

1 实验要求（尾号4,5学号做）

仿真线性调频脉冲雷达的信号处理。设线性调频带宽为各学生学号末两位数（15），单位为MHz，时宽为200 μ s，占空比10%，雷达载频为10GHz，输入噪声为高斯白噪声。目标模拟分单目标和双目标两种情况，目标回波输入信噪比可变（-35dB~10dB），目标速度可变（0~1000m/s），目标幅度可变（1~100），目标距离可变（0~10000m），相干积累总时宽不大于10ms。单目标时，给出回波视频表达式；脉压和FFT后的表达式；仿真LFM信号自相关函数，说明第一旁瓣高度，4dB输出脉冲宽度；给出脉压和FFT后的输出图形；通过仿真说明各级处理的增益，与各级时宽和带宽的关系；仿真说明脉压时多卜勒敏感现象和多卜勒容限及其性能损失（脉压主旁比与多卜勒的曲线）。双目标时，仿真出大目标旁瓣盖掩盖小目标的情况；仿真出距离分辨和速度分辨的情况。

2 线性调频脉冲雷达原理

2.1 雷达工作原理

雷达发射机的任务是产生符合要求的雷达波形（Radar Waveform），然后经馈线和收发开关由发射天线辐射出去，遇到目标后，电磁波一部分反射，经接收天线和收发开关由接收机接收，对雷达回波信号做适当的处理就可以获知目标的相关信息。

假设理想点目标与雷达的相对距离为 R ，为了探测这个目标，雷达发射信号 $s(t)$ ，电磁波以光速 c 向四周传播，经过时间 R/c 后电磁波到达目标，照射到目标上的电磁波可写成： $s(t - \frac{R}{c})$ 。电磁波与目标相互作用，一部分电磁波被目标散射，被反射的电磁波 $\sigma s(t - \frac{R}{c})$ ，其中 σ 为目标的雷达截面积（Radar Cross Section, 简称 RCS），反映目标对电磁波的散射能力。再经过时间 R/c 后，被雷达接收天线接收的信号为 $\sigma s(t - \frac{2R}{c})$ 。

2.2 线性调频信号（LFM）

脉冲压缩雷达能同时提高雷达的作用距离和距离分辨率。这种体制采用宽脉冲发射以提高发射的平均功率，保证足够大的作用距离；而接收时采用相应的脉

冲压缩算法获得窄脉冲，以提高距离分辨率，较好的解决雷达作用距离与距离分辨率之间的矛盾。

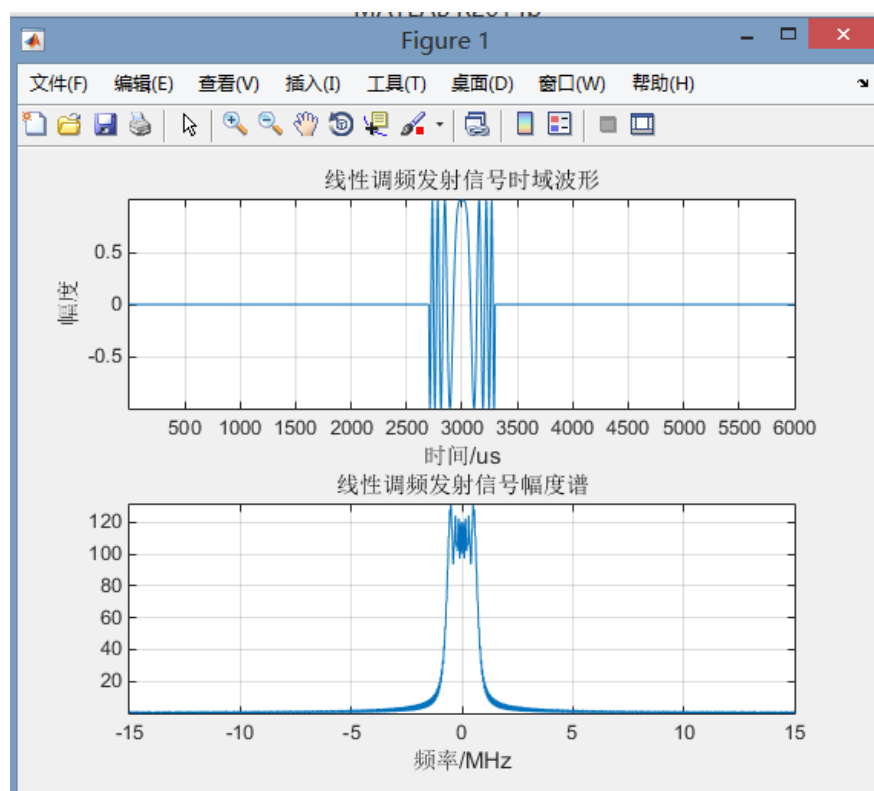
脉冲压缩雷达最常见的调制信号是线性调频（Linear Frequency Modulation）信号,接收时采用匹配滤波器（Matched Filter）压缩脉冲。

3 实验过程

3.1 构造线性调频脉冲雷达发射信号

LFM 信号(也称 Chirp 信号)的数学表达式为: $S(t) = \text{rect}(\frac{t}{T})e^{j2\pi(f_c t + \frac{K}{2}t^2)}$, 式中 $K=\frac{B}{T}$, 是调频斜率。我们去掉载波得到: $s(t)=\text{rect}(\frac{t}{T})e^{j\pi K t^2}$, 其中 $\text{rect}(\frac{t}{T}) = \begin{cases} 1 & |t| \leq T/2 \\ 0 & \text{elsewise} \end{cases}$ 。

我用补零的方式产生线性调频脉冲信号，发射信号时域波形和频域波形如下：

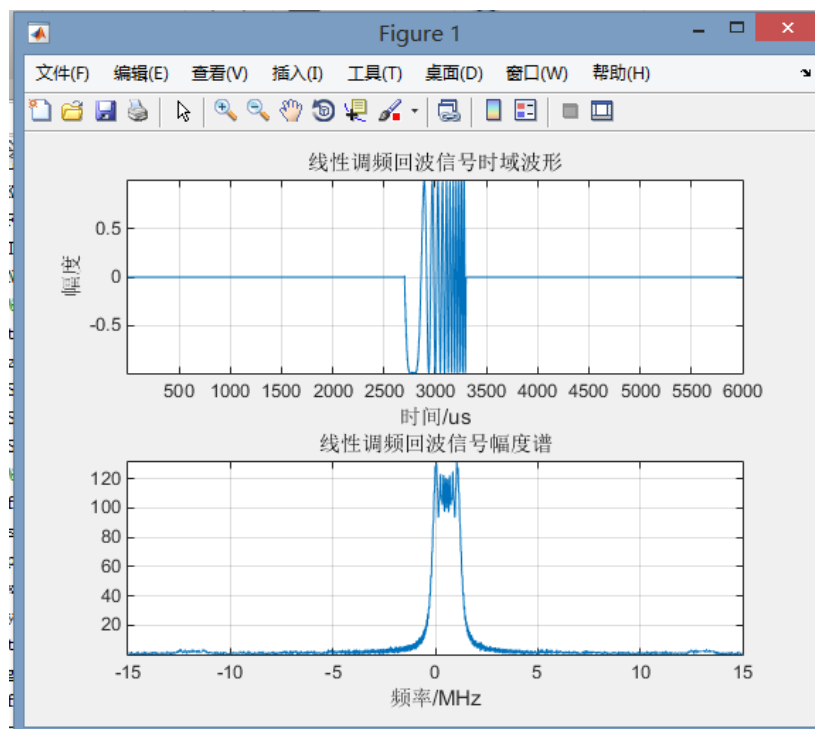


3.2 回波信号

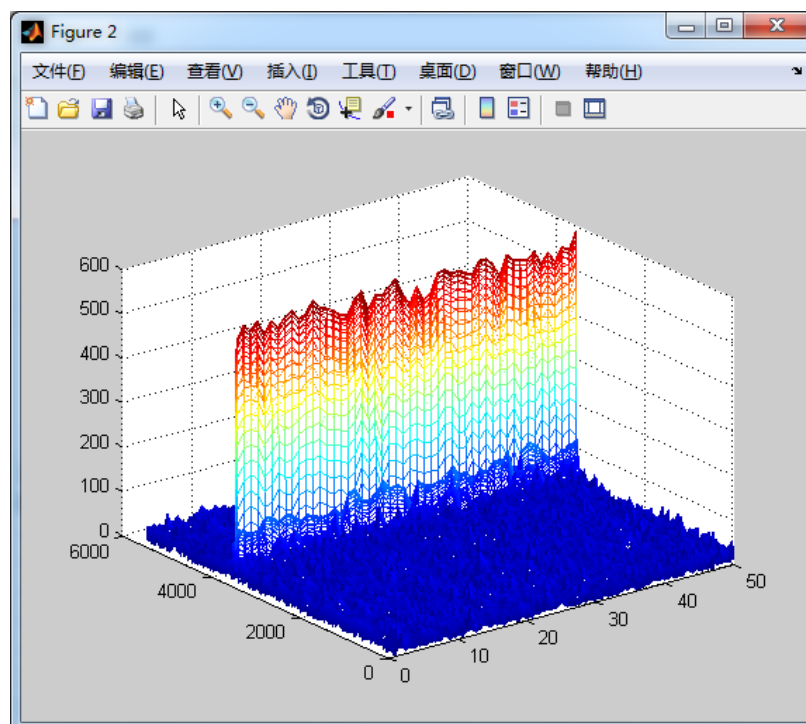
回波信号相对于发射信号延时 33.3us，回波视频表达式为

$$s(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) e^{j\pi K (t-33.3)^2}$$

