
窄波束运动补偿

RDA 点目标仿真

仿真程序分别基于:

1. 正侧视, 不考虑 SRC, 点目标仿真程序;
2. 正侧视, 采用方式 2 实现 SRC (二维频域相位相乘), 点目标仿真程序;

参考文献:

- 【1】 郑晓双. 机载合成孔径雷达运动补偿技术研究[D]. 中国科学院研究生院博士学位论文, 2007
- 【2】 卡明等著, 洪文等译, 合成孔径雷达成像——算法与实现[M]. 电子工业出版社, 2007

WD

2014.11.18

一、 正侧视，不考虑 SRC，点目标仿真

1. 生成含有运动误差的原始数据

1) 生成载机运动平台的运动误差

Matlab 程序如下：

```
% =====
% 生成载机运动平台的运动误差
% 沿地距 y 轴的运动误差
a = 4;
w = 8; % 这个控制着正弦误差是属于低频误差，还是高频误差。
delta_x_t = a*sin(2*pi*w/La*Vr.*ta_mtx); % 这是沿地距 x 轴的运动误差
% delta_x_t = 0;
% 沿 z 轴（载机平台高度）的运动误差
% delta_z_t = a*sin(2*pi*w/La*Vr.*ta_mtx); % 这是沿 z 轴的运动误差
delta_z_t = 0;
% =====
```

这里只引入了沿地距 x 轴的运动误差，而令沿 z 轴的运动误差为 0。

2) 生成点目标原始数据

若引入运动误差，则斜距的计算如下：

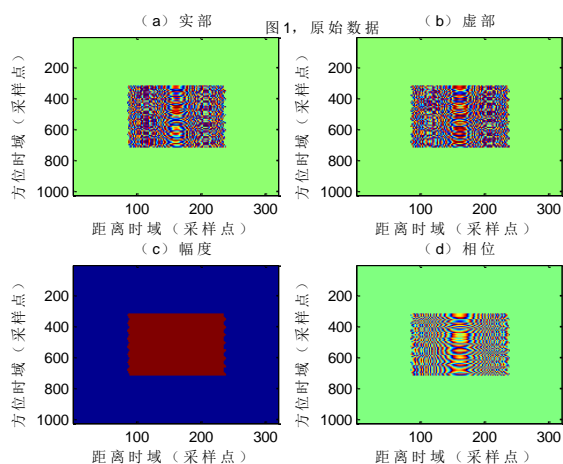
$$R_n = \sqrt{(\text{delta_x_t} - \text{target_x}(k))^2 + (\text{Vr} \cdot \text{ta_mtx} - \text{y_azimuth}(k))^2 + \dots + (\text{H} \cdot \text{ones}(\text{Naz}, \text{Nrg}) + \text{delta_z_t})^2}; \quad \% \text{ 目标 } k \text{ 的瞬时斜距}$$

若不考虑运动误差，则斜距的计算如下：

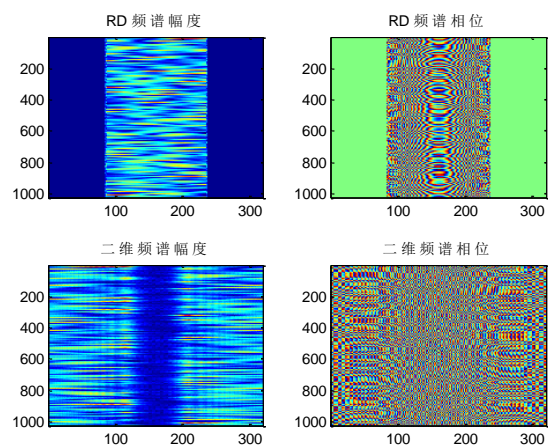
$$R_n = \sqrt{(\text{r_range}(k) \cdot \text{ones}(\text{Naz}, \text{Nrg}))^2 + \dots + (\text{Vr} \cdot \text{ta_mtx} - \text{y_azimuth}(k) \cdot \text{ones}(\text{Naz}, \text{Nrg}))^2}; \quad \% \text{ 无运动误差时的瞬时斜距}$$

生成原始数据时，只考虑一个合成孔径长度限制。

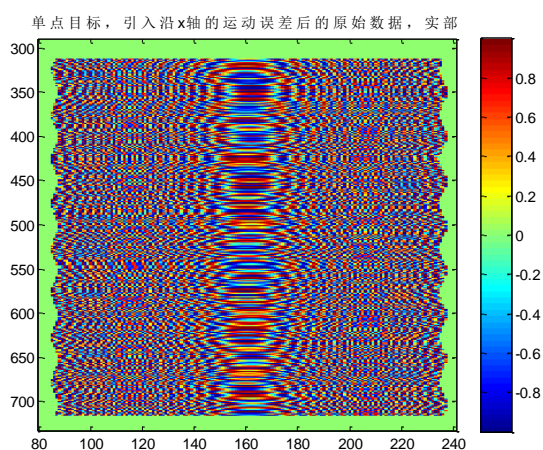
1) 生成单个点目标 A 的原始数据如下：



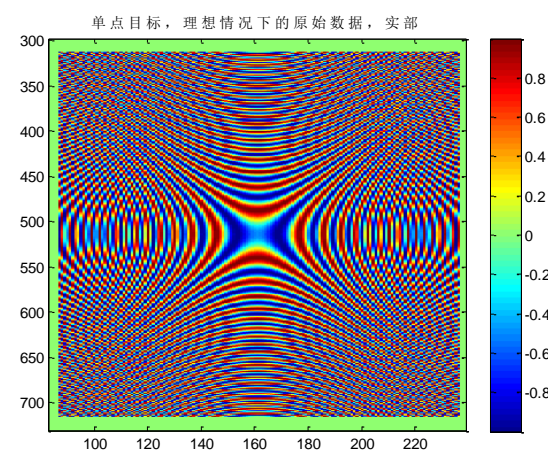
(a) 原始数据



(b) RD 域频谱及二维频谱



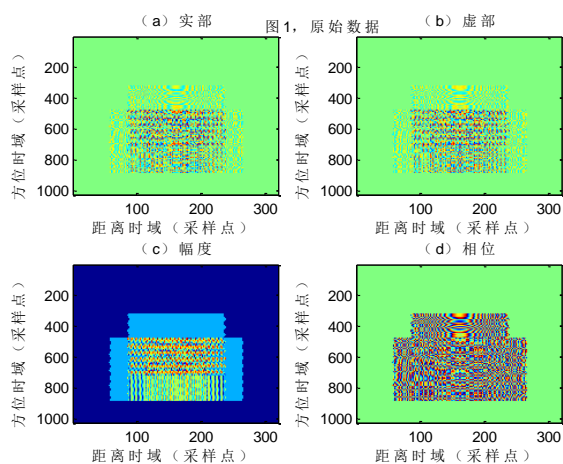
(c) 引入误差后的原始数据, 实部



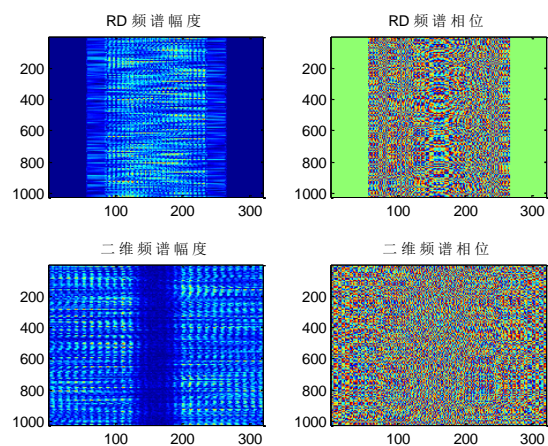
(d) 理想情况下的原始数据, 实部

图 1.1 单点目标 A, 原始数据

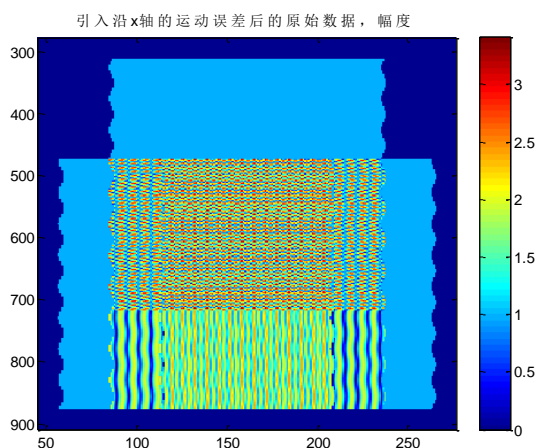
2) 生成 4 个点目标的原始数据



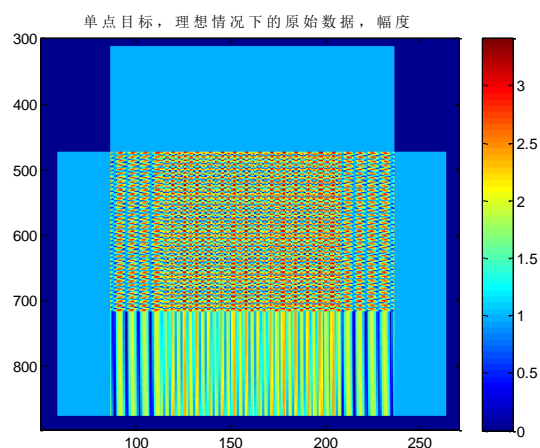
(a) 原始数据



(b) RD 域频谱及二维频谱



(c) 引入误差后的原始数据，实部



(d) 理想情况下的原始数据，实部

图 1.2 生成 4 个点目标的原始数据

2. 如果不进行运动补偿，则仿真结果如下

1) 单个点目标 A 的仿真结果

在变换到距离频域-方位时域，完成了距离 MF 后，再变换回二维时域，还没有进行 RCMC 时，有以下结果

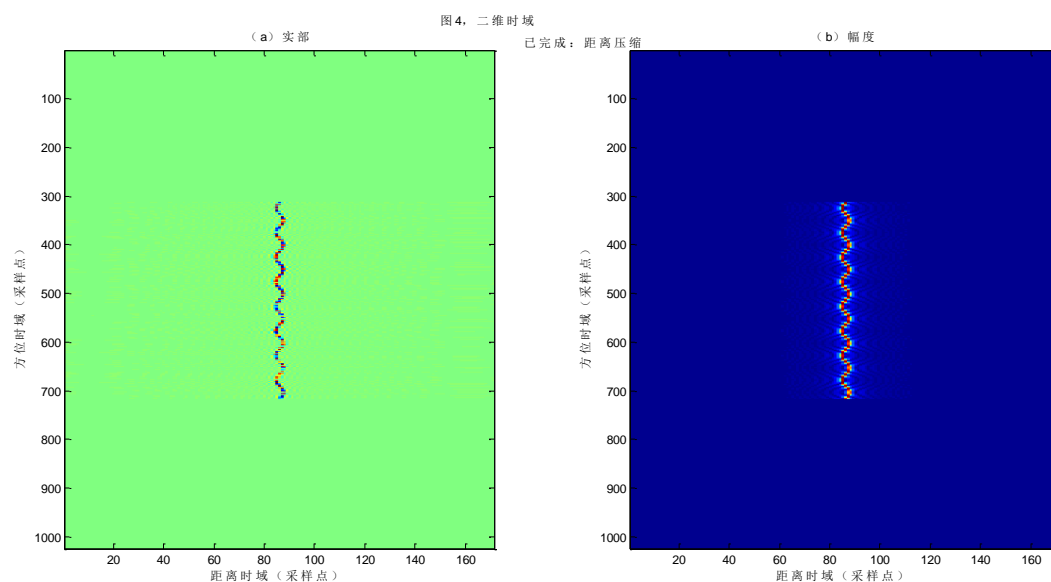
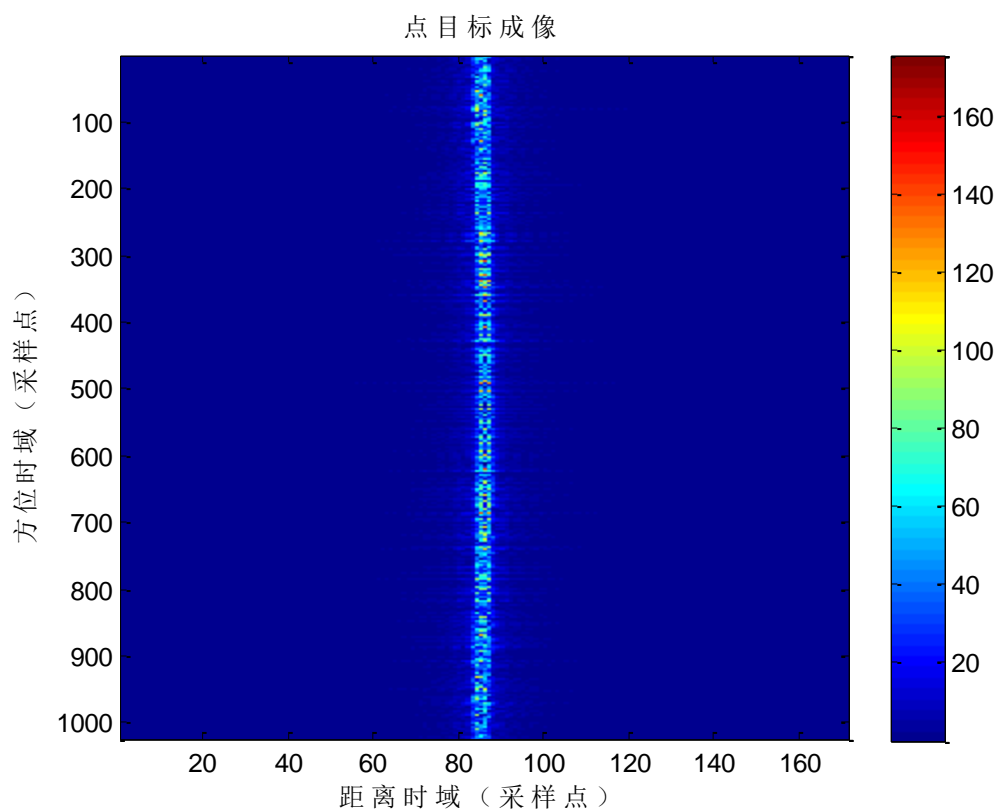


图4，二维时域

已完成：距离压缩

二维时域，完成了距离 MF

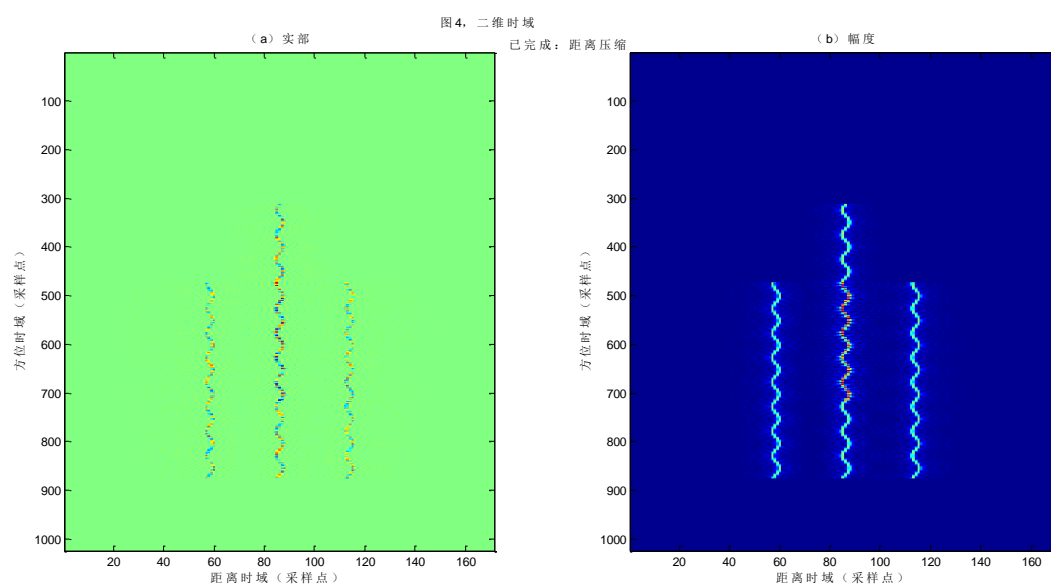
这里我们可以通过幅度，看到非常明显的高频正弦误差——这是我无意之间发现的，但是我想到了：如果对于未知误差，我们是不是可以通过这样类似的方法来发现运动误差？或者统计运动误差？



