

# 一种顺轨干涉 SAR 时变平地相位去除方法

孙 颖<sup>1,2</sup>, 吴思利<sup>1,2</sup>, 王 辉<sup>1,2</sup>

(1. 上海卫星工程研究所 上海市毫米波空天信息获取及应用技术重点实验室, 上海 201109;  
2. 上海航天技术研究院 毫米波成像技术重点实验室, 上海 201109)

**摘 要:** 顺轨干涉合成孔径雷达(ATI-SAR), 可以利用 2 幅 SAR 图像的干涉相位信息实现对动目标的检测和径向速度的测量。在实际情况下, 由于平台和天线相位中心的不稳定, 干涉基线的倾角变化会导致时变的交轨基线分量, 从而引入平地相位干扰运动目标的检测和测速, 需要去除其影响。针对此问题, 提出一种基于回波数据的时变平地相位去除方法。该方法通过最小二乘法估计出基线在平地相位中的影响系数, 再反演出估计的平地相位值, 从而在干涉相位中进行去平地相位, 提升了运动目标的检测和测速性能。通过仿真实验验证了理论公式的正确性, 并计算了误差。

**关键词:** 顺轨干涉; 合成孔径雷达; 平地相位; 动目标指示; 基线误差

**中图分类号:** TN 911.73; TP 391.9 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19328/j.cnki.2096-8655.2022.03.004

## A Time-Varying Flat Earth Phase Removal Method for Along-Track Interferometric SAR

SUN Ying<sup>1,2</sup>, WU Sili<sup>1,2</sup>, WANG Hui<sup>1,2</sup>

(1. Shanghai Key Laboratory of Remote Sensing and Millimeter Wave Information Acquisition and Application Technology, Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109, China; 2. Key Laboratory of Millimeter Imaging, Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China)

**Abstract:** Along-track interferometric synthetic aperture radar (ATI-SAR) can be used to detect moving targets and measure the radial velocity by using the interferometric phase information of two synthetic aperture radar images. In practice, owing to the instability of the phase center of the platform and the antenna, the change of the interferometric baseline will cause a cross-track baseline component, which will introduce a flat earth phase to interfere with the detection and radial velocity measurement of moving targets and thus the change influence should be removed. In view of this problem, a time-varying flat earth phase removal method is proposed based on the echo data. In this method, the influence coefficient of the baseline in the flat earth phase is estimated through the least square method, and then the estimated flat earth phase value is inversely calculated. These can remove the flat earth phase in the interferometric phase and improve the detection and radial velocity measurement performance of moving targets. Finally, the correctness of the theoretical method is verified through simulation experiment, and the phase error is calculated.

**Key words:** along-track interference; synthetic aperture radar; flat earth phase; moving target indication; baseline error

## 0 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是主动式微波成像雷达, 相比光学传感器具有全天候、强穿透等优点。如今, SAR在军事和民

用的诸多领域都发挥着重要作用<sup>[1-4]</sup>。而基于 SAR 图像数据能够进一步实现高分辨率雷达信息应用, 典型有基于空间角差异的干涉 SAR 测绘和基于时间基线的动目标指示(Moving Target Indication,

收稿日期: 2022-04-10; 修回日期: 2022-04-13

作者简介: 孙 颖(1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为毫米波 SAR 成像算法与图像处理。

MTI),后者通常会在多组数据之中提取多普勒信息、位置、时间的关联特性,完成速度反演。

MTI 的主要技术途径包括了空时自适应处理 (Space-Time Adaptive Processing, STAP)、偏置相位中心天线技术 (Displaced Phase Center Antenna, DPCA)、顺轨干涉 SAR (Along-Track Interferometric Synthetic Aperture Radar, ATI-SAR), 后两者可以视做是 STAP 的变体<sup>[5-8]</sup>。顺轨干涉技术由于其更灵活的基线配置,已经经历了广泛的天基、空基应用,通过利用沿航向布置的天线得到的两幅或两幅以上具有相干性的 SAR 复图像进行联合处理,实现地面运动目标检测及洋流监测等功能,具有十分重要的应用价值。成功的天基应用任务有航天飞机雷达地形测绘任务 (The Shuttle Radar Topography Mission), 使用单一混合基线完成了流场测量<sup>[9-11]</sup>。德国的 ROMEISER 等<sup>[12-14]</sup>深入研究了星载顺轨干涉洋流检测,量化分析测量精度,并应用于 TerraSAR-X 数据。

