

张佳辉, 苗洪利, 杨忠昊, 等. 基于 SAR 子孔径分解的海表面二维流场反演[J]. 海洋学报, 2023, 45(8): 24–30, doi:10.12284/hyxb2023094
Zhang Jiahui, Miao Hongli, Yang Zhonghao, et al. Two-dimensional sea surface current field inversion based on SAR sub-aperture decomposition[J]. Haiyang Xuebao, 2023, 45(8): 24–30, doi:10.12284/hyxb2023094

基于 SAR 子孔径分解的海表面二维流场反演

张佳辉¹, 苗洪利^{1*}, 杨忠昊¹, 刘昆池¹

(1. 中国海洋大学 信息科学与工程学部 物理与光电工程学院, 山东 青岛 266100)

摘要: 对 Radarsat-2 和 Sentinel-1A 分别观测的两个海域的单景 SAR 图像进行子孔径分解, 各自得到不同方位角上的两幅 SAR 子孔径图像。使用多普勒质心频移法分别对不同方位角的两幅 SAR 图像进行海流反演, 并进行海流矢量合成, 采用经过时空匹配的 HYCOM 模式数据对反演结果进行检验, 结果表明: Radarsat-2 观测的 SAR 图像分解的两幅子孔径 SAR 图像矢量合成后的海流与 HYCOM 模式数据相比, 速度均方根值为 0.09 m/s, 相关系数为 0.64; 方向均方根值为 10.49°, 相关系数为 0.78。Sentinel-1A 观测的 SAR 图像分解的两幅子孔径 SAR 图像矢量合成后的海流与 HYCOM 模式数据相比, 速度均方根值为 0.06 m/s, 相关系数为 0.82; 方向均方根值为 2.85°, 相关系数为 0.86。由此可见, 基于单景 SAR 分解的两幅子孔径 SAR 图像可以有效反演二维海流。其反演精度与雷达视向和真实海流矢量的方向有关, 二者的角度越小, 反演海流矢量的精度越高。

关键词: SAR; 子孔径; 多普勒质心异常; 二维流场; HYCOM

中图分类号: P714⁺.1; P731.21 文献标志码: A 文章编号: 0253-4193(2023)08-0024-07

1 引言

洋流在全球海洋中无处不在, 深海不同区域的洋流将交换物质和能量, 对全球气候起到至关重要的作用。此外, 监测沿海水域的洋流有助于航行、海上油气田开发、渔业资源管理等。在观测大范围海表面流场方面, 星载合成孔径雷达(SAR)与漂流浮标和海流计相比具有独特的优势, 具有全天候的观测能力, 同时具有较高的空间分辨率, 是海洋微波遥感中观测海流的重要手段。

目前利用 SAR 反演海表面流有两种方法, 即多普勒质心频移法(DCA)和顺轨干涉测量法(ATI)。DCA 适用于单天线 SAR 图像, Chapron 等^[1]于 2005 年首次提出 DCA, 并对 ENVISAT ASAR 数据进行处理, 获得了墨西哥湾流附近的雷达视向海表面流速。

1987 年, NASA 喷气推进实验室的 Goldstein 和 Zebker^[2]首次提出了 ATI 测量高分辨率海面流的概念, 并通过空中飞行实验验证了这一概念的可行性, 该方法使用双天线获得的两幅相干 SAR 图像进行干涉处理, 可获得更高空间分辨率的海表面流速。2019 年, 我国高分三号(GF-3)卫星的 ATI 实验模式在中国胶州湾进行了第一次海面海流观测实验^[3]。

无论是 DCA 还是 ATI, 获得的均是雷达视向上的一维海表面流速。目前已有相关研究在探讨反演海表面二维流场。Yoshida 等^[4]于 2020 年通过仿真实验验证了如果子孔径方位角的一半大于 1.25°, 则可利用传统 ATI SAR 方法计算的距离向速度分量估算速度矢量, 并于 2021 年将子孔径分解法与 ATI 结合, 获得了河流的速度矢量^[5]。Li 等^[6]提出了一种用于轨道交叉星载 SAR 的二维海表面流场模拟方法。

