

基于 ENVISAT ASAR 数据的 龙目海峡海表流场反演

李晴烁^{1,2}, 范陈清², 孟俊敏², 张 杰², 柯长青¹

(1. 南京大学 地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210023;

2. 自然资源部 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

摘 要: 基于 2003 年 5 月至 10 月 ENVISAT ASAR 宽幅模式 (Wide Swath Mode, WSM) 数据和 2003 年 11 月至 2004 年 5 月 ENVISAT ASAR 单视复数模式 (Image Mode SLC, IMS) 数据, 利用多普勒质心偏移法获取了海面运动引起的多普勒质心异常, 通过去除风和 Bragg 波引起的多普勒频移, 最终获得龙目海峡海表径向流速。利用 AVISO (Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic Data) 流场数据对结果进行了精度验证, 并分析了龙目海峡海表流速变化。结果表明: 本文反演得到的海表面流速与 AVISO 流场匹配度较好, 其中由 WSM 数据反演得到的流速与 AVISO 流场均方根误差为 0.28 m/s, IMS 数据反演得到的流速与 AVISO 流速均方根误差为 0.37 m/s。在研究区范围内, 2003 年 5 月至 9 月海流流速较大 ($-2.56 \sim 2.51$ m/s), 10 月流速减小 ($-0.79 \sim 0.72$ m/s), 11 月至 12 月流速逐月增大 ($-1.64 \sim 1.25$ m/s), 2004 年 3 月流速达到最低值 (-0.58 m/s), 2004 年 4 月至 5 月流速逐月增大 ($-1.46 \sim 1.72$ m/s); 在南半球夏季 (12 月) 和秋季 (5 月) 龙目海峡出现北向逆流, 其余皆为南向流。该流场反演方法可有效提取海面流速信息, 从而为海面流场变化研究提供有效支撑。

关键词: 多普勒频移; 海表流场; 反演算法; 时间序列; 龙目海峡; 合成孔径雷达

中图分类号: P731.2

文献标志码: A

文章编号: 1671-6647(2022)03-0484-12

doi: 10.12362/j.issn.1671-6647.20210611002

引用格式: 李晴烁, 范陈清, 孟俊敏, 等. 基于 ENVISAT ASAR 数据的龙目海峡海表流场反演[J]. 海洋科学进展, 2022, 40(3): 484-495. LI Q S, FAN C Q, MENG J M, et al. Estimation of sea surface current field in Lombok Strait based on ENVISAT ASAR data[J]. Advances in Marine Science, 2022, 40(3): 484-495.

海流是指海水较为稳定的大尺度流动, 代表在准定常状态下海水不同规模的运动状态, 其空间运动规模可达几百千米甚至全球范围, 时间跨度可为月尺度、季节尺度甚至多年尺度^[1-2]。海流决定了海洋中的热能和物质 (如营养盐、污染物、泥沙等) 在不同海区之间的输送和分布, 包含了海洋中各种物化过程, 对海洋的气候变化、海洋生物的生存和地形变迁都会造成直接影响。此外, 海洋溢油、海上运输线路的优化、海上搜救和海洋环境监测等均需考虑流场的影响。因此, 观测海洋流场的变化并监测分析其特性与规律, 对海洋科学的研究具有重大意义^[1, 3]。

海表流场的观测手段主要包括传统现场观测和卫星遥感观测, 传统现场观测主要包括浮标观测等, 其观测精度较高, 但现场测量的仪器安放危险性高、观测范围有限、观测成本高, 具有较大的限制性^[2]。卫星遥感可以对海流进行大范围的观测, 利用该手段不仅可以获得完整的二维流场结构, 还可以分析海面流场随时间变化的情况。卫星遥感主要有 3 种观测手段: ①雷达高度计^[4]。利用雷达高度计测得海面高度参数, 结合地转平衡关系获取流场的流速与流向, 该方法具有观测面积大、精度高和时间准同步等优点, 但仅适用于测量大尺度的地转流变化, 且存在重复观测周期较长的问题^[4-6]。②高频地波雷达。基于多普勒效

收稿日期: 2021-06-11

资助项目: 国家自然科学基金项目——低空远距离条件下海态与目标一体化雷达探测理论与方法 (U2006207)

作者简介: 李晴烁 (1997—), 女, 硕士, 主要从事海表信息反演方面研究. E-mail: mg1927102@smail.nju.edu.cn

(王 燕 编辑)

应和布拉格散射理论对海表流场进行监测, 该方法可连续获取大面积海流且不受天气状况影响, 但目前业务化应用较少, 且剖面流场随深度的不均匀性和流场剖面的时变情况会引起径向流速的测量误差^[7]。③合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)。它具备高分辨率、不受天气状况影响等优势^[8], 其反演流场的方法主要有 2 种: 一种是顺轨干涉测量方法(Along Track Interferometry, ATI), 该方法利用影像的相位差获取海表运动信息, 空间分辨率高, 但成像条件受限且数据成本较高, 适用范围小; 另一种是本文所采用的多普勒频移技术(Doppler Centroid Anomaly, DCA), 该方法利用 SAR 与地球相对运动、地球自转、海表面运动产生的回波信号频率偏移获取海表流场, 分辨率较高、应用范围较广, 适用于大范围的海流探测^[9-10]。

目前已有许多国内外学者将多普勒频移技术应用于海表流场反演。国内方面: 李慧敏^[2]利用 ENVISAT ASAR IMS(Image Mode SLC)数据, 采用符号多普勒法反演了长江口近岸海域的海表径向流速, 反演结果与潮汐表的结果较为一致。杨小波^[11]基于 ENVISAT ASAR WSM(Wide Swath Mode)数据, 提出了方位向和距离向多普勒中心模型, 采用多普勒频移法反演长江口及杭州湾近海港口海表面流速, 反演结果与模式结果的差值为 0.1 m/s。侯富城^[12]基于 ENVISAT ASAR IMS 数据, 采用多普勒频移法反演海表流速并提取内波, 反演得到的内波致海表面流的方向与内波传播方向在雷达距离向上的分量一致。宋小霞等^[13]利用 ENVISAT ASAR WSM 数据, 采用多普勒频移法反演厄加勒斯和黑海的海表流场, 流场结果与 AVISO 流场的相关系数为 0.84。国外方面: Johannessen 等^[14]基于 ENVISAT ASAR WSM 数据, 分析了从多普勒频移中反演得到的海流速度组成成分, 并由此反演了厄加勒斯海表流速, 反演结果与高度计所测结果较为一致。Rouault 等^[15]利用 ENVISAT ASAR WSM 数据, 采用多普勒频移法计算了厄加勒斯海表平均径向流速, 并以陆地覆盖影像为参照校正频移误差, 计算结果与 AVISO 数据匹配度较高。Hasen 等^[16]利用 ENVISAT ASAR WSM 数据, 基于多普勒频移法对挪威海沿海岸海域进行了流场反演研究, 并校正了多普勒中心计算中存在的卫星姿态运动导致的误差, 反演得到的流场结果在 10 m 分辨率下误差小于 5 cm/s。这些研究结果表明, SAR 多普勒技术可有效用于海表流场探测。