不进行运动补偿的成像结果

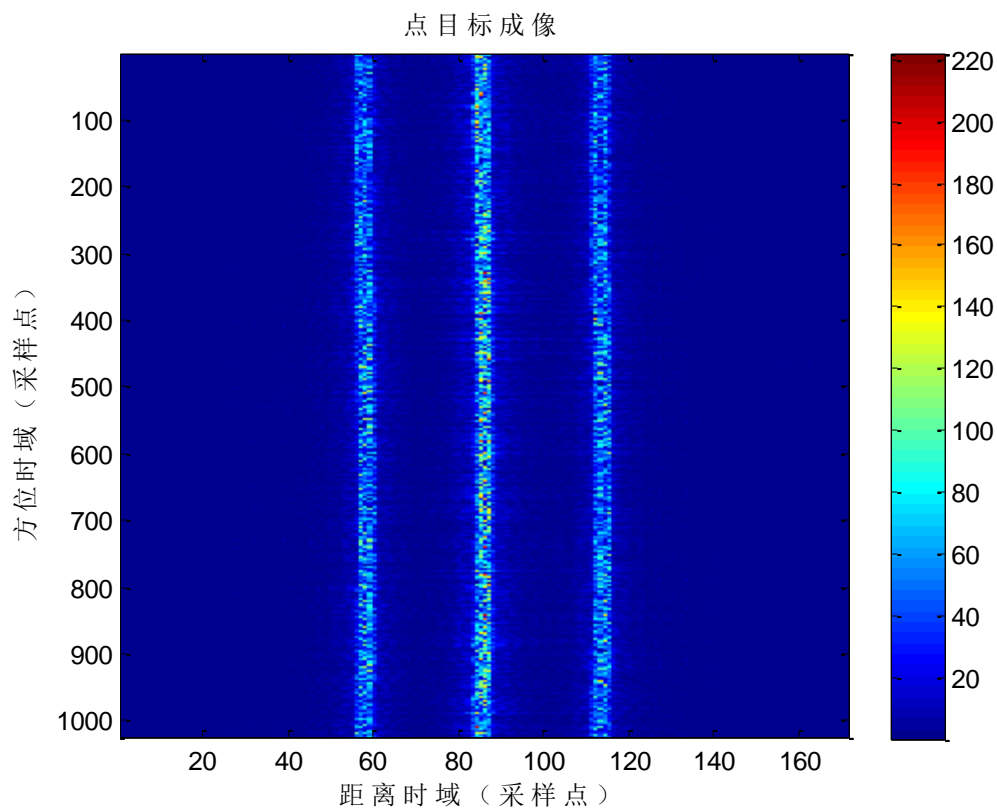
2) 4 个点目标的仿真结果

在变换到距离频域-方位时域，完成了距离 MF 后，再变换回二维时域，还没有进行 RCMC 时，有以下结果



二维时域，完成了距离 MF

同样，我们可以通过幅度，看到非常明显的正弦高频运动误差的形式。

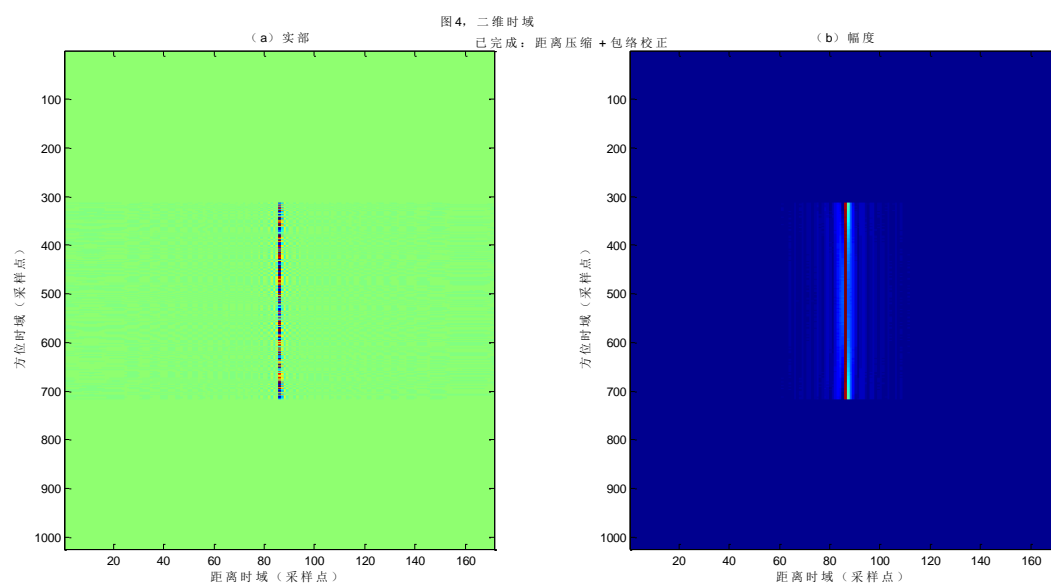


不进行运动补偿的成像结果

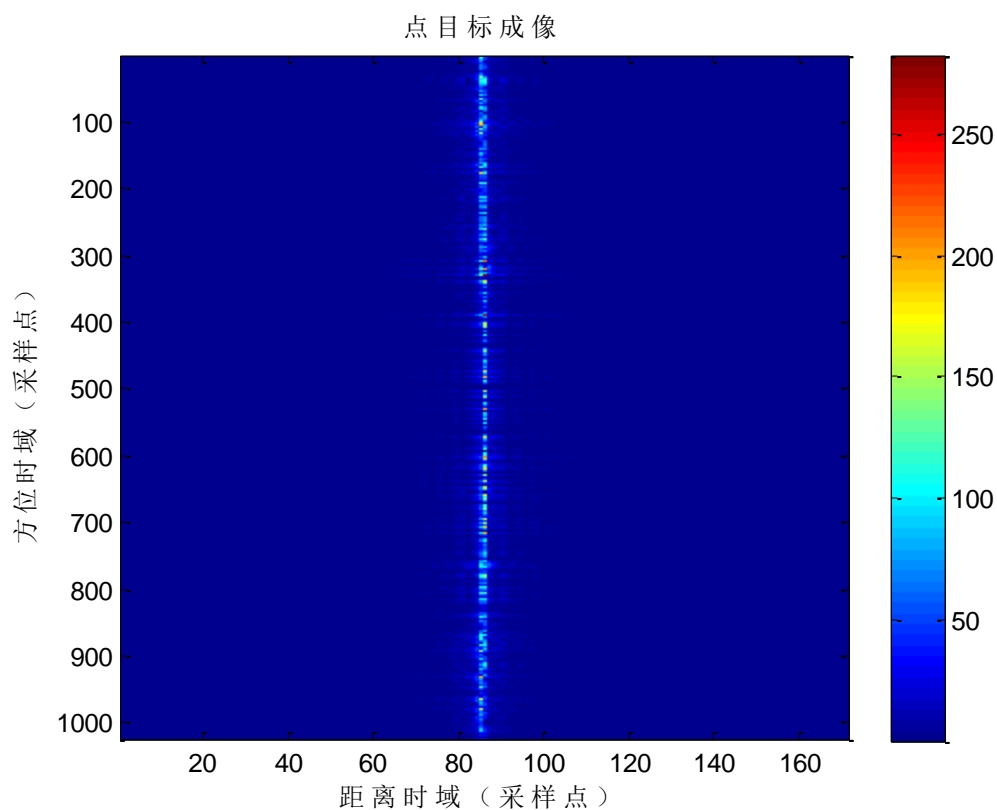
3. 在距离频域-方位时域, 只进行“包络校正”, 将其与距离压缩滤波器合并, 成像结果如下:

1) 单个点目标 A 的仿真结果

在变换到距离频域-方位时域, 完成了“距离 MF + 包络校正”后, 再变换回到二维时域, 还没有进行 RCMC 时, 有以下结果:



