

面向多基线干涉 SAR 编队系统的 海表流速测量方法*

谢毓鸿^{1,2}, 郑明洁^{1†}, 王吉利¹, 李鸿祥^{1,2}, 徐开江¹, 罗超¹, 刘俭¹

(1 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100190;
2 中国科学院大学电子电气与通信工程学院, 北京 100049)
(2024 年 8 月 19 日收稿; 2024 年 12 月 19 日收修改稿)

Xie Y H, Zheng M J, Wang J L, et al. Ocean surface velocity measurement method for multibaseline interferometric SAR formation system[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2026, 43(5): 623-632. DOI: 10. 7523/j.ucas. 2024. 079.

摘要 分布式编队 SAR 通过顺轨干涉可实现海表流速测量, 然而交轨基线的存在使得干涉相位中叠加了平地效应、海浪波高和海面高程等相位, 难以直接通过干涉相位精确反演海表流速。针对此, 提出一种面向多基线干涉 SAR 编队系统的海表流速测量方法。首先, 基于波浪运动和噪声分布特点, 提出基于空间平均的海浪波高、大尺度波轨道速度和噪声相位的联合抑制方法, 有效抑制这些干扰项。然后, 针对径向流速相位和海面高程相位相互耦合问题, 提出基于多基线的海面径向流速和高程相位解耦方法, 通过引入另一干涉对提高数据处理自由度, 联合 2 组耦合干涉相位完成流速和高程相位的有效分离, 实现径向流速的高精度测量。最后, 使用宏图 1 号的实测数据验证所提方法的有效性。

关键词 分布式合成孔径雷达(SAR); 多基线干涉; 顺轨干涉(ATI); 海表流速测量; 相位解耦
中图分类号: P731. 21 **文献标志码**: A **DOI**: 10. 7523/j.ucas. 2024. 079

Ocean surface velocity measurement method for multibaseline interferometric SAR formation system

XIE Yuhong^{1,2}, ZHENG Mingjie¹, WANG Jili¹, LI Hongxiang^{1,2}, XU Kaijiang¹, LUO Chao¹, LIU Jian¹

(1 Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2 School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The distributed formation synthetic aperture radar (SAR) can achieve ocean surface velocity measurement through along-track interferometry. However, the existence of cross-track baselines introduces phase influences from flat earth effect, ocean wave height, and sea surface height into the interferometric phase, making it challenging to directly retrieve sea surface velocity accurately from the interferometric phase. This paper proposes a method for measuring ocean

* 民用航天预研项目(D010206)资助

† 通信作者, E-mail: zhengmj@aircas. ac. cn

surface velocity using a multibaseline interferometric SAR formation system. Firstly, considering the characteristics of wave motion and noise distribution in the scene, a joint suppression method for wave height phase, large-scale wave orbital velocity phase, and noise phase based on spatial averaging is proposed, which effectively suppresses these interferometric phases. Then, to address the coupling issue between the radial velocity phase and sea surface height phase, a method for decoupling the radial velocity phase and height phase based on multibaseline is introduced. By introducing another interference pair to improve the degree of freedom in data processing, the effective separation of these two phase terms is achieved through two sets of coupled interference phases, achieving high-precision measurement of radial flow velocity. Finally, the proposed method was validated using the measured data from the Hongtu-1 satellite, and the results proved the effectiveness of the proposed method.

Keywords distributed synthetic aperture radar (SAR); multibaseline interferometry; along-track interferometric (ATI); ocean surface velocity measurement; phase decoupling

海洋占据了地球表面71%的面积,及时有效地掌握海表面流场信息对航运业、渔业和气候环境研究等具有重要的意义。合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)作为一种可全天时、全天候工作的观测仪器在海洋观测应用中占有重要的地位。通过SAR进行海面流场反演可帮助人们获取大范围、高精度的海面流场信息^[1-2]。

当前SAR实现海表流场测量主要有多普勒质心偏移估计(Doppler centroid analysis, DCA)和顺轨干涉(along-track interferometric, ATI)2种方法。相较于DCA方法,ATI通常能够获得更高精度的海表流场产品,因而被认为是未来SAR实现海流测量的主要发展方向^[1]。1987年,Goldstein和Zebker^[2]提出SAR-ATI的概念,并通过机载SAR系统验证了SAR-ATI测流的可行性。2000年,Romeiser和Thompson^[3]发布SAR-ATI测流技术报告,分析了SAR主要系统参数和环境参数对测流精度的影响。2005年,Romeiser等^[4]对SRTM在荷兰西部瓦登海的ATI观测数据进行处理,并将流场反演结果与海洋环流模型KUSTWAD的参考值进行对比,结果表明,SRTM在1 km空间分辨率下的测流精度可达到0.2 m/s。2010年,Romeiser等^[5]对TerraSAR-X采用孔径切换模式获得的德国易北河ATI观测数据进行处理,流场反演结果表明,TerraSAR-X在1 km空间分辨率下的测流精度可达到0.1 m/s。

SAR-ATI海表流速测量精度与顺轨基线长度密切相关,通常星载SAR-ATI系统实现最佳测流精度所需具备的顺轨基线长度应为1 000~2 000倍雷达波长。但在当前工程实践中,单星SAR系统

难以实现符合该要求的顺轨基线,而分布式编队SAR依靠灵活的基线变化能力可较好地解决该问题^[6-7]。2010年以来,TanDEM-X和TerraSAR-X开始以“螺旋式”飞行编队执行对地干涉测量任务^[8];2023年,航天宏图公司的4颗宏图1号SAR卫星成功发射并运营,该卫星系统是全球第1个采用“车轮式”编队的多星分布式干涉雷达卫星系统^[9];此外,还有Cartwheel计划、Sentinel-1等SAR多星编队项目正在推进中^[8-11]。受制于平台飞行安全、轨道控制难度等因素,分布式编队SAR干涉基线同时包含了顺轨基线和交轨基线。交轨基线的存在使得干涉相位中叠加了平地效应、海浪波高和海面高程相位的影响,导致分布式编队SAR无法直接应用ATI方法实现海表流速的高精度反演。