龙目海峡是印尼贯穿流的重要出口通道之一, 系统分析其海流流速和季节变化有助于分析印尼贯穿流在气候和海洋中的作用, 前人研究多基于数值模拟分析班达海和弗拉瑞斯海^[17-19], 针对龙目海峡流速和流向的研究较少。近年来, SAR 多普勒技术的出现为系统分析龙目海峡海流变化提供了新的手段^[1-3, 20]。本文基于 2003—2004 年 ENVISAT ASAR WSM 数据和 ENVISAT ASAR IMS 数据, 利用多普勒技术反演了龙目海峡海表流场, 并分析了龙目海峡海表流场的变化规律, 以期研究龙目海峡流场的动态变化提供有力的技术和数据支撑。

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区域

龙目海峡(114°24'~116°42'E, 6°30'~10°00'S)位于印度尼西亚群岛的巴厘岛和龙目岛之间, 是地处印度洋和太平洋之间的海上交通要冲, 其南北全长 80.5 km, 水深呈北深南浅分布, 最大水深可达 1 306 m, 受强烈海流的侵蚀, 近些年来水深仍在增加。龙目海峡是世界级的海运通道, 同时也是印尼贯穿流的重要出口通道之一, 局地潮致与海气相互作用混合使得该海域混合效应增强, 其不仅对海上输运和交通意义重大, 而且对军事活动也具有重要的影响^[19]。

研究区域为龙目海峡部分海域, 覆盖范围为(114°48'~116°00'E, 8°30'~9°48'S)(图 1 红色框区域), 为了便于分析对比多普勒频率的差异, 本文选取影像包含陆地区域。

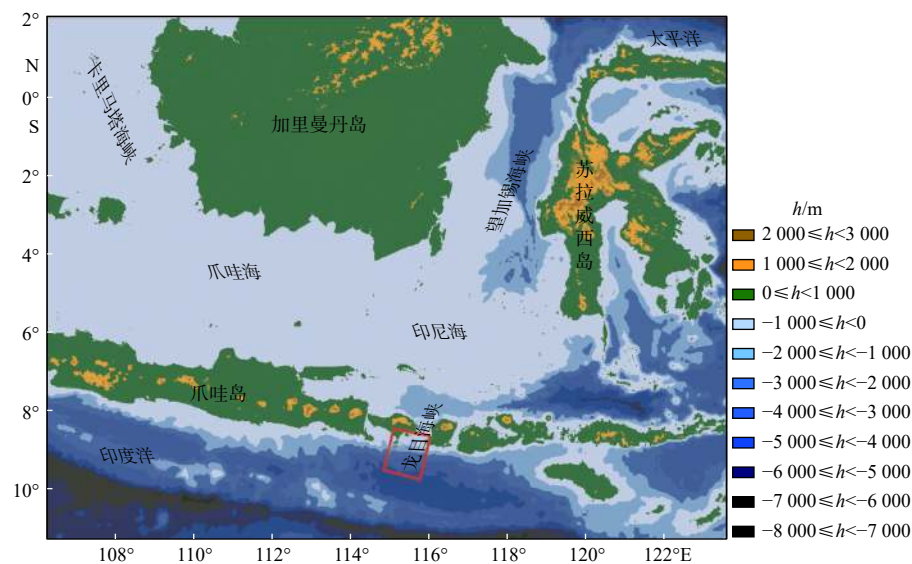


图 1 研究区域
Fig. 1 Study area

1.2 数据来源

1.2.1 ASAR 数据

本文采用欧洲航天局(European Space Agency, ESA)ENVISAT 卫星搭载的 ASAR WSM^[21] 和 IMS^[22] 产品作为数据源。ENVISAT 卫星运行时间为 2002—2012 年,轨道高度为 800 km,轨道倾角为 98°,工作波段为 C 波段,重访周期为 35 d^[21-23]。其中,WSM 数据影像幅宽约为 420 km,最小时间间隔为 3 d,空间分辨率为 150 m,有利于观测大范围海表特征^[13, 21-23]。IMS 数据含有相位信息和斜距信息,影像幅宽为 100 km、空间分辨率为 4 m,有利于小尺度海洋现象观测^[2, 12-13, 23]。选取 2003 年 5 月至 10 月的 ENVISAT ASAR WSM 产品和 2003 年 11 月至 2004 年 6 月的 ENVISAT ASAR IMS 产品对龙目海峡研究区域海流进行反演,数据有关参数如表 1 所示。

表 1 ENVISAT ASAR WSM 和 IMS 图像参数

Table 1 ENVISAT ASAR WSM and IMS image parameters

产品名称	时间	极化方式	升降轨方式
WSM	2003-05-09	VV	降轨
WSM	2003-06-29	VV	降轨
WSM	2003-09-16	VV	升轨
WSM	2003-10-15	HH	降轨
IMS	2003-11-19	VV	降轨
IMS	2003-12-24	VV	降轨
IMS	2004-03-03	VV	降轨
IMS	2004-04-07	VV	降轨
IMS	2004-05-12	VV	降轨

1.2.2 AVISO 数据

AVISO 数据因其覆盖范围广、数据质量较高和易于获取等优势,在验证 ASAR 流场精度方面发挥了重要的作用^[14, 16],本文选取 AVISO 的 GLORYS12V1 版本流场产品^[24]作为验证数据。GLORYS12V1 在欧洲 CMEMS(Copernicus Marine Service)框架下构建,由 ERA-Interim(ECMWF Re-Analysis Interim)和 ERA5 再分析数据融合所得,主要包括流场、温度、盐度、海平面、混合层深度和冰参数的日平均和月平均数据。时间间隔为 1 d,空间最小分辨率为 8.3 km,产品预测的时间长度为 1993 年 1 月 1 日至 2019 年 12 月 31 日。GLORYS12V1 的流场数据与潜标观测数据较为一致,大部分流场数据与潜标数据的均方根误差小于 0.25 m/s;在西太平洋吻合度最高,与潜标数据的均方根误差小于 0.20 m/s;在赤道潜流处吻合度最低,与潜标

数据的均方根误差小于 0.30 m/s; 随着深度的增加, GLORYS12V1 的流场数据与潜标数据的相关性逐渐减小^[25]。

2 方 法

2.1 多普勒质心异常计算

多普勒质心的计算是合成孔径雷达(SAR)成像的重要部分。WSM 数据的多普勒质心可由其多普勒网格数据插值得到(图 2), 由 WSM 数据插值得到的多普勒中心频率 f_{Dc} 在方位向分辨率约为 8 km, 距离向分辨率最高约为 9 km, 最低约为 3.5 km^[11, 26]。为方便计算, 后文 WSM 数据的多普勒质心和多普勒质心异常均以类似图 2a 的时间多普勒网格坐标成像。