应用顺轨干涉技术的任务包括了在理想情况下,静止目标干涉相位为零,而运动目标干涉相位不为零。但由于平台和天线相位中心的不稳定,干涉基线的倾角变化会导致时变的交轨基线分量,从而引入平地相位干扰运动目标的检测和测速<sup>[15-16]</sup>。现有的平地相位去除方法有基于地面控制点与敏感度方程的平地相位去除方法<sup>[17]</sup>、基于干涉相位的平地相位盲估计方法<sup>[18-19]</sup>。前者由于需要布设地面控制点实施成本和难度较大,后者则存在运算复杂度或地形适应性的问题。

本文提出一种基于回波数据的时变平地相位去除方法。该方法通过最小二乘法估计出基线在平地相位中的影响系数,再反演出估计的平地相位值,从而在干涉相位中进行去平地相位,具有较高的估计精度和效率,提升了运动目标的检测和测速性能。最后通过仿真实验验证了理论公式的正确性,并分析了平地相位估计误差。

## 1 ATI-SAR 基本原理

ATI-SAR 对运动目标成像的几何模型如图 1 所示。图中: $x$  轴为垂直航迹与高度方向构成平面的方向; $y$  轴为雷达平台运动方向; $z$  轴为垂直地表的高度方向; $H$  为平台运动轨迹高度; $V$  和  $v_r$  分别为平台运动速度和地面运动目标的径向速度;沿飞行

向前后布置 2 个天线  $A_1$  和  $A_2$ ; 间距即干涉基线长度为  $d$ ;  $x_0$  为地面目标相对  $zOy$  平面的垂直距离;  $R_0 = \sqrt{x_0^2 + H^2}$  为最近斜距;  $R(\eta)$  为瞬时斜距;  $\theta$  为天线下视角。

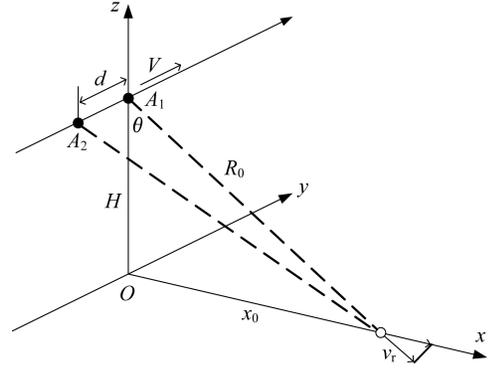


图 1 ATI-SAR 动目标成像几何模型

Fig. 1 Geometric model of moving target imaging by ATI-SAR

假设 ATI-SAR 两天线交替自发自收信号。根据几何关系,在方位时刻  $\eta$ , 两天线相位中心到运动目标的瞬时斜距分别为

$$\begin{cases} R_1(\eta) = \sqrt{(R_0 + v_r \eta)^2 + (V \eta)^2} \\ R_2(\eta) = \sqrt{(R_0 + v_r \eta)^2 + (V \eta - d)^2} \end{cases} \quad (1)$$

利用泰勒公式,将  $R_1(\eta)$  与  $R_2(\eta)$  分别在  $\eta = 0$  与  $\eta = \frac{d}{V}$  处展开到二次项<sup>[11]</sup>,有

$$\begin{cases} R_1(\eta) \approx R_0 + v_r \eta + \frac{V^2}{2R_0} \eta^2 \\ R_2\left(\eta - \frac{d}{V}\right) \approx \left(R_0 + \frac{d}{V} v_r\right) + v_r \left(\eta - \frac{d}{V}\right) + \frac{V^2}{2R_0} \left(\eta - \frac{d}{V}\right)^2 \end{cases} \quad (2)$$

