

## 基于加速度斜距模型的大场景超高分辨率星载 SAR 成像方法

吴元\* 孙光才 杨军 邢孟道

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

**摘要:** 在大场景超高分辨率星载合成孔径雷达(SAR)中,等效速度在方位向上的空变性会导致方位散焦,此时传统的双曲线斜距模型已经不再适用,针对这个问题,该文提出一种新的加速度斜距模型,该模型可以把速度的方位空变特性考虑在内。在此模型的基础上,该文还给出了相应的信号处理和成像方法,首先通过方位时域重采样消除速度的方位空变性,然后在2维频域去除三次项和四次项误差,最后再采用距离徙动算法(RMA)进行成像。仿真实验的结果证明了新的加速度斜距模型和成像方法的有效性。

**关键词:** 星载合成孔径雷达;超高分辨率;大场景;斜距模型;距离徙动算法

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2015)05-1116-06

DOI: 10.11999/JEIT140928

## An Imaging Algorithm for Wide-field and Super High-resolution Spaceborne SAR Based on Acceleration Slant Range Model

Wu Yuan Sun Guang-cai Yang Jun Xing Meng-dao

(National Key Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** In the wide-field and super high-resolution spaceborne Synthetic Aperture Radar (SAR), the traditional hyperbolic slant range model is no longer available, which is due to the variance of equivalent velocity in azimuth direction is able to cause azimuth defocus. For this problem, this paper proposes a new acceleration slant range model, which considers the azimuth variance of equivalent velocity. Based on this model, the corresponding signal processing and imaging method is given. Firstly, the azimuth variance of velocity is eliminated by azimuth resampling in the time domain. Secondly, the third-order and fourth-order error is eliminated in the 2D frequency domain. Finally, Range Migration Algorithm (RMA) is used to get the final image. The simulation results validate the effectiveness of the new acceleration slant range model and imaging algorithm.

**Key words:** Spaceborne SAR; Super high-resolution; Wide-field; Slant range model; Range Migration Algorithm (RMA)

### 1 引言

星载合成孔径雷达(SAR)技术近年来得到了快速的发展<sup>[1-5]</sup>。大场景高分辨率成像<sup>[6-10]</sup>是其中一个重要的方面。由于星载 SAR 几何关系的复杂性,针对星载 SAR 的斜距历程提出了一些近似模型和成像算法<sup>[11-16]</sup>。在高分辨率的情况下,文献[12]提出的四阶模型能够很好的对星载 SAR 的几何关系进行描述,但是基于该模型推导出的频域表达式十分复杂,很难直接应用于传统的 SAR 成像方法中,尤其是在测绘宽度较大的情况下。传统的双曲线斜距模型在高分辨率的情况下近似误差较大,但是具有便于推导成像算法这一优势,通过对近似误差进行补偿,可以用距离徙动算法(RMA)<sup>[17]</sup>等方法进行成

像。

星载 SAR 与机载 SAR 的一个重要区别在于等效速度是沿距离向变化的,由于卫星轨道以及地球旋转分量的时变性,该速度还沿方位向缓慢改变<sup>[17]</sup>。在低分辨率或者小场景的情况下,只需要考虑速度的距离向空变性,但是在超高分辨率且方位测绘带较宽时,速度在方位向上的变化也需要进行考虑。传统的双曲线模型没有考虑速度的方位空变性,在方位聚焦的时候将会导致点目标方位产生散焦。文献[13]提出一种基于奇异值分解 Stolt 插值的高分辨率星载 SAR 成像方法,文献[14]提出一种基于修正 RMA 算法的大场景超高分辨星载 SAR 成像方法,这些方法都针对速度的距离空变性对 RMA 算法进行了改进,能够很好地处理等效速度距离空变的问题,但是无法处理方位测绘带较宽时的速度方位空变。