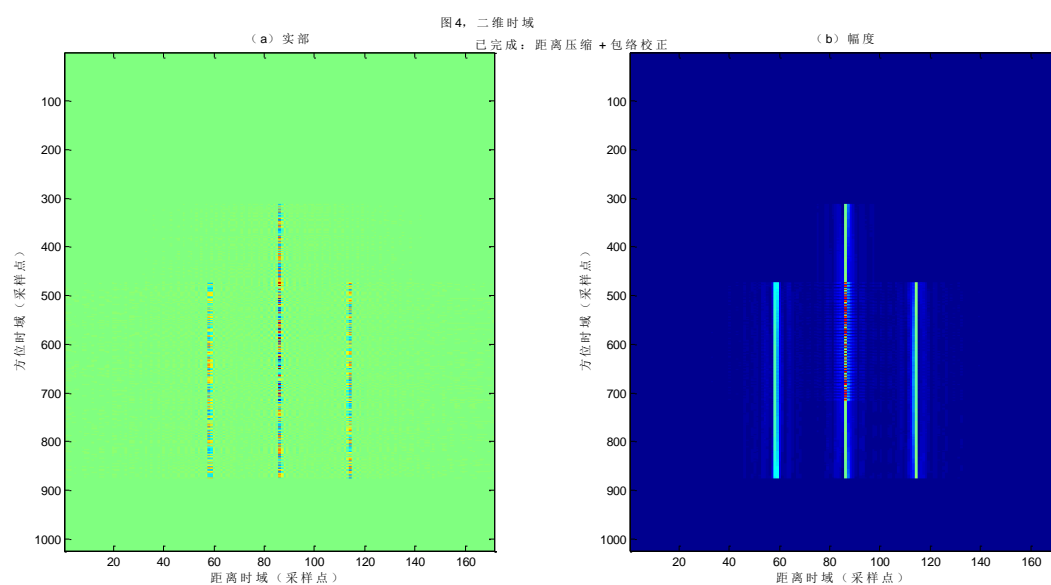
二维时域, 完成了距离 MF 和包络校正



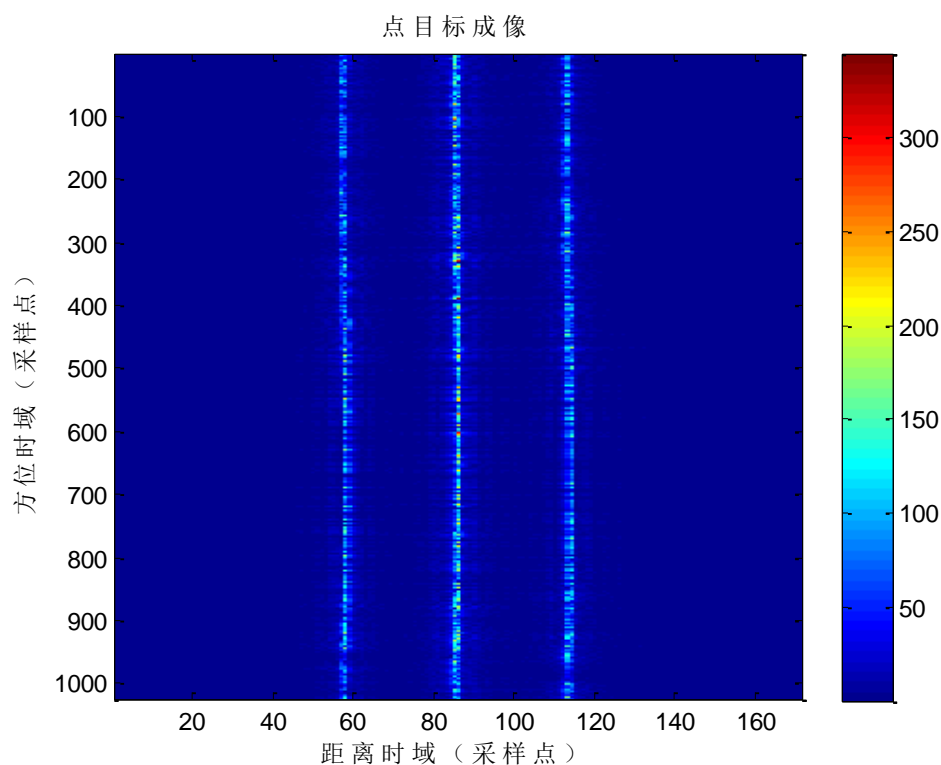
只进行了“包络校正”的成像结果

2) 4 个点目标的仿真结果

在变换到距离频域-方位时域，完成了“距离 MF + 包络校正”后，再变换回二维时域，还没有进行 RCMC 时，有以下结果：



二维时域，完成了距离 MF 和包络校正

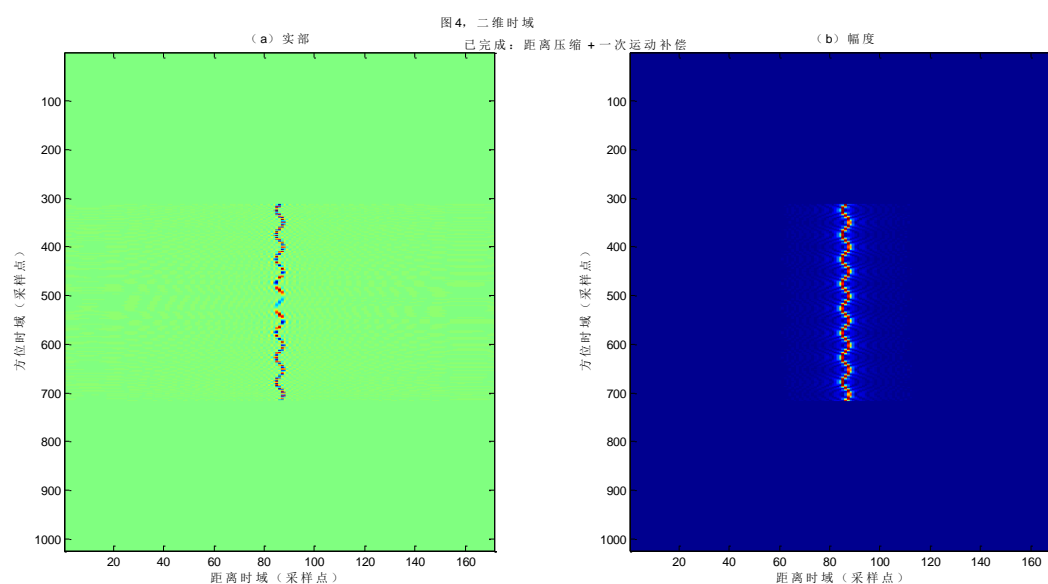


只进行了“包络校正”的成像结果

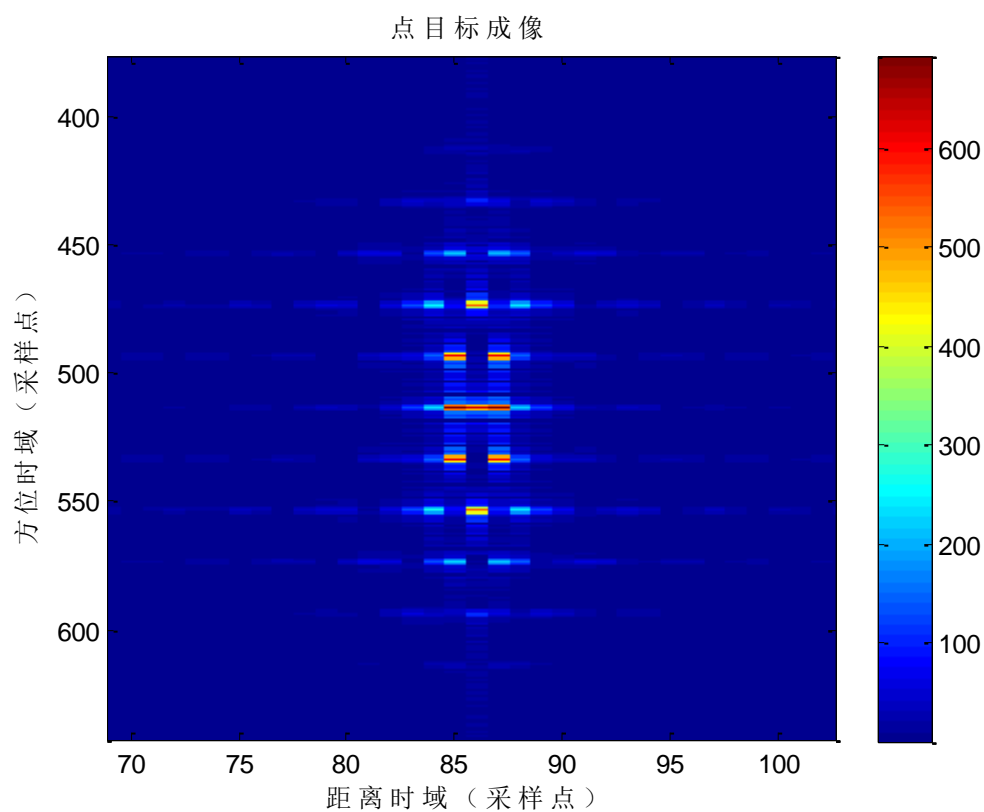
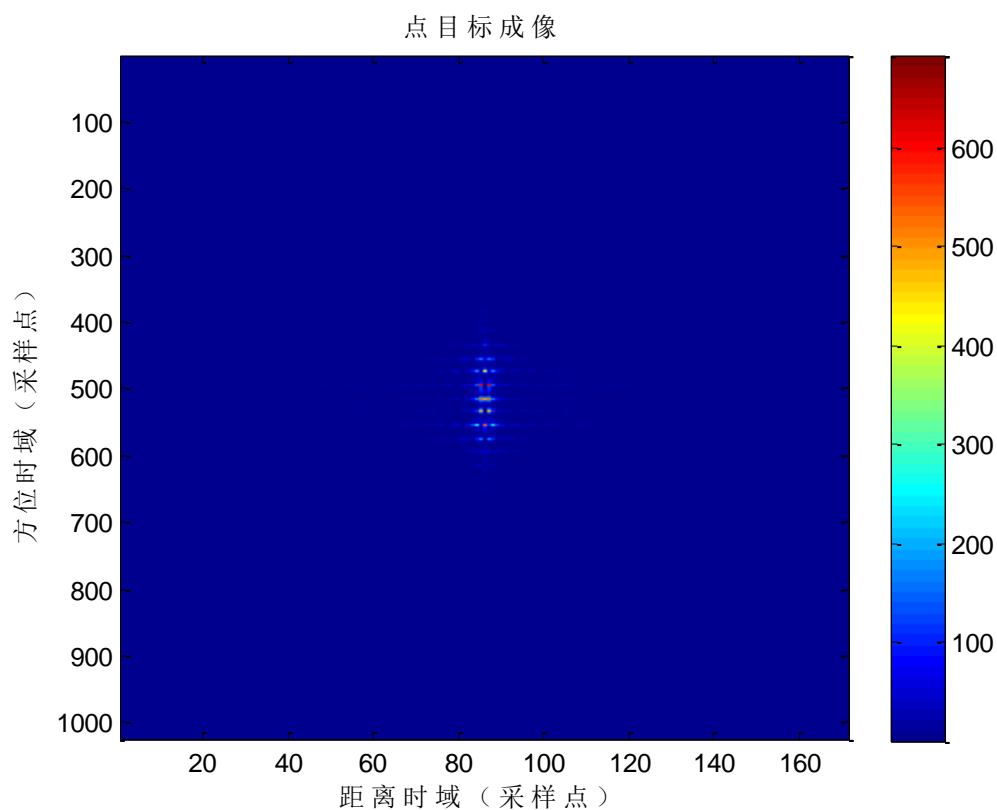
4. 在距离频域-方位时域, 只进行“一次运动补偿”, 将其与距离压缩滤波器合并, 成像结果如下:

1) 单个点目标 A 的仿真结果

在变换到距离频域-方位时域, 完成了“距离 MF + 一次运动补偿”后, 再变换回二维时域, 还没有进行 RCMC 时, 有以下结果:



二维时域, 完成了距离 MF 和一次运动补偿

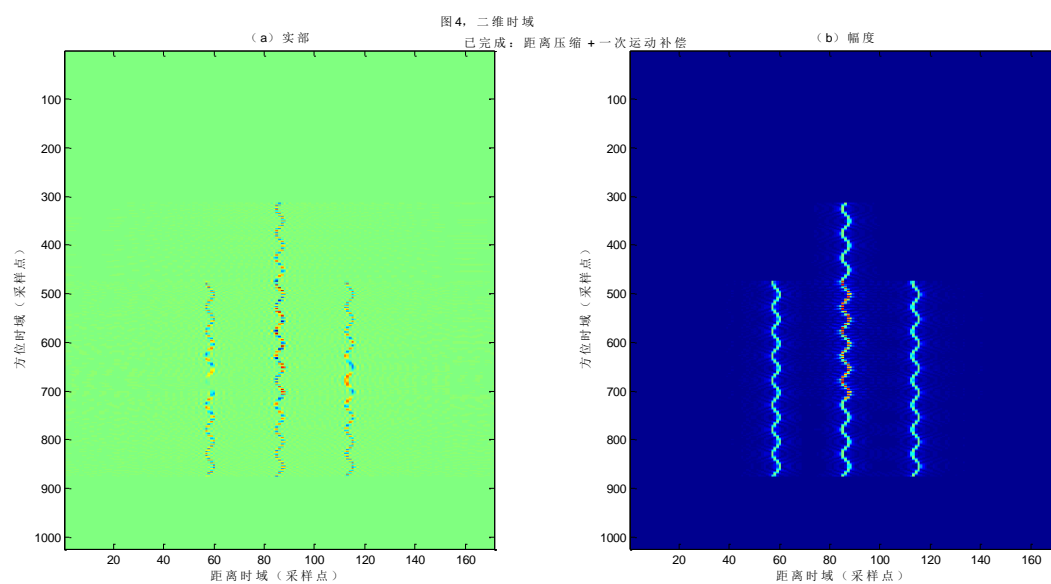


(局部放大)

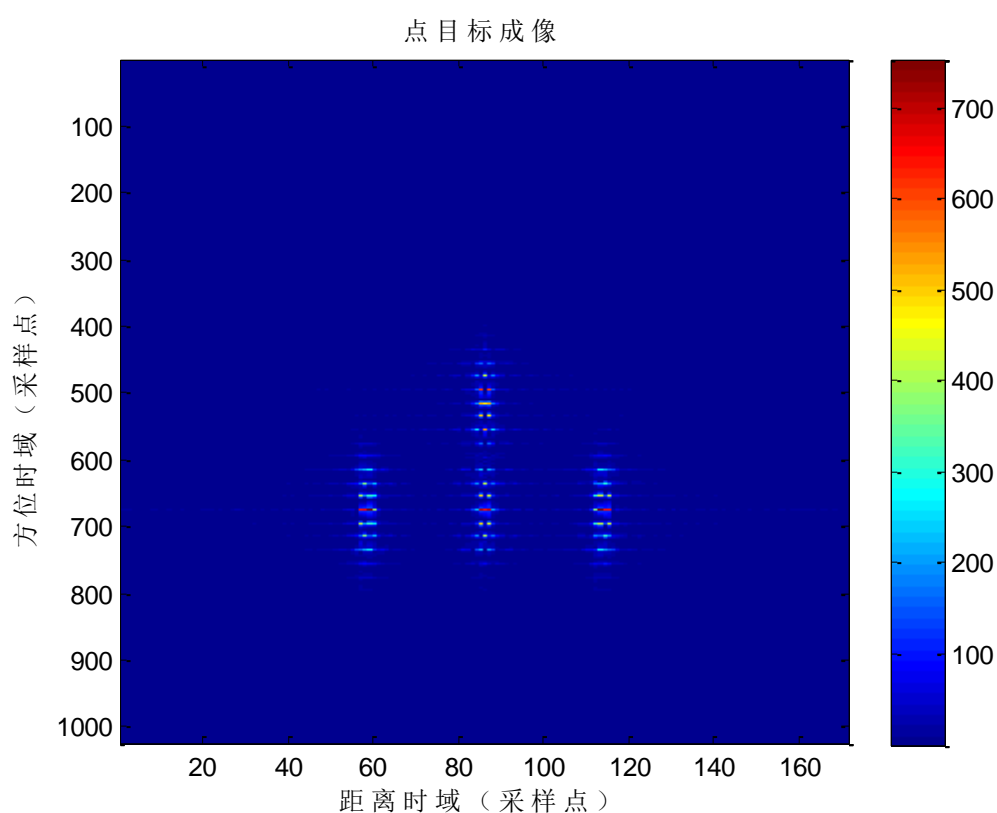
只进行了“一次运动补偿”的成像结果

2) 4 个点目标的仿真结果

在变换到距离频域-方位时域，完成了“距离 MF + 一次运动补偿”后，再变换回二维时域，还没有进行 RCMC 时，有以下结果：



二维时域，完成了距离 MF 和一次运动补偿

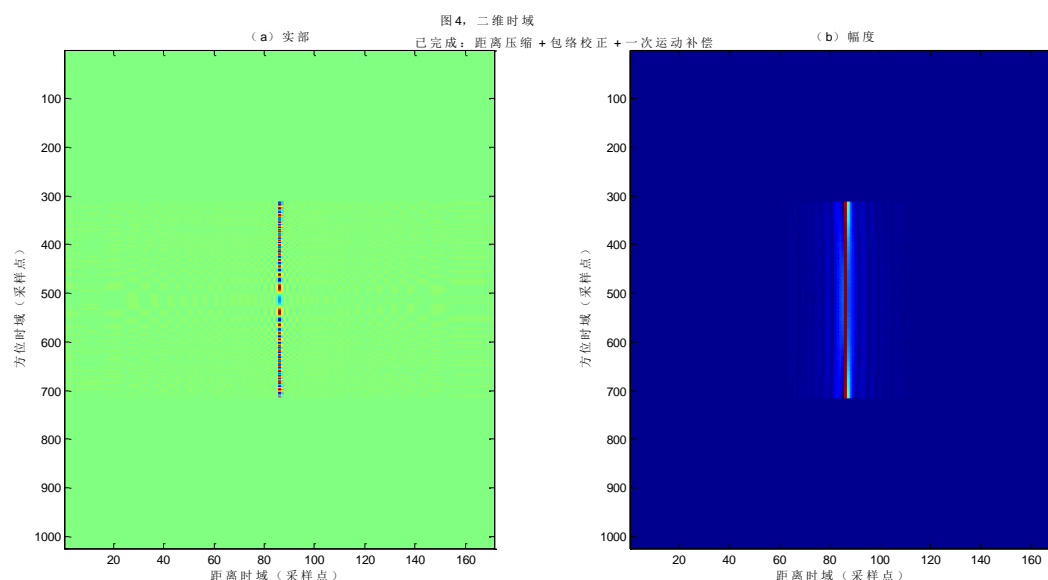


只进行了“一次运动补偿”的成像结果

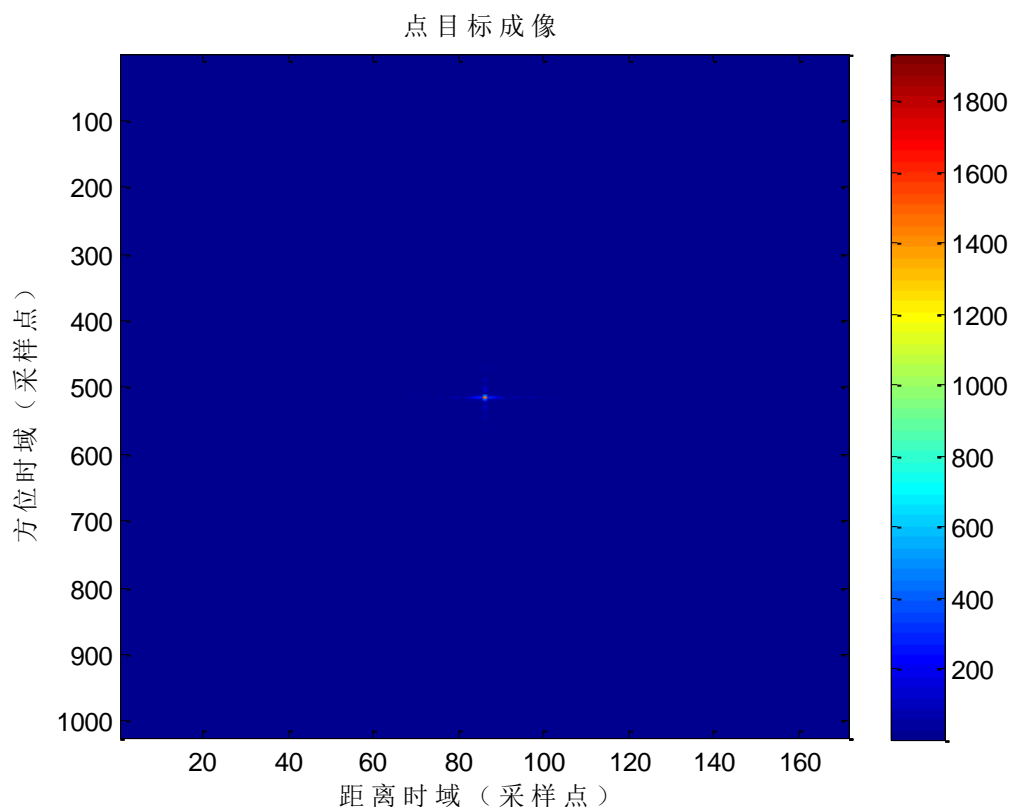
5. 在距离频域-方位时域，将“**包络校正 + 一次运动补偿**”与距离压缩滤波器合并，成像结果如下：

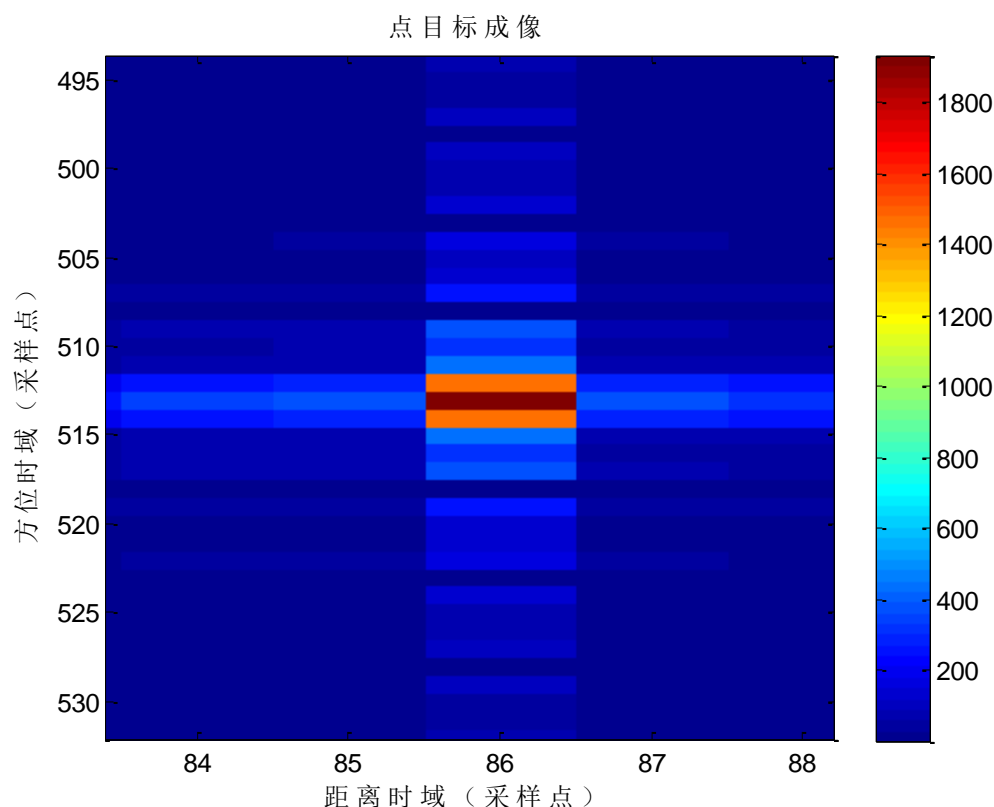
1) 单个点目标 A 的仿真结果

在变换到距离频域-方位时域，完成了“距离 MF + 包络校正 + 一次运动补偿”后，再变换回二维时域，还没有进行 RCMC 时，有以下结果



二维时域，完成了距离 MF、包络校正和一次运动补偿





进行了“包络校正和一次运动补偿”的成像结果

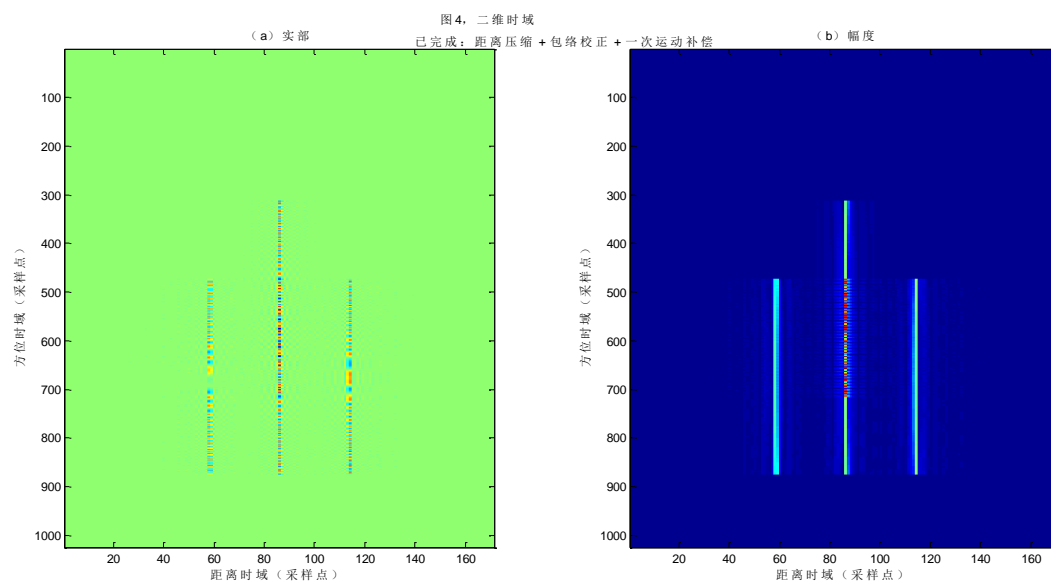
看上去，成像结果已经很理想了。

这里有几个原因：因为目标 A 恰好位于场景中心，因此其实对于目标 A 来说，一次运动补偿已经将距离向相位误差的补偿全部完成，其二次相位误差可以不用进行。因此，其实这时候的目标 A 就已经完成了运动补偿。

