



# 南京理工大学

NANJING UNIVERSITY OF SCIENCE & TECHNOLOGY

## 信号检测与估计

伪随机相位编码脉冲雷达的信号处理

姓 名：陈亦曼

学 号：913104680102

院 系：电子工程与光电技术学院

专 业：电子信息工程（卓越班）

指导老师：顾红

完成时间：2016 年 5 月

# 一、实验内容

伪随机相位编码脉冲雷达的信号处理。设码频 02，单位为 MHz，伪码周期内码长为 127，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 m 序列的双值电平循环自相关函数，给出脉压后和 FFT 后的输出图形；通过仿真说明脉压输出和 FFT 输出的 SNR、时宽和带宽；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（脉压主瓣峰值与多卜勒的曲线）。双目标时，仿真出大目标旁瓣掩盖小目标的情况；仿真出距离分辨和速度分辨的情况。

# 二、实验环境

- 1、windows10 操作系统
- 2、MATLAB R2015a--academic use

# 三、实验原理

## （1）单目标

- 1、发射信号： $S_r(t) = Ac(t)\exp(j2\pi f_0 t)$

回波视频表达式： $S_r(t) = Ac(t - \tau)\exp[j2\pi f_0(t - \tau) + j2\pi f_d t]$

其中：时延  $\tau = 2 * d / c$ ，多普勒频率  $f_d = 2 * v / \lambda = 2 * v / (c / f_c)$

脉压后的表达式： $R(\tau) = E[S(t)S(t + \tau)]$

FFT 后的表达式： $S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R(t)e^{j\omega t} dt$

## 2、伪随机相位编码信号

--m 序列：最长线性移位寄存器序列，是一种伪随机序列、伪噪声(PN)码或伪随机码。它容易产生，规律性强，有很好的自相关性和较好的互相关特性，若周期 m 序列的每个码元宽度为 T，则它的自相关函数是周期为 PT 的周期三角函数。线性移位寄存器是由移位寄存器

加上反馈后产生的。对于一个  $n$  级反馈移位寄存器来说，最多可以有  $2^n$  个状态，对于一个线性反馈移位寄存器来说，全“0”状态不会转入其他状态，所以线性移位寄存器的序列的最长周期为  $2^n - 1$ 。

--相位编码信号码元宽度  $T_b = \pi/127 = 1/f_m = 1/(2\text{MHz}) = 0.5\mu\text{s}$ ；

伪码信号一周期的脉冲数  $P = 2^n - 1 = 2^7 - 1 = 127$ ，占空比为 10%，周期内总点数 1270；

相位编码周期  $T = 10PT_b = 1270 \times 0.5\mu\text{s} = 635\mu\text{s}$ ，由于相干积累总时宽  $t \leq 10\text{ms}$ ，重复

周期数  $N \leq t/T$ ， $N=15$ ；

### 3、匹配滤波器

--基本思想：是寻求线性滤波器的最佳传递函数，白噪声中含已知波形的混合波形作为滤波器输入时滤波器输出的波形在某时刻可达最大信噪比。

--匹配滤波器的冲激响应是输入信号波形对纵轴作镜像函数，并沿时间轴向右平移一段时间，滤波器的振幅特性与信号的振幅谱一致。因此，对信号的匹配滤波相当于对信号进行自相关运算。

--匹配滤波器对信号做两种处理：

1) 滤波器的相频特性与信号相频特性共轭，使得输出信号所有频率分量都在输出端同相叠加而形成峰值。

2) 按照信号的幅频特性对输入波形进行加权，以便最有效地接收信号能量而抑制干扰的输出功率。即当信号与噪声同时进入滤波器时，它使信号成分在某一瞬间出现尖峰值，而噪声成分受到抑制。

--匹配滤波器的作用是：

1) 输出信号相对增强，噪声相对减弱，从而提高信噪比。

2) 对于大时间带宽积信号，匹配滤波等效于脉冲压缩。因此可以提高雷达或声纳的距离分辨率和距离测量精度。在扩频通信中，可以实现解扩。

3) 脉冲压缩技术可以解决雷达作用距离和距离分辨率的矛盾（脉宽越大，作用距离越大，但雷达分辨率会降低）。

-- $N$  点的 FFT 就相当于构建了  $N$  个频率相邻不同的正弦波匹配滤波器，来匹配一个频率未知的正弦波，看哪一个滤波器输出最大，那么该滤波器中心频率即为输入正弦波的频率。

### 4、多普勒敏感现象

--概念：MF 对频移信号没有适应性，伪随机  $m$  序列信号存在伪码调相信号所具有的多普勒敏感问题，其信号的模糊函数近似图钉型，随着多普勒频移的增加，相关处理后输出的主瓣峰值下降，旁瓣增加，主旁瓣比降低，SNR 也有一定损失，严重时使雷达无法正常工作。

--解决办法：1) 多普勒补偿（变本振）：静止目标变运动，影响对消

2) 修正匹配滤波器（移动模糊图原点）：匹配滤波器太多

3) 消除多普勒电路：非线性，影响邻近分辨

4) 补偿式旁瓣抑制滤波器：对应失配输出进行抑制

### 5、多普勒容限

--定义：当多普勒频率存在时，在匹配距离门内虽然不能得到最大的输出信噪比，但显然在某一个频率区间内相关积累还是有效的，则这一区间为多普勒容限。

--伪码调相信号的多普勒容限与压缩比  $D$  与码元宽度有关。压缩比是由子脉冲数决定的，子脉冲数越大，多普勒敏感性越大，选择大的压缩比必然多普勒容限减小。码长一定的情况下，

码元宽度减小，信号对多普勒的敏感性减弱，减小码元宽度是扩展多普勒容限的一种方法。

--理论上，主瓣幅度下降 3.94dB 时， $T_{pc} \leq 1/(2 * f_{d \max})$

## (2) 双目标

相关积累实际上是一种匹配滤波的思想，匹配滤波器根据输入信号的波形设计，本质上是信号与自身相乘累加得到的输出最大，通过视频回波信号与某个距离门参考码字完全匹配，实现信号的有效积累。

### 1、距离分辨

保持两个目标的速度相同。各个距离门上的参考码是由发射码字依次经过延迟一个码元时间得到的，每个距离门依次相差一个码元时间。

故距离分辨： $\Delta d = T_b \times c / 2 = 0.5 \mu s \times 3 \times 10^8 (m/s) / 2 = 75m$ ，从而可进一步求得最大测

量距离  $d_{\max}$  并根据测距速范围考虑距离模糊的问题。验证距离  $d = Y \times T_b \times c / 2$

### 2、速度分辨

保持两个目标的距离相同。对  $N$  点进行作 FFT，可得此关系式： $K/N = f_d P T_b$ ，其中  $K$  为

距离门序数。由于  $f_d = 2 * v / \lambda$ ，可得当  $K=1$  时， $\Delta v = K \times \lambda / (2 \times N \times P \times T_b) = 1.57m/s$ ，

