

星载 SAR 海洋表层流场反演综述*

常亮^{1,2}, 高郭平^{1,2}, 郭立新^{1,2}

(1. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306; 2. 远洋渔业协同创新中心, 上海 201306)

摘要: 基于星载 SAR 获取海洋表层流场, 已经成为相关海洋科学研究的重要支持。本文分析了星载 SAR 系统反演海洋表层流场的技术发展, 重点介绍了国内外基于顺轨干涉 SAR 技术和多普勒频移方法估计海洋表层流场的研究进展, 并对星载 SAR 估计海洋表层流场的研究、发展与应用作了展望。

关键词: 星载合成孔径雷达; 顺轨合成孔径雷达干涉测量; 多普勒频移; 海洋表层流场

中图分类号: P731

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2015)01-00107-11

海流是海水的重要运动形式之一, 反映的是海水在准定常状态下各种尺度的输运状态。海流可以将海洋中的物质, 如水体及包含其中的营养盐和泥沙等, 从一个区域输送到另一个区域, 也可以将海水中热能从一个海域输送到另一个海域, 直接影响那里的天气和气候, 并进一步引起海洋生态系统、海岸和海底地形的变化等。另外, 海上交通运输线路的优化, 海上搜救、溢油和其他污染物扩散等, 也常常利用海洋表层海流的运动规律进行计算和研究。因此, 开展海流观测、了解海洋流场的特征和变化规律, 对于海洋交通运输、海上生产、渔业、港口建设、海洋减灾和防灾以及相关海洋科学研究等都具有非常重要的意义^[1]。

海洋表层流场可以通过记录浮标漂移轨迹的方法获得^[1-6], 也可以采用海流观测仪器如声学多普勒流速剖面仪(ADCP)^[7-11]等进行测量, 或通过其他水文资料^[12-13]等间接方法进行海流的估算。但这些方法所获得的流场空间分辨率低, 而且限于海上环境条件, 仪器维护成本高。近年来, 岸基高频地波雷达也被应用于监测近海区域海洋表层流场, 它具有超视距、大范围、全天候以及低成本等优点, 被认为是一种能实现对各国专属经济区(EEZ)进行有效监测的高科技手段, 但距离业务化运行的应用要求还有一定的距离^[14-16]。

随着空间科学技术的发展, 特别是海洋遥感技术, 使得人们研究海洋和认识海洋的手段有了突飞猛进的发展。利用卫星高度计^[17-18]观测结果计算流场已经成为海洋表层流场估算的有效方法: 它通过卫星高度计测量的海面高度异常值, 应用地转流计算方法(压强梯度力水平分力与科氏力平衡)来估计表层海水的流动。卫星高度计资料虽然可全球覆盖, 但空间分辨率低, 仅适合用来研究大范围的海洋变化^[19]。在近岸海域, 高度计的测量受到陆地污染、大气误差(对流层和电离层延迟)和稳态海面地形精度差等方面的影响与限制, 使得至少沿岸 50 km 范围内的观测结果存在较大误差^[20-22]。此外, 还有利用高分辨率时间序列的海表温度(SST)和叶绿素浓度数据, 采用特征跟踪和模式识别的方法提取海洋表层流场^[23-24], 但该方法所用资料受云覆盖的影响, 常常缺失, 在温度变化和差异不显著区的应用更受到限制^[22]。

合成孔径雷达(SAR)具有全天时、全天候、高分辨率和宽刈幅成像的优势^[25], 使得 SAR 成为一种有效的测量海洋表层流场的技术手段。Goldstein 和 Zebker^[26-27]首先利用机载 SAR 进行高精度海洋表层流场测

* 收稿日期: 2014-06-22

资助项目: 全球变化研究国家重大科学研究计划——北极海冰减退引起的北极放大机理与全球气候效应(2015CB953902); 国家自然科学基金——快速变化期北极中层水的通风过程及其主要影响研究(41276197); 上海市“扬帆计划”——基于北斗和 PS-InSAR 技术的东海大桥健康状况研究(14YF1410200); 上海市教育委员会科研创新项目——多波段 SAR 系统监测上海临港新城三维地表形变(14YZ118); 上海市教育委员会科研创新项目——“电子海洋渔业专题海图系统”研究(14ZZ148); 上海高校青年教师培养资助计划——基于 SAR 的表层海流反演及应用研究(A1-2035-14-0010-12); 上海海洋大学博士科研启动基金——GPS 和 PSInSAR 监测上海时序地表形变及沉降机理研究(A-0209-13-0105395)

作者简介: 常亮(1984-), 男, 湖北荆州人, 讲师, 博士, 主要从事卫星海洋学和卫星大地测量方面研究. E-mail: lchang@shou.edu.cn

(李燕 编辑)

量,基于顺轨干涉测量(Along-track interferometry,ATI)技术,利用机载 SAR 获取的 2 幅图像间的相位差成功估计了美国旧金山湾、使命湾和圣地亚哥湾的海洋表层流场。随后,国内外学者开展了大量基于 ATI 技术的机载 SAR 估计海洋表层流场的研究^[28-36]。然而,机载 SAR 成本高,且绝大多数为军事系统所用,限制了该方法的进一步发展。

2007 年德国 TerraSAR-X(TSX)卫星的成功发射,以及 2010 年其“姊妹”卫星 TanDEM-X(TDM)的相继运行,为基于 ATI 技术的星载 SAR 系统进行海洋表层流场研究提供了前所未有的契机。Chapron 等^[28]提出基于单天线星载 SAR 多普勒频移技术的表层流场估计方法,进一步推动了星载 SAR 在海洋表层流场观测上的相关应用研究中的发展。本文结合海洋表层流场的观测和应用,分别对基于 ATI 技术和多普勒频移技术的星载 SAR 海洋表层流场反演方法进行了分析与总结,以期进一步推进星载 SAR 的表层流反演在海洋科学研究、海洋资源应用、海洋环境保护与管理、海洋防灾与减灾等等相关领域中的应用。