两天线接收的 SAR 回波信号经过成像算法聚焦后,可以分别得到 2 幅图像  $S_1$  和  $S_2$ 。经过图像配准,将 2 幅 SAR 图像进行共轭相乘可得干涉处理结果为

$$I = S_1 \cdot S_2^* = A \exp(j\varphi) = A \exp\left(j4\pi \frac{dv_r}{\lambda V}\right) \quad (3)$$

式中: $A$  为与相位无关的项。

从式(3)中可以观察到,目标径向速度与干涉相位的对应关系为

$$v_r = \frac{\lambda V}{4\pi d} \varphi \quad (4)$$

理想情况下,天线  $A_1$  和  $A_2$  具有相同的运动轨迹,因此对静止地面来说 2 幅 SAR 图像完全相同,经过干涉处理后静止目标的相位完全抵消,仅运动目标具有与其径向速度对应的干涉相位,这就是利用 SAR 顺轨干涉相位对动目标进行测速的原理。

## 2 时变基线倾角对干涉相位的影响

由于平台和天线相位中心的不稳定,使得基线相对于飞行轨迹方向有一定偏移。不失一般性,假设天线  $A_1$  相位中心坐标为  $(0, V\eta, H)$ , 由于基线倾角变化,  $A_2$  相位中心坐标为  $(d_x, V\eta - d_y, H - d_z)$ , 其中  $d_x, d_y, d_z$  随方位时间缓慢变化,且满足  $d^2 = d_x^2 + d_y^2 + d_z^2$ 。偏离航迹方向的基线几何关系如图 2 所示。

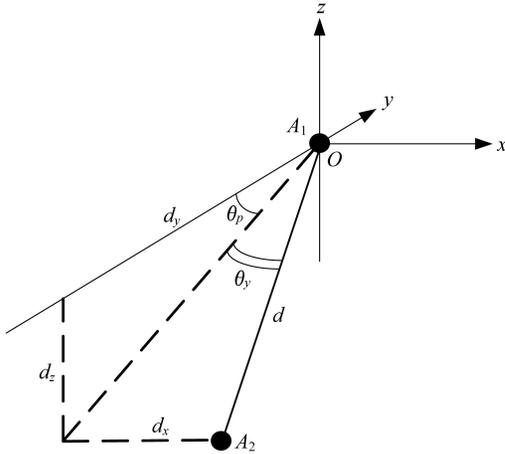


图 2 基线倾角

Fig. 2 Schematic diagram of baseline inclination

图 2 中:  $\theta_p$  为俯仰角;  $\theta_y$  为偏航角。由几何关系可得

$$\begin{cases} d_x = d \sin \theta_y \\ d_y = d \cos \theta_p \cos \theta_y \\ d_z = d \cos \theta_p \sin \theta_y \end{cases} \quad (5)$$

在基线存在误差的情况下,对于径向速度为零的目标,此时天线  $A_2$  相位中心到目标的瞬时斜距为  $R_2(\eta) = \sqrt{(x_0 - d_x)^2 + (V\eta - d_y)^2 + (H - d_z)^2}$  (6)

对式(6)在  $\eta = \frac{d_y}{V}$  处进行泰勒展开并舍去三次以上项,可得

$$R_2\left(\eta - \frac{d_y}{V}\right) \approx \left(R_0 + \frac{d^2 - d_y^2 - 2x_0 d_x - 2Hd_z}{2R_0}\right) + \frac{V^2}{2R_0} \left(\eta - \frac{d_y}{V}\right)^2 \quad (7)$$

进行 SAR 成像处理和图像配准后,2 幅 SAR 图像进行共轭相乘可得

$$I = S_1 \cdot S_2^* = B \exp(j\Delta\varphi) = B \exp\left(j2\pi \frac{d^2 - d_y^2 - 2x_0 d_x - 2Hd_z}{\lambda R_0}\right) \quad (8)$$

式中:  $B$  为与相位无关的项。

由式(8)可以看出,由于基线倾角变化导致的交轨基线分量,两天线与地面静止目标的斜距历程不再相同,静止目标干涉相位可能不为零,产生了在方位向时变的平地相位。将导致对运动目标速度的错误估计,甚至无法检测到运动目标,因此必须采取措施去除平地相位的影响。