从而可进一步求得最大测量速度  $V_{\max}$  并根据测速范围考虑速度模糊的问题。验证速度

$$v = K \times \lambda / (2 \times N \times P \times T_b)$$

3、大目标的幅度是小目标的几十倍时，大目标旁瓣会掩盖小目标，于是从 FFT 后的输出图形上只能观察到一个目标。

## 四、仿真过程与结果

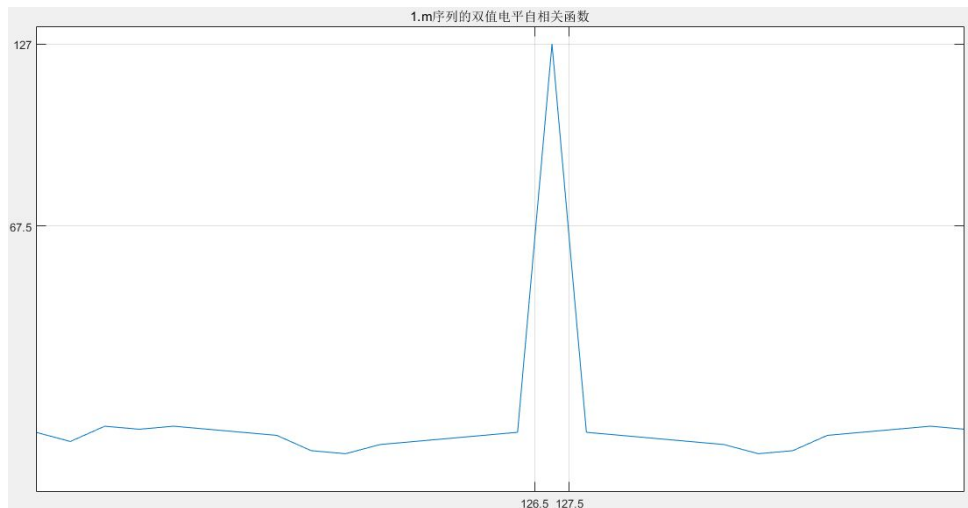
### (1) 单目标

#### 1、m 序列的双值电平循环自相关函数

一周期内，m 序列双值电平自相关函数如下图，可见脉压增益等于时宽带宽积

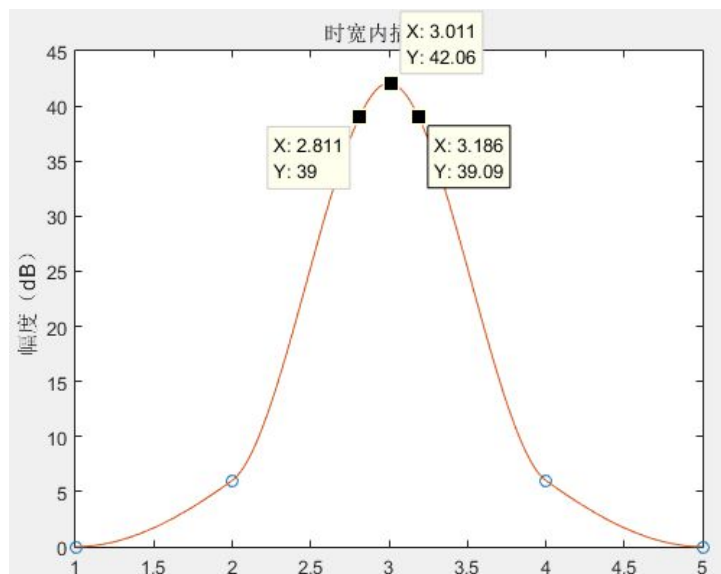
$G = B \times \tau = 1/T_b \times \tau = 1/(\tau/127) \times \tau = 127$ ，高度下降到一半时，3dB 带宽正好等于

$$(127.5 - 126.5) \times T_b = T_b = \tau/127$$

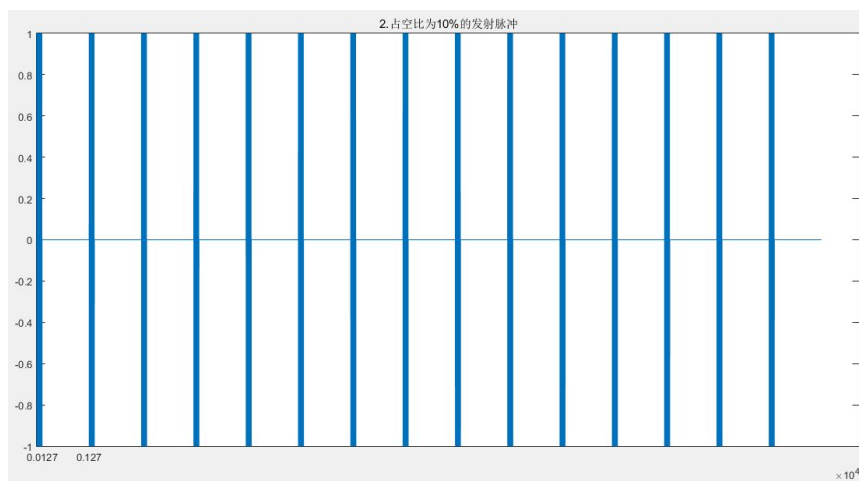


内插进三个点，便于观察脉压以后的时宽：

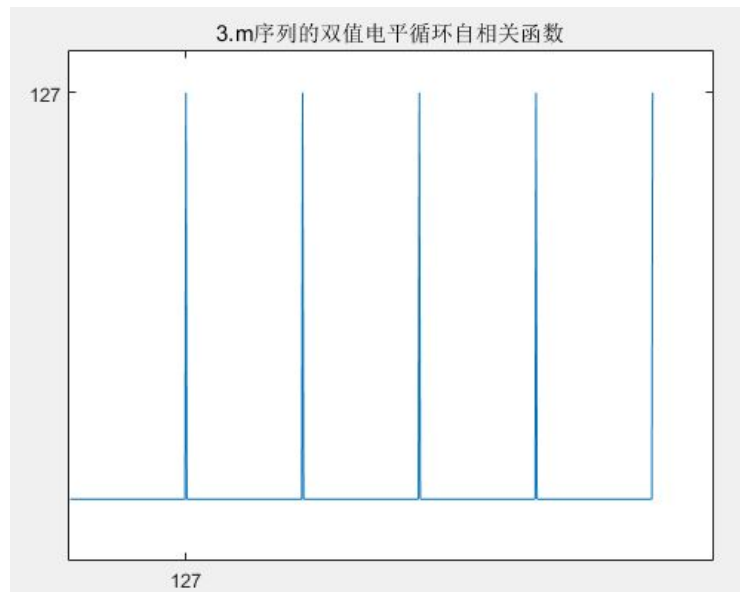
如下图：时宽为  $(3.186 - 2.811) \times T_b = 0.375 \times 0.5 \mu s = 0.1875 \mu s$



占空比 10% 的双值电平发射脉冲波形如下图，重复周期个数为 15，单脉冲内的子脉冲个数为 127，由于占空比为 10%，单周期内有 1270 个采样点。

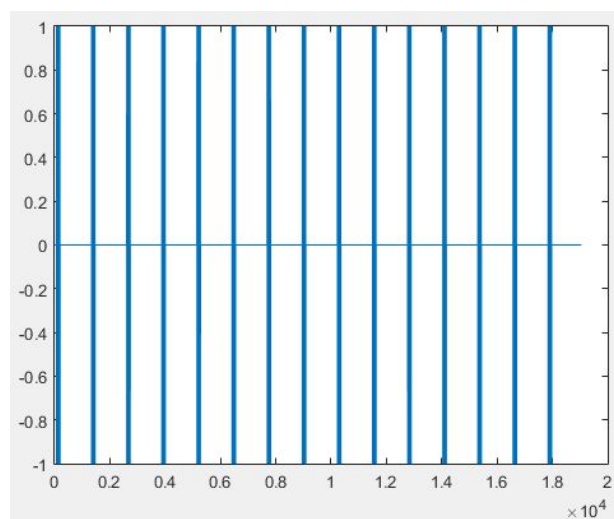


所以 m 序列周期性自相关函数如下图：

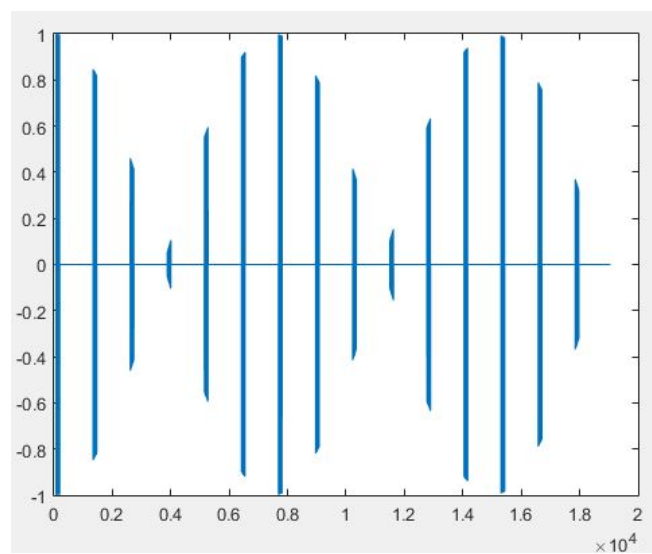


## 2、回波

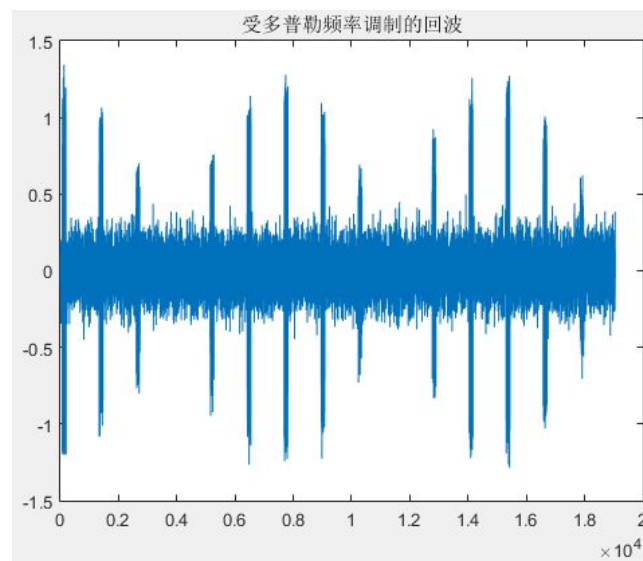
有延迟 ( $d=5000\text{m}$ ,  $\text{tr}=2d/c$ ,  $\text{snr}=5$ ) 的回波波形:



受多普勒调制 ( $v=2\text{m/s}$ ,  $f_d=2v/\lambda$ ):

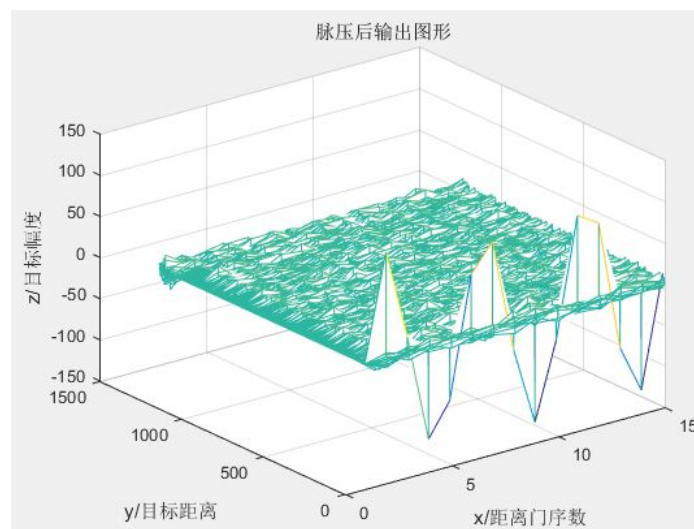


加入噪声：

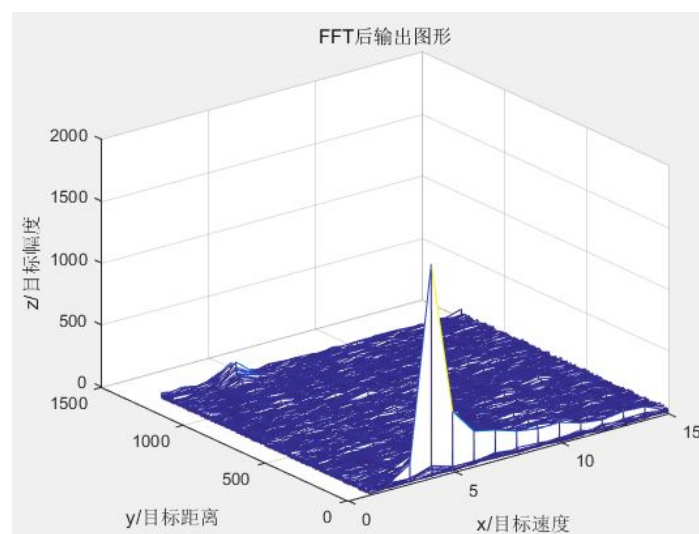


### 3、脉压后和 FFT 后的输出图形；

脉压后：（ $d=1000\text{m}$ ,  $v=5\text{m/s}$ ,  $A=1$ ,  $\text{snr}=-5\text{dB}$ ）



FFT 后：（ $d=1000\text{m}$ ,  $v=5\text{m/s}$ ,  $A=1$ ,  $\text{snr}=-5\text{dB}$ ）

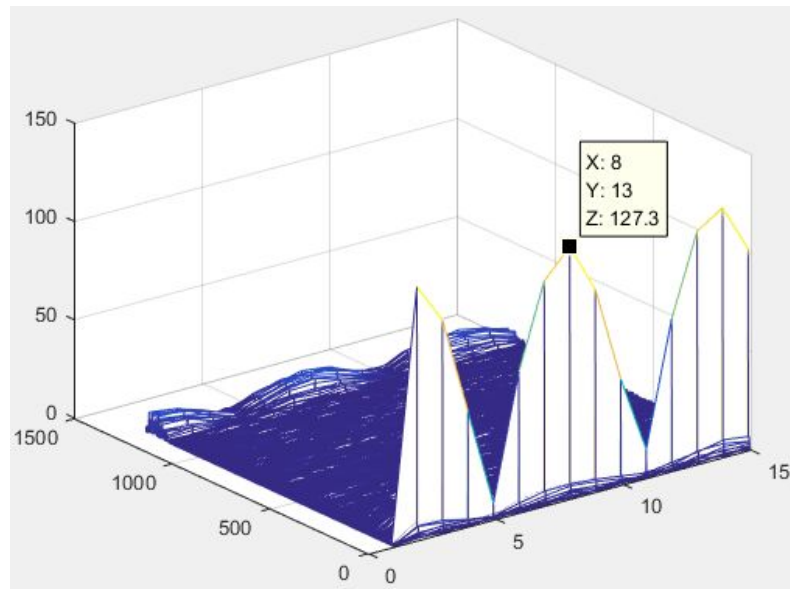


#### 4、脉压输出和 FFT 输出的 SNR、时宽和带宽；

MF 信号增益=脉压信号的时宽带宽积=脉压的时宽压缩比=脉压的带宽压缩比

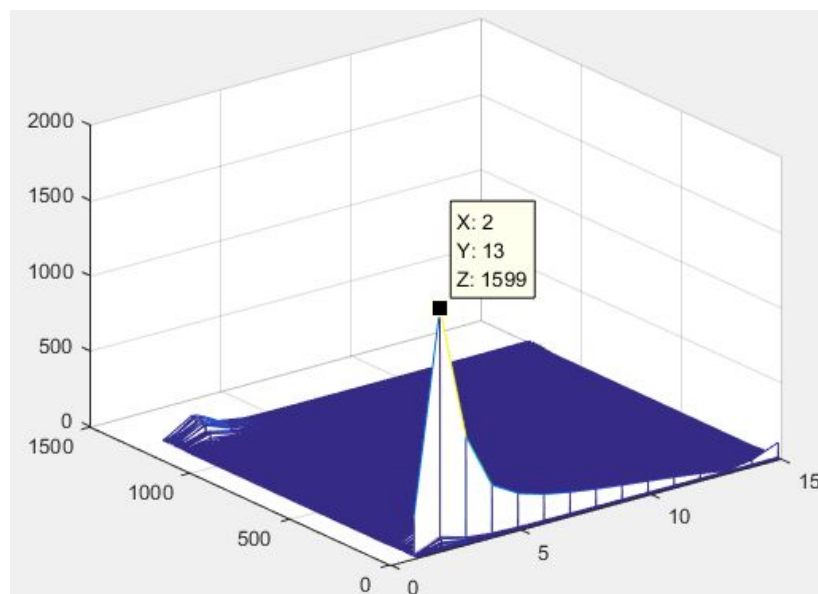
理论上：MF 增益  $G = B \times \tau = 1/T_b \times \tau = 1/(\tau/127) \times \tau = 127 = 21.04\text{dB}$

仿真： $G=127.3 \approx 127$ ，误差不大，而信号功率为最大的瞬时功率即最高主瓣峰值的平方



理论上 FFT 增益：复信号  $G = 10\log_{10} N = 10\log_{10} 15 = 11.76$ （实信号  $G = 10\log_{10} (N/2)$ ）；

仿真： $G=1599/127.3=12.56 \approx 11.76$ ，误差不大



压缩比代表输出功率信噪比比输入信噪比的改善程度，理想压缩器对具有随机特性的输入高斯白噪声不会产生压缩作用，故输出随机噪声的平均功率保持在输入随机噪声功率的电平上。说明相位编码信号脉压后，输出信噪比是输入信噪比的  $D$  倍，也就是提高了  $10\log_{10}(D)$  dB，输出  $\text{SNR (dB)} = \text{输入 SNR (dB)} + \text{增益值 (dB)}$ 。

当输入信噪比  $\text{snr}_0$  为 10dB 时



### 1) 脉压后

理论上:  $\text{snr1} = \text{snr0} + G = \text{snr0} + 10 \times \log_{10}(127) = \text{snr0} + 21.04 = 31.04\text{dB}$ ;

仿真:  $\text{snr1} = 31.3930\text{dB}$  与理论值相比, 误差很小。

### 2) FFT 后

理论上:  $\text{snr2} = \text{snr1} + G = \text{snr1} + 10 \times \log_{10}(15) = 31.04 + 11.76 = 42.8\text{dB}$ ;