多普勒中心频率 f_{Dc} 包含由海表运动产生的多普勒质心异常 f_{Dca} 和由卫星与地球相对运动产生的卫星多普勒频移 f_{Sat} , 为获得 f_{Dca} 需去除 f_{Sat} 影响^[27]。根据星载 SAR 多普勒频率理论模型, WSM 产品的成像时刻基带中心多普勒频率 f_{Dc} 分别在距离向和方位向具有近似线性变化的特点^[11, 13, 28-30]。沿距离向选取截面 A 和 B, 沿方位向选取截面 C 和 D, 其中截面 A 和 D 含有陆地区域, 截面 B 和 C 不包含陆地区域(图 2a)。由图 2b 至图 2e 可见, f_{Dc} 在距离向和方位向均呈线性变化, 截面 A、B 与距离向时间的拟合优度分别为 0.94、0.95, 截面 C、D 与方位向时间的拟合优度分别为 0.96、0.91。拟合优度 R^2 是回归直线对观测值的拟合程度, R^2 值越接近 1 说明回归直线对观测值拟合程度越好, 也说明多普勒质心在距离向和方位向上呈线性变化, 因此分别在 2 个方向上采用均值滤波和线性拟合的方法去除卫星多普勒频移 f_{Sat} 影响是可取的, 且该方法也适用于含有陆地的 WSM 影像^[13]。

频谱能量均衡法通过分析回波的多普勒谱计算 f_{Dc} 。由于多普勒谱与能量谱的特性相似, 根据能量均衡理论可将频率谱划分为两部分, 若这两部分的能量均衡对称^[31], 则中心均衡点的频率即为多普勒质心频率。基于以上理论, 采用频谱能量均衡法计算 IMS 产品的 f_{Dc} , 具体处理过程为: 首先, 对影像的局部窗口进行 FFT 变换, 同时考虑多普勒中心频率的精确度与其分辨率大小, 将窗口大小设置为 512×128。然后, 将变换结果与 $[-fs/2, fs/2]$ 对应, 采用正弦曲线拟合方位向上的多普勒谱能量, 则该窗口的多普勒中心频率即为拟合得到的曲线中心点频率。整景影像的多普勒中心频率 f_{Dc} 可通过滑动窗口得到, 能分辨的最小单元为 100 m^[12]。采用 Tie-point 网格数据中的斜距时间和多普勒系数计算 IMS 产品的卫星频移^[12], 计算公式为:

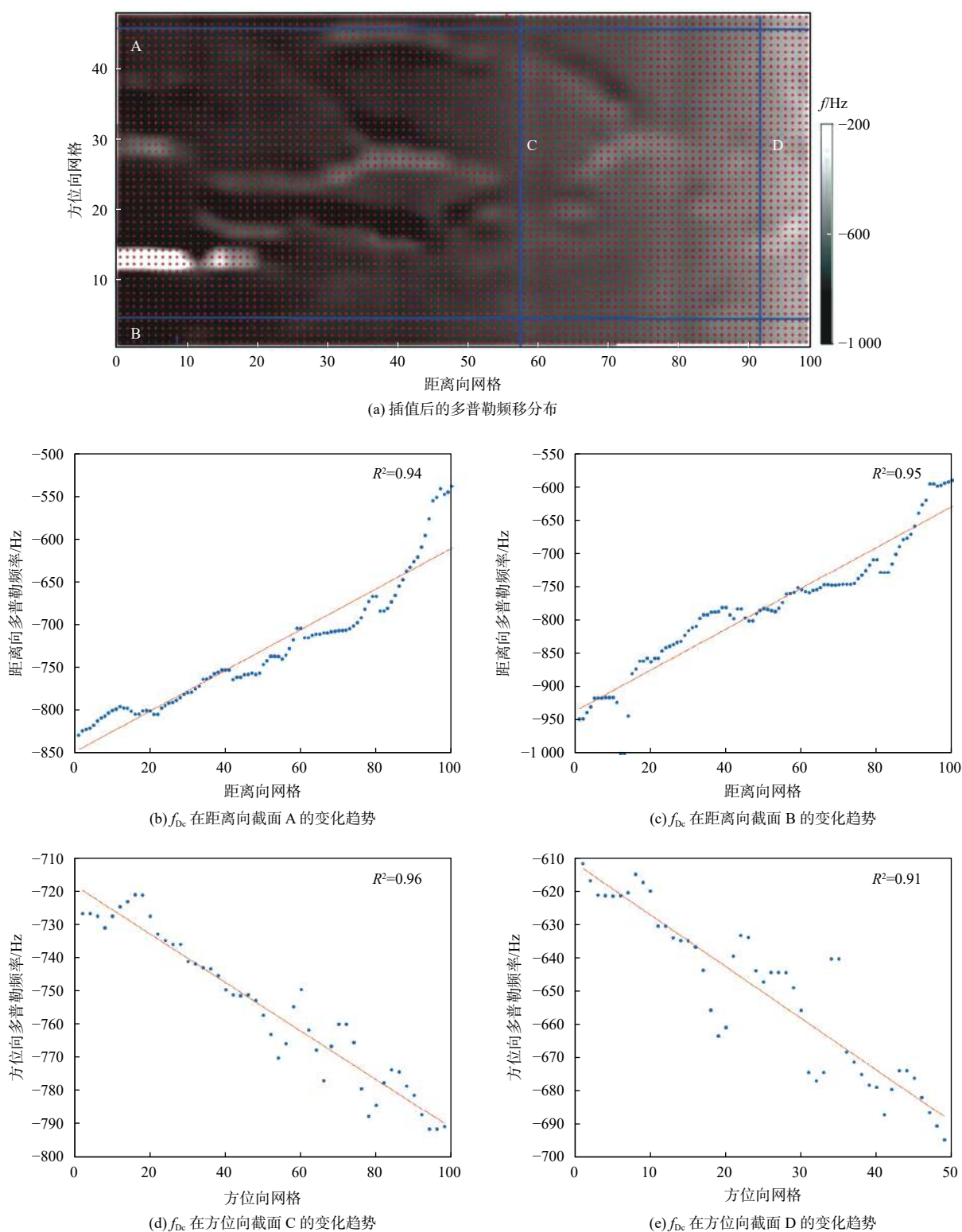
$$f_{Sat} = f_{coef(1)} + f_{coef(2)} \times (t - t_0) + f_{coef(3)} \times (t - t_0)^2 + f_{coef(4)} \times (t - t_0)^3 + f_{coef(5)} \times (t - t_0)^4, \quad (1)$$