## 3 时变平地相位去除方法

对于平地相位的去除有多种处理方法。文献[17]在交轨干涉 SAR 基线定标的基础上提出了通过布设地面控制点,并使用敏感度方程对机载 ATI-SAR 基线误差进行定标,从而消除其影响的方法。但是由于基线会随方位时变,需要在测绘带内多处布设地面控制点,导致布设难度和成本上升,且某些地形可能难以布设,因此此方法在实际应用中收到限制。文献[18]基于较短时间内飞行平台俯仰角相对不变的假设,分两步依次校正平地 and 地形起伏引起的相位的盲校正方法。文献[19]提出一种采用分块处理和迭代运算的相位校正方法,通过在方位向和距离向分块并使用子块内相位均值多次迭代的方式,校正顺轨干涉相位中的时变交轨分量。以上基于干涉相位的时变平地相位校正方法由于分块和迭代的操作,分块大小需要根据情况调整,且处理效率上存在一定问题。

针对这一问题,本文提出一种新的 ATI-SAR 时变平地相位去除方法。其原理和处理步骤如下:

由式(8)可以看出,平地相位随方位时间  $\eta$ 、地距  $x_0$  和斜距  $R_0$  变化如下:

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{d^2 - d_y^2 - 2x_0 d_x - 2Hd_z}{\lambda R_0} \quad (9)$$

若在一定距离变化范围内,可以将地距视为近似不变,从而有

$$\Delta\varphi \approx \frac{\alpha(\eta)}{R_0} \quad (10)$$

式中: $\alpha(\eta)$ 被定义为一个只与方位时间有关的因子。这在地形起伏不存在剧烈变化的情况下是合理的。

由式(10)可知,可以将同一方位时间一定距离范围内的平地相位视为只随斜距变化,因此可以对解缠绕后的干涉相位在距离向加窗截断,然后采用最小二乘法拟合得到平地相位的估计值。

