

# 高速平台下动目标高分辨成像方法研究\*

丁柏圆<sup>1</sup>, 闫海鹏<sup>2</sup>, 黄光泉<sup>1</sup>, 魏子杰<sup>1</sup>, 刘承禹<sup>1</sup>

(1 96901 部队 北京 100094

2 北京遥测技术研究所 北京 100076)

**摘要:** 高速平台对地面强散射移动目标或者海面舰船目标进行合成孔径雷达成像(SAR)时,存在两方面问题:一是传统 SAR 匀速直线模型已不适应高速平台自身高动态运动特征;二是目标的非合作运动一方面会引起图像散焦,另一方面动目标在地距图中的位置会产生较大偏移。针对这两个问题,首先在匀加速度模型频域相位滤波算法下,推导出了精确的斜地投影关系以及近似的反投影关系,同时给出了基于惯性组合导航(INS)的平台运动补偿方法,最后结合自聚焦技术,完成对舰船目标的聚焦并得到以目标为图像中心的地距图。

**关键词:** 合成孔径雷达; 匀加速度模型; 动目标; 斜地投影

中图分类号: TN95 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2021)06-0098-09

DOI: 10.12347/j.ycyk.20200902001

引用格式: 丁柏圆, 闫海鹏, 黄光泉, 等. 高速平台下动目标高分辨成像方法研究[J]. 遥测遥控, 2021, 42(6): 98-106.

## Research on moving target SAR imaging algorithm within high-speed platform

DING Baiyuan<sup>1</sup>, YAN Haipeng<sup>2</sup>, HUANG Guangquan<sup>1</sup>, WEI Zijie<sup>1</sup>, LIU Chengyu<sup>1</sup>

(1. 96901 Unit, Beijing 100094, China;

2. Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

**Abstract:** Two problems exist in which synthetic aperture radar imaging (SAR) for ground -moving targets or ships with strong scattering within high speed platform: one is that the incompatibility between the traditional uniform velocity model in SAR and the high-dynamic characteristic of high speed platform, the other is that defocusing image results in the unpredictability of motion of moving target. Firstly, frequency filtering algorithm used in uniform acceleration model is introduced, an accurate mapping function and an approximately inverse mapping function used in projection is proposed. Then a method of motion compensation based on inertial integrated navigation system(INS) is proposed, which is applied to the acceleration model. At last, PGA autofocus algorithm is adopted to focus the blurring image in Doppler domain. As a result, ground distance map with the target as the center of the image is obtained.

**Key words:** SAR; Uniform acceleration model; Moving target; Projection

**DOI:** 10.12347/j.ycyk.20200902001

**Citation:** DING Baiyuan, YAN Haipeng, HUANG Guangquan, et al. Research on moving target SAR imaging algorithm within high-speed platform[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2021, 42(6): 98-106.

## 引 言

随着合成孔径雷达 SAR (Synthetic Aperture Radar) 技术的发展,其越来越多地被应用于高速机动平台,用于获取特定区域的 SAR 图像完成景象匹配,修正惯性导航系统 INS (Inertial Navigation System) 长时间的累计误差。高速机动平台搭载的合成孔径雷达除了完成景象匹配的功能外,还迫切需要其能够实现地面强散射/海面大型舰船等移动目标进行实时成像并获取其运动信息。考虑高速机动平台高动态运动特征以及移动目标的非合作运动的特点,需要研究一种具有运算量适中、保证实时性的、应用于高

\*基金项目: 国家自然科学基金项目(62001501)

收稿日期: 2020-09-02 收修改稿日期: 2021-07-17

速机动平台下对移动目标的高分辨成像技术。

针对高速机动平台高动态的特点,文献[1]在传统匀速直线 SAR 成像模型的基础上建立了俯冲匀速直线模型,提出了频域相位滤波(FPFA)的子孔径成像算法,解决了俯冲段大斜视角下的方位空变的问题,但载体具有加速度时,算法聚焦效果会严重恶化。文献[2]建立了更贴近高速机动平台短时运动特征的恒加速运动模型,提出了基于局部直角坐标和方位子区域分块处理的 SAR 成像算法,获取了短时曲线轨迹下的 SAR 图像,但由于其分块操作,不仅会提升运算量更会带来子图拼接误差。文献[3]通过两级频域滤波技术,实现对距离包络方位耦合的分离和对调频率方位空变的校正,实现了高动态下大斜视宽幅 SAR 成像,但未给出精确的斜平面到地距平面的几何校正关系。针对高速机动平台搭载的单基雷达对动目标成像,一般采用 SAR/ISAR 混合成像技术,文献[4]利用分数阶傅里叶变换(FRFT)获取舰船的平动运动分量,进而对在加速度模型下对耦合舰船速度的两维空变进行补偿,获取舰船目标成像结果,其局限性在于目标需要位于波束中心,否则无法准确估计出舰船的平动运动分量。

本文针对高速机动平台对动目标成像,建立恒加速曲线运动模型,在文献[3]的算法基础上进一步推导二次弯曲校正引起的残余距离走动 RRW (Residual Range Walk),此分量在斜地投影时,可以被精确校正,避免投影近似引起的几何失真;接着提出基于惯导信息的恒加速模型下的运动补偿算法;然后通过方位向非相参积累检测目标所在距离门,再对这部分距离门数据进行自聚焦获取聚焦的动目标距离多普勒像(RD 像);最后通过斜地映射关系给出动目标的地平面投影图像,同时给出与传统景象匹配所需相一致的斜距多普勒信息。