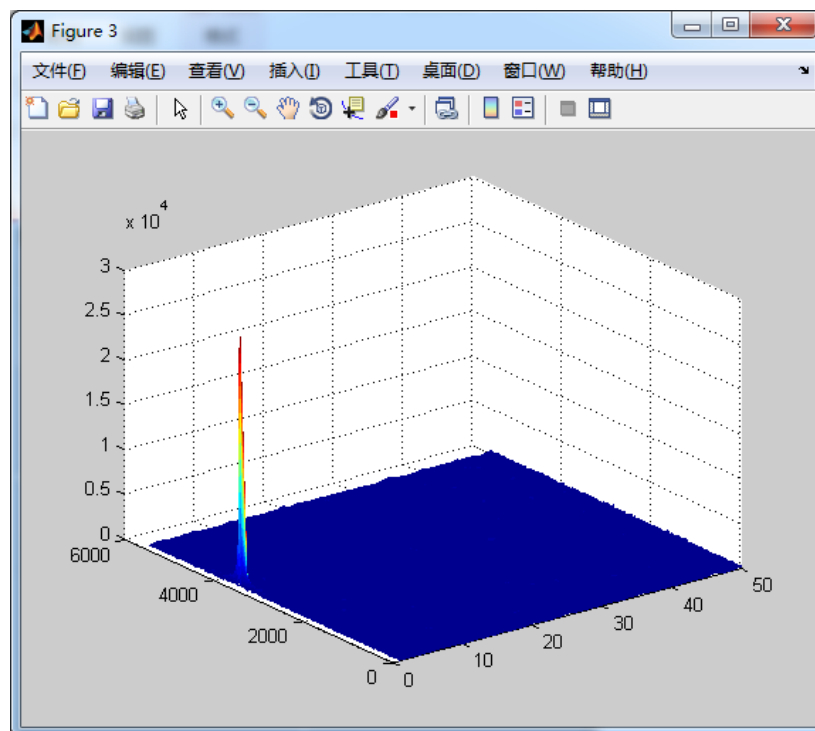
延时 33.3us 的回波信号仿真结果：



脉压波形：



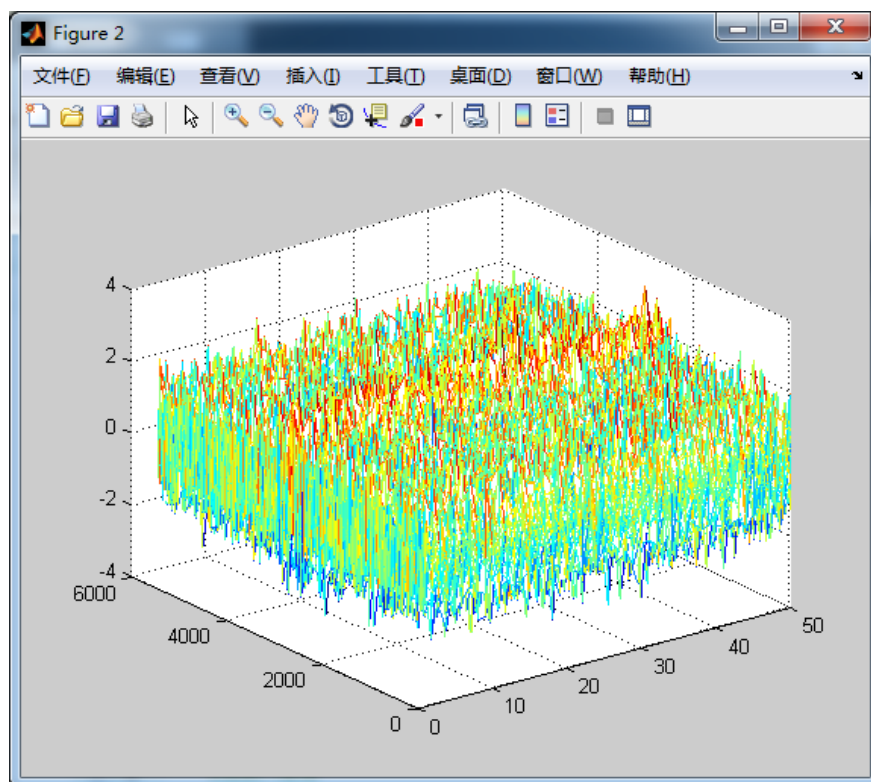
FFT 波形：

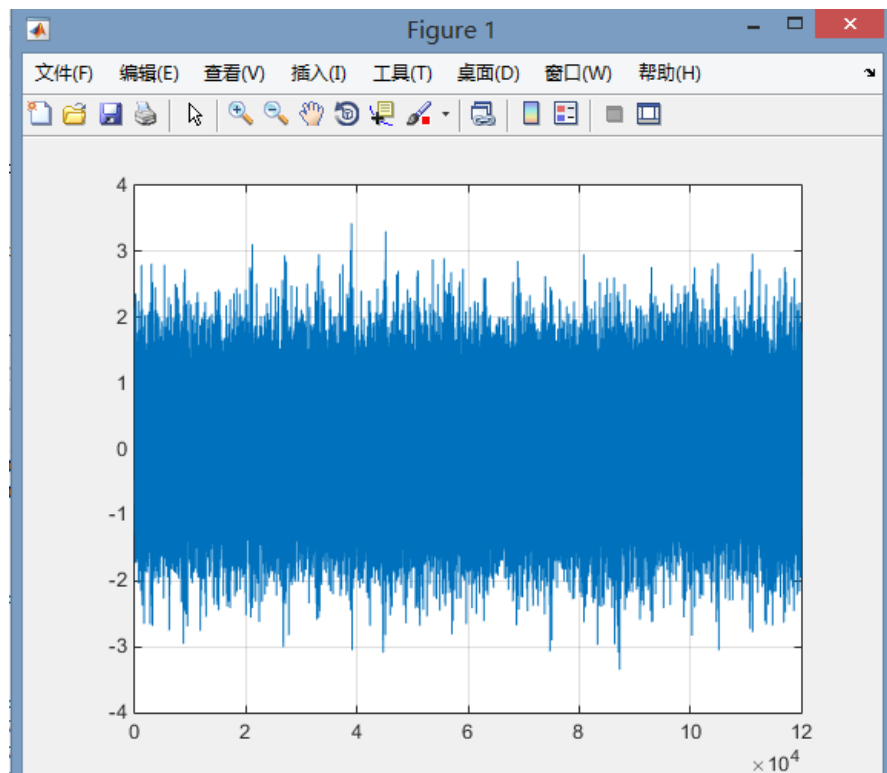


3.3 脉冲压缩

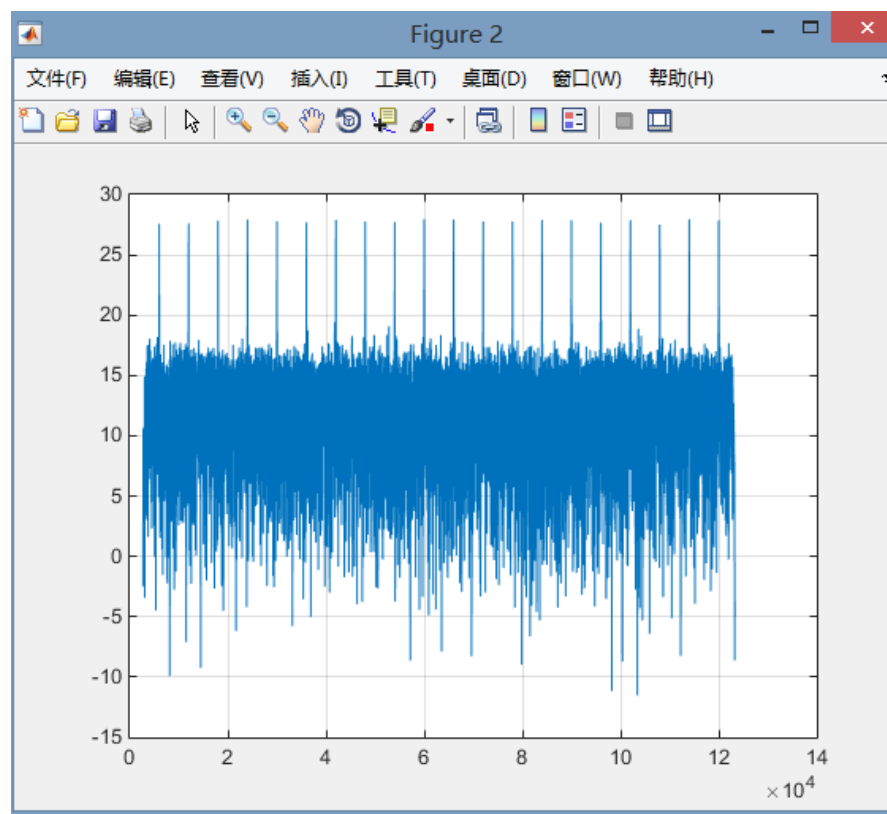
加入白噪声，信噪比为-10dB，相干积累 10ms，进行匹配滤波，仿真结果如下图：

