

# 机载多通道SAR运动目标方位向速度和法向速度联合估计算法

姜文<sup>\*①②③</sup> 牛杰<sup>①②③</sup> 吴一戎<sup>①②</sup> 梁兴东<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院空天信息创新研究院 北京 100094)

<sup>②</sup>(微波成像技术国家重点实验室 北京 100190)

<sup>③</sup>(中国科学院大学 北京 100049)

**摘要:** 对运动目标进行SAR成像时, 参数估计是必不可少的。现有算法主要针对运动目标的径向速度和方位向速度进行估计, 而对3维运动目标的法向速度无法估计。该文利用L型基线的机载多通道SAR系统, 提出一种方位向速度和法向速度的联合估计算法。该算法在距离-多普勒域提取运动目标信号, 并利用多幅SAR图像之间的相位差进行方位向速度和法向速度的联合估计。该算法不依赖图像配准, 不需要解多普勒模糊, 因此具有较高的估计精度和鲁棒性, 有较强的实际意义和应用价值。

**关键词:** 机载多通道SAR; 运动目标检测; 方位向速度; 法向速度; 速度估计

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)06-1542-07

DOI: [10.11999/JEIT190672](https://doi.org/10.11999/JEIT190672)

## Joint Estimation Algorithm for Azimuth Velocity and Normal Velocity of Moving Targets in Airborne Multi-channel SAR

JIANG Wen<sup>①②③</sup> NIU Jie<sup>①②③</sup> WU Yirong<sup>①②</sup> LIANG Xingdong<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(*Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China*)

<sup>②</sup>(*National Key Laboratory of Microwave Imaging Technology, Beijing 100190, China*)

<sup>③</sup>(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** Parameter estimation is essential for SAR imaging of moving targets. The existing algorithms mainly estimate the radial velocity and azimuth velocity of the moving target, but the normal velocity of the three-dimensional moving target can not be estimated. In this paper, a joint estimation algorithm of azimuth velocity and normal velocity is proposed by using an airborne multi-channel SAR system with L-shaped baseline. The algorithm extracts the moving target signal in Range-Doppler domain, and estimates the azimuth and normal velocity jointly using the phase differences between multiple SAR images. The algorithm does not rely on image registration, does not need to solve Doppler ambiguity. Therefore, the algorithm has high estimation accuracy and robustness, and has strong practical significance and application value.

**Key words:** Airborne multi-channel SAR; Moving target detection; Azimuth velocity; Normal velocity; Velocity estimation

### 1 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是一种主动式微波遥感设备, 具有全天时、全天候的大范围观测能力<sup>[1]</sup>。SAR成像处理一般针对地面静止目标或场景, 在实际应用中, 往往运动目标更具有价值和意义。对运动目标进行SAR成像<sup>[2]</sup>时, 横向速度会造成SAR图像的散焦, 径向速度会造成动目标偏离其实际位置, 因此对运动参数进行估计是十分必要的, 以便对运动目标进行聚焦

成像等后续处理<sup>[3]</sup>。

常规的SAR动目标速度估计方法, 主要对运动目标的径向速度和方位向速度进行估计<sup>[2,4]</sup>。已有的速度估计方法包括, Wigner-Ville分布(Wigner-Ville Distribution, WVD)<sup>[5]</sup>、2维速度搜索<sup>[6]</sup>、过采样平滑<sup>[7]</sup>、方位角转向<sup>[8]</sup>、3次相位相干积分<sup>[9]</sup>、分数阶傅里叶变换(Fractional Fourier transform, FrFT)<sup>[10]</sup>、最优2维频谱匹配<sup>[11]</sup>、局域多普勒中心频率估计<sup>[12]</sup>、最小二乘拟合<sup>[13]</sup>、联合像素归一化采样协方差矩阵(Joint Pixel Normalized Sampling Covariance Matrix, JPNSCM)<sup>[14]</sup>等方法。但是, 随着低空飞行器的发展, 运动目标不仅有径向速度

和方位向速度, 还存在与二者均垂直的法向速度。因此, 对运动目标速度的法向速度进行估计也是十分必要的, 从而可以获得运动目标的3维速度信息。相比于传统的单通道SAR系统而言, 多通道SAR系统具有空域自由度上的优势, 在动目标检测、成像和速度估计等方面具有更多天线相位中心, 具有更广泛的应用价值。

目前, 运动目标速度估计通常是运动目标聚焦成像或3维成像过程中的一部分, 但直接针对SAR运动目标法向速度估计的研究较少。Wang等人<sup>[15]</sup>提出了一种三天线逆SAR(Invers SAR, ISAR)接收系统, 利用运动目标的3维运动对其进行3维成像, 但是没有对误差进行详细分析。Zhang等人<sup>[16,17]</sup>提出了一种多天线ISAR系统, 对空中运动目标方位向和俯仰向的角运动参数进行准确估计。Zhang等人<sup>[17]</sup>又提出一种干涉ISAR(Interferometric ISAR, InISAR)的地面运动目标3维SAR成像算法, 可以对运动目标的横向运动参数进行估计, 但该估计方法在低信噪比情况下难以取得较好的估计精度。汤立波等人<sup>[18]</sup>提出了的海面运动目标3维成像算法, 其中的速度估计方法直接忽略了海面目标的垂直向速度, 因此仅在某些特定场合适用。尹建凤等人<sup>[19]</sup>提出采用方向偏移量来区分横向速度中的不同分量, 其方法依赖于图像配准, 并对干涉图像质量和信噪比要求较高。

