目录

1 实验目的 **2**

2 实验原理 **2**

2.1 连续时间信号 Fourier 分析 2

2.2 离散时间信号 Fourier 分析 3

3 程序讲解 **4**

3.1 连续时间周期信号频谱分析 4

3.1.1 周期三角波信号的频谱 4

3.1.2 周期矩形脉冲信号的频谱 5

3.1.3 观察 Gibbs 现象 6

3.2 连续时间非周期信号频谱分析 8

3.2.1 Fourier 正变换 8

3.2.2 Fourier 反变换 9

3.3 离散时间信号的频谱分析 10

4 实验内容 **12**

5 实验报告 **12**

实验四　信号的频谱分析

江苏师范大学 · 电气工程及自动化学院 · 李灿

1　实验目的

1. 掌握连续时间周期信号的 Fourier 级数展开；
2. 掌握连续时间信号频谱的绘制和分析方法；
3. 掌握使用 FFT 函数分析离散时间信号的频谱。

2　实验原理

2.1　连续时间信号 Fourier 分析

连续时间周期信号可以表示为一系列不同频率的正弦波信号的加权叠加，当信号满足 Dirichlet 条件（充分条件）时，该结论成立。这就是周期信号的 Fourier 级数展开，其表达式为

$$f(t)=\sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n \mathrm{e}^{\mathrm{j}n\omega_0 t} \tag{1}$$

其中基波角频率 $\omega_0=\frac{2\pi}{T_0}$，$T_0$ 为信号 $f(t)$ 的周期。C_n 为加权系数，也就是 Fourier 系数或者称为信号的频谱，可以看做是关于角频率 $n\omega_0$ 的函数。Fourier 系数的计算公式为

$$C_n=\frac{1}{T_0}\int_{<T_0>} f(t)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}n\omega_0 t}\mathrm{d}t \tag{2}$$

显然，周期信号的频谱是离散序列，利用离散序列的绘图方法，将 C_n 绘制出来，就是信号的频谱图。由于 C_n 可以是实的也可以是复的，所以当 C_n 为复的时候，需要绘制其幅度谱和相位谱，即

$$C_n=|C_n|\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi_n} \tag{3}$$

其中 $|C_n|$ 为幅度谱，φ_n 为相位谱。另外还可以利用 $|C_n|^2$ 绘制出信号的功率谱。在 MATLAB 中，幅度谱可以利用取模函数 `abs()` 求得，相位谱可以用相位角函数 `angle()` 求得，图形绘制则仍可采用棉棒函数 `stem()`。

当信号是非周期的时候，其频谱需要用 Fourier 变换来求得，变换公式为

$$F(\mathrm{j}\omega)=\int_{-\infty}^{\infty} f(t)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega t}\mathrm{d}t \tag{4}$$

Fourier 变换的存在性仍然需要 Dirichlet 条件（与周期信号的有所区别）来保证。此时，时域信号可以通过 Fourier 反变换表示出来

$$f(t)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} F(\mathrm{j}\omega)\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega t}\mathrm{d}\omega \tag{5}$$

显然，非周期信号的频谱是连续的，利用连续时间信号的绘图方法，将 $F(\mathrm{j}\omega)$ 绘制出来即可。当 $F(\mathrm{j}\omega)$ 为复的时候，需要绘制其幅度谱和相位谱，即

$$F(\mathrm{j}\omega) = |F(\mathrm{j}\omega)|\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi(\omega)} \tag{6}$$

其中 $|F(\mathrm{j}\omega)|$ 为幅度谱，$\varphi(\omega)$ 为相位谱。另外还可以利用 $|F(\mathrm{j}\omega)|^2$ 绘制出信号的能量谱。此处仍然可以使用 `abs()` 函数和 `angle()` 函数。

上面提到的频谱 C_n 或者 $F(\mathrm{j}\omega)$ 本质上都是求积分，因此可以通过数值积分函数 `integral()` 去计算其数值解。另外，MATLAB 中也提供了求解 Fourier 变换和 Fourier 反变换的符号解法。分别用到函数 `fourier()` 和 `ifourier()`。对于符号解的图形绘制，可以采用 ezplot() 函数或者 fplot() 函数，其使用方法将在后面的程序讲解中展示。