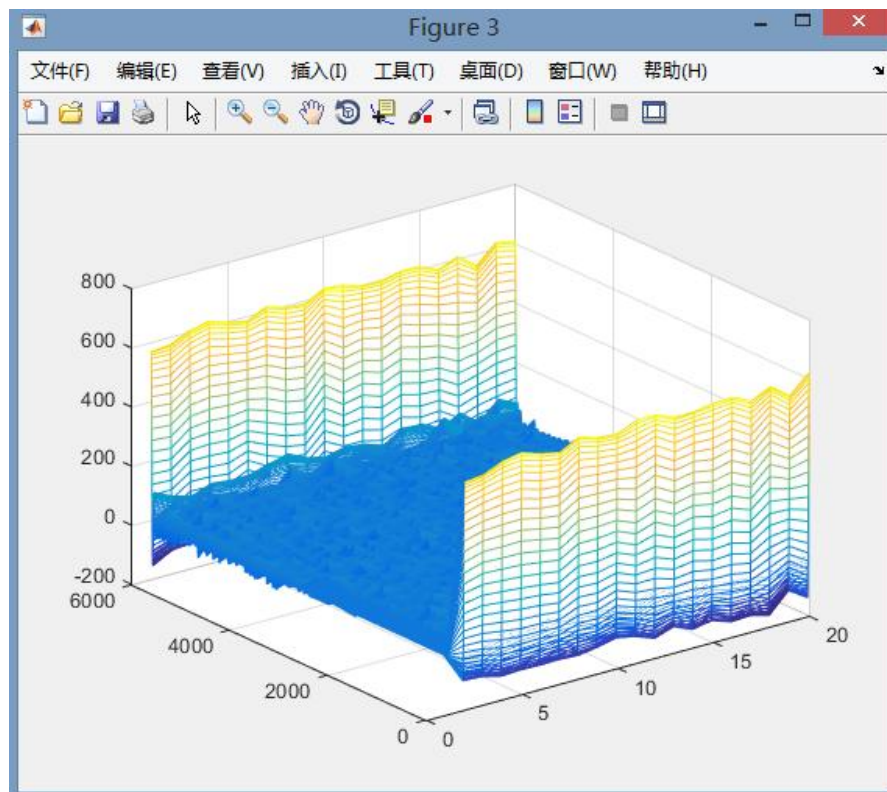
3.3.1 脉压前



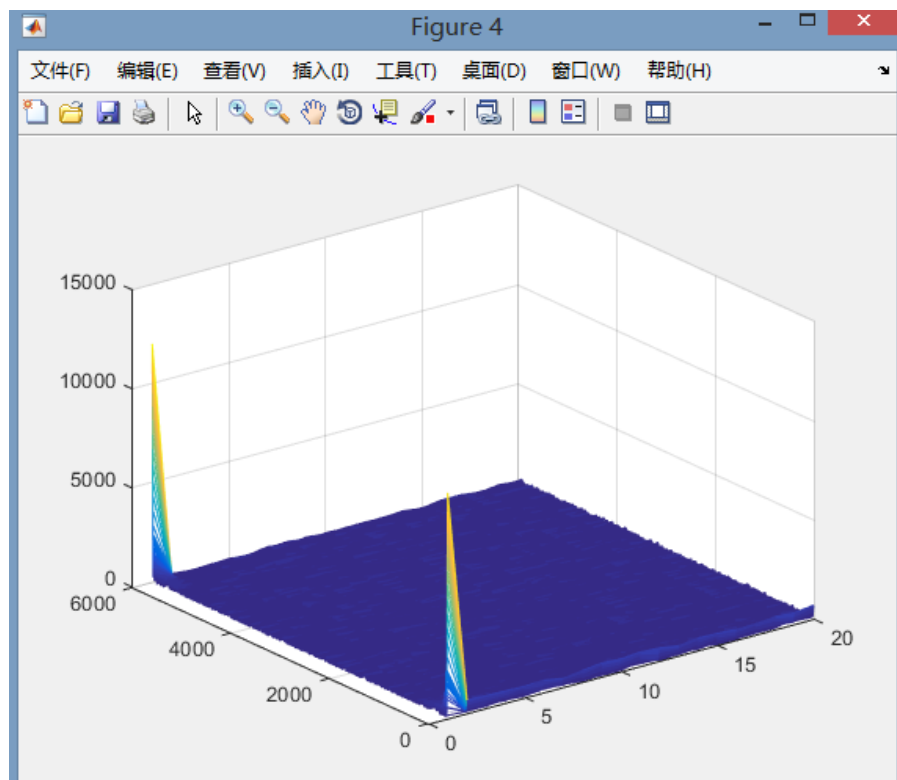


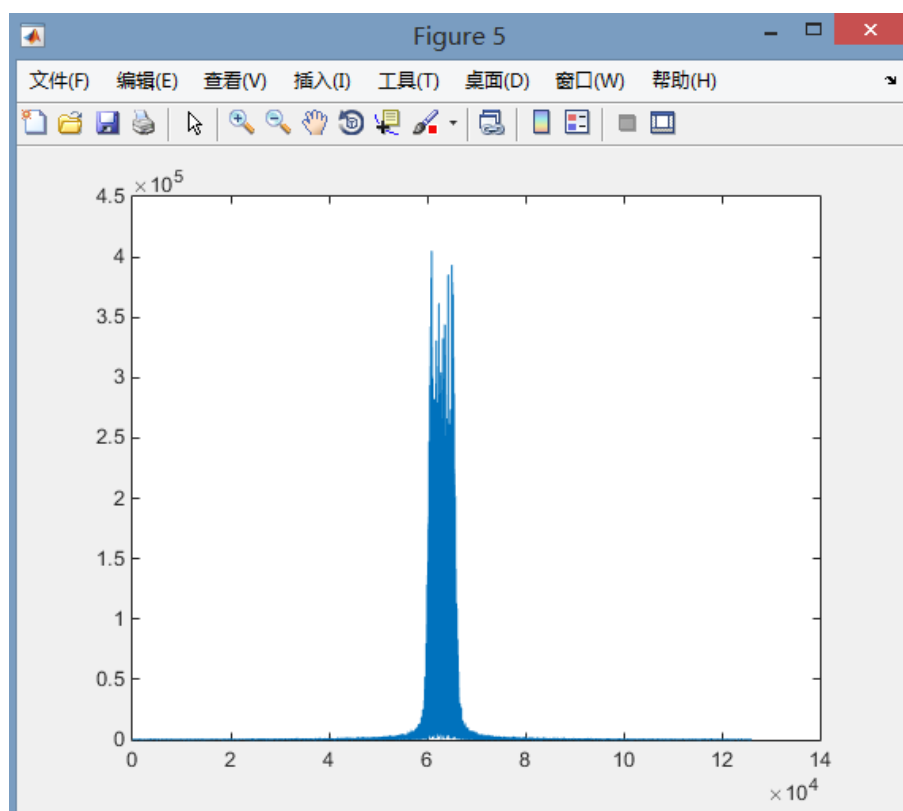
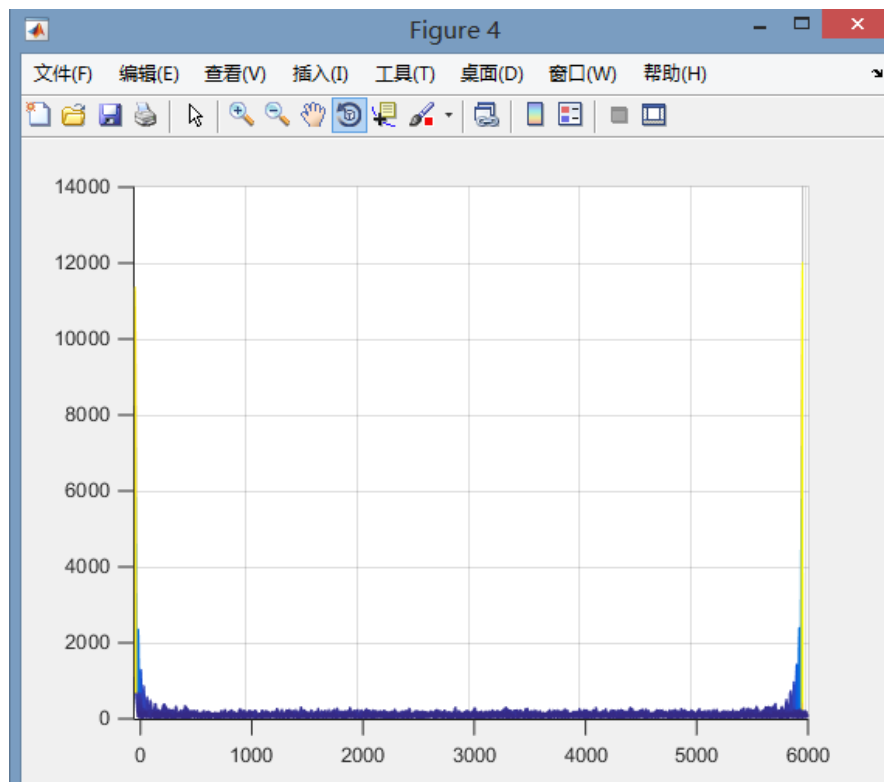
3.3.2 脉压后





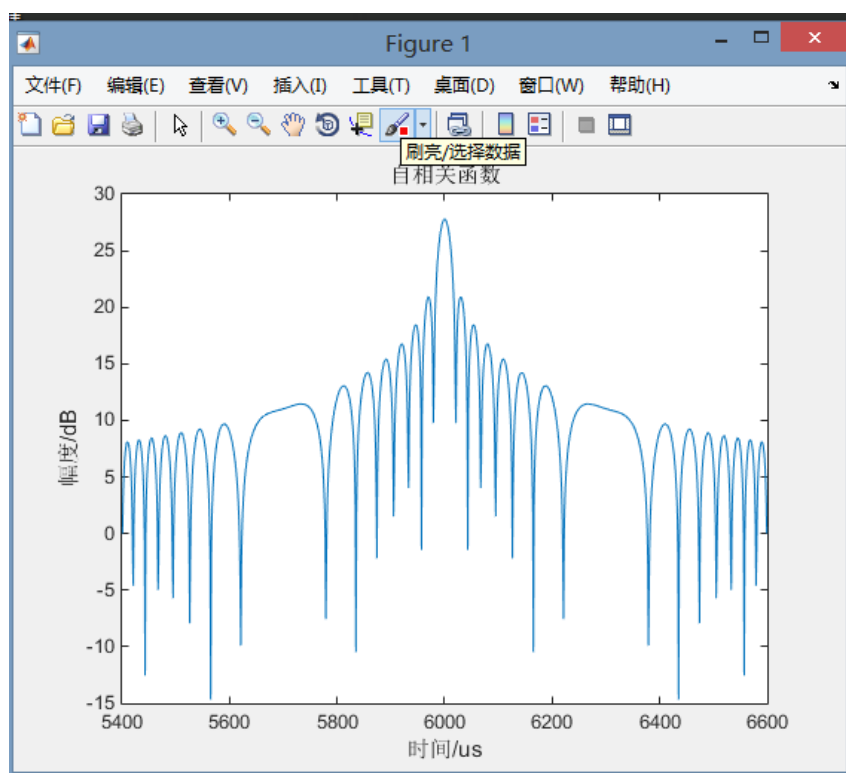
FFT 波形:





3.4 自相关函数

仿真结果：



用 matlab 计算得到 (如下图): 0 多普勒频率时, 主瓣=11.0256dB, 旁瓣=8.8563dB; 脉压比=2.1693dB。

```

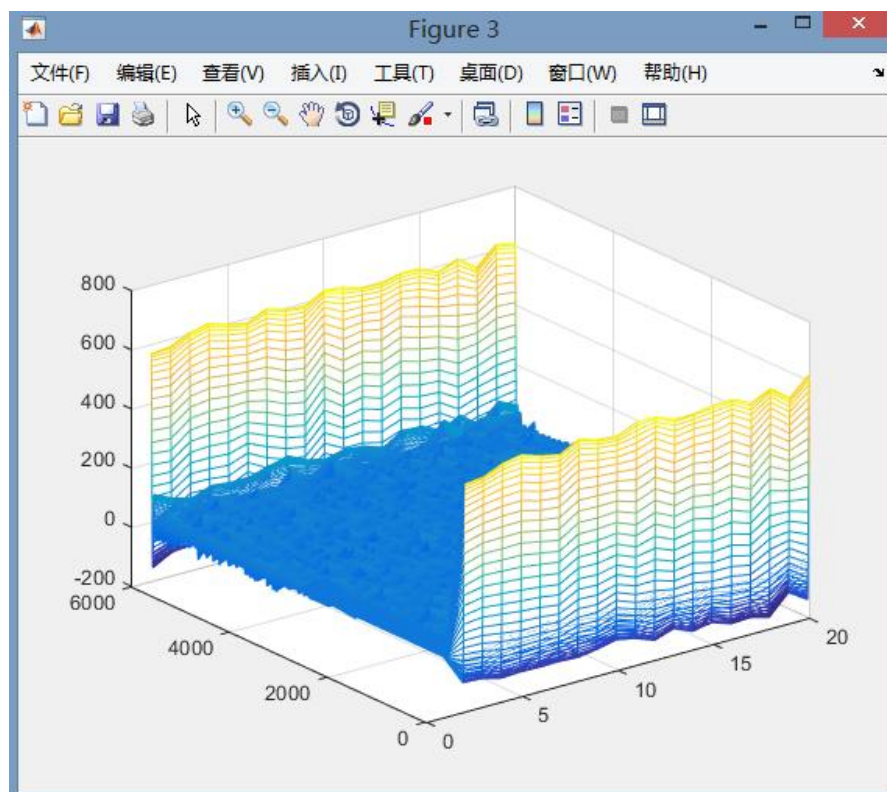
> maiya          1x21 double
> maiya_max_pan... 8.8563
> maiya_max_zhub... 11.0256
> maiyabi        2.1693
> ...            -----

