

山东科技大学通信工程 2013 级信号与系统课程设计

基于 MATLAB 的回波信号的产生与消除

班级：通信工程 2013-2 姓名：张玉帅

摘要

回波存在于我们生活中的各个方面，它是受反射面反射，同声源反向传播的声波，常常延迟于原声波一定时间。回波是现代通信中常见的干扰，但是利用回波的特性我们也可以实现测量距离的作用。

MATLAB 在数值计算方法、图形功能、用户界面设计编程手段和工具等方面有着重要的应用，随着 MATLAB 应用领域不断扩大，使其成为一种影响大、流行广的科学计算语言。

本次课程设计，将基于 MATLAB 实现对于声音信号中回波信号的产生与消除。首先，绘制其时域波形，对此音频信号用 FFT 作谱分析；然后，在原信号的基础上叠加其延时衰减的分量产生带有回声的声音信号并绘制其时域波形，对其进行 FFT 频谱分析，绘制频谱图；接下来，采用相关分析法从带有回声的声音信号中估计反射物的距离；最后，在知道系统函数的基础上，利用一维数字滤波器实现对于声音信号的恢复。

经过本次课程设计，我实现了所有的预定效果，并且学习到了关于采样、相关分析、FFT 分析和数字滤波器设计的相关知识。

关键词：回波信号；数字信号处理；频谱分析；MATLAB；相关分析

目录

- 1 设计目的.....3
- 2 设计原理.....3
- 3 设计过程.....4
 - 3.1 声音文件的导入与 FFT 变换.....4
 - 3.2 回声信号的产生与 FFT 变换.....5
 - 3.3 反射物的距离测算.....6
 - 3.4 从回声信号中恢复原信号.....7
- 4 调试分析.....8
 - 4.1 原始信号调试与分析.....8
 - 4.2 回声信号的调试与分析.....9
 - 4.3 反射物距离测算结果.....10
 - 4.4 滤波信号的调试与分析.....10
- 5 结果分析与体会.....12
- 参考文献.....12
- 附录13
 - 附录 A 原音信号及其 FFT 变换和回声信号的产生13
 - 附录 B 距离求解和还原信号14
 - 附录 C 滤波（恢复）信号的图像实现15

1 设计目的

本课程设计任务是用 MATLAB 语言编程实现回波信号的产生和消除。其要求主要有以下内容：

①信号的采集

录制一段音频（如歌曲、说话声等），绘制其时域波形，对此音频信号用 FFT 作谱分析。

②回声信号的产生

在录制信号基础上产生带有回声的声音信号并绘制其时域波形，对其进行 FFT 频谱分析，绘制频谱图。

③从带有回声的声音信号中恢复原信号

设计合适的滤波器，对带有回声的声音信号进行滤波，恢复原信号。绘制所设计滤波器的幅频和相频特性，及滤波后的信号的时域波形和频谱图。

④从带有回声的声音信号中估计反射物的距离。采用相关分析法从带有回声的声音信号中估计反射物的距离。

2 设计原理

本系统主要是实现了将声音信号中加入回声，模拟自然回声信号。然后根据回声信号的特性，根据采样率和信号长度求出回声的延迟时间，然后根据声速为 340m/s 来求出反射面距离声源的距离，最后将带有回声的信号恢复成原来的声音信号。

本次课程设计，主要利用了采样频率的概念、采样位数的概念、采样定理、相关函数的原理。现在做一些简单介绍。

采样频率：也称为采样速度或者采样率，是指录音设备在一秒钟内对声音信号的采样次数，采样频率越高声音的还原就越真实越自然。通常 8000Hz 即可满足声音需求。

采样位数：即采样值或取样值，用来衡量声音波动变化的参数，是指声卡在采集和播放声音文件时所使用数字声音信号的二进制位数。

采样定理：在进行模拟/数字信号的转换过程中，当采样频率 $f_{s,max}$ 大于信号中最高频率 f_{max} 的 2 倍时 ($f_{s,max} \geq 2f_{max}$)，采样之后的数字信号完整地保留了原始信号中的信息，一般实际应用中保证采样频率为信号最高频率的 5~10 倍；采样定理又称奈奎斯特定理。