式中: f_{coef} 为多普勒系数; t 为斜距时间; t_0 为标准斜距时间。

在多普勒质心频移 f_{Dc} 中减去卫星多普勒频移 f_{Sat} 影响后可计算得到 f_{Dca} , 即:

$$f_{Dca} = f_{Dc} - f_{Sat}。 \quad (2)$$

选取 2003 年 6 月 29 日 WSM(图 3)数据和 2004 年 4 月 7 日 IMS(图 4)数据, 分别针对这 2 组数据计算多普勒质心, 结果显示: 在 WSM 多普勒质心频率影像中(图 3b), 方位向多普勒网格 13 处频移误差较大, 这可能是由海洋和陆地的电磁波散射特性差异较大所致^[13]。 f_{Dc} 图像在朝向卫星方向上海洋和陆地相交处含有明显的透视收缩, 而在背离卫星方向上只有在海洋和陆地相交的区域才有阴影, 由于图像透视收缩及阴影的范围仅出现在海陆交界处, 其对反演海流的影响可以忽略^[11, 13], 本文在海洋和陆地相交处剔除掉由透视收缩和阴影产生的影像异常值, 最终得到 2003 年 6 月 29 日 WSM 整景影像的多普勒频率(-50~150 Hz, 图 3d)。2004 年 4 月 7 日 IMS 整景影像的多普勒频率为-30~15 Hz, 在 IMS 的多普勒质心异常图像(图 4b)上可观察到明显的海浪波纹。对比 WSM 数据 f_{Dca} (图 3d)和 IMS 数据 f_{Dca} (图 4b)发现, 相较 WSM 数据, IMS 数据的多普勒质心异常图像分辨率更高, 更适合分析小范围的海表面运动。



注：图 a 中红点表示原始多普勒网格数据的位置，频率负值表示海流的传播方向远离雷达天线。

图 2 2003 年 6 月 29 日 WSM 数据的多普勒中心网格及网格截面在距离向、方位向的变化趋势

Fig. 2 Doppler centroid grid and the trend of the grid section in range and azimuth directions of WSM data on June 29, 2003

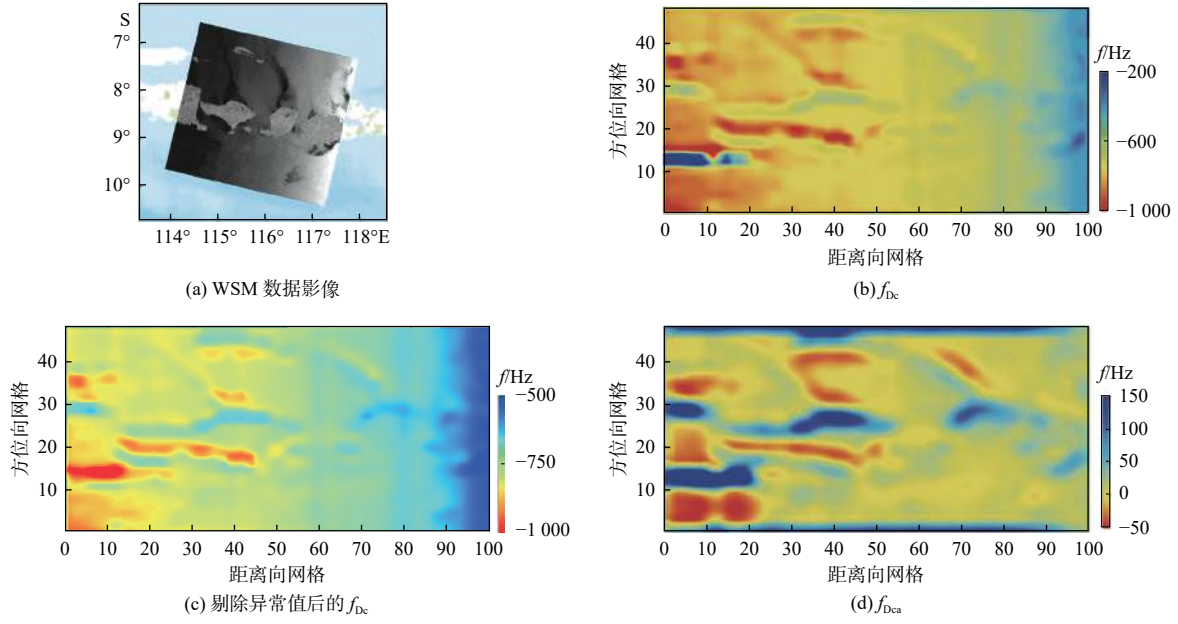


图 3 2003 年 6 月 29 日 WSM 影像数据、 f_{Dc} 、剔除异常值后的 f_{Dc} 和 f_{Dca} 结果
Fig. 3 WSM image data, results of f_{Dc} , f_{Dc} after eliminating outliers and f_{Dca} on June 29, 2003

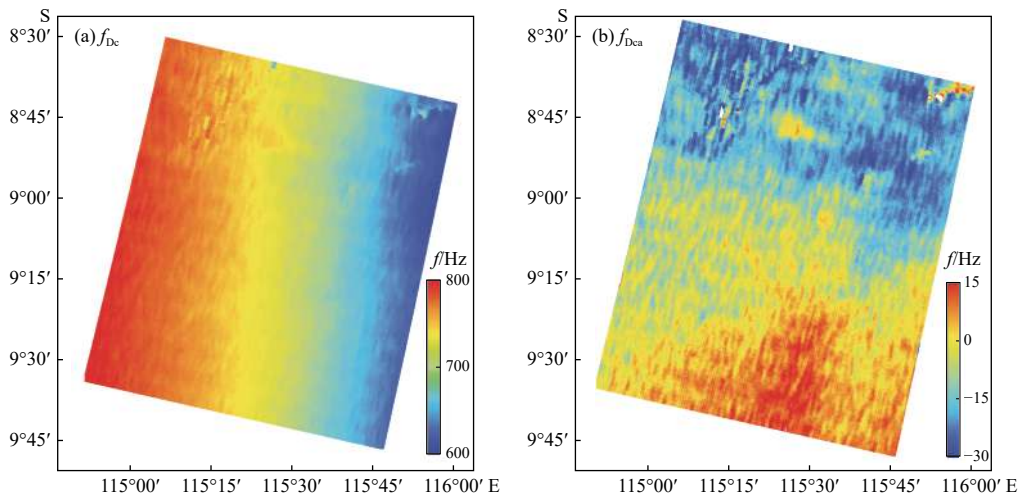


图 4 2004 年 4 月 7 日 IMS 数据 f_{Dc} 与 f_{Dca} 结果
Fig. 4 Results of Doppler Centroid f_{Dc} and Doppler Centroid Anomaly f_{Dca} of IMS data on April 7, 2004

2.2 海表面信息反演

多普勒质心异常 f_{Dca} 中包含了布拉格波^[11-13]、风场^[16, 32-34]和海表面流速等的贡献, 所以 f_{Dca} 的计算公式为:

$$f_{Dca} = f_B + f_w + f_s, \quad (3)$$

式中: f_B 为布拉格散射导致的多普勒频移; f_w 为风场影响导致的多普勒频移; f_s 为海表流场引起的多普勒频移。根据式 (3) 去除布拉格波和风场的多普勒频移影响后, 即可获得海表流场的多普勒信息。

