

%%

正侧视

CSA

点目标仿真

%%

## 1. 定义仿真参数

原始信号生成部分与 RDA 点目标仿真时完全相同，参数设置也完全一致。

但是值得注意的是：

在 CSA 中需要选定参考目标，并由此选定参考距离、方位参考频率。

在点目标仿真中，我选定场景中心为参考目标，因此，场景中心的最近斜距即为参考距离，场景中心的多普勒中心频率就是参考频率：

```
R_ref = R0;           % 参考目标选在场景中心，其最近斜距为 R_ref
fn_ref = fnc;         % 参考目标的多普勒中心频率
```

## 2. 点目标位置的设定

将目标 2 和目标 3 的距离向距离差由 50m 调整为 80m，其余部分保持不变。

```
delta_R0 = 0;         % 将目标 1 的波束中心穿越时刻，定义为方位向时间零点。
delta_R1 = 120;        % 目标 1 和目标 2 的方位向距离差，120m
delta_R2 = 80;         % 目标 2 和目标 3 的距离向距离差，80m
```

% 目标 1

```
x1 = R0;              % 目标 1 的距离向距离
y1 = delta_R0 + x1*tan(sita_r_c); % 目标 1 的方位向距离
```

% 目标 2

```
x2 = x1;              % 目标 2 和目标 1 的距离向距离相同
y2 = y1 + delta_R1;    % 目标 2 的方位向距离
```

% 目标 3

```
x3 = x2 + delta_R2;    % 目标 3 和目标 2 有距离向的距离差，为 delta_R2
y3 = y2 + delta_R2*tan(sita_r_c); % 目标 3 的方位向距离
```

### 3. 距离（方位）向时间，频率相关定义

```

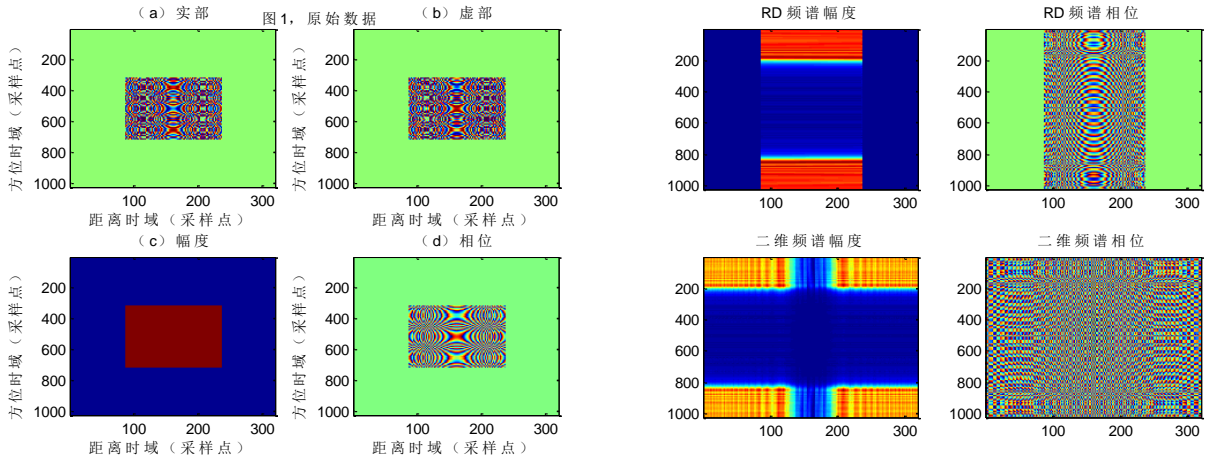
% 距离
tr = 2*R0/c + ( -Nrg/2 : (Nrg/2-1) )/Fr; % 距离时间轴
fr = ( -NFFT_r/2 : NFFT_r/2-1 )*( Fr/NFFT_r ); % 距离频率轴
% 方位
ta = ( -Naz/2 : Naz/2-1 )/Fa; % 方位时间轴
fa = fnc + fftshift( -NFFT_a/2 : NFFT_a/2-1 )*( Fa/NFFT_a ); % 方位频率轴

% 生成距离（方位）时间（频率）矩阵
tr_mtx = ones(Naz,1)*tr; % 距离时间轴矩阵，大小：Naz*Nrg
ta_mtx = ta.*ones(1,Nrg); % 方位时间轴矩阵，大小：Naz*Nrg
fr_mtx = ones(Naz,1)*fr; % 距离频率轴矩阵，大小：Naz*Nrg
fa_mtx = fa.*ones(1,Nrg); % 方位频率轴矩阵，大小：Naz*Nrg

```

### 4. 原始数据生成：此部分和 RDA 中完全一致。

当方位向只用一个合成孔径长度限制时，原始点目标回波数据及其 RD 域和二维频域频谱如下：



(a) 原始数据

(b) RD 域及二维频域频谱

### 5. 成像

#### 1) 变换到距离多普勒域，进行补余 RCMC

a) 首先第一步，很关键的是要进行数据搬移。也就是如同 RDA 中在距离压缩后，变换到距离多普勒域之前所做的一样，进行方位向频率轴对准。

```

s_rd = s_echo.*exp(-1j*2*pi*fnc.*(ta.*ones(1,Nrg)));
% 数据搬移

```

这么做的原因是因为我们将要变换到距离多普勒域进行方位处理。而方位处理中很重要的一点就是要设置方位频率轴，并将所设置的方位频率轴与数据的方位频率轴对准，实现正确的方位处理。

上面的这一步就是实现如此的目的。更详细的说明可以参见我在 RDA 仿真中的总结。

总之，记住一点：不管如何设置方位频率轴，不管对数据进行如何操作。我们的目的都是为了实现对准，一一对应的处理！

另外，由于正侧视下多普勒中心频率： $f_{\eta_c} = 0$ 。因此这里进行如此的数据搬移前后，实际上是没有变化的。但是还是要说，这一步是不能省的。

b) 通过方位向傅里叶变换，变换到距离多普勒域

c) 构造变标方程：

$$\text{徙动因子: } D(f_{\eta}, V_r) = \sqrt{1 - \frac{\lambda^2 f_{\eta}^2}{4V_r^2}} \quad (\text{这是随 } f_{\eta} \text{ 变化的})$$

$$\text{参考频率 } f_{\eta_{ref}} \text{ 处的徙动因子: } D(f_{\eta_{ref}}, V_r) = \sqrt{1 - \frac{\lambda^2 f_{\eta_{ref}}^2}{4V_r^2}} \quad (\text{这是一个定值})$$

变换到距离多普勒域后的距离调频率：

$$\begin{cases} K_m = \frac{K_r}{1 - K_r/K_{src}} \\ K_{src} = \frac{2V_r^2 f_0^3 D^3(f_{\eta}, V_r)}{cR_0 f_{\eta}^2} = \frac{2V_r^2 f_0^3 D^3(f_{\eta}, V_r)}{cR_{ref} f_{\eta}^2} \end{cases}$$