针对上述问题, 本文利用L型基线的机载多通道SAR系统, 提出一种运动目标方位向速度和法向速度的联合估计算法, 本算法在距离-多普勒域进行参数估计, 不依赖图像配准, 算法稳定性高。本文首先分析了运动目标方位向速度和法向速度分别对SAR成像的影响; 然后, 提出在距离-多普勒域进行方位向和法向速度的联合估计算法, 并给出了仿真分析; 最后, 实验证明本算法可以精确的估计出运动目标的方位向速度和法向速度, 具有较高的精度和算法稳定性。

## 2 机载SAR运动目标成像模型

机载SAR(airborne SAR)3维运动目标成像模型如图1所示。本文采用 $r$ - $a$ - $s$ 坐标系, 坐标原点位于载机航线上的0多普勒时刻点,  $r$ 表示径向,  $a$ 表示方位向,  $s$ 表示与径向和方向(即SAR成像平面)均垂直的法向, 三者相互垂直, 符合右手定则。载机高度为 $h$ , 载机速度为 $V$ , 载机沿方位向飞行, 运动目标初始位置与载机的最近地距为 $x_0$ , 对应最近斜距为 $R_0 = \sqrt{x_0^2 + h^2}$ ,  $\theta$ 为雷达下视角。在 $r$ - $a$ - $s$ 坐标系下, 运动目标的初始位置为 $(R_0, 0, 0)$ , 初始速度为 $(v_r, v_a, v_s)$ , 载机初始位置为

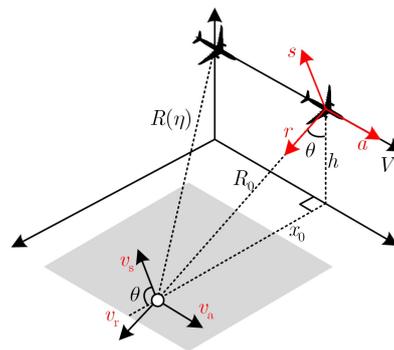


图1 机载SAR 3维运动目标成像模型

$(0, 0, 0)$ , 初始速度为 $(0, V, 0)$ , 则SAR回波信号经过距离压缩(range compression)后为

$$s_{rc}(\tau, \eta) = A_0 p_r \left[ \tau - \frac{2R(\eta)}{c} \right] w_a(\eta) \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi f_0}{c} R(\eta) \right\} \quad (1)$$

其中,  $\eta$ 为方位慢时间,  $\tau$ 为距离向快时间,  $A_0$ 为任意复常量,  $p_r(\tau)$ 为距离向脉冲压缩后的包络,  $w_a(\eta)$ 为方位向包络,  $f_0$ 为雷达中心频率,  $c$ 为光速, 瞬时斜距为

$$R(\eta) = \sqrt{(R_0 + v_r \eta)^2 + (V\eta - v_a \eta)^2 + (v_s \eta)^2} \quad (2)$$

对式(1)进行分析的关键是对式(2)进行展开并化简。在 $\eta = 0$ 处对式(2)进行泰勒展开, 并舍去关于 $\eta$ 的3次及以上项, 可得

$$R(\eta) \approx R_0 + v_r \eta + \frac{v_s^2 + (V - v_a)^2}{2R_0} \eta^2 \quad (3)$$

利用式(3)可以求得运动目标的多普勒信息。运动目标的多普勒中心频率为

$$f_{dr} = -\frac{2v_r}{\lambda} \quad (4)$$

其只与运动目标的径向速度 $v_r$ 有关。

运动目标的多普勒调频率为

$$K_{at} = \frac{2}{\lambda} \frac{v_s^2 + (V - v_a)^2}{R_0} \quad (5)$$

其与运动目标的方位向速度 $v_a$ 和法向速度 $v_s$ 均相关。根据未知数与方程的关系可知, 若要求解 $v_a$ 和 $v_s$ , 至少需要得到两个关于 $v_a$ 和 $v_s$ 的方程, 但传统的单天线SAR系统无法通过一次观测来同时求解 $v_a$ 和 $v_s$ , 因此需要构建多通道SAR系统来对 $v_a$ 和 $v_s$ 进行估计。