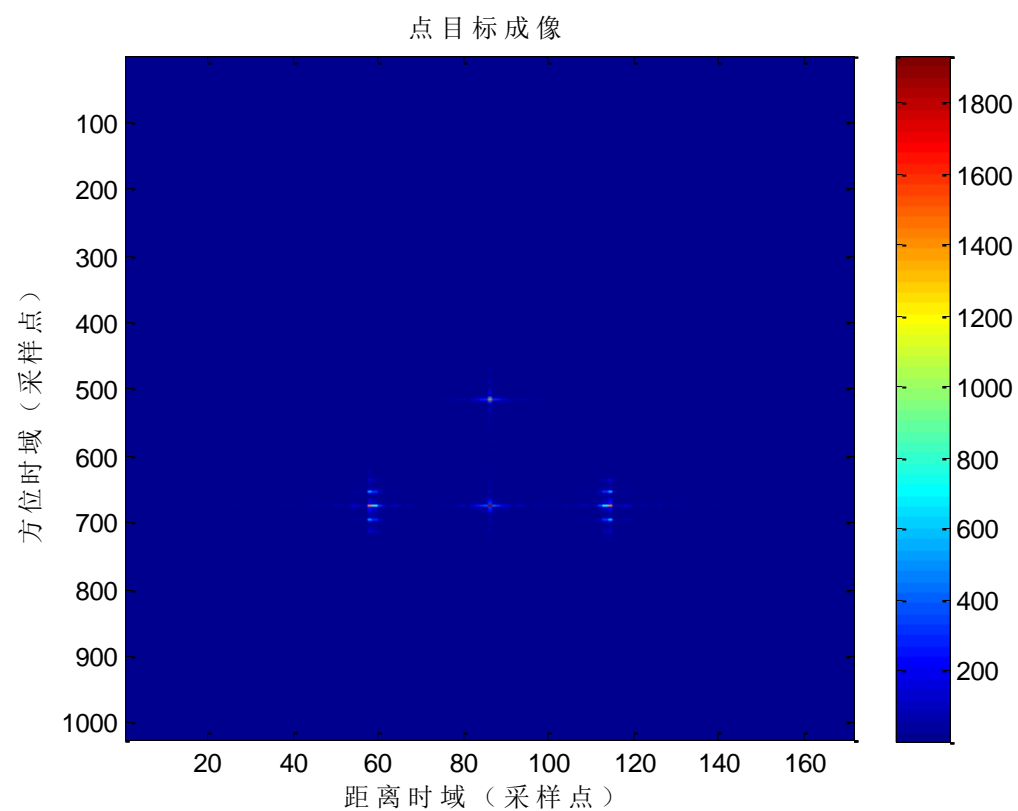
但是，正如这里所说，这是因为目标 A 恰好位于场景中心。在下面的 4 个点目标的仿真结果中，我们就会看到，偏离场景中心处的目标，由于没有进行二次运动补偿，其仿真结果是存在了很明显的成对回波的。

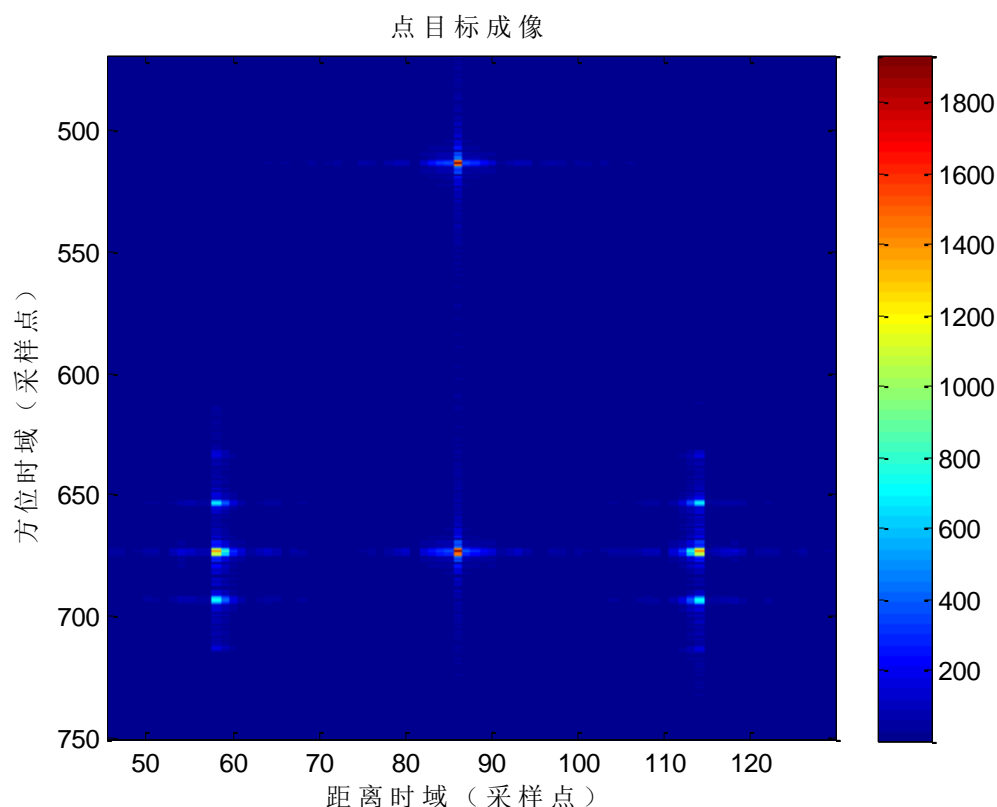
2) 4 个点目标的仿真结果

在变换到距离频域-方位时域，完成了“距离 MF + 包络校正 + 一次运动补偿”后，再变换回二维时域，还没有进行 RCMC 时，有以下结果



二维时域, 完成了距离 MF、包络校正和一次运动补偿





进行了“包络校正和一次运动补偿”的成像结果

正如上面所说，目标 C 和目标 D 就呈现出了非常明显的成对回波。这就是因为没有进行二次运动补偿的结果。而目标 A 和目标 B 因为设计在场景中心，所以其实它们的运动补偿已经完成，其成像结果很理想。

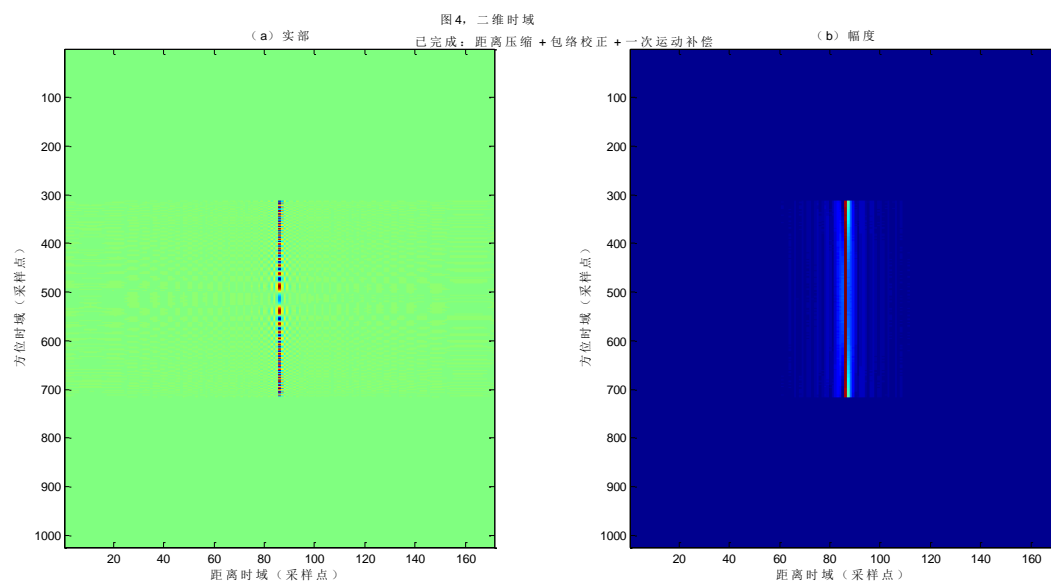
真正完成了运动补偿后的具体的指标分析将在后面进行。这里略过。

6. 在完成了“距离压缩 + 包络校正 + 一次运动补偿”后，依次在距离多普勒域进行 RCMC，再变换回到二维时域，进行“二次运动补偿”，最后，再进行方位 MF，即完成成像过程。也就是说，我们这里完成全部的“两步式运动补偿”：包络校正、一次运动补偿和二次运动补偿。

有以下结果：

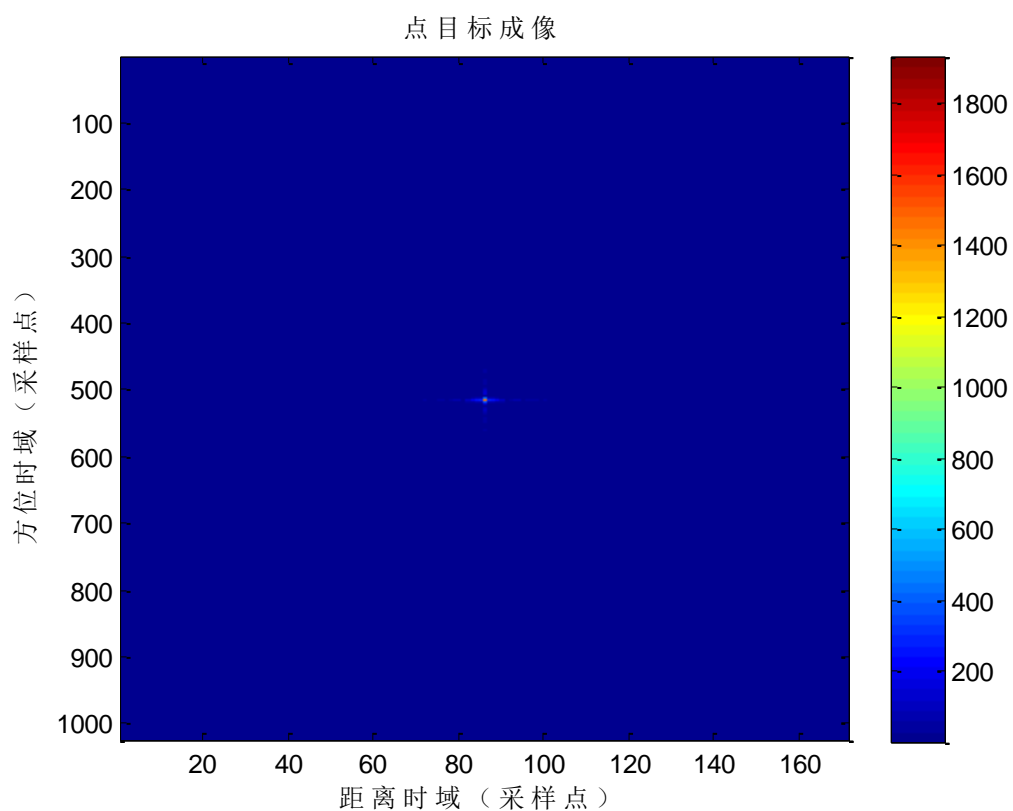
1) 单个点目标 A 的仿真结果

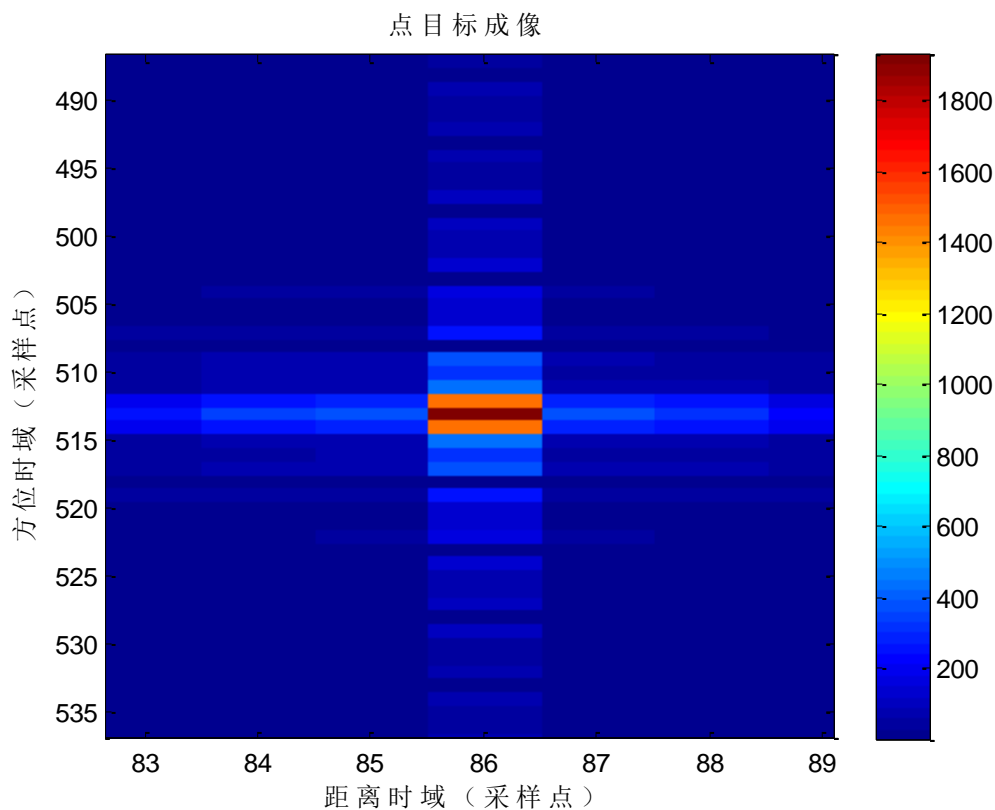
在变换到距离频域-方位时域，完成了“距离 MF + 包络校正 + 一次运动补偿”后，再变换回二维时域，还没有进行 RCMC 时，有以下结果



二维时域, 完成了距离 MF、包络校正和一次运动补偿

完成了全部的“两步式运动补偿”: 包络校正、一次运动补偿和二次运动补偿后的成像结果:

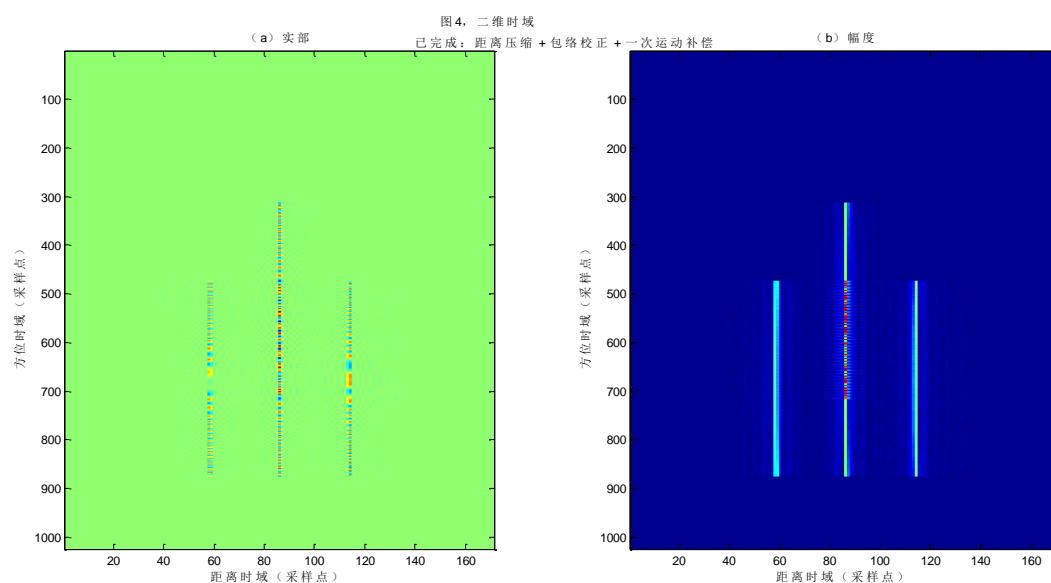




进行了两步式运动补偿的成像结果

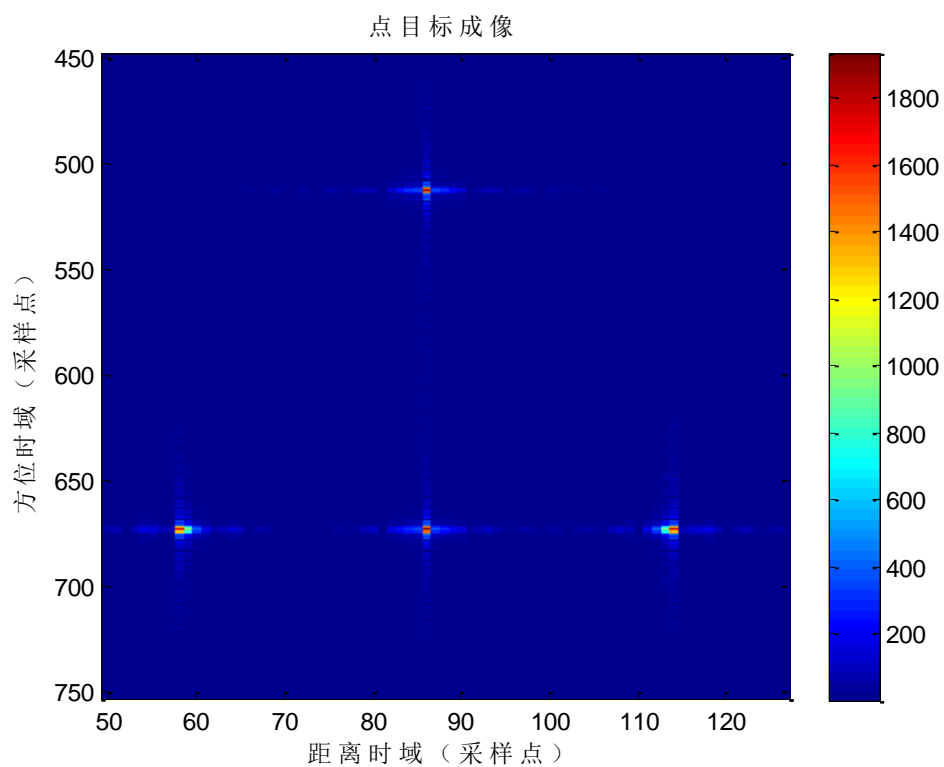
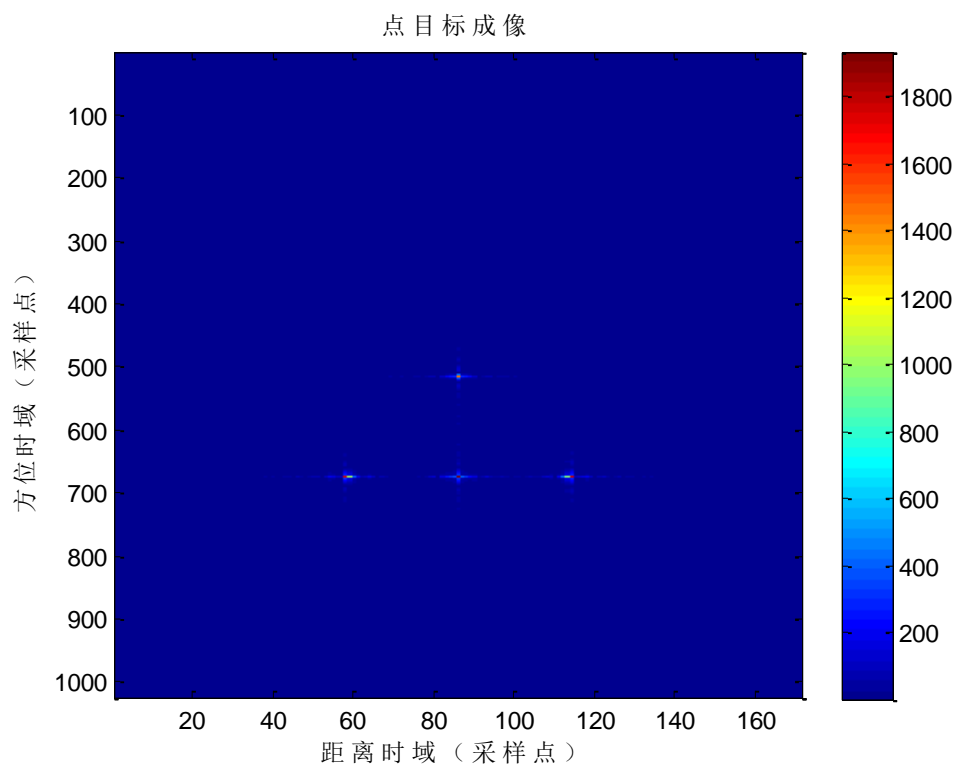
2) 4 个点目标的仿真结果

在变换到距离频域-方位时域，完成了“距离 MF + 包络校正 + 一次运动补偿”后，再变换回二维时域，还没有进行 RCMC 时，有以下结果



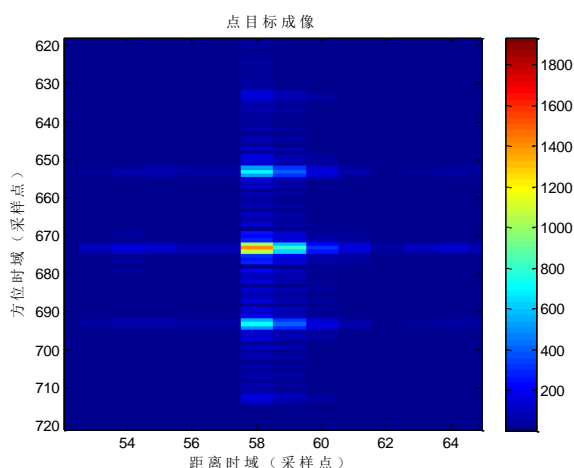
二维时域，完成了距离 MF、包络校正和一次运动补偿

完成了全部的“两步式运动补偿”：包络校正、一次运动补偿和二次运动补偿后的成像结果：

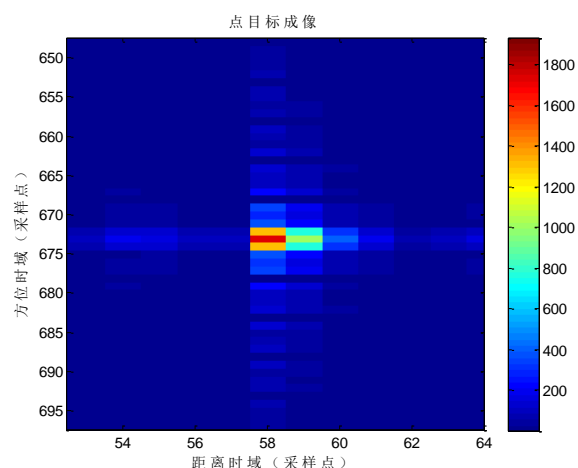


(局部放大)

进行了两步式运动补偿的成像结果



(a) 没有进行二次运动补偿的结果



(b) 进行了二次运动补偿

目标 D

由此，我们看到了对于目标 C 和目标 D，因为又进行了二次运动补偿，所以其成像效果明显有了很大改进。成对回波已经被消除。

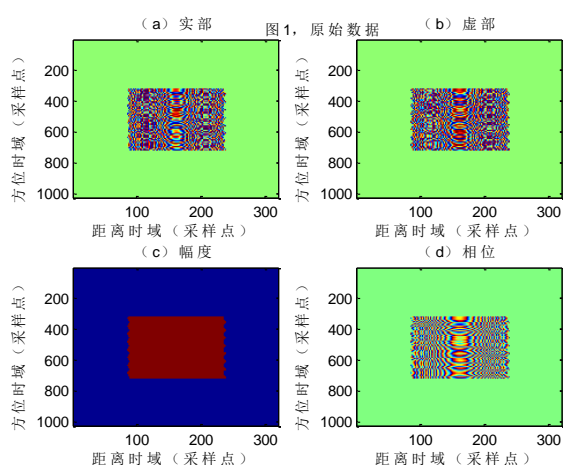
但是也可以看到，相比于目标 A 和目标 B，目标 C 和目标 D 的成像效果还是有一些区别的（距离向稍微差一些）。