本文针对等效速度的方位空变性容易导致方位

2014-07-15 收到, 2014-12-23 改回

国家自然科学基金(61301292)资助课题

\*通信作者: 吴元 wuyuaner@126.com

散焦这一问题, 提出了一种基于方位加速度的斜距模型, 不再认为卫星以恒定的等效速度运动, 而认为卫星以一定的加速度加速运动, 从而造成了等效速度在方位向的变化。通过在方位时域进行重采样, 去除速度的方位空变, 然后用 RMA 算法进行成像处理。

本文的结构为: 第 2 节分析了大场景超高分辨率星载 SAR 中速度的方位空变性对成像的影响, 并提出了新的加速度斜距模型; 第 3 节论述了基于以上提出的加速度斜距模型的信号处理和成像方法; 第 4 节给出了算法流程; 第 5 节给出了仿真实验结果, 验证了算法的有效性; 第 6 节对全文进行了总结。

## 2 加速度斜距模型

在星载 SAR 中, 卫星绕着地球转动, 同时地球自西向东自转, 当卫星转动到不同的纬度时, 地面切向速度也不相同。假设雷达正侧视成像, 斜视角为零, 用传统的双曲线模型对卫星的斜距历程进行表示为

$$\hat{R}(t_m) = \sqrt{r^2 + (v_{r,t_c}(t_m - t_c))^2} \quad (1)$$

其中  $t_m$  为方位慢时间,  $r$  为最短距离,  $t_c$  为点目标的方位中心时刻, 不同的  $r$  和  $t_c$  代表不同的点目标  $(r, t_c)$ ,  $v_{r,t_c}$  为点目标  $(r, t_c)$  的等效速度。当方位分辨率达到 0.15 m 的级别时, 双曲线模型会产生较大的近似误差。参照 TerraSAR-X 聚束模式的系统参数进行仿真(仿真参数见第 4 节表 1), 距离分辨率和方位分辨率为 0.15 m, 距离测绘带和方位测绘带宽度为 10 km, 双曲线模型与实际斜距历程的近似误差如图 1 所示, 在波束的两边沿, 相位误差的大小约为  $2\pi$ , 这样的误差会引起方位的严重散焦。

文献[12]提出的四阶模型可以精确的描述这种状况下的斜距历程:

$$R(t_m) = r + c_1(t_m - t_c) + c_2(t_m - t_c)^2 + c_3(t_m - t_c)^3 + c_4(t_m - t_c)^4 \quad (2)$$

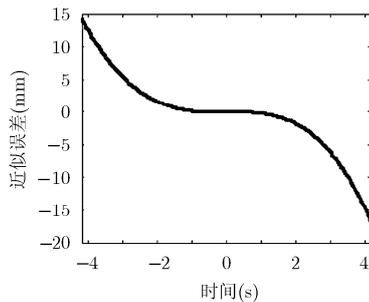


图 1 双曲线模型的近似误差

其中  $c_1$  为线性项的系数, 在正侧视的情况下可以视为零。把式(1)展开为泰勒级数, 忽略四次项以上的高次项:

$$\hat{R}(t_m) = r + \frac{v_{r,t_c}^2}{2r}(t_m - t_c)^2 - \frac{v_{r,t_c}^4}{8r}(t_m - t_c)^4 \quad (3)$$

假设  $c_2 = v_{r,t_c}^2/(2r)$ , 式(1)和式(2)的误差可以表示为

$$R(t_m) - \hat{R}(t_m) = c_3(t_m - t_c)^3 + \left(c_4 + \frac{v_{r,t_c}^4}{8r}\right)(t_m - t_c)^4 \quad (4)$$

所以, 实际的斜距历程可以表示为双曲线模型式(1)再加上误差项式(4):

$$R(t_m) = \sqrt{r^2 + (v_{r,t_c}(t_m - t_c))^2} + \beta(t_m - t_c)^3 + \gamma(t_m - t_c)^4 \quad (5)$$