### 1 瞬时斜距模型

高速运动平台进行景象匹配或运动目标跟踪时会预先加载基准图及目标信息,这些信息的坐标朝向已经预设,雷达输出图像及目标的坐标信息需要与之保持一致。为了推导简便,文献[2,3]分别在匀速俯冲模型及恒加速俯冲模型下假设中心时刻侧向速度为零,这里采用更为通用的坐标模型,可以省去惯导数据预处理以及斜地几何校正过程中引入的坐标转换。成像几何模型如图 1 所示,其中  $\overline{OX}$ 、 $\overline{OY}$ 、 $\overline{OZ}$  轴分别代表平台的航向、天向与侧向,点  $M$  为成像中心时刻平台位置,点  $C$  为成像中心时刻波束地面照射点,  $\vec{V}(v_x, v_y, v_z)$  与  $\vec{A}(a_x, a_y, a_z)$  分别为成像中心时刻的速度矢量与加速度矢量;点  $P$  为波束内任一点,  $\overline{PS} \perp \overline{OC}$ ,  $\overline{PS}$  与  $\overline{OC}$  相交于点  $S$ , 其中  $|\overline{PS}| = x_n$ ; 成像中心时刻的波束中心斜距为  $R_c$ , 点  $P$  的中心时刻斜距为  $R_0$ ,  $|\overline{MS}| = R_s$ ,  $\phi$  为地面斜视角。

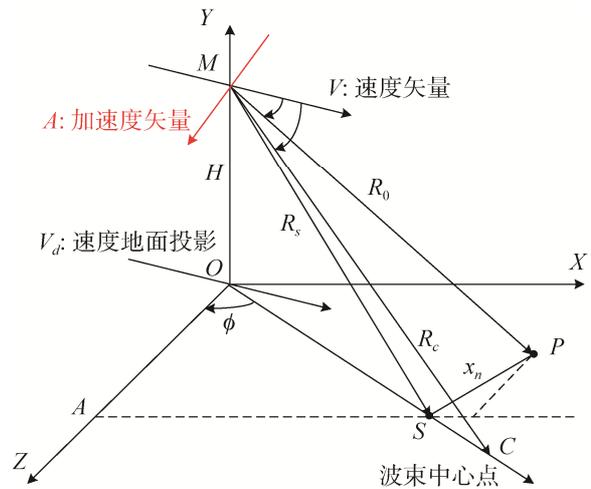


图 1 瞬时斜距模型

Fig. 1 Instantaneous oblique model

在图 1 所示的匀加速几何模型中,任意时刻  $t_m$  时,平台的瞬时位置可以表示为  $(\overline{OM} + \vec{V}t_m + 0.5\vec{A}t_m^2)$ , 点  $P$  的位置可以记为  $(\sqrt{R_s^2 - H^2} \sin \phi + x_n \cos \phi, 0, \sqrt{R_s^2 - H^2} \cos \phi - x_n \sin \phi)$ , 则点  $P$  的瞬时斜距可以写为:

$$R(t_m) = \sqrt{a_0 + a_1 t_m + a_2 t_m^2 + a_3 t_m^3 + a_4 t_m^4} \tag{1}$$

其中,  $a_k (k = 0, 1, 2, 3, 4)$  可由因式分解得到。在短时子孔径应用中,一般对  $R(t_m)$  进行四阶泰勒展开即可得到满意的近似精度,展开后的瞬时斜距可以写为:

$$R(t_m) \approx b_0 + b_1 t_m + b_2 t_m^2 + b_3 t_m^3 + b_4 t_m^4 \tag{2}$$

其中, 各阶系数  $b_k$  是方位位置  $x_n$  的函数, 为了便于进行变量分离, 将  $b_k$  关于  $x_n$  进行泰勒展开,  $b_k = \sum_{p=0}^{P-1} b_{kp} x_n^p$ , 由于  $x_n$  远小于  $R_c$ , 将  $p$  保留至 1 阶即可。 $b_0$  为点  $P$  的中心斜距  $R_0$ ;  $2b_1$  为点  $P$  的中心多普勒频率,  $2b_{10}$  为点  $P$  在波束投影线  $\overline{OC}$  上投影 (点  $S$ ) 的中心多普勒频率;  $4b_2/\lambda$  为点  $P$  的中心多普勒调频率,  $4b_{20}/\lambda$  为点  $S$  的中心多普勒调频率, 其中  $b_{20}$  表达式中含有加速度项, 为方便后续处理将  $b_{20}$  写成  $b_{20}=b_{201}+b_{202}$ ,  $b_{201}$  为仅有速度分量引起的多普勒调频率分量,  $b_{202}$  为仅有加速度分量引起的多普勒调频率分量;  $b_3$  和  $b_4$  为高阶相位项, 这里不详细展开分解。

## 2 高速机动平台动目标成像算法

### 2.1 距离向处理

雷达发射信号采用宽带线性调频信号  $s_0(t_r) = \text{rect}(t_r/T_p) e^{j(2\pi f_c t_r + \pi \gamma t_r^2)}$ , 其中  $\text{rect}(\cdot)$  表示矩形窗函数,  $f_c$  为发射信号中心频率,  $T_p$  为发射信号脉宽,  $\gamma$  为发射信号调频率。脉压后的回波信号 FFT 后可以表示为:

$$s(f_r, t_m) = w_r\left(\frac{f_r}{\gamma}\right) w_a(t_m) e^{-j\frac{4\pi}{c}(f_r + f_c)R(t_m)} \quad (3)$$