以上已经完整讨论了两步式运动补偿，并且依次比较了只进行两步式运动补偿中的一个步骤或者某几个步骤的结果。

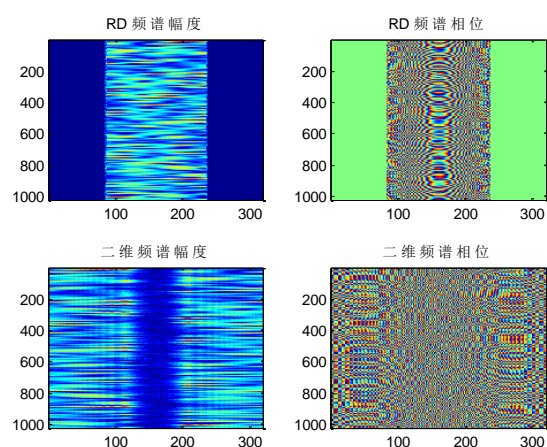
下面对完整的两步式运动补偿结果的每一步仿真结果进行汇总，如下：

7. 进行完整的两步式运动补偿，每一步的仿真情况如下：

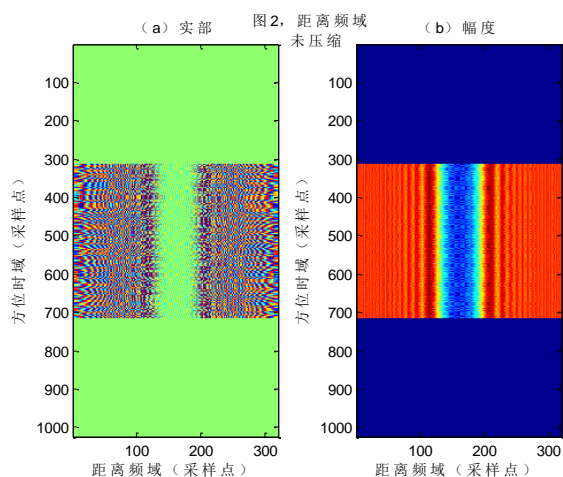
a) 单点目标 A 的仿真结果



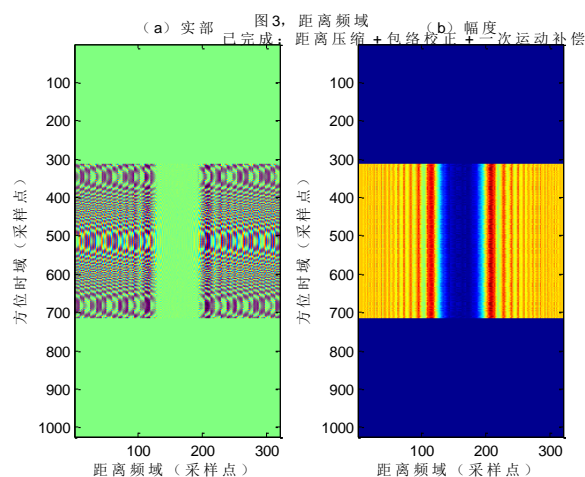
(1) 原始数据



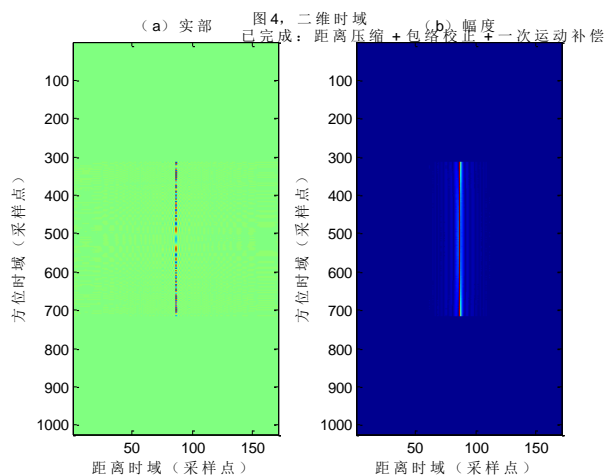
(2) RD 域频谱和二维频谱



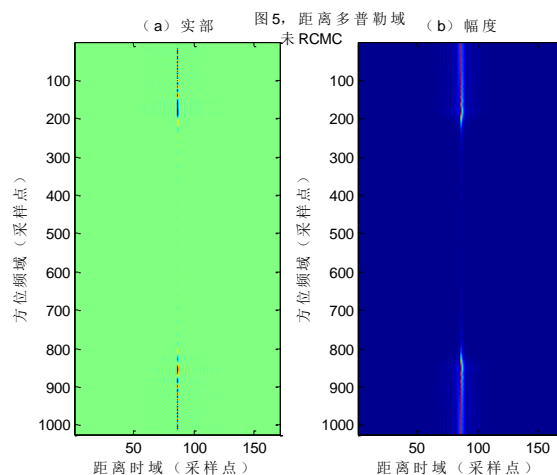
(3) 距离频域, 未压缩



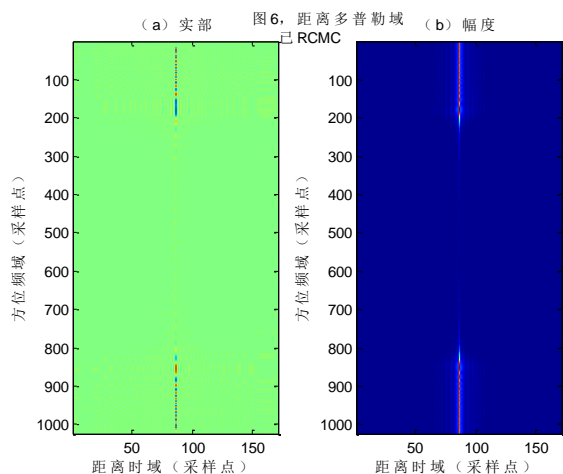
(4) 距离频域, 进行了距离压缩、包络校正和一次运动补偿



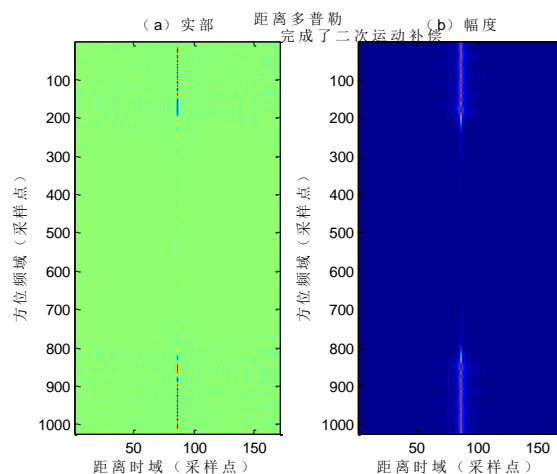
(5) 二维时域, 完成了距离压缩、包络校正和一次运动补偿



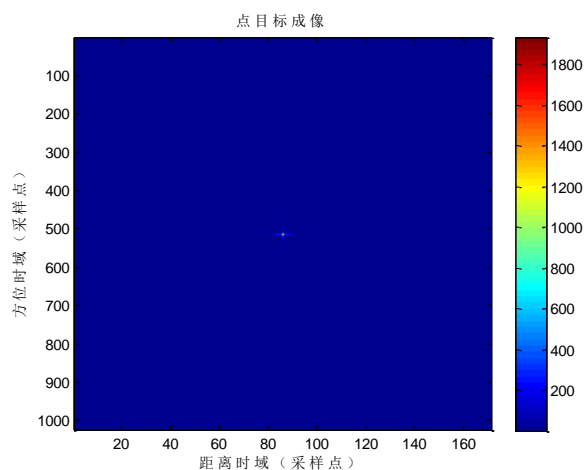
(6) 距离多普勒域, 未 RCMC



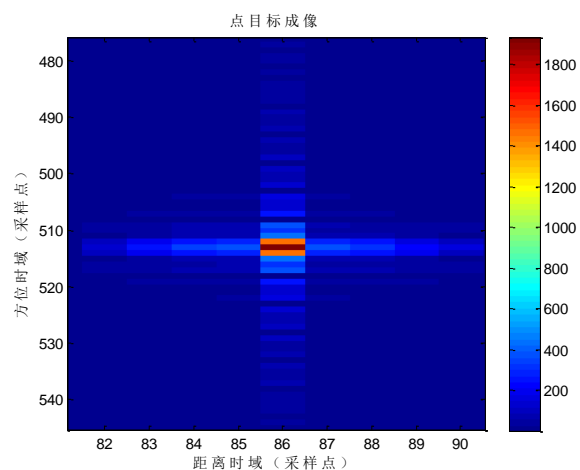
(7) 距离多普勒域, 已完成 RCMC



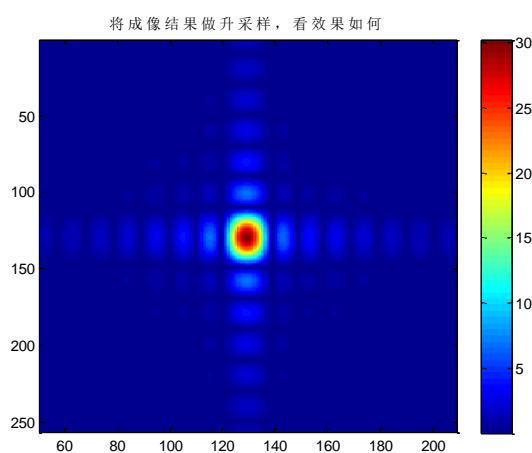
(8) 距离多普勒域, 完成了二次运动补偿



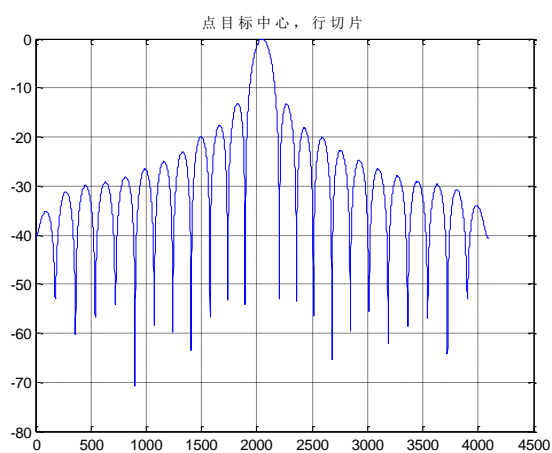
(9) 点目标成像结果



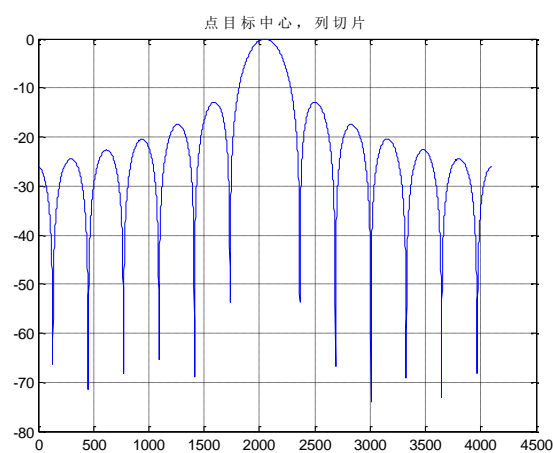
(10) 局部放大



(11) 点目标 A, 升采样



(12) 点目标 A, 距离向切片



(13) 点目标 A, 方位向切片

行切片，点目标中心距离向指标

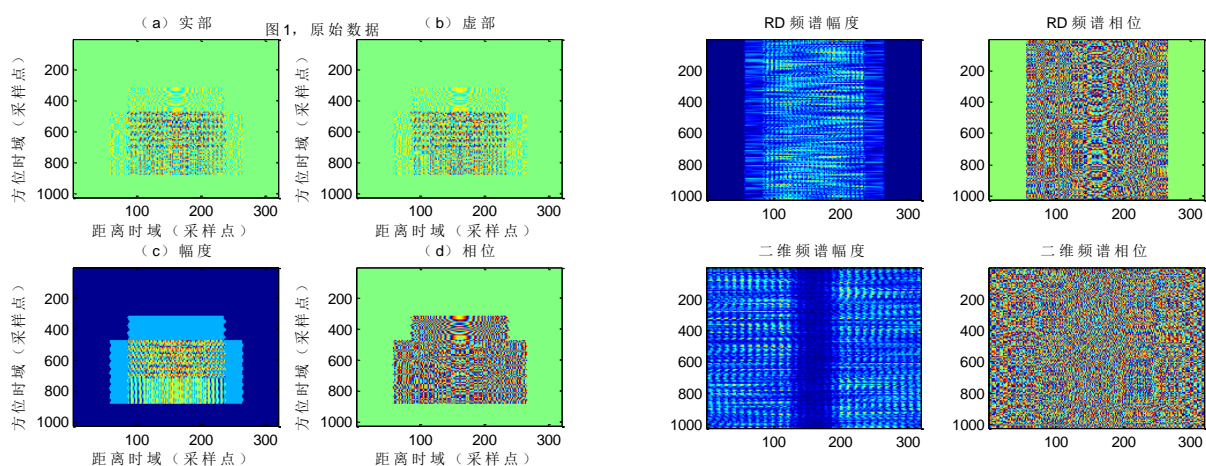
PSLR	ISLR	IRW
-13.1378	-9.8843	2.6695

列切片，点目标中心方位向指标

PSLR	ISLR	IRW
-12.8981	-10.0654	1.6419

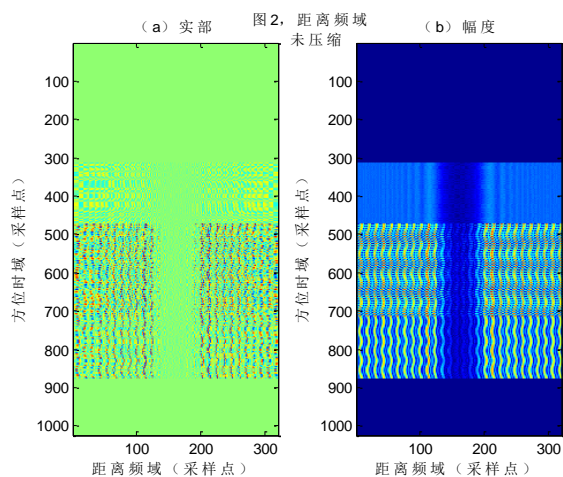
可以看到，相比于原来的没有运动误差的仿真结果，方位向的 PSLR 是偏高的，没有达到-13dB。

b) 4 个点目标的仿真结果

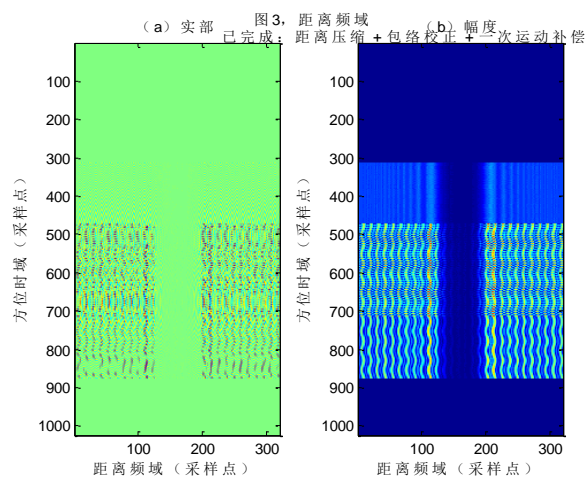


(1) 原始数据

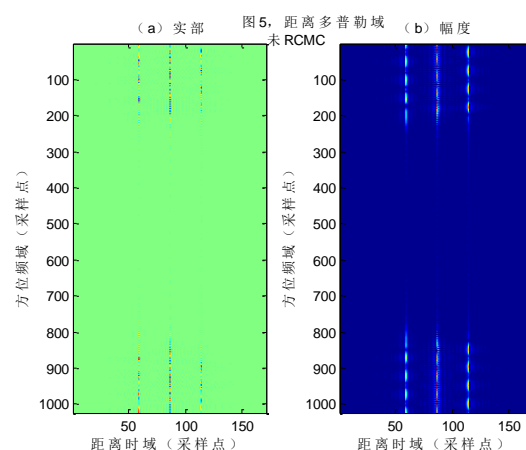
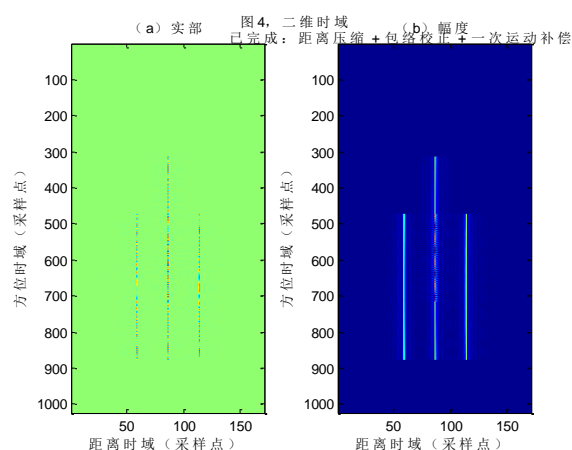
(2) RD 域频谱和二维频谱



(3) 距离频域，未压缩

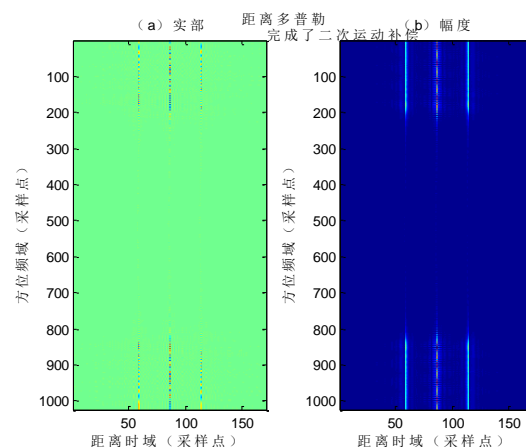
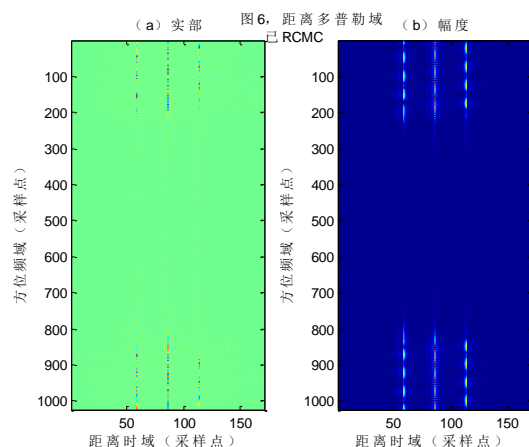


(4) 距离频域，进行了距离压缩、包络校正和一次运动补偿



(5) 二维时域, 完成了距离压缩、包络校正和一次运动补偿

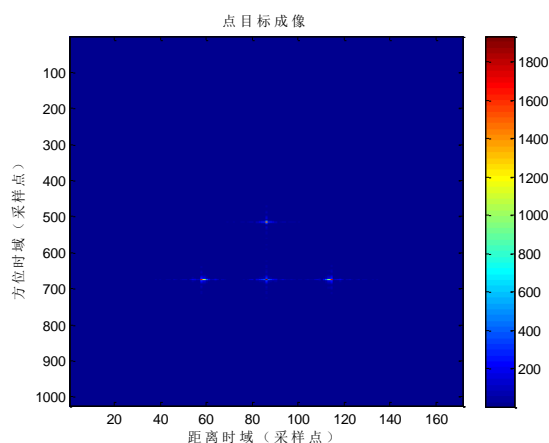
(6) 距离多普勒域, 未 RCMC



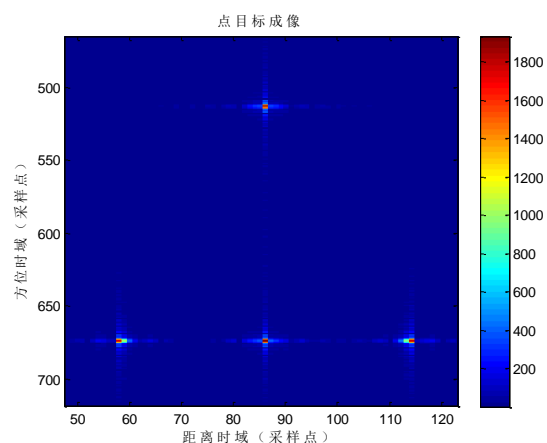
(7) 距离多普勒域, 已完成 RCMC

(8) 距离多普勒域, 完成了二次运动补偿

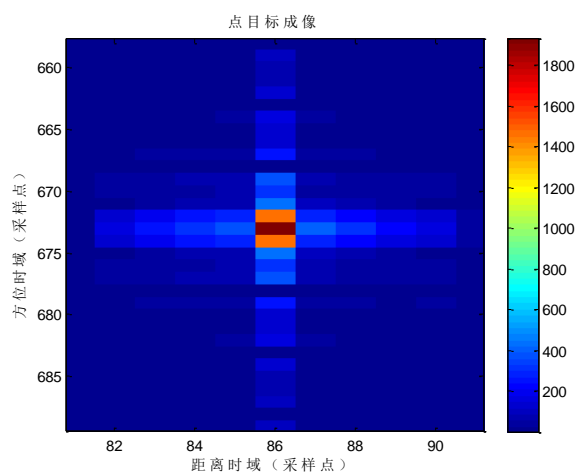
P.S. 尤其注意比较图 (7) 和图 (8), 注意到图 (7) 是完成 RCMC (但是没有进行二次运动补偿) 的结果, 而图 (8) 是进行了二次运动补偿后的结果。区别在于最左边和最右边的两条线, 这正是目标 C 和目标 D 的距离多普勒谱。造成图 (7) 和图 (8) 区别的根源就在于: 目标 C 和目标 D 不是位于场景中心, 因此如果不进行二次运动补偿, 则还会有距离向空变性带来的剩余相位。