2.2 离散时间信号 Fourier 分析

周期为 N 的周期时间序列 $f[k]$ 满足 $f[k+N]=f[k]$，它在一个周期内可以用 N 项虚指数序列进行线性叠加表示，即

$$f[k] = \frac{1}{N}\sum_{m=0}^{N-1} F[m]\mathrm{e}^{\mathrm{j}m\Omega_0 k}, \quad \Omega_0 = \frac{2\pi}{N}, \quad 0 \leqslant k \leqslant N-1 \tag{7}$$

称之为周期序列的离散 Fourier 级数（DFS）表示，$F[m]$ 为周期序列的 DFS 系数或者频谱，其计算公式为

$$F[m] = \sum_{k=0}^{N-1} f[k]\mathrm{e}^{-\mathrm{j}m\Omega_0 k}, \quad \Omega_0 = \frac{2\pi}{N}, \quad 0 \leqslant m \leqslant N-1 \tag{8}$$

可以看到，$F[m+N]=F[m]$，即离散时间序列和对应的离散频率序列都是以 N 为周期的周期序列，并且称 $0 \sim N-1$ 的的取值部分称为主值周期，$F[m]$ 表示的也是离散频谱。正是因为这种变换前后的保周期性，式(7)–(8)实际上给出了时域的 N 点有限长序列 $f[k]$ 变换为频域的 N 点有限长序列 $F[m]$ 的离散 Fourier 变换对。

非周期信号可以看作是周期信号的周期趋于无穷的结果，频谱由离散变为连续。离散序列的离散时间 Fourier 变换（DTFT）定义为

$$F(\mathrm{j}\Omega) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} f[k]\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\Omega k}, \quad -\infty < \Omega < \infty \tag{9}$$

显然，它是关于 Ω 的连续函数，并且由 $F(\mathrm{j}(\Omega+2\pi)) = F(\mathrm{j}(\Omega))$ 可知 $F(\mathrm{j}\Omega)$ 是以周期为 2π 的周期信号，通常把 $[-\pi, \pi]$ 称为 Ω 的主值区间。离散时间序列的 Fourier 反变换表示为

$$f[k] = \frac{1}{2\pi}\int_{<2\pi>} F(\mathrm{j}\Omega)\mathrm{e}^{\mathrm{j}\Omega k}\mathrm{d}\Omega \tag{10}$$

对 $F(\mathrm{j}\Omega)$ 在主值周期内进行等间隔抽样，即 2π 长度的频率区间分为 N 个点，并将 $\Omega = \frac{2\pi}{N}$ 代入式(9)–(10)，又可以得到(7)–(8)。换言之，任意有限长时间序列 $f[k]$ 的离散 Fourier 变换（DFT，即式(8)）就是它的 DTFT 在主值区间内的间隔抽样，抽样点数不同，结果不同，需要选取合适的抽样间隔。由于工程多为时限信号（无需考虑周期），有了 DFT 之后，Fourier 分析在工程上得以实践。具体做法是，先对连续时间信号进行抽样（需满足抽样定理），得到离散序列，然后对离散序列进行 DFT 变换，获得近似于连续时间信号的频谱。

在 MATLAB 中，可以利用定义式(8)求有限点数（时限）离散时间序列的 Fourier 变换，也可以直接利用一维快速 DFT 函数 `fft()` 实现。由于在计算机处理信号时，连续时间信号也要先表示为离散序列，并且还要能实现有限长序列的 Fourier 变换，因此采用 FFT 算法非常普遍，是一种非常重要的方法。Fourier 反变换则可以使用 `ifft()` 函数实现。

3 程序讲解

3.1 连续时间周期信号频谱分析

3.1.1 周期三角波信号的频谱

周期信号的频谱为 C_n，利用 MATLAB 中的 `abs()` 函数和 `angle()` 函数分别求幅度谱和相位谱，调用格式为

```
Mag = abs(Cn)
Pha = angle(Cn)
```

例： 已知周期三角波信号的 Fourier 系数

$$C_n = \begin{cases} \dfrac{-4\mathrm{j}}{n^2\pi^2}\sin\left(\dfrac{n\pi}{2}\right), & n \neq 0 \\ 0, & n = 0 \end{cases}$$