2004年,Siegmund等^[12]使用机载混合基线SAR系统对德国海岸Wadden河口区域进行干涉测量,流场测量结果验证了混合基线干涉系统在测流应用中的可行性。2015年,Suchandt和Runge^[13]首次给出TanDEM-X双星干涉测流的数据处理结果,流场反演结果表明,该双星干涉编队在33 m空间分辨率下的测流精度可达到0.1 m/s。以上基于混合基线干涉对的流场测量方法均基于已知流场高程的特殊情况。而在一般情况下,海面高程也是一个未知量,即使能够得到流场高程,往往也存在高程误差,给流速反演带来误差。因此,如何分离干涉相位中的高程相位和流速相位变得至关重要。有学者提出可基于海面场景中已知速度和高程的合作目标间接得到海面高程,进而得到该海域的流速^[14]。但该方法仅能得到目标附近海面的高程和流速参数,且在实际情况

下难以找到满足要求的合作目标。还有学者基于轨道的配准,提出通过严格控制飞行轨迹使得交轨基线不会产生垂直基线分量,以此消除海面高程相位和海浪波高相位对测流带来的影响^[14]。但在实践中很难实现如此高控制精度的卫星或飞机飞行轨迹。因此,在混合基线干涉SAR测流应用中,高程和流速相位解耦合仍是一个难题。

本文从当前SAR的多星和编队化发展趋势出发,提出一种面向多基线干涉SAR编队系统的海表流速测量方法。首先基于场景中的波浪运动和噪声分布特点,提出基于空间平均的海浪波高、大尺度波轨道速度和噪声相位的联合抑制方法,实现这些干扰项的有效抑制;然后针对径向流速相位和海面高程相位相互耦合问题,提出基于多基线的径向流速和高程相位解耦合方法,通过引入另一干涉对提高数据处理自由度,联合2组耦合干涉相位完成流速和高程相位的有效分离,从而实现海表径向流速高精度测量,同时获取海面高程信息。

1 混合基线干涉SAR海表流速测量基本原理

1.1 混合基线干涉SAR海表流速测量几何模型

图1给出了混合基线SAR双星编队采用正侧视条带模式进行海表流场干涉测量的几何关系图^[15-16]。 P 为所观测海面某一目标点; P_0 为 P 在参考面上的投影; R 为主星与 P_0 间的最短斜距; θ 为雷达下视角; $R_1(t)$ 和 $R_2(t)$ 分别为 t 时刻主星和辅星与目标间的瞬时斜距; B_x 为交轨基线长度; B_A 为顺轨基线长度; α 为交轨基线与其在水平面投影的夹角; V 为雷达等效地面飞行速度; h 为目标 P 的高程; V_r 为目标 P 速度在雷达波束方向上的投影。

若该SAR编队采用“单发双收”信号收发模式,则目标点 P 的干涉相位可表示为^[15-17]

$$\varphi_P = -\frac{2\pi}{\lambda} \left[B_x \sin(\theta - \alpha) + \frac{h}{R \sin \theta} B_x \cos(\theta - \alpha) + \frac{B_A}{V} V_r \right], \quad (1)$$

其中 λ 为雷达波长。通过分析,在式(1)中,括号内的第1项是由平地效应所引起的相位项,其与交轨基线的水平基线分量有关;第2项为目标高度引起的相位项,其与交轨基线的垂直基线分量有关;第3项为目标径向速度分量引起的相位项,

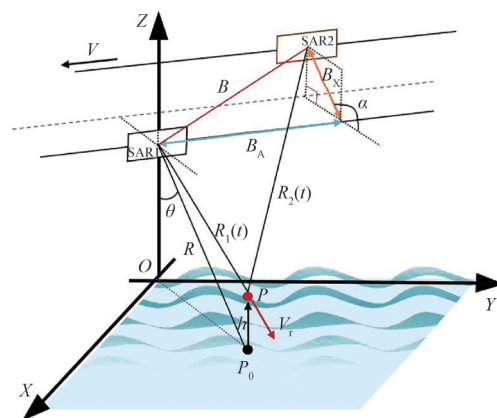


图1 混合基线SAR双星编队海表流速测量几何关系图

Fig. 1 Geometric relationship diagram for ocean surface velocity measurement using hybrid-baseline SAR dual-satellite formation

其与顺轨基线长度有关。

1.2 混合基线干涉SAR测流干涉相位成分分析

由于干涉基线同时包含交轨基线分量和顺轨基线分量,结合ATI海流测量、SAR海面测高以及物理海洋学的有关理论,目标 P 的干涉相位 φ_P 的相位组成成分^[16,18]可表示为

$$\varphi_P = \varphi_v + \varphi_c + \varphi_b + \varphi_f + \varphi_h + \varphi_H + \varphi_n, \quad (2)$$

其中, φ_f 为参考面带来的平地相位; φ_H 为海面高程带来的高程相位; φ_h 为波浪高度带来的海浪波高相位; φ_v 为海表径向流速分量带来的径向流速相位(这里将Stokes漂流也作为海表面流场的一部分); φ_c 为大尺度波轨道速度带来的相位; φ_b 为雷达观测特性引起的Bragg相速度带来的相位; φ_n 为系统和其他误差源带来的误差相位。

2 面向多基线干涉SAR编队系统的海表流速测量方法

基于上一节的论述,混合基线干涉SAR实现海表流速测量需抑制或去除干涉相位中除海表面径向流速相位项 φ_v 以外的其他干扰项,以此实现观测区域海表径向流速的高精度测量。本文所提算法流程图,如图2所示。首先根据干涉对基线参数选择2组干涉对;接着通过观测场景SAR图像切片提取海面场景主波浪波长,从而确定多视数并完成图像多视处理,通过该前置处理实现后续干涉中噪声相位、海浪波高相位和大尺度波轨道速度相位的联合抑制;然后分别对2组干涉对依次进行配准及重采样、干涉处理、去除平地效应