基于以上假设,采用如下步骤进行平地相位去除,流程如图 3 所示。

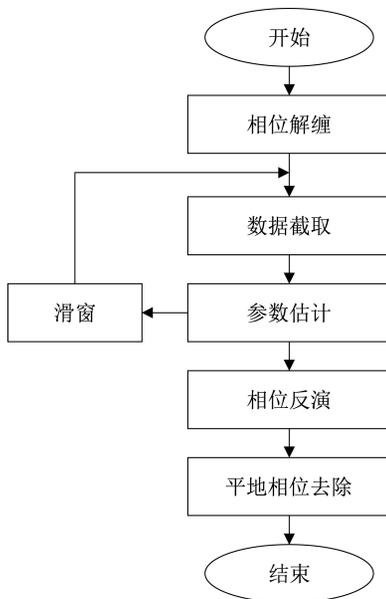


图 3 平地相位去除方法流程

Fig. 3 Flow chart of the flat earth phase removal method

**步骤 1** 对原干涉相位进行相位解缠,得到无跳变的绝对相位。此步骤中,若相位变化较快导致直接解缠存在问题,可以先去除一假设的理想平地相位再进行相位解缠,通过迭代方式逐步逼近。

**步骤 2** 保证样本数量足够和地距近似不变的假设成立的条件下合理选取距离窗长,在解缠后干涉相位距离向滑窗截取数据。

**步骤 3** 对于每个方位时刻,利用距离窗内干涉相位,使用最小二乘法估计距离窗中心的因子 $\alpha(\eta)$ 。

**步骤 4** 利用得到的因子 $\alpha(\eta)$ 与距离窗中心对应的斜距反演平地相位 $\Delta\varphi$ 。

**步骤 5** 从原干涉相位中去除估计得到的平地相位。

## 4 仿真试验及结果分析

### 4.1 仿真结果

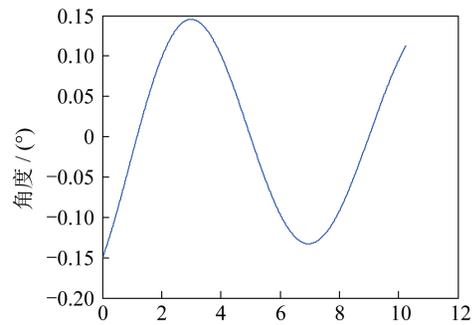
采用了一组 X 波段机载 SAR 参数在低噪声条件下仿真验证了本文所提平地相位去除方法,仿真场景为一理想平地,场景中心设有一运动目标,其径向速度对应的 ATI 干涉相位为 $\pi/2$  rad。仿真使用的参数见表 1。

表 1 仿真参数

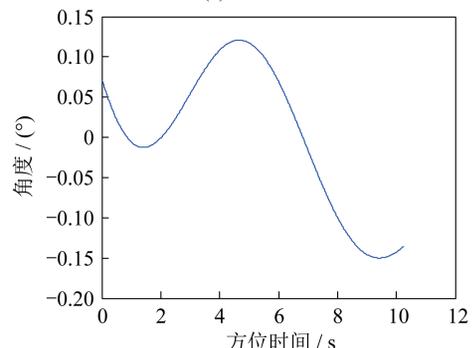
Tab. 1 Simulation parameters

参数	数值
景中心斜距/km	20
有效雷达速度/(m·s <sup>-1</sup> )	150
雷达高度 km	10
中心频率/GHz	5.3
距离采样率/MHz	60
PRF/Hz	100
基线长度/m	10

俯仰角和偏航角变化曲线如图 4 所示,随方位时间的变化,俯仰角和偏航角在 $0^\circ$ 附近有微小变化。



(a) 俯仰角变化



(b) 偏航角变化

图 4 俯仰角、偏航角变化

Fig. 4 Change curves of the pitch angle and yaw angle

仿真得到的干涉相位如图 5 所示。图中可见,在这组仿真参数条件下,即使较小的俯仰角和偏航角误差也会引入较大的平地相位,场景中心处平地相位引起的相位误差达到约  $-2 \text{ rad}$ ,严重影响运动目标的速度反演。同时可以观察到由于场景较小,平地相位在距离向的变化较缓慢;而在方位向由于基线倾角变化导致的平地相位变化比较快,呈现与方位向平行的彩色条纹,并且由于相位缠绕的原因出现了相位跳变<sup>[20-21]</sup>。

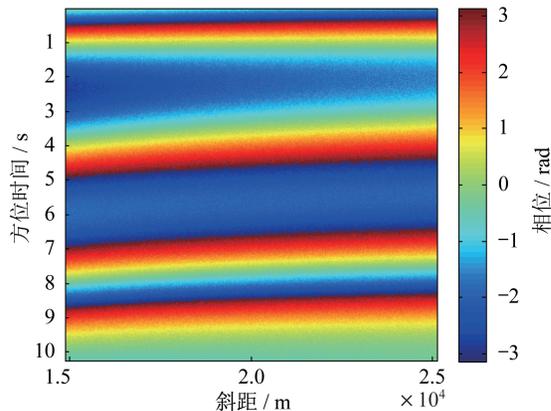


图 5 干涉相位

Fig. 5 Interferometric phase

由上文讨论可知,所提方法是基于解缠后的绝对相位,因此首先需要对原干涉相位进行解缠。由于设置的基线倾角误差较小,时变基线倾角导致的平地相位变化条纹并不算密集,相位解缠过程相对来说比较容易<sup>[23-25]</sup>,解缠后相位如图 6 所示。