其中,  $w_r(\cdot)$  和  $w_a(\cdot)$  分别为距离频域和方位时域的窗函数。由于加速度项的引入会导致方位频谱展宽或缩小<sup>[3]</sup>, 因此在补偿线性距离走动项的同时需要将系数  $b_2$  中的加速度因子项一并补偿。距离走动补偿因子可以写为:

$$H_{\text{walk}}(f_r, t_m) = e^{j\frac{4\pi}{c}(f_c + f_r)(b_{10C}t_m + b_{202C}t_m^2)} \quad (4)$$

其中,  $b_{10C}$  与  $b_{202C}$  中的下角标  $C$  代表波束中心处相应的参数,  $b_{202C}$  为  $b_{20C}$  中的加速度因子项。通过级数反演获取走动校正后的信号二维频域形式, 其相位可表示为:

$$\Phi_2(f_r, f_a) = -\frac{4\pi}{c}(f_c + f_r) \left\{ b_0 + [(b_1 - b_{10C}) + \frac{cf_a}{2(f_c + f_r)}]t_m + (b_2 - b_{202C})t_m^2 + b_3t_m^3 + b_4t_m^4 \right\} \quad (5)$$

$t_m$  通过级数反演法求得:

$$t_m(f_r, f_a) = \frac{1}{2(b_2 - b_{202C})} f_\kappa - \frac{3b_3}{8(b_2 - b_{202C})^3} f_\kappa^2 + \frac{18b_3^2 - 8(b_2 - b_{202C})b_4}{32(b_2 - b_{202C})^5} f_\kappa^3 \quad (6)$$

其中,  $f_\kappa = -\frac{cf_a}{2(f_c + f_a)} - (b_1 - b_{10C})$ 。将式 (6) 代入式 (5), 将  $\Phi_2(f_r, f_a)$  展成  $f_r$  的级数:

$$\Phi_2(f_r, f_a) \approx \varphi_0(f_a) + \varphi_1(f_a)f_r + \varphi_2(f_a)f_r^2 \quad (7)$$

其中,  $\varphi_0(f_a)$  是包含目标方位位置的调制项;  $\varphi_1(f_a)$  和  $\varphi_2(f_a)$  是关于残余的距离徙动项和二次距离压缩项, 需要补偿, 补偿函数根据波束中心处的参数构建:

$$H_{\text{RCM\_SRC}}(f_r, f_a) = e^{-j[\varphi_1(f_a; R_c, x_n=0)f_r + \varphi_2(f_a; R_c, x_n=0)f_r^2]} \quad (8)$$

经 RCM 和 SRC 的校正后的相位可以表示为:

$$\Phi_3(f_r, f_a) = -\frac{4\pi}{c}(b_0 + \Delta R)f_r + \varphi_0(f_a) \quad (9)$$

其中,  $\Delta R$  为  $\Phi_2(f_r; f_a)$  中  $f_r$  一次项补偿后的残余因子, 具体可以写为:

$$\Delta R = -\frac{1}{4(b_2 - b_{202C})}(b_1 - b_{10C})^2 + \frac{b_3}{8(b_2 - b_{202C})^3}(b_1 - b_{10C})^3 - \frac{(9b_3^2 - 4(b_2 - b_{202C})b_4)}{64(b_2 - b_{202C})^5}(b_1 - b_{10C})^4 \quad (10)$$

式 (9) 和式 (10) 说明经过走动校正以及弯曲校正后, 目标点的距离向位置发生部分偏移, 这部分偏移会在后续斜地几何校正中给予修正。

### 2.2 方位向处理

由式 (9) 中二维频域相位  $\Phi_3(f_r, f_a)$  做二维逆傅里叶变换可以得到距离向处理后的信号:

$$s_3(t_r, t_m) = \sin c[B_r(t_r - \frac{2}{c}(b_0 + \Delta R))]w_a(t_m)e^{-j\frac{4\pi}{\lambda}[b_0 + (b_1 - b_{10c})t_m + (b_2 - b_{202c})t_m^2 + b_3t_m^3 + b_4t_m^4]} \quad (11)$$

此时, 距离方位耦合已经得到分离, 仅需对方向向各阶系数随目标横向位置的空变进行修正。

由于不同距离门的多普勒中心不同, 方位谱呈倾斜谱, 通过对距离门  $R_{sn}$  的多普勒中心进行修正将其“中心化”<sup>[2]</sup>, 多普勒校正因子为:

$$H_{\text{Doppler}}(t_m, R_{sn}) = e^{j\frac{4\pi}{\lambda}\{[b_{10}(R_{sn}) - b_{10c}]t_m + [b_{202}(R_{sn}) - b_{202c}]t_m^2\}} \quad (12)$$

利用 SsFF<sup>[3]</sup>频域高阶相位补偿法进行系数解空变, 方位频域引入扰动相位:

$$H_{\text{dis}}(f_a) = e^{j\pi(s_3f_a^3 + s_4f_a^4)} \quad (13)$$

其中系数  $s_3$ 、 $s_4$  待定, 在 IFFT 返回方位时域后相位可以表示为:

$$\Phi_5(t_m) = \pi d_1 t_m + \pi d_2 t_m^2 + \pi d_3 t_m^3 + \pi d_4 t_m^4 + \pi s_3 (d_2 t_m + \frac{d_1}{2})^3 + \pi s_4 (d_2 t_m + \frac{d_1}{2})^4 \quad (14)$$