1 顺轨星载 InSAR(ATI)技术估计海洋表层流场

ATI 技术首先由 Goldstein 和 Zebker^[26]提出,基本原理是在飞行平台上同时装载 2 个连线与飞行平台航向平行的天线,对同一场景成像并获取 SAR 复图像的相位差,然后利用相位差与 SAR 后向散射信号的多普勒频移估计雷达视线向(Line of Sight,LOS)的海洋表层流场。传统意义上的 ATI 技术的实施需要利用 2 个单独的天线接收 SAR 回波信号(如:美国奋进号航天飞机执行的航天雷达地形测绘任务(SRTM)),但是对采用先进的基于相控阵技术的 TerraSAR-X 天线而言,还可以更丰富的实验成像模式实施 ATI 技术^[37]。对场景内目标成像时,TSX 天线可物理分割成 2 个独立的部分接收反射信号,从而实现双接收天线模式(DRA)成像。此外,还可利用单天线接收反射信号,通过多路复用技术对子孔径单元的信号进行交替处理,实现孔径转换(AS)模式成像。

1.1 传统星载 ATI 模式

在机载 ATI 估计海洋表层流场取得突破性成果后^[26-27],Romeiser 和 Thompson^[38]基于组合型表面模型的布拉格散射理论,通过对 ATI 信号和成像机制的数值模拟,进一步证明了星载 ATI 技术用于海洋表层流场估计的可行性,并给出了利用 ATI 技术获取高质量海洋表层流场的最佳参数配置(如:低运行轨道、大入射角、高频信号、垂直极化和适当的时间间隔)。2000-02-11—22,SRTM 计划的实施,第一次验证了星载 ATI 技术进行海洋表层流场估计的可行性^[38]。然而,SRTM 的主要任务是进行全球地形测绘,将其用于海洋表层流场估计时受到如下限制^[35]:1)SRTM 顺轨天线的基线长度仅 7 m,对应于 2 幅 SAR 影像的时间间隔约为 0.5 ms,这与 X 波段 ATI 技术海洋表层流场估计的最佳时间间隔(2~5 ms)差距较大;2)SRTM 的入射角较大(55°)且仪器噪声水平(-29 dB)较高,使得 SAR 在风速较小的海表面上回波信号的信噪比仍较低。由于 SRTM 获取的 ATI 数据存在的上述缺陷,其获取的海洋表层流场与数值环流模型 KUSTWAD 间的标准差为 0.24 m/s。在考虑波流交互影响以及进行海流估计算法改进后,Romeiser 等利用 SRTM 数据获得了空间分辨率为 1 km、均方根为 0.1 m/s 的海洋表层流场,并相继在荷兰瓦登海^[35]和德国易北河^[39]开展了应用研究。任永政^[40]基于 SRTM 数据进行了海洋表层流场估计的初步研究,但没有考虑波浪的影响,也没有对估计结果进行有效验证。

由于 SRTM 计划实施中 ATI 技术存在的诸多限制,以及 SRTM 计划在海面获取的数据量有限,制约了传统星载 ATI 模式在海洋表层流场估计及其相关领域的进一步推进。德国 TSX 及 TDX 卫星的相继升空,为传统星载 ATI 模式的海洋表层流场估计提供了前所未有的机遇。TSX 和 TDX 卫星均以太阳同步近距离编队飞行,采用 HELIX 卫星运行方式^[37]。2 颗卫星构成串行星对在很接近的轨道上运行,类似一个单轨 SAR 干涉测量系统,其基线可以根据不同的应用需求进行配置。基于这种双星模式的 ATI 技术,可以获得高精度的顺轨干涉图,进而实现海洋表层流场的精确估计。Romeiser^[41]利用 2012-01-12—03-29 苏格兰

奥克尼地区的 TSX 和 TDX 数据,获取了基线长度分别为 25 和 40 m 的顺轨干涉影像对,并成功用于该地区的海洋表层流场估计。结果显示,双星模式组成的传统星载 ATI 技术获取的海洋表层流场的精度优于 0.1 m/s,空间分辨率可达 $33\text{ m}\times 33\text{ m}$,为解决海洋表层长波的轨道运动提供了可能有效的方法。国内何志华等^[42]开展了传统星载 ATI 技术进行洋流估计的仿真研究,但基于双星模式的 ATI 技术的表层流场研究鲜见报道。

1.2 双接收天线(Dual Receive Antenna, DRA)模式

除了利用 2 个单独天线实施传统 ATI 模式外,还可以利用总长为 4.8 m 的 TSX 天线阵列实施 ATI 技术。基于 TSX 天线的 ATT 技术又称为双接收天线(DRA)模式,由 Mittermayer 在 2002 年提出^[43],并陆续得到了实验论证^[44-45]。DRA 模式的基本设想就是从天线阵列中物理上分割出 2 个天线,并分别接收回波信号。DRA 模式主要是为了延长 TSX 的寿命而设计,但是在 DRA 操作模式下,不能实现传统的单天线数据获取和下行传输,使得基于 DRA 模式的海洋表面流场估计方法受到较大限制^[46]。

尽管如此,Romeiser 和 Runge^[46]通过数值仿真分析后证明 DRA 模式在荷兰瓦登海地区获取的数据质量比 SRTM 计划仍要好,以宽幅为 30 km 的条带(Stripmap)数据和宽幅为 100 km 的宽幅(ScanSAR)数据为例,通过基于 TSX 卫星的 DRA 模式估计的有效海流分辨率分别为 800 m 和 1500 m。而且,考虑回波信号信噪比和入射角对 ATI 非线性成像机制的综合影响,推荐将入射角控制在 30° 左右。

最近,Romeiser 等^[41]利用基线长度为 1.15 m 的 DRA 模式实测 TSX 水平极化干涉对获取的海洋表面流场,与双星模式和数值海流计算系统 POLPRED 获取结果进行比较。结果表明,短基线 DRA 模式估计的海洋表面流场的空间分辨率($1\text{ km}\times 1\text{ km}$)较双星模式估计结果的空间分辨率($33\text{ m}\times 33\text{ m}$)差,但 DRA 模式估计流场与 POLPRED 输出结果较为一致。此外,为获取 0.1 m/s 的海流精度,DRA 模式需要对 1 km^2 内的像素进行平均,而双星模式仅需在 $33\text{ m}\times 33\text{ m}$ 范围内平均即可。

