
窄波束运动补偿

CSA 点目标仿真

仿真程序基于:

1. 正侧视, CSA, 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、 CSA, “运动补偿” 点目标仿真

根据郑晓双的博士论文，考虑窄波束运动补偿的 CSA 点目标成像流程是：

原始数据——距离 FT——包络校正、一次运动补偿——距离 IFT——方位 FT——补余 RCMC
——距离 FT——距离压缩、SRC 和一致 RCMC——距离 IFT
——附加相位校正（CS 操作残留相位校正）——方位 IFT——二次运动补偿——方位 FT
——方位压缩——方位 IFT——SAR 图像

我有一个疑惑是：

对于不考虑运动补偿的普通 CSA，附加相位校正是和方位压缩合并处理的。也就是在进行了距离压缩、SRC 和一致 RCMC 后，变换到距离多普勒域，然后同时进行附加相位校正和方位压缩。

由于这里考虑了运动补偿，因此作者所述的成像流程是，进行了距离压缩、SRC 和一致 RCMC 后，变换到距离多普勒域，先只进行了附加相位校正，然后变换到二维时域进行二次运动补偿，再变换到距离多普勒域，只进行方位压缩。我想：是否可以在进行了所有距离操作后，直接变换回二维时域，进行二次运动补偿，然后再变换到距离多普勒域，（和原来一样）同时进行附加相位校正和方位压缩。

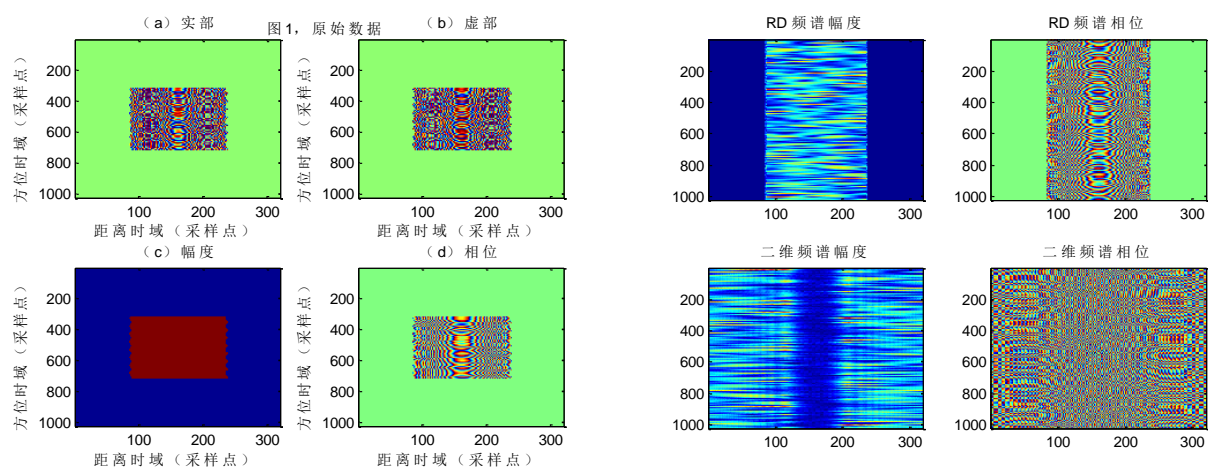
如果不可以，那为什么？

有关这个疑惑的相关讨论见本报告最后。

1. 先按照作者所述的成像流程, 进行两步式运动补偿的成像仿真

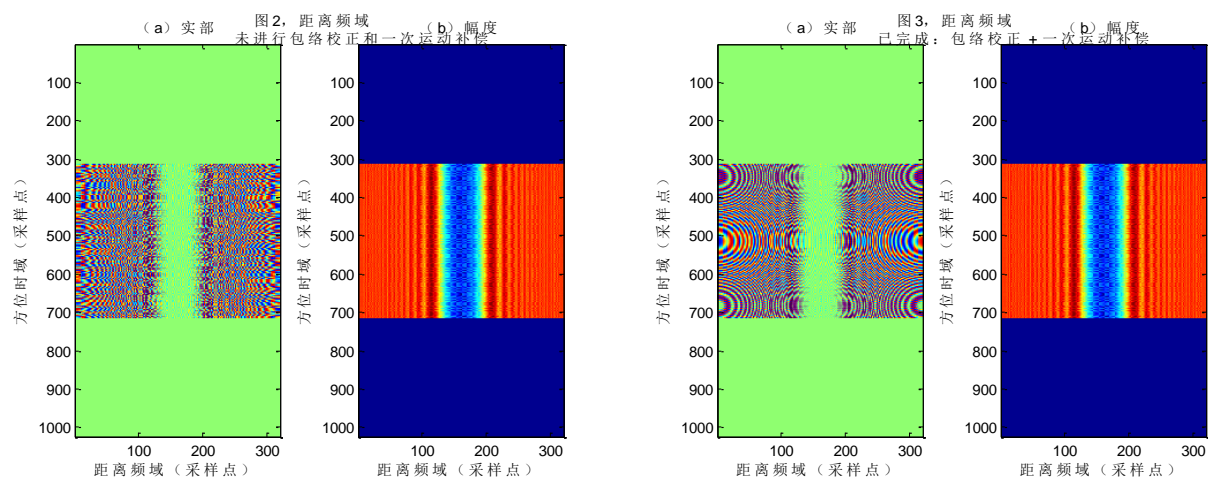
1) 完整的两步式运动补偿, 成像仿真结果

a) 单点目标 A 仿真



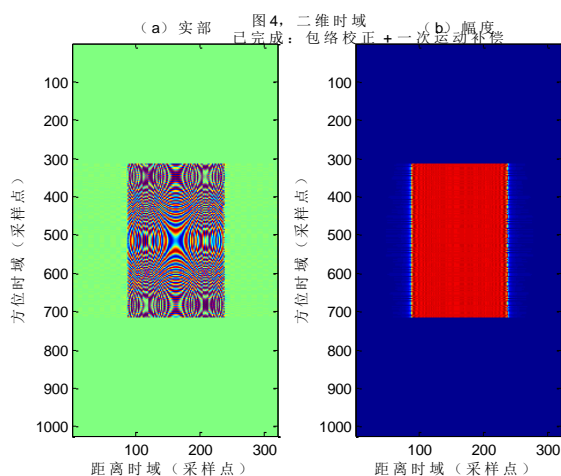
(1) 原始数据

(2) RD 域频谱和二维频谱

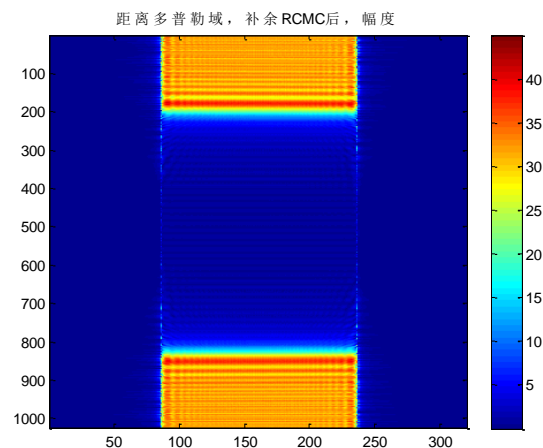
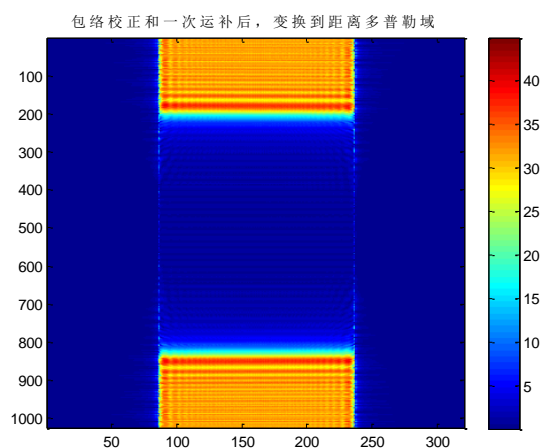


(3) 原始数据变换到距离频域

(4) 距离频域, 完成了包络校正和一次运动补偿

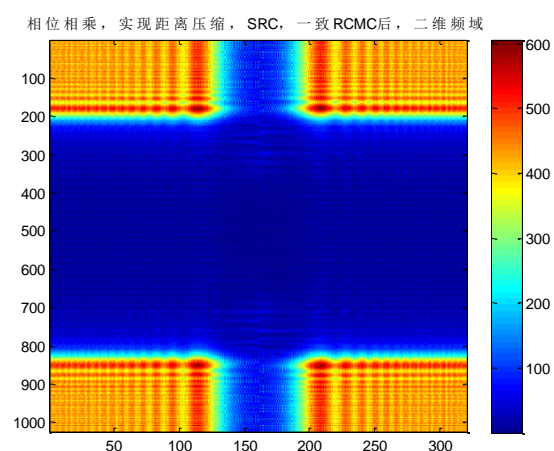
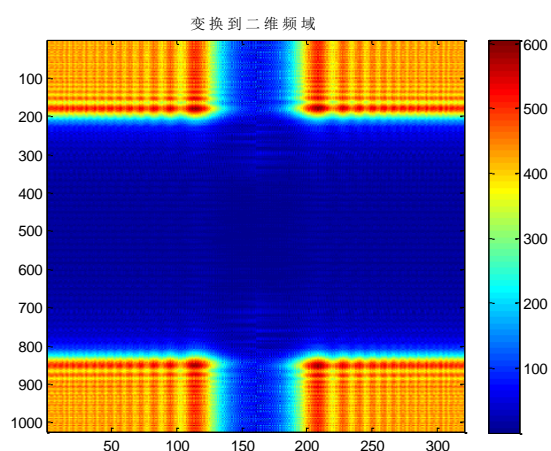