显然，该 Fourier 系数是复的，需要分别绘制幅度谱和相位谱，并且其表达式是一个分段函数，需要先分段表示再合并。绘制其前 20 次谐波分量频谱图的程序为

```
N = 20;
n_left = -N : -1;
n_righ = 1 : N;
C_left = ( -4 * j ./ (n_left.^2 * pi^2) ) .* sin(n_left * pi / 2);
C_righ = ( -4 * j ./ (n_righ.^2 * pi^2) ) .* sin(n_righ * pi / 2);
C_0 = 0;
Cn = [ C_left, C_0, C_righ];
n = -N : N;
% 计算幅度谱和相位谱
Mag = abs(Cn);
Pha = angle(Cn);
% 绘图
figure('position', [0, 0, 1000, 600])
subplot(2, 1, 1)
stem(n, Mag, '-r', 'filled', 'linewidth', 2)
set(gca, 'fontsize', 13);
legend('Magnitude Spectrum', 'location', 'northeast');
xlabel('$\omega/\pi$', 'interpreter', 'latex')
```

```
ylabel('$|C_n|$', 'interpreter', 'latex')
title('Magnitude Spectrum')
subplot(2, 1, 2)
stem(n, Pha, '-b', 'filled', 'linewidth', 2)
set(gca, 'fontsize', 13);
legend('Phase Spectrum', 'location', 'northeast');
xlabel('$\omega/\pi$', 'interpreter', 'latex')
ylabel('$\varphi_n$', 'interpreter', 'latex')
title('Phase Spectrum')
axis([-N N -3 3])
```

通过频谱图可以观察频谱的分布情况、幅度衰减情况等，还可识别主要谐波分量。

扩展： 请自行绘制出该信号的功率谱图。

3.1.2 周期矩形脉冲信号的频谱

频谱为实函数时，可以绘制在一张图中。

例： 已知周期矩形脉冲信号的 Fourier 系数

$$C_n = \frac{1}{2}\mathrm{Sa}\left(\frac{n\pi}{2}\right)$$

前 N 次谐波合成的信号近似波形（Fourier 级数展开式的有限项）

$$\begin{aligned} f_N(t) &= \sum_{n=-N}^{N} \frac{1}{2}\mathrm{Sa}\left(\frac{n\pi}{2}\right) e^{\mathrm{j}n\pi t} \\ &= \frac{1}{2} + \sum_{n=1}^{N} \mathrm{Sa}\left(\frac{n\pi}{2}\right)\cos(n\pi t) \end{aligned}$$

画出频谱 C_n 和近似波形 $f_N(t)$。

绘制频谱图的程序为

```
N = 20;
n = -N : N;
Cn = 0.5 * sinc( n ./ 2);
Mag = abs(Cn);
Pha = angle(Cn);
figure('position', [0, 0, 800, 300])
stem(n, Cn, '-r', 'filled', 'linewidth', 2)
set(gca, 'fontsize', 13);
legend('Spectrum', 'location', 'northeast');
xlabel('$\omega/\pi$', 'interpreter', 'latex')
ylabel('$C_n$', 'interpreter', 'latex')
```

绘制近似波形 $f_N(t)$ 的程序为

```
N = input('N = ');
t = -2 : 0.001 : 2;
dc = 0.5;
fN = dc * ones(1, length(t));
for n = 1 : 2 : N
    fN = fN + sinc(n/2) * cos(n*pi*t);
end
figure('position', [0, 0, 800, 300])
plot(t, fN, '-r', 'linewidth', 2)
set(gca, 'fontsize', 13);
xlabel('$t$', 'interpreter', 'latex')
ylabel('$f_N$', 'interpreter', 'latex')
title(['N = ' num2str(N)])
axis([-2 2 -0.2 1.2])
```