收稿日期: 2022-12-30; 修订日期: 2023-03-23。

基金项目: 国家自然科学基金重点基金(62031005); 山东省自然科学基金(ZR2020MD097)。

作者简介: 张佳辉(1998—), 男, 山东省青岛市人, 主要从事海洋微波遥感研究。E-mail: zhangjiahui@stu.ouc.edu.cn

* 通信作者: 苗洪利(1964—), 男, 山东省青岛市人, 教授, 主要从事海洋微波遥感研究。E-mail: oumhl@ouc.edu.cn

本文基于单幅 Radarsat-2 和 Sentinel-1A SAR 图像, 利用子孔径分解方法获得不同方位向上的 SAR 图像, 进而分别采用 DCA 获得不同方位向上的海表面流速并将其矢量合成而得到二维流场, 本文使用 Chapron 等^[1]提出的 DCA 处理方法^[1], 处理流程来自文献 [7]。

2 方法

2.1 多普勒质心频移法

雷达视向多普勒质心频移 (f_{DC}) 可由以下几项组成^[8-10]:

$$f_{DC} = f_{geo} + f_{em} + f_{phys}, \quad (1)$$

$$f_{phys} = f_c + f_{wv}, \quad (2)$$

式中, f_{geo} 为地球与 SAR 观测平台相对运动引起的雷达视向多普勒频移, 通过简单计算即可获得; f_{em} 为 SAR 天线指向误差和平台波动引起的误差, 这些误差在陆地和海洋均存在, 由于在陆地没有风浪和海流的影响, 可以利用式 (1) 和陆地上的多普勒频移来计算 f_{em} , 并将其用于去除海洋区域成像数据中的 f_{em} ; f_{phys} 为海流引起的雷达视向多普勒频移 f_c 及风和波浪引起的雷达视向多普勒频移 f_{wv} 之和。一般认为 f_{wv} 由风导致的布拉格波相速度和波浪导致的大尺度波轨道速度等因素引起。去除 f_{wv} 一直以来是研究的热点。Mouche 等^[11]使用 Envisat ASAR 观测数据与 ECMWF 风场匹配, 拟合了一个 3 层神经网络模型 CDOP, 将风场 u_{10} 在 u 和 v 方向上的分量、雷达视向与风向的相对夹角 (φ)、雷达波入射角 (θ) 及极化方式 (PP) 作为输入, 可计算风和波浪引起的雷达视向多普勒频移 f_{wv} 。

本文在使用 CDOP 模型时, 采用 ECMWF 的 ERA5 风场数据。在通过卫星数据获得 f_{DC} 的基础上去除其他因素影响而得到海流引起的雷达视向多普勒频率 f_c , 进而推算出雷达视向海流速度并进行反投影得到地距海流速度。

2.2 子孔径分解法

单天线 SAR 数据只提供一个雷达视向的多普勒频率。本文首先进行子孔径分解处理, 获取不同方位角的子孔径 SAR 图像。

当雷达视向与卫星飞行方向正交 (正侧视) 时, 得出的多普勒频率 $f_d(t)$ 为^[12-13]

$$f_d(t) = \frac{2v_{sat}^2}{\lambda_0 r_0} t, \quad (3)$$

式中, λ_0 是 SAR 发射电磁波的波长; r_0 是天线与目标的距离; v_{sat} 为卫星平台速度; t 是合成孔径时间。

$f_d(t)$ 的取值范围为

$$-\frac{v_{sat}\Delta Y}{\lambda_0 r_0} \leq f_d(t) \leq \frac{v_{sat}\Delta Y}{\lambda_0 r_0}, \quad (4)$$

式中, ΔY 是 SAR 图像的方位向长度。通过方位向傅里叶变换进入距离-多普勒 (RD) 域, 基于中心多普勒频率将频域数据分为前视和后视对称的两部分。其各自对应的图像中心视向与全孔径雷达视向的夹角 φ_d 由下式给出:

$$\varphi_d = \text{atan} \left(\frac{v_{sat} t}{r_0} \right) = \text{atan} \left(\frac{f_d}{2F_0} \frac{c}{v_{sat}} \right), \quad (5)$$