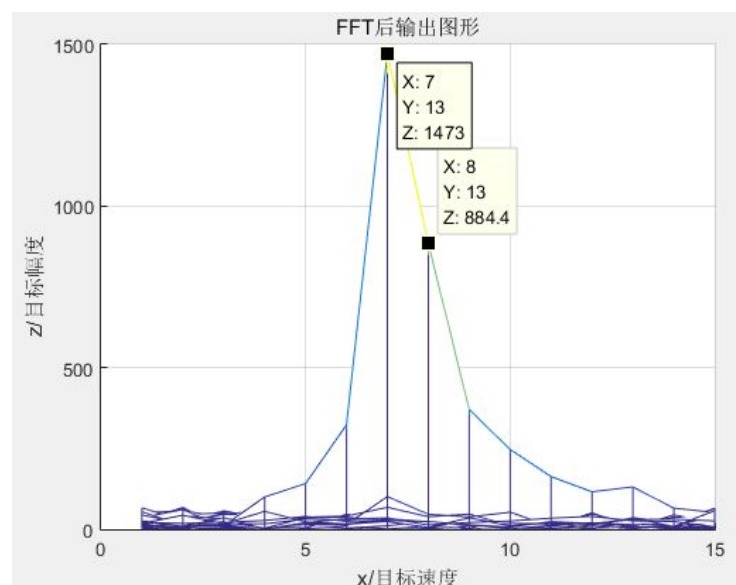
仿真:  $\text{snr1} = 42.5546\text{dB}$  与理论值相比, 误差很小。

脉压后时宽比  $D = PT_b/T_b = P$ ; 相位编码信号带宽  $B = 1/T_b$ , 取决于子脉冲宽度, 相位编

码信号时宽带宽积  $D = PT_b \times (1/T_b) = P$ ; 对于相位编码信号: 时宽带宽积=输入输出时宽

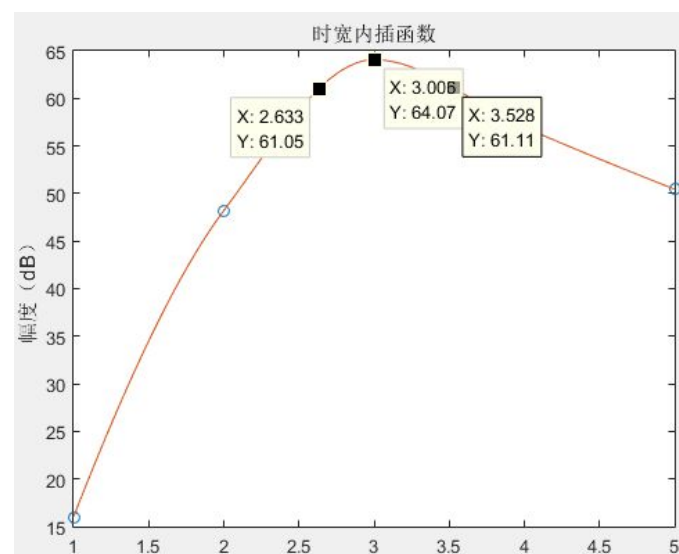
比值=相位编码信号压缩比;

FFT 后, 距离方向上看时宽, 时宽不变; 速度方向上看带宽, 带宽取主瓣峰值下降一半时的 3dB 带宽。

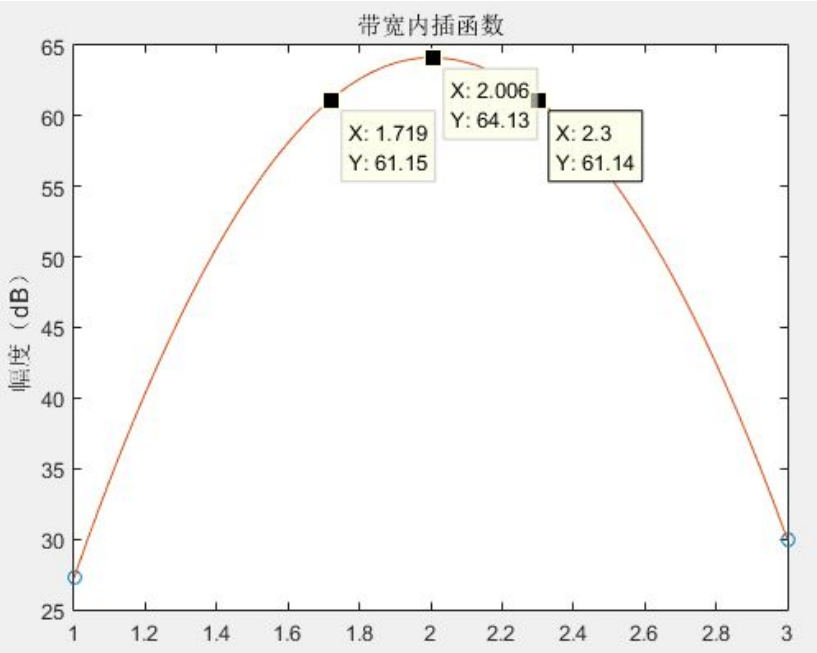


内插三个点, 便于观察 FFT 后的时宽和带宽:

如下图: 时宽为  $(3.528 - 2.633) \times T_b = 0.895 \times 0.5\mu\text{s} = 0.4475\mu\text{s}$

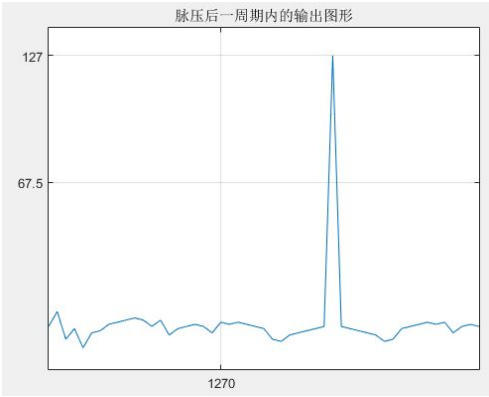


如下图：带宽为  $(2.3-1.719) \times 1/T_b = 0.581 \times 2M = 1.162\text{MHz}$

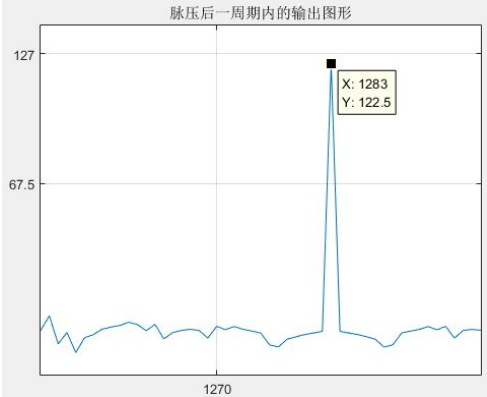


4、脉压时多卜勒敏感现象和多卜勒容限及其性能损失（脉压主瓣峰值与多卜勒的曲线）。伪随机 m 序列信号存在伪码调相信号所具有的多普勒敏感问题，随着多普勒频移的增加，脉压后输出的主瓣峰值下降，旁瓣增加，主旁瓣比降低，SNR 也有一定损失。

仿真：fd=0：主瓣峰值为 127（21.04dB）

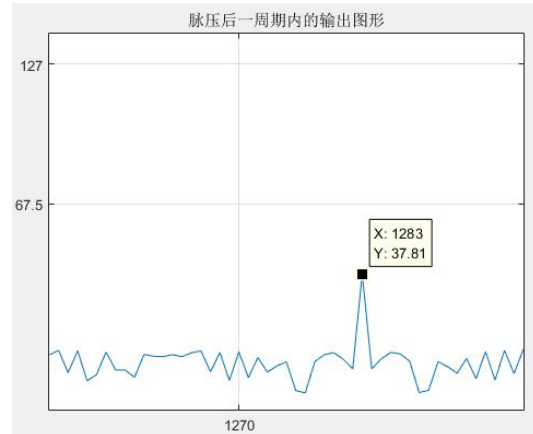
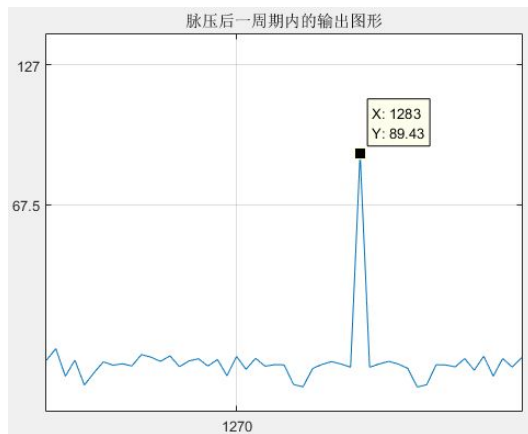


fd=1KHz:

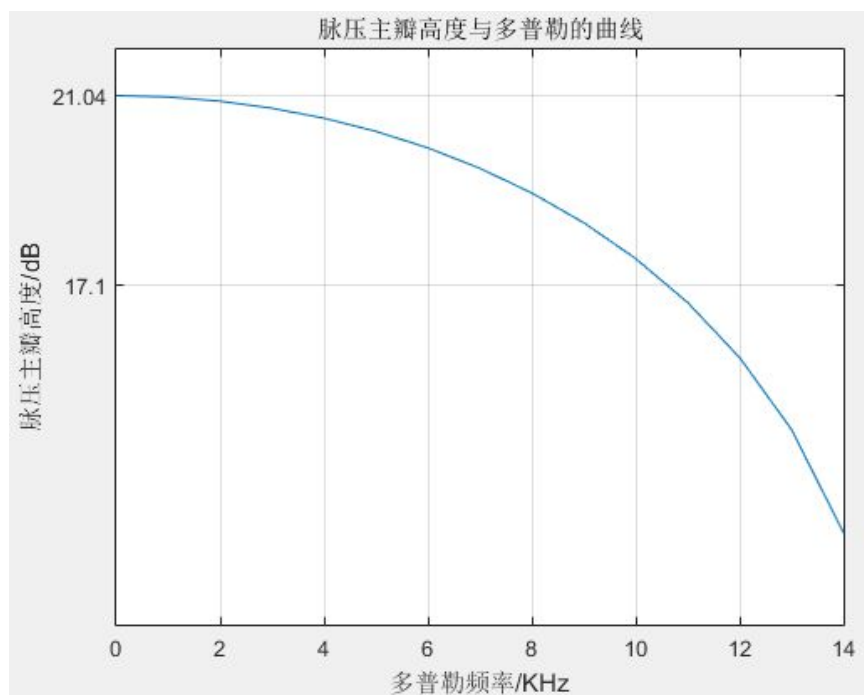


fd=3KHz:

fd=5KHz:



绘制脉压主瓣高度与多普勒的曲线如下图（取了十组数据， $f_d$  依次增加 1KHz），在高度下降 3.94dB 时得到多普勒容限  $1/2PT=10574\text{KHz}$  与仿真结果相差不大。



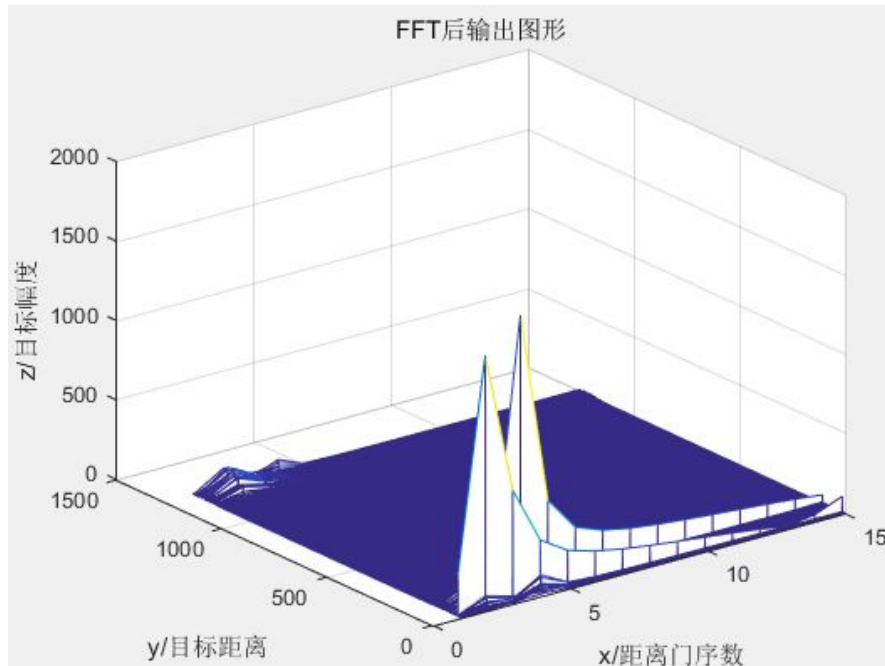
## (2) 双目标

### 1、大目标旁瓣未掩盖小目标；

幅度都为 1，距离和速度都不相同

$d_1=8000\text{m}; d_2=1000\text{m}; v_1=5\text{m/s}; v_2=2\text{m/s};$

图中可以看到大目标和小目标

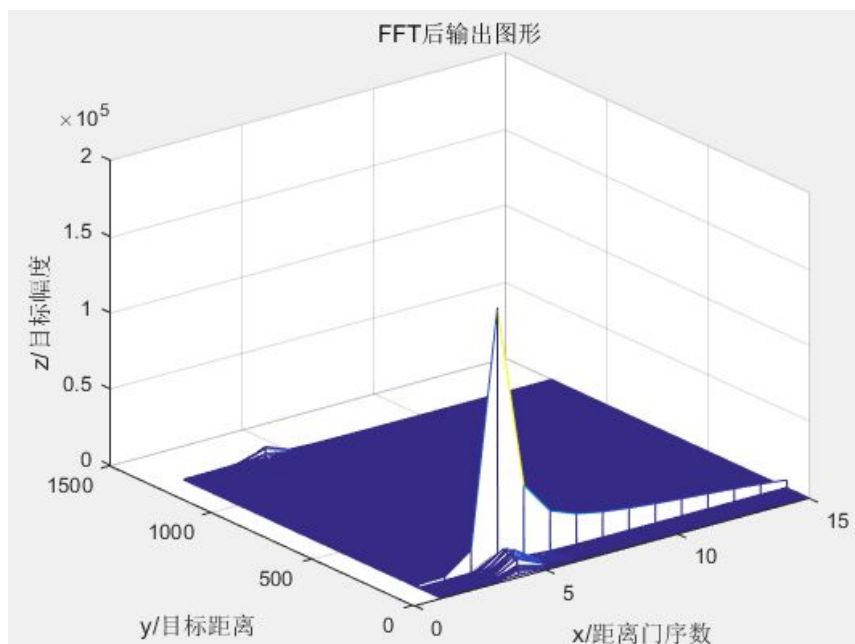


## 2、大目标旁瓣掩盖小目标；

大目标幅度为 100，小目标幅度为 1，距离和速度都不相同

$d_1=8000\text{m}$ ;  $d_2=1000\text{m}$ ;  $v_1=5\text{m/s}$ ;  $v_2=2\text{m/s}$ ;

图中只能看到大目标，小目标被掩盖



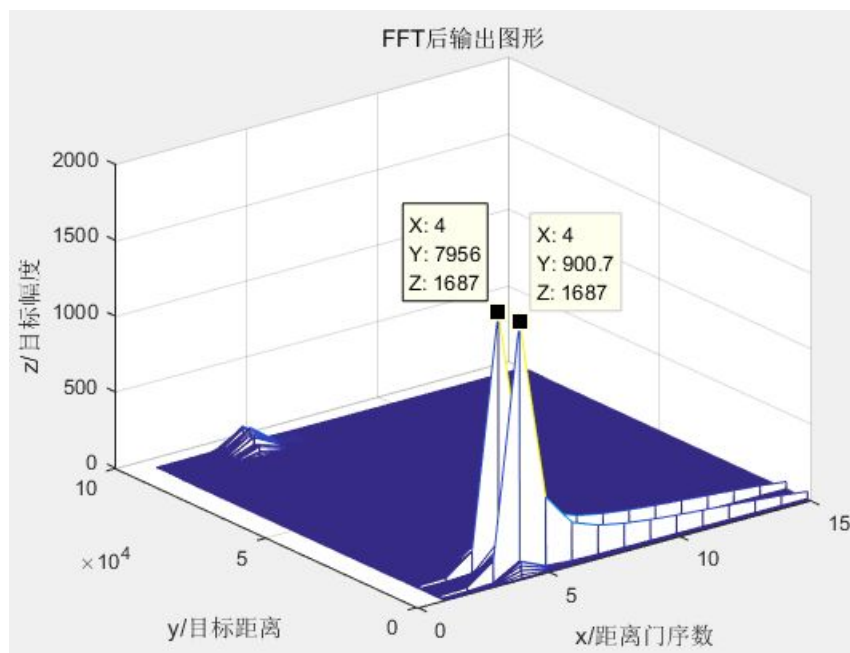
## 3、距离分辨

保持两个目标的速度相同。各个距离门上的参考码是由发射码字依次经过延迟一个码元时间得到的，每个距离门依次相差一个码元时间。

故距离分辨： $\Delta d = T_b \times c / 2 = 0.5 \mu\text{s} \times 3 \times 10^8 (\text{m/s}) / 2 = 75\text{m}$