其中  $\beta = c_3$ ,  $\gamma = (c_4 + v_{r,t_c}^4/(8r))$  分别为模型误差的三次项、四次项系数, 它们是  $r$  和  $t_c$  的函数, 但是在整个场景中变化很小, 统一用场景中心点的参数来表示。

等效速度  $v_{r,t_c}$  沿距离向的变化曲线在测绘带内接近于直线<sup>[4]</sup>, 实际上  $v_{r,t_c}$  沿慢时间  $t_m$  也是在缓变的, 同一个距离单元内方位向间隔较大的目标等效速度是不同的。假设式(5)中的三次项、四次项误差已经完全去除, 那么从成像的角度看, 在校正完距离徙动进行方位聚焦时, 由方位速度空变带来的方位相位误差为

$$\varphi(f_a) = -\frac{4\pi}{\lambda} r \left( \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f_a}{2v_{r,t_c}}\right)^2} - \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f_a}{2v_{r,t_{ref}}}\right)^2} \right) \quad (6)$$

其中,  $f_a$  为方位频率,  $t_{ref}$  为选定的参考时间,  $v_{r,t_{ref}}$  为参考目标  $(r, t_{ref})$  的等效速度。目标在方位向上离参考目标越远, 产生的方位相位误差越大, 方位带宽很大时影响尤为显著, 仿真得到最大二次相位误差(Quadratic Phase Error, QPE)如图 2 所示。

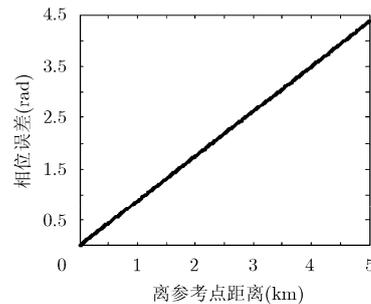


图 2 等效速度的方位空变性引起的相位误差

可见,当方位向上距离参考目标超过0.9 km时,产生的最大二次相位误差超过了 $\pi/4$ ,当方位向上距离参考目标超过1.8 km时,相位误差超过了 $\pi/2$ ,所以在方位测绘带宽度较大且分辨率很高时,等效速度的方位空变性将会严重影响方位聚焦。

对不同纬度不同下视角的卫星轨道进行分析,可以发现等效速度 $v_{r,t_c}$ 沿方位向的变化可以近似为直线,只是在不同纬度不同下视角的时候直线斜率稍有不同。如果把卫星等效为沿着直线作加速运动,并且加速度为常数,如图3所示,则可以得到如式(7)的斜距模型:

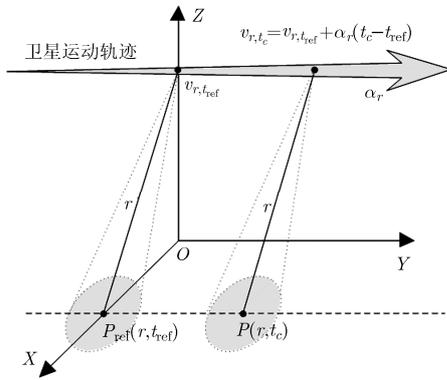


图3 加速度斜距模型示意图

$$R(t_m) = \left[ r^2 + \left( \left( v_{r,t_{\text{ref}}} (t_m - t_{\text{ref}}) + \frac{1}{2} \alpha_r (t_m - t_{\text{ref}})^2 \right) - \left( v_{r,t_{\text{ref}}} (t_c - t_{\text{ref}}) + \frac{1}{2} \alpha_r (t_c - t_{\text{ref}})^2 \right) \right)^2 \right]^{1/2} + \beta (t_m - t_c)^3 + \gamma (t_m - t_c)^4 \quad (7)$$