（在该 CS 算法中，假设  $K_m$  是不随距离变化的，但实际中并非如此，因此通常使用测绘带中心处（该仿真中选为参考目标）的  $K_m$  值，以使误差最小化。因此，在  $K_{src}$ （ $K_m$ ）的计算中最近斜距  $R_0$  是取的  $R_{ref}$ ）

变标方程：

$$\begin{aligned} s_{sc} &= \exp \left\{ j\pi K_m \left[ \frac{D(f_{\eta_{ref}}, V_r)}{D(f_{\eta}, V_r)} - 1 \right] (t_r')^2 \right\} \\ &= \exp \left\{ j\pi K_m \left[ \frac{D(f_{\eta_{ref}}, V_r)}{D(f_{\eta}, V_r)} - 1 \right] \left[ t_r - \frac{2R_{ref}}{cD(f_{\eta}, V_r)} \right]^2 \right\} \end{aligned}$$

- d) 在距离多普勒域，将信号与变标方程相乘，实现“补余 RCMC”：

$$S_{RD\_1} = S_{RD} \cdot S_{sc}$$

- 2) 变换到二维频域，进行“距离压缩，SRC，一致 RCMC”

- a) 将补余 RCMC 后的结果  $S_{RD\_1}$  通过距离向傅里叶变换，变换到二维频域，为  $S_{2df\_1}$ 。

注意，在 Matlab 中，经过距离 FFT 后，此时距离向零频在两端。

- b) 构造能同时进行距离压缩，SRC，一致 RCMC 的相位补偿滤波器是：

$$H_1 = \exp \left\{ j \frac{\pi D(f_\eta, V_r)}{K_m D(f_{\eta_{ref}}, V_r)} f_r^2 \right\} \\ \times \exp \left\{ j \frac{4\pi}{c} \cdot \left( \frac{1}{D(f_\eta, V_r)} - \frac{1}{D(f_{\eta_{ref}}, V_r)} \right) \cdot R_{ref} f_r \right\}$$

注意，在我的仿真参数设置下，这里构造的  $H_1$  滤波器，其距离向零频在中心；

- c) 可以通过对  $H_1$  加窗来实现距离向压缩的加窗处理，以抑制旁瓣；

- d) 在二维频域，相位相乘，实现距离压缩，SRC，一致 RCMC；

$$S_{2df\_2} = S_{2df\_1} \cdot H_1$$

注意，相位相乘时，要对  $H_1$  进行 fftshift 操作，以使相乘的两项的距离频率轴是对准的。

- e) 进行距离向傅里叶逆变换，回到距离多普勒域，完成所有距离处理

$$S_{RD\_2} = \text{ifft}(S_{2df\_2})$$

- 3) 在距离多普勒域，完成“方位压缩”和“附加相位校正”

- a) 构造方位向匹配滤波器

$$H_{az} = \exp \left\{ j \frac{4\pi R_{0\_rcmc} f_0 D(f_\eta, V_r)}{c} \right\} \\ R_{0\_rcmc} = \frac{c}{2} \cdot t_r$$

其中， $R_{0\_rcmc}$  是随距离线变化的最近斜距，这里由距离向时间乘以  $c/2$  得到。为

了以示区别，这里专门写为  $R_{0\_rcmc}$ ；

## b) 构造实现附加相位校正的滤波器

$$H_2 = \exp \left\{ -j \frac{4\pi K_m}{c^2} \cdot \left[ 1 - \frac{D(f_\eta, V_r)}{D(f_{\eta_{ref}}, V_r)} \right] \cdot \left[ \frac{R_{0\_rcmc}}{D(f_\eta, V_r)} - \frac{R_{ref}}{D(f_\eta, V_r)} \right]^2 \right\}$$

## c) 进行相位相乘，在距离多普勒域同时完成方位压缩和附加相位校正

$$S_{RD\_3} = S_{RD\_2} \cdot H_{az} \cdot H_2$$

## 4) 进行方位向傅里叶逆变换，回到图像域，完成方位处理，得到成像结果

$$s_{image} = \text{ifft}(S_{RD\_3})$$

至此，所有成像步骤完成，我们得到了点目标的成像结果。

最后，我利用与 RDA 中同样的方法，对点目标中心进行升采样，并且取出距离向切片和方位向切片，再计算得到其指标。

注意到，这里由于是正侧视，不涉及到点目标中心轴的旋转，因此只需要使用函数：  
target\_analysis(s\_ac, Fr, Fa, Vr) 即可，便可完成我们上面想得到的结果。