通常将海面与雷达入射电磁波产生共振的波浪定义为布拉格波, 其导致的多普勒频移 f_B 通常表示为^[33]:

$$f_B = \pm \frac{1}{2\pi} \sqrt{2gK_r (\sin \theta_i)}, \quad (4)$$

式中： g 为重力加速度； K_r 为雷达入射电磁波波数，对于 ASAR 数据 K_r 取 112 m/s； θ_i 为入射角。布拉格波导致的多普勒频移的正负是由海流的传播方向与雷达视向方向相同或相反决定的^[32]。

多普勒质心异常中去除布拉格波产生的频移后，即可计算出雷达视向的海表运动速度 v_{slc} ，即：

$$v_{slc} = -\frac{\pi(f_{Dca} - f_B)}{K_r} \quad (5)$$

为了去除海面风场引起的多普勒频移，本文利用 ASAR 数据反演海面风场信息。通常认为，海面上方 10 m 高度风速与雷达径向风速 v_w 间有如下关系^[27]：

$$v_w = \gamma U_{10}, \quad (6)$$

式中： γ 是与风速大小有关的系数，在真实海洋中， γ 通常取 0.03^[11-12]； U_{10} 为雷达径向方向上海面 10 m 高度的风速。

本文采用 CMOD 5 (C-band models 5) 模型反演海面风场，并结合 ECMWF^[35] 风场的风向信息解决反演模型的 180°模糊问题^[12,34]。在实际 SAR 图像中，分析窗口的大小对风向反演结果具有重要意义：窗口大小为 20 km 的反演结果可以体现出风向局部细节，有利于小尺度风场反演；窗口大小为 40 km 的风向反演结果具有相对综合性，在大尺度上可体现出风向的一致性，在小尺度上也能较好地体现出风场的局部细节，有利于中尺度风场反演；窗口大小为 60 km 的反演结果可充分展示大范围风场结构，有利于大尺度风场反演^[11-12]。

对于风速数据的反演，本文将 VV 极化的归一化雷达散射截面 (Normalized Radar Cross Section, NRCS) 数据应用到 CMOD 5 模型中，但此模型不适用于 HH 极化数据。所以，需要将 HH 极化的 NRCS 转换为相应的 VV 极化的 NRCS^[34]，即：

$$\sigma_v^0 = \frac{(1 + 2\tan^2\theta)^2}{(1 + \alpha\tan^2\theta)^2} \sigma_H^0, \quad (7)$$

式中： σ_v^0 为 VV 极化的 NRCS； α 为雷达观测方向与风向的夹角，根据 Kirchoff^[36] 极化比模式， α 值设为 1； θ 为雷达入射角； σ_H^0 为 HH 极化的 NRCS。

多普勒质心异常中去除风场引起的多普勒频移后，即可计算出在雷达视向海表流速的真实值 v_s (风速的正负由风向与雷达视向方向相同或相反决定)^[32]：

$$v_s = v_{slc} - v_w. \quad (8)$$

式中： v_{slc} 为雷达视向的海表运动速度； v_w 为雷达径向风速。

为进一步表示雷达径向的海表流场速度，根据雷达视线方向海流运动速度与海表运动产生的多普勒频移之间的线性关系，可计算出垂直于卫星飞行方向的海表径向流速 v_d ^[12-13]：

$$v_d = v_s / \sin\theta. \quad (9)$$

综合海表面运动信息，利用 SAR 多普勒方法可以反演得到沿雷达视向的海表径向流速。

3 结果与讨论

将 WSM 宽幅数据裁剪至研究区，利用式(3)~式(9)计算出径向海表流速，4 个季节各选取 1 景影像反演径向速度(图 5)，4 景影像均为降轨数据，朝向雷达径向的流速用正值表示，背离雷达径向的流速用负值表示^[13,34]。为了更好地验证流向精度，将 AVISO 流场数据转为径向流场(图 5 中箭头)。结果表明，反演得到的径向流场与 AVISO 径向流场较为一致，其中在近岸海域，IMS 反演的流向与 AVISO 流向较 WSM 反演的流向匹配度更高，这是因为 IMS 影像分辨率更高、幅宽更小，有利于监测和分析小范围的海面流场特征，而 WSM 为宽幅影像，更有利于观测较大范围的海面流场特征。