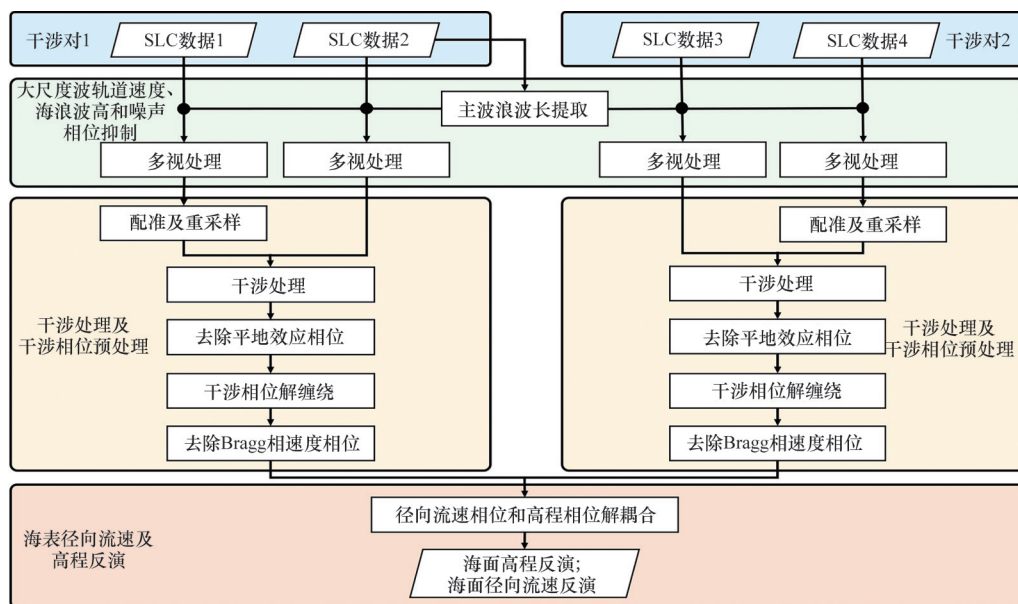


图2 算法处理流程图

Fig. 2 Flowchart of the proposed algorithm

相位和干涉相位解缠绕,接着去除 Bragg 相速度相位,完成 2 组干涉对的干涉处理及干涉相位预处理;最后根据得到的 2 幅干涉相位图进行流速和高程相位解耦合,进而得到观测场景的径向流速 V_r 和高程 H 。下面对所提算法进行详细介绍。

2.1 大尺度波轨道速度、海浪波高和噪声相位联合抑制

2.1.1 噪声相位抑制

在进行干涉处理前,受斑点噪声、数据处理噪声等因素的影响,干涉对图像进行干涉处理后会在干涉图中引入噪声相位,噪声相位会影响后续的干涉质量和干涉相位解缠绕的准确性,因此须对其进行有效抑制。在 SAR 对海观测干涉相位图中,通常可采用多视处理(等效于对干涉相位进行均值滤波)实现对噪声相位的抑制^[15,18],而在开阔海域,干涉相位中由海面高程和海表径向流速带来的相位项均可视为一个常数值^[18-20],因此,多视处理不会对海面高程相位和海表径向流速相位带来影响。

2.1.2 基于空间平均的大尺度波轨道速度和海浪波高相位抑制

如前所述,对 SLC 图像进行多视处理后再进行干涉处理可等效为在干涉相位图上进行均值滤波。而在干涉相位中,除噪声相位会影响相位解缠以外,相位中包含的大尺度波轨道速度相位和海浪波高相位不仅会对相位解缠过程造成影响,还会影响后续的径向流速反演,因此也需对它们进行抑制或去除。

由于大尺度波轨道速度在波浪传播方向上具有一定的周期性,通常采用对干涉相位进行空间平均的方法来实现对该相位项的抑制^[18]。根据线性海面理论,海面波浪可简化为无限多个不同振幅和波长的余弦谐波叠加,不同成分的谐波围绕平均海面上下波动^[18,20],因而海浪波高也可认为具有一定的周期性,同样可通过空间平均的方法对其实现有效抑制。因此,可根据观测区域海面场景的主波浪波长选择合适的多视视数(即空间平均尺度),以便在后续进行干涉处理的同时实现噪声相位、大尺度波轨道速度相位和海浪波高相位的联合抑制。根据经验,当空间平均尺度取海面主波浪波长的 2~4 倍及以上时即可有效抑制这 3 个干扰项。

2.1.3 海面主波浪波长获取

SAR 图像的 2 维图像谱可通过对地距投影后的 SAR 幅度图像 $I(m, n)$ 做 2 维傅里叶变换得到,可表示为

$$S(k_x, k_y) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} I(m, n) e^{-j\frac{2\pi}{M}k_x m} e^{-j\frac{2\pi}{N}k_y n}, \quad (3)$$

其中, M 和 N 分别表示图像数据的行数和列数, m 和 n 分别表示像素点在图像中的行值和列值, k_x 和 k_y 分别表示沿图像列方向(x 轴方向)和行方向(y 轴方向)的波数。2 维图像谱中各 2 维波数点处的幅度对应该谐波分量的波浪在波浪场中所占比重大小,因此 2 维图像谱中峰值点 $(k_{x\max}, k_{y\max})$ 对应的波长 L 即为图像场景中的最主要波浪波长^[21],可表示为

$$L = \frac{2\pi}{\sqrt{k_{x\max}^2 + k_{y\max}^2}}. \quad (4)$$

综上所述,根据观测海域主波浪波长、流场空间分辨率要求、流场测速精度要求和SAR图像分辨率,确定算法处理过程中的多视处理视数,即可实现对后续干涉相位中大尺度波轨道速度、海浪波高和噪声相位的联合抑制。

2.2 干涉处理及干涉相位预处理

2.2.1 图像配准及重采样

分布式编队SAR不同载荷对同一区域的观测图像会有一定的偏移,因此同一干涉对图像在进行干涉前需对图像进行配准和重采样,以实现图像亚像素级的对准,这里采用最大相干系数法完成图像的配准和重采样。

同一干涉对经配准和重采样的复图像共轭相乘后,再取复数相位角即可获得该干涉对的干涉相位。

2.2.2 去除平地效应相位

在干涉相位图中,距离向和方位向上会呈现有规律的条纹,这是由交轨基线中的水平基线分量引起的参考面相位。该相位项的存在会干扰后续的相位解缠绕以及流速反演。这里采用基于卫星精密轨道数据的平地相位去除方法^[22],将使用该方法得到的模拟平地相位从干涉相位中去除,即可得到平坦的干涉相位图。