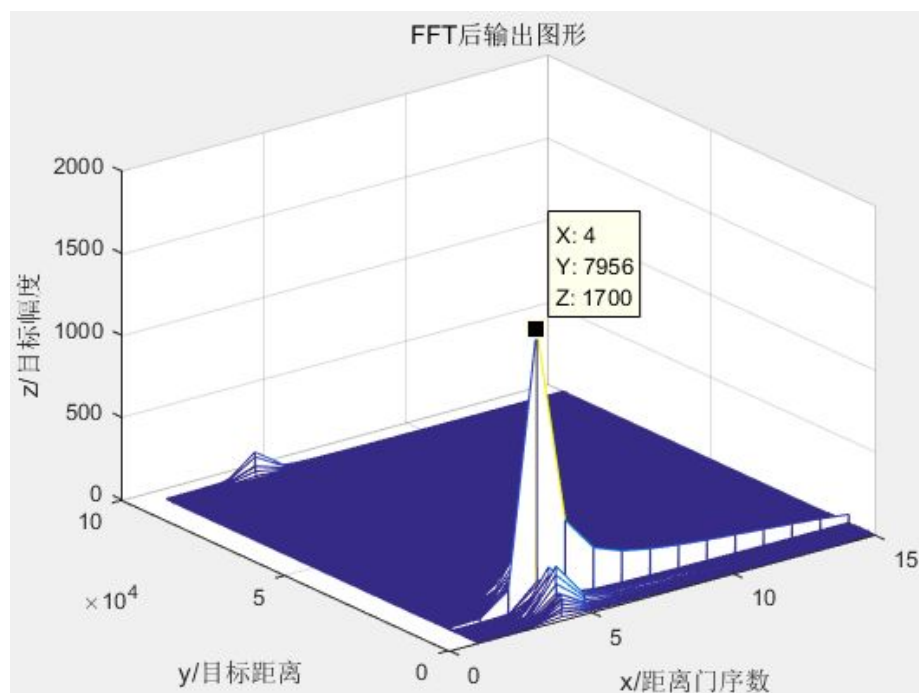
1) 幅度都为 1，速度相同  $v_1=v_2=5\text{m/s}$ ，距离不相同  $d_1=1000\text{m}$ ,  $d_2=8000\text{m}$

此时图中可以分辨出两个目标



2) 幅度都为 1，速度相同  $v_1=v_2=5\text{m/s}$ ，距离不相同  $d_1=7925\text{m}, d_2=8000\text{m}$

此时图中不可以分辨出两个目标



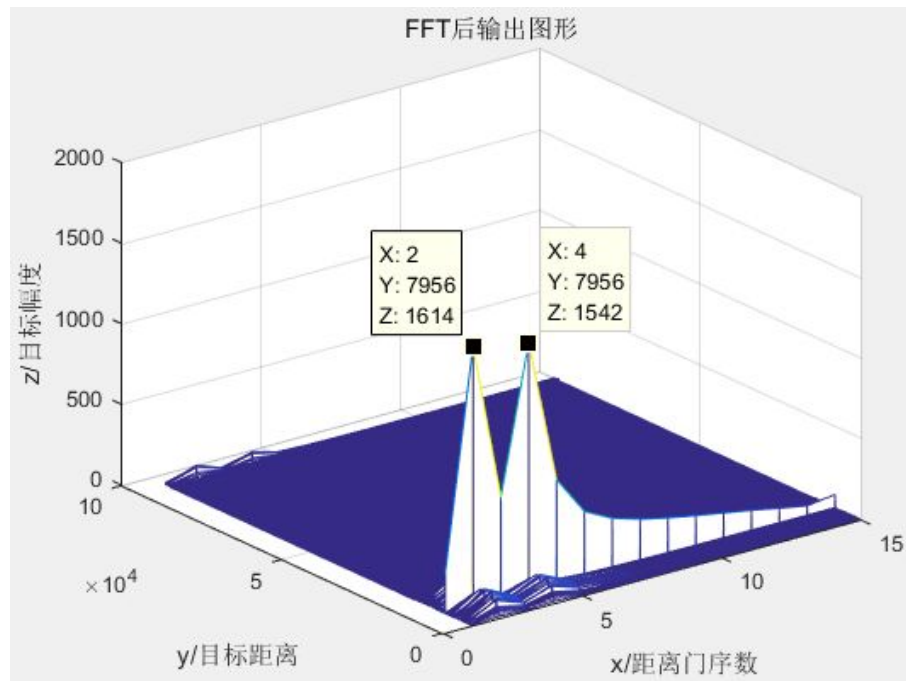
#### 4、速度分辨

保持两个目标的距离相同。对  $N$  点进行作 FFT，可得此关系式： $K/N = f_d P T_b$ ，其中  $\kappa$  为

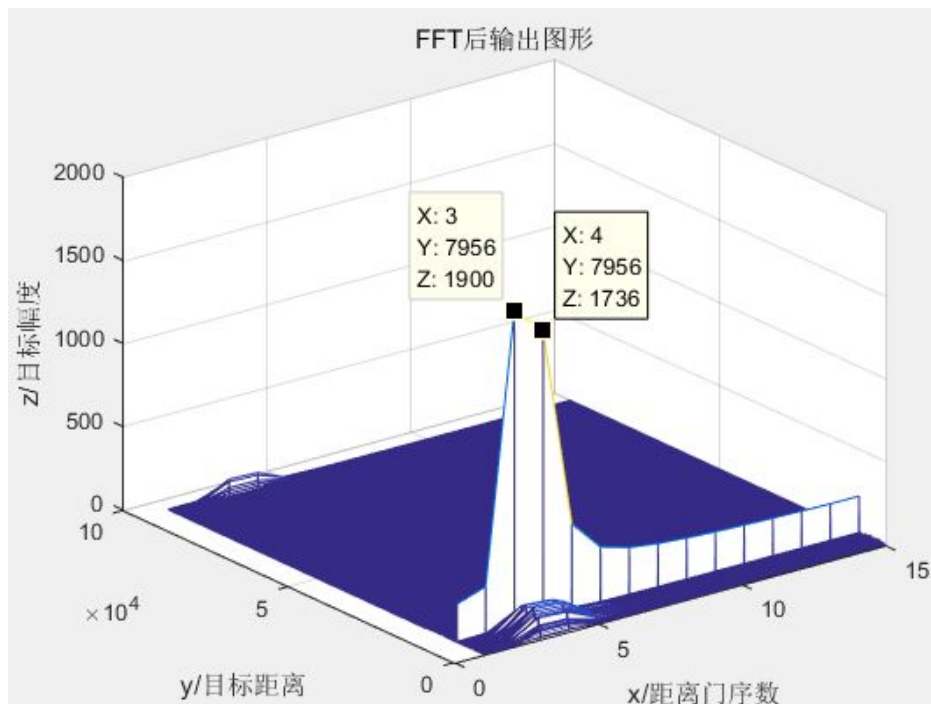
距离门序号。由于  $f_d = 2 * v / \lambda$ ，可得当  $\kappa=1$  时， $\Delta v = K \times \lambda / (2 \times N \times P \times T_b) = 1.57 \text{m/s}$ ，

1) 幅度都为 1，距离相同  $d_1=d_2=8000\text{m}$ ，速度不相同  $v_1=2\text{m/s}, v_2=5\text{m/s}$

此时图中可以分辨出两个目标



2) 幅度都为 1，距离相同  $d_1=d_2=8000\text{m}$ ，速度不相同  $v_1=3\text{m/s}, v_2=5\text{m/s}$   
此时图中不可以分辨出两个目标，两个信号有所重叠



## 五、源程序

### 1、m 序列双值电平循环自相关函数

```

clear all;
close all;
clc;
%=====条件=====
fm=2e6;%码频
fc=10e9;%载频
c=3e8;%光速
t=10e-3;%相干积累总时宽
T=1/fm*1270;%相位编码周期
N=15;%周期重复次数 (t/T)
%=====m 序列产生=====
connection=[1 0 0 0 0 0 1];
n=length(connection);
reg=[0 0 0 0 0 0 1];
mseqmatrix(1)=reg(n);
for i=2:127
    newreg(1)=mod(sum(connection.*reg),2);
for j=2:n
    newreg(j)=reg(j-1);
end
reg=newreg;
mseqmatrix(i)=reg(n);
end
m_bip=2*mseqmatrix-1;%双值电平
%=====单目标=====

pipei=fliplr(m_bip);%矩阵沿垂直轴左右翻转
hbb=conv(pipei,m_bip);

for p=1:127*5
    c=0;
    for k=1:127
        if (mod((p+k),127)==0)
            m1=127;
        else
            m1=mod(p+k,127);
        end
        c=c+m_bip(k)*m_bip(m1);
    end
    zxg(p)=c;
end
figure;plot(zxg);
title('3.m 序列的双值电平循环自相关函数');
set(gca,'Ytick',127,'Xtick',127);