(5) 二维时域, 完成了包络校正和一次运动补偿



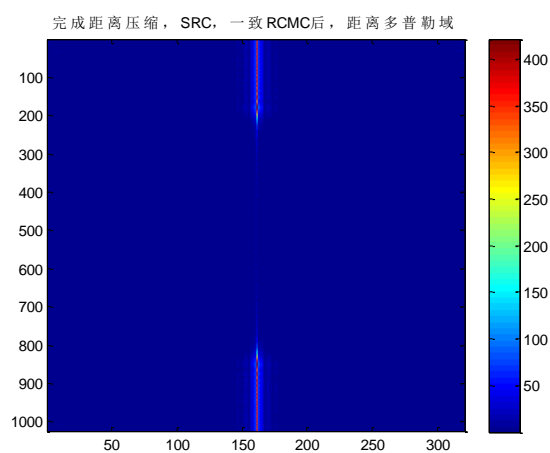
(6) 包络校正和一次运补后，变换到 RD 域

(7) 距离多普勒域，补余 RCMC 后，幅度

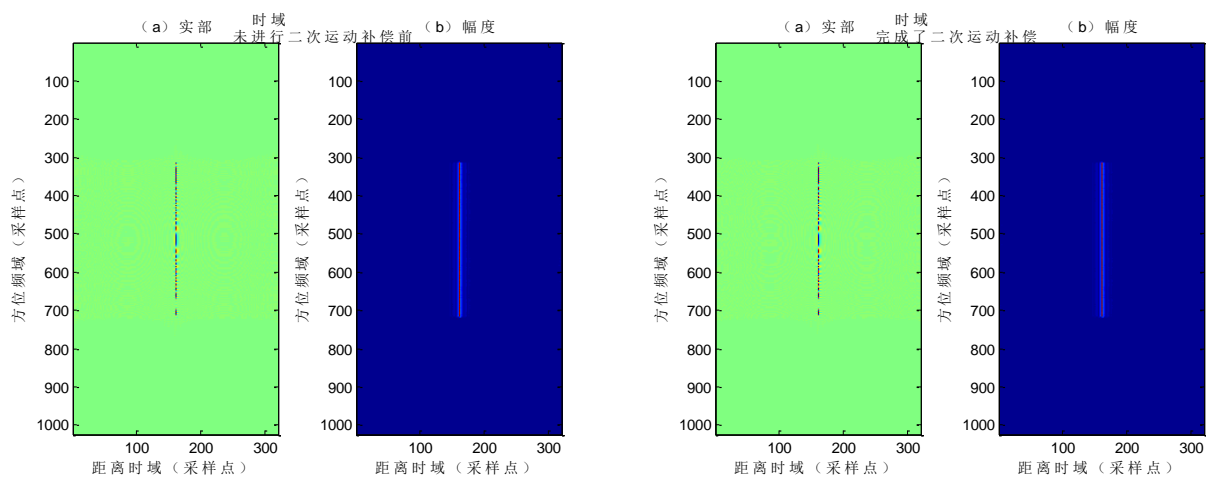


(8) 变换到二维频域

(9) 二维频域，实现距离压缩、SRC 和一致 RCMC

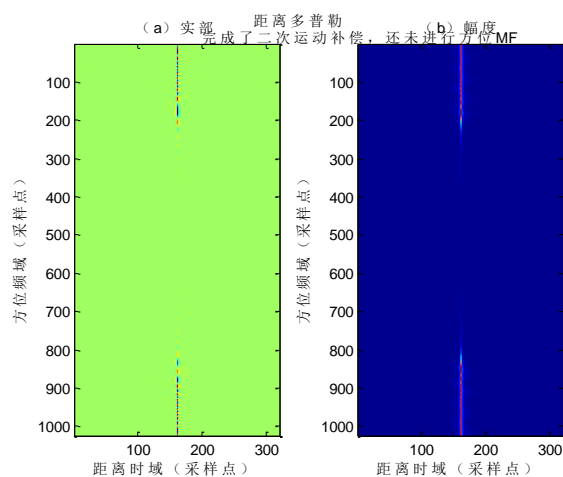


(10) 完成距离压缩，SRC 和一致 RCMC 后，距离多普勒域

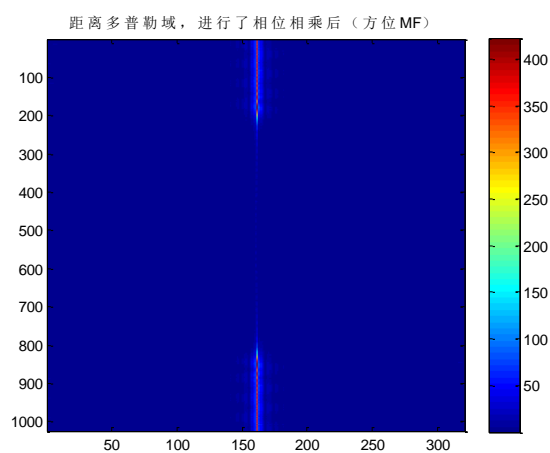


(11) 时域, 未进行二次运动补偿前

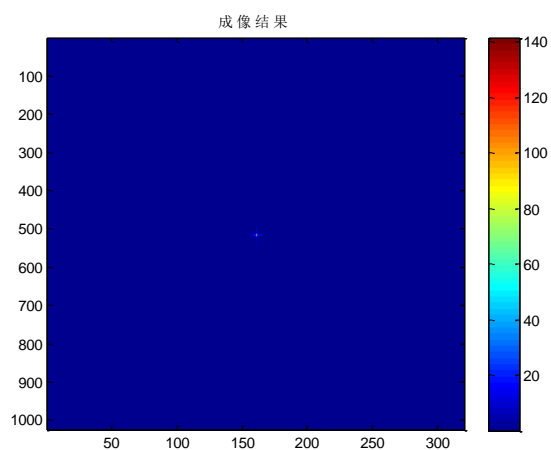
(12) 时域, 完成了二次运动补偿



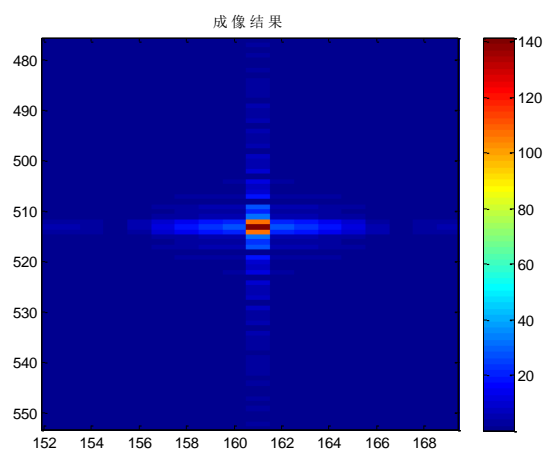
(13) 距离多普勒域, 完成了二次运动补偿, 还未进行方位 MF



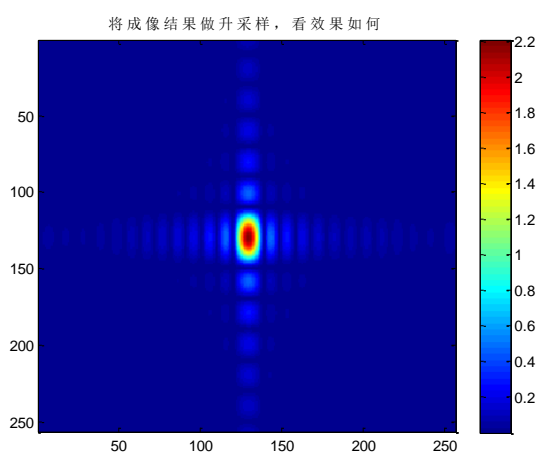
(14) 距离多普勒域, 进行了相位相乘后 (方位 MF)