式中, c 为光速; F_0 为 SAR 所发射电磁波的频率。

对分解的两部分数据分别进行方位向压缩处理, 可以得到不同方位角的子孔径 SAR 图像, 具体处理流程如图 1 所示。

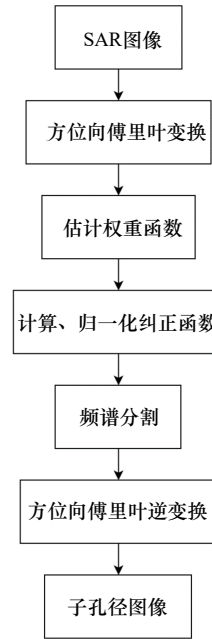


图 1 子孔径分解流程

Fig. 1 Sub-aperture decomposition flowchart

2.3 海流矢量合成

通过子孔径分解处理后, 得到不同方位角的 SAR 图像, 并通过 DCA 反演得到不同方位角的海面流速, 加之全孔径雷达视向流速进行矢量合成, 其矢量关系示意如图 2 所示^[14-15]。

$$u_f = \mathbf{u} \cos(\pi/2 - \alpha - \theta_s) = \mathbf{u} \sin(\alpha + \theta_s), \quad (6)$$

$$u_b = \mathbf{u} \cos(\pi/2 - \alpha + \theta_s) = \mathbf{u} \sin(\alpha - \theta_s), \quad (7)$$

$$u_a = \frac{u_f - u_b}{2 \sin \theta_s}, \quad (8)$$

$$\alpha = \arctan \left(\frac{u_f}{u_a} \right) = \arctan \left(\frac{2u_f \sin \theta_s}{u_f - u_b} \right), \quad (9)$$

式中, \mathbf{u} 表示海流矢量; u_a 为海流在方位向上的分量; u_f 为前视子孔径流速; u_b 为后视子孔径流速; u_r 表示海流在雷达视向上的分量; θ_s 表示前视子孔径方向和雷达视向的夹角, 同时也是后视子孔径与雷达视向的夹角; α 代表海流矢量与方位向夹角。通过联立上述公式即可求得二维海流矢量。

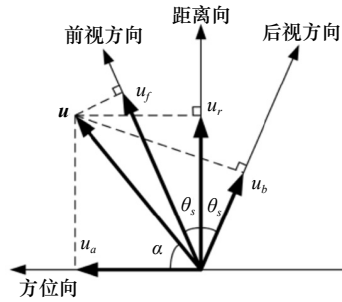


图 2 流速矢量几何关系

Fig. 2 Geometric relation of current velocity vector

3 结果与分析

3.1 数据

本文采用的数据为 Radarsat-2 卫星条带模式数据和 Sentinel-1A 卫星条带模式数据。图 3 为 Radarsat-2 卫星全孔径原始 SAR 图像, 图中陆地位于右上方。所使用的 SAR 数据是一幅升轨图像, 拍摄方向是右正侧视, 极化方式为 VV 极化。Radarsat-2 卫星拍摄时间为 UTC: 2020 年 5 月 24 日 9 时 28 分, 拍摄地点为台湾岛东南方。范围为 19.823 8°~20.960 6°N, 127.388 3°~128.634 1°E, 入射角近端为 24.00°, 远端为 31.25°, 图像大小为 156.56 km × 33.56 km, 方位向分辨率为 5.26 m, 距离向分辨率为 7.99 m。