```

## 2、时宽内插

```
clear all;
clc;
%=====条件=====
fm=2e6;%码频
fc=10e9;%载频
c=3e8;%光速
t=10e-3;%相干积累总时宽
T=1/fm*1270;%相位编码周期
N=15;%周期重复次数(t/T)
snr=5;%目标回波输入信噪比(-35~10dB)
d=1000;%目标距离(0~10000m)
v=2;%目标速度(0~1000m/s)
A=1;%目标幅度(1~100)
m=1270;%一个周期内的采样点个数
t1=2*d/c;%延时
n1=fix(t1/5e-7);%延时补零个数
%=====m序列产生=====
connection=[1 0 0 0 0 0 1];
n=length(connection);
reg=[1 0 1 0 1 0 1];
mseqmatrix(1)=reg(n);
for i=2:127
    newreg(1)=mod(sum(connection.*reg),2);
for j=2:n
    newreg(j)=reg(j-1);
end
reg=newreg;
mseqmatrix(i)=reg(n);
end
m_bip=2*mseqmatrix-1;%双值电平
m_1270=[m_bip zeros(1,1143)];%占空比10%补零
hb= repmat(m_1270,1,N);
pipei=flip1r(m_1270);%矩阵沿垂直轴左右翻转
hbb=conv(pipei,hb);
[maxa,adress]=max(hbb);
for i=1:5
y(i)=20*log10(hbb(i+adress-3));
end
x=1:1:5;
xi=1:1/360:5;
yi=interp1(x,y,xi,'cubic');%内插函数
figure;
plot(x,y,'o',xi,yi);
```



```
ylabel('幅度 (dB) ');
title('时宽内插函数');
```

### 3、单目标

```
clear all;
clc;
%=====条件=====
fm=2e6;%码频
fc=10e9;%载频
c=3e8;%光速
t=10e-3;%相干积累总时宽
T=1/fm*1270;%相位编码周期
N=15;%周期重复次数 (t/T)
snr=5;%目标回波输入信噪比 (-35~10dB)
d=1000;%目标距离 (0~10000m)
v=2;%目标速度 (0~1000m/s)
A=1;%目标幅度 (1~100)
m=1270;%一个周期内的采样点个数
t1=2*d/c;%延时
n1=fix(t1/5e-7);%延时补零个数
%=====m 序列产生=====
connection=[1 0 0 0 0 0 1];
n=length(connection);
reg=[0 0 0 0 0 0 1];
mseqmatrix(1)=reg(n);
for i=2:127
    newreg(1)=mod(sum(connection.*reg),2);
for j=2:n
    newreg(j)=reg(j-1);
end
reg=newreg;
mseqmatrix(i)=reg(n);
end
m_bip=2*mseqmatrix-1;%双值电平
%=====单目标=====
pipei=fliplr(m_bip);%矩阵沿垂直轴左右翻转
hbb=conv(pipei,m_bip);
subplot(3,1,1);plot(hbb);title('1.m 序列的双值电平自相关函数');
axis([100 150 -10 140]);grid on;
set(gca,'Ytick',[67.5,127],'Xtick',[126.5,127.5]);
m_1270=[m_bip zeros(1,1143)];%占空比 10%补零
hb= repmat(m_1270,1,N);
subplot(3,1,2);plot(hb);title('2. 占空比为 10%的发射脉冲');
```

```

set(gca, 'Xtick', [127, 1270]);
clear j;
%-----回波-----
hb=[zeros(1,n1) hb(1:1270*N-n1)]*A;%加延时
fd=2*v/(c/fc);
duopule=exp(j*2*pi.*(1:1:1270*N)*fd/fm);
hb1=hb.*duopule;%加多普勒
hb2=awgn(hb1,snr,'measured');%加噪声
% subplot(3,1,1);plot(real(hb));
% subplot(3,1,2);plot(real(hb1));
% subplot(3,1,3);plot(real(hb2));title('受多普勒频率调制的回波');
figure;plot(real(hb2));title('受多普勒频率调制的回波');
%xlabel('t/\mus'),ylabel('hb2(t)')
%-----脉压-----
pipei=fliplr(m_1270);
hbb1=conv(pipei,hb1);
% m_hb1=abs(hbb1);
% m_hb=abs(hbb1)/max(m_hb1);
% m_hb=10*log10(m_hb);
% figure;plot(m_hb);
hbb2=hbb1(1:2000);
figure;plot(real(hbb2));
title('脉压后一周期内的输出图形');
axis([1250 1300 -20 140]);grid on;
set(gca, 'Ytick', [67.5, 127], 'Xtick', 1270);
%-----脉压主瓣高度与多普勒的曲线-----%
fd1=0:1000:14000;h=1:1:15;
for i=1:15
duopule1=exp(j*2*pi.*(1:1:1270)*fd1(i)/fm);
hb3=m_1270.*duopule1;
pipei=fliplr(m_1270);
hbb3=conv(pipei,hb3);
h(i)=max(10*log10(abs(hbb3)));
%h(i)=max(abs(hbb3));
end
figure;plot(fd1*1e-3,h);
title('脉压主瓣高度与多普勒的曲线');
xlabel('多普勒频率/KHz');ylabel('脉压主瓣高度/dB');
grid on;
set(gca, 'Ytick', [17.1, 21.04]);
hbb4=conv(pipei,hb2);
%-----距离门重排-----%
for r=1:N
for h=1:m

```

```

s_hb2(h,r)=hbb4((r-1)*m+h);
end
end
figure;mesh(1:N,1:m,real(s_hb2));
%figure;mesh(1:N,linspace(0,95250,1270),real(s_hb2));
title('脉压后输出图形');
xlabel('x/距离门序号');ylabel('y/目标距离');zlabel('z/目标幅度');
%-----
for h=1:m
r_fft2(h,:)=abs(fft(s_hb2(h,:)));
end
%figure;mesh(1:N,linspace(0,95250,1270),10*log10(real(r_fft2)));
figure;mesh(1:N,1:1270,real(r_fft2))
title('FFT 后输出图形');
xlabel('x/目标速度');ylabel('y/目标距离');zlabel('z/目标幅度');

```

#### 4、FFT 后的时宽带宽内插

```

clear all;
clc;
%=====条件=====
fm=2e6;%码频
fc=10e9;%载频
c=3e8;%光速
t=10e-3;%相干积累总时宽
T=1/fm*1270;%相位编码周期
N=15;%周期重复次数(t/T)
snr=5;%目标回波输入信噪比(-35~10dB)
d=1000;%目标距离(0~10000m)
v=2;%目标速度(0~1000m/s)
A=1;%目标幅度(1~100)
m=1270;%一个周期内的采样点个数
t1=2*d/c;%延时
n1=fix(t1/5e-7);%延时补零个数
%=====m 序列产生=====
connection=[1 0 0 0 0 0 1];
n=length(connection);
reg=[1 0 1 0 1 0 1];
mseqmatrix(1)=reg(n);
for i=2:127
newreg(1)=mod(sum(connection.*reg),2);
for j=2:n
newreg(j)=reg(j-1);
end
reg=newreg;

```

```

mseqmatrix(i)=reg(n);
end
m_bip=2*mseqmatrix-1;%双值电平
%=====单目标=====
pipei=fliplr(m_bip);%矩阵沿垂直轴左右翻转
hbb=conv(pipei,m_bip);
m_1270=[m_bip zeros(1,1143)];%占空比10%补零
hb= repmat(m_1270,1,N);
clear j;
%-----回波-----
hb=[zeros(1,n1) hb(1:1270*N-n1)]*A;%加延时
fd=2*v/(c/fc);
duopule=exp(j*2*pi.*(1:1:1270*N)*fd/fm);
hb1=hb.*duopule;%加多普勒
hb2=awgn(hb1,snr,'measured');%加噪声
% subplot(3,1,1);plot(real(hb));
% subplot(3,1,2);plot(real(hb1));
% subplot(3,1,3);plot(real(hb2));title('受多普勒频率调制的回波');
figure;plot(real(hb2));title('受多普勒频率调制的回波');
%xlabel('t/\mus'),ylabel('hb2(t)')
%-----脉压-----
pipei=fliplr(m_1270);
hbb1=conv(pipei,hb1);
% m_hb1=abs(hbb1);
% m_hb=abs(hbb1)/max(m_hb1);
% m_hb=10*log10(m_hb);
% figure;plot(m_hb);
hbb2=hbb1(1:2000);
figure;plot(real(hbb2));
title('脉压后一周期内的输出图形');
axis([1250 1300 -20 140]);grid on;
set(gca,'Ytick',[67.5,127],'Xtick',1270);
%-----脉压主瓣高度与多普勒的曲线-----%
fd1=0:1000:14000;h=1:1:15;
for i=1:15
duopule1=exp(j*2*pi.*(1:1:1270)*fd1(i)/fm);
hb3=m_1270.*duopule1;
pipei=fliplr(m_1270);
hbb3=conv(pipei,hb3);
h(i)=max(10*log10(abs(hbb3)));
%h(i)=max(abs(hbb3));
end
figure;plot(fd1*1e-3,h);
title('脉压主瓣高度与多普勒的曲线');