其中 $\alpha_r$ 为最近距离为 $r$ 时卫星的等效加速度, $\beta, \gamma$ 分别为根号项与实际斜距历程误差的三次项、四次项系数。对此斜距模型进行泰勒级数分解,由二次项系数可以求得目标 $(r, t_c)$ 的等效速度为 $v_{r,t_c} = v_{r,t_{\text{ref}}} + \alpha_r (t_c - t_{\text{ref}})$ ,与实际情况相符合。当加速度 $\alpha_r = 0$ 时,选择 $t_{\text{ref}} = t_c$ 就使得式(7)退化为双曲线斜距模型式(5)。可见此斜距模型把速度的方位空变性包含在内,相比传统的双曲线斜距模型更为完善,更具有普适性。

在方位时域对回波信号按照 $t'_m - t_{\text{ref}} = (t_m - t_{\text{ref}}) + \sigma_r (t_m - t_{\text{ref}})^2$ 进行重采样,其中 $\sigma_r = \frac{1}{2} \frac{\alpha_r}{v_{r,t_{\text{ref}}}}$ 为重采样系数,在新的方位慢时间域 $t'_m$ 中,斜距历程可以表示为

$$R(t'_m) = \sqrt{r^2 + (v_{r,t_{\text{ref}}} (t'_m - t'_c))^2} + \beta \left[ \frac{2(t'_m - t'_c)}{\sqrt{1 + 4\sigma_r (t'_m - t_{\text{ref}})} + \sqrt{1 + 4\sigma_r (t'_c - t_{\text{ref}})}} \right]^3 + \gamma \left[ \frac{2(t'_m - t'_c)}{\sqrt{1 + 4\sigma_r (t'_m - t_{\text{ref}})} + \sqrt{1 + 4\sigma_r (t'_c - t_{\text{ref}})}} \right]^4 \approx \sqrt{r^2 + (v_{r,t_{\text{ref}}} (t'_m - t'_c))^2} + \beta (t'_m - t'_c)^3 + \gamma (t'_m - t'_c)^4 \quad (8)$$

其中 $t'_c - t_{\text{ref}} = (t_c - t_{\text{ref}}) + \sigma_r (t_c - t_{\text{ref}})^2$ 。方位向上离参考目标不同距离处的点目标的等效速度变为一致,凝聚为参考时间点 $t_{\text{ref}}$ 时的等效速度,便于进行统一方位聚焦处理。对于式(8)可以用驻定相位点法求得频域的表达式,便于推导成像算法。

### 3 信号处理与成像方法

RMA算法具有成像精度高、可使用内定标信号中的Chirp信号进行距离压缩等优点,因此是一种精确的SAR成像算法。本节基于上面提出的加速度斜距模型,首先通过方位时间重采样去除速度的方位空变性,然后在2维频域去除三次项、四次项误差,最后采用修正的RMA方法进行成像。

#### 3.1 方位时间重采样

假设发射信号为线性调频信号,则回波信号去载频后可以表示为

$$S_{\text{ech}}(\hat{t}, t_m) = W_r \left( \hat{t} - \frac{2R(t_m)}{c} \right) \exp \left[ j\pi\gamma \left( \hat{t} - \frac{2R(t_m)}{c} \right)^2 \right] \cdot W_a(t_m - t_c) \exp \left[ -j \frac{4\pi}{\lambda} R(t_m) \right] \quad (9)$$

其中 $\hat{t}$ 为快时间, $t_m$ 为慢时间, $c$ 为光速, $\lambda$ 为雷达的中心波长, $\gamma$ 为距离调频率, $W_r(\cdot)$ 和 $W_a(\cdot)$ 分别表示雷达线性调频信号的窗函数和方位窗函数, $r$ 为目标的最短距离, $t_c$ 为目标方位中心时刻。 $R(t_m)$ 用第2节提出的加速度斜距模型式(7)来表示。

$$\text{将式(9)变换到距离频域并用 } H_1 = \exp \left[ j\pi \frac{f_r^2}{\gamma} \right]$$

进行距离压缩,可得到

$$S_{\text{ech}}(f_r, t_m) = W_r(f_r) W_a(t_m - t_c) \cdot \exp \left[ -j \frac{4\pi}{c} (f_c + f_r) R(t_m) \right] \quad (10)$$