```

3.5 计算各级增益

3.5.1 0 延时 0 噪声线性调频信号平均功率计算

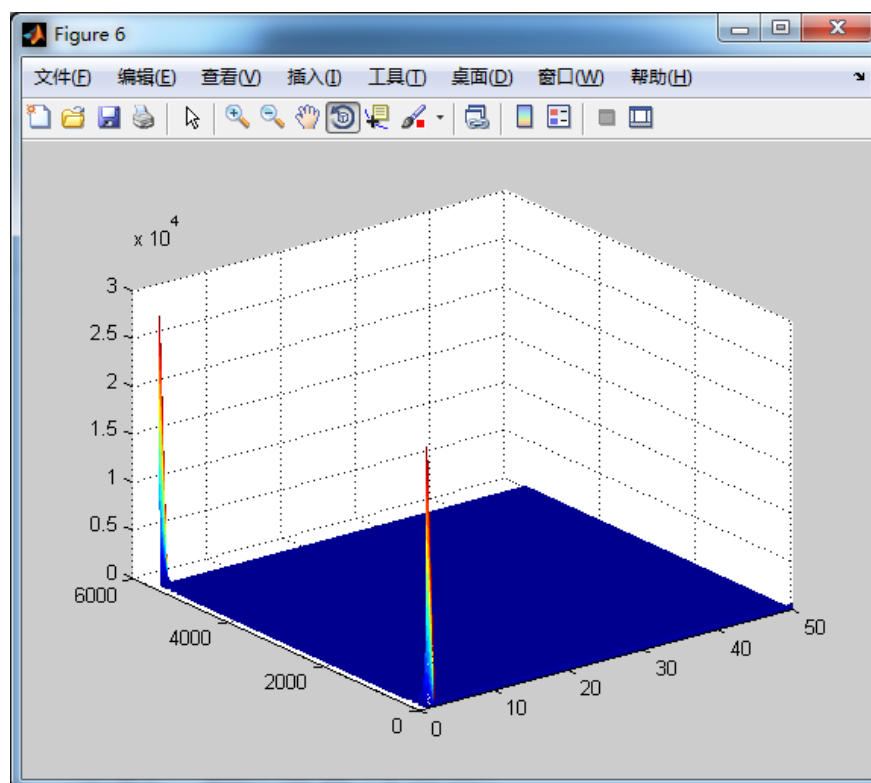
信号脉压波形图:

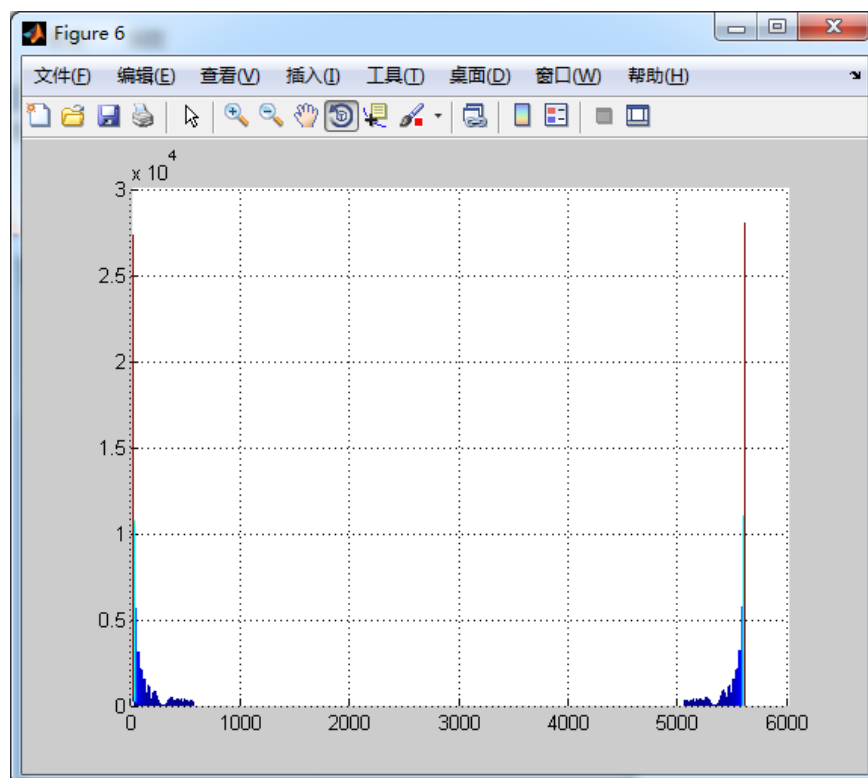


脉压后信号平均幅度=396V,

脉压后信号平均功率=156800W。

信号 FFT 仿真图:



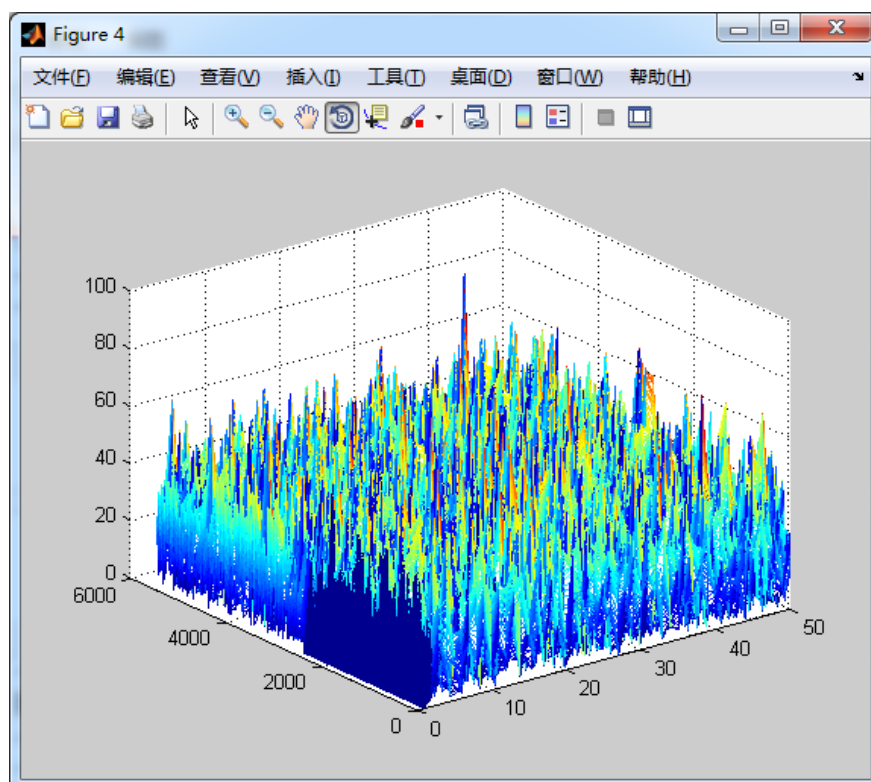


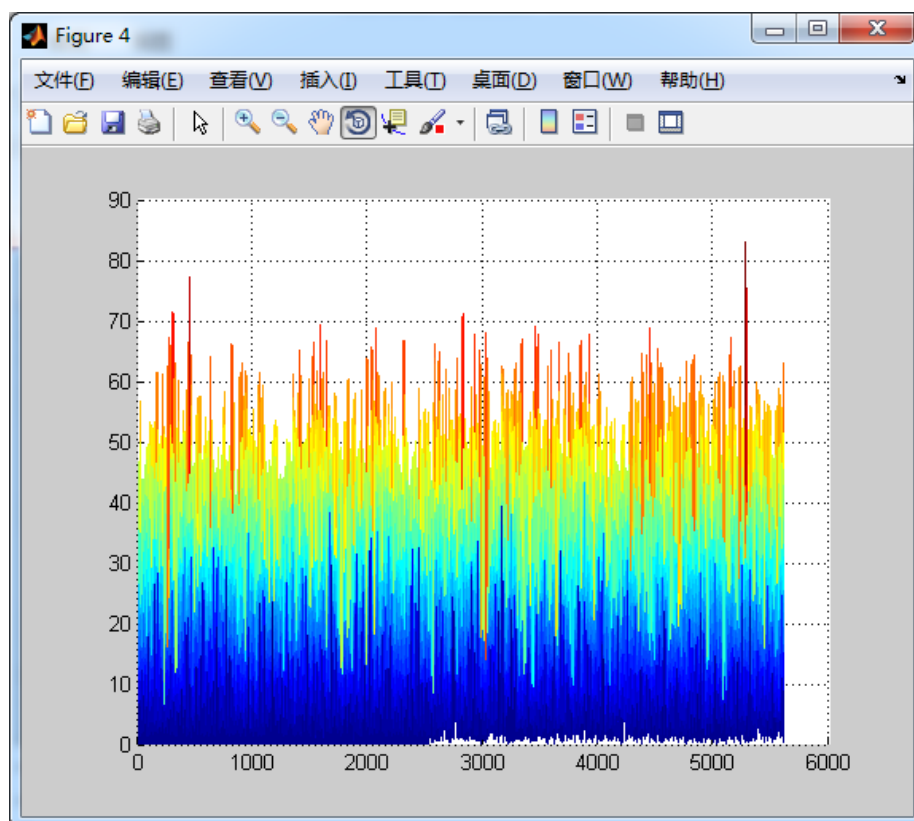
FFT 后信号平均幅度= $1.98 \times 10^4 \text{V}$,