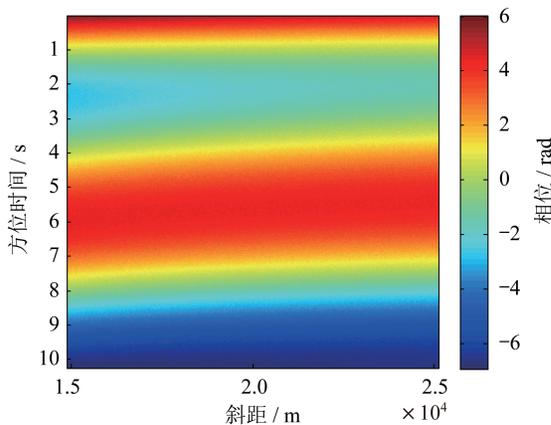


图 6 解缠相位

Fig. 6 Unwrapped phase

选取距离窗长 128 点,采用最小二乘法对解缠后相位进行参数估计,并进行平地相位反演,即可

得到平地相位估计结果。从原干涉相位中减去估计的平地相位后得到的结果如图 7 所示,可以看出随方位时间时变的平地相位已得到去除,设置的运动目标可以得到正确的检测和测速。

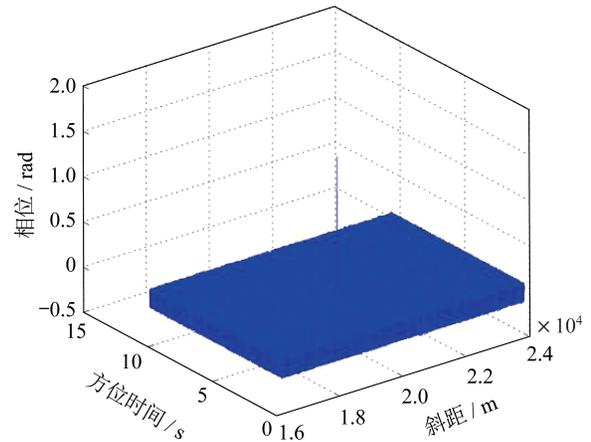


图 7 动目标显示

Fig. 7 Ground moving target indication

#### 4.2 结果分析

将通过本文方法得到的平地相位估计值与通过仿真参数得到的平地相位理论值相减,得到了平地相位反演误差,相对  $2\pi$  相位归一化后的相位反演误差如图 8 所示。图中可见,仿真中相对  $2\pi$  相位归一化后的相位误差低于 0.5%,说明本方法的平地相位估计精度较高,去除平地相位后可以满足对运动目标检测和测速的应用需求。

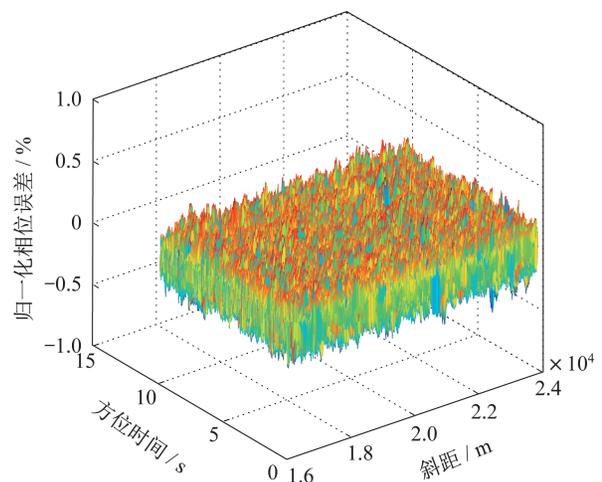


图 8 平地相位反演误差

Fig. 8 Inversion error of the flat earth phase

同时对同一幅干涉相位图采用不同的窗长进行了平地相位反演仿真,并计算均方误差以分析窗长选择对性能的影响。平地相位反演的均方误差随距离窗长变化的关系图如图 9 所示。图中可见,窗长较小和较大时平地相位反演误差将会快速上升,但总的来说选取窗长在 1 000 点以内平地相位反演的误差都是较小的,计算出的相位均方误差在  $2 \times 10^{-4}$  以内。发生误差上升的原因在于窗长过小时,样本数太少导致最小二乘估计的误差较大;而窗长过大时,由于窗内距离变化较大,前一节提出的一定距离变化范围内将地距视为近似不变的假设不再成立,最小二乘估计得到的结果也将偏离真实值。因此为使误差尽可能小,窗长不能取太大也不能取太小,合理选择窗长可以得到更好的平地相位去除性能。