相关函数： $X(t)$ 为随机过程， $a(t) = EX(t)$ 为期望，则相关函数定义为：

$B(s, t) = E(X(s) - a(t))(X(t) - a(t))$ 若 $X(t) = Y(t) + iZ(t)$, Y, Z 为实过程, 则称 $X(t)$ 为复随机过程, 相关函数定义为: $B(s, t) = E(X(s) - a(t))(X(t) - a(t))$ (后一个括号取共轭)

3 设计过程

3.1 声音文件的导入与 FFT 变换

声音文件是由录音机录音, 采用的是 wav 格式, 采样频率是 44100Hz, 由于计算机配置问题, 无法处理采样率为 44100Hz 的音频文件。因此为了能够处理声音文件, 我将声音文件采样率降为 8000Hz。在此采样率下, 能够满足声音的识别。

实现声音降低采样率的程序清单如下:

```
x=wavread('2015122722340821'); %文件名为 2015122722340821.wav。读入信号, 采样率和采样位数。
```

```
y=resample(x, 8000, 44100) %采样从 44100hz 降到 8000hz
```

由于录制的声音是单声道声音, 因此存储在 Matlab 中的 y 是一个一维矩阵。然后我们将其按照时间为自变量画出其幅值图。

```
sigLength=length(y); %信号长度
```

```
t=(0:length(y)-1)/Fs; %计算时间轴
```

```
subplot(3,1,1);plot(t,y),xlabel('Time(s)'),ylabel('Amplitude'),title('时域关系图'); %在第一个窗口画波形
```

```
grid on;
```

Matlab 有现成的快速傅里叶变换 (FFT) 函数。因此只需要调用 Matlab 中的 FFT 函数, 即可实现对于该声音信号在时域里面的函数进行 FFT 变换到频域之中。具体实现的程序清单如下:

```
n=0:sigLength-1; %自变量取值范围
```

```
Y=fft(y,length(y)); %在 sigLength 这个有限区间内做快速傅立叶变换
```

```
f=Fs*n/sigLength; %自变量 (频率)
```

```
subplot(3,1,2);plot(f,abs(Y));xlabel('Frequency(Hz)'),title('经过快速傅里叶变换之后的幅频特性'), grid on; %画出幅频特性
```

```
subplot(3,1,3); %第三张图
```

```
plot(f,angle(Y)),grid on,xlabel('频率'); ylabel('相位'); title('相频特性'); %画出相频特性图像
```

至此，我已经完成了原始信号在时域和频域的变换。为了能够更形象的展示出信号在时域和频域中的关系，我将时域图和频域图合二为一，展示在一张三维图像上。其程序清单如下：

```
figure(2)%显示在第二张图
Nw=20; %窗函数长 window length
L=Nw/2; %窗函数每次移动的样点数
Ts=round((sigLength-Nw)/L)+1; %计算把数据 y 共分成多少段
nfft=512; % FFT 的长度
TF=zeros(Ts,nfft); %将存放三维图谱，先清零
for i=1:Ts
    xw=y((i-1)*L+1:i*L+L); %取一段数据
    temp=fft(xw,nfft); % FFT 变换
    %temp=fftshift(temp); %频谱以 0 频为中心
    TF(i,:)=temp; %把谱图存放在 TF 中 代表 TF 矩阵中的第 i 行
end
fn=(1:nfft)*Fs/nfft;
tn=(1:Ts)*Nw/2/Fs;
[T,F]=meshgrid(tn,fn);
mesh(F,T,abs(TF.')).'; %三维绘图
axis tight;
title('原始信号三维时频图');
ylabel('Time(s)');
xlabel('Frequency(Hz)');
grid on;
```