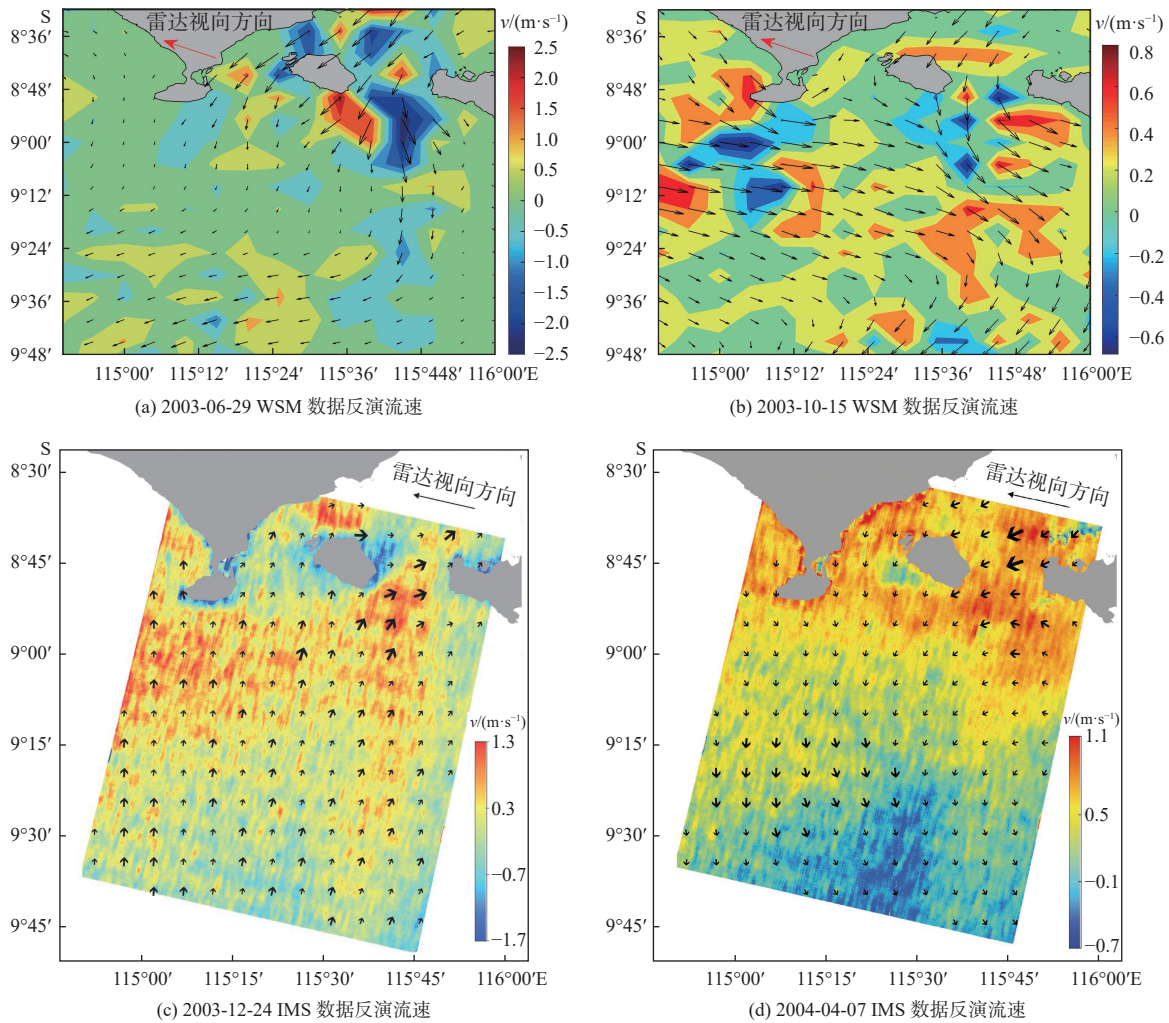


图 5 ASAR 数据反演流速(填色区)与 AVISO 流场(箭头)分布

Fig. 5 The retrieved sea surface velocities field from ASAR (color shading) and AVISO (arrows)

为进一步验证反演的流速精度,将反演得到的流速网格分辨率重采样至 8.3 km,使其与 AVISO 流场分辨率一致,将反演的整幅影像流场与径向 AVISO 流场求差值,对流速和流向的误差分布进行分析(图 6)。其中 WSM 数据反演流速主要分布于 $-0.5 \sim 1.0$ m/s,与 AVISO 流速误差主要集中于 $-0.35 \sim 0.45$ m/s,均方根误差为 0.28 m/s,相关系数为 0.95。IMS 数据反演流速主要分布于 $-0.2 \sim 0.4$ m/s,与 AVISO 流速误差主要分布于 $-0.15 \sim 0.55$ m/s,均方根误差为 0.37 m/s,相关系数为 0.73。由图 6a 和图 6c 可知,与 AVISO 流场相比,ASAR 反演流速整体更大,这也符合前人研究所述^[2,13]。可见,本文采用的流场反演方法可有效提取海表面信息,且反演精度较高,适用于近岸海域。

对 WSM 和 IMS 数据进行时间序列变化分析,结果如表 2 所示。总体来看,龙目海峡流速较大,最大值为 -2.56 m/s(负号表示海流的传播方向与雷达视向相反),流速变化明显。结合图 5 分析可知:龙目海峡在 2003 年 6 月 29 日流速较大,主要集中在 $(115^{\circ}24' \sim 115^{\circ}48'E, 8^{\circ}30' \sim 9^{\circ}12'S)$ 附近的海域,其他海域流速较小($-0.50 \sim 0.75$ m/s),主要流向为西南向;在 2003 年 10 月 15 日流速较小($-0.79 \sim 0.92$ m/s),主要流向为东南向;在 2003 年 12 月 24 日整体流速较大,出现北向逆流,主要流向转为东北向,几乎与原来相反;在 2004 年 4 月 7 日海流转回南向流。总体来说,研究区范围内,2003 年 5 月至 9 月流速较大,10 月流速减小,11 月至 12 月流速逐月增加,在 2004 年 3 月流速达到最低值(-0.58 m/s),而后在 2004 年 4 月至 5 月流速逐月增大;在南半球夏季(12 月)和秋季(5 月)出现北向逆流,其余月份皆为南向流。

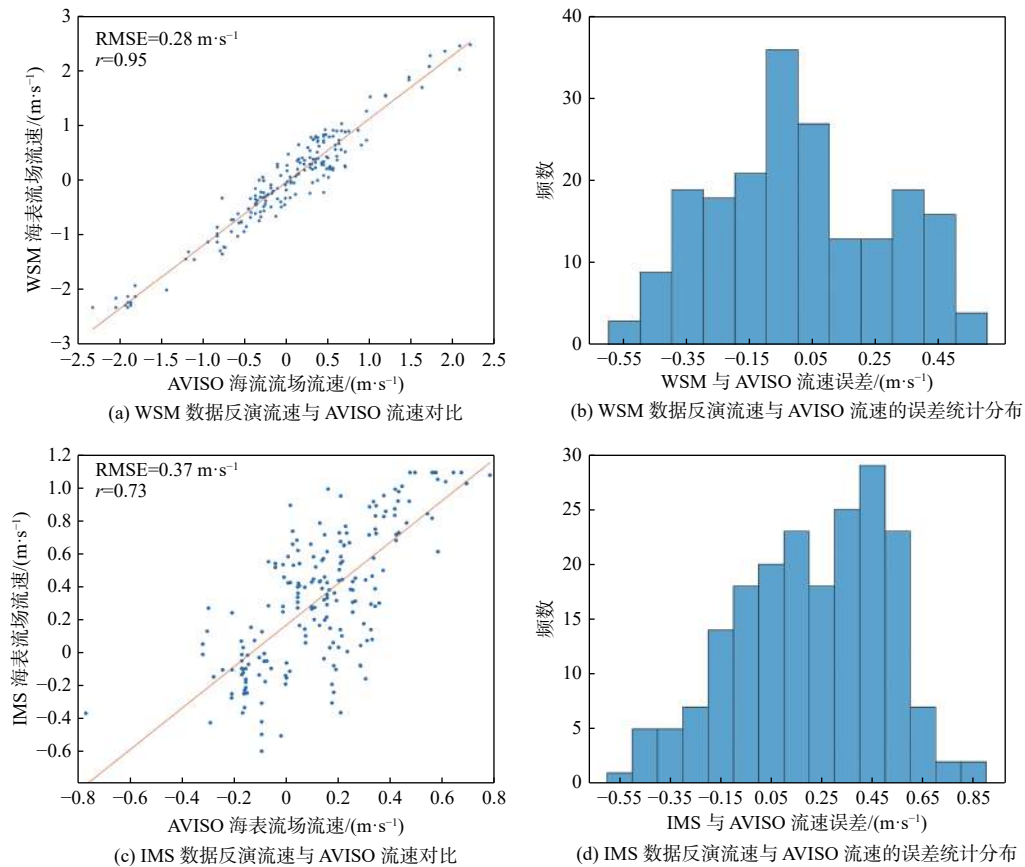


图 6 2003 年 6 月 29 日 WSM 数据和 2004 年 4 月 7 日 IMS 数据反演流速与 AVISO 流速对比以及二者误差对比

Fig. 6 Comparison of the sea surface velocity retrieved from WSM (June 29, 2003) and IMS (April 7, 2004) with AVISO sea surface velocity and their errors contraction and the error comparison