## 3 方位向速度 $v_a$ 和法向速度 $v_s$ 联合估计算法

### 3.1 联合估计算法原理

根据式(5)的分析, 至少需要得到两个关于 $v_a$ 和

$v_s$ 的方程,并结合图1所示的运动目标成像模型,在  $r$ - $a$ - $s$ 坐标系下,构建如图2所示的机载多通道SAR系统。

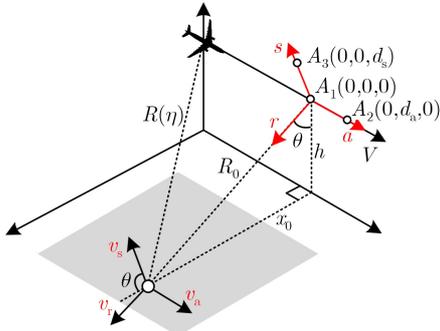


图2 机载多通道SAR 3维运动目标成像模型

该系统有3个天线相位中心,位置分别为  $(0,0,0)$ ,  $(0, d_a, 0)$ ,  $(0, 0, d_s)$ , 其沿  $a$ 轴方向构成顺轨干涉(Along-Track Interferometry, ATI)系统,沿  $s$ 轴构成交轨干涉(Cross-Track Interferometry, XTI)系统。其余参数均与图1一致。不同相位中心的天线与运动目标所形成的瞬时斜距不同,因此多普勒频率也不同。分别求得各个天线的多普勒频率表达式为

$$\left. \begin{aligned} f_{\eta,0} &= f_{dr} - K_{at}\eta \\ f_{\eta,a} &= f_{dr} + f_{da} - K_{at}\eta \\ f_{\eta,s} &= f_{dr} - f_{ds} - K_{at}\eta \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

其中,  $f_{\eta,0}$ 表示中心天线  $(0,0,0)$  的多普勒频率,  $f_{\eta,a}$ 表示顺轨向天线  $(0, d_a, 0)$  的多普勒频率,  $f_{\eta,s}$ 表示交轨向天线  $(0,0, d_s)$  的多普勒频率。 $f_{da} = -\frac{2d_a(V-v_a)}{\lambda R_0}$ 表示由顺轨方向天线间隔  $d_a$  和方位向速度  $v_a$  引入的多普勒中心频率偏差,  $f_{ds} = -\frac{2d_s v_s}{\lambda R_0}$ 表示由交轨方向天线间隔  $d_s$  和法向速度  $v_s$  引入的多普勒中心频率偏差。 $f_{dr}$ 同式(4),  $K_{at}$ 同式(5)。由此可见,  $f_{da}$ 只与  $v_a$ 有关,  $f_{ds}$ 只与  $v_s$ 有关。

通过上述可知,  $f_{da}$ 和  $f_{ds}$ 表示顺轨天线和交轨天线与中心天线的多普勒中心频率之差,该值通常较小,直接测量误差较大,无法用于求解  $v_a$ 和  $v_s$ 。本文算法在距离-多普勒(range Doppler)域进行处理,可以消除相同的多普勒频率,仅保留多普勒频率的差值,实现了对  $f_{da}$ 和  $f_{ds}$ 的适当放大,从而可以准确的估计出  $v_a$ 和  $v_s$ 。

对3天线分别进行方位向傅里叶变换(Fourier Transform, FT),可得距离-多普勒域表达式  $S_{rda}(\tau, f_\eta)$ ,  $S_{rds}(\tau, f_\eta)$ ,  $S_{d0}(\tau, f_\eta)$ 。将  $S_{rda}(\tau, f_\eta)$ ,  $S_{rds}(\tau, f_\eta)$ 分别与  $S_{d0}(\tau, f_\eta)$ 共轭相乘,则共轭相乘后的相位分别为

$$\left. \begin{aligned} \theta_{a0}(f_\eta) &= \frac{\pi}{K_{at}} f_{da}^2 - \frac{2\pi}{K_{at}} f_{da}(f_\eta - f_{dr}) \\ \theta_{s0}(f_\eta) &= \frac{\pi}{K_{at}} f_{ds}^2 + \frac{2\pi}{K_{at}} f_{ds}(f_\eta - f_{dr}) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

通过式(7)可以看出,相位差  $\theta_{a0}(f_\eta)$ 和  $\theta_{s0}(f_\eta)$ 是关于  $f_\eta$ 的1次函数,而1次项系数可以构成关于  $v_a$ 和  $v_s$ 的两个方程。通过线性拟合等方式来提取1次项系数,分别为  $\varepsilon_{a0}$ 和  $\varepsilon_{s0}$ ,即

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{a0} &= -\frac{f_{da}}{K_{at}} = \frac{d_a(V-v_a)}{(V-v_a)^2 + v_s^2} \\ \varepsilon_{s0} &= \frac{f_{ds}}{K_{at}} = -\frac{d_s v_s}{(V-v_a)^2 + v_s^2} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

则通过求解式(8)的方程组,可得到关于  $v_a$ 和  $v_s$ 的估计值  $\tilde{v}_a$ 和  $\tilde{v}_s$ 为

$$\left. \begin{aligned} \tilde{v}_a &= V - \frac{\varepsilon_{a0} d_a d_s^2}{\varepsilon_{a0}^2 d_s^2 + \varepsilon_{s0}^2 d_a^2} \\ \tilde{v}_s &= -\frac{\varepsilon_{s0} d_s d_a^2}{\varepsilon_{a0}^2 d_s^2 + \varepsilon_{s0}^2 d_a^2} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