3.2 回声信号的产生与 FFT 变换

在已有声音信号y的基础上产生带回声的声音信号，可以表达为在原信号的基础上叠加其延时衰减的分量，由此可以产生其回声。

假设在只有一个回声的情况下，其模型可以简化为为：

$$z(n)=x(n)+ax(n-N) \quad (1)$$

其中，a为反射系数，意为反射信号幅值上衰减的结果。N为每一信号延迟时间，n为时间点。

在这里，我取a为0.5，N为2500。根据

$$\Delta t=N/fs \quad (2)$$

我们可以知道，延迟时间大约是0.3125s。

程序清单如下：

N=2500;%a为反射系数; N为每一信号延迟时间。

a=0.5

z=[y;zeros(N,1)]+a*[zeros(N,1);y];%把原始信号和回声信号相叠加

audiowrite('huisheng.wav',z,Fs);%我们将回声信号保存为huisheng.wav

实现回声信号的时域波形以及频域的幅频特性和相频特性的过程与原始信号的类似,因此在此部分不再做累述。

3.3 反射物的距离测算

在本课程设计中,由于回声信号是我们自己加上去的,因此我们就可以直接知道延迟时间是多少,并由此可以计算出距离。但在实际情况中,由于回声信号是由实际存在的反射面反射产生,而在测量距离的时候,我们并不知道关于反射物的任何信息,也不知道声音信号的相关信息。因此这就相当于我们既不知道延迟时间 Δt ,也不知道N和反射系数a。由此可知,我们必须求出N来,再根据公式(2)求得 Δt ,再求距离。

要求出N,我们需要相关分析法来求解。

对于信号 $x(n)$,其长度为N,其求得的自相关函数为 $r(m) = \sum_{n=0}^{N-m} x(n)x(n+m)$,其中m的范围为 $-(N-1)$ 到 $N-1$,而且显然是左右对称的。

由于自相关函数是对函数本身在两个时刻 t_1, t_2 的相关程度的一种衡量标准,对于加回声后信号 $z(n)=y(n)+ay(n-N)$, $y(n)$ 是由 $y(n)$ 与它的一个衰减延时 $ay(n-N)$ 叠加而成,因此相关函数是函数本身相关程度的一种衡量,可以看到, $y(n)$ 的自相关函数将出现几个极值点,对于 $y(n)$ 极值点应该出现在 $m=0, m=\pm N$,这时候相关程度相对较大。所以只要求出两个极值点之间的距离就能得到N。

由于Matlab自带函数库中有自相关函数`xcorr`,因此我们可以直接利用`xcorr`来进行相关求解即可,节省了很多步骤。关于求解N的程序清单如下:

```
r=xcorr(z);%r即为信号的自相关函数
```

```
plot(r),grid on,title('z的自相关函数');
```

```
[u,v]=max(r);
```

```
r1=r;
```

```
r1(v-100:v+100,1)=0;
```

```
[u1,v1]=max(r1);
```

```
N1=v-v1;%此处的N1即为所之前设置的N
```

至此,我们求出了N, N=2500。

设反射物距离为s,声速为v,则有

$$2*s=v*t \quad (3)$$

得

$$s=v*t/2 \quad (4)$$

3.4 从回声信号中恢复原信号

如 3.3 所述，虽然我们的设计中的回声信号是设计好参数然后添加到原始信号上，但是实际情况中我们是不会得到这些信息的。根据回声信号与原始信号、回声之间的关系公式(1)所知，要恢复原声音信号，我们需要知道 N 和反射系数 a 。由于 N 在 3.3 中我们已经求出。因此接下来我们只需要求解反射系数 a ，然后再设计一个滤波器将回声滤除，即可得到我们想要的原信号。