2.2.3 干涉相位解缠绕

同一干涉对经干涉处理后得到的干涉相位为实际干涉相位 2π 的模,为使干涉相位和干涉过程的几何关系相对应,需对干涉相位进行恢复,即解缠绕。这里采用最小费用流算法完成干涉相位解缠绕,该方法通过将未解缠相位的相邻梯度差与解缠相位的相邻梯度差间的差异,即不连续性最小化,实现相位的解缠绕,具有极高的鲁棒性与准确性^[23]。

2.2.4 去除Bragg相速度相位

经过上述处理后,干涉相位中只剩下Bragg相速度、海面高程和海面径向流速带来的相位。其中,Bragg相速度可基于风向与Bragg相速度的经验关系进行估计和去除^[24],其可表示为

$$\Delta h = \frac{\lambda R_1 R_2 \sin \theta_1 \sin \theta_2 (B_{A1} \Delta \varphi_2 - B_{A2} \Delta \varphi_1)}{2\pi [B_{X1} B_{A2} R_2 \sin \theta_2 \cos(\theta_1 - \alpha_1) - B_{X2} B_{A1} R_1 \sin \theta_1 \cos(\theta_2 - \alpha_2)]}, \quad (10)$$

$$v_b = \sqrt{\frac{g}{|k_b|} + \frac{\tau_s |k_b|}{\rho}} \times \left[\frac{G(\theta_w) - G(\theta_w + \pi)}{G(\theta_w) + G(\theta_w + \pi)} \right], \quad (5)$$

$$G(\theta_w) = \cos^{2n} \left(\frac{\theta_w}{2} \right), \quad (6)$$

其中, g 为重力加速度; ρ 为海水密度; τ_s 为表面张力; k_b 为Bragg波波数矢量; θ_w 为雷达视线方向与风向的夹角; n 为扩展因子,与雷达载频有关,通常取2~5。

2.3 基于多基线的流速和高程相位解耦合

2.3.1 相位解耦合方法原理

完成上述处理后,观测场景内某一目标点 P 与参考控制点(即相位解缠绕过程中选取的陆地参考点)的相位差可表示为

$$\Delta \varphi = \Delta \varphi_h + \Delta \varphi_{V_r}, \quad (7)$$

其中, $\Delta \varphi_h$ 为 P 点高程与控制点高程差 Δh 引起的相位差; $\Delta \varphi_{V_r}$ 为目标径向速度 V_r 引起的相位差。

因此,目标点 P 的干涉相位可重新表示为

$$\Delta \varphi = -\frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{B_x \cos(\theta - \alpha)}{R \sin \theta} \Delta h + \frac{B_A}{V} V_r \right]. \quad (8)$$

这里的相位中仅包含目标 P 径向速度和高程带来相位,在一般情况下难以对这2个物理量引入的相位进行有效分离。而在3颗及以上SAR载荷组成的多星干涉编队中,载荷间两两组合可形成3组及以上的干涉对。这里只需选用其中的2组干涉对即可完成上述分离目标。由式(8)可得,观测场景内目标 P 在2组干涉对中的干涉相位可分别表示为

$$\begin{cases} \Delta \varphi_1 = -\frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{B_{X1} \cos(\theta_1 - \alpha_1)}{R_1 \sin \theta_1} \Delta h + \frac{B_{A1}}{V} V_r \right], \\ \Delta \varphi_2 = -\frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{B_{X2} \cos(\theta_2 - \alpha_2)}{R_2 \sin \theta_2} \Delta h + \frac{B_{A2}}{V} V_r \right]. \end{cases} \quad (9)$$

其中, R_1 和 R_2 分别为2组干涉对中目标 P 在参考面上的投影 P_0 与主星间的最短斜距; B_{X1} 和 B_{X2} 分别为2组干涉对的交轨基线长度; α_1 和 α_2 分别为2组干涉对的交轨基线与其在水平面投影的夹角; B_{A1} 和 B_{A2} 分别为2组干涉对的顺轨基线长度; θ_1 和 θ_2 分别为2组干涉对中主星雷达波束相对于 P_0 的下视角。通过求解式(9)即可得到 P 点的相对高度 Δh 和径向速度 V_r ,它们可分别表示为

$$V_r = -\frac{\lambda V \Delta \phi_1}{2\pi B_{A1}} - \frac{B_{X1} V \cos(\theta_1 - \alpha_1)}{B_{A1} R_1 \sin \theta_1} \Delta h. \quad (11)$$

2.3.2 基线配置对解耦合效果的影响

若式(9)为线性相关的方程组,式(10)的分母为0,该解耦方法会失效,而式(9)能否形成线性相关的方程组主要与2组干涉对的基线配置有关。因此,分析该方法实现最佳解耦合效果时2组干涉对所需具备的基线配置,可为后续通过该方法进行精确的流速反演提供支持。

在如表1所示的SAR系统初始参数条件下,分别以干涉对2的交轨基线长度、交轨基线倾角和顺轨基线长度为自变量,而其他参数不变,得到干涉对2的基线配置对流速和高程相位解耦

合效果的影响,如图3所示。结果表明,若干涉对2的基线配置使得式(9)越趋于线性相关的方程组,则解耦合效果越差,反之则解耦合效果越好;当其中一个干涉对的基线配置一定时,另一干涉对的基线长度越长,则解耦合效果越好,但基线的长度还应根据海面去相干时间、雷达波长等具体确定,已有学者针对此做了有益的工作,这里不做过多论述;此外,若2组干涉对的顺轨和交轨基线长度的模一致,则当 $B_{X1}B_{A1}$ 与 $B_{X2}B_{A2}$ 异号时解耦合效果更好。综上所述,当所选用的2组干涉对干涉基线以“L”形排列时(“L”可倾斜或顶点不相连),所提方法的解耦合效果最佳。

表1 系统参数设置
Table 1 System parameter setting

参数	参数值	参数	参数值
载频 f_c /GHz	9.6	平台等效地面速度 V /(m/s)	7 100
轨道高度 H /km	520	下视角 $\theta/(^{\circ})$	30
干涉对1交轨基线长度 B_{X1} /m	100	干涉对2交轨基线长度 B_{X2} /m	100
干涉对1夹角 $\alpha_1/(^{\circ})$	90	干涉对2夹角 $\alpha_2/(^{\circ})$	90
干涉对1顺轨基线长度 B_{A1} /m	50	干涉对2顺轨基线长度 B_{A2} /m	50
干涉对1相位误差 $\Delta\phi_1/(^{\circ})$	2	干涉对2相位误差 $\Delta\phi_2/(^{\circ})$	-2