其中  $d_1 = -\frac{4}{\lambda}(b_1 - b_{10})$ ,  $d_2 = -\frac{4}{\lambda}(b_2 - b_{202c})$ ,  $d_3 = -\frac{4}{\lambda}b_3$ ,  $d_4 = -\frac{4}{\lambda}b_4$ 。  $d_k$  可以展成  $x_n$  的多项式  $d_k = \sum_{p=0}^{P-1} d_{kp} x_n^p$ , 通过设置扰动系数  $s_3$  和  $s_4$  可以将  $\Phi_5(t_m)$  中关于  $x_n t_m^2$  和  $x_n t_m^3$  的方位空变项消除, 实现方位调频率去空变, 联立方程组可以求解获取扰动系数  $s_3$  和  $s_4$ :

$$\begin{cases} s_3 = -\frac{\lambda^2 b_{21}(R_{sn})}{24 b_{11}(R_{sn}) b_{201}^2(R_{sn})} \\ s_4 = \lambda^3 \frac{b_{11}(R_{sn}) b_{31}(R_{sn}) - 2[b_{21}(R_{sn})]^2}{128 b_{201}^3(R_{sn}) b_{11}^2(R_{sn})} \end{cases} \quad (15)$$

扰动因子补偿后的相位可以表示为:

$$\Phi_6(t_m) = \pi d_1 t_m + \pi d_{20} t_m^2 + \pi d_{30} t_m^3 + \pi(d_{40} + s_4 d_{20}^4) t_m^4 + \pi \varphi_{\text{cont}} \quad (16)$$

其中, 第一项反应目标方位位置; 第二项为方位压缩项, 通过 Deramp 方式压缩; 其余项为与方位位置  $x_n$  无关的高阶项, 可一并补偿。方位聚焦后的信号可以表示为:

$$s_0(t_r, f_a) = \sin c[B_r(t_r - \frac{2}{c}(R_{sn} + \Delta R))]W_a[f_a - \frac{2}{\lambda}(b_1 - b_{10})] \quad (17)$$

### 2.3 平台运动补偿

在匀速直线模型下的 SAR 成像算法中, 基于 INS 的运动补偿把载体非匀速平动引起的距离偏差当作误差项进行补偿<sup>[6]</sup>, 这一距离误差往往由 INS 提供的加速度通过两次积分获得, 可以表示为:

$$\Delta R_{\text{err}}(t_m) = \iint_{-T/2}^{T/2} a(t_m) dt_m \quad (18)$$

其中,  $a(t_m)$  为平台瞬时加速度沿目标视线的投影。

加速度模型虽然更贴近高速载体实际运动轨迹, 合成孔径时间内依然存在距离误差项需要进行补偿。由于 INS 只提供加速度信息, 所以距离误差通过加速度的变化量来获得, 可以表示为:

$$\Delta R_{\text{err}}(t_m) = \iint_{-T/2}^{T/2} [a(t_m) - a(0)] dt_m \quad (19)$$

其中,  $a(0)$  为平台中心时刻加速度沿目标视线的投影。

从式 (19) 中的投影关系可以看出, 距离视线方向的运动误差是距离方位两维空变的, 由式 (3) 可知该空变对模型的影响包含两部分: 相位中一部分引起距离向包络抖动, 另一部分引起方位向散焦。故而对视线方向的运动误差补偿可以分为两步: 首先, 在距离频率域以波束中心点为参考进行统一包络补偿, 然后, 在方位向处理时逐距离单元进行运动误差的相位补偿。两步补偿因子分别如下所示:

$$H_{\text{err1}}(f_r, t_m) = e^{-j\frac{4\pi}{c}f_r \Delta R_{\text{err}}(t_m; R_c)} \quad (20)$$

$$H_{\text{err}2}(t_m, R_{sn}) = e^{-j\frac{4\pi}{c}f_c\Delta R_{\text{err}}(t_m, R_{sn})} \quad (21)$$

### 2.4 动目标提取及自聚焦

运动目标相对于固定目标而言, 由于自身运动会产生附加多普勒。假设雷达的速度矢量为  $\bar{v}$ , 中心时刻平台到目标的位置矢量为  $\bar{R}$ , 运动目标的速度矢量为  $\bar{\Delta v}$ , 则目标中心时刻的多普勒为:

$$f_{\text{dc}} = \frac{2(\bar{v} - \bar{\Delta v}) \cdot \bar{R}}{|\bar{R}|}, \text{ 目标引起的附加多普勒为: } \Delta f_{\text{dc}} = \frac{-2\bar{\Delta v} \cdot \bar{R}}{|\bar{R}|}.$$

可以看出附加多普勒有上下界, 当  $\bar{\Delta v} \perp \bar{R}$ ,  $|\Delta f_{\text{dc}}| = 0$ ; 当  $\bar{\Delta v} \parallel \bar{R}$ ,  $|\Delta f_{\text{dc}}| = |\Delta f_{\text{dc}}|_{\text{max}}$ 。针对地面动目标, 可以忽略动目标的天向速度, 则当目标的运动方向与雷达波束地面投影垂直时,  $|\Delta f_{\text{dc}}| = 0$ , 当目标的运动方向与雷达波束地面投影平行时,  $|\Delta f_{\text{dc}}| = |\Delta f_{\text{dc}}|_{\text{max}}$ 。