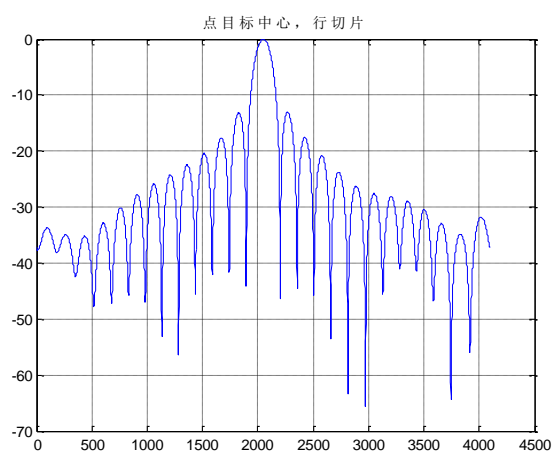
(15) 成像结果



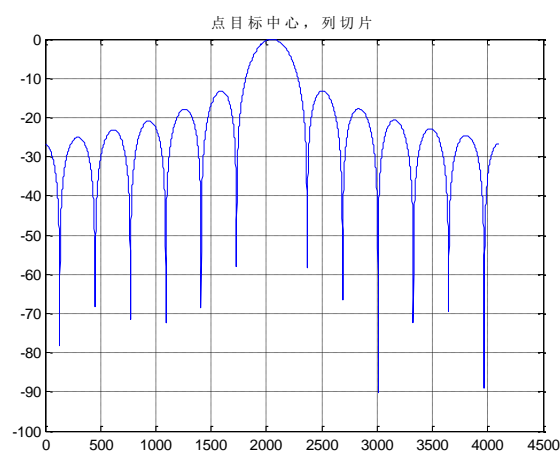
(16) 局部放大



(a) 升采样



(b) 距离向切片



(c) 方位向切片

(17) 点目标 A

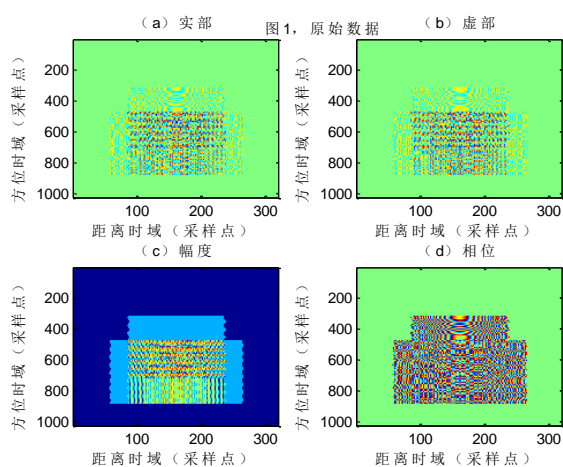
行切片，点目标中心距离向指标

| PSLR | ISLR | IRW |
|----------|----------|--------|
| -13.0316 | -10.0467 | 2.6677 |

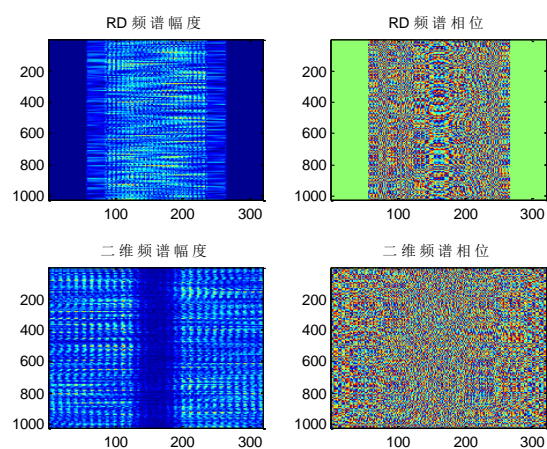
列切片，点目标中心方位向指标

| PSLR | ISLR | IRW |
|----------|----------|--------|
| -13.2250 | -10.4842 | 1.6564 |

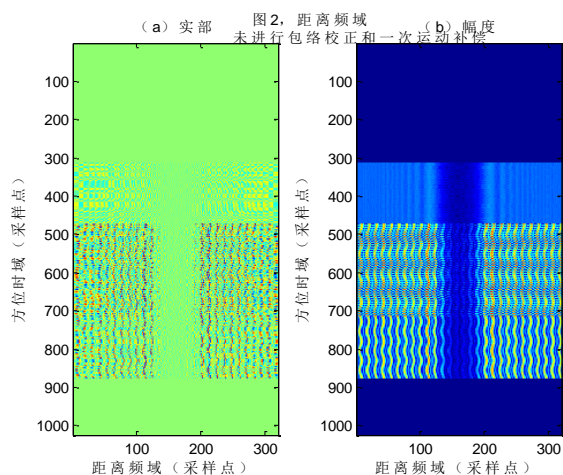
b) 4 个点目标仿真



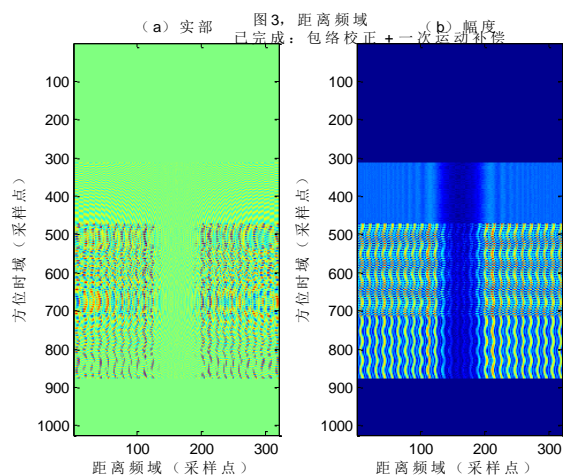
(1) 原始数据



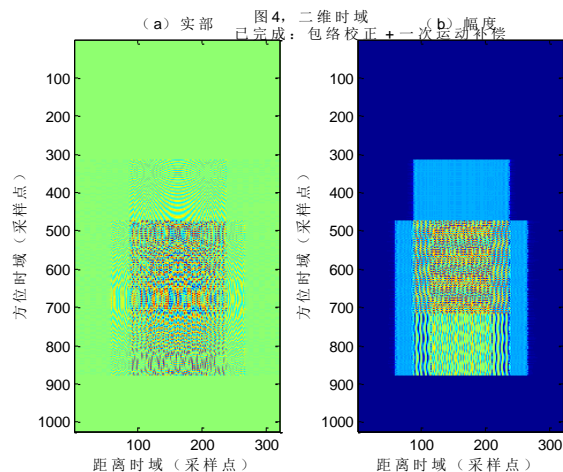
(2) RD 域频谱和二维频谱



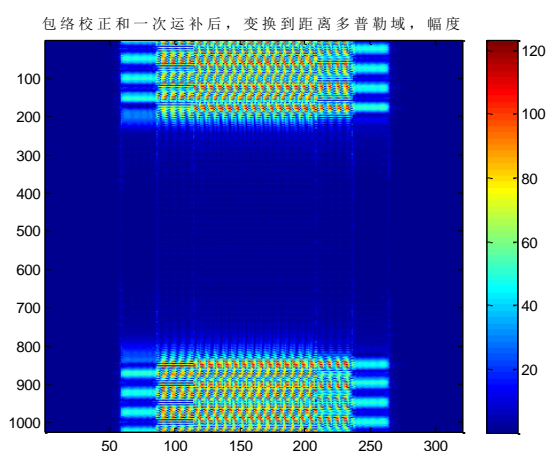
(3) 原始数据变换到距离频域



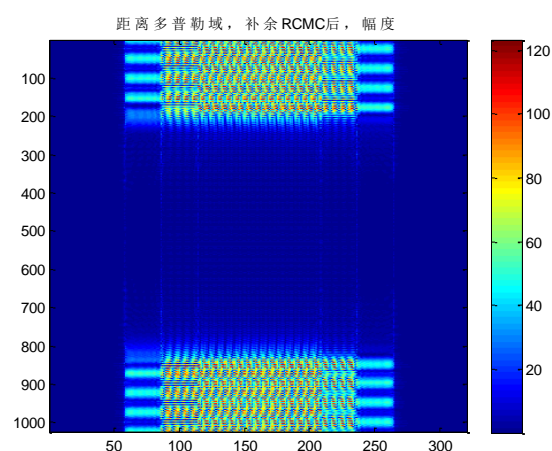
(4) 距离频域，完成了包络校正和一次运补



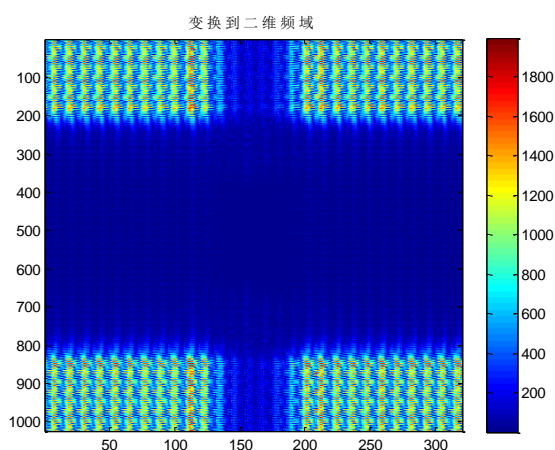
(5) 二维时域，完成了包络校正和一次运动补偿



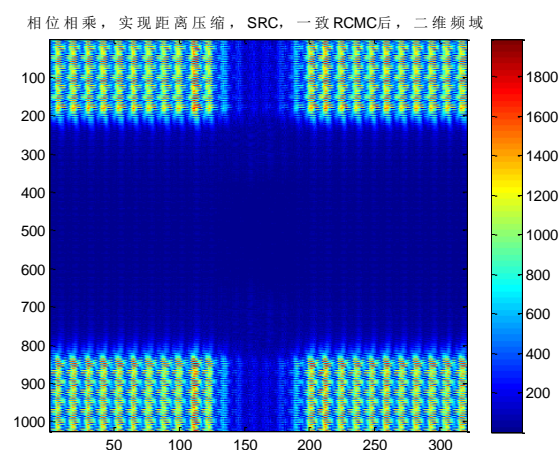
(6) 包络校正和一次运补后，变换到 RD 域



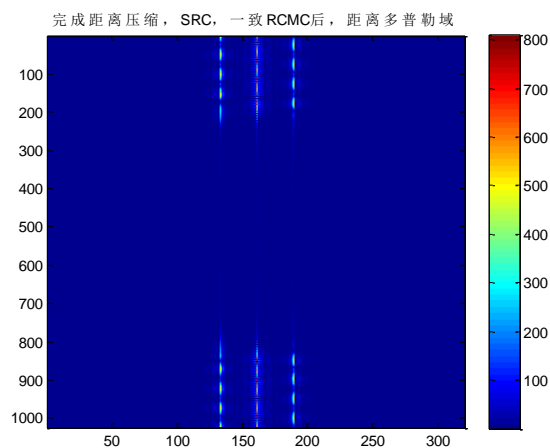
(7) 距离多普勒域，补余 RCMC 后，幅度



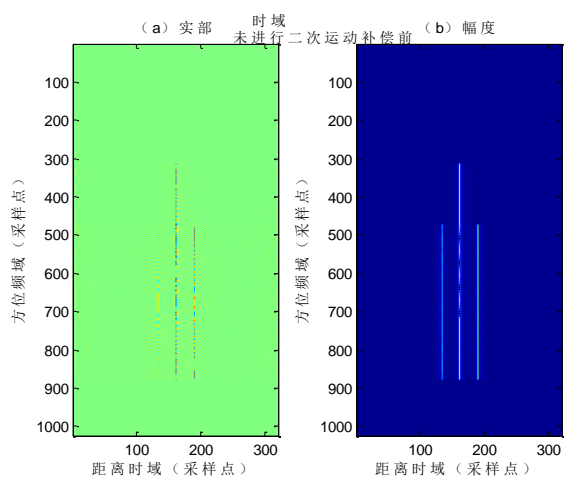
(8) 变换到二维频域



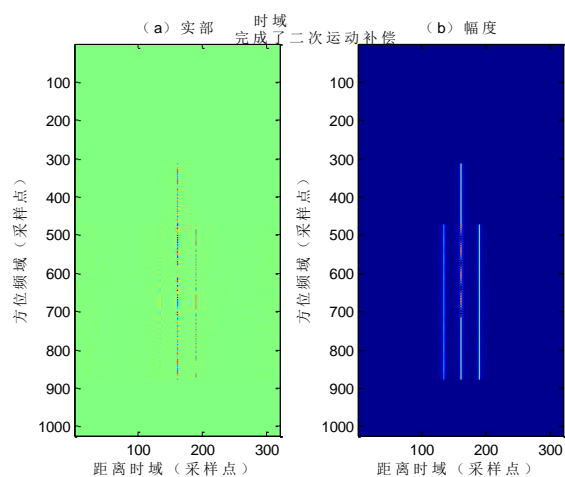
(9) 二维频域，实现距离压缩、SRC 和一致 RCMC



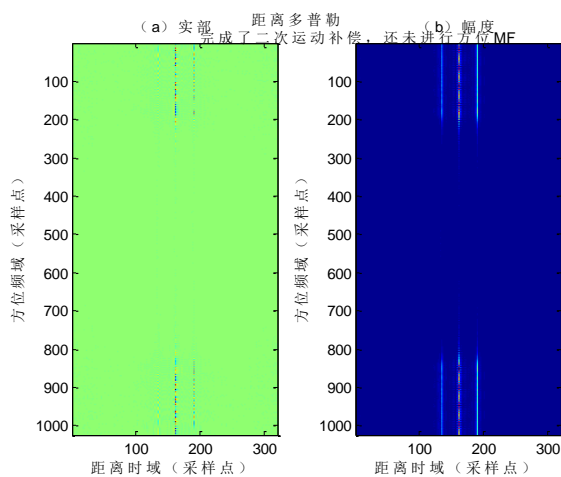