接下来来求解 a 。由于已知 $z(n)$ 是 $y(n)$ 前补零与后补零的叠加，于是有

$$z(1)=y(1)$$

$$z(1+N)=y(1+N)+ay(1)$$

$$z(1+2N)=y(1+2N)+ay(1+N)$$

...

$$z(1+(k-1)N)=y(1+(k-1)N)+ay(1+(k-2)N)$$

$$z(1+kN)=ay(1+(k-1)N)$$

设 $z(n)$ 的长度为 L ，对于 k ，则满足 $1+kN < L$, $1+(k+1)N > L$

现在逐级代入，可得

$$1/a * z(1+kN)$$

$$= y(1+(k-1)N)$$

$$= z(1+(k-1)N) - ay(1+(k-2)N)$$

$$= z(1+(k-1)N) - az(1+(k-2)N) + a^2 y(1+(k-3)N)$$

=...

$$= z(1+(k-1)N) - az(1+(k-2)N) + a^2 z(1+(k-3)N) - a^3 z(1+(k-4)N) + \dots a^k z(1)$$

即

$$1/a * z(1+kN) = z(1+(k-1)N) - az(1+(k-2)N) + a^2 z(1+(k-3)N) - a^3 z(1+(k-4)N) + \dots a^k z(1)$$

因此我们可以以此为方程来求解 a 。程序清单如下：

```
for k=1:11
    t(k)=(-1)^(k*z(2500*(k-1)+1,1));
end
a1=roots(t);
for k=1:11
    t(k)=(-1)^(k*z(2500*(k-1)+2,1));
end
a2=roots(t);
```

我们将把不合理的根舍掉，再根据由于从 $z(1)$ 和 $z(2)$ 开始的根 a 都应该是一致的，我们得出 a 的取值应该是 0.5。这和我们假设的结果是符合的。因此我们求出了 a 。

接下来，我们就得知道了 $z(n)=y(n)+0.5*y(n-2500)$ 。对其求 z 变换，我们可以知道该系统的系统函数为

$$H(z) = \frac{X(z)}{Y(z)} = \frac{1}{1 + 0.5 * z^{-2500}}$$

Matlab 中有 filter 函数，它是一个一维数字滤波器，它既可以实现 IIR（递归滤波器）滤波，又可以实现 FIR（有限长单位冲激响应滤波器）滤波。

Filter 函数的滤波是通过一个差分方程实现的，这个方程如下：

$$a(1)*y(n) = b(1)*x(n) + b(2)*x(n-1) + \dots + b(nb+1)*x(n-nb) - a(2)*y(n-1) - \dots - a(na+1)*y(n-na) \quad (5)$$

filter 函数的使用格式为 $Y = \text{filter}(B, A, X)$ ，输入 X 为滤波前序列， Y 为滤波结果序列， B/A 提供滤波器系数， B 为系统函数的分子多项式，即 $b(1), b(2) \dots b(nb+1)$ ， A 为系统函数的分母多项式， $a(1), a(2) \dots a(na+1)$ 。输出结果长度等于 X 的长度。若 $a=1$ ，此时表示 FIR 滤波器，否则就是 IIR 滤波器。所以这里我们采用的是 FIR 滤波器。

通过滤波器滤除回声的程序清单如下：

```
a=[1,zeros(1,2499),0.5];%系统函数的分母多项式
b=[1];%系统函数的分子多项式
xhf=filter(b,a,z);%经滤波的信号
wavwrite(xhf,'huifuxinhao')%写入文件
```

实现滤波信号的时域波形以及频域的幅频特性和相频特性的过程与原始信号的类似，因此在此部分不再做累述。

4 调试分析

4.1 原始信号调试与分析

由于原始信号是采样率为 44100Hz 的信号，因此当信号被 Matlab 读入后是一个一维矩阵。经过降低采样率处理之后，信号变成 8000Hz 的单声道信号。接下来，经过如 3.1 中处理之后，得出来的图像如图 4-1 所示。