同理, 当经过距离徙动校正后, 动目标的徙动量可以表示为:  $\Delta R_m \approx \frac{t_m \cdot \bar{\Delta v} \cdot \bar{R}}{|\bar{R}|}$ 。动目标残余的徙动量具有同附加多普勒类似的上下界。徙动量可分为两部分, 一部分为固定偏移, 另一部分为在固定偏移基础上的残余徙动。

图 2 给出了表 1 雷达参数下, 运动目标不同速度和不同运动方向下引起的附加多普勒及徙动量变化趋势。

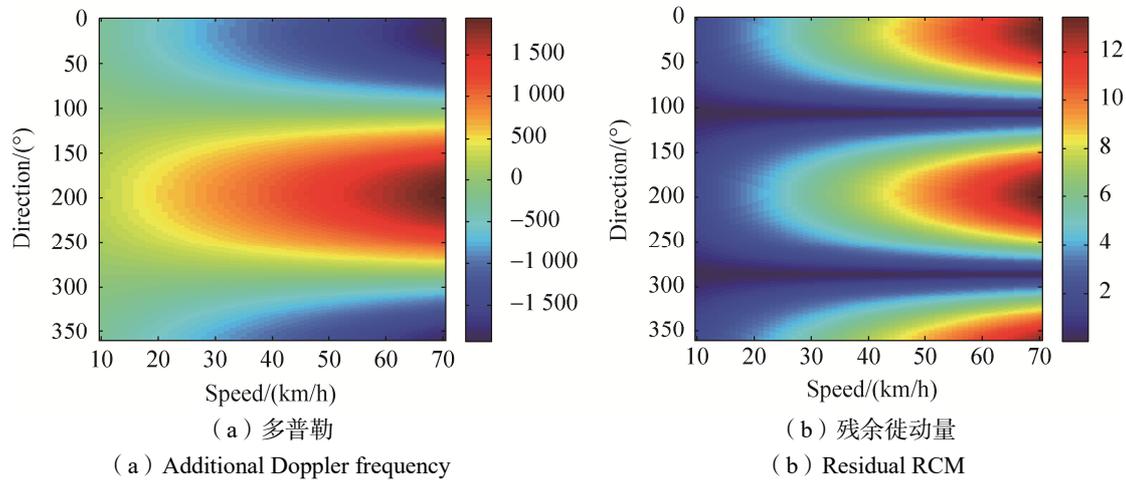


图 2 动目标引起的附加多普勒和残余徙动量 (仿真参数见表 1)  
Fig. 2 Additional Doppler frequency and residual RCM induced by moving targets

表 1 雷达参数及动目标参数

Table 1 Radar parameters and moving target parameters

名称	值	名称	值	名称	值
雷达参数					
高度(m)	21 471	斜距(m)	58 985	速度(m/s)	[2 109, -101, 102]
前视角(°)	68	下视角(°)	14.4	加速度(m/s <sup>2</sup> )	[-7, 5.5, -1]
带宽(MHz)	80	脉宽(μs)	10	波长(mm)	18
波束宽度(°)	6	积累时间(s)	0.9		
动目标参数					
位置(距波束中心)/m	[-100, -100]	RCS(dBm <sup>2</sup> )	33	目标个数	3
速度(km/h)	10~70	运动方向(与 x 轴夹角(°))	0~360	目标间距(m)	45

高速平台由于其孔径时间短, 一般在百毫秒量级, 动目标运动的距离仅跨越少量距离门, 这种特点一方面有利于在已有成像算法的基础上, 利用包络对齐技术将残余徙动分量进行距离域对齐, 再通过

PGA 自聚焦<sup>[7]</sup>技术将方位向散焦的目标像进行再聚焦；另一方面可以得到成像中心时刻动目标的近似斜距。通过多帧图像提供的动目标斜距多普勒信息，能够建立一个快速鲁棒的动目标识别跟踪系统。

2.5 斜地几何校正<sup>[8,9]</sup>

结合图 1 的斜距模型，由式 (17)、式 (10) 可知，地面任一点  $P(x,z)$  在 RD 图中的斜距-多普勒对  $(R_p, f_p)$  可以通过下式获得：

$$\begin{cases} R_p = b_0 + \Delta R \\ f_p = \frac{2}{\lambda}(b_1 - b_{10}) \\ x_n = x \cos \varphi - z \sin \varphi \\ R_s = \sqrt{R_0^2 - x_n^2} \end{cases} \quad (22)$$

斜地投影的过程可以看成是地面网格点逐一计算其在 RD 图中的位置，再通过插值完成一一映射。

一般针对场景成像时，地面网格的中心即为波束中心点；但是针对动目标成像时，其在 RD 图中的位置会发生偏移，偏移量取决于目标的运动速度，此时再取波束中心为网格中心获取的地距图有可能不包含目标的图像信息，故而针对动目标斜地投影时采取的策略是以 RD 图中检测到的动目标位置为网格中心，以保证目标始终位于地距图的中心，以便于后续基于目标的识别与特征提取。

为此需要求得 RD 图中某一点坐标  $(R_p, f_p)$  至地面点  $(x, z)$  的映射关系，属于式 (22) 的逆变换。由于  $(x, z) \leftrightarrow (R_p, f_p)$  之间的变换是非线性的，正变换易求解，逆变换需要求解高阶方程，解析表达式难以得到，这里给出一种近似求解关系，以保证目标始终位于地距图的中心附近。

对式 (22) 中的目标在 RD 图中的斜距  $R_p$  近似可得：

$$R_p \approx R_s + \alpha \frac{x_n^2}{R_s} \approx R_s', \quad (0 \leq \alpha \leq 1) \quad (23)$$