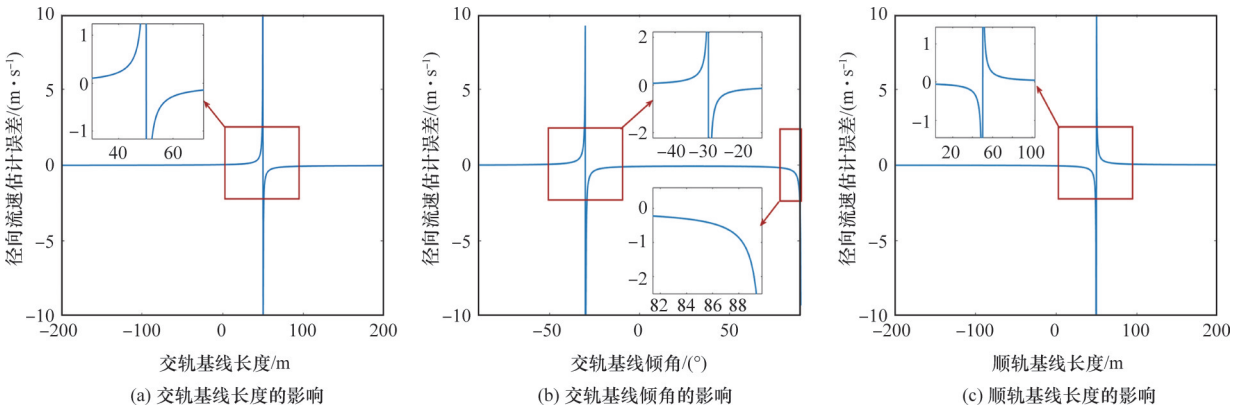


图3 干涉对2的基线配置对解耦合效果的影响

Fig. 3 Impact of baseline configuration of the second interferometric pair on decoupling effect

3 有效性验证

为验证所提方法的有效性,采用航天宏图公司提供的宏图1号4星观测数据对本文提出的方法进行验证。

3.1 宏图1号介绍

宏图1号星座由1颗主星和3颗辅星组成,如图4所示,主星在3颗以圆形阵列排列的辅星中间,组成“车轮式”的干涉编队。该星座运行于太阳同步轨道,轨道高度约为528 km,轨道回归周

期为15 d,轨道倾角为97.552°。搭载的SAR载荷工作波段为X波段,极化方式为HH,能够实现多种成像模式,具备高精度地形测绘、高分辨率宽幅成像、高精度形变检测以及3维立体成像等能力。

3.2 观测数据概况

所选用的数据为宏图1号采用4星干涉模式获取的澳大利亚西北部某海域观测数据(数据源于航天宏图),表2为观测场景及SAR系统的基本参数,图5为观测场景SAR影像。因为该星座由4颗SAR卫星组成,可由此获得6组干涉对,由各

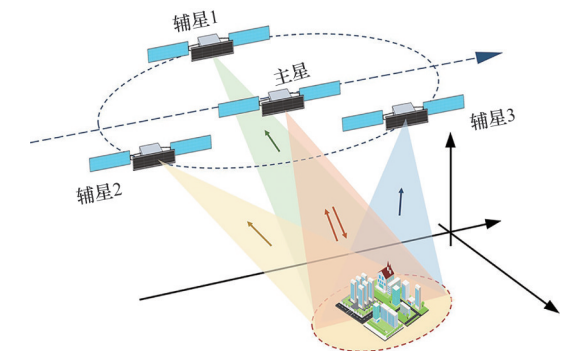


图4 宏图1号星座对地观测示意图

Fig. 4 Diagram of earth observation by Hongtu-1 constellation

表2 观测场景及SAR系统参数	
Table 2 Parameters of observing scene and SAR system	
参数	参数值
载频 f_c/GHz	9.6
轨道高度 H/km	520
平台等效地面速度 $V/(\text{m/s})$	7 070
下视角 $\theta/(^{\circ})$	33
景中心经度 $l(^{\circ})$	126.38
景中心纬度 $b(^{\circ})$	-13.93
观测区域尺度 $/\text{km}$	19×13(方向×距离向)

颗卫星的精密轨道数据可得到各组干涉对的基线参数。因干涉对的基线参数对本文所提方法的实现效果有较大影响,这里给出初始时刻各组干涉对的基线配置情况,如表3所示。

3.3 数据处理

根据本文所提方法对2组干涉对的基线配置要求,这里选用A-B干涉对和C-D干涉对进行后续处理。由2组干涉对的相干系数图(图6(a)和6(b))可以看出,在进行多视处理前2组干涉对均具有良好的相干性。由于2组干涉对的基线参数差异,A-B干涉对由于其较长的顺轨基

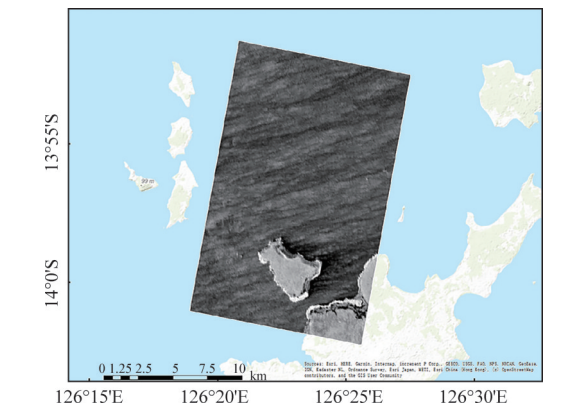


图5 宏图1号澳大利亚西北部某海域观测影像

Fig. 5 Observation image of the Hongtu-1 in a sea area in northwest Australia

线长度和较短的交轨基线长度使得干涉对的相干系数呈现陆地场景相干性高而海面场景相干性低的情况;而C-D干涉对则因较短的顺轨基线长度和较长的交轨基线长度使得干涉对的相干系数呈现陆地场景相干性低而海面场景相干性高的情况。对选取的SLC影像距离和方位向分别做50视的多视处理后,再对2组干涉对分别进行图像配准及重采样、干涉处理、去平地效应相位和干涉相位解缠绕后得到的2幅干涉相位图,分别如图6(c)和6(d)所示,由这2幅干涉相位图可看出2组干涉对均实现了较好的干涉处理效果。

