

海面流场卫星遥感方法综述*

Overview on Satellite Remote-sensing Methods for Sea-surface-current Measurement

何宜军, 刘保昌, 张 彪, 陈忠彪, 丘中锋

HE Yi-jun, LIU Bao-chang, ZHANG Biao, CHEN Zhong-biao, QIU Zhong-feng

(南京信息工程大学海洋科学学院, 江苏南京 210044)

(The School of Marine Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu, 210044, China)

摘要:海表面流矢量是海洋和气象领域诸多过程中最基本、最重要的要素, 它们对海洋中多种生物过程、化学过程和物理过程都有制约作用, 因此, 掌握全球范围的海流信息和规律无论是对于海洋学本身的研究, 还是与海洋密切相关的渔业、航运等都有重要意义。测量海流比较直接的方式是“现场观测”, 然而这种方法的空间覆盖范围有限, 且观测成本较高。岸基高频地波雷达是专门用来测量沿海岸海流的雷达设备, 然而其测量的空间范围有限, 不能进行全球观测。卫星遥感能够实现低成本、高空间分辨率、以及全球范围的海场测量。本文对海面流场卫星遥感方法进行综述, 其中包括多时相示踪物测量法、卫星高度计测量法、合成孔径雷达多普勒中心偏移法、以及合成孔径雷达沿航向干涉法, 并对海面流场卫星遥感方法进行展望。

关键词:海表面流 流场反演 卫星遥感 合成孔径雷达

中图分类号: P731.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-9164(2015)03-0294-07

Abstract: Sea surface currents can impose influences and constraints on oceanic physical processes, chemical processes and biological processes, so the measurement of global seasurface currents is of great significance for the oceanography research or for fisheries, shipping, etc. One direct way of measuring sea currents is the *in situ* observation. However, this method is generally limited in its spatial coverage due to its high cost. Shore-based high-frequency radar systems are specially designed to map the currents off the coast. However, their coverage, like the *in situ* observation, is also limited and cannot realize a global scale. Only satellite remote sensors can provide a cost-effective means of monitoring sea surface currents with a global coverage. The objective of this paper is to review several remote-sensing methods for mapping seasurface currents, including the sequential-image feature tracking method, the satellite altimetry method, the synthetic aperture radar (SAR) Doppler centroid shift method, and the SAR along-track interferometry method. Finally, we give an outlook for upcoming technologies for sea-surface-current measurement.

Key words: sea surface currents, current field retrieval, satellite remote sensing, synthetic aperture radar

收稿日期: 2015-04-20

作者简介: 何宜军(1963-), 男, 教授, 主要从事海洋遥感、物理海洋方面的研究。

* 国家自然科学基金项目(“利用角度分集 SAR 反演海洋流场与风场”和“基于 MIMO-SAR 的高分辨海面成像与大覆盖海流测量方法研究”)资助。

0 引言

海流对海洋上空甚至全球的气候和天气的形成

及变化有重要的影响^[1,2]。比如,流向高纬度的海流会造成水汽向上输送,使得空气湿度增大而产生降水;而流向低纬度的海流会产生逆温,水汽不易向上输送,蒸发较弱而不易成雨。海流对海洋中多种物理、化学、生物以及地质过程也存在影响和制约作用。比如,寒暖流交汇的海区,海水易受到扰动,可以将下层的营养物质带到表层,有利于鱼类大量繁殖^[3];海流可以使得污染物迅速扩散而加快其稀释和净化的速度,也相应地使污染范围扩大^[4];海水运动是形成海岸地形的重要因素,引起海岸线变迁,影响沿海沉积物的搬运和沉积。此外,海流在军事上也有重要的意义。对于海军作战,海流是需要考虑的重要因素之一,合理地利用海流会降低战争消耗,增加胜利的筹码(比如,舰艇顺水航行有利于提高航行速度而节约时间和燃料;下降流有利于潜艇的下潜,上升流有利于潜艇的出击)。海流信息的获取在民用方面也有重要的作用,比如,贸易船只航线的选择要参考海流的情况。要实现海岸带资源的可持续开发,就要研究海流的规律。因此,全球范围的海洋流场信息的反演无论是对于海洋学本身的研究,还是与海洋密切相关的气象学,甚至军事应用均起着至关重要的作用。