通过上述可知,通过“L型”基线构型的多通道机载SAR系统,可以实现对3维运动目标方位向速度  $v_a$ 和法向速度  $v_s$ 的联合估计。并且,处理过程避免了SAR图像配准,处理过程简单高效。

### 3.2 联合估计算法处理流程

联合估计算法那处理流程如图3所示。

### 3.3 精度分析

通过3.1节的分析可知,联合估计算法不需要对3幅SAR图像进行配准,只需在距离-多普勒域提取运动目标信号即可,因此,估计精度与信号提取过程有关。通过式(9)可知,估计值与基本参数有关。接下来对其分别进行简要分析。

#### 3.3.1 运动目标信号提取

本文所提算法在距离-多普勒域提取运动目标的徙动曲线,显然,提取结果与距离-多普勒域的

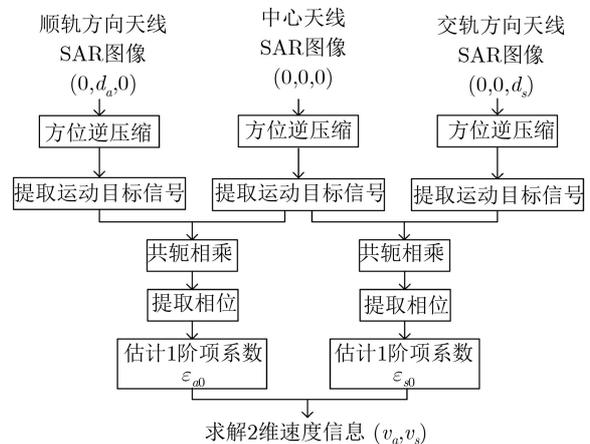


图3 速度联合估计算法处理流程

信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)有关。当信噪比越大时, 提取的徙动曲线越精确, 后续处理精度越高。

通常目标在距离-多普勒域的徙动曲线在多普勒带宽内是一条连续的曲线。但是, 运动目标由于存在径向速度, 可能存在多普勒模糊, 此时运动目标的徙动曲线可能不再连续。而本文所提算法是利用3幅SAR图像多普勒中心频率的微小差别进行速度估计, 这个差别在多普勒带宽之内是一致的, 因此只需要提取3幅SAR图像对应同一多普勒中心处的信噪比最高的一部分徙动曲线, 无需解多普勒模糊即可完成估计, 具有较高的鲁棒性。同时, 在多普勒带宽内, 提取的徙动曲线越完整, 估计结果精度越高。

### 3.3.2 误差公式

根据误差传递公式, 估计值 $\tilde{v}_a$ 和 $\tilde{v}_s$ 的方差 $\sigma_{v_a}^2$ 和 $\sigma_{v_s}^2$ 分别为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{v_s}^2 &= \left( \frac{\partial \tilde{v}_s}{\partial d_a} \right)^2 \sigma_{d_a}^2 + \left( \frac{\partial \tilde{v}_s}{\partial d_s} \right)^2 \sigma_{d_s}^2 + \left( \frac{\partial \tilde{v}_s}{\partial \varepsilon_{a0}} \right)^2 \sigma_{\varepsilon_{a0}}^2 \\ &\quad + \left( \frac{\partial \tilde{v}_s}{\partial \varepsilon_{s0}} \right)^2 \sigma_{\varepsilon_{s0}}^2 \\ \sigma_{v_a}^2 &= \left( \frac{\partial \tilde{v}_a}{\partial d_a} \right)^2 \sigma_{d_a}^2 + \left( \frac{\partial \tilde{v}_a}{\partial d_s} \right)^2 \sigma_{d_s}^2 + \left( \frac{\partial \tilde{v}_a}{\partial \varepsilon_{a0}} \right)^2 \sigma_{\varepsilon_{a0}}^2 \\ &\quad + \left( \frac{\partial \tilde{v}_a}{\partial \varepsilon_{s0}} \right)^2 \sigma_{\varepsilon_{s0}}^2 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

其中,

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \tilde{v}_s}{\partial d_a} &= \frac{2v_s}{d_a} \cdot \frac{(V - v_a)^2}{(V - v_a)^2 + v_s^2} \\ \frac{\partial \tilde{v}_a}{\partial d_a} &= -\frac{V - v_a}{d_a} \cdot \frac{(V - v_a)^2 - v_s^2}{(V - v_a)^2 + v_s^2} \\ \frac{\partial \tilde{v}_s}{\partial d_s} &= \frac{v_s}{d_s} \cdot \frac{(V - v_a)^2 - v_s^2}{(V - v_a)^2 + v_s^2} \\ \frac{\partial \tilde{v}_a}{\partial d_s} &= -\frac{2(V - v_a)}{d_s} \cdot \frac{v_s^2}{(V - v_a)^2 + v_s^2} \\ \frac{\partial \tilde{v}_s}{\partial \varepsilon_{a0}} &= -\frac{2(V - v_a)v_s}{d_a} \\ \frac{\partial \tilde{v}_a}{\partial \varepsilon_{a0}} &= -\frac{(V - v_a)^2 - v_s^2}{d_a} \\ \frac{\partial \tilde{v}_s}{\partial \varepsilon_{s0}} &= -\frac{(V - v_a)^2 - v_s^2}{d_s} \\ \frac{\partial \tilde{v}_a}{\partial \varepsilon_{s0}} &= -\frac{2(V - v_a)v_s}{d_s} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

