说明：可将模拟滤波器 (b,a) 变换成数字滤波器 (bz,az)，两者的冲激响应不变，即模拟滤波器的冲激响应按  $F_s$  抽样后等同于数字滤波器的冲激响应。当缺少参数  $F_s$  时，抽样频率  $F_s$  取缺省值 1Hz。

#### 4.5.6 sinc

功能：产生 sinc 函数波形。

格式：y = sinc(x)

说明：y = sinc(x) 用于计算 sinc 函数，即

$$\text{sinc}(t) = \begin{cases} 1, & t = 0; \\ \frac{\sin(\pi t)}{\pi t}, & t \neq 0. \end{cases}$$

sinc 函数之所以重要，是因为它的傅里叶变换正好是幅值为 1 的矩形脉冲。

#### 4.5.7 boxcar

功能：矩形窗。

格式：w = boxcar(n)

说明：boxcar(n) 函数可产生长度为 n 的矩形窗函数。

#### 4.5.8 hamming

功能：海明窗。

格式：w = hamming(n)

说明：hamming(n) 可产生 n 点的海明窗。

#### 4.5.9 hanning

功能：汉宁窗。

格式：w = hanning(n)

说明：hanning(n) 可产生 n 点的汉宁窗。

#### 4.5.10 fir1

功能：基于窗函数的 FIR 滤波器设计。

格式：

b=fir1(n,Wn)

b=fir1(n,Wn,'ftype')

b=fir1(n,Wn>window)

b=fir1(n,Wn,'ftype',window)

说明：fir1 函数以经典方法实现加窗线性相位 FIR 数字滤波器的设计，它可设计出标准的低通、高通、带通和带阻滤波器（具有任意频率响应的多带加窗滤波器由 fir2 函数设计）。

b=fir1(n,Wn) 可得到 n 阶低通 FIR 滤波器，滤波器系数包含在 b 中，这可表示为

$$B(z) = b(1) + b(2)z^{-1} + \dots + b(n+1)z^{-n}$$

这是个截止频率为 Wn 的加海明窗的线性相位 FIR 滤波器， $0 \leq Wn \leq 1$ ，Wn=1 对应于抽样频率的二分之一，即 Nyquist 频率。

当 [Wn]=[W1,W2] 时，fir1 函数可得到带通滤波器，其通带为  $W1 < \omega < W2$ 。

b=fir1(n,Wn,'ftype') 可设计高通和带阻滤波器，由 ftype 决定：

当 ftype = high 时，表明设计高通 FIR 滤波器；

当 ftype = stop 时，表明设计带阻 FIR 滤波器。

在设计高通和带阻滤波器时，`fir1` 函数总是使用阶次为偶数的结构，因此当输入的阶次为奇数时，`fir1` 函数会自动将阶次加 1。这是因为对奇次阶的滤波器，其在 Nyquist 频率处的频率响应为零，因此不适合用于设计高通和带阻滤波器。

`b=fir1(n,Wn>window)` 利用列向量 `window` 中指定的窗函数进行滤波器设计，`window` 的长度应为 `n+1`。如果不指定 `window` 参数，则 `fir1` 函数使用海明窗。

`b=fir1(n,Wn,'ftype',window)` 的用法为以上两种类型的结合，用于设计定制窗函数的高通和带阻滤波器的设计。

## 4.6 选学内容

《Experiments with MATLAB》第四章。

## 5 实验五 综合实验：电话号码识别

### 5.1 实验目的

1. 学习用 MATLAB 解决实际的信号处理问题；
2. 了解时间-频率分析及短时傅里叶变换的基本概念及原理。

### 5.2 实验内容

根据实验二的内容，电话拨号音使用双音多频信号，因此可以使用 DFT 分析拨号音的频谱分量，从而根据频谱的峰值及编码识别所拨出的电话号码。本实验要求识别音频文件 `phone_number.mp3` 中的电话号码。

由于这个信号是一个时变信号，即频率分量随着时间而变化，因此需要分析该信号的时间-频率特性，即频谱的时间函数。由于无法准确确定每次按键的起止时刻，因此可以考虑先将信号分割成若干段，然后单独分析每段信号，最后综合分析以识别。这正是短时傅里叶变换（short time Fourier transform, STFT）的基本思想。针对本实验的信号，需要满足如下条件：

1. 信号段的长度应足够短（小于每次按键的持续时间）以保证对于每次按键，至少有一段信号只包含该按键而不包含相邻的按键；
2. 同时信号段的长度应足够长以保证 DFT 具有足够高的分辨率。

综合考虑，建议每次分析 0.2 秒的信号。

### 5.3 实验报告

实验报告格式同实验一。

报告内容应包含实验名称、实验目的、实验内容、程序及结果、实验结果分析与讨论等。

## 5.4 用到的 MATLAB 命令

### 5.4.1 audioread

功能：读取音频文件。

格式：[y,Fs] = audioread(filename)

说明：从文件 filename 中读取音频数据，返回采样数据 y 及采样频率 Fs。

### 5.4.2 image

功能：将矩阵数据以图像方式显示。

格式：image(C)

说明：以图像方式显示矩阵 C，C 中每个元素对应图像中一个矩形，矩形的颜色由元素值的大小决定，颜色与元素值的映射关系由 colormap 决定。

### 5.4.3 imagesc

功能：与 image 命令类似，但会对矩阵数据进行归一化。

格式：imagesc(C)

说明：对 C 进行归一化（0 到 255），并以图像方式显示。

### 5.4.4 goertzel

功能：使用二阶 Goertzel 算法计算 DFT。

格式：dft = goertzel(data,indices)

说明：计算给定频点 indices 的 DFT。

## 5.5 选学内容

《Experiments with MATLAB》第五章。

## 索引

audioplayer, 18  
audioread, 29  
audiorecorder, 18  
axis, 10  
  
boxcar, 25  
buttmap, 24  
buttford, 23  
  
conv, 5, 12  
  
disp, 12  
doc, 15  
  
fft, 21  
filter, 6, 11  
fir1, 26  
fir2, 26  
freqs, 13  
freqz, 6, 12  
  
getaudiodata, 18  
goertzel, 29  
  
hamming, 26  
hanning, 26  
help, 15  
  
image, 29  
imagesc, 29  
impinvar, 25  
impz, 6, 14  
  
lp2lp, 25  
  
ones, 10  
  
play, 18  
plot, 9  
  
rand, 15  
randn, 14  
recordblocking, 18  
  
sinc, 25  
sound, 19  
soundsc, 19  
stem, 5, 6  
subplot, 10  
  
tic,toc, 15  
title, 10  
  
xlabel, 10  
  
ylabel, 10  
  
zeros, 11  
zp2tf, 24