(10) 完成距离压缩, SRC 和一致 RCMC 后, 距离多普勒域



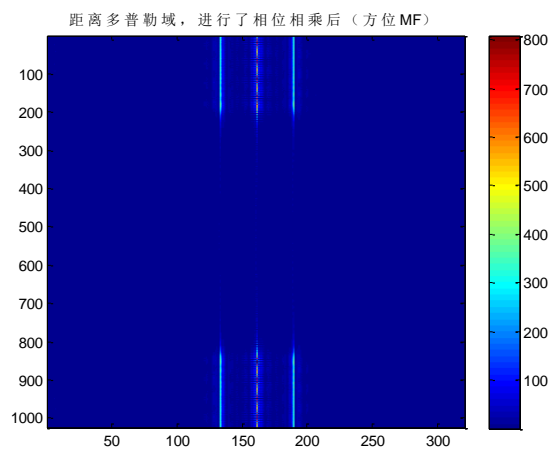
(11) 时域, 未进行二次运动补偿前



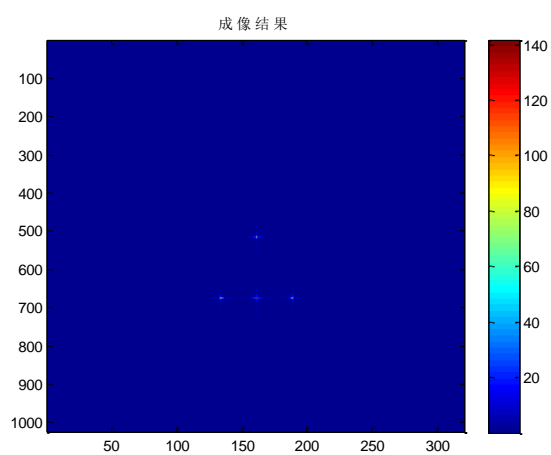
(12) 时域, 完成了二次运动补偿



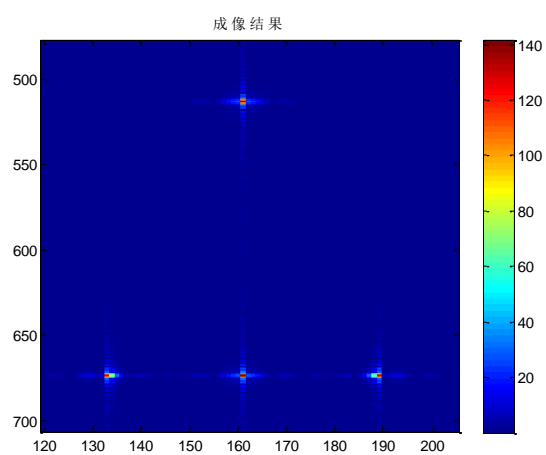
(13) 距离多普勒域, 完成了二次运动补偿, 还未进行方位 MF



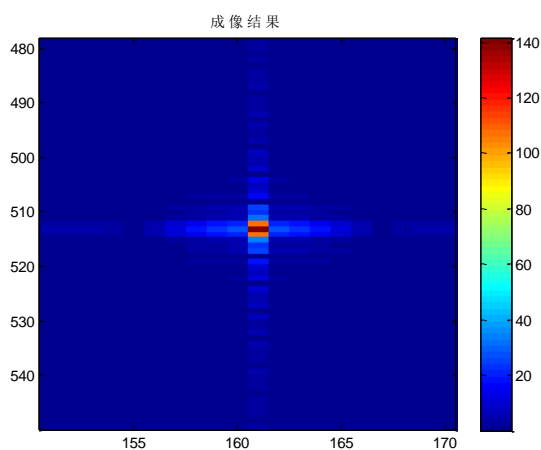
(14) 距离多普勒域，进行了相位相乘后（方位 MF）



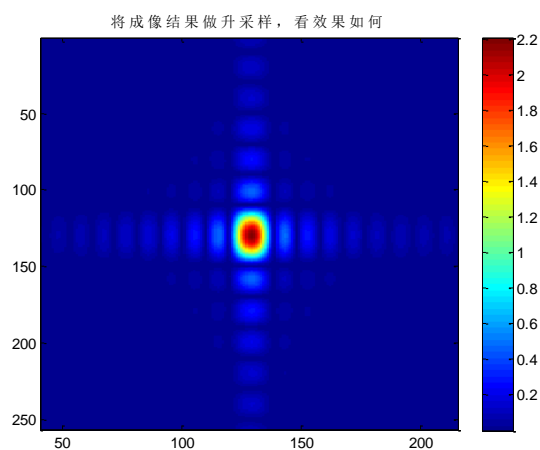
(15) 成像结果



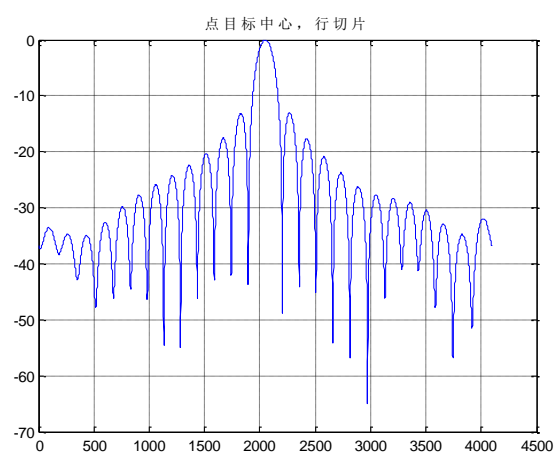
(16) 局部放大



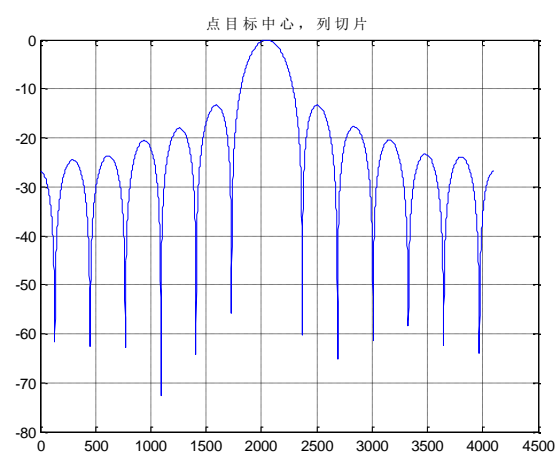
(a) 未升采样



(b) 升采样



(c) 距离向切片



(d) 方位向切片

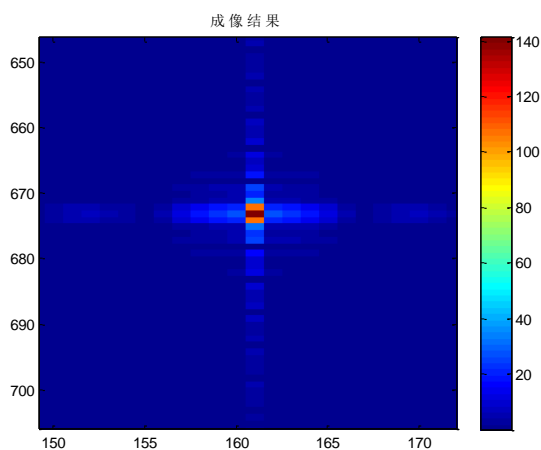
(17) 点目标 A

行切片, 点目标中心距离向指标

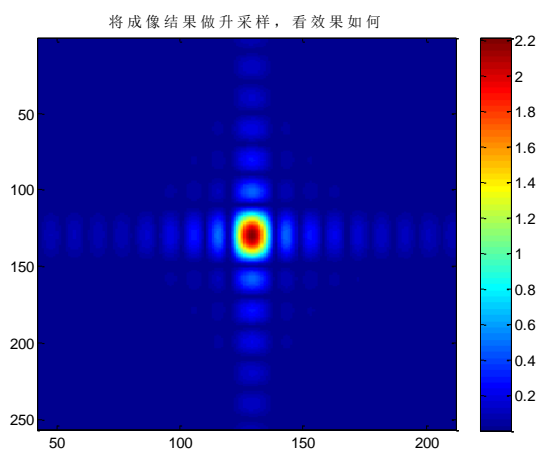
| PSLR | ISLR | IRW |
|----------|----------|--------|
| -13.0678 | -10.0419 | 2.6673 |

列切片, 点目标中心方位向指标

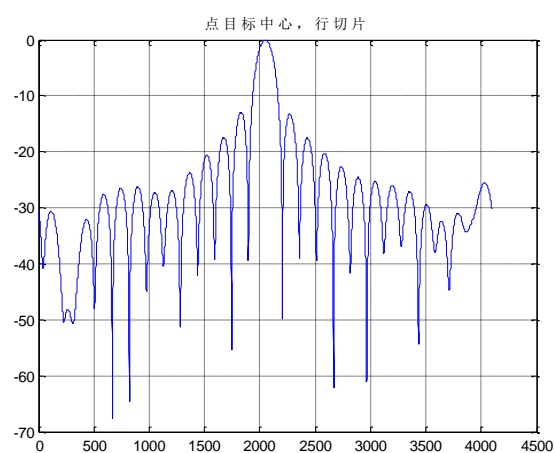
| PSLR | ISLR | IRW |
|----------|----------|--------|
| -13.3245 | -10.5360 | 1.6689 |



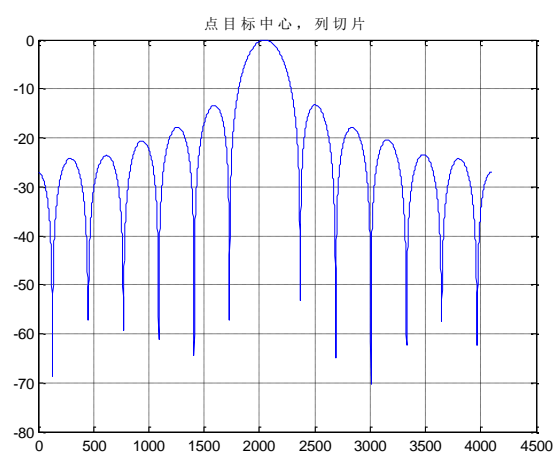
(a) 未升采样



(b) 升采样



(c) 距离向切片



(d) 方位向切片

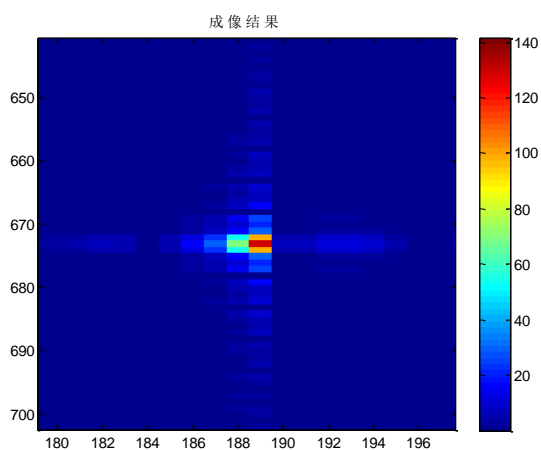
(18) 点目标 B

行切片, 点目标中心距离向指标

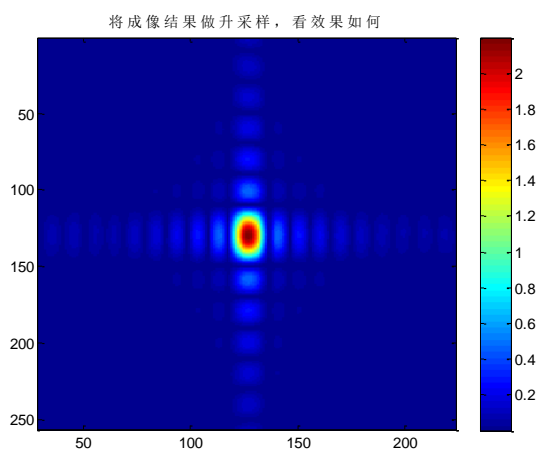
| PSLR | ISLR | IRW |
|----------|---------|--------|
| -12.9836 | -9.7653 | 2.6640 |