程序中 input() 为输入函数，用来获取外部输入，如键入数字。同学们可以键入不同的数字观察逼近效果。

扩展：请自行绘制出该信号的能量谱图。

3.1.3 观察 Gibbs 现象

针对3.1.2节中的例子，选取不同谐波分量次数（N 值）恢复原始信号，观察 Gibbs 现象，给出解释。这里选取 1 次、7 次、21 次、140 次谐波分量的叠加为例，绘制图形程序如下

```
t = -2 : 0.001 : 2;
dc = 0.5;
% 1次
N1 = 1;
fN1 = dc * ones(1, length(t));
for n = 1 : 2 : N1
    fN1 = fN1 + sinc(n/2) * cos(n*pi*t);
end
% 7次
N2 = 7;
fN2 = dc * ones(1, length(t));
for n = 1 : 2 : N2
    fN2 = fN2 + sinc(n/2) * cos(n*pi*t);
end
% 21次
N3 = 21;
fN3 = dc * ones(1, length(t));
for n = 1 : 2 : N3
```

```
    fN3 = fN3 + sinc(n/2) * cos(n*pi*t);
end
% 140次
N4 = 140;
fN4 = dc * ones(1, length(t));
for n = 1 : 2 : N4
    fN4 = fN4 + sinc(n/2) * cos(n*pi*t);
end
% 绘图
figure('position', [0, 0, 800, 400])
subplot(2, 2, 1)
plot(t, fN1, '-r', 'linewidth', 2)
set(gca, 'fontsize', 13);
xlabel('$t$', 'interpreter', 'latex')
ylabel('$f_N$', 'interpreter', 'latex')
title(['N = ' num2str(N1)])
axis([-2 2 -.2 1.2])
subplot(2, 2, 2)
plot(t, fN2, '-r', 'linewidth', 2)
set(gca, 'fontsize', 13);
xlabel('$t$', 'interpreter', 'latex')
ylabel('$f_N$', 'interpreter', 'latex')
title(['N = ' num2str(N2)])
axis([-2 2 -.2 1.2])
subplot(2, 2, 3)
plot(t, fN3, '-r', 'linewidth', 2)
set(gca, 'fontsize', 13);
xlabel('$t$', 'interpreter', 'latex')
ylabel('$f_N$', 'interpreter', 'latex')
title(['N = ' num2str(N3)])
axis([-2 2 -.2 1.2])
subplot(2, 2, 4)
plot(t, fN4, '-r', 'linewidth', 2)
set(gca, 'fontsize', 13);
xlabel('$t$', 'interpreter', 'latex')
ylabel('$f_N$', 'interpreter', 'latex')
title(['N = ' num2str(N4)])
axis([-2 2 -.2 1.2])
```

3.2 连续时间非周期信号频谱分析

3.2.1 Fourier 正变换

该部分提供两个例子。

例： 求双边指数信号的 Fourier 变换。

$$f(t) = e^{-\alpha|t|} \tag{11}$$

这里采用 `fourier()` 函数求解析解，然后利用 `ezplot()` 函数绘图，实现程序为

```
alpha = 1;
syms t
% 原时域信号
ft = exp(-alpha*abs(t));
H1 = ezplot(ft, [-4, 4]);
set(gca, 'fontsize', 13);
set(H1, 'color', 'red', 'linewidth', 3);
xlabel('$t$', 'interpreter', 'latex')
ylabel('$f(t)$', 'interpreter', 'latex')
title('Time-domain Function')
axis([-4 4 -0.2 1.2])
% Fourier正变换
figure
Fw = fourier(ft);
H2 = ezplot(Fw, [-20, 20]);
set(gca, 'fontsize', 13);
set(H2, 'color', 'blue', 'linewidth', 3);
xlabel('$\omega$', 'interpreter', 'latex')
ylabel('$F(\mathrm{j}\omega)$', 'interpreter', 'latex')
title('Fourier Transform')
axis([-20 20 -0.2 2.4])
```

采用 `fplot()` 函数也行，只需要将上述程序中的 `ezplot` 替换为 `fplot` 即可。另外，如果仍然想用 `plot()` 函数绘图，则可以先对解析表达式 `Fw` 进行赋值，修改程序为

```
w = -4 : 0.1 : 4;
Fw = subs(Fw, w);
plot(w, Fw);
```

例： 求三角脉冲信号的 Fourier 变换。

$$f(t) = (1 - |t|)p_2(t) \tag{12}$$

方法同上例，程序如下

```
syms t
% 原时域信号
ft = (1 - abs(t)) * (heaviside(t+1) - heaviside(t-1));
H1 = ezplot(ft, [-4, 4]);
set(gca, 'fontsize', 13);
set(H1, 'color', 'red', 'linewidth', 3);
xlabel('$t$', 'interpreter', 'latex')
ylabel('$f(t)$', 'interpreter', 'latex')
title('Time-domain Signal')
axis([-4 4 -.2 1.2])
% Fourier正变换
figure
Fw = fourier(ft);
H2 = ezplot(Fw, [-20, 20]);
set(gca, 'fontsize', 13);
set(H2, 'color', 'blue', 'linewidth', 3);
xlabel('$\omega$', 'interpreter', 'latex')
ylabel('$F(\mathrm{j}\omega)$', 'interpreter', 'latex')
title('Fourier Transform')
axis([-20 20 -0.2 1.2])
```