而目标在 RD 图中的斜距  $f_p$  近似可得：

$$f_p \approx \frac{2}{\lambda} b_{11} x_n, \quad b_{11} = -\frac{(v_x \cos \varphi - v_z \sin \varphi)}{R_s} \quad (24)$$

由式 (22)~式 (24) 及图 1 的几何构型可得，目标在 RD 图中的斜距可以近似求得中心时刻瞬时斜距在波束视线的投影  $R_s$ ，目标在 RD 图中的多普勒可以求得方位位置项  $x_n$ ，由几何关系可以得到目标在地面的坐标估计：

$$\begin{bmatrix} x' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \varphi & \cos \varphi \\ \cos \varphi & -\sin \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{R_s^2 - H^2} \\ x_n \end{bmatrix} \quad (25)$$

最后，高速平台运动目标成像算法及斜地校正流程如下图所示：

3 仿真实验

为了验证本文所提算法的有效性，这里通过仿真数据来说明。仿

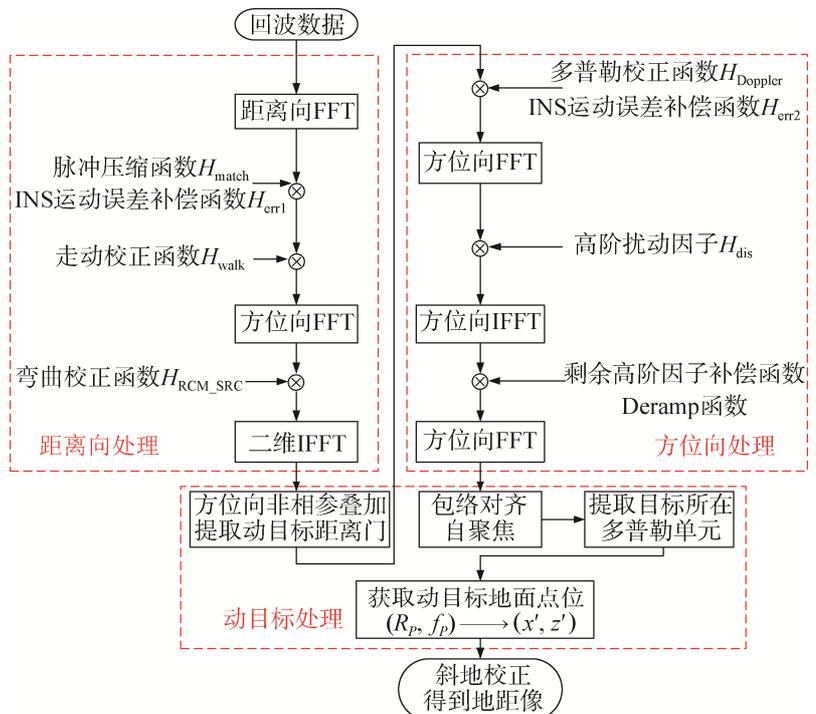


图 3 高速平台运动目标成像算法流程图  
Fig. 3 Imaging algorithm flow chart of moving target within high speed platform

真参数如表 1 所示, 均为高速平台典型的运动参数, 除了点目标仿真以外, 场景仿真中用实测数据中戈壁的 SAR 图像作为背景, 以 33 dBm<sup>2</sup>的强点模拟某些试验下的移动目标。

这里以目标速度 70 km/h、运动方向沿波束投影方向为例, 经过距离向处理后的距离多普勒图如图 4 (a) 所示, 可见动目标的斜距和多普勒位置相对于具有同样中心时刻位置的固定目标都产生了偏移。图 4 (b)~图 4 (c) 分别为图 4 (a) 中固定目标与动目标经方位向处理后的 RD 域图像, 图 4 (d)~图 4 (e) 分别为动目标自聚焦前后投影到地距的 SAR 图像, 投影的地面网格尺寸为 5 m×5 m, 图 4 (f) 为点目标聚焦后的方位剖面图, 经计算方位向分辨率为 3.84 m, 经本文的成像算法能够实现动目标的良好聚焦并投影至图像中心区域。