列切片, 点目标中心方位向指标

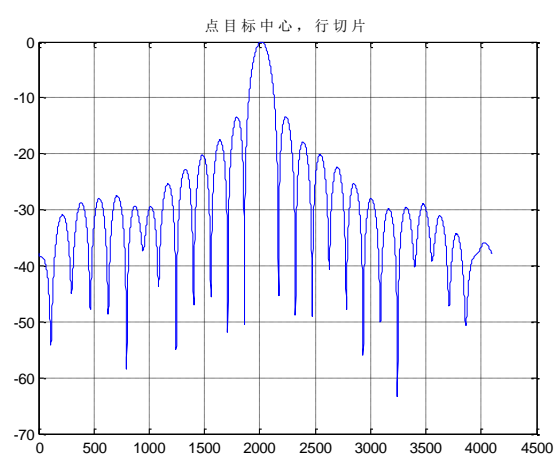
| PSLR | ISLR | IRW |
|----------|----------|--------|
| -13.3003 | -10.5445 | 1.6664 |



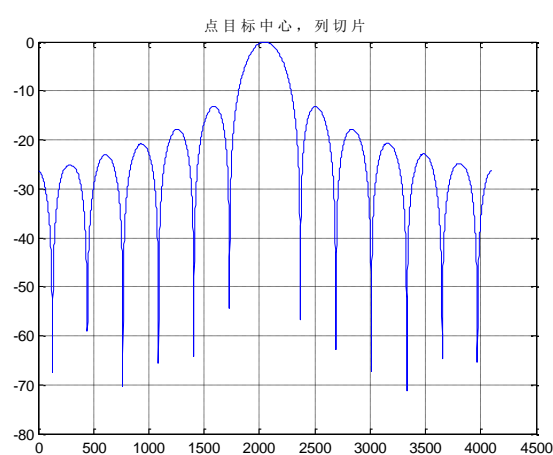
(a) 未升采样



(b) 升采样



(c) 距离向切片



(d) 方位向切片

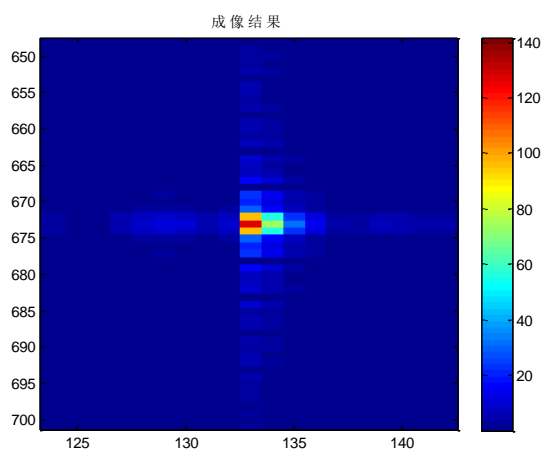
(19) 点目标 C

行切片, 点目标中心距离向指标

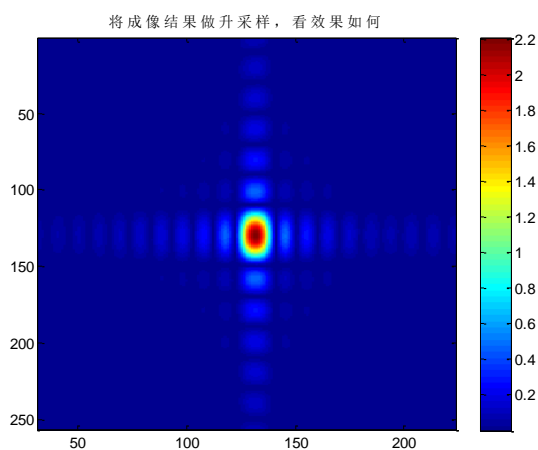
| PSLR | ISLR | IRW |
|----------|----------|--------|
| -13.3855 | -10.1099 | 2.6615 |

列切片, 点目标中心方位向指标

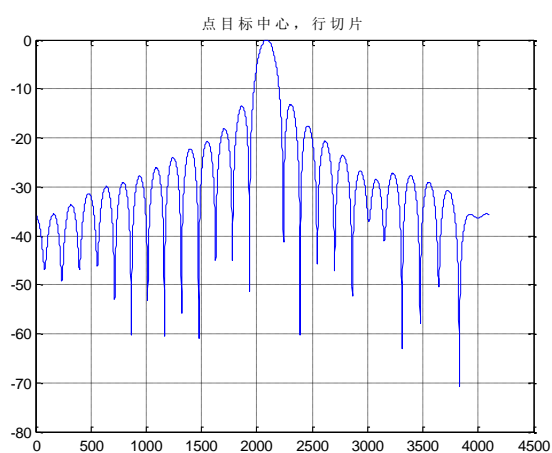
| PSLR | ISLR | IRW |
|----------|----------|--------|
| -13.1896 | -10.4618 | 1.6609 |



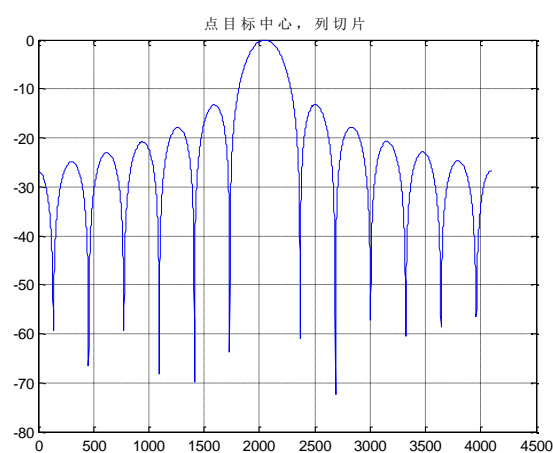
(a) 未升采样



(b) 升采样



(c) 距离向切片



(d) 方位向切片

(20) 点目标 D

行切片, 点目标中心距离向指标

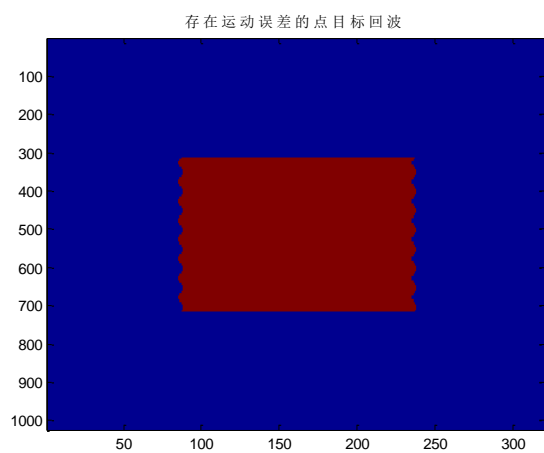
| PSLR | ISLR | IRW |
|----------|----------|--------|
| -13.1966 | -10.1234 | 2.6512 |

列切片, 点目标中心方位向指标

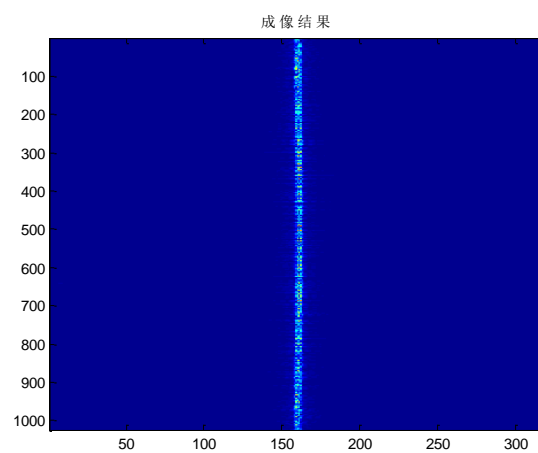
| PSLR | ISLR | IRW |
|----------|----------|--------|
| -13.2106 | -10.4897 | 1.6496 |