根据欧洲中期天气预报中心ERA5数据集提供的观测区域风场信息去除海洋场景干涉相位中的Bragg相速度相位后,应用本文所提的高程和径向流速相位解耦合方法对2幅干涉相位图进行解耦合处理,解耦合后得到的场景径向流速(已投影到地距)和高程反演结果,分别如图7(a)和7(b)所示。

3.4 处理结果分析

对于观测场景中陆地场景的反演结果,通过对比 TanDEM-X 90 m 数字高程模型 (digital

表3 初始时刻各干涉对干涉基线配置		
Table 3 Initial interference baseline configuration for each interference pair		
干涉对	参数	参数值
A-B	交轨基线长度 B_{X1}/m	228.39
	夹角 $\alpha_1/(^{\circ})$	28.23
	顺轨基线长度 B_{A1}/m	-96.12
A-C	交轨基线长度 B_{X2}/m	434.67
	夹角 $\alpha_2/(^{\circ})$	-108.35
	顺轨基线长度 B_{A2}/m	-955.15
A-D	交轨基线长度 B_{X3}/m	359.29
	夹角 $\alpha_3/(^{\circ})$	-58.93
	顺轨基线长度 B_{A3}/m	-1 002.20
干涉对	参数	参数值
B-C	交轨基线长度 B_{X4}/m	630.73
	夹角 $\alpha_4/(^{\circ})$	-121.18
	顺轨基线长度 B_{A4}/m	-899.07
B-D	交轨基线长度 B_{X5}/m	416.12
	夹角 $\alpha_5/(^{\circ})$	-92.19
	顺轨基线长度 B_{A5}/m	-905.41
C-D	交轨基线长度 B_{X6}/m	722.33
	夹角 $\alpha_6/(^{\circ})$	-31.74
	顺轨基线长度 B_{A6}/m	-6.31

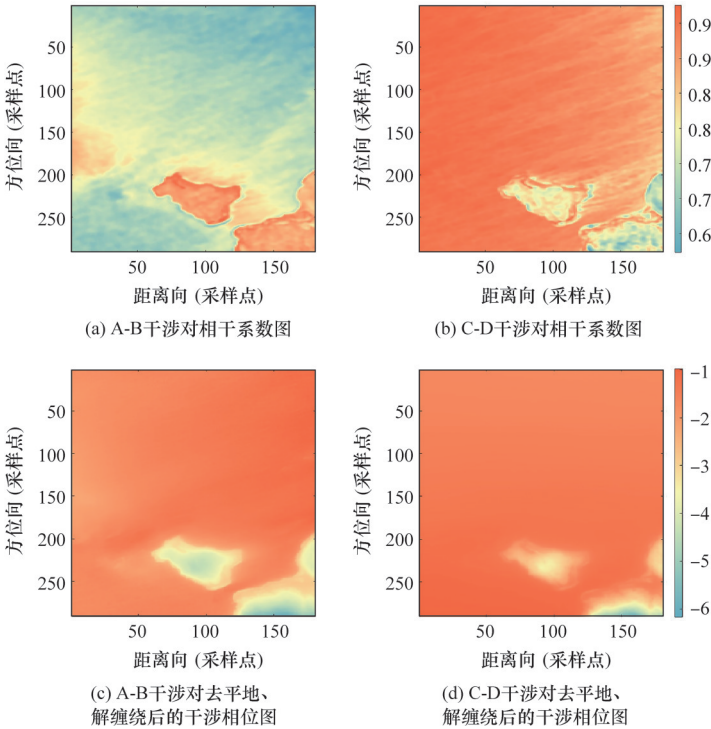


图6 A-B干涉对和C-D干涉对的干涉处理过程
Fig. 6 Interferometric processing of A-B and C-D pairs

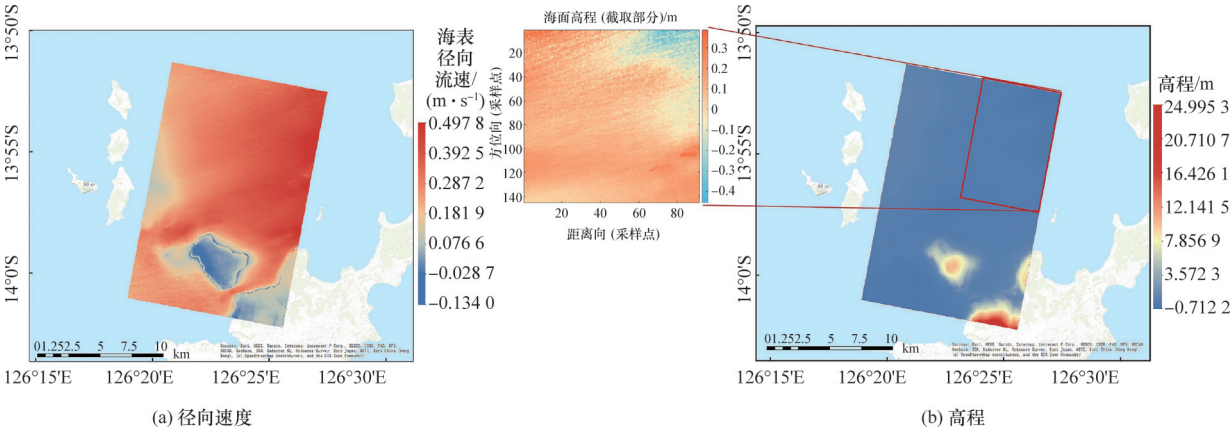


图7 观测场景径向速度和高程反演结果

Fig. 7 Observation scene radial velocity and elevation inversion results

elevation model, DEM)数据,图 8(a)为高程反演结果与参考 DEM 间的高程差值分布图,高程差值均值为 -0.1107 m ,均方差为 0.8793 m 。由于 2 组干涉对涉及的 4 个 SAR 载荷不同,干涉相位中存在无法消除的系统误差,这表现为反演结果中陆地场景微小的径向流速,其均值为 -0.0227 m/s ,均方差为 0.0545 m/s ,2 个值均接近 0 m/s 。由上述论述可得,本文所提方法对静止场景具有良好的解耦合高程反演能力。