比较式(11)中各个参数可得,  $\left| \frac{\partial \tilde{v}_a}{\partial \varepsilon_{a0}} \right| > \left| \frac{\partial \tilde{v}_a}{\partial d_a} \right| > \left| \frac{\partial \tilde{v}_a}{\partial d_s} \right|$ ,  $\left| \frac{\partial \tilde{v}_s}{\partial \varepsilon_{a0}} \right| > \left| \frac{\partial \tilde{v}_s}{\partial \varepsilon_{s0}} \right| > \left| \frac{\partial \tilde{v}_s}{\partial d_a} \right| > \left| \frac{\partial \tilde{v}_s}{\partial d_s} \right|$ 。由此可知: (1)系数 $\varepsilon_{a0}$ ,  $\varepsilon_{s0}$ 的估计精度比基线长度 $d_a$ ,  $d_s$ 的估计精度影响更大; (2)顺轨方向参数 $\varepsilon_{a0}$ ,  $d_a$ 的估计精度比交轨方向参数 $\varepsilon_{s0}$ ,  $d_s$ 的估计精度影响更大; (3)为提高速度 $\tilde{v}_a$ 和 $\tilde{v}_s$ 的估计精度, 可以增加基线 $d_a$ ,  $d_s$ 长度。

## 4 仿真分析与验证

为了验证本文方法的有效性, 将利用MATLAB进行点目标仿真进行验证。由于本文重点是对3维运动目标的方位向速度 $v_a$ 和法向速度 $v_s$ 进行联合估计, 因此, 仿真时暂不考虑运动目标的径向速度 $v_r$ 。SAR系统仿真基本参数如表1所示。

假设存在3个运动目标, 起始位置均位于 $(R_0, 0, 0)$ 处, 其具体运动参数如表2所示。

针对运动目标1, 通过SAR成像仿真, 分别在3天线所成SAR图像中提取运动目标信号的距离-多普勒信号, 并按照图3的处理流程进行处理, 可以得到顺轨方向和交轨方向的相位差如图4所示。然后利用线性拟合法估计相位差的1阶项系数(如图4中红线所示), 即可估计出运动目标的方位向速度和法向速度以及估计误差, 如表3所示。

运动目标2只有方位向速度, 运动目标3只有法向速度, 这两个种情况都是运动目标1的特例。按照图3所示的仿真流程, 可得各自多普勒域的相位差如图5和图6所示, 估计结果及估计误差如表3所示。

通过表3可以看出, 该算法对于方位向速度和法向速度的联合估计具有较高的精度, 而且法向速度估计精度要高于方位向速度估计精度。这主要是因为, 方位向速度的估计与载机的飞行速度有直接关系, 载机的飞行速度误差会传递到最终的方位向速度估计误差中。

## 5 实测数据处理结果

实测数据来源于中国科学院电子学研究所某机载X波段多通道SAR平台, 部分参数如表4所示。

对原始数据进行成像, 如图7(a)所示。运动目标是小型低空无人机, 在公路上空飞行。由于存在3维运动速度, 因此出现了散焦和位移。利用文献[18]所提算法直接对运动目标进行时频分析成像, 如图7(b)所示。运动目标的方位向位移得到校

表1 SAR系统仿真基本参数

| 中心频率    | 飞行速度    | 飞行高度   | 最近斜距  | PRF  | 信噪比   | 多普勒带宽  | 顺轨基线 | 交轨基线 |
|---------|---------|--------|-------|------|-------|--------|------|------|
| 9.6 GHz | 150 m/s | 7500 m | 20 km | 2000 | 10 dB | 500 Hz | 1 m  | 1 m  |

表2 目标3维运动参数(m/s)

|       | 径向速度 | 方位速度 | 法向速度 |
|-------|------|------|------|
| 运动目标1 | 0    | 10   | 10   |
| 运动目标2 | 0    | 10   | 0    |
| 运动目标3 | 0    | 0    | 10   |

正, 方位向散焦程度有所减小, 但是由于未考虑法向速度, 方位向依然存在一定程度的散焦现象。

根据顺轨干涉(Along Track Interferometry, ATI)处理算法, 可以对运动目标的径向速度进行估计, 可得 $v_r = 10.58$  m/s。再利用本文所提算法