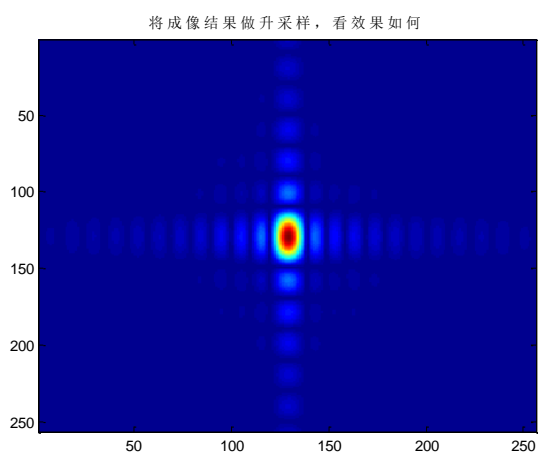
(9) 点目标成像结果



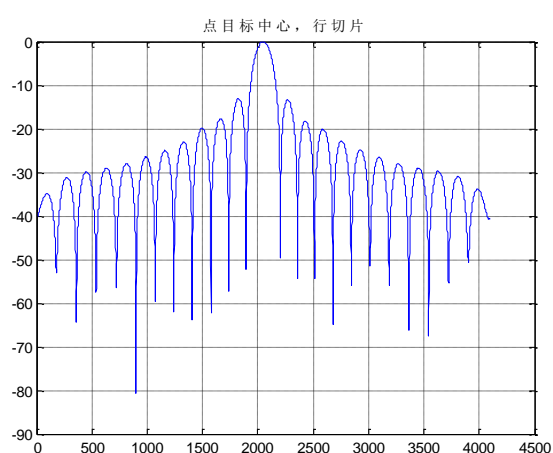
(10) 局部放大



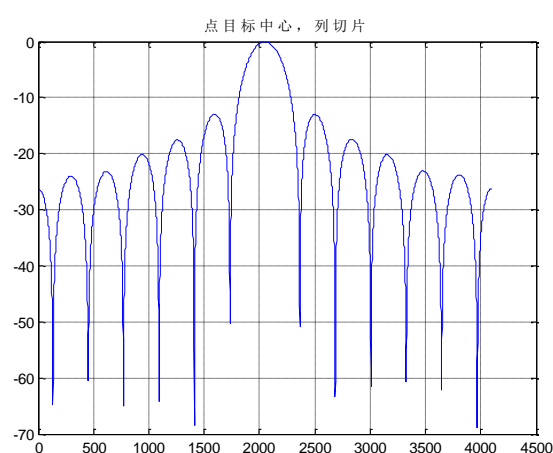
(a) 未升采样



(b) 升采样



(c) 距离向切片



(d) 方位向切片

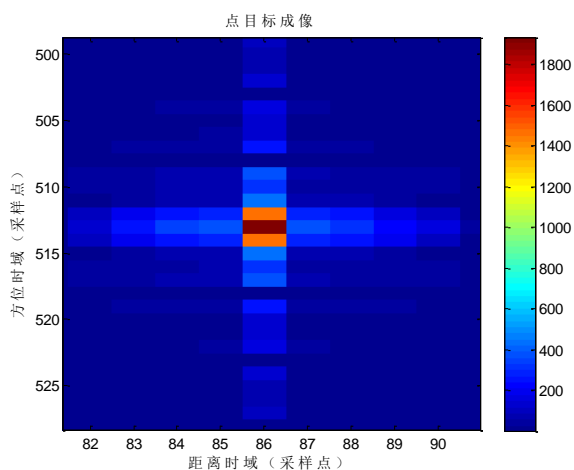
(11) 点目标 A

行切片, 点目标中心距离向指标

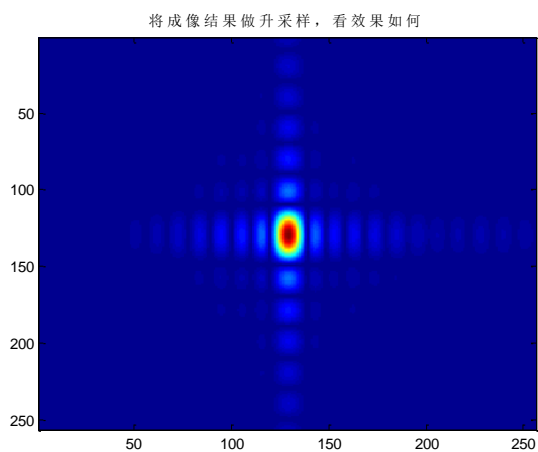
PSLR	ISLR	IRW
-13.1232	-9.8719	2.6692

列切片, 点目标中心方位向指标

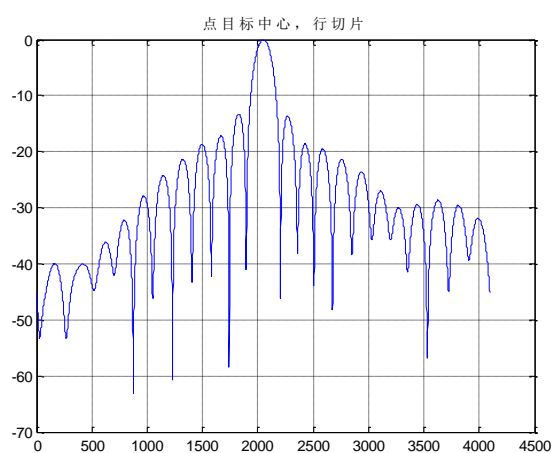
PSLR	ISLR	IRW
-12.9434	-10.1144	1.6535



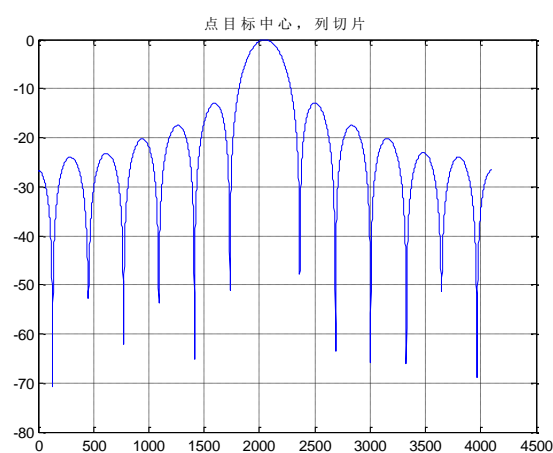
(a) 未升采样



(b) 升采样



(c) 距离向切片



(d) 方位向切片

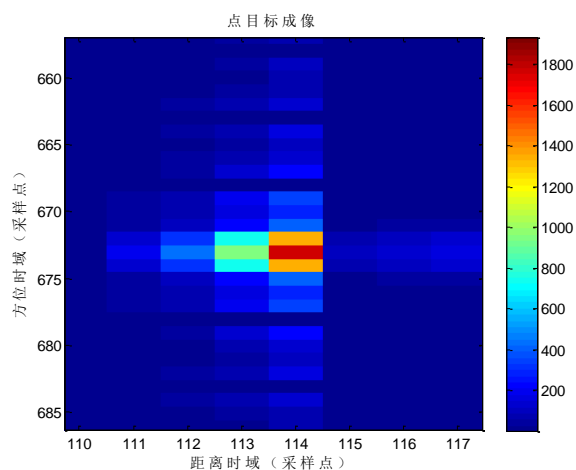
(12) 点目标 B

行切片, 点目标中心距离向指标

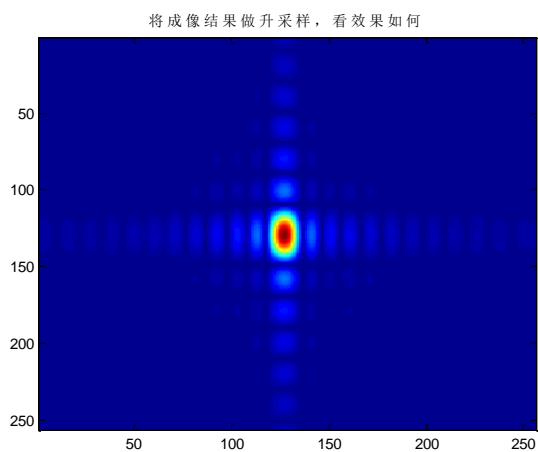
PSLR	ISLR	IRW
-13.2862	-9.7744	2.6693

列切片, 点目标中心方位向指标

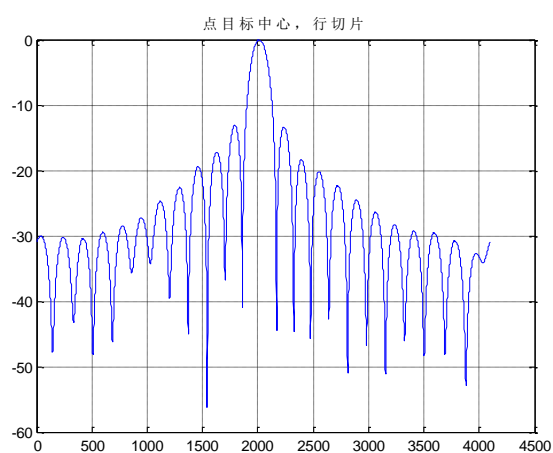
PSLR	ISLR	IRW
-12.9507	-10.1107	1.6507



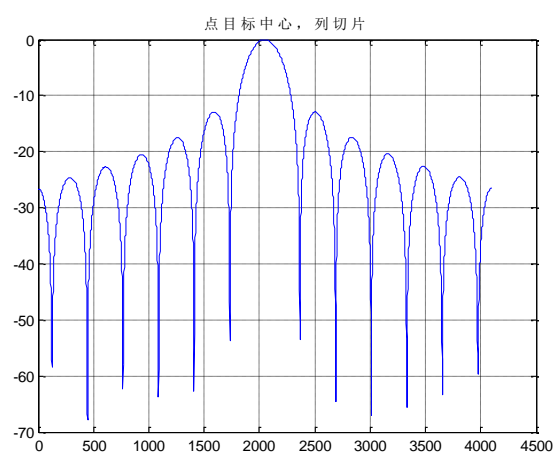
(a) 未升采样



(b) 升采样



(c) 距离向切片



(d) 方位向切片

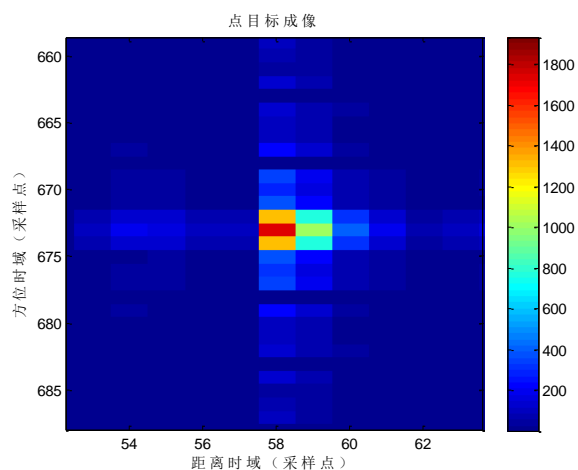
(13) 点目标 C

行切片, 点目标中心距离向指标

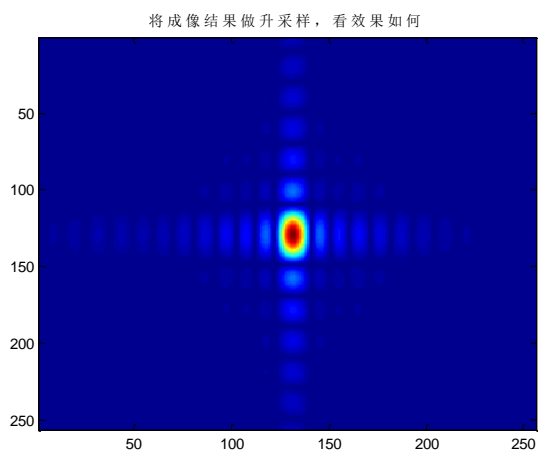
PSLR	ISLR	IRW
-13.1482	-9.7727	2.6709

列切片, 点目标中心方位向指标

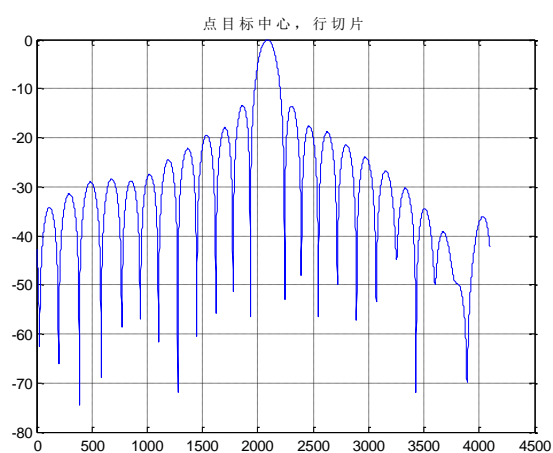
PSLR	ISLR	IRW
-12.8854	-10.0690	1.6478



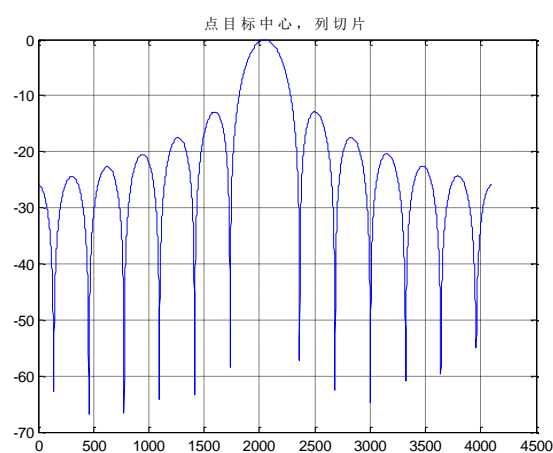
(a) 未升采样



(b) 升采样



(c) 距离向切片



(d) 方位向切片

(14) 点目标 D

行切片, 点目标中心距离向指标

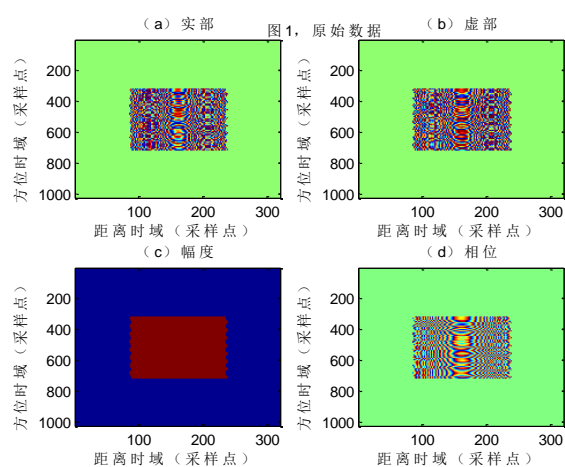
PSLR	ISLR	IRW
-13.3925	-9.8893	2.6749

列切片, 点目标中心方位向指标

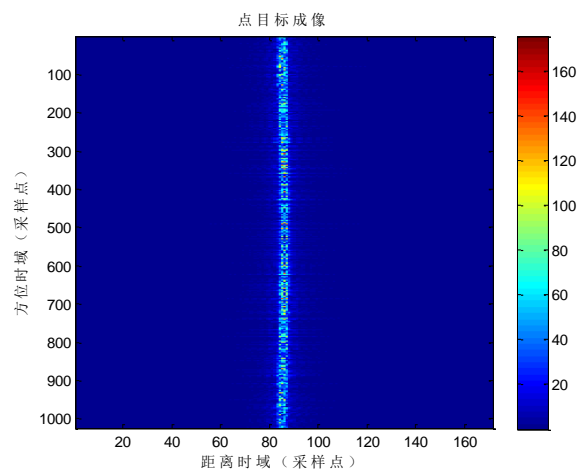
PSLR	ISLR	IRW
-12.8876	-10.0559	1.6353

最后，再将进行不同运动补偿（进行完整的两步式运动补偿，还是只进行了其中一个或者几个步骤）的结果汇总如下

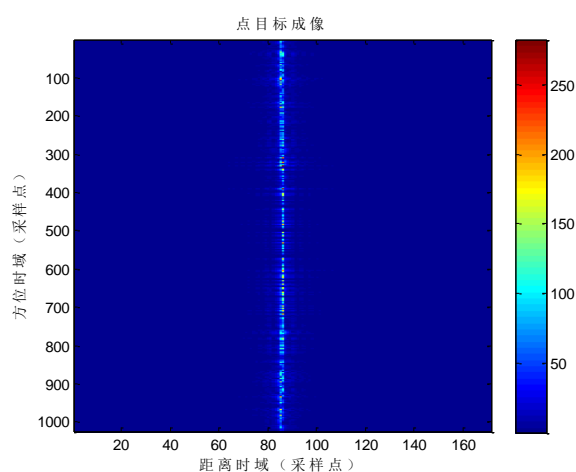
a) 单个点目标 A 的仿真结果



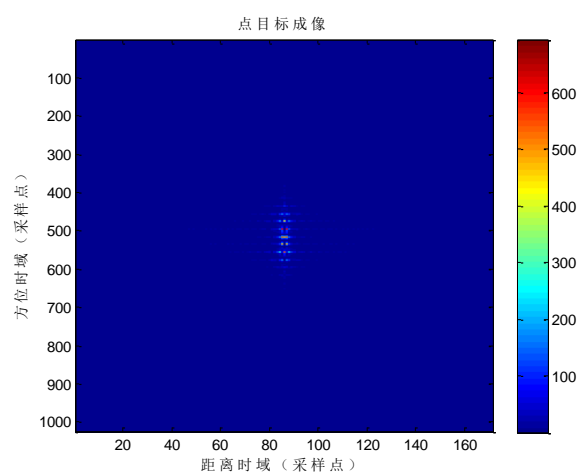