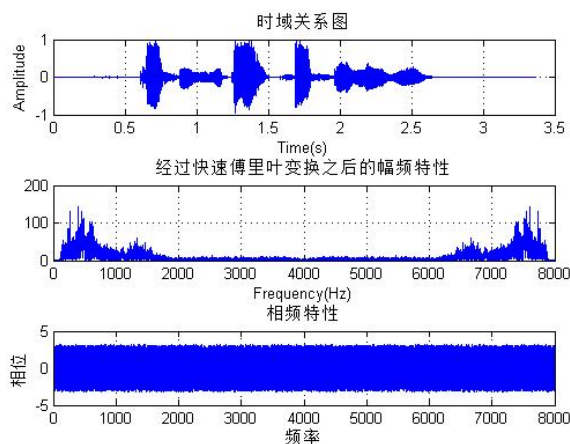


图 4-1 原始信号的时域与幅频特性、相频特性图（实际打印图像要大一点）

根据图 4-1 中幅频特性图，我们可以知道声音主要集中在频率分布的两端。接下来，为了更好的显示出时域和频域的关系，我特别制作了如图 4-2 所示的三维立体图。

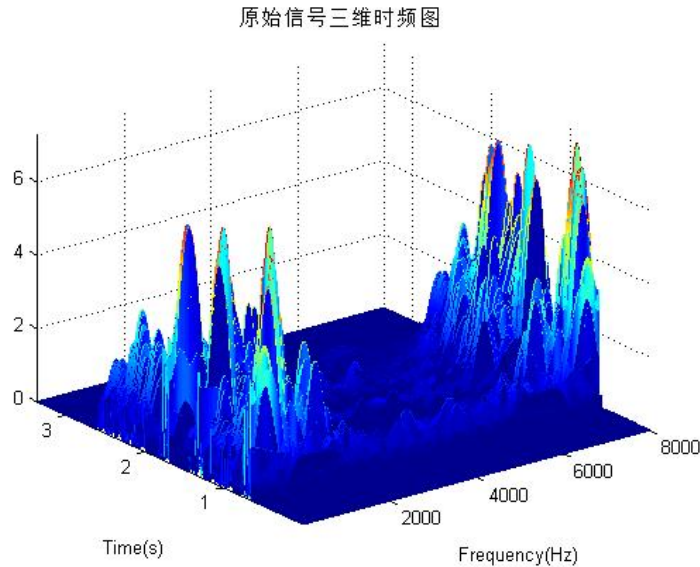


图 4-2 原始信号三维时频图（实际打印图像要大一点）

4.2 回声信号的调试与分析

关于回声信号的产生已经在 3.2 做出了详细的介绍。经过延迟信号的叠加之后，我们将信号的时域图像、幅频特性、相频特性画出如图 4-3 所示。

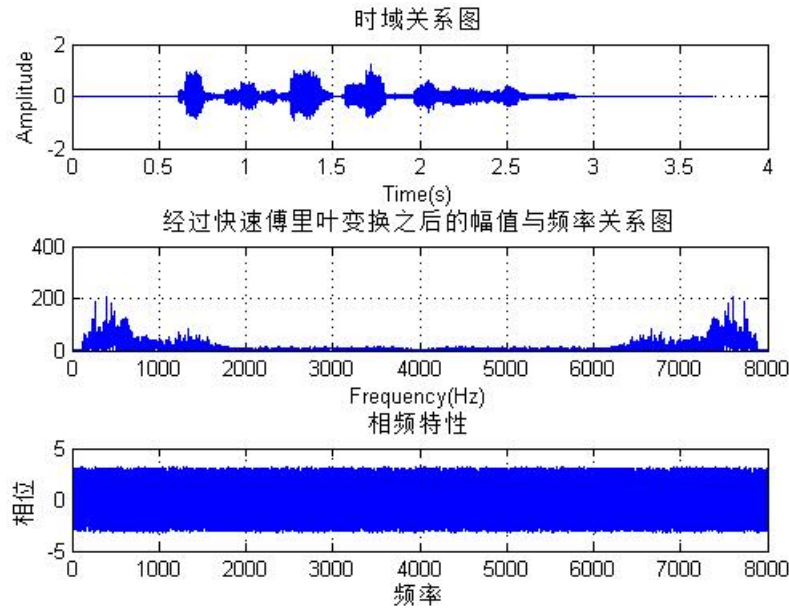


图 4-3 回声信号时域、幅频特性、相频特性（实际打印图像要大一点）

与图 4-1 相比较，在时域、频域上我们均可以看出有了很明显的变换。经过试听生成的音频文档，发现回声效果较好。

4.3 反射物距离测算结果