图 4 为 Sentinel-1A 卫星全孔径原始 SAR 图像,

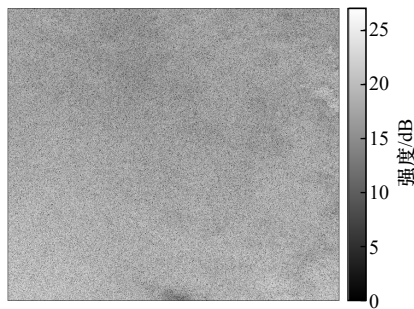


图 3 Radarsat-2 卫星全孔径 SAR 强度图

Fig. 3 Full-aperture SAR intensity image of Radarsat-2 satellite

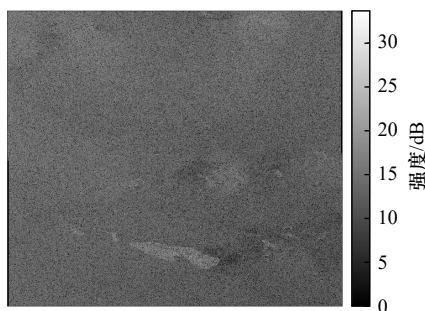


图 4 Sentinel-1A 卫星全孔径 SAR 强度图

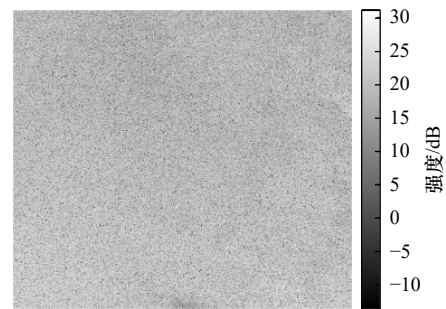
Fig. 4 Full-aperture SAR intensity image of Sentinel-1A satellite

图中陆地位于中下方。是一幅升轨图像, 拍摄方向是右正侧视, 极化方式为 VV 极化, Sentinel-1A 卫星拍摄时间为 UTC: 2023 年 2 月 8 日 9 时 44 分, 拍摄地点为澳大利亚北方。范围为 7.190 3°~8.507 3°S, 128.603 4°~129.322 8°E, 入射角近端为 29.10°, 远端为 34.70°, 图像大小为 130.96 km × 42.97 km, 方位向分辨率为 3.55 m, 距离向分辨率为 2.25 m。

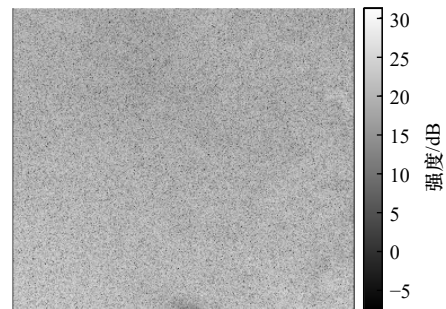
3.2 结果与分析

3.2.1 基于 Radarsat-2 卫星数据的处理及结果

将 Radarsat-2 卫星全孔径原始 SAR 图像分解为前视和后视两幅子孔径 SAR 图像, 如图 5 所示。以正北方向为参照, 全孔径 SAR 的雷达视向为 78.10°, 前视子孔径方位角为 76.22°, 后视子孔径方位角为 79.98°, 全孔径雷达视向与前视和后视子孔径方向各成 1.88° 夹角, 符合 Yoshida 等^[4]提出的角度需大于 1.25° 要求。



a. 前视子孔径图像



b. 后视子孔径图像

图 5 分解后各子孔径 SAR 图像

Fig. 5 SAR images of each sub-aperture after decomposition

使用 DCA 海流反演方法分别对图 4 和图 5 的 SAR 图像进行海流反演, 得到全孔径 SAR 图像雷达视向上的海流及前视子孔径和后视子孔径的海流, 其结果如图 6 和图 7 所示(其中全孔径 SAR 的雷达视向为 78.10° , 前视子孔径方位角为 76.22° , 后视子孔径方位角为 79.98°)。图中速度为正代表海流沿雷达视向方向传播, 速度为负代表海流逆雷达视向的方向传播)。对以上 3 个方向的海流进行矢量合成获得真实