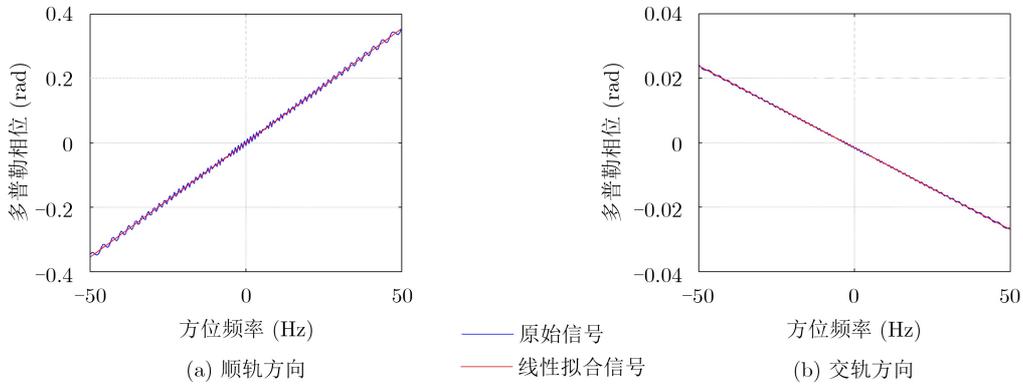


图4 运动目标1的多普勒域相位差

表3 运动目标速度估计结果及误差(m/s)

|       | 理论方位速度 | 理论法向速度 | 估计方位速度                | 估计法向速度                 | 方位速度估计误差              | 法向速度估计误差               |
|-------|--------|--------|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|
| 运动目标1 | 10.00  | 10.00  | 9.85                  | 10.00                  | 0.15                  | 0                      |
| 运动目标2 | 10.00  | 0      | 9.84                  | $1.15 \times 10^{-15}$ | 0.16                  | $1.15 \times 10^{-15}$ |
| 运动目标3 | 0      | 10.00  | $7.93 \times 10^{-2}$ | 9.90                   | $7.93 \times 10^{-2}$ | 0.10                   |

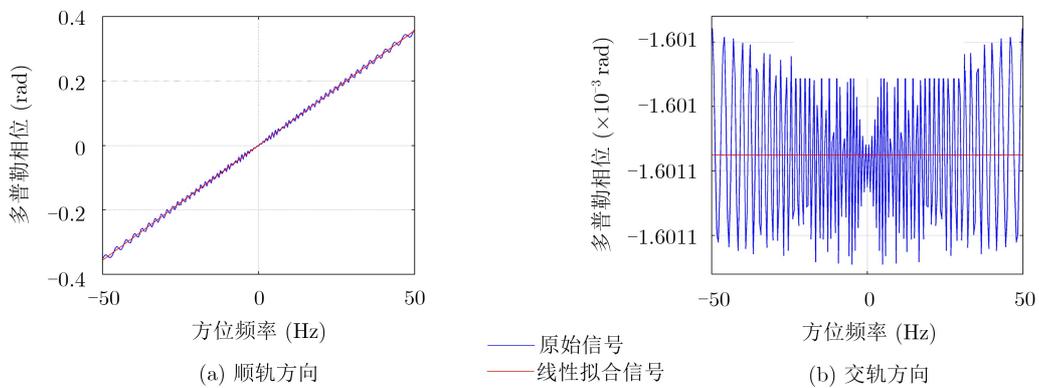


图5 运动目标2的多普勒域相位差

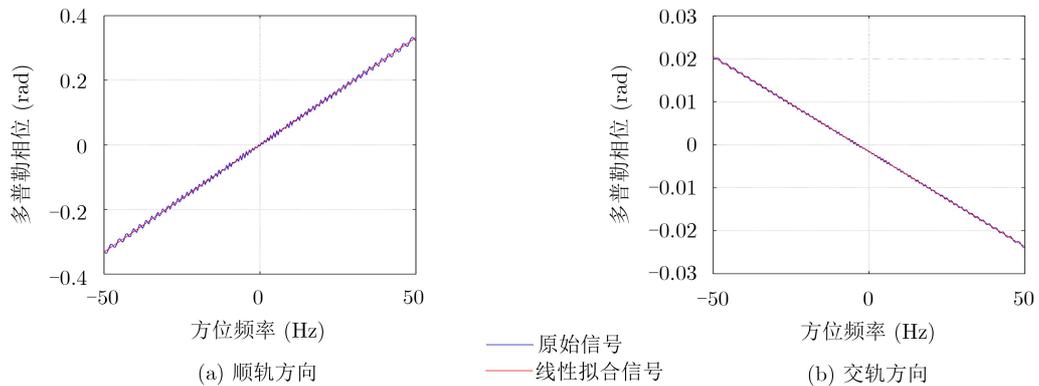


图6 运动目标3的多普勒域相位差

表 4 SAR平台部分参数

| 距离向采样点数 | PRF | 天线间距 | 飞行速度    | 飞行高度   | 带宽      |
|---------|-----|------|---------|--------|---------|
| 16384   | 781 | 1 m  | 146 m/s | 7544 m | 300 MHz |

和3.2节的处理流程对运动目标方位向速度和法向速度进行联合估计，可得方位向速度 $v_a = 7.31$  m/s，法向速度 $v_s = -1.05$  m/s。根据估计结果，重新对运动目标区域进行聚焦成像，然后与静止目标图像进行融合，结果如图7(c)所示。运动目标聚焦效果