测量海流比较直接的一种方式就是“现场”观测。“现场”观测主要有两种方法:欧拉方法与拉格朗日方法^[5]。欧拉方法的原理是将海流计安装在锚定浮标上并放置在海洋中某个固定的位置,通过海水的流动与海流计的相互作用来测量海流的速度。通过欧拉方法测海流的仪器包括叶轮海流计^[1]、声学多普勒海流剖面仪和电磁海流计等。拉格朗日测流法的原理是通过跟踪海水“质点”以测量海流的速度。通过跟踪海面的漂标即可实现海流的测量^[6]。“现场”海流观测方法的突出优点是具有较高的测量精度,然而,这种方法的空间覆盖范围有限,难以全面了解海流的时空变化,并且观测的成本较高,这些缺点使得“现场观测”不能满足实际应用的需求。除了“现场”观测外,岸基雷达也能测量海流,主要包含 X 波段雷达和频地波雷达。X 波段雷达测量近岸 3 km 以内的流场,但是它只有在海浪大于 1 m,且波浪较为均匀的地方才能获得相应的流场^[7,8]。高频地波雷达是专门用来测量沿岸海流的雷达设备,然而其测量的空间范围有限,不能进行全球观测(高频地波雷达主要覆盖于近岸 400 km 以内的区域,对于开阔的大洋就难以覆盖^[9])。

卫星遥感是海流测量的另外一种手段。与“现场”观测相比,卫星遥感具有自己独特的优点:1)能够实现大范围(全球范围)的观测;2)具有反复观测的能

力;3)具有较高的空间分辨率。因此卫星遥感能够克服“现场”测量等方法的不足,实现全球范围海洋流场的观测。本文对各种海面流场卫星遥感方法进行综述,并讨论它们各自的特点,涉及的卫星遥感流场反演方法包括多时相示踪物测量法、卫星高度计测量法、合成孔径雷达多普勒中心偏移法、以及合成孔径雷达沿航向干涉法。最后,对海面流场卫星遥感方法进行展望。

1 多时相示踪物测量法

1.1 反演原理

多时相示踪物测量法的基本原理是利用卫星遥感图像(比如光学图片)中的示踪物(比如叶绿素等)在海流作用下的变化来测量海流。假定两幅卫星遥感图像获取的时间间隔为 T ,两幅遥感图像中示踪物沿着两个相互垂直的方向(\vec{x} 与 \vec{y})移动的距离分别为 S_x 与 S_y 。那么,海流速度在 \vec{x} 与 \vec{y} 两个方向的估计值(v_x 与 v_y)可以表示为

$$v_x = \frac{S_x}{T}, \quad (1)$$

$$v_y = \frac{S_y}{T}. \quad (2)$$

S_x 与 S_y 可以通过最大相关系数法(MCC)^[10]求得。MCC法的原理如图1所示(图像灰度表示示踪物辐射或反射的强弱),第一幅遥感图像中的窗口称为“模板窗口”。MCC法的过程就是在“搜索区域”内(见第二幅图像中虚线所标示的区域)找出与“模板窗口”大小相同且相关性最好的那个窗口(即第二幅图像中的“匹配窗口”)。为了描述“模板窗口”与“搜索窗口”之间的相关性的大小,MCC法采用相关系数这个变量,其定义如下:

$$R(\Delta x, \Delta y) = \frac{\iint \{ [f(x, y) - \bar{f}] [g(x + \Delta x, y + \Delta y) - \bar{g}] \} dx dy}{\sqrt{\iint [f(x, y) - \bar{f}]^2 dx dy \cdot \iint [g(x + \Delta x, y + \Delta y) - \bar{g}]^2 dx dy}} \quad (3)$$