## 6. 单点目标仿真结果

## 1) 原始数据生成时，方位向只考虑一个合成孔径长度；

在二维频域进行距离压缩时，不加窗：

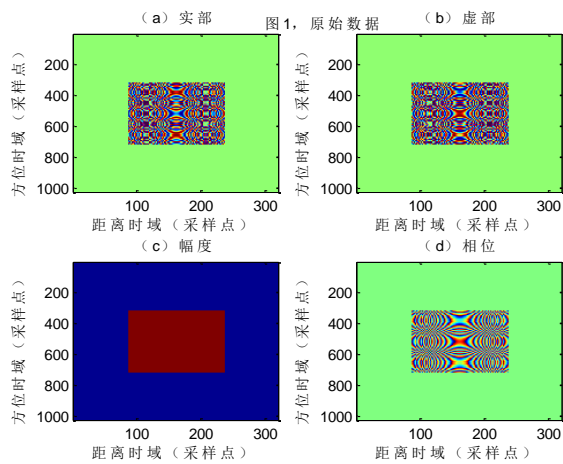


图 1 原始数据

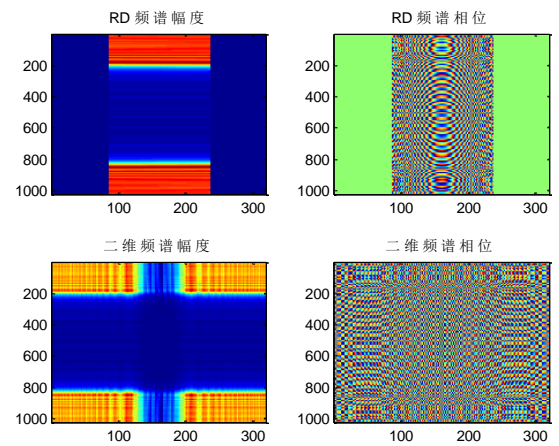


图 2 RD 域及二维频域频谱

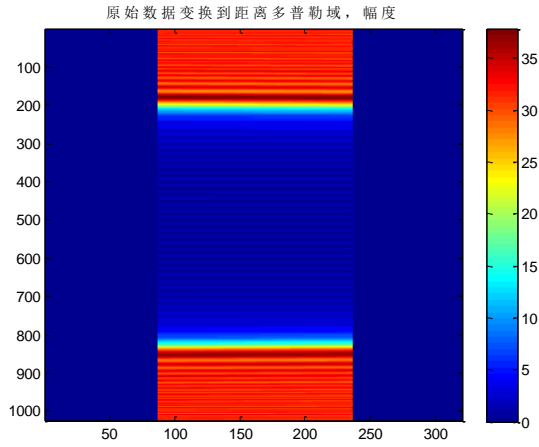


图 3 原始数据变换到 RD 域，幅度

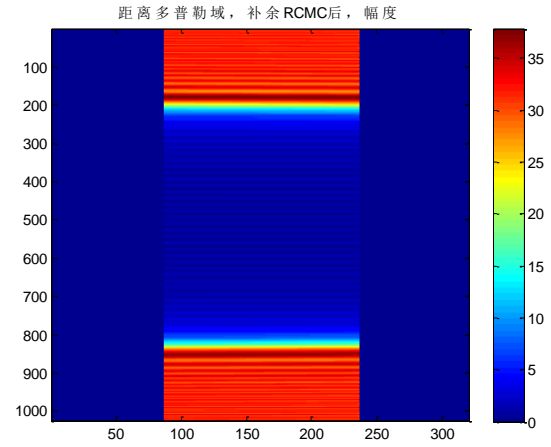


图 4 RD 域，补余 RCMC 后，幅度

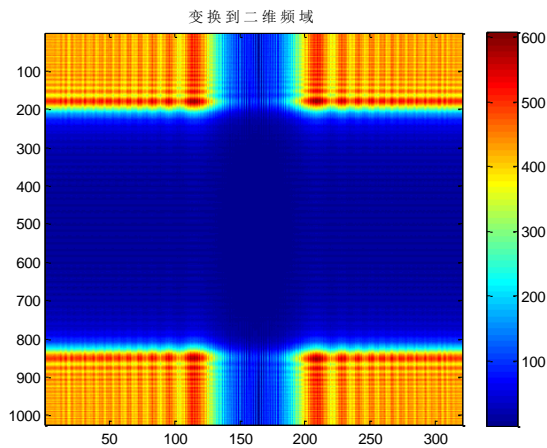


图 5 变换到二维频域，幅度

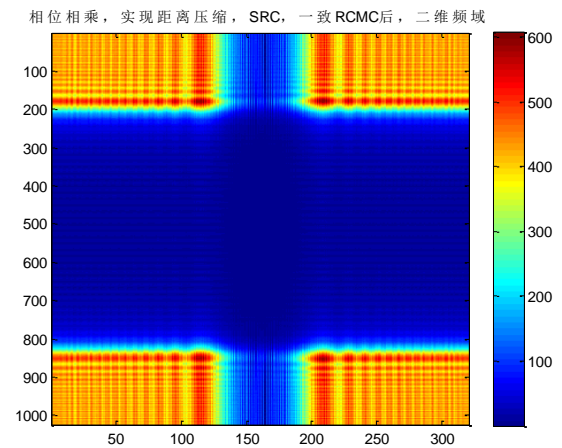


图 6 相位相乘，实现距离压缩，SRC，一致 RCMC 后，二维频域

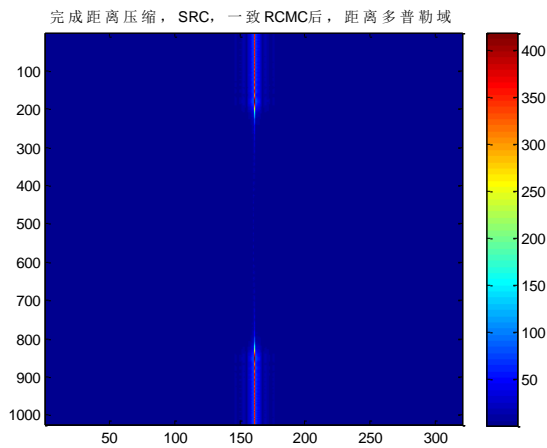


图 7 (a) 完成距离压缩，SRC，一致 RCMC 后，RD 域（即已完成所有距离处理）

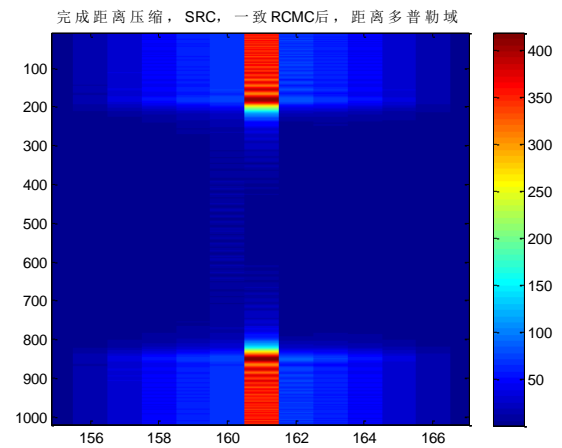


图 7 (b) 局部放大

距离多普勒域，进行了相位相乘后（方位MF和附加相位校正）

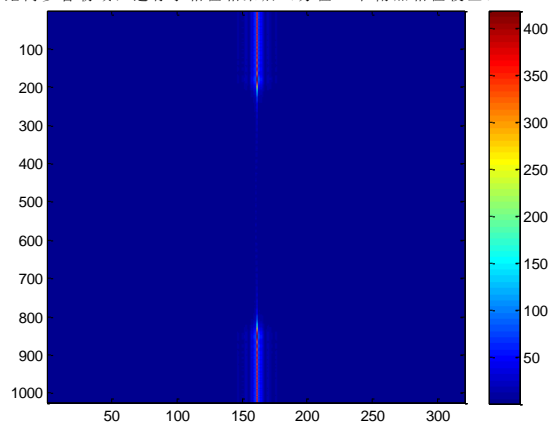