良好，说明3维速度估计是准确的。

分别提取图7中3个运动目标在方位向剖面进行对比，如图8所示。通过对比可以明显看出，未进行聚焦成像的运动目标SAR图像在方位向存在明显的散焦；在不考虑法向速度时，对运动目标进行重新聚焦成像，聚焦效果得到改善，但是还是存在一定程度的主瓣展宽等散焦现象；在考虑3维速度时，对运动目标进行聚焦成像，可以得到聚焦良好的运动目标SAR图像。

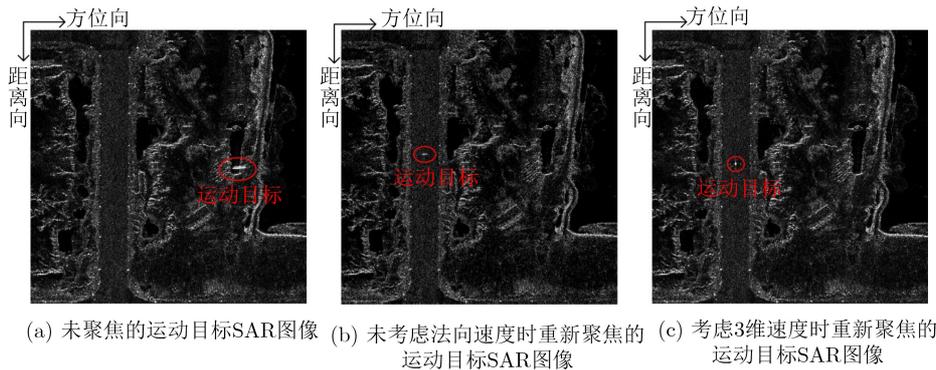


图 7 运动目标聚焦前后的SAR图像

## 6 结束语

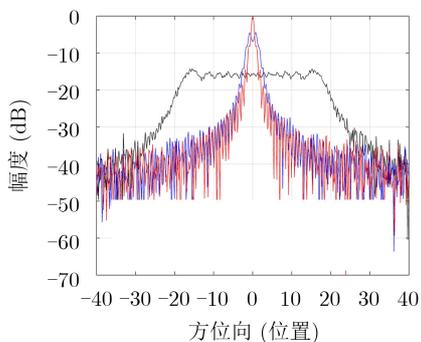
本文针对SAR3维运动目标的法向速度估计问题，提出一种利用L型基线的机载多通道SAR系统，同时估计运动目标的方位向速度和法向速度的估计方法。本文首先介绍了“径向 $r$ -方位向 $a$ -法向 $s$ ”坐标系，在此坐标系下，运动目标的3维速度对SAR成像的影响相互独立，便于分析。然后根据3维速度对SAR成像的影响，在 $ras$ 坐标系下建立了L型基线的机载多通道SAR系统，通过对提取3维运动目标的距离-多普勒域信号，分别在顺轨方向和交轨方向提取相位差，并估计相位差的1阶项系数，从而同时估计出运动目标方位向速和法向速度。仿真分析表明，本文方法对运动目标方位向速

度和法向速度具有较高的估计精度，具有很好的稳健性。

由于结构系统相对单天线SAR系统复杂，因此如何优化系统结构，降低系统复杂度将是下一步研究内容。

## 参考文献

- [1] PERRY R P, DIPIETRO R C, and FANTE R L. SAR imaging of moving targets[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, 35(1): 188–200. doi: 10.1109/7.745691.
- [2] FIENUP J R. Detecting moving targets in SAR imagery by focusing[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2001, 37(3): 794–809. doi: 10.1109/7.953237.
- [3] JAO J K. Theory of synthetic aperture radar imaging of a moving target[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(9): 1984–1992. doi: 10.1109/36.951089.
- [4] MARQUES P A C and DIAS J M B. Velocity estimation of fast moving targets using a single SAR sensor[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2005, 41(5): 75–89. doi: 10.1109/TAES.2005.1413748.
- [5] BARBAROSSA S and FARINA A. Detection and imaging of moving objects with synthetic aperture radar. 2. Joint time-frequency analysis by wigner-ville distribution[J]. *IEE Proceedings F - Radar and Signal Processing*, 1992, 139(1): 89–97. doi: 10.1049/ip-f-2.1992.0011.