2) 两步式运动补偿, 采用其中一个或者几个步骤进行仿真, 结果对比

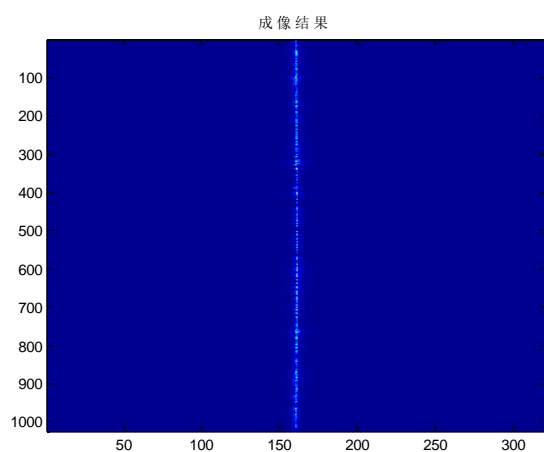
a) 单个点目标 A 仿真



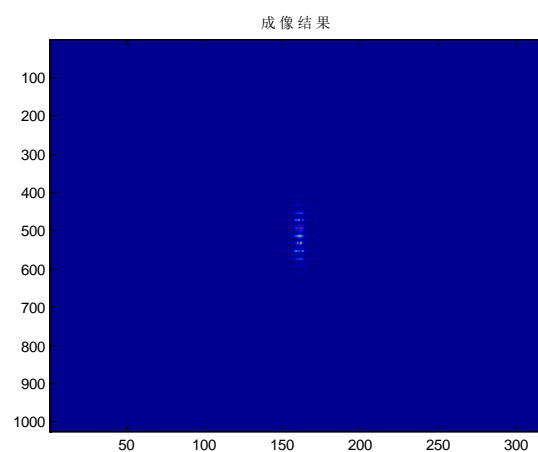
(a) 存在运动误差的点目标回波



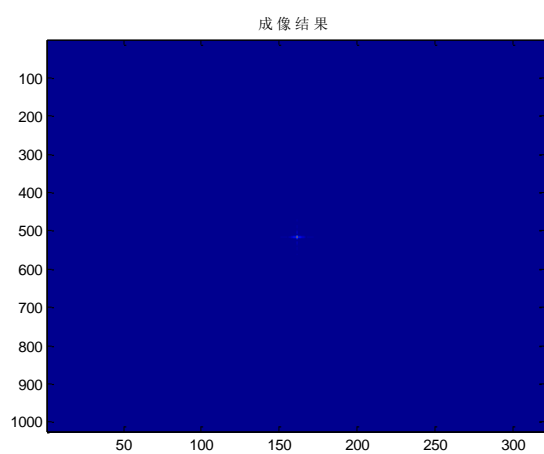
(b) 未作运动补偿的成像结果



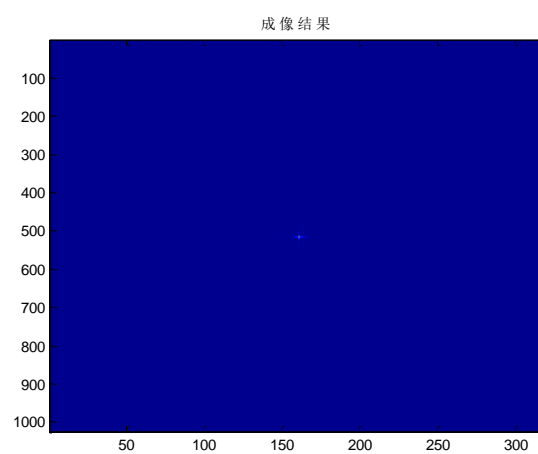
(c) 只作包络矫正的成像结果



(d) 只作一次运动补偿的成像结果

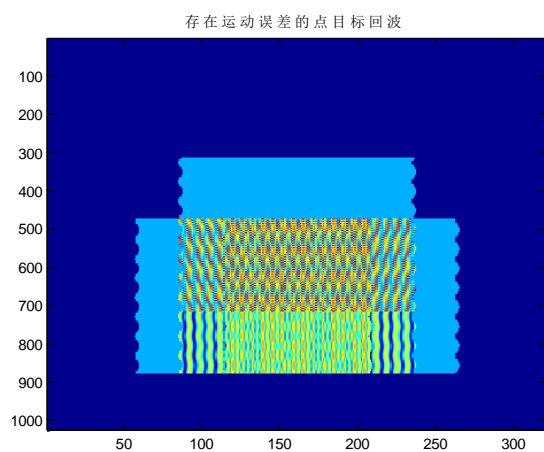


(e) 包络校正和一次运动补偿后成像结果

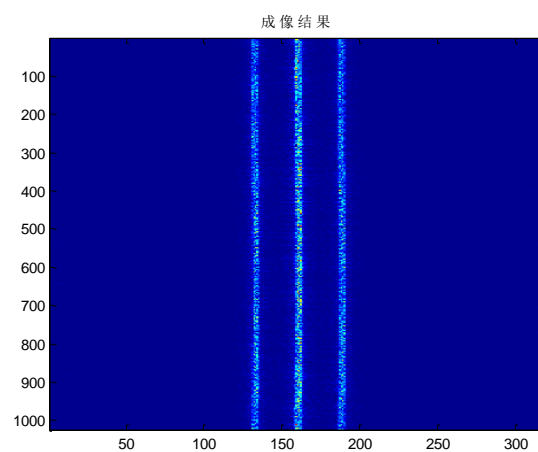


(f) 两步式运动补偿成像结果

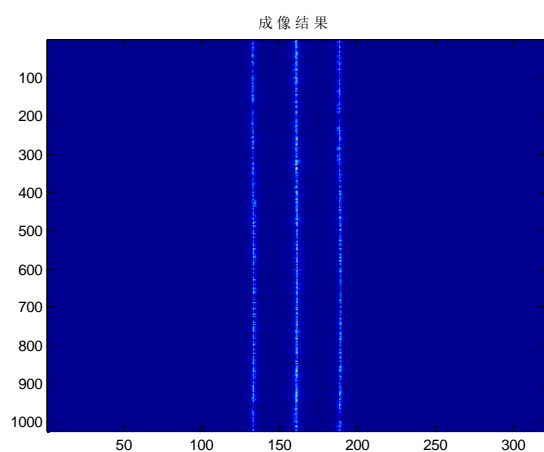
b) 4 个点目标仿真



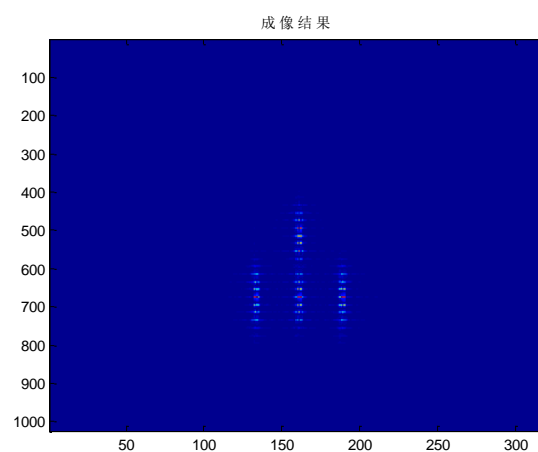
(a) 存在运动误差的点目标回波



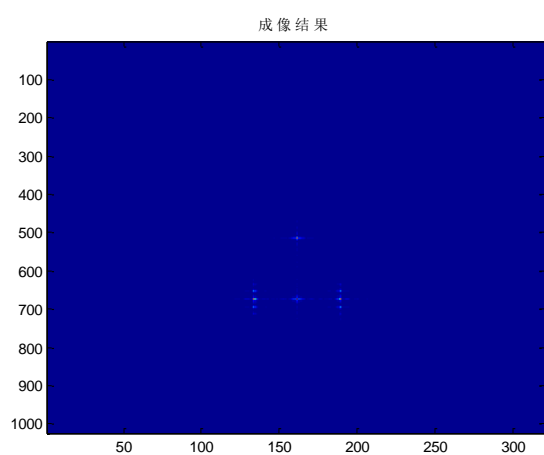
(b) 未作运动补偿的成像结果



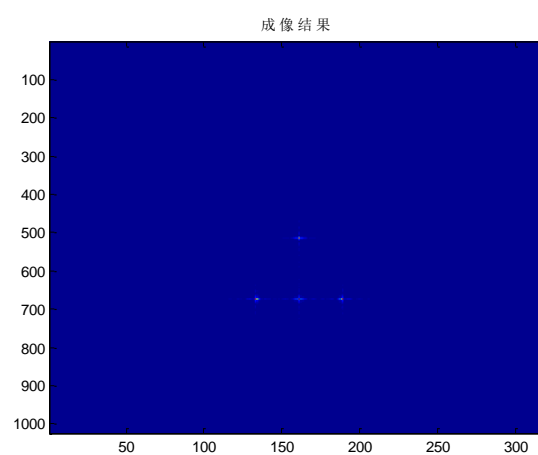
(c) 只作包络矫正的成像结果



(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后成像结果



(f) 两步式运动补偿成像结果

2. 讨论“附加相位校正”的顺序问题

在进行两步式运动补偿的前提下，保持前面的成像过程不变，如下：

原始数据——距离 FT——包络校正、一次运动补偿——距离 IFT——方位 FT——补余 RCMC
——距离 FT——距离压缩、SRC 和一致 RCMC——距离 IFT

此时，数据位于距离多普勒域，即为 S_{RD} ；

从这里开始，我们分为两种情况：

- 1) 直接通过方位 IFT 变换回到二维时域，进行二次运动补偿；然后通过方位 FT 变换到距离多普勒域，同时进行附加相位校正和方位压缩，再通过方位 IFT 完成成像。
过程如下：

——方位 IFT——二次运动补偿——方位 FT

——附加相位校正（CS 操作残留相位校正）合并方位压缩——方位 IFT——SAR 图像

我试图通过数学表达式来找到一些差别；

记二次运动补偿滤波器为： H_{c_2}

附加相位校正滤波器为： H_2

方位 MF 滤波器为： H_{az}

那么上面的过程（在方位 IFT 前，位于距离多普勒域），表达式可以简单表示为：

$$\begin{aligned} & FT_a \left\{ IFT_a \{ S_{RD} \} \cdot H_{c_2} \right\} \cdot H_2 \cdot H_{az} \\ &= \left(FT_a \left\{ IFT_a \{ S_{RD} \} \right\} \otimes FT_a \{ H_{c_2} \} \right) \cdot H_2 \cdot H_{az} \\ &= \left(S_{RD} \otimes FT_a \{ H_{c_2} \} \right) \cdot H_2 \cdot H_{az} \end{aligned}$$

- 2) 按照论文作者所述的过程进行后续操作，即在距离多普勒域先进行附加相位校正，然后通过方位 IFT 回到时域进行二次运动补偿，最后进行方位 MF 得到成像结果，过程如下：

——附加相位校正（CS 操作残留相位校正）——方位 IFT——二次运动补偿——方位 FT
——方位压缩——方位 IFT——SAR 图像

$$\begin{aligned}
& FT_a \left\{ IFT_a \left\{ S_{RD} \cdot H_2 \right\} \cdot H_{c_2} \right\} \cdot H_{az} \\
&= FT_a \left\{ \left(IFT_a \left\{ S_{RD} \right\} \otimes IFT_a \left\{ H_2 \right\} \right) \cdot H_{c_2} \right\} \cdot H_{az} \\
&= \left(FT_a \left\{ IFT_a \left\{ S_{RD} \right\} \otimes IFT_a \left\{ H_2 \right\} \right\} \otimes FT_a \left\{ H_{c_2} \right\} \right) \cdot H_{az} \\
&= \left(\left(FT_a \left\{ IFT_a \left\{ S_{RD} \right\} \right\} \cdot FT_a \left\{ IFT_a \left\{ H_2 \right\} \right\} \right) \otimes FT_a \left\{ H_{c_2} \right\} \right) \cdot H_{az} \\
&= \left((S_{RD} \cdot H_2) \otimes FT_a \left\{ H_{c_2} \right\} \right) \cdot H_{az}
\end{aligned}$$

因此，我们可以看出这两种结果的差别：

- 1) 直接通过方位 IFT 变换回到二维时域，进行二次运动补偿；然后通过方位 FT 变换到距离多普勒域，同时进行附加相位校正和方位压缩，再通过方位 IFT 完成成像。