式中, $f(x, y)$ 为第一幅遥感图像中示踪物(模板窗口)在坐标 (x, y) 处的灰度值; $g(x + \Delta x, y + \Delta y)$ 为第二幅遥感图像中示踪物(搜索窗口)在坐标 $(x + \Delta x, y + \Delta y)$ 处的灰度值(Δx 与 Δy 分别为搜索窗口在 \vec{x} 方向与 \vec{y} 方向的位移变量); \bar{f} 为示踪物在模板窗口内的平均灰度值,而 \bar{g} 为示踪物在搜索窗口内的平均灰度值。相关系数 $R(\Delta x, \Delta y)$ 的最大值对应的位置坐标即为“匹配窗口”的位置坐标。假定第一幅遥感图像中“模板窗口”的坐标为 (X, Y) , 而第二幅遥感图像中“匹配窗口”

的坐标为 (X', Y') ,则(1)与(2)中的 S_x 与 S_y 可分别由以下两式得到:

$$S_x = X' - X, \quad (4)$$

$$S_y = Y' - Y. \quad (5)$$

最后将(4)式与(5)式分别代入(1)式与(2)式即可估计出海流的二维矢量。

1.2 示踪物选择

MCC 法最初是利用 AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer, 搭载在美国 NOAA 气象卫星上)图像的亮温来获得海面流场的(即利用亮温作为示踪物)^[11~13]。后来,文献[14,15]将 MCC 法用到海岸带扫描仪(CZCS)的可见光图像上(利用可见光图像作为示踪物)。2007年,Crocker等^[16]分别利用 AVHRR 反演的 SST(海表面温度)和 MODIS 及 SeaWiFS 反演得到的海色图像得到海面流场。近年来,又有学者^[17,18]利用 SAR 图像(灰度值)作为示踪物来获得海洋流场信息。

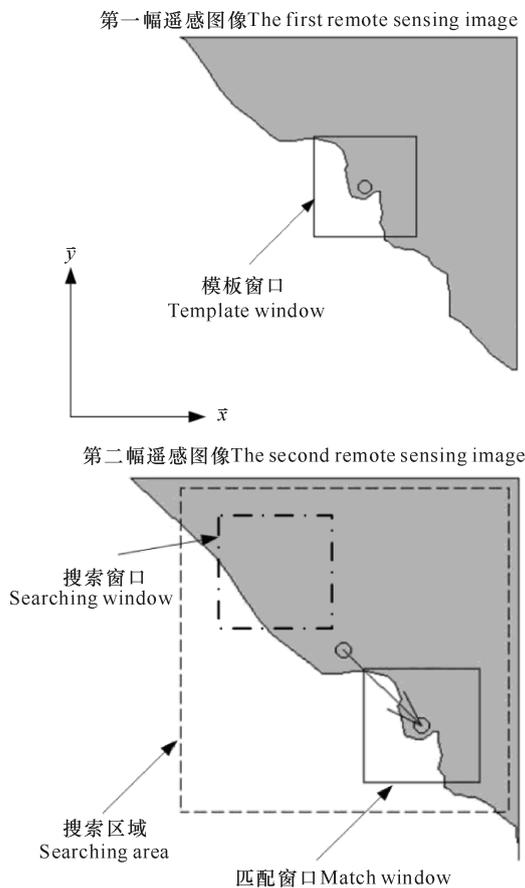


图1 MCC法原理示意图^[16]

Fig. 1 Illustration of the maximum cross correlation (MCC) method

1.3 性能及其局限性

Tokmakian等^[15]选取 California 附近海域,将 MCC 法应用于 CZCS 可见光图像,并将海流反演结果与声学多普勒海流剖面仪得到的海流数据对比,发

现它们的均方根误差为 14~25 cm/s。Kelly等^[12]将 MCC 法反演得到的海流与浮标数据进行对比,发现它们的相对误差为 53%。Crocker等^[16]利用 MCC 法反演得到的 SST 图像与海色图像的平均相关系数为 0.74,海流速度反演的均方根误差为 7.4 cm/s,平均偏差小于 2 cm/s。Bowen等^[19]在 2002 年对 MCC 法的反演性能做了详细的研究。他们选取澳大利亚东部海域 7 年的 AVHRR 数据,利用 MCC 法对海表面流进行了反演,反演精度大约为 8~20 cm/s。Qazi等^[18]将利用多时相 SAR 图像反演的海流结果与岸基高频雷达测量的海流结果对比,发现前者得到的海流速度比后者高 11 cm/s。