图 8 RD 域，进行方位 MF 和附加相位校正

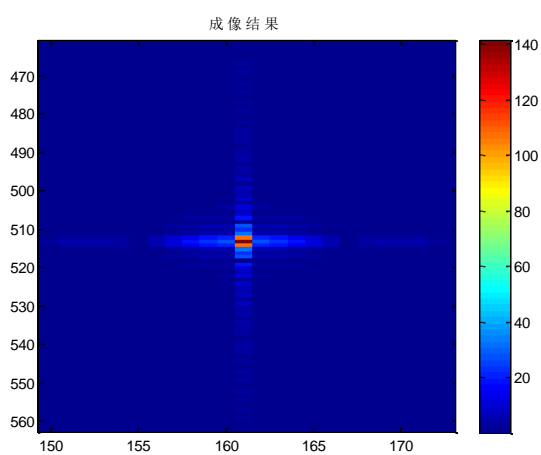


图 9 (a) 成像结果（局部放大）

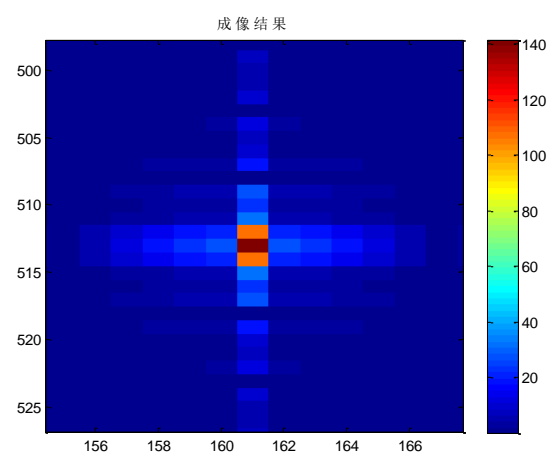


图 9 (b) 进一步放大

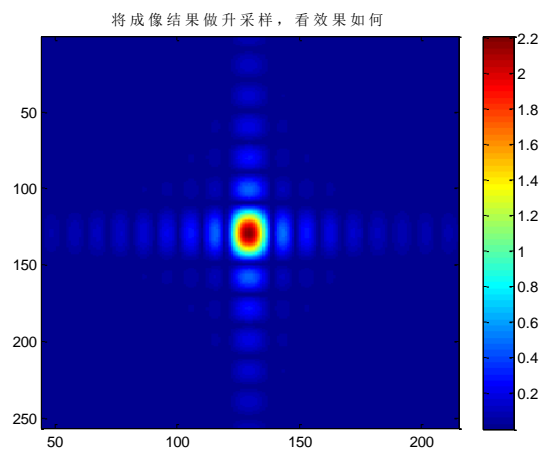


图 10 (a) 将成像结果升采样

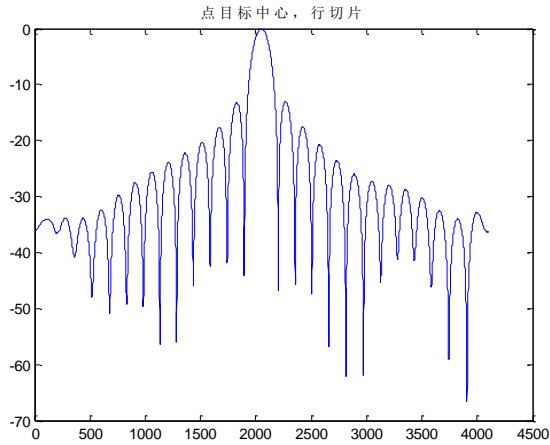


图 10 (b) 距离向切片

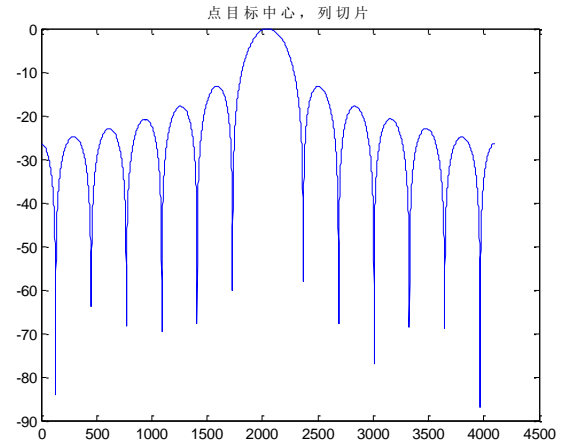


图 10 (c) 方位向切片

行切片，点目标中心距离向指标

PSLR	ISLR	IRW
-12.9996	-9.9847	2.6681

列切片，点目标中心方位向指标

PSLR	ISLR	IRW
-13.2607	-10.4862	1.6565

- 2) 原始数据生成时,方位向用天线双程方向图加权(同时限制为 1.135 个合成孔径长度);  
在二维频域进行距离压缩时, 加上一个  $\beta = 3$  的 Kaiser 窗

(之所以选择  $\beta = 3$ , 是因为此时如果我还选择  $\beta = 2.5$ , 则距离向脉压结果的 PSLR 明显小于 -20dB, 在 -17dB 左右, 而 ISLR 在 -15dB 左右。我认为这是加权不够造成的, 而非距离向处理有问题。因此我加大了权重):