FFT 后信号平均功率= $3.92 \times 10^8 \text{W}$ 。

3.5.2 -10dB 信噪比中的噪声平均功率计算

噪声脉压波形图：

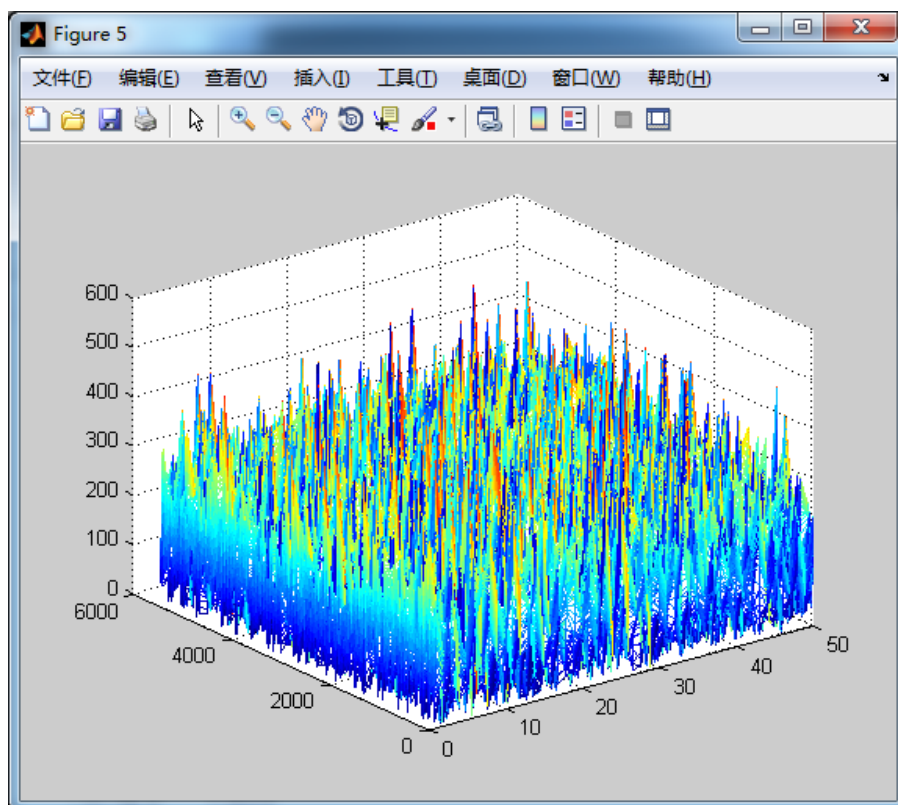


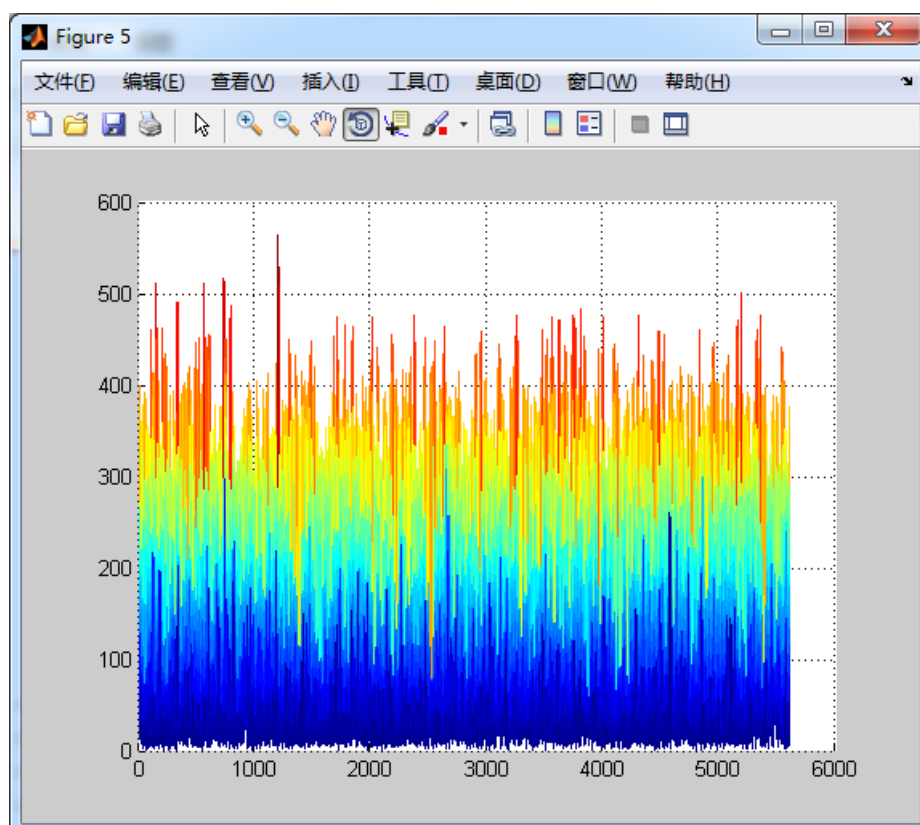


脉压后噪声平均幅度=23.60V,

脉压后噪声平均功率=557.24W。

噪声 FFT 仿真图:





噪声 FFT 后平均幅度=167.45,

噪声 FFT 后平均功率= 2.80×10^4 W。

3.5.3 理论分析

①脉压增益: $D_{\text{理论}} = BT = 3000 = 34.77\text{dB}$

$$SNR_{in} = -10\text{dB}$$

$$SNR_{o1} = 10 \log\left(\frac{156800}{557.24}\right) = 24.49$$

$$D_{\text{实际}} = SNR_{o1} - SNR_{in} = 34.49\text{dB}$$

$$E = \frac{(D_{\text{实际}} - D_{\text{理论}})}{D_{\text{理论}}} \times 100\% = 0.8\%$$

②FFT 增益: $A_{\text{理论}} = D_{\text{理论}} + 10 \log(50) = 51.76\text{dB}$

$$SNR_{in} = -10\text{dB}$$

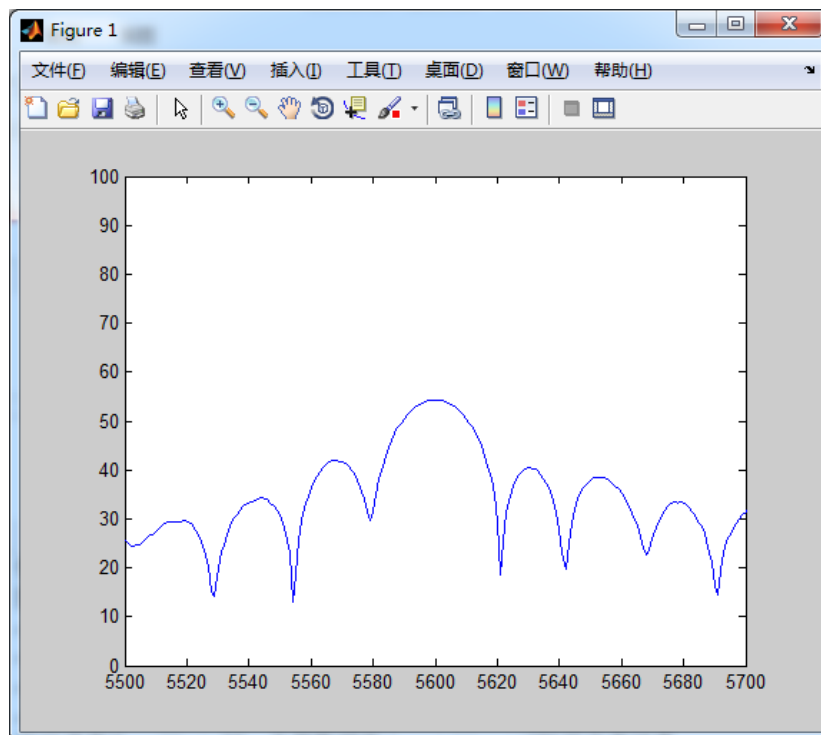
$$SNR_{o2} = 10 \log\left(\frac{3.92 \times 10^8}{2.80 \times 10^4}\right) = 41.56$$

$$A_{\text{实际}} = SNR_{o2} - SNR_{in} = 51.56\text{dB}$$

$$E = \frac{(A_{\text{实际}} - A_{\text{理论}})}{A_{\text{理论}}} \times 100\% = 0.39\%$$