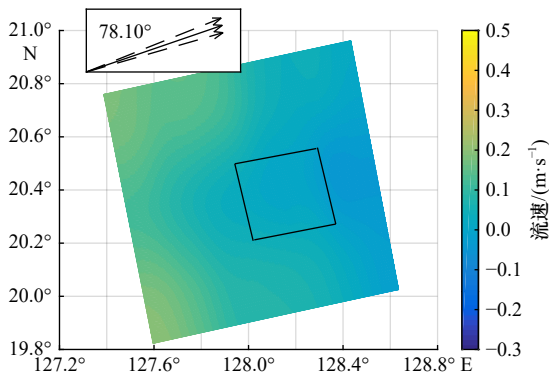
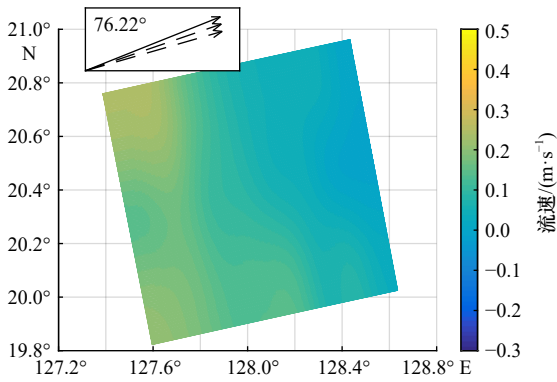
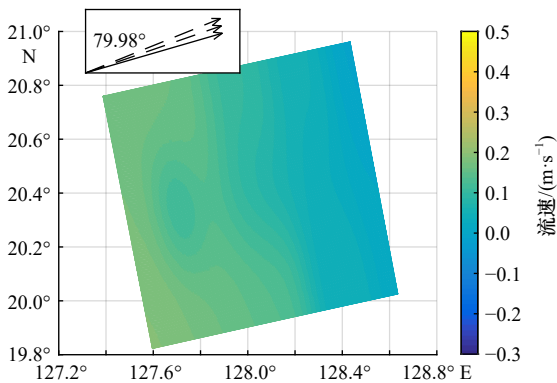


图 6 全孔径雷达视向海流
Fig. 6 Sea surface current at full-aperture radar looking direction



a. 前视子孔径海流



b. 后视子孔径海流

图 7 子孔径海表面流图

Fig. 7 Sea surface current of sub-aperture images

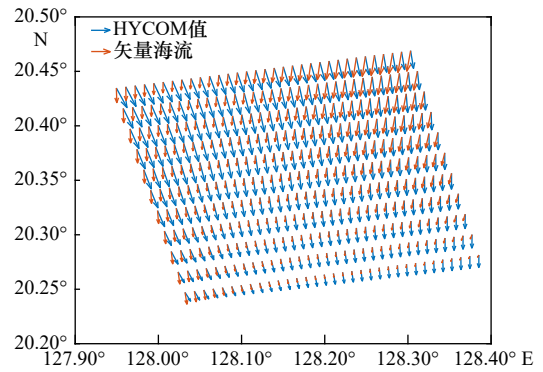


图 8 SAR 反演的海流矢量与 HYCOM 海流
矢量对比图

Fig. 8 Comparison diagram of SAR inverted current vector and HYCOM current vector

的海流大小和方向, 如图 8 中的红色箭头所示。基于子孔径分解的 DCA 反演海流会以牺牲分辨率为代价, 本文得到的海流矢量的方位向分辨率为 263 m, 距离向分辨率为 399 m。

基于反演的 SAR 图像区域的海流分布特点及所能获取的 HYCOM 有效值, 选取图像中心的区域作为对比检验区域, 如图 6 中黑线框所示。HYCOM 数据的时间分辨率为 3 h, 空间分辨率为 $(1/12)^\circ$ 。

对所选取的 HYCOM 海流值进行插值匹配, 见图 8 中的蓝色箭头。为清晰图示, 对数据进行抽样处理。箭头的长短为海流的大小, 箭头的方向为海流方向, 可以看出, 真实海流矢量的方向与全孔径雷达视向之间的夹角在 100° 左右。

从图 8 可以看出, 利用子孔径分解并合成获得的海流的速度和方向与 HYCOM 值相比具有较好的一致性, 二者的速度和方向的散点图如图 9 所示, 统计分析结果如表 1 所示。

结合图 9 和表 1 可以看出, 在对比区域中, 利用合成的海流矢量速度大小主要分布在 $0.1 \sim 0.2$ m/s 之间, HYCOM 值主要分布在 $0.2 \sim 0.3$ m/s 之间, 平均偏差为 -0.08 m/s。在方向上, 海流矢量主要分布在 $175^\circ \sim 185^\circ$ 之间, 而 HYCOM 值分布在 170° 附近, 方向偏差在 10° 左右。大小和方向的均方根差分别为 0.09 m/s 和 10.49° , 相关系数分别为 0.64 和 0.78。