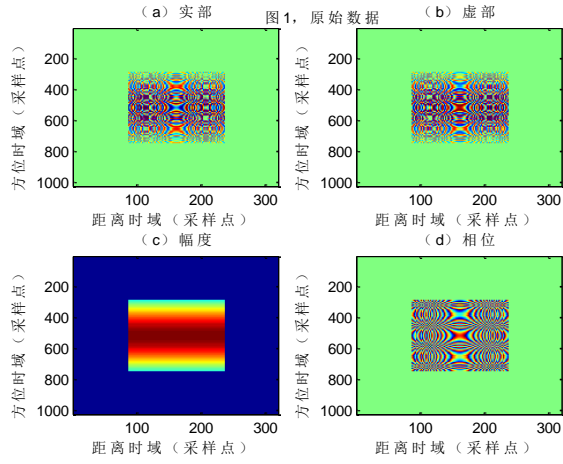


图 11 原始数据

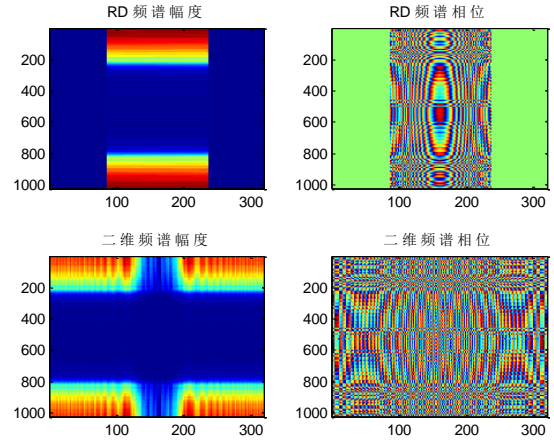


图 12 RD 域及二维频域频谱

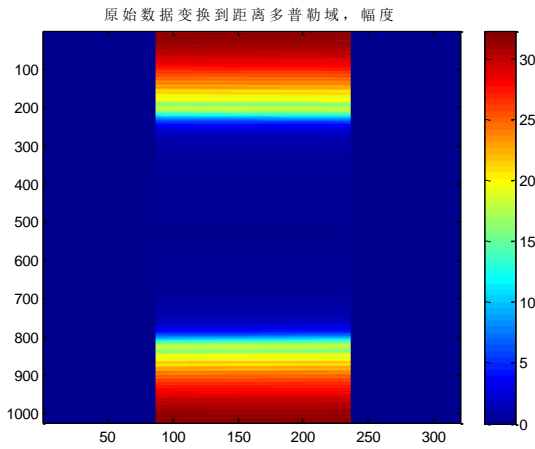


图 13 原始数据变换到 RD 域，幅度

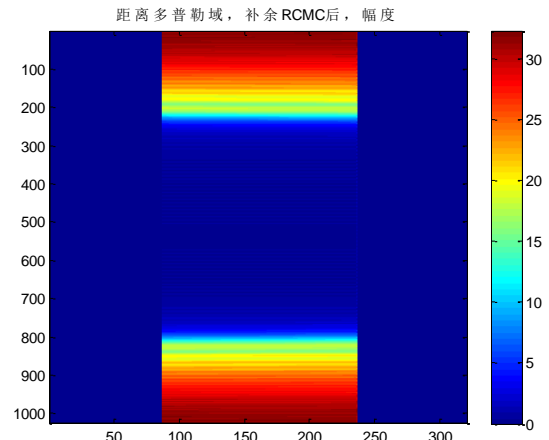


图 14 RD 域，补余 RCMC 后，幅度

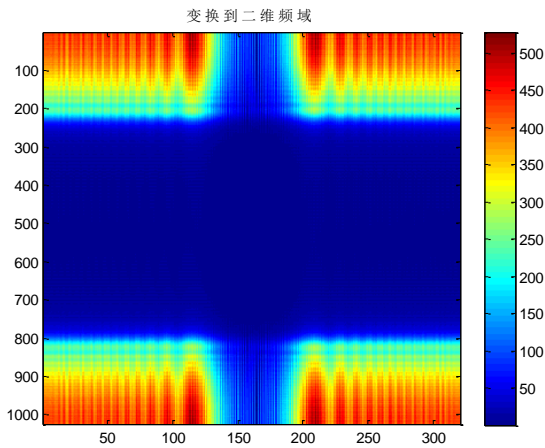


图 15 变换到二维频域，幅度

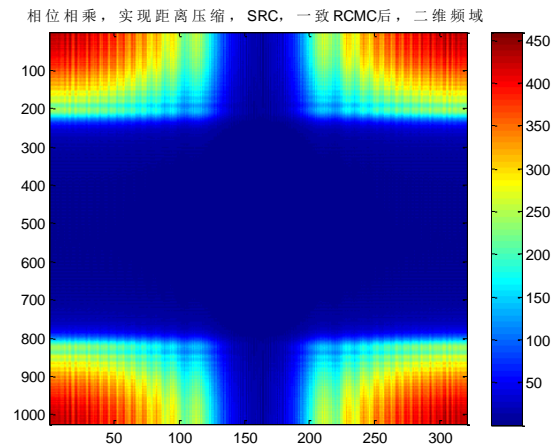


图 16 相位相乘，实现距离压缩，SRC，一致 RCMC 后，二维频域

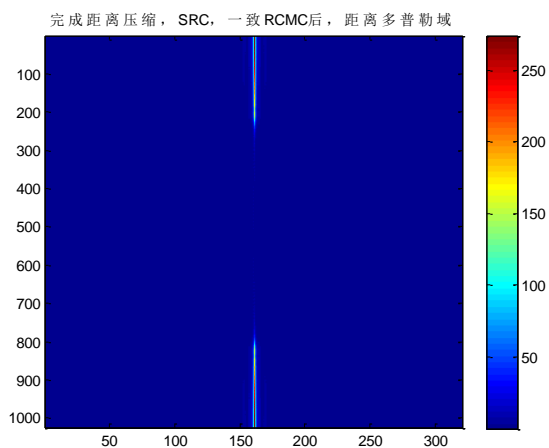


图 17 (a) 完成距离压缩，SRC，一致 RCMC 后，RD 域（即已完成所有距离处理）

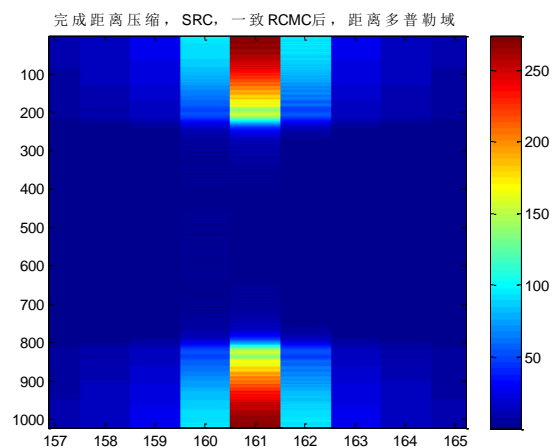


图 17 (b) 局部放大

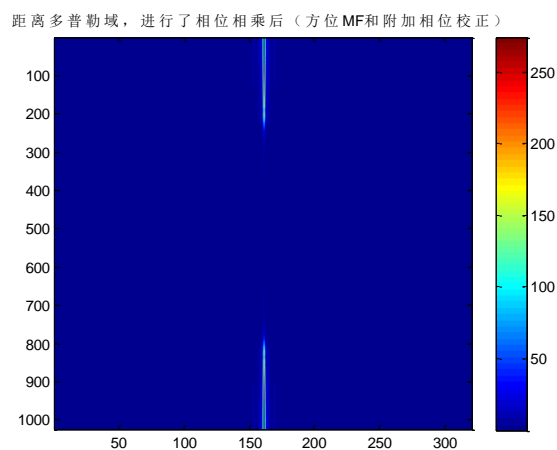


图 18 RD 域，进行方位 MF 和附加相位校正

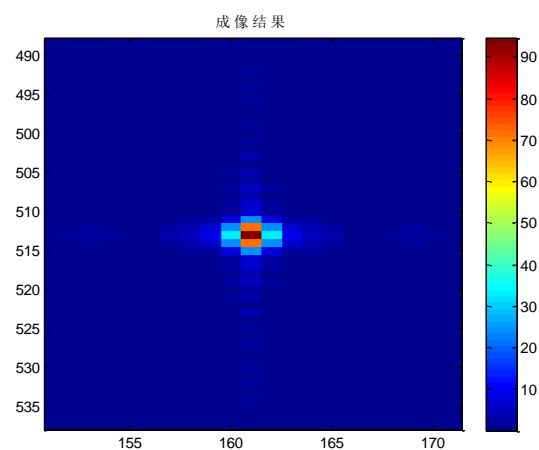


图 19 成像结果（局部放大）

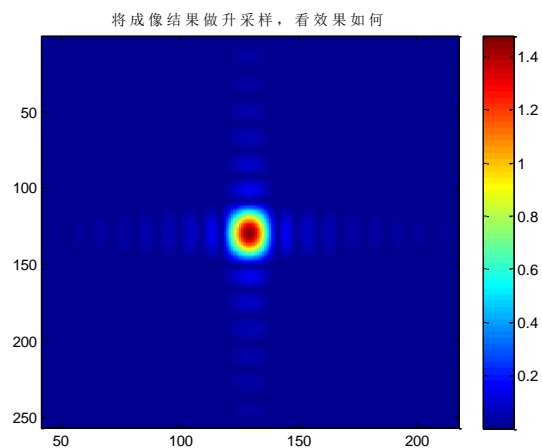


图 20 (a) 将成像结果升采样

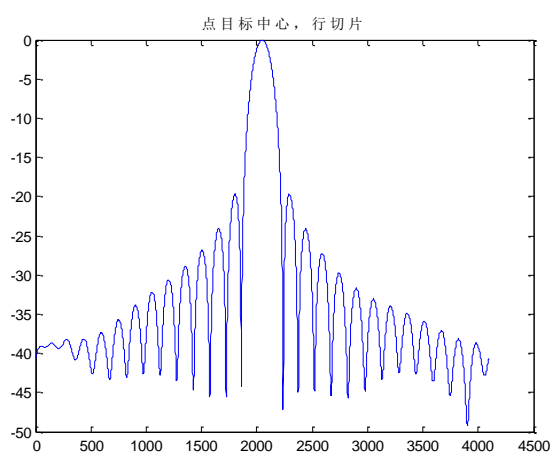


图 20 (b) 距离向切片

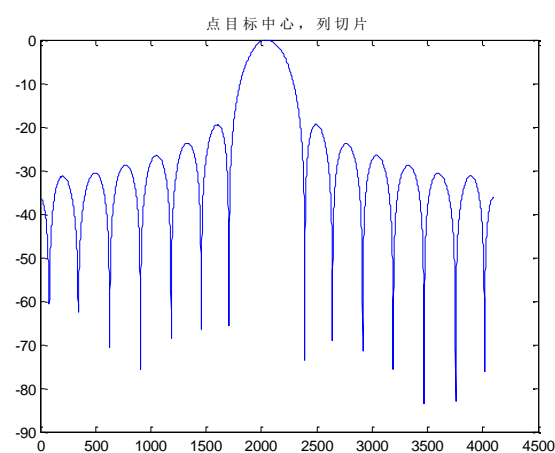


图 20 (c) 方位向切片

行切片，点目标中心距离向指标