对于观测场景中海洋场景的反演结果,图 8(b)为海面高程反演结果分布图,其中红实线表示均值,2 条红虚线之间为标准差区间(下

同),反演得到的海面高程主要分布在 $-0.30\sim 0.80\text{ m}$,平均海面高程为 0.21 m ,与 Google Earth 中提供的该海域平均海面高程 0 m 相近(Google Earth 相对高程分辨率为 1 m)。因未能获取该海域高分辨率真实流场数据,这里使用美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)提供的 $0.08^\circ\times 0.08^\circ$ 空间分辨率(约 $9\text{ km}\times 9\text{ km}$)的 RFOT 流速数据对流速反演结果进行验证。因该数据空间分辨率较低,这里根据该数据的特点将观测场景分为 2 块区域,如图 8(c)所示。其中区域 1 仅包含海洋场景,区域 2 同时包含陆地场景和海洋场

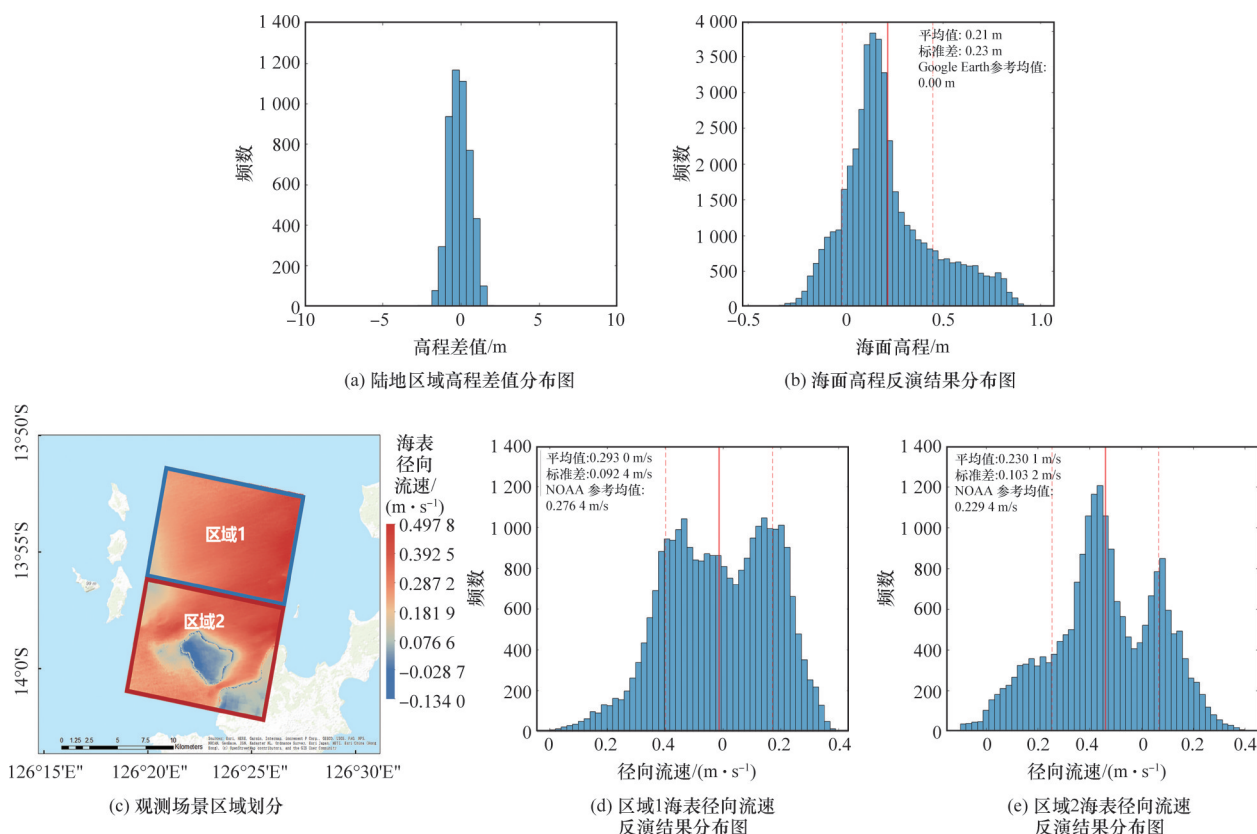


图8 反演结果分析

Fig. 8 Analysis of inversion results

景。分别对这两块区域的海表径向流速反演结果进行统计分析,图8(d)和8(e)分别为这2块区域的海表径向流速反演结果分布图。从整体来看,反演得到的海表径向流速主要分布在0~0.5 m/s。分区域来看,区域1和区域2的径向流速均值分别为0.293 0和0.230 1 m/s,与NOAA提供的0.276 4和0.229 4 m/s参考值相差较小。以上分析证明了本文所提方法的有效性。区域2中有部分近岸海域的径向流速反演结果出现异常,其原因在于:干涉对图像经多视处理(即干涉相位均值滤波)后,2个干涉对近岸海域干涉相位中均混入了岸边陆地高程相位,进而导致解耦合后径向流速反演异常。另外,结合观测区域及其附近区域的地理环境对反演得到的径向流速进行分析,该区域海水的参考流向大致为正东方向,从海表径向流速反演结果可观察到:海水流经狭窄水道时流速加快;流动过程中遇到障碍时流速减慢;海岛背离海水流向一侧的近岸海域径向流速趋近于0 m/s,这些现象与海水的流动特性相符。

另外需要说明的是,本文所提出的方法主要面向海面径向流速反演,这里保留并分析陆地场景的反演结果是为了在海洋场景的径向流速和

高程反演结果得不到足够分辨率实际参考数据进行验证的情况下,通过陆地无运动速度场景的反演结果间接证明算法反演结果的可靠性。而基于多基线干涉SAR实现高精度的陆地高程测量,已有学者开展了有益的研究,在此不做过多介绍。