目前,多时相示踪物测量法还存在一些局限性,主要体现在以下几个方面:1)海表面温度数据以及叶绿素数据的获得受到“云层覆盖”的制约,通常只能得到晴空区结果;2)MCC 法对于“等温区域”或“等叶绿素区域”通常是失效的;3)MCC 法需要连续时间,且空间分辨率高的卫星遥感图像;4)MCC 法很难得到海洋锋、中尺度涡附近的流场。

2 卫星高度计测量法

2.1 反演原理

测量大洋环流是高度计的主要任务之一^[20],它除了具有全天候、观测面积大、观测精度高、时间准同步、信息量大等特点外,其长时间历程的数据为大洋环流的观测和研究提供了宝贵资料,比如中尺度涡旋现象^[21]。

雷达高度计用于测量相对于地球质心的绝对海面高度,当大地水准面已知时,它可以反映海面高度变化。当海流不直接受风的作用,压力梯度和科氏力平衡的情况下产生的海流称为地转流。根据地转关系,地转流正比于海面高度变化的斜率(图 2),即

$$\begin{cases} U_s = -\frac{g}{f} \frac{\partial \zeta}{\partial y}, \\ V_s = \frac{g}{f} \frac{\partial \zeta}{\partial x}, \end{cases} \quad (6)$$

其中, U_s 和 V_s 分别是沿东西方向和南北方向的地转流分量, g 为重力加速度, f 为科氏力参数, ζ 是相对于大地水准面的海面高度。由图 2 知,海面相对于大地水准面的斜率与地转流成比例,在北半球 V_s 的方向是垂直于纸面向里。水平距离 100 km 内 1 m 的海面高度变化可以产生很强的地转流。地转关系式(6)一般适用于水平尺度大约 50 km,时间尺度大于几天的洋流。利用高度计测得海面高度,然后通过式(6)即可估计出地转流的大小。

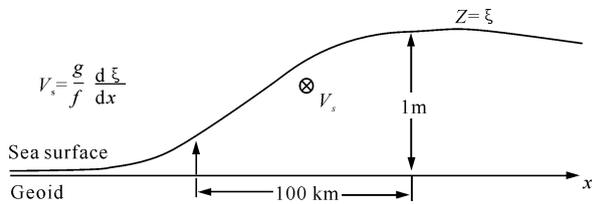


图2 地转关系示意图

Fig. 2 Illustration of geostrophic relationship

2.2 反演性能及其局限性

利用卫星高度计测量海流的性能及其局限性主要体现在如下几个方面:1)高度计通常仅适用于测量大范围的地转流;2)存在重复观测周期较长的问题;3)高度计接收到的雷达回波信号容易受到来自陆地回波信号的“污染”以及大气误差的影响,离海岸线50 km以内的高度计数据通常不能用;4)由于高度计测量的是相对于地球质心的绝对海面高度,其测量的海面高度变化不仅产生于地转流,还来源于其他地球物理过程,包括潮汐、季节性的升温 and 降温以及大气压力的改变等。而大洋环流的流速一般为几至几十厘米每秒,其对应的海面倾斜很小,为计算海表面地转流,需要高精度的大地水准面测量。常用的GRACE大地水准面的精度大约为400 km内的误差2~3 mm,在较小距离内的误差很大^[22],因而使用高度计无法分辨尺度较小的洋流,比如尺度小于100 km的流。随着大地水准面精度的不断提高,这一问题正逐步解决。另外,自20世纪90年代开始,各国布放了大量漂流浮标用于测量海面流速,结合高度计和漂流浮标的观测,可以获得50~100 km尺度的洋流信息^[23]。

3 合成孔径雷达多普勒中心偏移法

3.1 反演原理

星载合成孔径雷达(SAR)是一种主动式微波遥感系统,它通过发射宽带脉冲信号实现距离高分辨,通过雷达与场景之间的相对运动产生一个较宽的多普勒带宽而实现方位高分辨。与其它的遥感手段相比,星载SAR有着自己的优势^[24,25]:1)可提供较高的空间分辨率(25~50 m);2)全天候,不受气象条件限制;3)轨道稳定性好,多次获取数据重复性好。