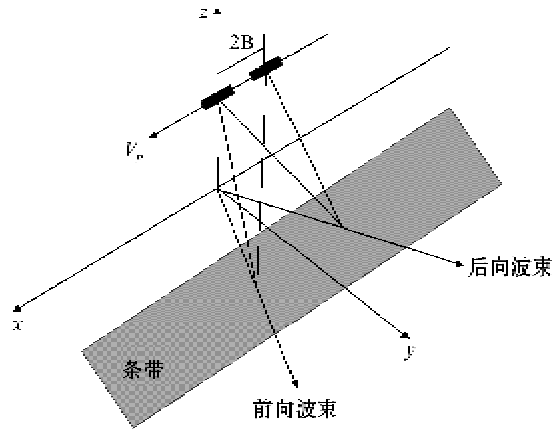
1.3 孔径转换(Aperture Switching, AS)模式

为了克服 DRA 模式的限制,Runge 等^[47]首次提出了 AS 模式。与 DRA 模式从 TSX 天线阵列中物理上分割出两个天线不同,AS 模式仅采用单物理天线进行回波信号的接收,然后利用多路复用技术将信号进行处理。虽然 AS 模式克服了 DRA 模式的限制,与 DRA 模式相比,AS 模式也存在以下缺陷:1)平均仪器噪声约大 3 dB;2)图幅宽度减少约 1/2;3)AS 模式的脉波重复频率更大,使得数据处理时方位向模糊度增加,为了解决这一问题,可能需要降低图像方位向分辨率,这甚至可能会导致宽幅数据无法使用^[46, 48]。

通过对宽幅为 15 km 的 Stripmap 数据和宽幅为 50 km 的 ScanSAR 数据进行 AS 模式的数值仿真,Romeiser 和 Runge^[46]估计了荷兰瓦登海地区的海洋表面流场。结果发现 Stripmap 和 ScanSAR 数据所得流场的有效分辨率分别为 400 和 600 m。随后,Romeiser 等^[49]对 TSX 首次获取的 6 组 ATI 数据进行分析后证实,尽管 AS 模式数据存在仪器噪声较大、图幅宽度较窄、ATI 基线较短和方位向模糊度增加等缺陷,该模式数据仍可进行海洋表面流场的精确估计。

1.4 双波束干涉模式(Dual-Beam Interferometry, DBI)

DBI 模式最早由 Rodriguez 等^[50]提出,它利用安置在飞行平台上的两幅顺轨天线对地面进行观测(图 1)。每个天线都可以分别在飞行方向和反飞行方向产生前向波束和后向波束,对两幅天线生成的前向波束和后向波束进行交叉干涉处理即可得到一对干涉图,结合利用每幅干涉图产生的雷达视线向的多普勒速度,即可用于估计二维海流场^[51]。近年来,欧洲空间局支持了相关的 DBI 模式系统的研究工作^[52],这将进一步推进 ATI 技术在表层海流估计中的发展。

图1 双波束干涉模式的成像空间几何关系^[52]Fig.1 Dual-beam interferometry system geometry^[52]

2 星载 SAR 多普勒频移(DCA)估计海洋表层流场

2.1 国内外研究现状

在 SAR 成像系统中,由于雷达对于目标的相对运动,使得接收到的回波信号频率相对发射信号频率产生的变化,就是多普勒频移效应^[53]。利用 Envisat ASAR 数据,Chapron 等^[28]首次提出利用 SAR 信号的多普勒中心频率进行海洋表层运动速度估计的方法,并指出该速度包含海面风、浪和海流的综合影响。根据 SAR 卫星的精密轨道与姿态,可精确预测 SAR 信号的多普勒中心频率。由于观测目标的运动,SAR 信号记录的多普勒中心频率与其预测值不同,两者之间的差值即是海洋表层运动在 SAR 图像上的物理体现,其大小与各散射目标的后向散射强度相关^[33]。随后,陆续有学者基于多普勒中心频移(DCA)方法,对阿古拉斯海流区域的海流速度场进行了研究与分析^[54-55]。Johannessen 等^[55]采用雷达成像模型(RIM)和雷达多普勒信息建立了 DopRIM 模型,并用于海洋表层流场的反演。结果表明,虽然多普勒速度并不是对海洋表层流速的直接测量,但其有助于从新的视角研究中尺度海洋动力学。基于加拿大 Radarsat-1 的标准聚束模式数据,Marghany 和 Hashim^[56]利用波长差异解模糊(WDAR)方法和多视差频(MLBF)算法精确估计了多普勒中心模糊度,进而用于海洋表层流场的估计,其精度可达 0.11 m/s。Rossi 等^[57]对 TSX 数据进行了多普勒频移估计,并利用 DCA 方法估计了德国易北河的水面流速,证实了 TSX 数据可以通过 ATI 技术和 DCA 方法进行海洋表层流场的反演。Rouault 等^[22]利用阿古拉斯海流区域 2 年的 ASAR 宽幅数据,基于 DCA 方法估计了该地区的海洋表层流场,与浮标观测结果比较后发现,风速的输入精度会影响海流的估计精度。Hansen 等^[58]系统全面地介绍了利用 ASAR 宽幅 Level-1b 数据进行海洋表层流场估计的处理步骤以及相应的误差正方法,通过对实例分析后表明,对垂直和水平极化数据进行误差修正后的多普勒频移误差分别为 4.7 和 3.9 Hz,对应雷达入射角为 35°时大小分别为 23 和 19 cm/s 的水平方向多普勒速度。随后,Hansen 等^[59]利用 2007—2011 年在挪威海、北海和斯卡格拉克海峡获取的近 1200 景 ASAR 数据进行了海洋表层流场的反演研究,再次证实了 DCA 方法监测海洋表层环流的时空变化的能力。为了进一步检验 DCA 方法在强海潮作用下的有效性,考虑波浪交互作用的影响,Hansen 等^[60]指出 DopRIM 模型可方便有效地分离各种散射机制对多普勒速度的影响。最近,Dagestad 等^[19]针对现有方法仅能获取雷达视线向一维海流速度场的缺陷,提出基于 DCA 方法利用升降轨 ASAR 数据组合获取二维海洋表层流场的方法。Romeiser 等^[41]利用 TSX 数据,将 DCA 方法、DRA 和 AS 模式估计的流场进行比较后发现,一般情况下,DCA 方法与短基线 DRA 和 AS 模式能获得质量相当的流场,但在估计河流和海洋内波流场或对某特定方

向的海流分辨率有较高需求时,短基线 DRA 和 AS 模式比 DCA 方法估计结果更有优势。

在国内,已经有一些相关研究开始关注如何估计星载 SAR 的多普勒参数^[61-63],这些工作有助于进一步进行海洋表层流场的反演研究。

2.2 基于星载 SAR 多普勒频移的海洋表层流场估计方法

基于星载 SAR 多普勒频移信息估计海洋表层流场的流程如图 2 所示:

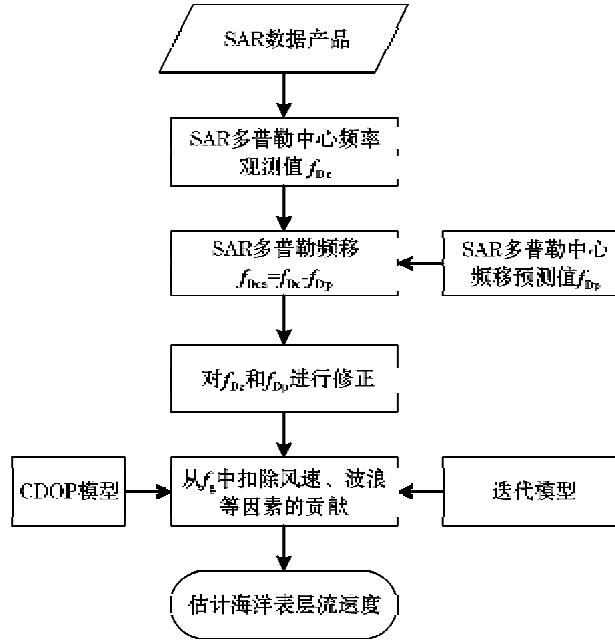


图 2 基于星载 SAR 的 DCA 方法估计海洋表层流场流程图

Fig. 2 Flowchart of ocean surface current field estimation by space-borne SAR DCA method

单天线 SAR 卫星回波信号的多普勒频移^[58]可表示为:

$$f_{\text{Dca}} = f_{\text{Dc}} - f_{\text{Dp}} \quad (1)$$

式中, f_{Dc} 为多普勒中心频率的实测值, 定义为雷达回波在天线波束中心线上的频率; f_{Dp} 为多普勒中心频移的预测值, 主要是由 SAR 卫星与地球间的相对速度引起的, 可通过 SAR 卫星的精密轨道和天线指向进行估计:

$$f_{\text{Dp}} = \frac{k_e V_{\text{sc}}}{\pi} \sin \gamma \cos \alpha \times [1 - (\omega_e / \omega) (\epsilon \cos \beta \sin \Psi \tan \alpha + \cos \Psi)] \quad (2)$$

式中, V_{sc} 为 SAR 卫星沿轨道方向的速度大小; γ 为雷达波束的高度角; α 为偏航角; ω_e 为地球自转角速度; ω 为 SAR 卫星角速度; ϵ 表示雷达侧视成像方向(右侧视=1, 左侧视=-1); β 为升交点与 SAR 轨道平面的夹角; Ψ 为 SAR 轨道平面的倾角。对于 ASAR 宽幅产品, 可利用欧洲空间局(ESA)提供的 CFI 软件估计 f_{Dp} 的大小。

多普勒频移在海洋表层的物理体现可表示为:

$$f_g = f_{\text{Dca}} - f_{\text{err}} \quad (3)$$

式中, f_{err} 为 f_{Dc} 和 f_{Dp} 的综合估计误差。理论上, 在与地球相对静止的海面上 f_g 应等于零, 然而, 对动态变化的海面, f_g 受到海面雷达后向散射截面变化的影响。 f_{err} 可进一步表示为

$$f_{\text{err}} = f_{e_0} + f_{pe} + f_{\Delta} \quad (4)$$

式中, f_{e_0} 为 SAR 方位向上的后向散射截面梯度导致的多普勒中心频移; f_{pe} 为由雷达波束指向角误差导致的多普勒中心频移的预测误差; f_{Δ} 为残余误差。为消除 f_{e_0} 和 f_{pe} 对 f_g 的影响, Hansen 等^[58] 提出了相应的解决方法。

在对 SAR 多普勒频移进行有效修正后, 还需进一步扣除海面风速、波浪等因素对多普勒频移的贡献, 可

分别采用 Collard 等^[54]提出的 CDOP 模型和 Romeiser 等^[33,35]提出的迭代模型进行估计。最后,可利用海洋表面流场导致的多普勒频移估计海洋表层流速度:

$$v_r = -f_{\text{Dca}}^*/(k_e \sin \theta_I) \quad (5)$$

其中, f_{Dca}^* 为进行修正并去除风速、波浪等因素影响后的多普勒频移大小; k_e 为电磁波数(对 C 波段 ASAR 数据, $k_e = 112 \text{ m}^{-1}$); θ_I 为雷达入射角大小。当目标向原理雷达的方向运动时 v_r 为正^[33,38]。

3 星载 SAR 估计海洋表层流场应用实例

3.1 ATI 技术

利用 2010-04-26—2012-02-26 的 TSX/TDM 数据, Romeiser^[41] 分别采用基于 DRA 模式和双星模式的 ATI 技术估计了苏格兰奥克尼群岛和彭特兰湾的海洋表层流场。为了减小噪声,估计过程均采用了窗口大小为 11×11 的 Boxcar 滤波方法。此外,对相关系数小于 0.5 的像素进行了掩膜处理,然后利用周围的高质量像素通过差值进行填补。为消除风、浪对结果的影响,还采用迭代方法进行了改正以获取更精确的海洋表层流场。图 3a 和 3b 分别表示利用 2010-04-26 TSX 卫星的 DRA 模式数据和 2012-02-26 的 TSX 和 TDM 双星模式数据获取的海洋表层流场,图 3c 和 3d 分别为图 3a 和 3b 与 POLPRED 环流模型估计海流的差值^[19]。可以看出, DRA 模式在图 3c 偏东方向的估计结果比环流模型输出的海流值要大,而双星模式在图 3d 偏西方向的估计结果比环流模型输出的海流值要小。