其中，`heaviside()` 函数是单位阶跃信号的符号表示。

3.2.2 Fourier 反变换

可以使用 `ifourier()` 函数实现，和正变换 `ifourier()` 函数一样，这也是一种符号解法。

例： 求矩形脉冲频谱函数的 Fourier 反变换。

$$F(\mathrm{j}\omega) = \pi p_2(\omega) \tag{13}$$

程序如下

```
syms w
% 原频谱函数
Fw = pi * (heaviside(w+1) - heaviside(w-1));
H1 = ezplot(Fw, -4, 4);
set(gca, 'fontsize', 13);
set(H1, 'color', 'blue', 'linewidth', 3);
xlabel('$\omega$', 'interpreter', 'latex')
ylabel('$F(\mathrm{j}\omega)$', 'interpreter', 'latex')
title('Spectrum Function')
axis([-4 4 -0.2 1.1*pi])
% Fourier反变换
```

```
ft = ifourier(Fw);
H2 = ezplot(ft, -20, 20);
set(gca, 'fontsize', 13);
set(H2, 'color', 'red', 'linewidth', 3);
xlabel('$t$', 'interpreter', 'latex')
ylabel('$f(t)$', 'interpreter', 'latex')
title('Inverse Fourier Transform')
axis([-20 20 -0.4 1.2])
```

3.3 离散时间信号的频谱分析

利用 DTFT 的定义式，求离散序列的频谱。

$$F(\mathrm{j}\Omega) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} f[k]\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\Omega k}, \quad -\infty < \Omega < \infty \tag{14}$$

例：根据定义式，编写程序，计算并绘制当 $a = 0.7$ 时单边指数序列的频谱图。

$$f[k] = a^k u[k] \tag{15}$$

程序如下：

```
a = 0.7;
k = 0 : 15;
fk = power(a, k);
Omega = -4*pi : (2*pi)*0.01 : 4*pi;
F = fk * exp(-1j*k'*Omega);
Mag = abs(F);
Pha = angle(F);
subplot(311)
stem(k, fk, '-k', 'linewidth', 1.5)
xlabel('$k$', 'interpreter', 'latex')
ylabel('$f[k]$', 'interpreter', 'latex')
subplot(312)
plot(Omega/pi, Mag, '-b', 'linewidth', 1.5)
ylabel('$F(\mathrm{j}\Omega)$', 'interpreter', 'latex')
subplot(313)
plot(Omega/pi, Pha, '-r', 'linewidth', 1.5)
xlabel('$\Omega (\pi)$', 'interpreter', 'latex')
ylabel('$\varphi(\Omega)$', 'interpreter', 'latex')
```

注意：计算定义式中的累加时，直接使用了矩形运算，利用循环也可以实现。

利用一维快速 Fourier 变换函数 `fft()` 可求离散序列的频谱，对应的反变换函数为 `ifft()`，调用格式为

```
F = fft(f, N);
f = ifft(F, N);
```

其中，N 表示计算 Fourier 变换或者 Fourier 反变换的点数。

例： 已知一个 8 点的时域非周期离散序列 $\delta[k-k_0]$，$k_0=1$，用 $N=32$ 点进行 Fourier 变换，绘制时域信号图和频谱图。程序如下

```
k0 = 1;
k = 0 : 7;
fk = ( k - k0 == 0 );
stem(k, fk, 'color', 'black', 'linewidth', 1.5)
figure
N = 32;
Fm = fft(fk, N);
Mag = abs(Fm);
Pha = angle(Fm);
subplot(2, 1, 1)
stem(0:N-1, Mag, 'color', 'blue', 'linewidth', 1.5)
axis([0 N-1 0 1.5])
subplot(2, 1, 2)
stem(0:N-1, Pha, 'color', 'red', 'linewidth', 1.5)
axis([0 N-1 -4 4])
```