PSLR	ISLR	IRW
-19.6609	-17.2795	3.0530

列切片，点目标中心方位向指标

PSLR	ISLR	IRW
-19.4092	-17.2968	1.6627

## 7. 三点目标仿真结果

仿真条件：原始数据生成时，方位向只用一个合成孔径长度限制；距离压缩不加窗。

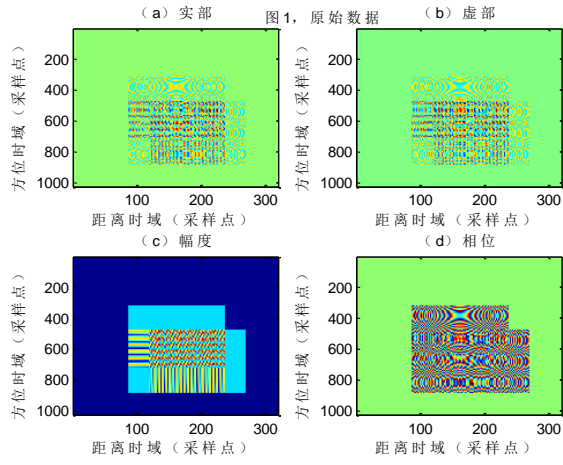


图 21 原始数据

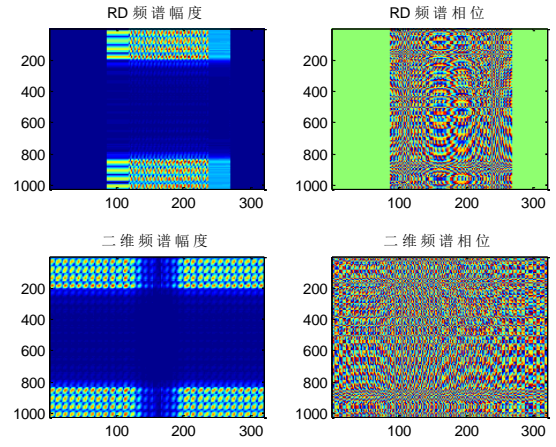


图 22 RD 域及二维频域频谱

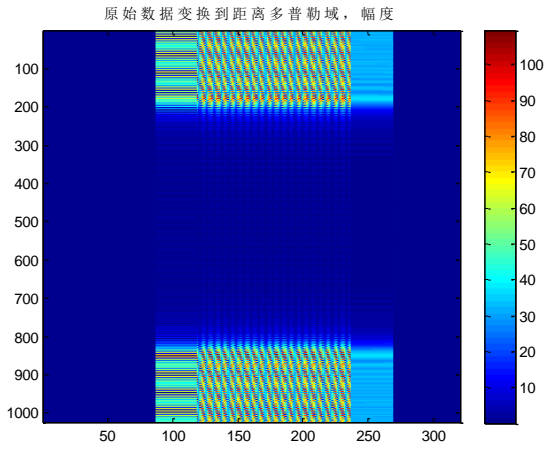


图 23 原始数据变换到 RD 域，幅度

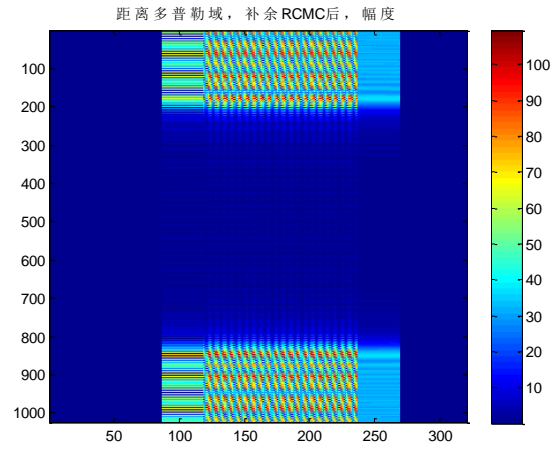


图 24 RD 域，补余 RCMC 后，幅度

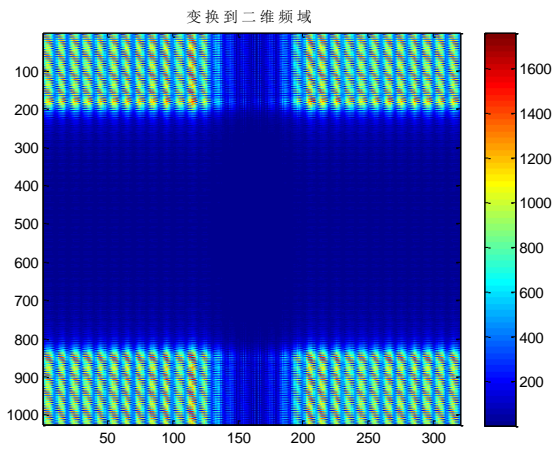


图 25 变换到二维频域，幅度

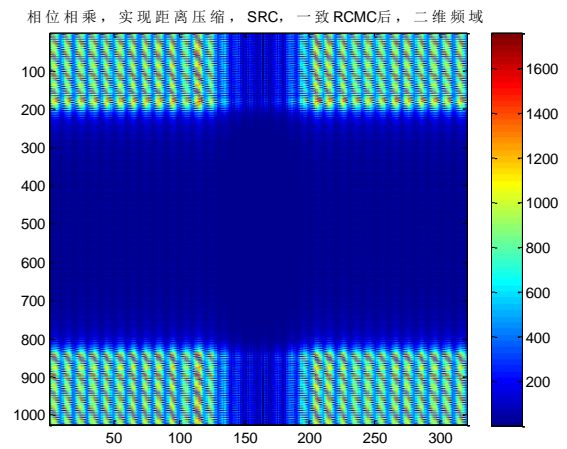


图 26 相位相乘，实现距离压缩，SRC，一致 RCMC 后，二维频域

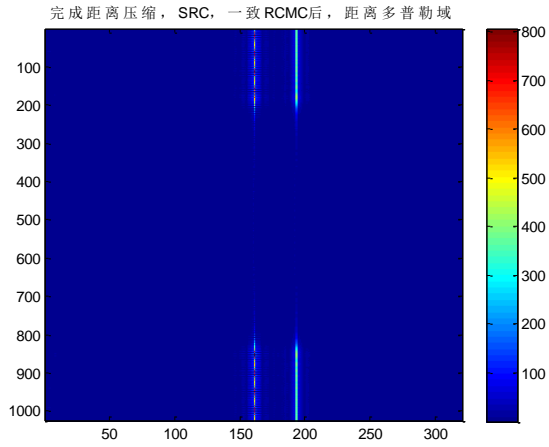


图 27 (a) 完成距离压缩，SRC，一致 RCMC 后，RD 域（即已完成所有距离处理）

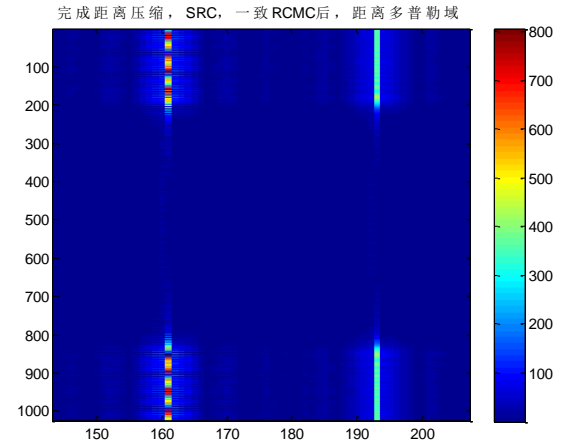


图 27 (b) 局部放大

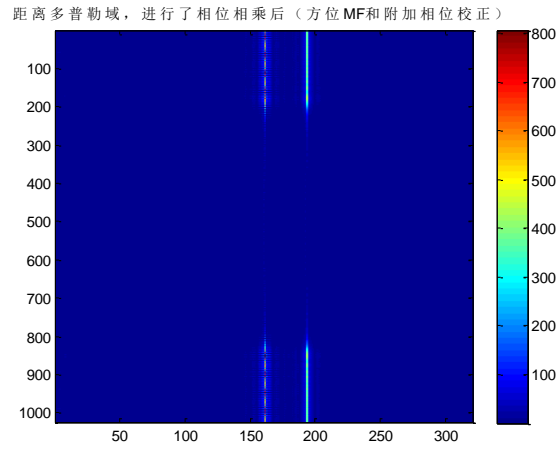


图 28 RD 域，进行方位 MF 和附加相位校正

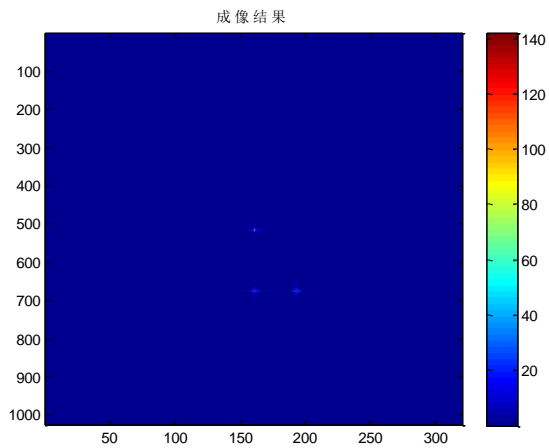


图 29 (a) 成像结果

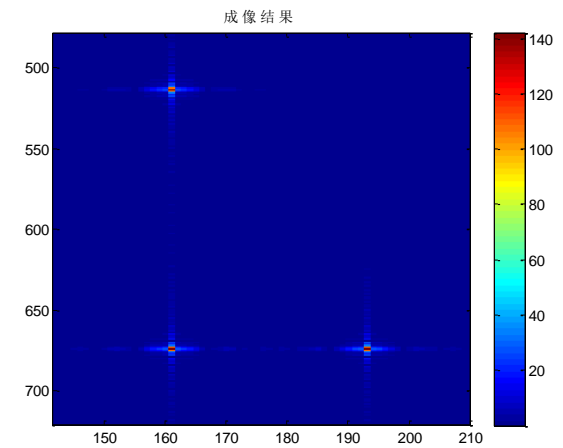