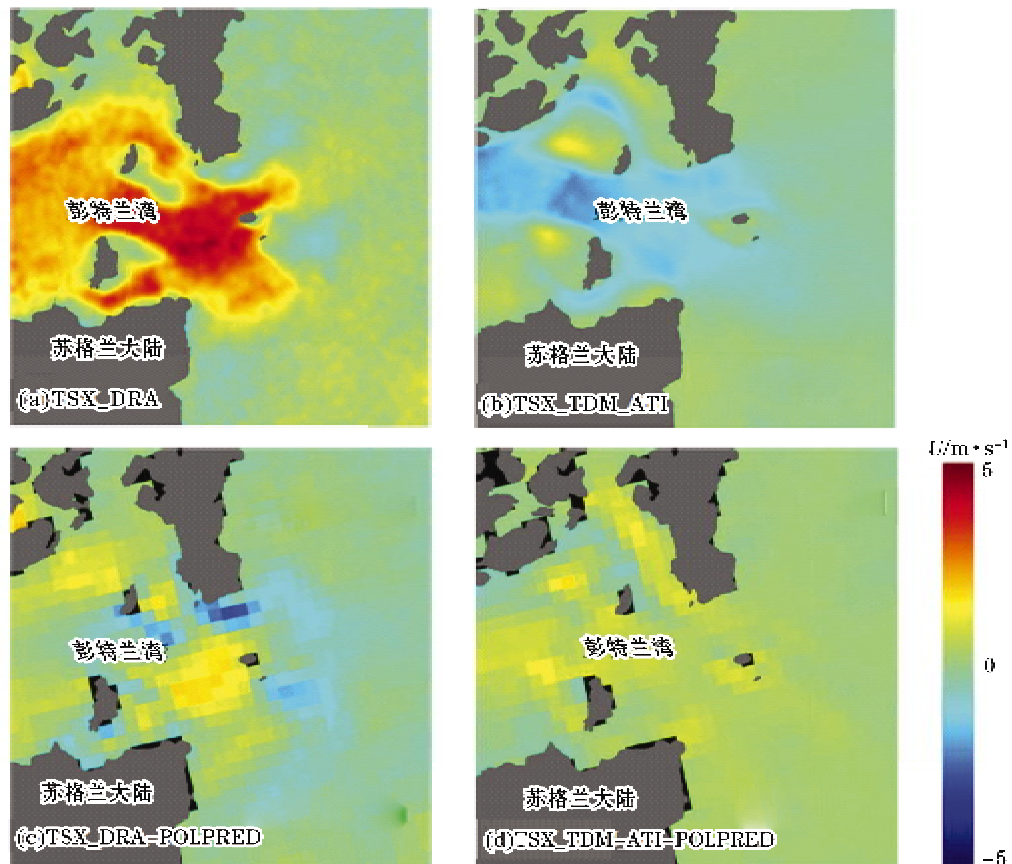


图 3 ATI 技术估计的海洋表层流场及其与 POLPRED 环流模型的差值^[41]
Fig. 3 Ocean surface current field estimated by ATI technique, together with its difference from results derived by POLPRED circulation model^[41]

3.2 DCA 技术

最近, Dagestad 等^[19]利用 2007—2011 年的近 1200 景升、降轨 ASAR 数据, 基于 DCA 方法进行了二维(经向、纬向)的海洋表层平均流场反演研究, 结果如图 4a 所示。为了对图 4a 中的结果进行比较验证, 图 4b 还给出了综合稳态地形资料、GRACE 数据、高度计和实测数据估计得到的地转流。比较图 4a 和图 4b 可以看出, 基于 DCA 方法的估计结果与图 4b 得到的二维流场在大小和方向上都具有较好的一致性。图 4c 和 4d 分别给出了 DCA 方法估计海流和地转流在纬向的标准差, 而图 4e 和 4f 分别为经向的标准差。基于 SAR 多普勒信息在经向的海流估计精度比地转流在该方向分量的精度要高。在纬向上, 海岸带附近的高度计精度较差, 直接影响了地转流的估计精度。在除海岸带的区域, 地转流估计精度较 DCA 的结果好。

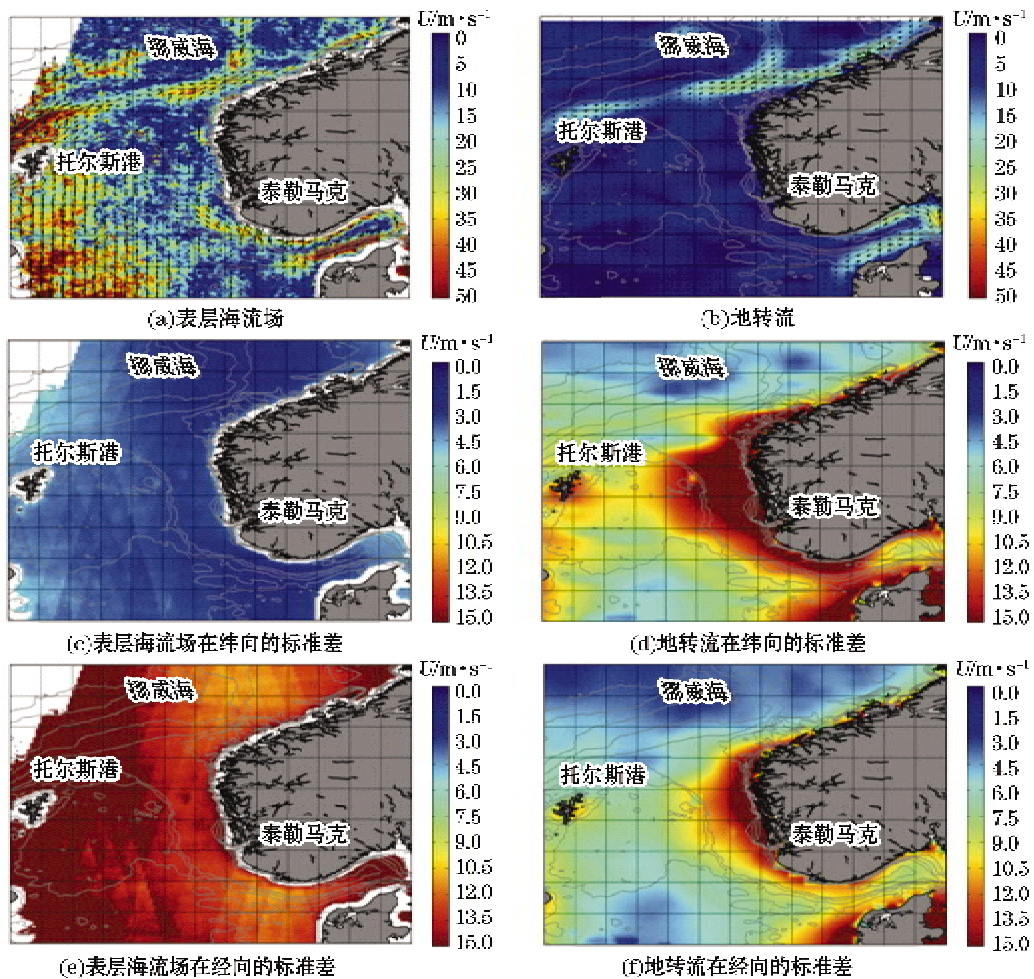


图 4 表层流场分布以及在经向和纬向与地转流的标准差^[19]