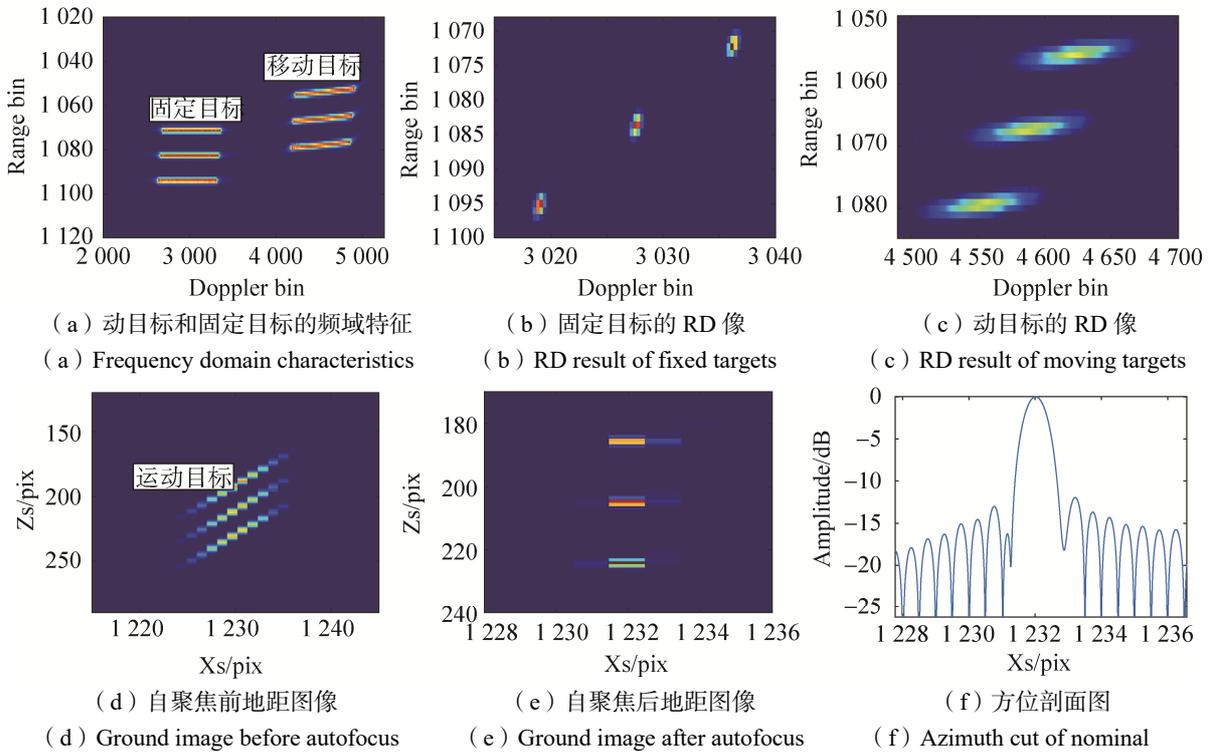


图 4 移动目标点目标仿真

Fig. 4 Simulation results of Moving targets

利用文献[4]中的方法得到仿真结果如图 5 (a) 所示, 该方法要求目标位于波束中心, 当目标不在波束中心时, 利用 FRFT 估计得到目标平动运动分量包含了平台速度分量, 在方位聚焦处理时带来参数失配, 引起散焦。

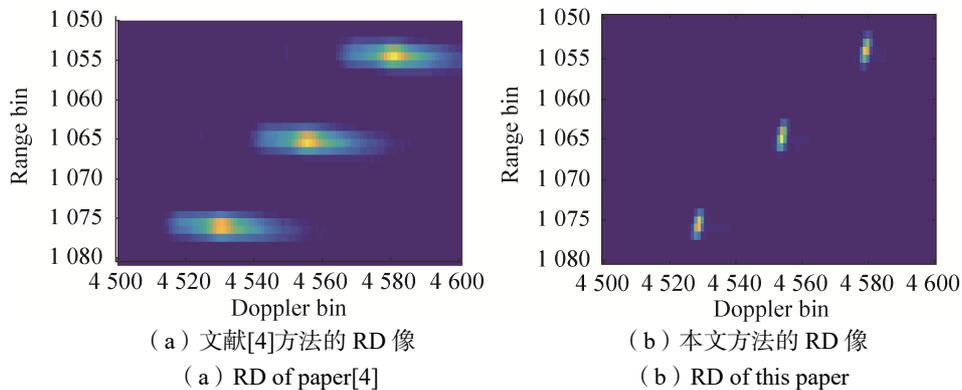


图 5 本文方法与文献[4]方法成像效果对比

Fig. 5 The contrast of this paper method and the method used in paper [4]

下面针对地面场景中的固定目标(包括参照目标以及舰船模拟目标)和移动目标(3个拖车,每个拖车上放置一个33 dBm<sup>2</sup>的角反射器)给出仿真结果,参数同上。

根据运动条件的差异,动目标可能位于场景多普勒区域之内,也可能位于场景多普勒区域之外。成像结果如图6所示,该参数条件下动目标在多普勒域与场景分离,更方便于动目标提取以完成自聚焦;对于动目标位于场景多普勒区域之内的情况,可以先在一维距离像进行恒虚警检测的方式来提取目标区域,进而完成后续处理,这不是本文讨论的重点,不再赘述。