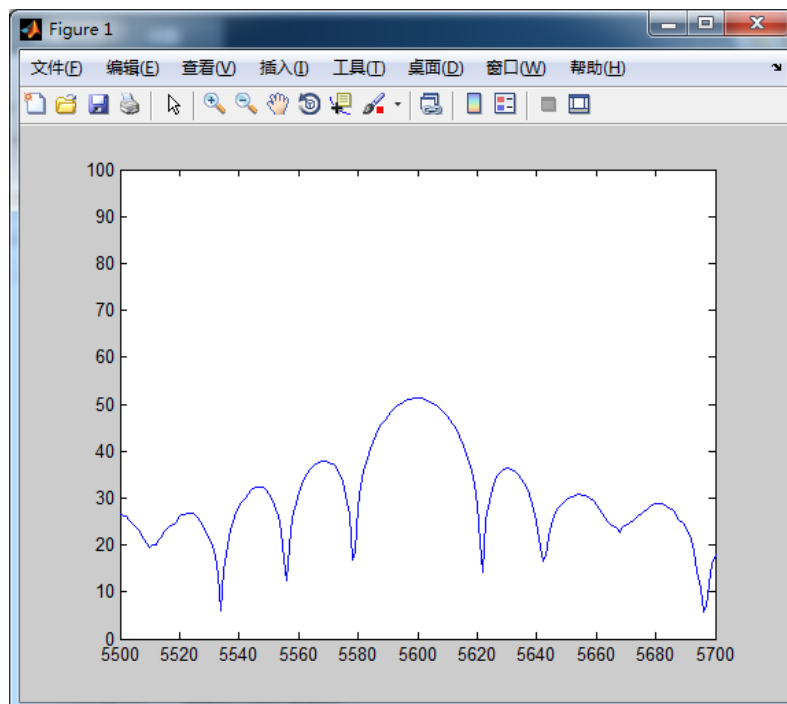
3.6 仿真多普勒敏感现象

目标速度为 $v=10\text{m/s}$ 时，多普勒频率 $f_d = 0.67\text{kHz}$ ，脉压仿真结果如下：



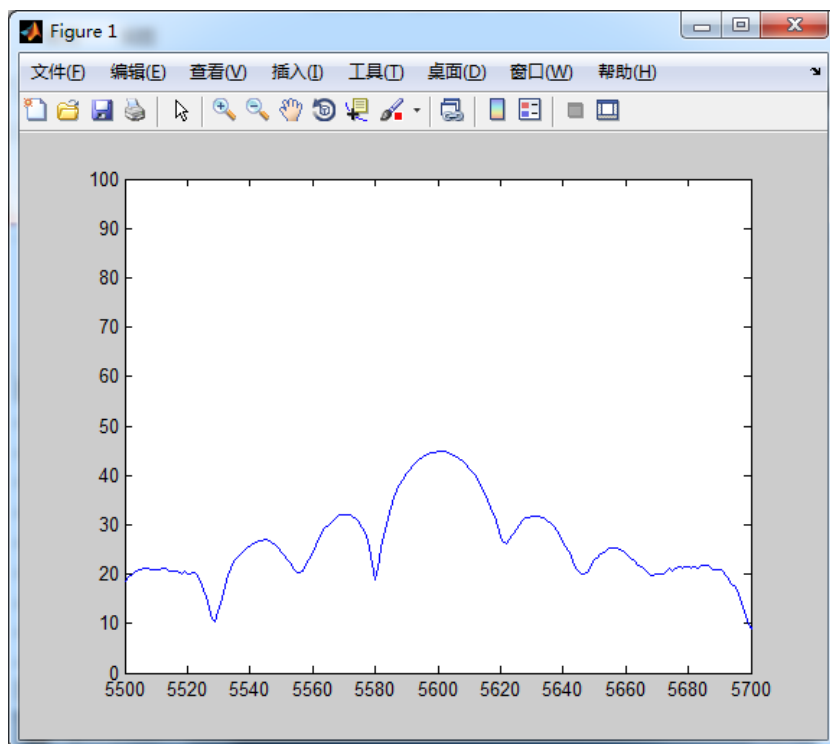
主旁比=12.42dB。

目标速度为 $v=20\text{m/s}$ 时，多普勒频率 $f_d = 1.33 \times 10^3\text{kHz}$ 脉压仿真结果如下：



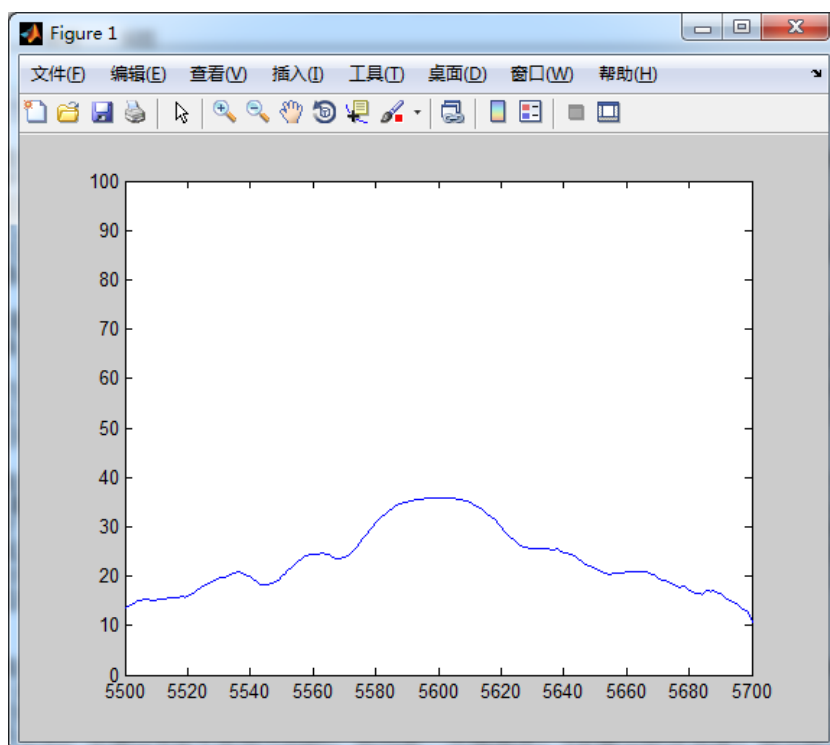
主旁比=12.88dB。

目标速度为 $v=30\text{m/s}$ 时，多普勒频率 $f_d = 2\text{kHz}$ 脉压仿真结果如下：



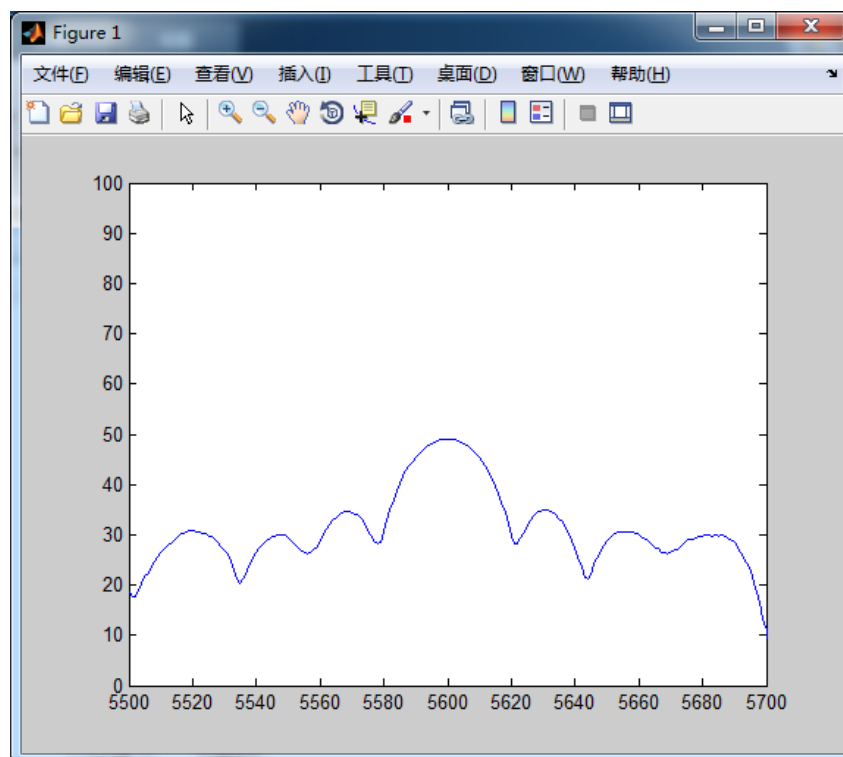
主旁比=12.72dB。

目标速度为 $v=40\text{m/s}$ 时，多普勒频率 $f_d = 2.67\text{kHz}$ ，脉压仿真结果如下：



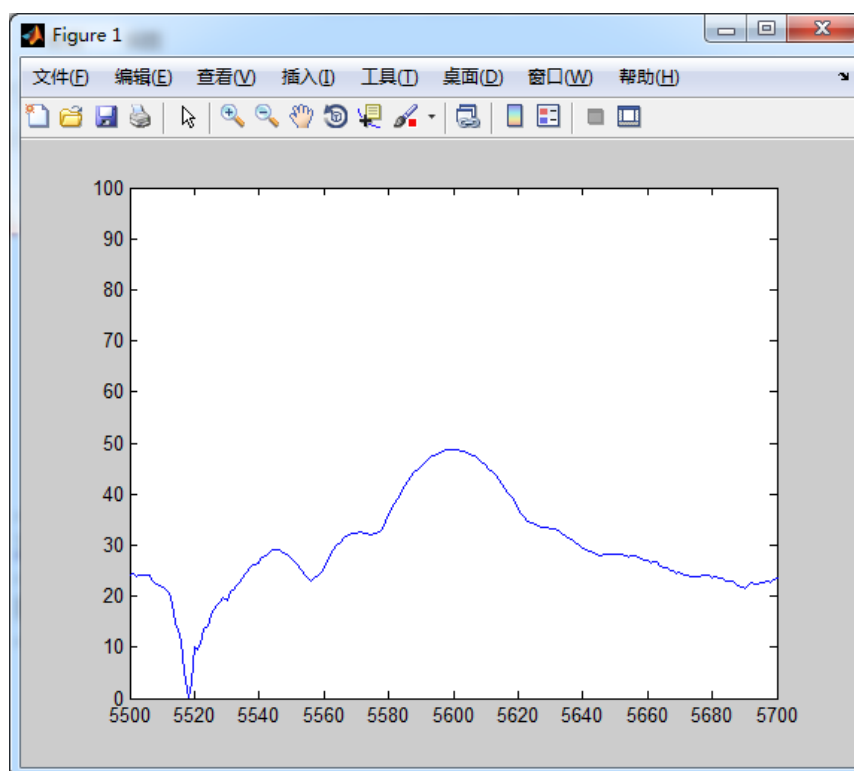
主旁比=11.35dB。

目标速度为 $v=50\text{m/s}$ 时，多普勒频率 $f_d = 3.3\text{kHz}$ ，脉压仿真结果如下：



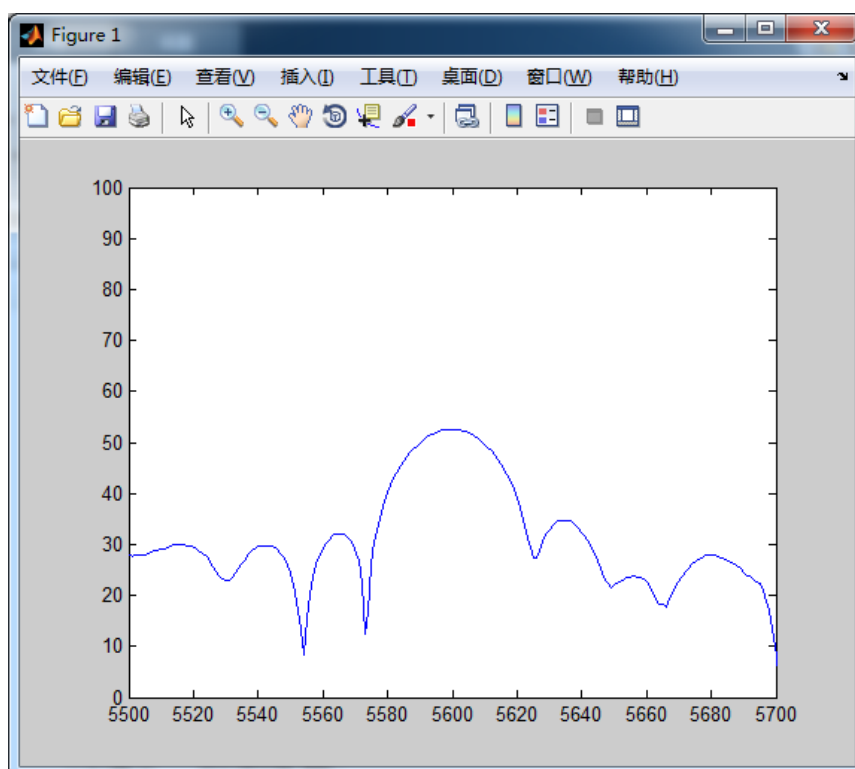
主旁比=13.41dB。

目标速度为 $v=100\text{m/s}$ 时，多普勒频率 $f_d = 6.6\text{kHz}$ ，脉压仿真结果：



主旁比=15.07dB。

目标速度为 $v=300\text{m/s}$ 时，多普勒频率 $f_d = 20\text{kHz}$ 脉压仿真结果：



主旁比=20.40dB。

总结以上实验数据如下表：

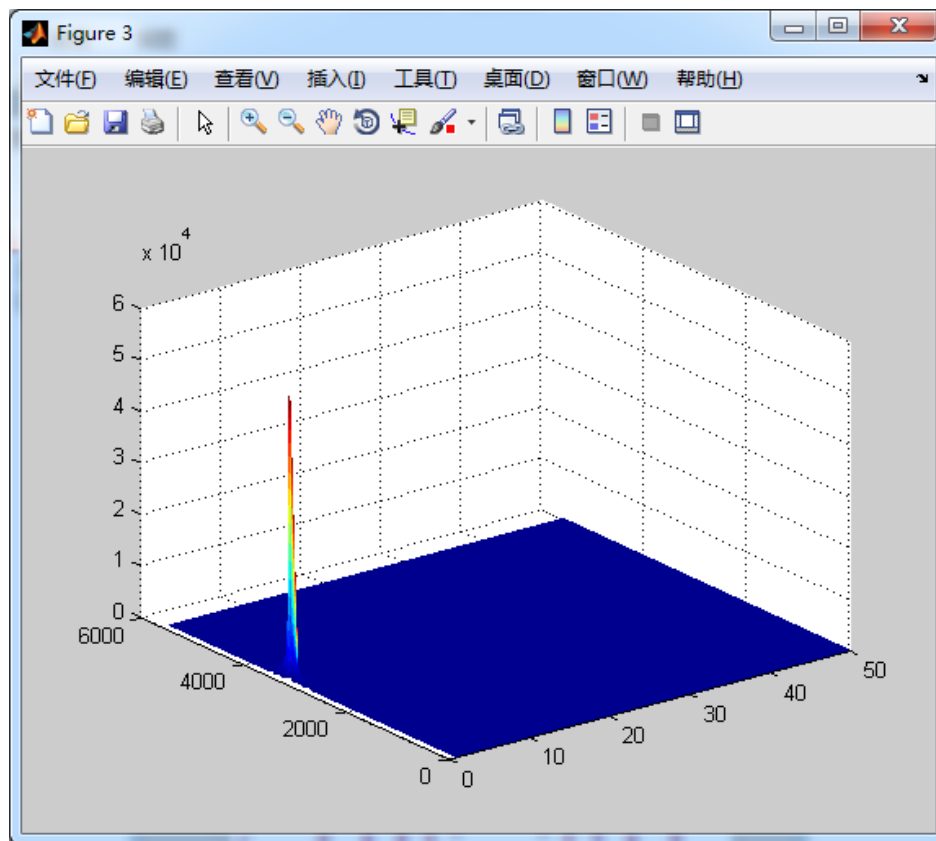
目标移动速度 $v/(\text{m/s})$	10	20	30	40	50	100	300
多普勒频率 f_d/kHz	0.67	1.33	2.00	2.67	3.33	6.66	20.00
脉压后主旁比/dB	12.42	12.88	12.72	11.35	11.41	10.07	9.40