— 未聚焦的运动目标SAR图像  
— 未考虑法向速度时重新聚焦的运动目标SAR图像  
— 考虑三维速度时重新聚焦的运动目标SAR图像

图 8 运动目标方位向剖面图

- [6] WANG Zhirui, XIA Xianggen, XU Jia, *et al.* Ground moving target imaging based on 2-D velocity search in high resolution SAR[C]. 2017 IEEE Radar Conference, Seattle, USA, 2017: 68–72.
- [7] SHI Hongyin, YANG Xiaoyan, ZHOU Qiuxiao, *et al.* SAR slow moving target imaging based on over-sampling smooth algorithm[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2017, 26(4): 876–882. doi: [10.1049/cje.2017.06.005](https://doi.org/10.1049/cje.2017.06.005).
- [8] YANG Wei, CHEN Jie, LIU Wei, *et al.* Moving target azimuth velocity estimation for the MASA mode based on sequential SAR images[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, 10(6): 2780–2790. doi: [10.1109/JSTARS.2016.2641744](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2641744).
- [9] SU Jia, TAO Haihong, WANG Ling, *et al.* Coherently integrated cubic function based doppler parameters estimation for moving-target imaging[C]. 2017 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium, Suzhou, China, 2017: 1–2.
- [10] WANG Hanyun and JIANG Yicheng. Real-time parameter estimation for SAR moving target based on WVD slice and FrFT[J]. *Electronics Letters*, 2018, 54(1): 47–49. doi: [10.1049/el.2017.1740](https://doi.org/10.1049/el.2017.1740).
- [11] LI Zhongyu, WU Junjie, LIU Zhutian, *et al.* An optimal 2-D spectrum matching method for SAR ground moving target imaging[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(10): 5961–5974. doi: [10.1109/TGRS.2018.2829166](https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2829166).
- [12] 魏翔飞, 王小青, 种劲松. 一种基于局域中心频率的SAR图像舰船方位向速度估计方法[J]. *电子与信息学报*, 2018, 40(9): 2242–2249. doi: [10.11999/JEIT170991](https://doi.org/10.11999/JEIT170991).
- WEI Xiangfei, WANG Xiaoqing, and CHONG Jinsong. Ship azimuthal speed estimation method based on local region doppler centroid in SAR images[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(9): 2242–2249. doi: [10.11999/JEIT170991](https://doi.org/10.11999/JEIT170991).
- [13] 王超, 王岩飞, 王琦, 等. 基于回波序列最小二乘拟合的高分辨率SAR运动目标速度估计[J]. *电子与信息学报*, 2019, 41(5): 1055–1062. doi: [10.11999/JEIT180695](https://doi.org/10.11999/JEIT180695).
- WANG Chao, WANG Yanfei, WANG Qi, *et al.* Velocity estimation of moving targets based on least square fitting of high-resolution SAR echo sequences[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(5): 1055–1062. doi: [10.11999/JEIT180695](https://doi.org/10.11999/JEIT180695).
- [14] HE Xiongpeng, LIAO Guisheng, XU Jingwei, *et al.* Robust radial velocity estimation based on joint-pixel normalized sample covariance matrix and shift vector for moving targets[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2019, 16(2): 221–225. doi: [10.1109/LGRS.2018.2871950](https://doi.org/10.1109/LGRS.2018.2871950).
- [15] WANG Genyuan, XIA Xianggen, and CHEN V C. Three-dimensional ISAR imaging of maneuvering targets using three receivers[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2001, 10(3): 436–447. doi: [10.1109/83.908519](https://doi.org/10.1109/83.908519).
- [16] ZHANG Qun and YEO T S. Three-dimensional SAR imaging of a ground moving target using the InISAR technique[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(9): 1818–1828. doi: [10.1109/TGRS.2004.831863](https://doi.org/10.1109/TGRS.2004.831863).
- [17] ZHANG Qun, YEO T S, DU Gan, *et al.* Estimation of three-dimensional motion parameters in interferometric ISAR imaging[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(2): 292–300. doi: [10.1109/TGRS.2003.815669](https://doi.org/10.1109/TGRS.2003.815669).
- [18] 汤立波, 李道京, 洪文, 等. 基于顺轨-交轨InSAR技术的运动舰船目标三维成像[J]. *系统工程与电子技术*, 2008, 30(9): 1669–1673. doi: [10.3321/j.issn:1001-506X.2008.09.017](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-506X.2008.09.017).
- TANG Libo, LI Daojing, HONG Wen, *et al.* Three-dimensional imaging of moving ships with 3D motion based on AT-CT InSAR[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2008, 30(9): 1669–1673. doi: [10.3321/j.issn:1001-506X.2008.09.017](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-506X.2008.09.017).
- [19] 尹建凤, 李道京, 王爱明, 等. 基于星载毫米波顺轨-交轨InISAR的空间运动目标三维成像技术研究[J]. *宇航学报*, 2013, 34(2): 237–245. doi: [10.3873/j.issn.1000-1328.2013.02.013](https://doi.org/10.3873/j.issn.1000-1328.2013.02.013).
- YIN Jianfeng, LI Daojing, WANG Aiming, *et al.* Three-dimensional imaging technique of space moving target based on spaceborne along-cross track millimeter-wave In-ISAR[J]. *Journal of Astronautics*, 2013, 34(2): 237–245. doi: [10.3873/j.issn.1000-1328.2013.02.013](https://doi.org/10.3873/j.issn.1000-1328.2013.02.013).
- 姜文: 男, 1990年生, 博士生, 研究方向为机载多通道SAR地面运动目标参数估计.
- 牛杰: 男, 1993年生, 博士生, 研究方向为新体制SAR海面纹理增强.
- 吴一戎: 男, 1963年生, 中国科学院院士, 研究方向为微波成像理论、微波成像技术、雷达信号处理等.
- 梁兴东: 男, 1973年生, 研究员, 研究方向为高分辨率SAR系统、干涉SAR系统、成像处理及应用、实时数字信号处理等.