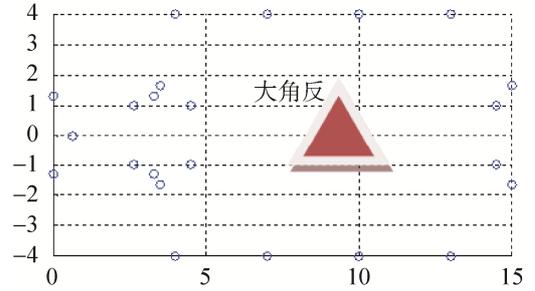


图 6 单个拖车的俯视图  
Fig. 6 Top view of single trailer car

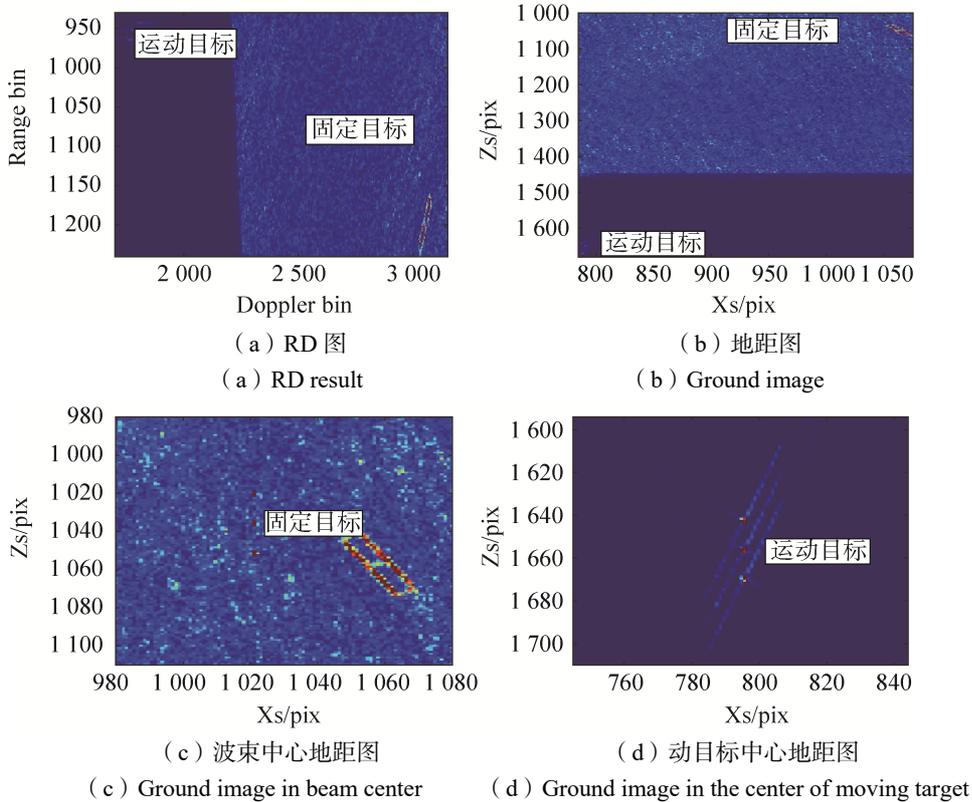


图 7 场景中的动目标仿真结果  
Fig. 7 Simulation results of moving targets

#### 4 结束语

本文针对高速平台对动目标高分辨成像问题,提出一种适用于实际平台运动条件下改进的频域相位滤波成像算法。首先讨论了加速度模型下频域相位滤波算法的处理流程,给出了精确的斜地几何校正映射关系;针对运动补偿问题,提出了适用于加速度模型下的基于INS数据的运动补偿方法;最后针对动目标斜地校正需要目标中心化的问题,给出了斜地几何校正映射关系的近似解析表示。点目标及场景仿真验证了文中方法的正确性以及有效性。

#### 参考文献

[1] 李震宇, 梁毅, 邢孟道, 等. 弹载合成孔径雷达大斜视子孔径频域相位滤波成像算法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(4): 953-960.  
LI Zhenyu, LIANG Yi, XING Mengdao, et al. A frequency phase filtering imaging algorithm for highly squint missile-borne

- synthetic aperture radar with subaperture[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(4): 953-960.
- [2] 别博文, 孙路, 邢孟道, 等. 基于局部直角坐标和子区域处理的弹载 SAR 频域成像算法[J]. 电子与信息学报, 2018 40(8): 1779-1786.  
BIE Bowen, SUN Lu, XING Mengdao, et al. A frequency-domain algorithm based on local Cartesian coordinate and subregion processing for missile-borne SAR imaging[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2018 40(8): 1779-1786.
- [3] 党彦锋, 梁毅, 别博文, 等. 俯冲段大斜视 SAR 子孔径成像二维空变校正方法[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(11): 2621-2629.  
DANG Yanfeng, LIANG Yi, BIE Bowen, et al. Two-dimension space-variance correction approach for diving highly squinted SAR imaging with sub-aperture[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2018, 40(11): 2621-2629.
- [4] 曹晔, 闫海鹏, 张剑琦, 等. 高动态条件下舰船目标 SAR 成像算法研究[J]. 遥测遥控, 2019, 40(4): 40-48.  
CAO Ye, YAN Haipeng, ZHANG Jianqi, et al. Research on ship target SAR imaging algorithm under high dynamic condition[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2019, 40(4): 40-48.
- [5] SUN Guangcai, XING Mengdao, WANG Yong, et al. A 2-D space-variant chirp scaling algorithm based on the RCM equalization and subband synthesis to process geosynchronous SAR data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(8): 4868-4880.
- [6] 郑晓双. 机载合成孔径雷达运动补偿技术研究[D]. 北京: 中国科学院电子学研究所, 2007.  
ZHENG Xiaoshuang. The study of motion compensation for airborne synthetic aperture radar[D]. Beijing: Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2007.
- [7] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 90-100.
- [8] 李震宇, 梁毅, 邢孟道, 等. 一种俯冲段子孔径 SAR 大斜视成像及几何校正方法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(8): 1814-1820.  
LI Zhenyu, LIANG Yi, XING Mengdao, et al. New subaperture imaging algorithm and geometric correction method for high squint diving SAR based on equivalent squint model [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(8): 1814-1820.
- [9] 李学仕, 梁毅, 李蓓蕾, 等. 基于 SPECAN 处理的斜视 SAR 实时成像算法及其实现[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(12): 2618-2622.  
LI Xueshi, LIANG Yi, LI Beilei, et al. Real-time imaging processing algorithm for squint SAR based on SPECAN processing and its implement in FPGA[J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(12): 2618-2622.

#### [作者简介]

- 丁柏圆 1990 年生, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为电子对抗、SAR 目标识别。  
闫海鹏 1988 年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为 SAR 成像算法。  
黄光泉 1988 年生, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为电子对抗。  
魏子杰 1988 年生, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为电子对抗。  
刘承禹 1979 年生, 硕士, 研究员, 主要研究方向为电子对抗。

(本文编辑: 潘三英)