加速度 $\alpha_r$ 在整个场景内变化很小,重采样系数 $\sigma_r = \frac{1}{2} \frac{\alpha_r}{v_{r,t_{\text{ref}}}}$ 在整个场景内变化也很小,可以将整个回波

统一按照场景中心的参数  $t'_m - t_{\text{ref}} = (t_m - t_{\text{ref}}) + \sigma_{r_s} (t_m - t_{\text{ref}})^2 = (t_m - t_{\text{ref}}) + \frac{1}{2} \frac{\alpha_{r_s}}{v_{r_s, t_{\text{ref}}}} (t_m - t_{\text{ref}})^2$  进行时间重采样, 其中  $r_s$  为场景中心的最短距离, 得到回波信号:

$$S_{\text{ech}}(f_r, t'_m) = W_r(f_r) W_a(t'_m - t'_c) \cdot \exp\left[-j \frac{4\pi}{c} (f_c + f_r) R(t'_m)\right] \quad (11)$$

其中  $R(t'_m)$  为式(8)。至此速度的方位空变性已经消除, 在距离向上的空变性还需要进行处理。以下为了叙述方便,  $t'_m$  和  $t'_c$  用  $t_m$  和  $t_c$  来表示,  $v_{r, t_{\text{ref}}}$  用  $v_r$  来表示。

### 3.2 去除三次项四次项误差

把式(11)变换到方位频域, 根据驻相点法得到:

$$S_{\text{ech}}(f_r, f_a) = A_0 W_r(f_r) W_a(f_a) \cdot \exp\left[-j 4\pi r \sqrt{\left(\frac{f_c + f_r}{c}\right)^2 - \left(\frac{f_a}{2v_r}\right)^2}\right] \cdot \exp(j\varphi_{3,r}) \exp(j\varphi_{4,r}) \exp(-j 2\pi f_a t_c) \quad (12a)$$

$$\varphi_{3,r} = \pi\beta \frac{r^3 (f_c + f_r) f_a^3}{2c v_r^6} \left[ \sqrt{\left(\frac{f_c + f_r}{c}\right)^2 - \left(\frac{f_a}{2v_r}\right)^2} \right]^{-3} \quad (12b)$$

$$\varphi_{4,r} = -\pi\gamma \frac{r^4 (f_c + f_r) f_a^4}{4c v_r^8} \left[ \sqrt{\left(\frac{f_c + f_r}{c}\right)^2 - \left(\frac{f_a}{2v_r}\right)^2} \right]^{-4} \quad (12c)$$

其中  $A_0$  是常数项, 对成像不构成影响。  $\varphi_{3,r}$  和  $\varphi_{4,r}$  都随  $r$  变化, 但是变化很小, 对三次项和四次项在 2 维频域统一用场景中心点的参数进行补偿, 补偿相位为

$$H_2 = \exp(-j\varphi_{3,r}) \exp(-j\varphi_{4,r}) | r = r_s \quad (13)$$

补偿后回波的表达式为

$$S_{\text{ech}}(f_r, f_a) = A_0 W_r(f_r) W_a(f_a) \cdot \exp\left[-j 4\pi r \sqrt{\left(\frac{f_c + f_r}{c}\right)^2 - \left(\frac{f_a}{2v_r}\right)^2}\right] \cdot \exp(-j 2\pi f_a t_c) \quad (14)$$

至此三次项四次项误差已经去除, 方位向上的速度空变也已经去除, 2 维频域表达式变为双曲线模型的表达式, 只剩下距离上的速度空变性, 在下一步进行处理。

### 3.3 RMA 算法成像

原始的 RMA 算法无法处理等效速度沿距离向的空变, 会使得处理后的信号在非参考距离处仍存在残余的方位调制以及距离徙动, 导致离参考距离越远聚焦质量下降越严重。文献[14]对 Stolt 插值核