表 2 海表径向流速反演结果

Table 2 The retrieved results of radial sea surface velocity

产品名称	时相	$v_d/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	产品名称	时相	$v_d/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
IMS	2003-11-19	-0.99~0.97	WSM	2003-05-09	-2.56~2.51
IMS	2003-12-24	-1.64~1.25	WSM	2003-06-29	-2.33~2.50
IMS	2004-03-03	-0.58~0.72	WSM	2003-09-16	-2.03~1.90
IMS	2004-04-07	-0.80~1.06	WSM	2003-10-15	-0.79~0.72
IMS	2004-05-12	-1.46~1.72			

注：空白处无数据。

4 结 论

基于 2003 年至 2004 年 ENVISAT ASAR WSM 数据和 ENVISAT ASAR IMS 数据，利用多普勒技术反演了龙目海峡海表流场，并分析了龙目海峡海表流场的变化，得出以下主要结果。

1) 基于 2003 年 5 月至 10 月 WSM 数据和 2003 年 11 月至 2004 年 5 月 IMS 数据，利用多普勒质心偏移法

获取了海面运动引起的多普勒质心异常, 通过去除风和 Bragg 波引起的多普勒频移, 最终获得龙目海峡海表径向流速。结果表明: 本文的流场反演方法可准确提取海面流速信息, 海表面流速反演结果与 AVISO 流场匹配度较好, 其中 WSM 数据反演的流速与 AVISO 流场均方根误差为 0.28 m/s, IMS 数据反演的流速与 AVISO 流速均方根误差为 0.37 m/s。

2) 基于反演的径向海表流速的反演结果分析龙目海峡 2003 年至 2004 年流速和流向变化, 结果表明龙目海峡流速较大, 最大值为 -2.56 m/s (负号表示流向与雷达视向相反), 流场变化明显, 2003 年 5 月至 9 月流速较大 ($-2.56 \sim 2.51$ m/s), 10 月流速减小到 0.72 m/s, 11 月至 12 月流速逐月增加 ($-1.64 \sim 1.25$ m/s), 在 2004 年 3 月流速达到最低值 (-0.58 m/s), 而后在 2004 年 4 月至 5 月流速逐月增大 ($-1.46 \sim 1.72$ m/s); 在南半球夏季 (12 月) 和秋季 (5 月) 出现北向逆流, 部分海流流向巴厘海, 其余皆为南向流, 海流流向印度洋。

3) 本文对 WSM 和 IMS 数据分别采用了不同的方法估算多普勒质心异常: WSM 数据的多普勒质心由网格化多普勒中心估计所得, 卫星频移影响采用均值滤波和线性拟合的方法去除; IMS 数据的多普勒质心由频谱拟合法结合能量均衡理论计算所得, 卫星频移影响采用斜距时间和多普勒系数去除。结果表明: IMS 能反演出海浪波纹信息, 在近岸海域 IMS 数据反演得到的流向结果与 AVISO 流场的匹配度更高, 而从整体上来看, WSM 数据反演得到的流速结果与 AVISO 流场的匹配度更高, WSM 数据反演流速与 AVISO 流速均方根误差为 0.28 m/s, 相关系数为 0.95, IMS 数据反演流速与 AVISO 均方根误差为 0.37 m/s, 相关系数为 0.73。综上, IMS 影像幅宽较小、分辨率较高, 更适合分析和监测小范围的海洋区域, 而 WSM 数据为宽刈幅数据, 更适合观测较大范围的海表面流场特征。

参考文献 (References):

- [1] 常亮, 高郭平, 郭立新. 星载 SAR 海洋表层流场反演综述[J]. *海洋科学进展*, 2015, 33(1): 107-117. CHANG L, GAO G P, GUO L X. Review on ocean surface current field measurement by space-borne SAR[J]. *Advances in Marine Science*, 2015, 33(1): 107-117.
- [2] 李慧敏. 基于多普勒法的 SAR 海表流场反演算法研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015. LI H M. Retrieval of surface current from SAR imagery using Doppler Shift method[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015.
- [3] 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. HE Y J, LIU B C, ZHANG B, et al. Overview on satellite remote sensing methods for sea surface current measurement[J]. *Guangxi Sciences*, 2015, 22(3): 294-300.
- [4] SHAY L K, HANS C G, DUCAN B R, et al. Mesoscale ocean surface current structure detected by high-frequency radar[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1995, 12(4): 881-900.
- [5] PRIETO D F, SABIA R. Remote sensing advances for earth system science[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2016.
- [6] VIGNUDLLI S, KOSTIANOV A G, CIPOLLINI P, et al. Coastal altimetry[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [7] 龚子平, 柯亨玉, 侯杰昌, 等. 高频地波雷达海洋表面流测量误差分析[J]. *武汉大学学报*, 2007(3): 356-360. GONG Z P, KE H Y, HOU J C, et al. Error analyze of current measurements by HF surface wave radar[J]. *Journal of Wuhan University*, 2007(3): 356-360.
- [8] 林琤, 范开国, 申辉, 等. 星载 SAR 海洋内波遥感研究进展[J]. *地球物理学进展*, 2010, 25(3): 1081-1091. LIN H, FAN K G, SHEN H, et al. Review on remote sensing of oceanic internal wave by space-borne SAR[J]. *Progress in Geophysics*, 2010, 25(3): 1081-1091.
- [9] 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*, 2014, 52(5): 2759-2772.
- [10] EMERY W J, FOWLER C, CLAYSON C A. Satellite image derived Gulf-Stream currents compared with numerical-model results[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1992, 9(3): 286-304.
- [11] 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 X B. Using ASAR to retrieve the sea surface current based on time-varying sea surface model[D]. Shanghai: Ocean University of Shanghai, 2016.
- [12] 侯富城. 基于多普勒频移的内波致海表面流提取[D]. 青岛: 自然资源部第一海洋研究所, 2019. HOU F C. Internal wave induced sea current extraction based on Doppler shift[D]. Qingdao: First Institute of Oceanography, MNR, 2019.
- [13] 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 X X, WANG J, CHU X Q. Estimation of sea surface velocities from SAR images using the Doppler shift[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2019, 34(2): 293-302.
- [14] JOHANNESSEN J A, CHAPRON B, COLLARD F, et al. Direct ocean surface velocity measurements from space: improved quantitative interpretation of ENVISAT ASAR observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(22): 113-130.