图 29 (b) 局部放大

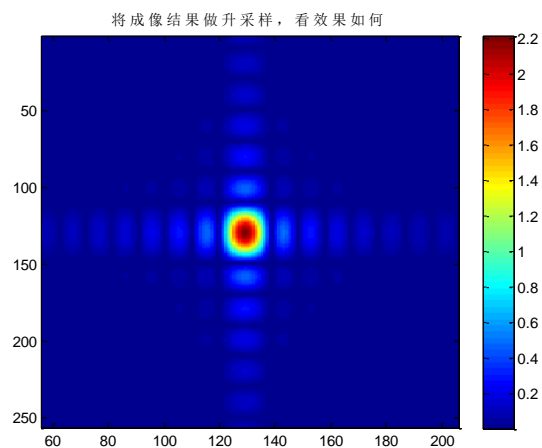


图 30 (a) 点目标 A, 升采样

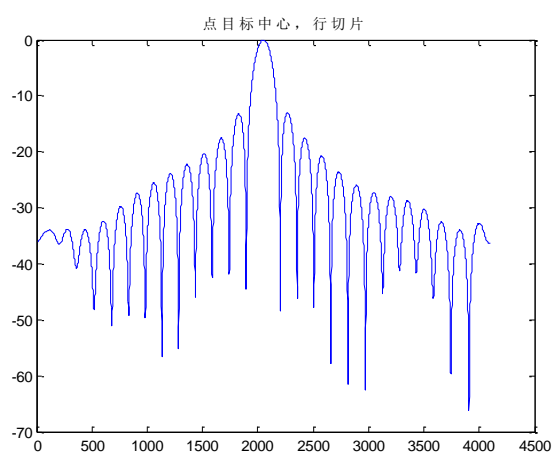


图 30 (b) 点目标 A, 距离向切片

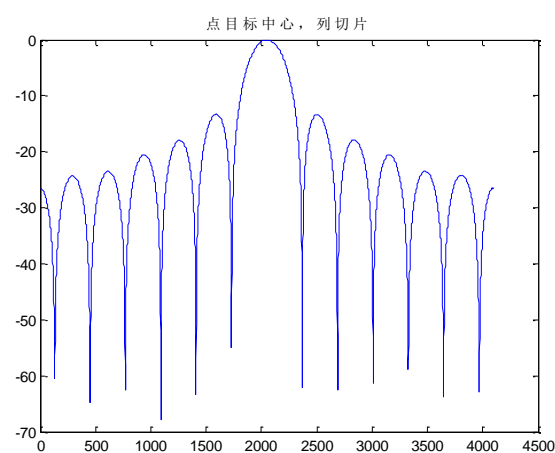


图 30 (c) 点目标 A, 方位向切片

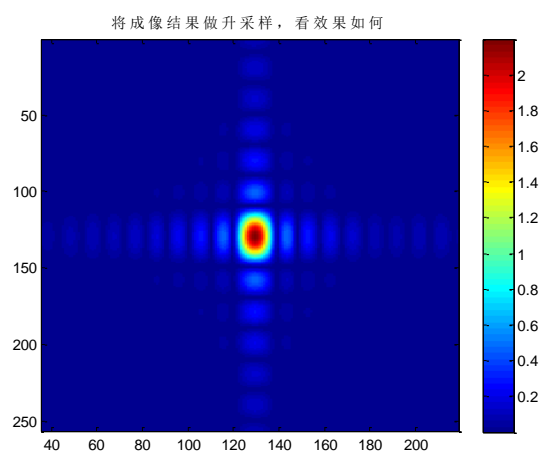


图 31 (a) 点目标 B, 升采样

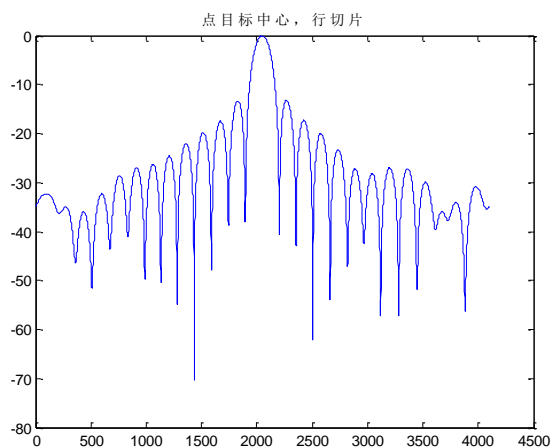


图 31 (b) 点目标 B, 距离向切片

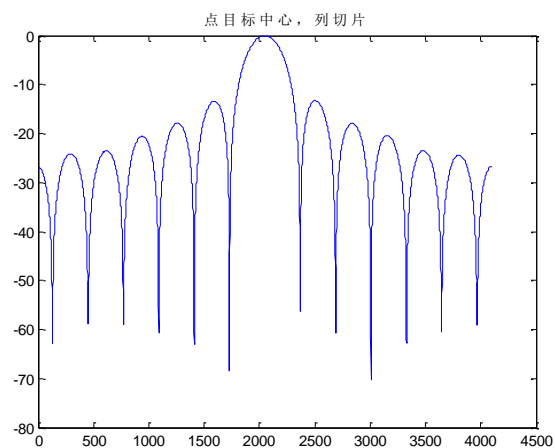


图 31 (c) 点目标 B, 方位向切片

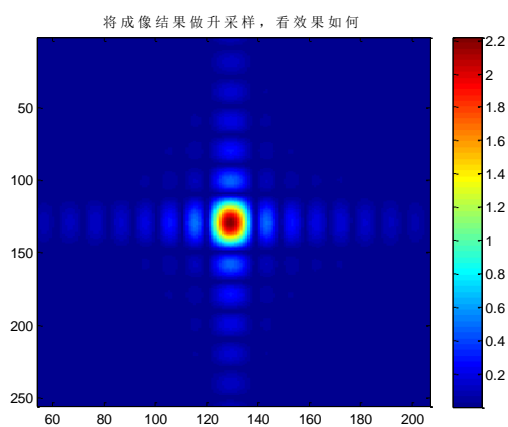


图 32 (a) 点目标 C, 升采样

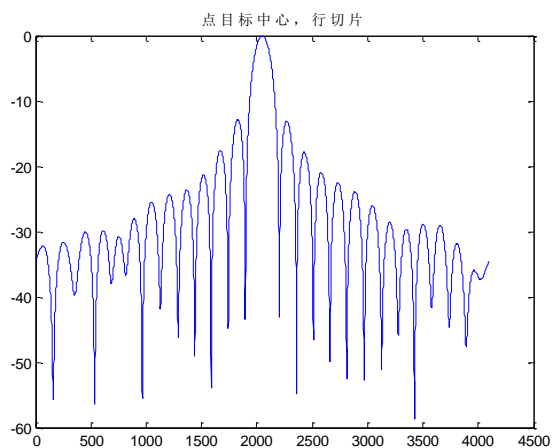


图 32 (b) 点目标 C, 距离向切片

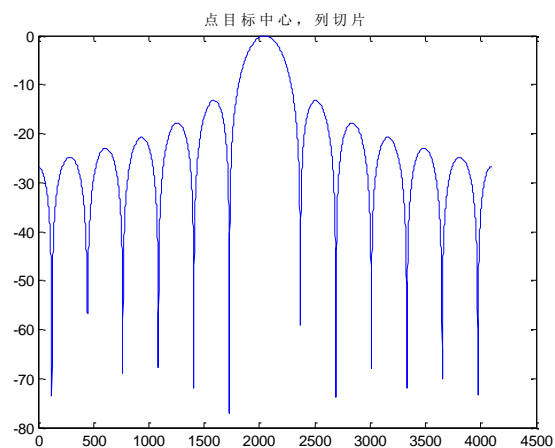


图 32 (c) 点目标 C, 方位向切片

表 1 三点目标的距离向和方位向切片指标

		PSLR (dB)	ISLR (dB)	IRW (m)
目标 A	距离向	-12.9943	-9.9750	2.6673
	方位向	-13.2987	-10.5386	1.6672
目标 B	距离向	-13.1705	-9.9440	2.6682
	方位向	-13.2995	-10.5366	1.6672
目标 C	距离向	-12.8603	-9.8903	2.6673
	方位向	-13.2376	-10.4906	1.6631