由 3.3 我们可以画出信号的相关函数图像，如图 4-4 所示。

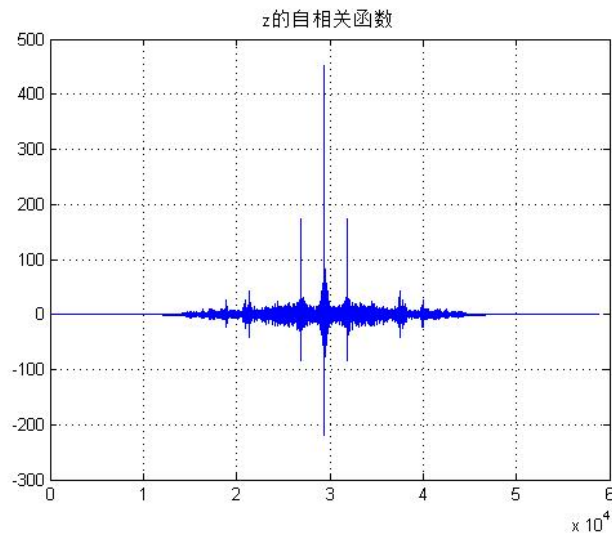


图 4-4 回声信号的自相关函数

根据程序，我们计算出 N 为 2500，根据公式 (2) 我们又求出 Δt 为 0.3125s，这与添加回声信号时设置相同，因此可以验证利用 3.3 方法求解是正确的。

接下来，我们将 $v=340\text{m/s}$ ， $t=0.3125\text{s}$ 代入公式 (4)，可以得出反射面距离声源距离 s 为 53.125m。

4.4 滤波信号的调试与分析

由 3.3 我们已经求出了 N 的值，接下来利用 3.4 中所述，我们输入代码求出 a 的值。关于 $z(1)$ 的根如下：

```
a1 =  
9.9857  
-7.5681  
-1.3229 + 0.8025i  
-1.3229 - 0.8025i  
0.3464 + 1.2169i  
0.3464 - 1.2169i  
1.3237  
0.5000  
0.3989
```