这种情况下的数学表达式可记为：

$$(S_{RD} \otimes FT_a \{H_{c_2}\}) \cdot H_2 \cdot H_{az}$$

- 2) 按照论文作者所述的过程进行后续操作。

这种情况下的数学表达式可记为：

$$((S_{RD} \cdot H_2) \otimes FT_a \{H_{c_2}\}) \cdot H_{az}$$

两者的区别在于对 H_2 的处理： S_{RD} 先和 $FT_a \{H_{c_2}\}$ 卷积，再乘以 H_2 ；还是 S_{RD} 先和 H_2 相乘，再与 $FT_a \{H_{c_2}\}$ 卷积。

一般而言这两种结果是不一样的。

我们可以举个例子：比如考虑 S_{RD} 是一个原始数据， $FT_a \{H_{c_2}\}$ 是一个形式上的时域滤波器（因此 S_{RD} 通过 $FT_a \{H_{c_2}\}$ 即表现为时域卷积），而将 H_2 看成是一个相位项。

那么，对于第 1) 种情况：原始数据先通过了滤波器，然后将滤波器输出结果与一个相位项进行相乘；

与之对比，第 2) 种情况：先直接将原始数据与一个相位项相乘，然后将相乘的结果再通过滤波器；

显然这两种结果并不是相同的。

这里只是举了一个用来理解这两个数学表达式的例子。

真正情况， H_2 代表附加相位校正参考函数，而 H_{c_2} 代表二次运动补偿参考函数。

至此，我虽然分析得到了这两种情况下的结果应该是不同的，但是我还是并不知道为什么需要按照作者所述的方法去操作？如果采用另一种方法，带来的后果是什么？是不是用作者所述的方法就更好？好在哪里？

——这些都还是待解决待分析的。

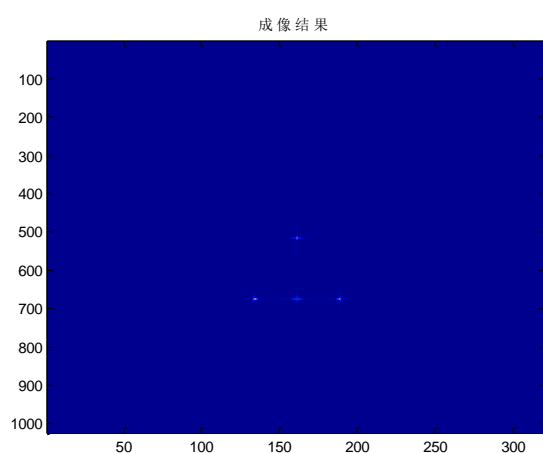
下面我简单将两种情况下的仿真结果列出，看看是不是有什么区别。

- 1) 直接通过方位 IFT 变换回到二维时域，进行二次运动补偿；然后通过方位 FT 变换到距离多普勒域，同时进行附加相位校正和方位压缩，再通过方位 IFT 完成成像。