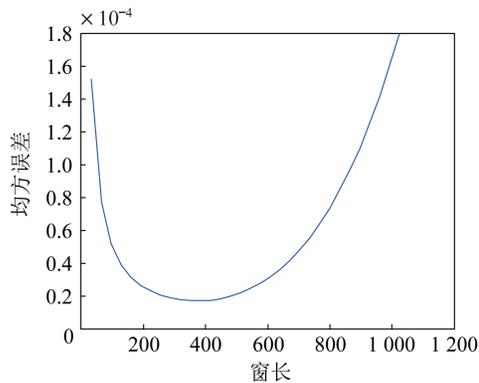


图 9 相位反演均方误差

Fig. 9 Inversion mean square error of the flat earth phase

## 5 结束语

本文分析了 ATI-SAR 在时变基线倾角影响下,其干涉相位中平地相位分量随方位时间、地距和斜距变化的关系。基于在一定距离变化范围内,可以将地距视为近似不变的假设下,提出一种基于回波数据的平地相位校正方法。该方法通过在解缠绕后的干涉相位的距离向进行滑窗,并使用最小二乘法估计和反演平地相位,从而将其去除。在理想平地假设的场景下,利用仿真数据对该方法进行了验证和误差分析,结果表明本文提出的方法具有较高的估计精度,去除时变平地相位后静止目标的干涉相位恢复到零附近,不再干扰对运动目标的检测和测速,且由于不存在分块和迭代的操作,此方法的处理效率较高。但是本文仅使用仿真的平地场景进行了验证,本方法在实测数据和复杂地形下的性能还有待进一步研究和改进。

## 参考文献

- [ 1 ] WANG H, ZHAO F J, DENG Y K. Development and application of the millimeter wave SAR [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2015, 34(4): 452-459.
- [ 2 ] WANG H, ZHANG H, DAI S, et al. Azimuth multichannel GMTI based on Ka-Band DBF-SCORE SAR system [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2018, 15(3): 419-423.
- [ 3 ] CUMMING I G, WONG F H. 合成孔径雷达成像:算法与实现[M]. 洪文, 胡东辉, 译. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [ 4 ] SHERWIN C W, RUINA J P, RAWCLIFFE R D. Some early developments in synthetic aperture radar system [J]. *IRE Trans on MIL*, 1962, 6(2): 111-115.
- [ 5 ] WU D, YAGHOUBI M, DAVIES M E. Sparsity-driven GMTI processing framework with multichannel SAR [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 57(3): 1434-1447.
- [ 6 ] ALDHARRAB A, DAVIES M E. Multichannel coprime SAR/GMTI (CopGMTI) [C]// 2020 IEEE International Radar Conference (RADAR). 2020: 827-832.
- [ 7 ] ENDER J H G. Space-time processing for multichannel synthetic aperture radar [J]. *Electronics & Communication Engineering Journal*, 1999, 11(1): 29-38.
- [ 8 ] GOLDSTEIN R M, ZEBKER H. Interferometric radar measurement of ocean surface currents [J]. *Nature*, 1987, 328(6132): 707-709.
- [ 9 ] SUCHANDT S, EINEDER M, BREIT H, et al. Analysis of ground moving objects using SRTM/X-SAR data [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2006, 61(3/4): 209-224.
- [ 10 ] BREIT H, EINEDER M, HOLZNER J, et al. Traffic monitoring using SRTM along-track interferometry [C]// 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2003: 1187-1189.
- [ 11 ] BAMLER R, EINEDER M, KAMPES B, et al. SRTM and beyond: current situation and new developments in spaceborne InSAR [C]// Proceedings of the ISPRS Workshop on High Resolution Mapping from Space, University Hannover Germany, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing. 2003: 6-8.
- [ 12 ] ROMEISER R, SUCHANDT S, RUNGE H, et al. First analysis of TerraSAR-X along-track InSAR-derived current fields [J]. *IEEE Transactions on*