3.2.2 基于 Sentinel-1A 数据的处理及结果

使用相同方法对 Sentinel-1A 数据进行处理, 全孔径雷达视向为 77.41° , 前视子孔径方位角为 75.65° , 后视子孔径方位角为 79.17° , 二者夹角为 3.52° , 同样满足矢量合成条件。合成海流矢量方位向分辨率为 112 m, 距离向分辨率为 177 m, 海流矢量与 HYCOM 数据对

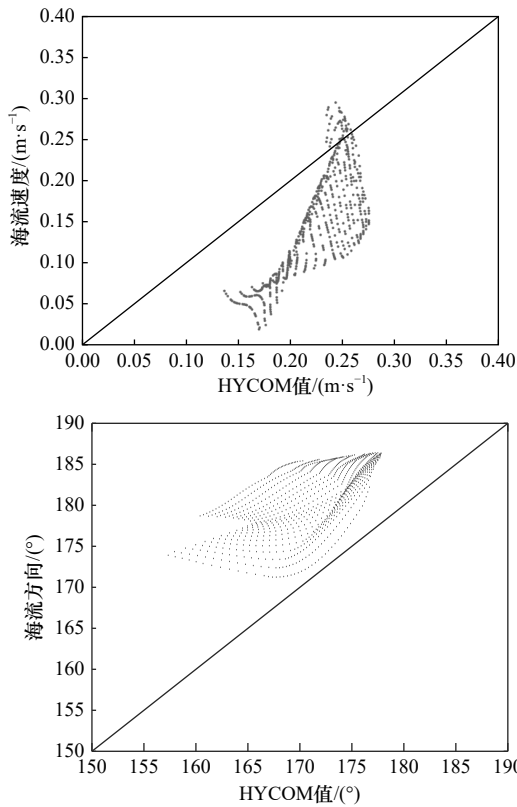


图 9 反演海流矢量与 HYCOM 值散点图
Fig. 9 Scatter plots of inverted current vector and HYCOM values

表 1 反演海流矢量与 HYCOM 值统计结果
Table 1 Statistical results of inverted current vector and HYCOM values

	速度	方向
平均偏差	-0.08 m/s	9.98°
均方根差	0.09 m/s	10.49°
相关系数	0.64	0.78

比如图 10 所示。选取 7.5°~7.7°S, 128.96°~129.18°E 为对比区域。二者的速度和方向散点图如图 11 所示, 统计结果如表 2 所示。

从图 10 可以看出, 真实海流矢量方向与全孔径雷达视向之间的夹角在 45°左右。

结合图 11 和表 2 可以看出, 在对比区域内, SAR 反演的海流矢量速度主要分布在 0.3~0.4 m/s 的区间内, HYCOM 值主要分布在 0.35~0.45 m/s 的区间内, 速度平均偏差为-0.05 m/s。在方向上, 海流矢量主要分布在 35°附近, 而 HYCOM 数据分布在 30°~35°区间内, 方向平均偏差在 2.72°。速度和方向的均方根差分别为 0.06 m/s 和 2.85°。二者速度和方向的各自相关系数分别为 0.82 和 0.86。

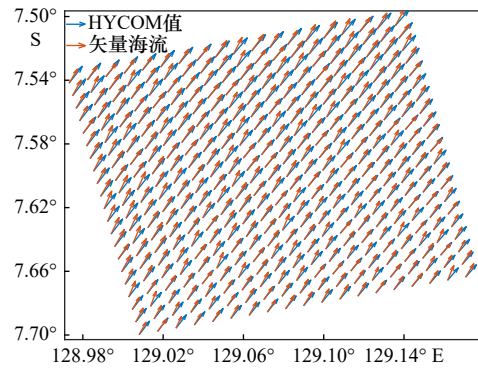


图 10 SAR 反演的海流矢量与 HYCOM 海流矢量对比图

Fig. 10 Comparison diagram of SAR inverted current vector and HYCOM current vector