Fig. 4 Surface current field distribution and the standard deviations of the difference with geostrophic current of the u- and v-components^[19]

4 展 望

利用美国 SRTM 计划在方位向上基线长为 7 m 的 2 部天线, 学者们开创了采用星载平台进行海洋表层海流估计的先河。然而, 在德国 TSX 卫星发射前, 基于 ATI 技术的海洋表层海流研究主要通过机载 SAR 和仿真模拟来进行。2005 年, 基于星载 SAR 多普勒频移估算海洋表层流场方法的提出^[4]则从业务化的层

面掀起了利用星载平台进行海洋表层海流定量研究的热潮^[19,22,35,39,41,48-49,57]。德国 TSX 和 TDX 卫星在 2007 年和 2010 年的相继发射,进一步推动了星载 SAR 估计海洋表层流场研究的发展。

星载 SAR 估计海洋表层流场的方法主要有 ATI 和 DCA 两种,两者具有较好的互补性,主要体现在以下 2 个方面:

1)ATI 技术的实施需要通过双接收天线或天线阵列来实现,现有能实施 ATI 技术的星载平台仅有德国的 TSX 和 TDX 卫星,使得基于 ATI 技术进行海流速度估计的有效数据量非常有限。而 DCA 方法仅需要单天线即可实现,据已有成果,包括 ERS-1/2, ASAR, Radarsat-1/2, TSX 和 TDX 在内的 SAR 卫星均可以基于 DCA 方法进行海洋表层流场估计,使得 DCA 方法非常有潜力对海流速度进行业务化监测。

2)ATI 技术可以全分辨率估计海洋表层流场,具有较高的空间分辨率。而 DCA 方法则需通过空间平均来保证流场估计精度,空间分辨率较低。

国际上,德国航空太空中心(DLR)和挪威南森环境与遥感中心(NERSC)正在进一步发展和完善星载 SAR 估计海洋表层流场的理论与方法,ESA 计划的下一颗 SAR 卫星 Sentinel-1 预计也采用双站雷达,并提供更高精度的多普勒速度场。开展星载 SAR 表层海流估计研究,可为获取表层海流细结构信息提供新的手段,加深对海洋环流输送规律的认识甚至发现新的海流,跟踪海洋涡旋及研究其形成及变化规律,还可用于极地海冰消融等方面的研究。此外,开展星载 SAR 海洋表层流场估计的应用,还可为我国的国防生产、海洋资源管理等领域提供更为精确的信息。

参考文献(References):

- [1] SHI M C, GAO G P, BAO X W. Introduction to marine survey methodology[M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2008. 侍茂崇,高郭平,鲍献文. 海洋调查方法导论[M]. 青岛:中国海洋大学出版社, 2008.
- [2] ZHOU H, YUAN D L, GUO P F, et al. Meso-scale circulation at the intermediate-depth east of Mindanao observed by Argo profiling floats[J]. Science China Earth Science, 2010, 40(1): 105-114. 周慧,袁东亮,郭佩芳,等. Argo 剖面浮标显示的棉兰老岛以东中层环流的中尺度信号特征[J]. 中国科学:地球科学, 2010, 40(1): 105-114.
- [3] LI Y H, WANG F, REN X B. Development trend and strategy of ocean observing capability[J]. Advances in Earth Science, 2010, 25(7): 715-722. 李颖虹,王凡,任小波. 海洋观测能力建设的现状、趋势与对策思考[J]. 地球科学进展, 2010, 25(7): 715-722.
- [4] SU J Z, WANG D X, CHEN J, et al. Modeling the trajectories of satellite-tracked drifters with regression models[J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(6): 607-617. 苏京志,王东晓,陈举,等. 利用回归模型模拟卫星跟踪海洋漂流浮标轨迹[J]. 地球科学进展, 2005, 20(6): 607-617.
- [5] CHEN D K, XU J P, MA J R, et al. Argo global observation network and studies of upper ocean structure, variability and predictability [J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(1): 1-7. 陈大可,许建平,马继瑞,等. 全球实时海洋观测网(Argo)与上层海洋结构、变异及预测研究[J]. 地球科学进展, 2008, 23(1): 1-7.
- [6] WANG D X, LIU Q Y, XIE Q, et al. Progress of regional oceanography study associated with western boundary current in the South China Sea[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58: 1277-1288. 王东晓,刘钦燕,谢强,等. 与南海西边界流有关的区域海洋学进展[J]. 科学通报, 2013, 58: 1277-1288.
- [7] WANG S B, JI G R, YANG G B, et al. Center frequency estimation of broadband ADCP signal[J]. Periodical of Ocean University of China, 2013, 43(2): 87-92. 汪胜波,姬光荣,杨光兵,等. 宽带声学多普勒流速剖面仪信号中心频率估计[J]. 中国海洋大学学报, 2013, 43(2): 87-92.
- [8] LIAO G H, YUAN Y C, ARATA K, et al. Analysis of internal tidal characteristics in the layer above 450 m from acoustic Doppler current profiler observations in the Luzon Strait[J]. Science China Earth Science, 2011, 41(1): 124-140. 廖光洪,袁耀初, ARATA K, 等. 吕宋海峡 ADCP 观测的 450 m 以浅水层内潮特征分析[J]. 中国科学:地球科学, 2011, 41(1): 124-140.
- [9] YIN X L, ZHANG H W, REN J, et al. Analysis on characteristics of current and sediment movement in Humen estuary of Pearl River during spring tide in flood season[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(2): 166-172. 尹小玲,张红武,任杰,等. 珠江口虎门水域洪季大潮的水沙特点分析[J]. 水利学报, 2009, 40(2): 166-172.
- [10] WANG Z K, STEVEN D, STEPHANIE I, et al. A cabled oceanographic monitoring network in the northern Arabian Sea: Success, challenges and opportunities[J]. Advances in Earth Science, 2013, 28(5): 529-536. 王展坤, STEVEN D, STEPHANIE I, 等. 北阿拉