0.0033

关于 $z(2)$ 的根如下：

$a_2 =$

12.1049

-7.7219

-1.0045 + 0.6492i

-1.0045 - 0.6492i

1.2332

0.3746 + 1.0278i

0.3746 - 1.0278i

0.5000

0.0503

-0.0155

由此我们可以得出 $a=0.5$ ，这与我们在 3.2 中所加回声信号的设置是一致的，因此我们可以验证这一方法是正确的。

接下来，我们对滤波出来的信号进行处理，图 4-5 是恢复出来的信号的时域、幅频特性、相频特性图像。

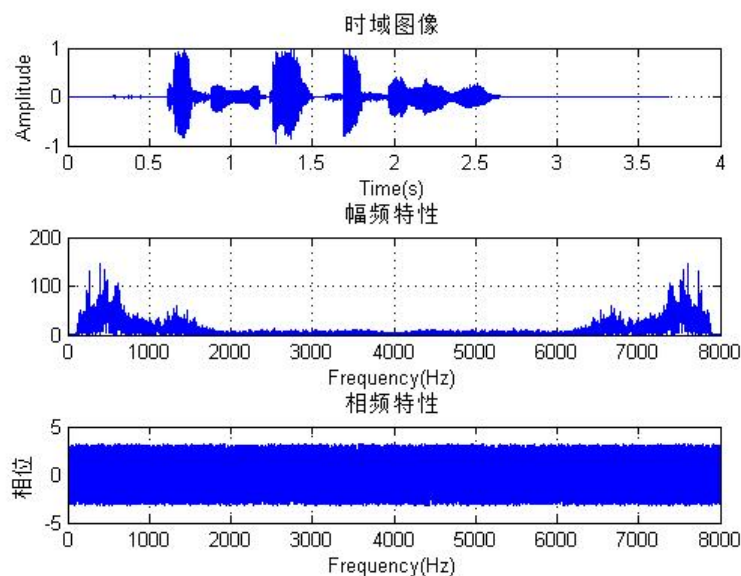


图 4-5 滤波信号的时域、幅频特性、相频特性图像

通过比较图 4-5 和图 4-1，我们发现，其时域图像、幅频特性图像、相频特性图像都从肉眼上无区分出差别。再通过试听生成的音频文件，发现回声人耳无法听到回声。因此，去掉回声的这一步骤实现的效果很好。

5 结果分析与体会

这次课程设计，我完成了课题所给定的所有任务。在整个过程中，我认为有一点对于从回声信号中恢复原信号来说非常重要，那便是 N 与 a 的求解，而不应该把它们当做已知来直接滤波得到原序列。若是直接利用前问中的 N 和 a 求解，则与实际情况就很不相符。

本次设计，我根据题目要求，利用了叠加延时信号产生回声，然后又利用相关分析法分析出来了延时信号的相关参数，利用 FIR 滤波器过滤了回声信号，还原出来的信号还原度非常高，效果非常好，几乎与原信号完全一样。

另外，在整个课程设计过程中，由于知识的不足和个人能力的缺陷，仍然遇到了很多问题。比如，对于 wav 音频格式的不了解，在录制了一个采样率为 44100Hz 的音频文件之后直接导入 Matlab 软件，在进行处理时发现因为计算机性能不足导致计算机死机。为了避免这个问题，我决定将音频文件的采样率降低为 8000Hz。经过降低采样率处理之后，对于音频的处理已经能够正常进行了，问题得到了解决。

但是，虽然本次课程设计极力模拟现实中回波情况，但是依然是理想化手动添加的回声信号。由于现实生活中回声信号更加复杂，其两个参数变换很大，很难唯一确定，所以在实际信号的还原过程中可能存在还原度不高效果差等缺点。

参考文献

- [1] 程佩青. 数字信号处理教程，北京：清华大学出版社, 2007.
- [2] 张德丰. 详解MATLAB数字信号处理，北京：电子工业出版社，2010.
- [3] 王彬. MATLAB数字信号处理，北京：机械工业出版社，2010.
- [4] 吴大正. 信号与线性系统分析（第四版），北京：高等教育出版社，2010
- [5] 李晓峰. 随机信号分析（第四版），北京：电子工业出版社，2011
- [6] 陈怀琛 吴大正 高西全. MATLAB及在电子信息课程中的应用，北京：电子工业出版社，2011