进行了改进, 提出了一种修正 RMA 算法, 能够处理等效速度沿距离向的空变, 进行精确的成像, 在此选用此方法进行最后的距离徙动校正和方位聚焦处理, 得到最终的成像结果。

## 4 成像处理流程

基于加速度斜距模型的大场景超高分辨率星载 SAR 成像方法的流程如图 4 所示。算法由 4 部分组成: 参数估计; 方位时间重采样; 去除三次项四次项误差及改进的 RMA 算法成像。第 1 部分参数估计, 主要参数有场景中心点的等效速度  $v_{r_s}$ , 等效加速度  $\alpha_{r_s}$ , 误差系数  $\beta, \gamma$  等。第 2 部分方位时间重采样, 通过时间域的变换, 目的是为了消除速度的方位空变性。第 3 部分去除了卫星实际斜距历程与双曲线模型的三次项、四次项误差, 处理后的回波可以用双曲线模型来表示。第 4 部分针对速度的距离空变性, 采用修正的 RMA 算法, 进行两维的聚焦成像。

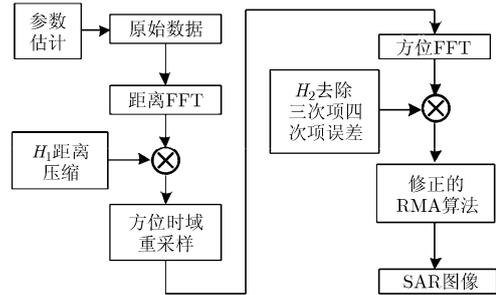


图 4 成像处理流程

## 5 实验结果

为了验证本文提出的加速度斜距模型和成像算法, 本节给出了仿真实验结果。仿真参数见表 1。9 个点目标均匀的分布在场景中, 如图 5 所示。

如果采用传统的双曲线斜距模型式(5), 忽略方位上等效速度的变化, 点目标 1, 5, 9 的成像结果如图 6 所示。可以看到, 方位向上处于中间的目标 5 得到了很好的聚焦, 但是两边的点 1 和点 9 由于

表 1 仿真参数

离心率	0.0011	载频	9.65 GHz
轨道倾角	97.44°	方位分辨率	0.15 m
轨道半长轴	6885 km	距离带宽	1 GHz
下视角	34.8°	距离分辨率	0.15 m
斜视角	0°	距离向场景宽度	10 km
场景中心点经/纬度	-105°/45°	方位向场景宽度	10 km

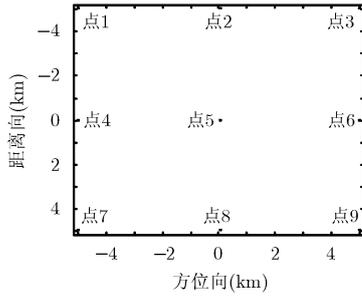


图 5 仿真场景点目标分布

等效速度偏离中心点，散焦很严重，尤其是方位散焦很严重。采用本文的加速度斜距模型式(7)和相应的成像方法，成像结果如图 7 所示，可以看到 3 个

点目标都得到了很好的聚焦，说明了本文提出的模型和成像是有效的。9 个点目标的图像质量参数如表 2 所示。

### 6 结束语

本文针对大场景超高分辨率星载 SAR，提出一种新的加速度斜距模型，该模型把等效速度的方位空变性考虑在内，比传统的双曲线斜距模型更为完善，并且给出了基于加速度斜距模型的信号处理和成像方法，仿真实验证明可以有效地去除等效速度的距离和方位空变性，满足大场景超高分辨率星载 SAR 成像的需要。