最后，还要说明的是：

在正侧视情况下，对于三个点目标位置的计算，其大体思路与 RDA 是一致的。

但也有一点不同，这种不同就是来源于 CSA 的变标（Chirp Scaling）运算。

变标运算导致了目标是被压缩在参考频率处的距离单元的，而不是像 RDA 一样被压至零多普勒。因此，一般来说，CSA 成像结果是有一定的距离位置偏移的，或者更具体的说，应该相对于理想的零频位置（也是 RDA 的成像结果位置）是向右偏移的。

比如，对于最近斜距为  $R_0$  的目标，若压至零多普勒，则目标就应该出现在  $R_0$  对应的距离单元

处。但是在 CSA 算法中，该点最后是被压在了参考频率所对应的距离单元处，即  $\frac{R_0}{D(f_{\eta_{ref}}, V_r)}$ 。

这实际上就是使得点目标的位置相比于原来的零频位置向右偏移了。

不过，很特别的是：

在正侧视情况下，我选择多普勒中心频率作为参考频率，此时： $f_{\eta_{ref}} = f_{\eta_c} = 0$

$$\text{因此， } D(f_{\eta_{ref}}, V_r) = \sqrt{1 - \frac{\lambda^2 f_{\eta_{ref}}^2}{4V_r^2}} = 1$$

因此，最近斜距为  $R_0$  的目标在距离向上，最后被压至： $\frac{R_0}{D(f_{\eta_{ref}}, V_r)} = R_0$ ，这和原来是一样的。



所以在正侧视情况下，CSA 的成像结果的位置并没有改变。所有的关于位置的结果和 RDA 中是一致的。

但是，我要再次说明：CSA 的成像结果是和 RDA 不同的，这是非常显著的一个区别。这里的一致只是一种特殊情况，是在正侧视（ $f_{\eta_{ref}} = f_{\eta_c} = 0$ ）下的特殊情况。

因此，要注意对这种情况的讨论（尤其是当有斜视角时）

WD

2014.10.17. 11:46 a.m.