附录

附录 A 原音信号及其 FFT 变换和回声信号的产生

```
%OS: Windows 10 x64%
%Designed By Yushuai Zhang @ SDUST 2015/12/29-2016/1/8%
% <http://www.yushuai.me 小奥の专属领地>%
%此程序包含以下功能: 1. 原声音信号的代入和时域频域图像。2. 加入回声信号之后的时域频域图像。%
%y为原始音频信号, z为加入回声之后的音频信号%
[y, Fs]=wavread('2015122722340821'); %读出信号, 采样率和采样位数。
figure(1);%图1
sigLength=length(y);
t=(0:length(y)-1)/Fs; %计算时间轴
subplot(3,1,1):plot(t,y),xlabel('Time(s)'),ylabel('Amplitude'),title('时域关系图');%在第一个窗口画波形
grid on;
n=0:sigLength-1;
Y=fft(y,length(y)); %在sigLength这个有限区间内做快速傅立叶变换
mag=abs(Y);
f=Fs*n/sigLength;
subplot(3,1,2):plot(f,abs(Y));xlabel('Frequency(Hz)'),title('经过快速傅里叶变换之后的幅频特性');
grid on;
subplot(3,1,3);
plot(f,angle(Y)); grid on;
xlabel('频率'); ylabel('相位'); title('相频特性');
%以下是画出三维图像, 展示时域和频域的关系%
figure(2)
Nw=20; %窗函数长 window length
L=Nw/2; %窗函数每次移动的样点数
Ts=round((sigLength-Nw)/L)+1; %计算把数据y共分成多少段
nfft=512; % FFT的长度
TF=zeros(Ts,nfft); %将存放三维图谱, 先清零
for i=1:Ts
    xw=y((i-1)*L+1:i*L+L); %取一段数据
    temp=fft(xw,nfft); % FFT变换
    %temp=fftshift(temp); %频谱以0频为中心
    TF(i,:)=temp; %把谱图存放在TF中 代表TF矩阵中的第i行
end
```

附录 B 距离求解和还原信号

```
%OS: Windows 10 x64%
%Designed By Yushuai Zhang @ SDUST 2015/12/29-2016/1/8%
% <http://www.yushuai.me 小奥の专属领地>%
%此程序包含以下功能: 1. 距离的求解。2. 求a。3. 还原信号%
%y为原始音频信号, z为加入回声之后的音频信号%
%现在回声已经添加完毕, 开始求解反射物的距离%
[z Fs]=wavread('huisheng.wav')
r=xcorr(z);
figure(1);
plot(r);grid on;title('z的自相关函数');
[u,v]=max(r);
r1=r;
r1(v-100:v+100,1)=0;
[u1,v1]=max(r1);
N1=v-v1;%此处的N1即为所之前设置的的N
%接下来开始求解距离
yt=N1/Fs;%求出延时
sv=340;
juli=sv*yt/2;
for k=1:11
    t(k)=(-1)^k*z(2500*(k-1)+1,1);
end
a1=roots(t);
for k=1:11
    t(k)=(-1)^k*z(2500*(k-1)+2,1);
end
a2=roots(t);
%接下来开始还原声音信号%
a=[1,zeros(1,2499),0.5];
b=[1];
xhf=filter(b,a,z);
wavwrite(xhf,'huifuxinhao')
```

附录 C 滤波（恢复）信号的图像实现

```
%OS: Windows 10 x64%
%Designed By Yushuai Zhang @ SDUST 2015/12/29-2016/1/8%
% <http://www.yushuai.me 小奥の专属领地>%
%此程序包含以下功能：1. 画出时域频域图像%
[y Fs]=wavread('huifuxinhao');
%接下来画时域图像
sigLength=length(y);
t=(0:length(y)-1)/Fs; %计算时间轴
subplot(3,1,1);plot(t,y);xlabel('Time(s)'),ylabel('Amplitude'),title('时域图像');%在第一个窗口画波形
grid on;
n=0:sigLength-1;
Y=fft(y,length(y)); %在sigLength这个有限区间内做快速傅立叶变换
f=Fs*n/sigLength;
subplot(3,1,2);plot(f,abs(Y));
xlabel('Frequency(Hz)'),title('幅频特性');
grid on;
subplot(3,1,3);
plot(f,angle(Y)); grid on;
xlabel('Frequency(Hz)'); ylabel('相位'); title('相频特性');
```