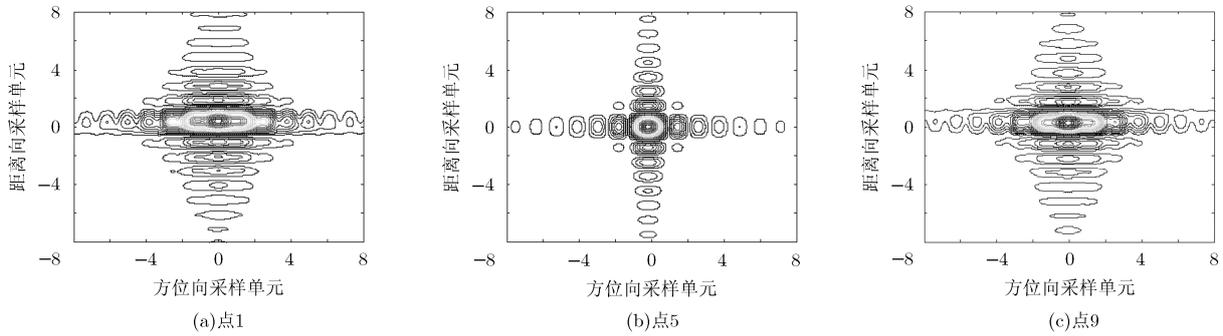


图 6 采用传统双曲线斜距模型的成像结果

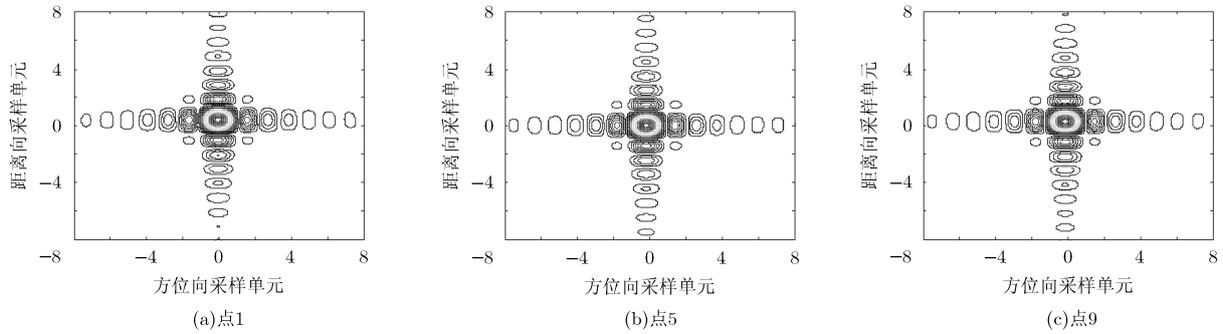


图 7 采用加速度斜距模型的成像结果

表 2 点目标的质量参数

目标	方位向			距离向		
	$\rho_a$ (m)	PSLR(dB)	ISLR(dB)	$\rho_r$ (m)	PSLR(dB)	ISLR(dB)
点 1	0.150	-13.2	-10.5	0.134	-13.2	-10.0
点 2	0.150	-13.1	-10.4	0.134	-13.2	-10.0
点 3	0.150	-13.2	-10.4	0.134	-13.2	-9.95
点 4	0.150	-13.2	-10.4	0.134	-13.3	-9.90
点 5	0.150	-13.1	-10.4	0.135	-13.3	-9.90
点 6	0.150	-13.2	-10.5	0.135	-13.3	-9.90
点 7	0.151	-13.3	-10.5	0.134	-13.3	-9.95
点 8	0.151	-13.2	-10.5	0.134	-13.3	-9.95
点 9	0.152	-13.2	-10.5	0.135	-13.3	-9.95

需要说明的是, 本文侧重于分析轨道斜距模型对成像的影响, 对于大场景超高分辨率星载 SAR 中存在的距离模糊或方位模糊没有进行考虑, 在实际情况中, 可以采用阵列多发多收等技术进行解模糊。