- 伯海的光纤海洋观测网络:成功、挑战和机遇[J]. 地球科学进展, 2013, 28(5): 529-536.
- [11] ZHANG C Z, ZHANG X H, WU Q S. Experimental study of reciprocal sound transmission for current measurement in the Qiantang River [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(7): 1741-1748. 张传正, 朱小华, 吴清松. 钱塘江双向声传播测流实验研究[J]. 地球物理学报, 2010, 53(7): 1741-1748.
- [12] WANG G H, XU J P. Application of isopycnal P-vector method to diagnostic study of the South China sea circulation[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2002, 24(1): 124-128. 王桂华, 许建平. 等密度面 P 矢量方法在南海环流诊断研究中的应用[J]. 海洋学报, 2002, 24(1): 124-128.
- [13] WANG G H, LI R F. Advances in the study of deducing ocean circulation from hydrographic data[J]. Advances in Earth Science, 2004, 19(1): 100-106. 王桂华, 李荣凤. 利用水文资料推测海洋流场的研究进展[J]. 地球科学进展, 2004, 19(1): 100-106.
- [14] ESSEN H, GURGEL K, SCHLICK T. On the accuracy of current measurements by means of HF radar [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2000, 25(4): 472-480.
- [15] GONG Z P, KE H Y, WU X B, et al. HF radar observation of Longwang Typhoon in the Taiwan Strait[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2007, 50(6): 1695-1702. 龚子平, 柯亨玉, 吴雄斌, 等. “龙王”台风期间高频地波雷达数据分析[J]. 地球物理学报, 2007, 50(6): 1695-1702.
- [16] WANG F Y, HE Y J, LU Z Z, et al. Research on algorithm of inverting ocean surface current with a sequence of X-Band radar images [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2009, 38(5): 443-449. 王福友, 何宜军, 卢志忠, 等. 基于 X 波段雷达图像序列反演海洋表面流的算法研究[J]. 测绘学报, 2009, 38(5): 443-449.
- [17] LI L, XU J D, JIN C S, et al. Annual variation of sea surface height, dynamic topography and circulation in the South China Sea—A TOPEX/Poseidon satellite altimetry study[J]. Science China: Series D, 2002, 32(12): 978-986. 李立, 许金电, 靖春生, 等. 南海海面高度、动力地形和环流的周年变化——TOPEX/Poseidon 卫星测高应用研究[J]. 中国科学: D 辑, 2002, 32(12): 978-986.
- [18] SIEDLER G, ROUAULT M, LUTJERHARMS J. Structure and origin of the subtropical South Indian Ocean countercurrent[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(24): L24609.
- [19] FERNA NDEZ-PRIETO D, SABIA R. Remote sensing advances for earth system science[M]. Germany: Springer, 2011.
- [20] MADSEN K, HYER J, TSCHERNING C. Near-coastal satellite altimetry: sea surface height variability in the North Sea-Baltic Sea area[J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(14): L14601.
- [21] VIGNUDELLI S, BERRY P, ROBLIOU I. Satellite altimetry near coasts—Current practices and a look at the future[M]. Pisa: ESA, 2008.
- [22] ROUAULT M, MOUCHE A, COLLARD F, et al. Mapping the Agulhas Current from space: An assessment of ASAR surface current velocities[J]. Journal of Geophysical Research, 2010, 115(C10): C10026.
- [23] MAO Z H, PAN D L, PAN Y Q. Methods of obtaining sea surface velocities field from SST images[J]. Marine Science Bulletin, 1996, 15(1): 84-90. 毛志华, 潘德炉, 潘玉球. 利用卫星遥感 SST 估算海表流场[J]. 海洋通报, 1996, 15(1): 84-90.
- [24] EMERY W, FOWLER C, CLAYSON C. Satellite-image-derived Gulf Stream currents compared with numerical model results[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1991, 9(3): 286-304.
- [25] 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. 林珲, 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.
- [26] GOLDSTEIN R, ZEBKER H. Interferometric radar measurement of ocean surface currents[J]. Nature, 1987, 328(6132): 707-709.
- [27] GOLDSTEIN R, BARNETT T, ZEBKER H. Remote sensing of ocean currents[J]. Science, 1989, 246(4395): 1282-1285.
- [28] CHAPRON B, COLLARD F, ARDHUIN F. Direct measurements of ocean surface velocity from space: Interpretation and validation [J]. Journal of Geophysical Research, 2005, 110(C7): C07008.
- [29] MAROM M, SHEMER L, THORNTON E. Energy density directional spectra of a nearshore wave field measured by interferometric synthetic aperture radar[J]. Journal of Geophysical Research, 1991, 96(C12): 22125-22134.
- [30] SHEMER L, MAROM M, MARKMAN D. Estimates of currents in the nearshore ocean region using interferometric synthetic aperture radar[J]. Journal of Geophysical Research, 1993, 98(C4): 7001-7010.
- [31] THOMPSON D, JENSEN J. Synthetic aperture radar interferometry applied to ship-generated internal waves in the 1989 Loch Linnhe experiment[J]. Journal of Geophysical Research, 1993, 98(C6): 10259-10269.
- [32] GRABER H, THOMPSON D, CARANDE R. Ocean surface features and currents measured with synthetic aperture radar interferometry and HF radar[J]. Journal of Geophysical Research, 1996, 101(C11): 25813-25832.
- [33] ROMEISER R, THOMPSON D. 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.