(a) 存在运动误差的点目标回波



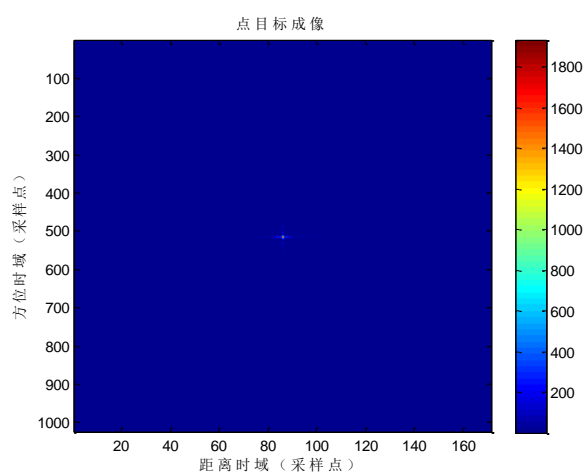
(b) 未作运动补偿的成像结果



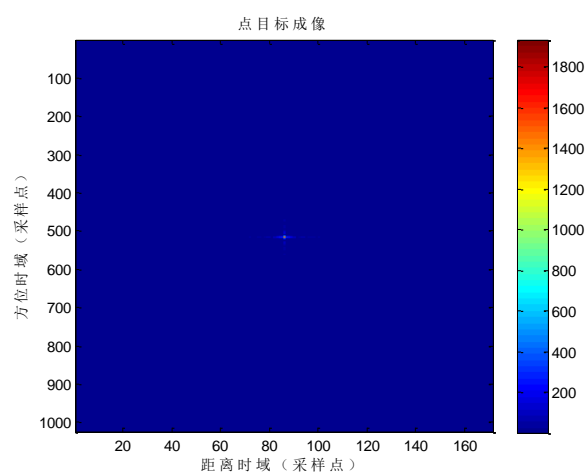
(c) 只作包络校正的成像结果



(d) 只作一次运动补偿的成像结果

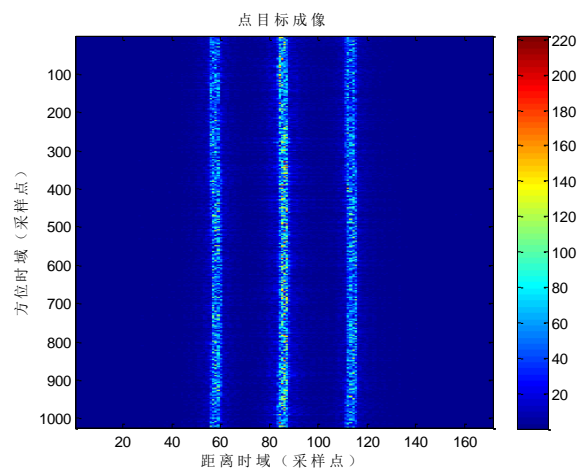
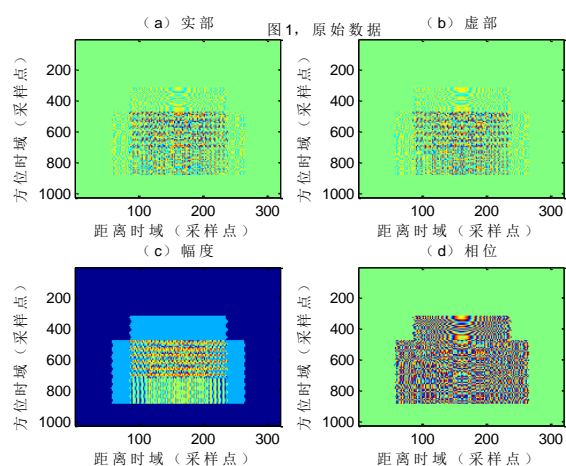


(e) 包络校正和一次运动补偿的成像结果



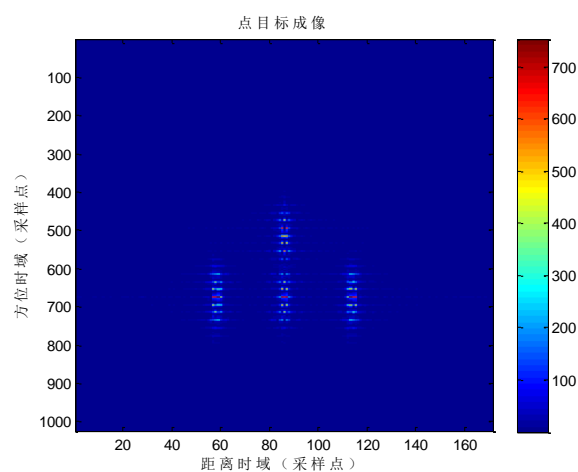
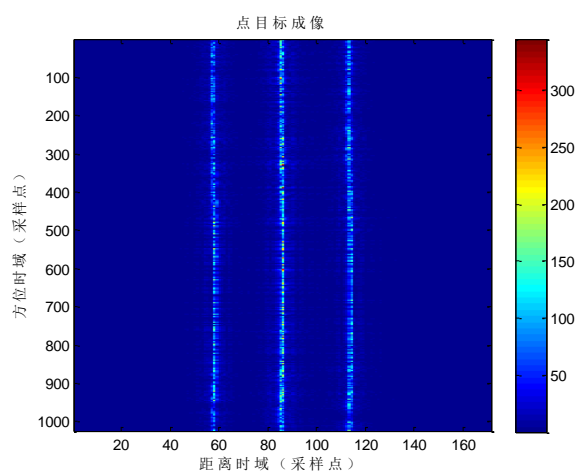
(f) 两步式运动补偿成像结果

b) 4 个点目标的仿真结果



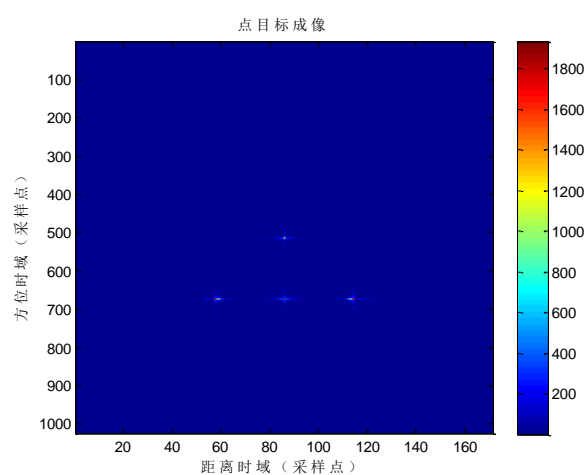
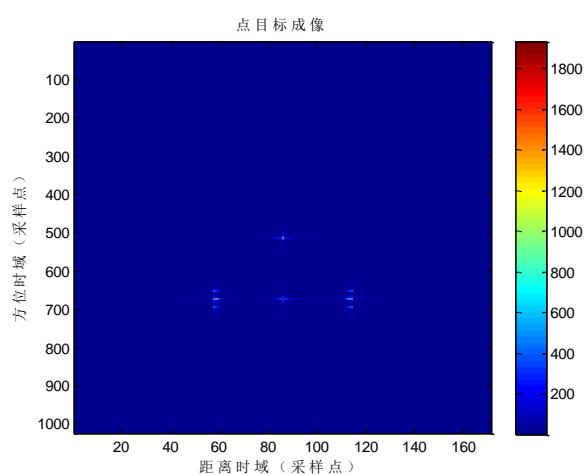
(a) 存在运动误差的点目标回波

(b) 未作运动补偿的成像结果



(c) 只作包络校正的成像结果

(d) 只作一次运动补偿的成像结果



(e) 包络校正和一次运动补偿的成像结果

(f) 两步式运动补偿成像结果

二、 正侧视，采用方式 2 实现 SRC（二维频域相位相乘），点目标仿真

有了上面的所有讨论，我已经没有太多要说的了。

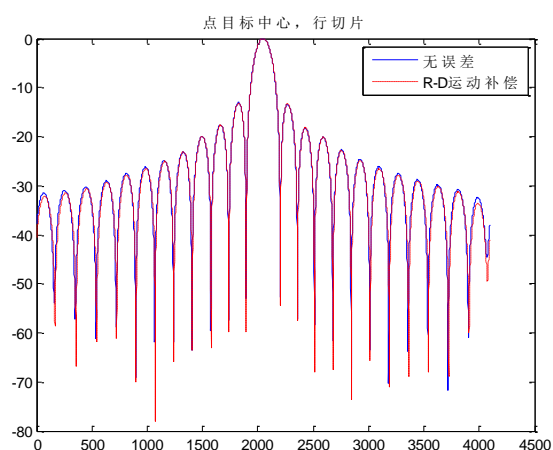
对于采用方式 2 实现 SRC，即二次距离压缩（采用二维频域相位相乘的形式），这相当于是在第一种情况（不考虑 SRC 进行点目标仿真）的基础上给出了更精确的结果。

所有关于两步式运动补偿的仿真结果、指标计算值，以及只采用其中一个或者几个步骤得到的结果都是类似的。详细说明见前面所述。

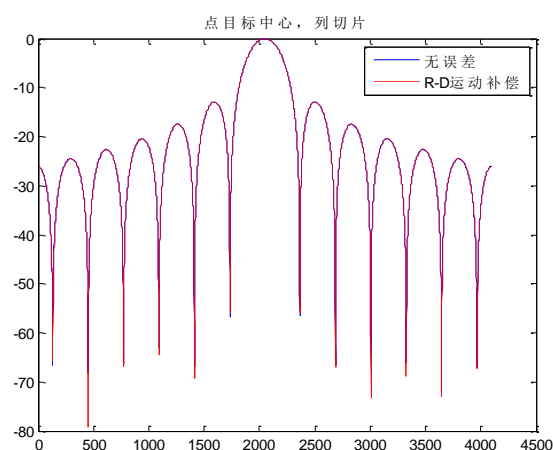
因此，下面重点针对中心距离处、远距处、近距处点目标的距离向切片和方位向切面图，分别给出对比（无误差和采用两步式运动补偿的结果对比）。

1. 中心距离处：

1) 点目标 A 的结果对比

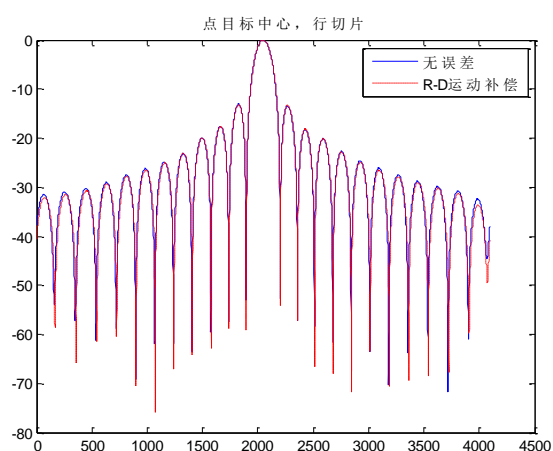


(a) 距离向切片

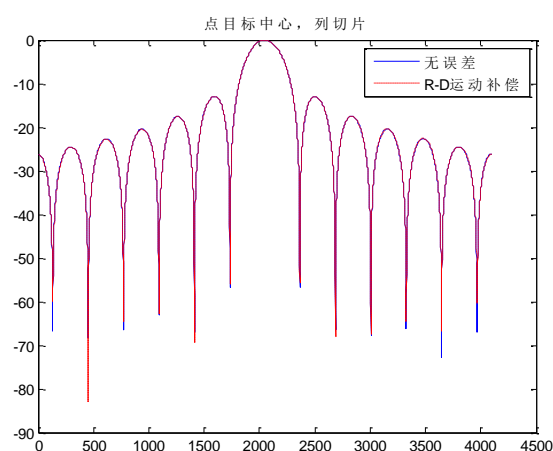


(b) 方位向切片

2) 点目标 B 的结果对比（相比于点目标 A，沿航迹方向移动了 120m）

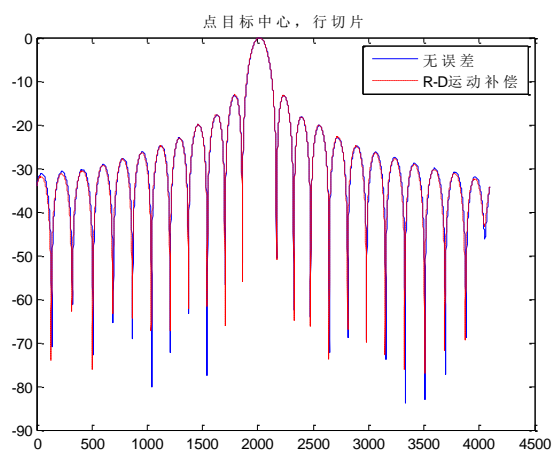


(a) 距离向切片

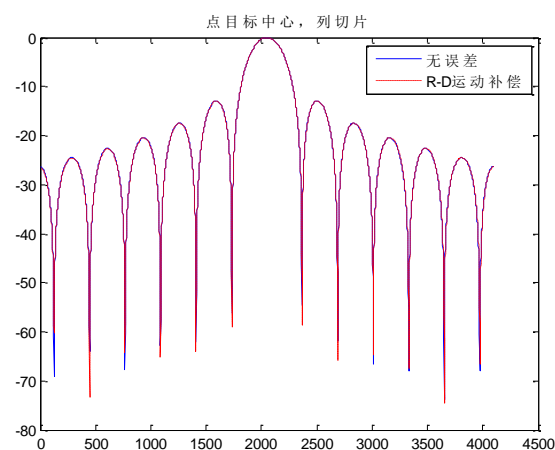


(b) 方位向切片

2. 远处处：点目标 C 的结果对比（相比于点目标 B，沿地距 x 轴移动了 80m）

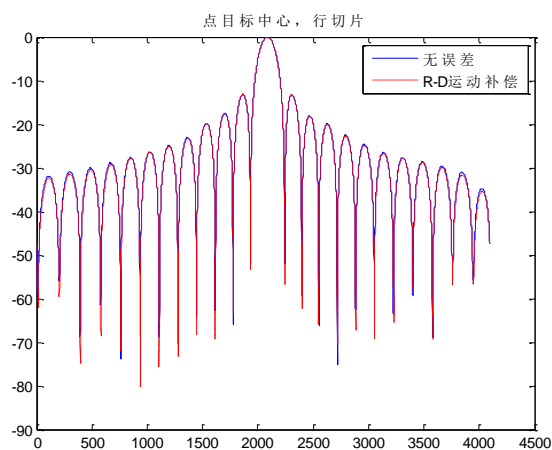


(a) 距离向切片

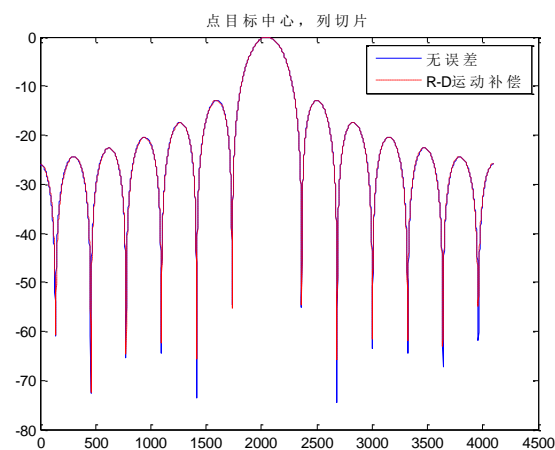


(b) 方位向切片

3. 近距处：点目标 D 的结果对比（相比于点目标 B，沿地距 x 轴移动了 -80m）



(a) 距离向切片



(b) 方位向切片

从上面的结果可以看出，在我仿真所选择的这四个点中（包括两个中心距离处的点，一个近距处的点，一个远处处的点），它们的 R-D 两步式运动补偿效果都很不错，其点目标中心升采样后的距离向和方位向切片基本与无误差时的仿真结果是一致的。

WD

2014.11.18. 22:53 p.m.