### 参考文献

- [1] Breit H, Fritz T, Balss U, *et al.*. TerraSAR-X SAR Processing and Products[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(2): 727-740.
  - [2] Prats P, Scheiber R, Mittermayer J, *et al.*. Processing of sliding spotlight and TOPS SAR data using baseband azimuth scaling[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(2): 770-780.
  - [3] Kim J H, Younis M, Prats-Iraola P, *et al.*. First spaceborne demonstration of digital beamforming for azimuth ambiguity suppression[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(1): 579-590.
  - [4] Rodriguez-Cassola M, Prats-Iraola P, De Zan F, *et al.*. Doppler-related focusing aspects in the TOPS imaging mode[C]. Proceedings of the Geoscience and Remote Sensing Symposium, Melbourne, Australia, 2013: 2043-2046.
  - [5] 李春升, 杨威, 王鹏波, 等. 星载 SAR 成像处理算法综述[J]. 雷达学报, 2013, 2(1): 111-122.  
Li Chun-sheng, Yang Wei, Wang Peng-bo, *et al.*. A review of spaceborne SAR algorithm for image formation[J]. *Journal of Radars*, 2013, 2(1): 111-122.
  - [6] Krieger G, Gebert N, and Moreira A. Multidimensional waveform encoding: a new digital beamforming technique for synthetic aperture radar remote sensing[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(1): 31-46.
  - [7] Sun Guang-cai, Xing Meng-dao, Xia Xiang-gen, *et al.*. Multichannel full-aperture azimuth processing for beam steering SAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(9): 4761-4778.
  - [8] Sikaneta I, Gierull C H, and Cerutti-Maori D. Optimum signal processing for multichannel SAR: with application to high-resolution wide-swath imaging[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(10): 6095-6109.
  - [9] 盛磊, 刘小平. 高分辨率宽观测带星载 SAR 技术研究[J]. 雷达科学与技术, 2013, 11(2): 130-140.  
Sheng Lei and Liu Xiao-ping. Research on high-resolution wide-swath spaceborne SAR technology[J]. *Radar Science and Technology*, 2013, 11(2): 130-140.
  - [10] 刘艳阳, 李真芳, 索志勇, 等. 一种星载多通道高分辨率宽观测带 SAR 系统通道相位偏差估计新方法[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(8): 1862-1868.  
Liu Yan-yang, Li Zhen-fang, Suo Zhi-yong, *et al.*. A novel channel phase bias estimation method for spaceborne multi-channel high-resolution and wide-swath SAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(8): 1862-1868.
  - [11] Eldhuset K. Ultra high resolution spaceborne SAR processing[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2004, 40(1): 370-378.
  - [12] Eldhuset K. A new fourth-order processing algorithm for spaceborne SAR[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1998, 34(3): 824-835.
  - [13] DAria D and Monti Guarnieri A. High-resolution spaceborne SAR focusing by SVD-stolt[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2007, 4(4): 639-643.
  - [14] 刘燕, 孙光才, 邢孟道. 大场景高分辨率星载聚束 SAR 修正  $\omega - k$  算法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(9): 2108-2113.  
Liu Yan, Sun Guang-cai, and Xing Meng-dao. A modified  $\omega - k$  algorithm for wide-field and high-resolution spaceborne spotlight SAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(9): 2108-2113.
  - [15] He Feng, Chen Qi, Dong Zhen, *et al.*. Processing of ultrahigh-resolution spaceborne sliding spotlight SAR data on curved orbit[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2013, 49(2): 819-839.
  - [16] Prats-Iraola P, Scheiber R, Rodriguez-Cassola M, *et al.*. On the processing of very high resolution spaceborne SAR data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(10): 1-14.
  - [17] Cumming I G and Wong F H. 洪文, 胡东辉译. 合成孔径雷达成像——算法与实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007: 83-84.
- 吴元: 男, 1987年生, 博士生, 研究方向为合成孔径雷达成像。  
孙光才: 男, 1984年生, 讲师, 博士, 研究方向为新体制雷达成像、运动目标检测成像。  
杨军: 男, 1984年生, 博士生, 研究方向为合成孔径雷达成像、电子对抗。  
邢孟道: 男, 1975年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达探测、雷达成像、运动目标检测成像。