3.7 双目标仿真

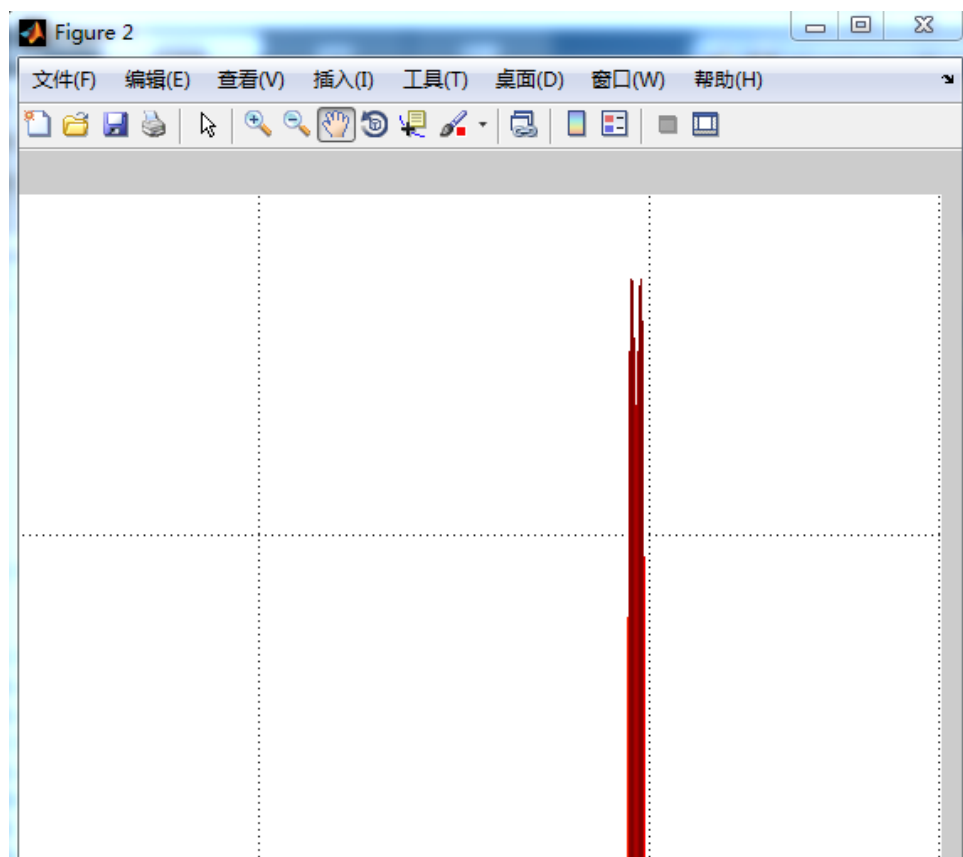
3.7.1 距离分辨力

①两目标相距 16m 时的脉压波形：

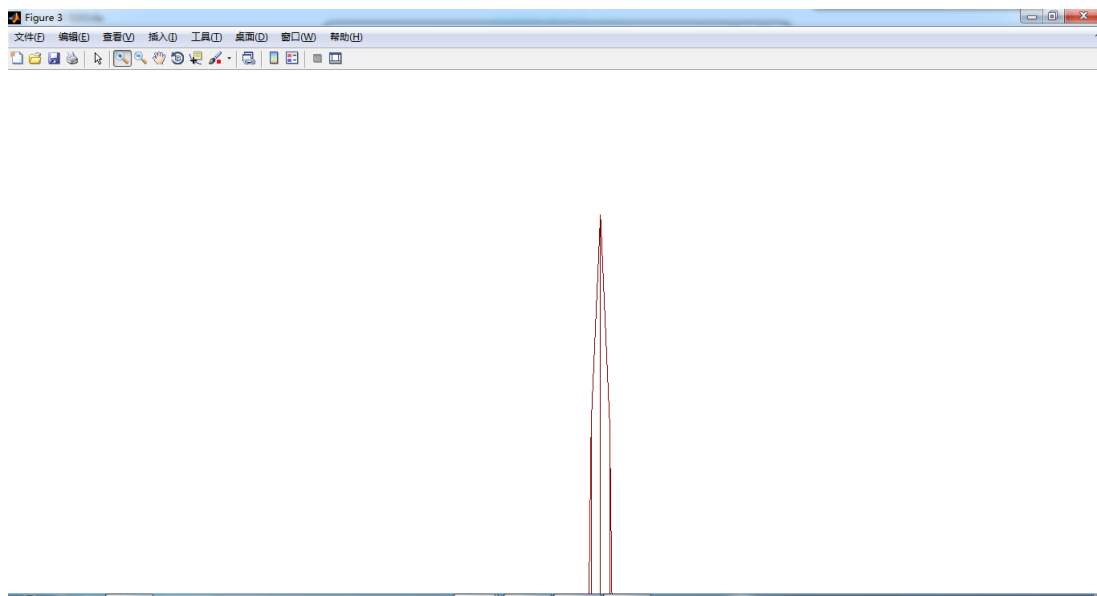
②FFT 后的波形：



放大后看到两个谱线，说明距离可以分辨。



当把两目标距离调为 12m 时，FFT 后放大波形如下：

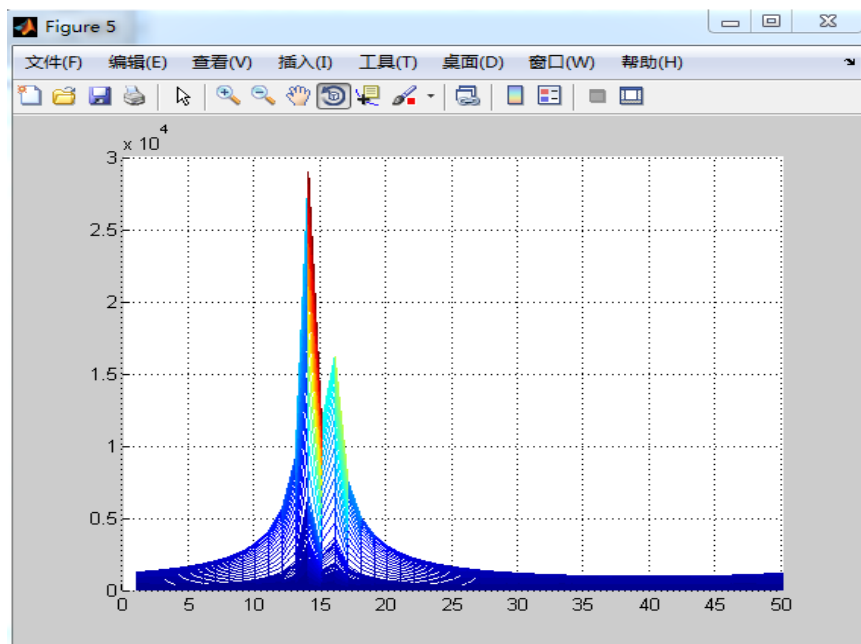


此时我们只看到一个峰，已经不能分辨。

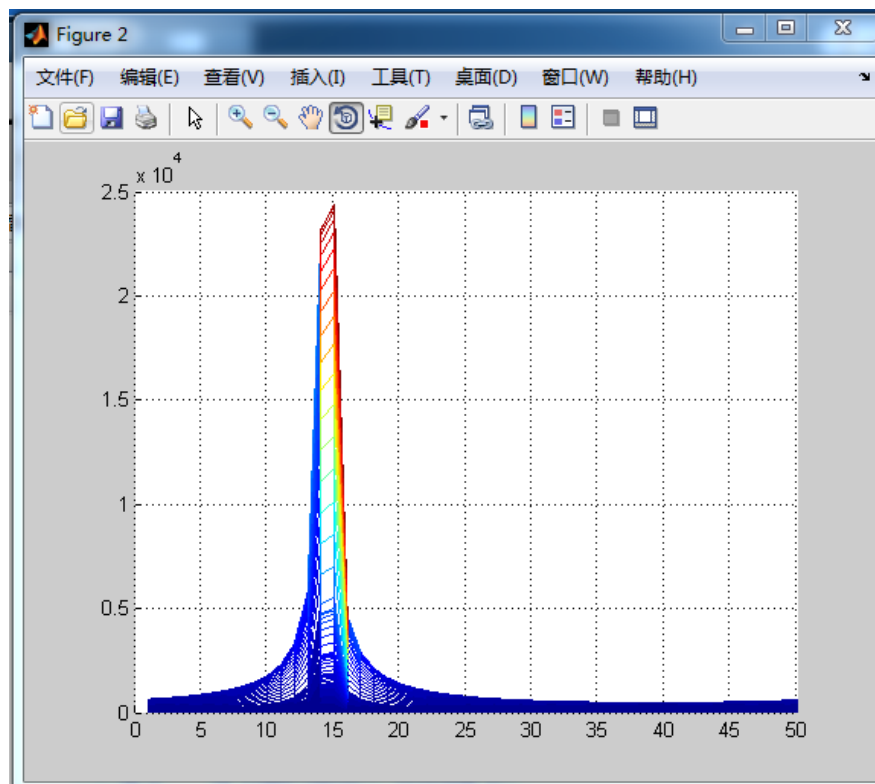
理论值 $=\frac{c}{2B} = \frac{150}{15} = 10m$ ，仿真值=12m，误差=20%