4 结束语

本文针对当前分布式编队SAR海表流速测量精度低的问题,提出一种面向多基线干涉SAR编队系统的海表流速测量方法。首先,基于波浪运动和噪声分布特点,提出基于空间平均的海浪波高、大尺度波轨道速度和噪声相位的联合抑制方法,有效抑制了这些干扰项对测流带来的影响。然后,针对径向流速相位和海面高程相位相互耦合问题,提出基于多基线的径向流速和高程相位解耦合方法,通过引入另一组干涉对提高数据处理自由度,联合2组耦合干涉相位完成流速和高程相位的有效分离,进而实现海表径向流速高精度测量,并分析干涉对基线配置对该方法解耦合效果的影响。使用宏图1号卫星的实际观测数据验证了本文所提方法的有效性。本文所提方法受图像重采样配准步骤和干涉相位解缠步骤运算量的影

响,算法总体复杂度可表示为 $O(M \times N)^{[25]}$,目前还未能实现星上实时处理,未来可通过数据并行处理、提升星上处理资源配置等方法来实现该目标。

感谢航天宏图提供的宏图 1 号 4 星干涉数据。

参考文献

- [1] 何宜军, 刘保昌, 张彪, 等. 海面流场卫星遥感方法综述[J]. 广西科学, 2015, 22(3): 294-300. DOI:10.13656/j.cnki.gxkx.2015.03.005.
- [2] Goldstein R M, Zebker H A. Interferometric radar measurement of ocean surface currents[J]. Nature, 1987, 328(6132): 707-709. DOI: 10.1038/328707a0.
- [3] Romeiser R, Thompson D R. Numerical study on the along-track interferometric radar imaging mechanism of oceanic surface currents[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(1): 446-458. DOI: 10.1109/TGRS.2000.823940.
- [4] Romeiser R, Breit H, Eineder M, et al. Current measurements by SAR along-track interferometry from a Space Shuttle[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43(10): 2315-2324. DOI: 10.1109/TGRS.2005.856116.
- [5] 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, 2010, 48(2): 820-829. DOI: 10.1109/TGRS.2009.2030885.
- [6] Wollstadt S, López-Dekker P, De Zan F, et al. Design principles and considerations for spaceborne ATI SAR-based observations of ocean surface velocity vectors[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55(8): 4500-4519. DOI: 10.1109/TGRS.2017.2692880.
- [7] 闫贺, 朱岱寅. 星载 ATI-SAR 系统洋流测速要点分析与仿真[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(10): 3861-3868, 3874. DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201810032.
- [8] 尹建凤, 张庆君, 刘杰, 等. 国外编队飞行干涉 SAR 卫星系统发展综述[J]. 航天器工程, 2018, 27(1): 116-122. DOI: 10.3969/j.issn.1673-8748.2018.01.016.
- [9] Zhang T, Qian Y G, Li C M, et al. Imaging and interferometric mapping exploration for PIESAT-01: the world's first four-satellite "Cartwheel" formation constellation[J]. Atmosphere, 2024, 15(6): 621. DOI: 10.3390/atmos15060621.
- [10] Massonnet D. Capabilities and limitations of the interferometric cartwheel[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(3): 506-520. DOI: 10.1109/36.911109.
- [11] Torres R, Lokas S, Di Cosimo G, et al. Sentinel 1 evolution: Sentinel-1C and Sentinel-1D models[C]//2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). July 23-28, 2017, Fort Worth, TX, USA. IEEE, 2017: 5549-5550. DOI: 10.1109/IGARSS.2017.8128261.
- [12] Siegmund R, Bao M Q, Lehner S, et al. First demonstration of surface currents imaged by hybrid along- and cross-track interferometric SAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(3): 511-519. DOI: 10.1109/TGRS.2003.817816.
- [13] Suchandt S, Runge H. Ocean surface observations using the TanDEM-X satellite formation[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2015, 8(11): 5096-5105. DOI: 10.1109/JSTARS.2015.2446893.
- [14] Jing K, Xu J, Huang Z Z, et al. GMTI for squint looking XTI-SAR with rotatable forward-looking array[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2016, 16(6): 873. DOI: 10.3390/s16060873.
- [15] 杨红磊, 彭军还, 康志忠, 等. InSAR 技术原理及实践[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- [16] Elyouncha A, Eriksson L E B, Romeiser R, et al. Measurements of sea surface currents in the Baltic Sea region using spaceborne along-track InSAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019, 57(11): 8584-8599. DOI: 10.1109/TGRS.2019.2921705.
- [17] 王欣, 洪峻. 基于机载 ATI-SAR 相位中心误差分析的天线系统结构设计[J]. 中国科学院研究生院学报, 2013, 30(2): 228-232, 256. DOI: 10.7523/j.issn.1002-1175.2013.02.013.
- [18] 袁新哲, 王小青, 赵良波, 等. 顺轨干涉合成孔径雷达海面流测量原理、方法与信号仿真[M]. 北京: 海洋出版社, 2022.
- [19] 陆翔, 张庆君, 董晓, 等. 基于总变分的干涉成像高度计相位滤波方法[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(3): 1044-1051. DOI:10.11999/JEIT210135.
- [20] Rizaev I G, Karakuş O, Hogan S J, et al. Modeling and SAR imaging of the sea surface: a review of the state-of-the-art with simulations[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2022, 187: 120-140. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2022.02.017.
- [21] Shao W Z, Zhang Z, Li X F, et al. Ocean wave parameters retrieval from Sentinel-1 SAR imagery[J]. Remote Sensing, 2016, 8(9): 707. DOI: 10.3390/rs8090707.
- [22] Cao Y X, Fan Z, Chen Y, et al. Flat earth removal and baseline estimation based on orbit parameters using Radarsat-2 image[C]//2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). July 21-26, 2013, Melbourne, VIC, Australia. IEEE, 2013: 346-349. DOI: 10.1109/IGARSS.2013.6721163.
- [23] Costantini M. A novel phase unwrapping method based on network programming[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(3): 813-821. DOI: 10.1109/36.673674.
- [24] Moller D, Frasier S J, Porter D L, et al. Radar-derived interferometric surface currents and their relationship to subsurface current structure[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1998, 103(C6): 12839-12852. DOI: 10.1029/98je00781.
- [25] 徐璟, 何明浩, 陈昌孝, 等. 雷达辐射源特征参数提取算法复杂度分析[J]. 中国电子科学研究院学报, 2013, 8(1): 43-47. DOI:10.3969/j.issn.1673-5692.2013.01.009.