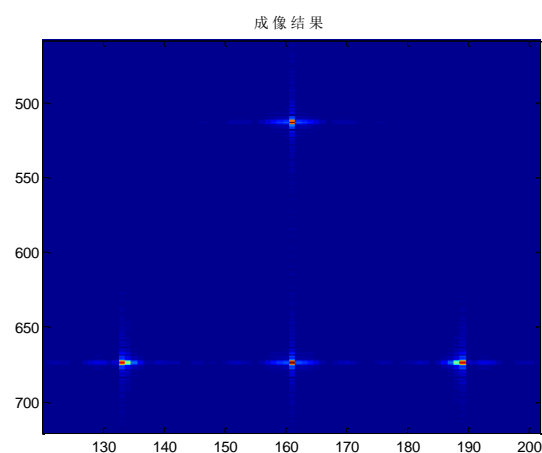
这种情况下的数学表达式可记为：

$$\left(S_{RD} \otimes FT_a \{ H_{c_2} \} \right) \cdot H_2 \cdot H_{az}$$

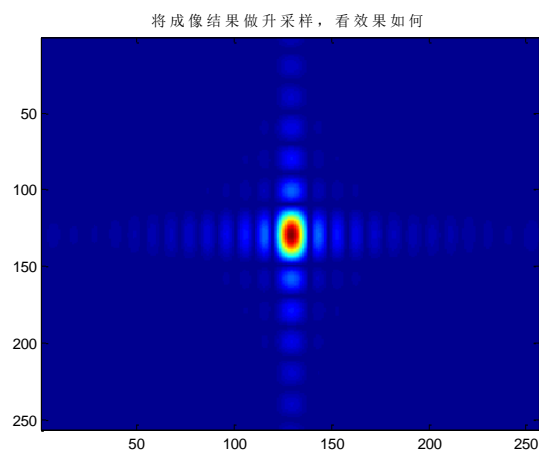
仿真结果是：



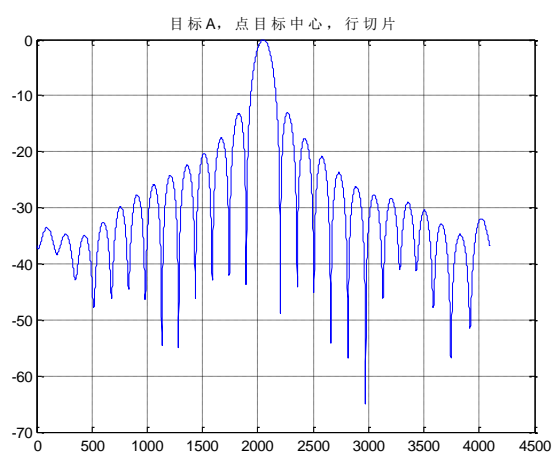
(1) 成像结果



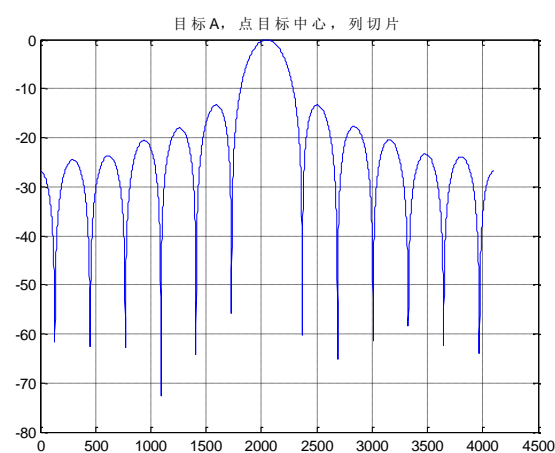
(2) 局部放大



(a) 升采样



(b) 距离向切片



(c) 方位向切片

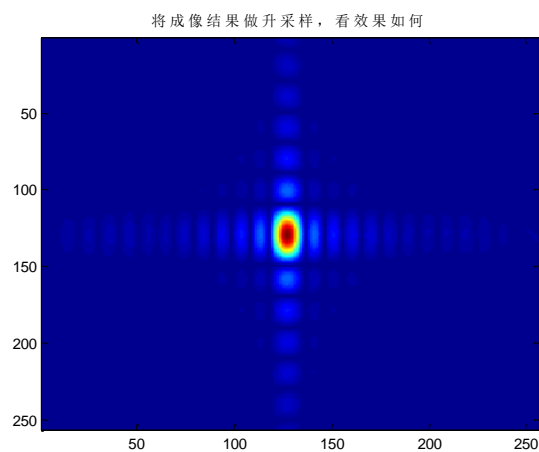
行切片，点目标中心距离向指标

| PSLR | ISLR | IRW |
|----------|----------|--------|
| -13.0678 | -10.0419 | 2.6673 |

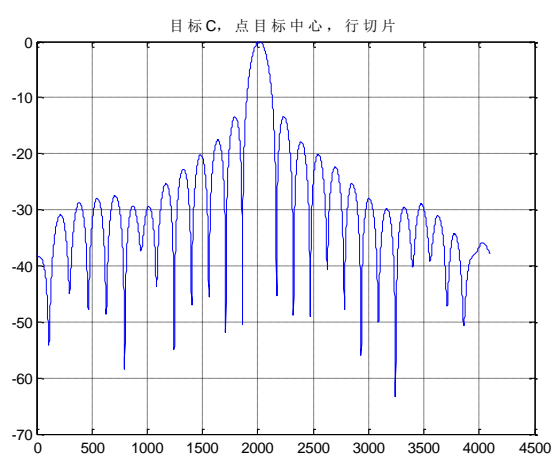
列切片，点目标中心方位向指标

| PSLR | ISLR | IRW |
|----------|----------|--------|
| -13.3245 | -10.5360 | 1.6689 |

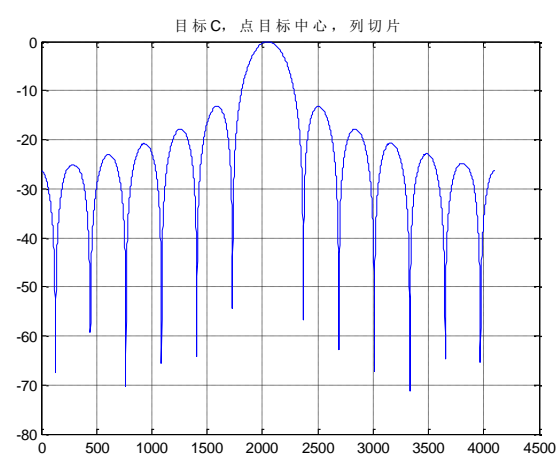
(3) 目标 A



(a) 升采样



(b) 距离向切片



(c) 方位向切片

行切片，点目标中心距离向指标

| PSLR | ISLR | IRW |
|----------|----------|--------|
| -13.3855 | -10.1099 | 2.6615 |

列切片，点目标中心方位向指标

| PSLR | ISLR | IRW |
|----------|----------|--------|
| -13.1896 | -10.4618 | 1.6609 |

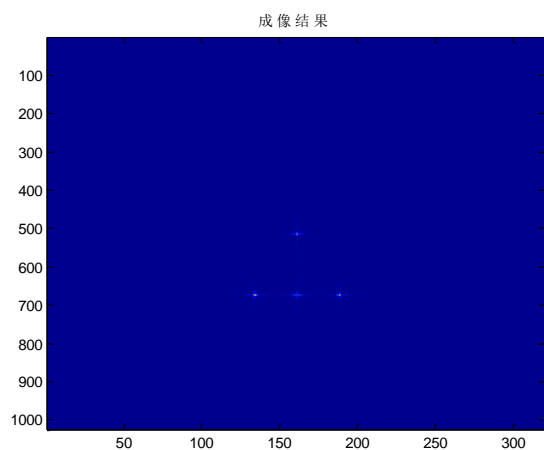
(4) 目标 C

2) 按照论文作者所述的过程进行后续操作。

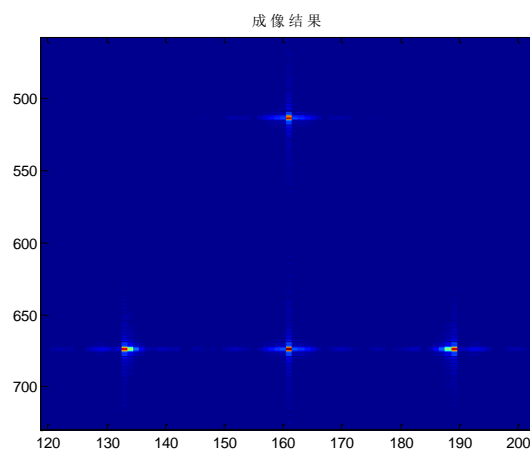
这种情况下的数学表达式可记为：

$$\left((S_{RD} \cdot H_2) \otimes FT_a \{ H_{c_2} \} \right) \cdot H_{az}$$

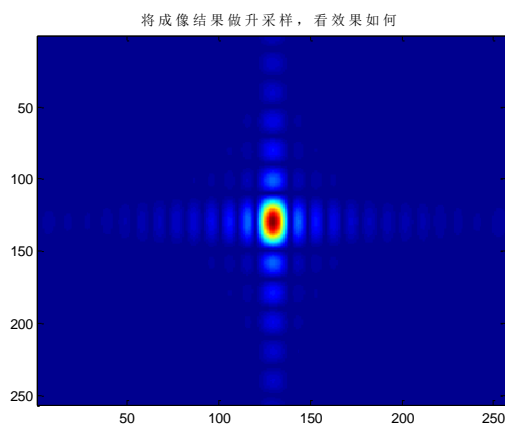
仿真结果是：



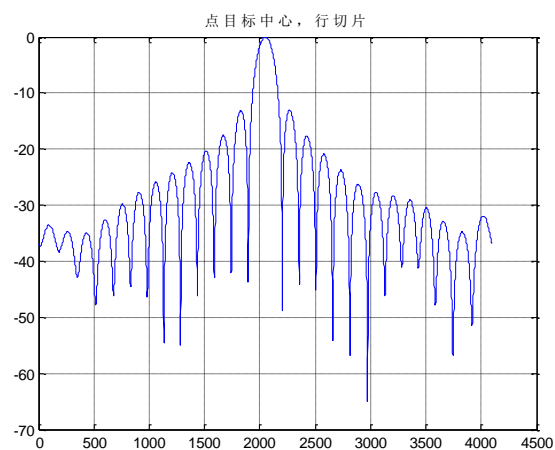
(1) 成像结果



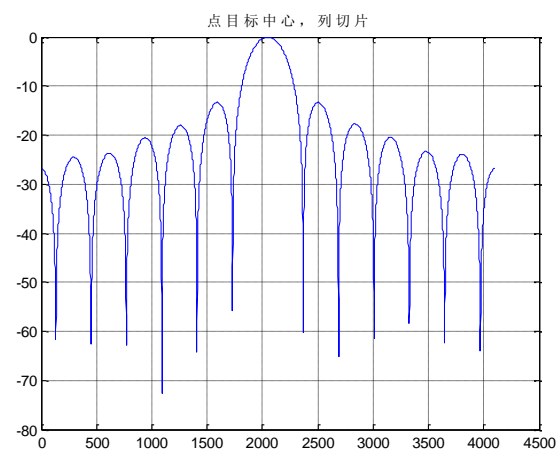
(2) 局部放大



(a) 升采样



(b) 距离向切片



(c) 方位向切片

行切片，点目标中心距离向指标

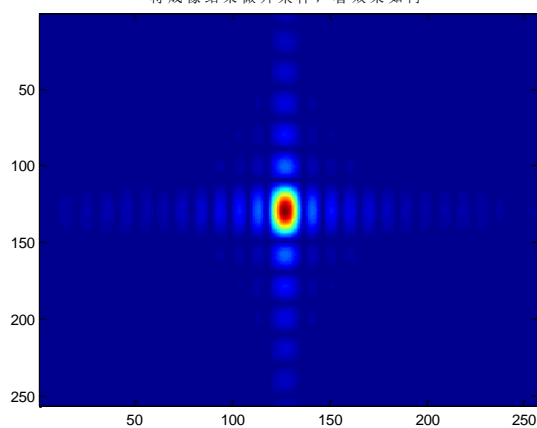
| PSLR | ISLR | IRW |
|----------|----------|--------|
| -13.0678 | -10.0419 | 2.6673 |

列切片，点目标中心方位向指标

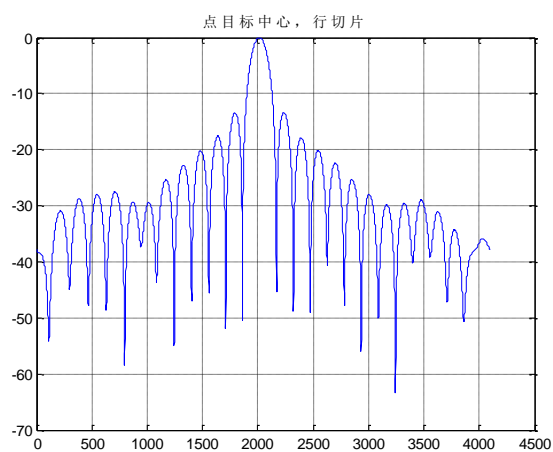
| PSLR | ISLR | IRW |
|----------|----------|--------|
| -13.3245 | -10.5360 | 1.6689 |

(3) 目标 A

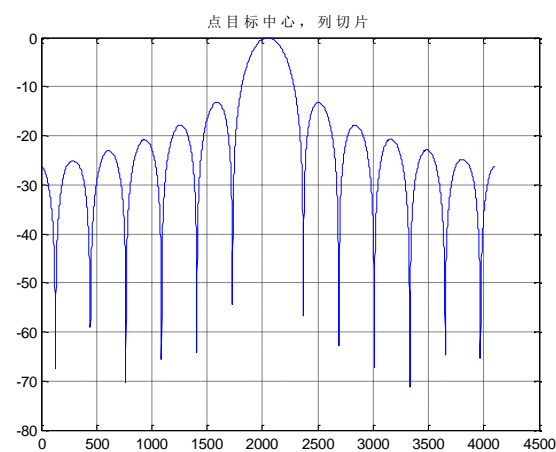
将成像结果做升采样，看效果如何



(a) 升采样



(b) 距离向切片



(c) 方位向切片

行切片，点目标中心距离向指标

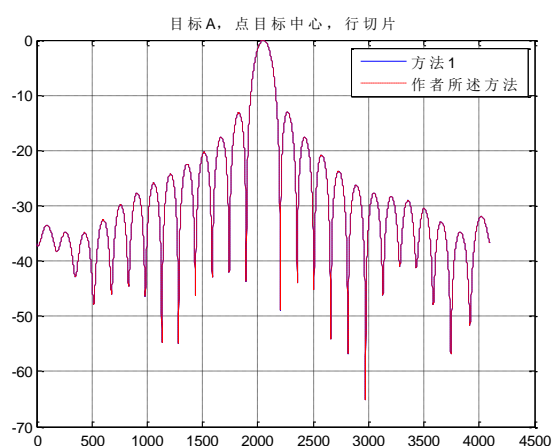
| PSLR | ISLR | IRW |
|----------|----------|--------|
| -13.3855 | -10.1099 | 2.6615 |

列切片，点目标中心方位向指标

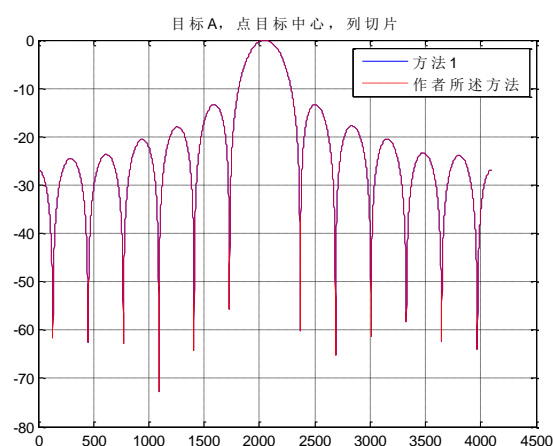
| PSLR | ISLR | IRW |
|----------|----------|--------|
| -13.1896 | -10.4618 | 1.6609 |

(4) 目标 C

3) 两种情况下，分别取目标 A 和目标 C，将它们各自的距离向切片和方位向切片进行对比，如下：

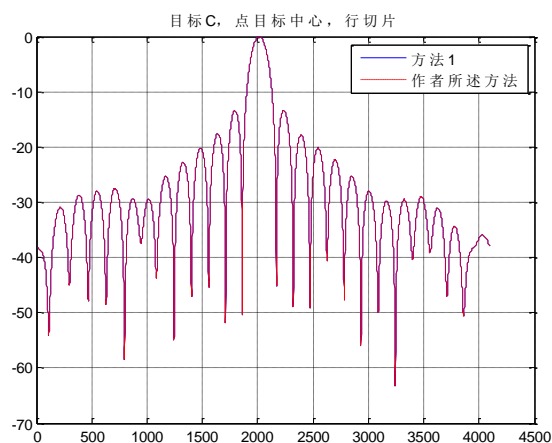


(a) 距离向切片

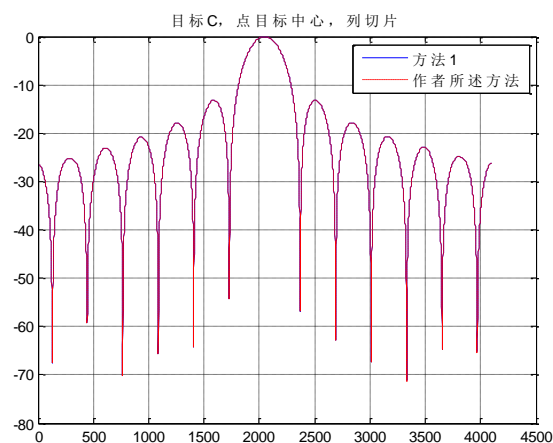


(b) 方位向切片

图1 目标 A，距离向切片和方位向切片，在两种情况下的对比



(a) 距离向切片



(b) 方位向切片

图2 目标 C，距离向切片和方位向切片，在两种情况下的对比

对比 1) 和 2) 中的指标计算结果，以及 3) 这里的切片对比结果，可以看到，在我的仿真条件下，这两者是完全相同的：指标计算结果完全一致，切片重合。

因此，在我的仿真情况下，我没有看到两者的区别。

但这个问题依然没有解决——还需要继续思考。

不过，在后续的仿真中，或者进行其他比较时，我还是直接采用作者的方法，保险起见。

至此，这一部分的讨论暂时告一段落。

WD

2014.11.19. 21:33 p.m.