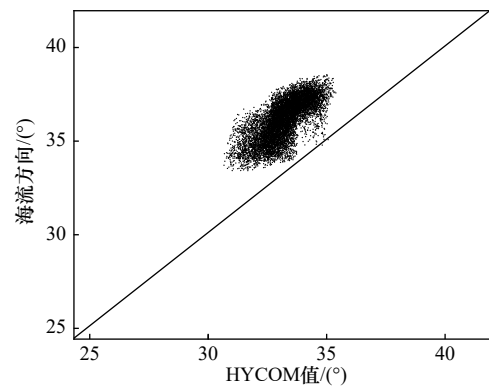
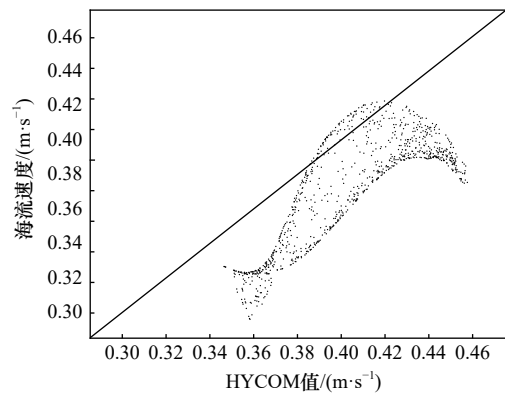


图 11 合成海流矢量与 HYCOM 值相关散点图
Fig. 11 Scatter plots of synthesized current vector and HYCOM values

4 结论

本文利用台湾岛附近海域的 Radarsat-2 数据和澳大利亚北方的 Sentinel-1A 数据, 通过 SAR 子孔径分解方法将单幅 SAR 图像分解为前视和后视两幅子孔径图像。利用多普勒质心频移法对全孔径 SAR 图像及两幅子孔径图像各自的方位角海流进行反演并做海流矢量合成, 获得了二维海表面流场。通过时空匹配的 HYCOM 模式数据检验可知, 两组数据在速度大

表 2 合成海流矢量与 HYCOM 值统计结果

Table 2 Statistical results of synthesized current vector and HYCOM values

	速度	方向
平均偏差	-0.05 m/s	2.72°
均方根差	0.06 m/s	2.85°
相关系数	0.82	0.86

小方面, 均方根差均小于 0.1 m/s, 在方向上, 误差基本在 10°以内。证实了利用 SAR 子孔径分解获取海流矢量方法的有效性。

参考文献:

- [1] Chapron B, Collard F, Arduin F. Direct measurements of ocean surface velocity from space: interpretation and validation[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2005, 110(C7): C07008.
- [2] Goldstein R M, Zebker H A. Interferometric radar measurement of ocean surface currents[J]. *Nature*, 1987, 328(6132): 707-709.
- [3] Yuan Xinzhe, Lin Mingsen, Han Bing, et al. Observing sea surface current by gaofen-3 satellite along-track interferometric SAR experimental mode[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, 14: 7762-7770.
- [4] Yoshida T, Ouchi K, Yang C S. Application of MA-ATI SAR for estimating the direction of moving water surface currents in Pi-SAR2 images[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, 14: 2724-2730.
- [5] Yoshida T, Ouchi K, Yang C S. Validation of MA-ATI SAR theory using numerical simulation for estimating the direction of moving targets and ocean currents[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2021, 18(4): 677-681.
- [6] Li Yan, Chong Jinsong, Li Zongze. A simulation method of two-dimensional sea-surface current field for trajectory crossing spaceborne SAR[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(12): 5900.
- [7] 侯富城, 孟俊敏, 张晰, 等. 利用多普勒频移反演ASAR海表面流速[J]. *海洋科学进展*, 2019, 37(2): 274-283.
Hou Fucheng, Meng Junmin, Zhang Xi, et al. Using the doppler shift method to retrieve the ASAR sea surface velocity[J]. *Advances in Marine Science*, 2019, 37(2): 274-283.
- [8] 张夏荣, 黄云仙, 赵现斌. 基于星载SAR多普勒速度反演海表流场算法的研究[J]. *气象水文海洋仪器*, 2016, 33(1): 1-7.
Zhang Xiarong, Huang Yunxian, Zhao Xianbin. Study of ocean surface current inversion algorithm based on space-borne synthetic aperture radar dopplervelocity[J]. *Meteorological, Hydrological and Marine Instruments*, 2016, 33(1): 1-7.
- [9] 杨小波. 基于ASAR的时变海表面流场反演研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2016.
Yang Xiaobo. Sea surface current retrieval based on ASAR data[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2016.
- [10] 宋小霞, 王静, 储小青. 基于多普勒频移的SAR海表流场反演[J]. *遥感技术与应用*, 2019, 34(2): 293-302.
Song Xiaoxia, Wang Jing, Chu Xiaoqing. Estimation of sea surface velocities from SAR images using the Doppler shift[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2019, 34(2): 293-302.
- [11] Mouche A A, Collard F, Chapron B, et al. On the use of Doppler shift for sea surface wind retrieval from SAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(7): 2901-2909.
- [12] 马琳, 潘宗序, 黄钟铃, 等. 基于子孔径与全孔径特征学习的SAR多通道虚假目标鉴别[J]. *雷达学报*, 2021, 10(1): 159-172.
Ma Lin, Pan Zongxu, Huang Zhongling, et al. Multichannel false-target discrimination in SAR images based on sub-aperture and full-aperture feature learning[J]. *Journal of Radars*, 2021, 10(1): 159-172.
- [13] Ferro-Famil L, Reigber A, Pottier E, et al. Scene characterization using sub-aperture polarimetric SAR data analysis[C]//Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Toronto: IEEE, 2002: 417-419.
- [14] Li Yan, Chong Jinsong, Sun Kai, et al. Accuracy and error analysis of vector measurement of ocean surface current by multi-aperture along-track interferometric SAR[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 207551-207562.
- [15] Li Yan, Chong Jinsong, Sun Kai, et al. Measuring ocean surface current in the kuroshio region using gaofen-3 SAR data[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(16): 7656.

从两组数据反演结果看, 全孔径雷达视向与真实海流方向的夹角大小直接影响海流矢量的合成精度, Sentinel-1A 图像二者夹角为 45°左右, 而 Radarsat-2 图像二者夹角为 100°左右, 明显前者反演的精度要优于后者。

除此之外, 子孔径 SAR 图像分解数量和彼此间的夹角也同样决定海流反演的精度, 数量越多、角度越大, 反演海流的精度应该越高。再之, SAR 图像和 HYCOM 的空间分辨率存在差异可能也是导致本文结果出现系统偏差的原因, 有待后续使用现场实测海流数据进行检验。

Two-dimensional sea surface current field inversion based on SAR sub-aperture decomposition

Zhang Jiahui¹, Miao Hongli¹, Yang Zhonghao¹, Liu Kunchi¹

(1. College of Physics and Optoelectronic Engineering, Faculty of Information Science Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Two single-scene SAR images observed by Radarsat-2 and Sentinel-1A were decomposed to obtain a pair of SAR sub-aperture images at different azimuth-angles, respectively. Doppler centroid anomaly method was used to invert the sea surface current of two sub-aperture images with different azimuth angles. The current field was obtained by vector synthesis. The inversion results were verified by the HYCOM model data with spatio-temporal matching. The results show that the root mean square (RMS) of the current velocity between the synthesized result by two sub-aperture images of Radarsat-2 and the HYCOM model data is 0.09 m/s, and the correlation coefficient is 0.64. The RMS of current direction is 10.49° and the correlation coefficient is 0.78 of this group data. As for the results of the Sentinel-1A image, the RMS of the current velocity is 0.06 m/s, and the correlation coefficient is 0.82. The RMS of the current direction is 2.85°, and the correlation coefficient is 0.86. It can be seen that the two-dimensional ocean currents field can be effectively inverted based on the two sub-aperture SAR images that decomposed from single-scene SAR image. The inversion accuracy is related to the relative direction of the radar's looking direction and the real current vector. The inversion accuracy of the sea surface current field can be higher when the relative angle is small.

Key words: SAR; sub-aperture; Doppler centroid anomaly; two-dimensional current field; HYCOM