- Geoscience and Remote Sensing, 2009, 48 (2) : 820-829.
- [13] ROMEISER R, RUNGE H, SUCHANDT S, et al. Quality assessment of surface current fields from TerraSAR-X and TanDEM-X along-track interferometry and Doppler centroid analysis [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 52(5): 2759-2772.
- [14] CALDARELLA N, LOPEZ-DEKKER P, PRATS-IRAOLA P, et al. Retrieval of wind and total surface current vectors using experimental bidirectional along-track interferometric TanDEM-X data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60: 1-12.
- [15] RASHID M, GIERULL C H. Retrieval of ocean surface radial velocities with RADARSAT-2 along-track interferometry [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2021, 14: 9597-9608.
- [16] DA SILVA A B C, BAUMGARTNER S V, DE ALMEIDA F Q, et al. In-flight multichannel calibration for along-track interferometric airborne radar [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 59(4): 3104-3121.
- [17] 张慧,洪峻,王宇,等.机载顺轨干涉合成孔径雷达成标中地面控制点的布设策略研究[J].电子与信息学报, 2015(7):1816-1822.
- [18] 兰竹,袁运能,刘书君.一种 ATI相位误差的盲校正方法[C]//第十三届全国信号处理学术年会(CCSP-2007)论文集.2007:4.
- [19] 姜文,梁伟,吴一戎.机载顺轨干涉 SAR时变交轨基线校正算法[J].国外电子测量技术,2020,39(6):49-54.
- [20] ZHANG Y B, ZHANG J, MENG J M, et al. An improved frequency shift method for ATI-SAR flat earth phase removal [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2019, 38(8): 94-100.
- [21] LI H, LI Z F, LIAO G S, et al. An estimation method for InSAR interferometric phase combined with image auto-coregistration [J]. Science in China (Series F: Information Sciences), 2006(3): 386-396.
- [22] LI H, WU R B. An estimation method for InSAR interferometric phase using correlation weight joint subspace projection [J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2013, 2013(1): 1-11.
- [23] 吴思利,王辉,郑世超,等.Ka数字波束合成-合成孔径雷达顺轨干涉性能分析[J].上海航天,2021,38(1):72-79.
- [24] 索志勇.垂直航迹/沿航迹干涉合成孔径雷达信号处理技术研究[D].西安:西安电子科技大学,2008.
- [25] 邢孟道,保铮,李真芳,等.雷达成像算法进展[M].北京:电子工业出版社,2014.

(上接第 25 页)

- [17] JAMALI B, RAMALINGAM D, BABAKHANI A. Intelligent material classification and identification using a broadband millimeter-wave frequency comb receiver [J]. IEEE Sensors Letters, 2020, 4(7):1-4.
- [18] VIDHYA N, ONG L C, SIYAL M Y, et al. A 2D radon transformation for enhancing the detection and imaging of embedded defects in layered composite structures using millimeter-wave system [J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(14): 7750-7760.
- [19] 陈翔,王辉.调频连续波合成孔径雷达滑动聚束成像算法[J].上海航天,2019,36(5):107-114.
- [20] WU J X, DENG W, CHEN Z P, et al. A 77-GHz mixed-mode FMCW generator based on a vernier TDC with dual rising-edge fractional-phase detector [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2020, 67(1):60-73.
- [21] 李金亮,王辉,陈翔,等.Ka频段调频连续波 SAR卫星及关键技术[J].上海航天,2021,38(增刊1):56-60.
- [22] LIU K, YU W D, LV J Y. Azimuth interrupted FMCW SAR for high-resolution imaging [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2022, 19: 1-5.
- [23] YEGULALP A F. Fast back projection algorithm for synthetic aperture radar[C]// Proceedings of the 1999 IEEE Radar Conference. Radar into the Next Millennium (Cat. No.99CH36249). 1999: 60-65.
- [24] 刘艳芳,杨威,史瑛如,等.多角度毫米波 SAR数据处理方法研究[J].上海航天,2021,38(增刊1):78-85.
- [25] 李浩林,张磊,杨磊,等.一种改进的快速分解后向投影 SAR成像算法[J].电子与信息学报,2013,35(6): 1435-1441.