例： 已知一个 8 点的时域非周期离散序列 $u[k-k_0]$，$k_0=4$，用 $N=32$ 点进行 Fourier 变换，绘制时域信号图和频谱图。程序如下

```
k0 = 4;
k = 0 : 7;
fk = ( k - k0 >= 0 );
stem(k, fk, 'color', 'black', 'linewidth', 1.5)
figure
N = 32;
Fm = fft(fk, N);
Mag = abs(Fm);
Pha = angle(Fm);
subplot(2, 1, 1)
stem(0:N-1, Mag, 'color', 'blue', 'linewidth', 1.5)
axis([0 N-1 0 5])
subplot(2, 1, 2)
stem(0:N-1, Pha, 'color', 'red', 'linewidth', 1.5)
axis([0 N-1 -4 4])
```

如果在上述程序中 `Fm = fft(fk, N)` 的下一行添加

```
Fm = fftshift(Fm);
```

则频谱图中的零频分量将移到频谱中心，即对 `fft()` 的输出进行重新排列，直接将 `Fm` 中的左右两半交换，产生新的 `Fm`。

扩展：请尝试设置 `fft()` 中的不同点数 N，观察现象，解释原因。

4 实验内容

1. 已知某周期信号的 Fourier 系数为

$$C_n = \frac{A\tau}{2T_0}\mathrm{Sa}^2\left(\frac{n\omega_0\tau}{4}\right)$$

   请自行设置信号幅值 A、脉冲宽度 τ 和周期 T_0，并完成：
   (1) 绘制该信号的频谱图；
   (2) 设置不同的 τ 和 T_0 进行实验，分析信号脉宽和信号周期对频谱的影响；（提示：取 $T_0 = 2\tau$，$T_0 = 4\tau$，$T_0 = 8\tau$。）
   (3) 利用不同次数的谐波分量叠加去近似原时域信号，绘制波形图，观察并分析 Gibbs 现象。
2. 已知信号 $f(t) = 5\mathrm{Sa}(2t)$，请完成：
   (1) 利用 `fourier()` 函数求该信号的频谱函数 $F(\mathrm{j}\omega)$，并绘制频谱图；
   (2) 利用第 1 问求得的频谱函数 $F(\mathrm{j}\omega)$ 和 `ifourier()` 函数验证 Fourier 变换的时移特性。（提示：将对 $F(\mathrm{j}\omega)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega t_0}$ 作 Fourier 反变换的结果与 $f(t-t_0)$ 进行比较，用图形比较。）
3. * 无限长信号频谱的计算。
   (1) 利用 `fourier()` 函数求信号 $f(t) = \cos(20\pi t)$ 的理论频谱 $F(\mathrm{j})\omega$；
   (2) 工程实际中只能获得有限长信号，设信号长度为 3，可表示为 $f_w(t) = \cos(20\pi t)[u(t) - u(t-3)]$，利用 MATLAB 中求 $f_w(t)$ 的频谱 $F_w(\mathrm{j}\omega)$，绘制频谱图；
   (3) 比较理论的 $F(\mathrm{j})\omega$ 和实际的 $F_w(\mathrm{j}\omega)$，试给出理论上的解释。
4. 已知一个 12 点的时域非周期离散序列 $f[k] = 0.9^k(u[k-1] - u[k-8])$，用 $N = 64$ 点进行 Fourier 变换，绘制时域信号图和频谱图。
5. * 利用 DTFT 的定义式，求离散序列 $0.8^k \cdot \sin(k)$ 的频谱，并绘制图形。

5 实验报告

1. 简述实验目的和实验原理。
2. 完成实验内容部分的第 1、2、4 题，要求独自完成程序编写和绘图，写入报告。
3. 选做实验内容部分第 3、5 题，完成的内容也写入报告。
4. 总结实验过程，记录心得体会。

参考文献

[1] 陈后金, 胡健, 薛健. 信号与系统 (第三版). 北京: 清华大学出版社, 2017.

[2] 龚晶, 许凤慧, 卢娟, 等. 信号与系统实验. 北京: 机械工业出版社, 2022.

[3] 徐亚宁, 唐璐丹, 王旬, 等. 信号与系统分析实验指导书 (MATLAB 版). 西安: 西安电子科技大学出版社, 2012.