- [34] KIM D, MOON W, MOLLER D, et al. Measurements of ocean surface waves and currents using L- and C-band along-track interferometric SAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(12): 2821-2832.
- [35] ROMEISER R. Current measurements by airborne along-track InSAR; measuring technique and experimental results[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2005, 30(3): 552-569.
- [36] YU X Z, CHONG J S, HONG W. An iterative method for ocean surface current retrieval by along-track interferometric SAR[J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2012, 34(11): 2660-2665. 于祥祯, 种劲松, 洪文. 顺轨干涉 SAR 海洋表面流场迭代反演算法[J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(11): 2660-2665.
- [37] BREIT H, FRITZ T, BALSS U, et al. TerraSAR-X SAR processing and products[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(2): 727-740.
- [38] ROMEISER R, BREIT H, EINEDER M, et al. Demonstration of current measurements from space by along-track SAR interferometry with SRTM data[C]//*IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. New Jersey: IEEE, 2002: 158-160.
- [39] ROMEISER R, RUNGE H, SUCHIANDT S, et al. Current measurements in rivers by spaceborne along-track InSAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(12): 4019-4030.
- [40] REN Y Z. Study on retrieval algorithms of sea surface wind fields and sea surface current fields from TerraSAR-X images[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009. 任永政. 从卫星 TerraSAR-X 图像反演海面风场和海表流场方法研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- [41] ROMEISER R, RUNGE H, SUCHIANDT S, et al. Quality assessment of surface current fields from TerraSAR-X and TanDEM-X a long-track interferometry and Doppler centroid analysis[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 52(5): 2759-2772.
- [42] HE Z H, DONG Z, LIANG D N. Study on ocean along-track interferometric spaceborne SAR[J]. *Journal of System Simulation*, 2008, 20(17): 4496-4500. 何志华, 董臻, 梁甸农. 星载 SAR 海面顺轨干涉仿真研究[J]. *系统仿真学报*, 2008, 20(17): 4496-4500.
- [43] MITTERMAYER J, ALBERGA V, BUCKREUSS S, et al. TerraSAR-X; Predicted performance [C]//FUJISADA H, LURIE J B, ATEN M L, et al. *Proc. SPIE 4881, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites VI*. SPIE, 2002.
- [44] MITTERMAYER J, RUNGE H. Conceptual studies for exploiting the TerraSAR-X dual receive antenna[C]//*Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. New Jersey: IEEE, 2003: 2140-2142.
- [45] ROMEISER R, BREIT H, EINEDER M, et al. On the suitability of TerraSAR-X split antenna mode for current measurements by a long-track interferometry[C]//*Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. New Jersey: IEEE, 2003: 1320-1322.
- [46] ROMEISER R, RUNGE H. Theoretical evaluation of several possible along-track InSAR modes of TerraSAR-X for ocean current measurements[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(1): 21-35.
- [47] RUNGE H, EINEDER M, PALUBINSKAS G, et al. Traffic monitoring with TerraSAR-X[C]//*Proceedings of Internal Revenue Service*. Washington: Internal Revenue Service, 2005: 629-634.
- [48] RUNGE H, CHRISTOPHER L, MARTINA G, et al. Performance analysis of virtual multi-channel modes for TerraSAR-X[C]//*Proceedings of European Conference on Synthetic Aperture Radar*. Dresden: OLR, 2006: 4PP.
- [49] ROMEISER R, SUCHIANDT 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.
- [50] RODRIGUEZ E, IMEL D, HOUSHMAND B. Two-dimensional surface currents using vector along-track interferometry[C]//*Proceedings of PIERS*. Seattle: The Electromagnetics Academy, 1995: 763.
- [51] FRASIER S J, CAMPS A J. Dual-beam interferometry for ocean surface current vector mapping[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(2): 401-414.
- [52] M RQUEZ J, RUFFINI G, LANCASHIRE D, et al. Wavemill; A novel instrument for ocean circulation monitoring[C]//*Proceedings of EUSAR*. Aachen: VDE Verlag, 2010: 52-54.
- [53] SMITH A. A new approach to range-Doppler SAR processing[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1991, 12(2): 235-251.
- [54] COLLARD F, MOUCHE A, CHAPRON B, et al. Routine high resolution observation of selected major surface currents from space[C]//*Proceedings of SeaSAR workshop*. Frascati: ESA, 2008: SP-656.
- [55] JOHANNESSEN J, 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): L22608.
- [56] MARGHIANY M, HASHIM M. Robust of Doppler centroid for mapping sea surface current by using radar satellite data[J]. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2009, 2(4): 781-788.
- [57] ROSSI C, RUNGE H, BREIT H, et al. Surface current retrieval from Terrasar-X data using Doppler measurements[C]//*Proceedings*

- of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, New Jersey: IEEE, 2010: 3055-3058.
- [58] HANSEN M, COLLARD F, DAGESTAD K, et al. Retrieval of Sea surface range velocities from Envisat ASAR Doppler centroid measurements[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(10): 3582-3592.
- [59] HANSEN M, JOHANNESSEN J, DAGESTAD K, et al. Monitoring the surface inflow of Atlantic Water to the Norwegian Sea using Envisat ASAR[J]. Journal of Geophysical Research, 2011, 116(C12): C12008.
- [60] HANSEN M, KUDRYAVTSEV V, CHAPRON B, et al. Simulation of radar backscatter and Doppler shifts of wave current interaction in the presence of strong tidal current[J]. Remote Sensing Environment, 2012, 120: 113-122.
- [61] YAO Y L, LU S N. Study on SAR total zero Doppler steering method based on elliptic orbit[J]. Spacecraft Engineering, 2011, 20(4): 50-53. 姚玉林, 陆书宁. 星载 SAR 椭圆轨道全零多普勒导引方法研究[J]. 航天器工程, 2011, 20(4): 50-53.
- [62] WEN Z, ZHOU Y Q, CHEN J. Accurate method to calculate space-borne SAR Doppler parameters[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(12): 1418-1421. 文竹, 周荫清, 陈杰. 高精度星载 SAR 多普勒参数估算方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(12): 1418-1421.
- [63] PEI L, GAO L N, DONG X C, et al. High accurate compensation method of Doppler center frequency in GEO SAR using phase scan [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2010, 30(6): 741-745. 裴磊, 高立宁, 董锡超, 等. 基于相位扫描的 GEO SAR 多普勒中心频率高精度补偿方法[J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(6): 741-745.

Review on Ocean Surface Current Field Measurement by Space-borne SAR

CHANG Liang^{1,2}, GAO Guo-ping^{1,2}, GUO Li-xin^{1,2}

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Collaborative Innovation Center for Distant-water Fisheries, Shanghai 201306, China)

Abstract: Measurement of ocean surface current field using space-borne synthetic aperture radar (SAR) has become an important method in marine research. The technology developments of estimating ocean surface current field using space-borne SAR system is analyzed and the progresses of along-track interferometric SAR (ATI) technique and Doppler centroid analysis (DCA) method on extracting ocean surface current field are introduced. Finally, future perspective of estimating ocean surface current field using space-borne SAR and related applications are discussed.

Key words: space-borne synthetic aperture radar (SAR); along-track interferometric SAR; Doppler shift; ocean surface current field

Received: June 22, 2014