3.7.2 速度分辨率

FFT 波形图：



不能分辨时：



理论值分析：

$$f_d = \frac{1}{NT} = 100$$

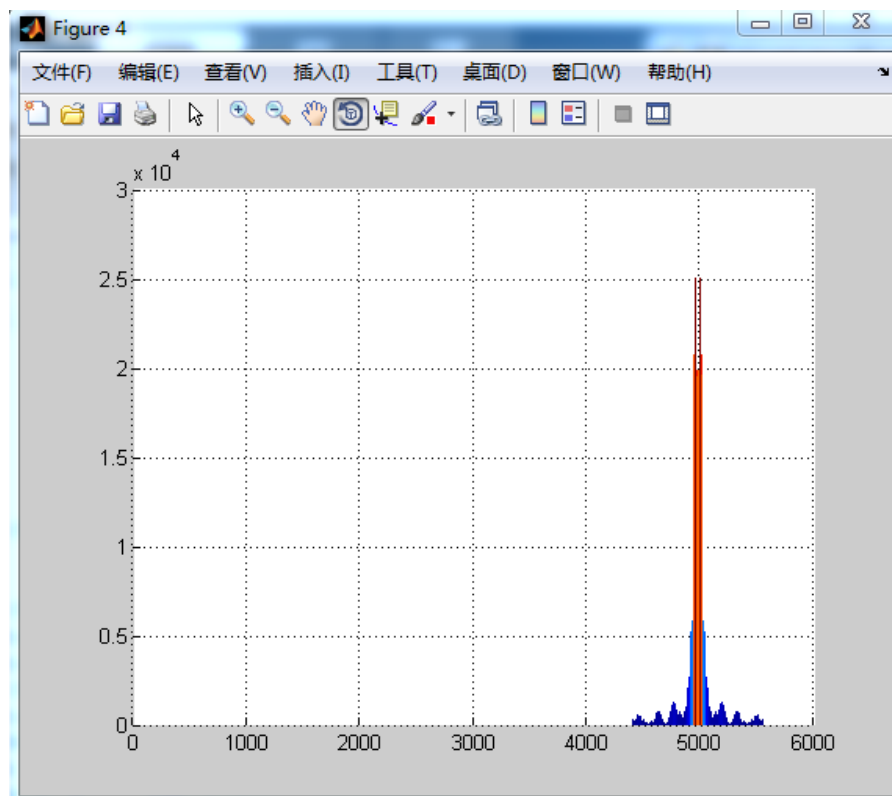
$$v_{\text{测量}} = f_d \times \frac{c}{2f_c} = 1.5$$

$$v_{\text{测量}} = 1.8$$

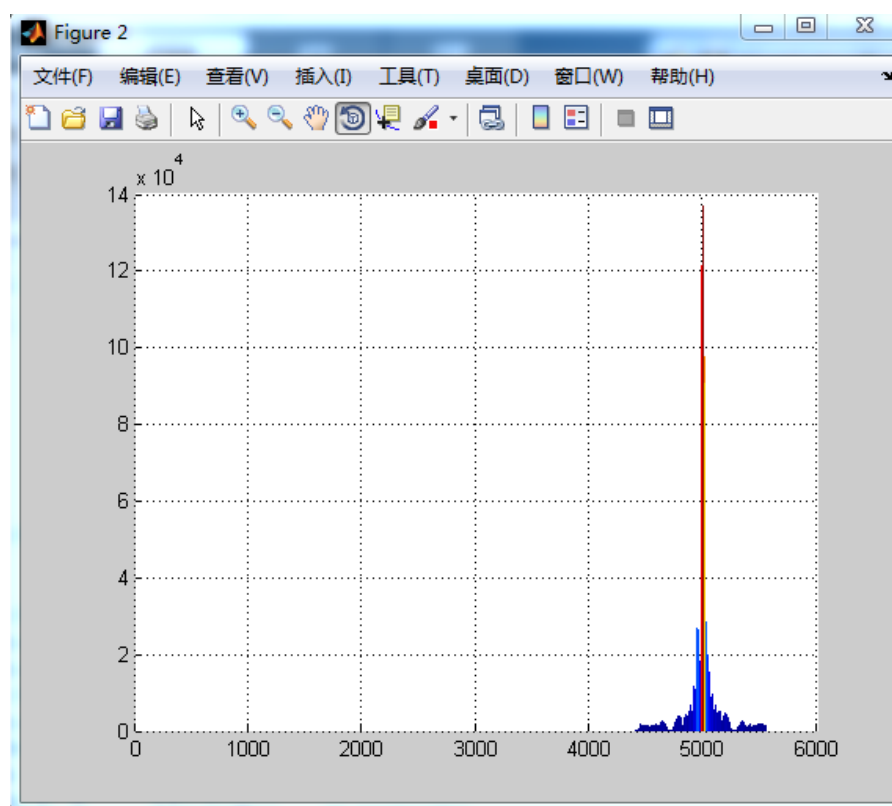
$$E = 20\%$$

3.7.3 大目标旁瓣盖掩盖小目标仿真

无掩盖时 FFT 仿真图：



大目标掩盖 FFT 仿真图：



从 FFT 仿真图上看只有一个峰，说明大目标已经掩盖了小目标。

4 源程序

4.1 产生脉冲信号

```
clear;

%-----参数设置-----

T=200e-6;          %时宽200us

B=15e6;            %调频带宽15MHz

K=B/T;             %调频频率

Fs=2*B;

Ts=1/Fs;           %采样频率

N=round(T/Ts);     %每个发射周期采样点数

%-----构造发射信号-----

t=linspace(-T/20,T/20,N/10);

ze=zeros(1,2700);

St=exp(j*pi*K*t.^2);

St=[ze,St,ze];

St_1=real(St);

%-----画出发射信号的时域波形和频域波形-----

figure;

subplot(211);

plot(St_1);

xlabel('时间/us');

ylabel('幅度');

title('线性调频发射信号时域波形');

grid on;axis tight;

freq=linspace(-Fs/2,Fs/2,N);

subplot(212);

plot(freq*1e-6,fftshift(abs(fft(St))));

xlabel('频率/MHz');

title('线性调频发射信号幅度谱');
```

```
grid on; axis tight;
```

4.2 自相关函数

```
clear;

T=200e-6;

B=15e6;

K=B/T;

Fs=2*B;

Ts=1/Fs;

N=T/Ts;

t=linspace(-T/20,T/20,N/10);

ze=zeros(1,2700);

St=exp(j*pi*K*t.^2); % 调频信号表达式

St=[ze,St,ze];

St_1=real(St);

pipei=flip1r(St);% 匹配滤波器

pipei=conj(pipei);

St4=conv(pipei,St);% 自相关函数

St_4=abs(St4);

St_4_log=10*log10(St_4);% 转换成dB

figure;

plot(St_4_log);

xlabel('时间/us');

ylabel('幅度/dB');

title('自相关函数');

maiya=St_4_log(5500:5700);

maiya_max_zhuban= max(maiya(:));

maiya=St_4_log(5560:5580);

maiya_max_pangban= max(maiya(:));

maiyaabi=maiya_max_zhuban-maiya_max_pangban;
```

4.3 脉冲压缩

```
clear;

T=200e-6;

B=15e6;

K=B/T;

Fs=2*B;

Ts=1/Fs;

N=round(T/Ts);

t=linspace(-T/20,T/20,N/10);

ze=zeros(1,2700);

St=exp(j*pi*K*t.^2);

St=[ze,St,ze];

St_1=real(St);

%——————发射信号——————

snr=-10;%信噪比-10dB

rep_mat=20;

St2= repmat(St,1,rep_mat);

St_2=real(St2);

St3=awgn(St2,snr,'measured');%加高斯白噪声

St_3=real(St3);

figure

plot(St_3);

grid on;

%——————脉压处理——————

pipei=fliplr(St);%匹配滤波器

pipei=conj(pipei);

St4=conv(pipei,St3);%卷积

St_abs=abs(St4);

St_log=10*log10(St_abs);
```

```
figure

plot(St_log);

grid on;

%—————距离门重排—————

for r=1:rep_mat

    for h=1:N

        St5(h,r)=St4((r-1)*N+h);

    end

end

St_5=real(St5);

figure;

mesh(1:rep_mat,1:N,St_5);

%FFT

for h=1:N

    St6_fft(h,:)=abs(fft(St5(h,:)));

end

figure;

mesh(1:rep_mat,1:N,St6_fft);

St_6=fftshift(abs(fft(St4)));

figure;

plot(St_6);
```

4.4 总程序

```
clear;

T=200e-6;

B=15e6;

K=B/T;

Fs=2*B;

Ts=1/Fs;

fc=10e9;
```



```
N=round(T/Ts);

rep_mat=50;

t=linspace(-T/20,T/20,N/10);

x1=1000;%第一个目标距离

x2=1020;%第二个目标距离

v1=20;%第一个目标速度

v2=50;%第二个目标速度

% 发射信号

ze=zeros(1,2700);

St=exp(j*pi*K*t.^2);

St0=[ze,St,ze];

St_1=real(St);

subplot(211)

plot(St_1);

xlabel('时间/us');

ylabel('幅度');

title('线性调频发射信号时域波形');

grid on;axis tight;

subplot(212)

freq=linspace(-Fs/2,Fs/2,N);

plot(freq*1e-6,fftshift(abs(fft(St0))));

xlabel('频率/MHz');

ylabel('幅度');

title('线性调频发射信号幅度谱');

grid on;axis tight;

% 回波信号

fd1=2*v1*fc/3e8;

fd2=2*v2*fc/3e8;

i=1:N*rep_mat;

Dop1=exp(2*j*pi*fd1*Ts*i);
```

```
Dop2=exp(2*j*pi*fd2*Ts*i);

num_x1=round(2*x1/3e8/Ts);

num_x2=round(2*x2/3e8/Ts);

ze_left=zeros(1,2700+num_x1);

ze_right=zeros(1,2700-num_x1);

St1=[ze_left,St,ze_right];

ze2_left=zeros(1,2700+num_x2);

ze2_right=zeros(1,2700-num_x2);

St2=[ze2_left,St,ze2_right];

St1=repmat(St1,1,rep_mat);

St2=repmat(St2,1,rep_mat);

St_he_rep=St1.*Dop1+St2.*Dop2;

snr=-10;%信噪比-10

St_he=awgn(St_he_rep,snr,'measured');%加高斯白噪声

%脉压处理

pipei=fliplr(St0);%匹配滤波器

pipei=conj(pipei);

St_he_maiya=conv(pipei,St_he_rep);%卷积

St_he_abs=abs(St_he_maiya);

St_he_log=20*log10(St_he_abs);

figure;

plot(St_he_log);

%距离门重排

for r=1:rep_mat

    for h=1:N

        St_he_chongpai(h,r)=St_he_maiya((r-1)*N+h);

    end

end

St_he_ch=abs(St_he_chongpai);

figure;
```

```
mesh(1:rep_mat,1:N,St_he_ch);  
  
%FFT  
  
for h=1:N  
  
St_he_fft(h,:)=abs(fft(St_he_chongpai(h,:)));  
  
end  
  
figure;  
  
mesh(1:rep_mat,1:N,St_he_fft);
```