- [15] ROUAULT M J, MOUCHE A, COLLARD F, et al. Mapping the Agulhas current from space: an assessment of ASAR surface current velocities[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2010, 115: C1026-1-C1026-14.
- [16] HANSEN M W, JOHANNESSEN J A, DAGESTAD K F, et al. Monitoring the surface inflow of Atlantic Water to the Norwegian Sea using EnviSat ASAR[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2011, 116(C12): 338-348.
- [17] 梁浩然, 谢玲玲, 周磊, 等. 印度尼西亚海及周边海域层结的时空变化特征分析[J]. *海洋学报*, 2021, 43(5): 63-78. LIANG H R, XIE L L, ZHOU L, et al. Analysis of the spatiotemporal characteristics of stratification in the Indonesian seas and surrounding waters[J]. *Haiyang Xuebao*, 2021, 43(5): 63-78.
- [18] 李淑江, 徐腾飞, 孙俊川, 等. 卡里马塔海峡贯穿流与印尼贯穿流的相互作用[J]. *海洋科学进展*, 2021, 39(2): 197-209. LI S H, XU T F, SUN J C, et al. The interaction between the Karimata strait throughflow and the Indonesian throughflow[J]. *Advances in Marine Science*, 2021, 39(2): 197-209.
- [19] 寇睿之, 徐振华, 尹宝树, 等. 印尼海龙目海峡上层环流季节变化及影响机制[J]. *海洋与湖沼*, 2020, 51(4): 829-838. KOU R Z, XU Z Z, YIN B S, et al. Seasonal variation of upper layer circulation in Lombok Sea area based on OFAM data[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2020, 51(4): 829-838.
- [20] 候富城, 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 F C, MENG J M, ZHANG X, et al. Using the Doppler shift method to retrieve the ASAR sea surface velocity[J]. *Advances in Marine Science*, 2019, 37(2): 274-283.
- [21] European Space Agency. EnviSat ASAR wide swath medium resolution I1 product. IPF version 6.03[EB/OL]. [2021-04-14]. https://esar-ds.eo.esa.int/oads/access/collection/ASA_WSM_1P.
- [22] European Space Agency. Envisat ASAR image mode SLC resolution L1 product. IPF version 6.03[EB/OL]. [2021-01-13]. https://esar-ds.eo.esa.int/oads/access/collection/ASA_1MS_1P.
- [23] European Space Agency. ENVISAT-1 ASAR products specifications: volume 8 ASAR products specifications[EB/OL]. [2021-04-14]. https://earth.esa.int/web/sppa/mission-performance/esa-missions/envisat#product_spec.html.
- [24] Copernicus Marine and Environment Monitoring Service. Gridded Sea Level and Geostrophic Velocity Anomalies(MSLA-H-UV) and Absolute Dynamic Topography(MADT-H-UV) products[EB/OL]. [2021-05-12]. <https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/data-access/aviso-opendap/opendap-access-to-products.html>.
- [25] Copernicus Marine and Environment Monitoring Service. Quality information document for global ocean reanalysis multi-model ensemble products GREP-V1 GLOBAL-REANALYSIS-PHY-001-026[EB/OL]. [2021-05-30]. <https://catalogue.marine.copernicus.eu/documents/QUID/CMEMS-GLO-QUID-001-026.pdf>.
- [26] 刘利, 王小青, 陈鹏真, 等. 基于线阵CCD的风浪环境下水面弱流场速度测量方法[J]. *实验流体力学*, 2014, 28(2): 32-38. LIU L, WANG X Q, CHEN P Z, et al. The measurement of weak current velocity on water surface under wind wave environment based on linear array CCD[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2014, 28(2): 32-38.
- [27] CHAPRON B, COLLARD F, KERBAOL V. Satellite Synthetic Aperture Radar sea surface Doppler measurements[C]//Proceeding of the 2nd Workshop on Coastal and Marine Application of SAR. Noordwijk, Netherlands. 2003.
- [28] ZOU X F, ZHANG Q Y. Estimating the doppler centroid frequency in spaceborne scansar[J]. *Journal of Electronics (China)*, 2008, 25(6): 822-826.
- [29] 王绍清. 星载SAR多普勒中心实时估计技术研究[D]. 北京: 中国科学院电子学研究所, 2005, 32(8): 1649-1651. WANG S Q. Real time estimation of spaceborne SAR Doppler center[D]. Beijing: Institute of Electronics, Chinese Academy of Science, 2005, 32(8): 1649-1651.
- [30] 许小剑. 时变海面雷达目标散射现象学模型[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013. XU X J. Phenomenological model of target scattering in time varying sea surface radar[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013.
- [31] 柯兰德, 麦克多诺. 合成孔径雷达: 系统与信号处理[M]. 韩传钊, 译. 北京: 电子工业出版社, 2014. CURLANDER J C, MCDONOUGH R N. Synthetic Aperture Radar: systems and signal processing[M]. HAN C Z, trans.. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014.
- [32] TOPORKOV J V, BROWN G S. Numerical simulations of scattering from time varying, randomly rough surfaces[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(4): 1616-1625.
- [33] 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.
- [34] 程玉鑫, 戈书睿, 袁凌峰. 星载合成孔径雷达海面风速反演技术研究[J]. *电子测试*, 2016(7): 133-134. CHENG Y X, GE S R, YUAN L F. Research of the ocean wind speed retrieval from Space-Borne SAR[J]. *Electronic Test*, 2016(7): 133-134.
- [35] HERBACH H, BELL B, BERRISFORD P, et al. ERA5 monthly averaged data on pressure levels from 1979 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS)[EB/OL]. [2021-07-20]. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-pressure-levels-monthly-means>.
- [36] 韩延磊. SAR和CALIPSO数据反演海面风速[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010. HAN Y L. Sea surface wind speed retrieved from SAR and CALIPO data[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010.

Estimation of Sea Surface Current Field in Lombok Strait Based on ENVISAT ASAR Data

LI Qing-shuo^{1,2}, FAN Chen-qing², MENG Jun-min², ZHANG Jie², KE Chang-qing¹

(1. *School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China;*

2. *First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China*)

Abstract: In this paper, the ENVISAT ASAR Wide Swath Mode (WSM) data from May to October 2003 and ENVISAT ASAR Image Mode SLC (IMS) data from November 2003 to May 2004 are used to retrieve the radial sea surface velocity of Lombok Strait. The doppler centroid anomaly caused by sea surface motion is obtained by Doppler centroid migration method. Then we remove the doppler frequency shift caused by wind and Bragg waves. The data used to verify the accuracy of the results are AVISO (Archiving Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic Data), and the variation of the velocity in Lombok Strait is analyzed. The result shows that the retrieval sea surface velocity has a good matching degree with AVISO flow field, the Root Mean Square Error (RMSE) of sea surface velocity derived from WSM and IMS data shows minimal difference with AVISO, which are 0.28 m/s and 0.37 m/s, respectively. Within the study area, the current velocity is $-2.56\text{--}2.51$ m/s from May to September 2003, which is relatively large during 2003—2004. The current velocity decreases in October ($-0.79\text{--}0.72$ m/s), and increases with the month from November to December ($-1.64\text{--}1.25$ m/s). In March 2004, the current velocity reaches a minimum value of -0.58 m/s, and it increases with the month from April to May 2004 ($-1.46\text{--}1.72$ m/s). The northward countercurrent occurs in southern hemisphere summer (December) and autumn (May), and the rest are southward current.

Key words: Doppler shift; sea surface velocities; retrieval algorithm; time series; Lombok Strait; Synthetic Aperture Radar (SAR)

Received: June 11, 2021