```

```

xlabel('多普勒频率/KHz');ylabel('脉压主瓣高度/dB');
grid on;
set(gca,'Ytick',[17.1,21.04]);
hbb4=conv(pipei,hb2);
%-----距离门重排-----%
for r=1:N
for h=1:m
s_hb2(h,r)=hbb4((r-1)*m+h);
end
end
figure;mesh(1:N,1:m,real(s_hb2));
%figure;mesh(1:N,linspace(0,95250,1270),real(s_hb2));
title('脉压后输出图形');
xlabel('x/距离门序号');ylabel('y/目标距离');zlabel('z/目标幅度');
%-----
for h=1:m
r_fft2(h,:)=abs(fft(s_hb2(h,:)));
end
%figure;mesh(1:N,linspace(0,95250,1270),10*log10(real(r_fft2)));
figure;mesh(1:N,1:1270,real(r_fft2));
title('FFT 后输出图形');
xlabel('x/目标速度');ylabel('y/目标距离');zlabel('z/目标幅度');
%-----FFT 的时宽和带宽
%求时宽
for i=1:m
for j=1:N
m_hb1(N*(i-1)+j)=r_fft2(i,j);
end
end
%把 FFT 后的矩阵转换为一维数组
[max0,address]=max(m_hb1);%取出最大值的位置
for i=(address-2):(address+2);
y0(i-(address-3))=m_hb1(i);
y(i-(address-3))=20*log10(y0(i-(address-3)));
end
x=1:1:5;
xi=1:1/360:5;
yi=interp1(x,y,xi,'cubic');%内插函数
figure;
plot(x,y,'o',xi,yi);
ylabel('幅度 (dB)');
title('时宽内插函数');
%求带宽
for i=1:N
for j=1:m

```

```

m_hb1(m*(i-1)+j)=r_fft2(j,i);
end
end %把FFT后的矩阵转换为一维数组
[max0,address]=max(m_hb1);%取出最大值的位置
for i=(address-1):(address+1);
y0(i-(address-2))=m_hb1(i);
y1(i-(address-2))=20*log10(y0(i-(address-2)));
end
x1=1:1:3;
xi1=1:1/360:3;
yi1=interp1(x1,y1,xi1,'cubic');%内插函数
figure;
plot(x1,y1,'o',xi1,yi1);
ylabel('幅度 (dB) ');
title('带宽内插函数');

```

## 5、计算信噪比

```

clear all;
clc;
%=====条件=====
fm=2e6;%码频
fc=10e9;%载频
c=3e8;%光速
t=10e-3;%相干积累总时宽
T=1/fm*1270;%相位编码周期
N=15;%周期重复次数(t/T)
snr0=10;%目标回波输入信噪比(-35~10dB)
d=1000;%目标距离(0~10000m)
v=0;%目标速度(0~1000m/s)
A=1;%目标幅度(1~100)
m=1270;%一个周期内的采样点个数
t1=2*d/c;%延时
n1=fix(t1/5e-7);%延时补零个数
%=====m序列产生=====
connection=[1 0 0 0 0 0 1];
n=length(connection);
reg=[0 0 0 0 0 0 1];
mseqmatrix(1)=reg(n);
for i=2:127
    newreg(1)=mod(sum(connection.*reg),2);
for j=2:n
    newreg(j)=reg(j-1);
end
reg=newreg;

```

```

mseqmatrix(i)=reg(n);
end
m_bip=2*mseqmatrix-1;%双值电平
snr=snr0-10;
%=====单目标=====
m_1270=[m_bip zeros(1,1143)];%占空比10%补零
hb= repmat(m_1270,1,N);
clear j;
%-----回波-----
hb=[zeros(1,n1) hb(1:1270*N-n1)]*A;%加延时
fd=2*v/(c/fc);
duopule=exp(j*2*pi.*(1:1:1270*N)*fd/fm);
hb1=hb.*duopule;%加多普勒
hb2=awgn(hb1,snr,'measured');%加噪声
%-----脉压后的 SNR 计算-----
pipei=fliplr(m_1270);%矩阵沿垂直轴左右翻转
hbb1=conv(pipei,hb1);%无噪声
hbb2=conv(pipei,hb2);%有噪声
hbb3=hbb2-hbb1;
%-----距离门重排-----%
for r=1:N
for h=1:m
s_hb1(h,r)=hbb1((r-1)*m+h);
s_hb2(h,r)=hbb2((r-1)*m+h);
s_hb3(h,r)=hbb3((r-1)*m+h);
end
end
pp=10*log10(max(max(abs(real(s_hb1))))*max(max(abs(real(s_hb1)))));
pn=s_hb3.*s_hb3;
pn=sum(abs(real(pn(:))))/1270/N;
pn=10*log10(pn);
snr1=pp-pn;
snr1;
%-----
for h=1:m
r_fft1(h,:)=abs(fft(s_hb1(h,:)));
r_fft3(h,:)=abs(fft(s_hb3(h,:)));
end
pp1=10*log10(max(max(r_fft1))*max(max(r_fft1)));
pn1=r_fft3.*r_fft3;
pn1=sum(pn1(:))/1270/N;
pn1=10*log10(pn1);
snr2=pp1-pn1;
snr2;

```

## 6、双目标

```
clear all;
clc;
close all;
%=====条件=====
fm=2e6;%码频
fc=10e9;%载频
c=3e8;%光速
t=10e-3;%相干积累总时宽
T=1/fm*1270;%相位编码周期
N=15;%周期重复次数(t/T)
snr=-10;%目标回波输入信噪比(-35~10dB)
d1=8000;
d2=1000;%目标距离(0~10000m)
v1=6;
v2=6;%目标速度(0~1000m/s)
A1=1;
A2=1;%目标幅度(1~100)
m=1270;%一个周期内的采样点个数
t1=2*d1/(3e8);
t2=2*d2/(3e8);%延时
n1=round(t1/(5e-7));
n2=round(t2/(5e-7));%延时补零个数
%=====m序列产生=====
connection=[1 0 0 0 0 0 1];
n=length(connection);
reg=[0 0 0 0 0 0 1];
mseqmatrix(1)=reg(n);
for i=2:127
    newreg(1)=mod(sum(connection.*reg),2);
for j=2:n
    newreg(j)=reg(j-1);
end
reg=newreg;
mseqmatrix(i)=reg(n);
end
clear j;
m_bip=2*mseqmatrix-1;
m_1270=[m_bip zeros(1,1143)];
hb= repmat(m_1270,1,N);
%-----加延时和多普勒的回波-----
hb1=[zeros(1,n1) hb(1:1270*N-n1)]*A1;
hb2=[zeros(1,n2) hb(1:1270*N-n2)]*A2;
fd1=2*v1/(c/fc);
```



```

fd2=2*v2/(c/fc);
duopule1=exp(j*2*pi.*(1:1:1270*N)*fd1/fm);
duopule2=exp(j*2*pi.*(1:1:1270*N)*fd2/fm);
hb21=hb1.*duopule1;
hb22=hb2.*duopule2;
hb23=hb21+hb22;
hb31=awgn(hb23,snr,'measured');
%-----脉压-----
pipei=fliplr(m_1270);
hbb2=conv(pipei,hb31);
%-----距离门重排-----
for r=1:N
for h=1:m
s_hb2(h,r)=hbb2((r-1)*m+h);
end
end
%-----
for h=1:m
r_fft(h,:)=abs(fft(s_hb2(h,:)));
end
figure;mesh(1:N,linspace(0,95250,1270),real(r_fft));
%figure;mesh(1:N,1:1270,real(r_fft));
title('FFT 后输出图形');
xlabel('x/距离门序号');ylabel('y/目标距离');zlabel('z/目标幅度');

```

## 六、实验感想

经过这次仿真实验，我加深了对伪随机相位编码脉冲雷达和匹配滤波器的理解，了解掌握了包括信号脉压以后信噪比、压缩比、增益、时宽带宽、多普勒敏感现象和多普勒容限在内的相关知识，不仅对过去所学内容进行了回顾与巩固，还在实验过程中学到很多新的知识，更全面地认识了信号处理的过程，也认识到脉冲压缩技术广泛应用于雷达系统，并具有重要地位。同时我也通过这次仿真实验，熟悉了 MATLAB 的仿真环境和实验中需要用到的一些函数，学会借助软件工具编程并进行仿真，真正地将理论知识和实际操作联系在了一起，获益匪浅，也很感谢实验过程中顾红老师提供的一些帮助与指导。