作为一种先进的微波遥感探测器,SAR已经广泛应用于军事侦察、地质测绘和海洋环境探测等领域。在海洋环境探测方面,星载SAR可获取海面流场、风场、海浪、海洋内波和海冰等海洋环境要素(通过星载SAR反演的风场的分辨率可以达到亚米~千米的级别),具有广阔的应用前景。

到目前为止,星载SAR反演流场的方法主要有广西科学 2015年6月 第22卷第3期

3种。第1种方法是通过多时相SAR图像(灰度图像)反演海流信息,其原理已在1.1节作了讨论。第2种方法利用单天线的多普勒中心偏移^[26~31]进行流场反演。第3种方法称为沿航向干涉法^[32~39](ATI)。这里,我们讨论SAR多普勒中心偏移法(流程见图3),关于SAR-ATI法我们将在下一小节讨论。



图3 SAR多普勒中心偏移法估计海流径向速度流程

Fig. 3 Flowchart of the SAR Doppler centroid shift method for measuring the radial-velocity component of the sea surface current

SAR多普勒中心偏移法最早由Chapron等^[26]提出。近年来,Johannessen等^[28]、Rouault等^[30]和Hansen等^[31]等利用该思路开展了海流径向速度监测的探索研究。SAR多普勒中心偏移法的原理可以概括为,由卫星轨道和姿态测量数据计算得到的多普勒中心频率和探测回波数据估计的多普勒中心存在特定的差异,而这种差异恰好是由海流引起的。具体讲,由SAR回波数据测得的多普勒中心频率可以表示为

$$f_{Dc} = f_{Dca} + f_{Dp} \quad (7)$$

上式中, f_{Dp} 为由卫星轨道、姿态以及地球自转所引起的多普勒频率; f_{Dca} 为SAR数据测得的多普勒中心频率与 f_{Dp} 之间的偏移量。 f_{Dca} 由海面的运动所引起,主要包括两部分:

$$f_{Dca} = f_{Dca}^c + f_{Dca}^w \quad (8)$$

其中 f_{Dca}^w 是由海面风所引起的多普勒中心频率成分,而 f_{Dca}^c 是由海流的运动所引起的多普勒中心频率成分。 f_{Dca}^c 可以表示为

$$f_{Dca}^c = \frac{2}{\lambda} \cdot v_r \quad (9)$$

上式中, λ 为雷达波长, v_r 为海流的径向速度(海流

的速度矢量向雷达波束中心的投影)。通过以上关系式即可估计出海流的径向速度。

3.2 反演性能

2005年 Kudryavtsev 等^[27]从海面微波散射理论出发详细分析了不同雷达散射机制对计算多普勒中心频率距平的影响,并利用多次试验观测进行了验证,证实他们提出的模型与实际观测具有相当好的一致性。2008年 Mouche 等^[29]利用一个改进的散射模型进一步分析不同海面微波散射机制对计算多普勒中心频率距平的影响。2010年 Hansen 等^[31]将 SAR 多普勒中心偏移法应用于 ASAR 数据,进一步验证了该方法的有效性,且反演得到的海流径向速度的均方根误差约为 23 cm/s。

尽管实测数据的处理结果已经验证了 SAR 多普勒中心偏移法的有效性,然而该方法仍然存在一定的局限性,具体体现在如下几个方面:1) SAR 多普勒中心偏移法只能得到海流的“径向”速度(海流向雷达视线方向的投影),而无法得到完整的二维流场矢量;2) SAR 多普勒中心的估计容易受到海面后向散射非均匀性的调制,从而导致估计得到的多普勒中心值偏离其真实值;3) SAR 波束中心指向误差会影响多普勒中心频率的估计从而影响海流径向速度的估计。文献^[31]给出一种消除多普勒中心估计误差的方法,该方法利用待估计海面附近的陆地 SAR 数据对海面 SAR 数据进行多普勒中心校正。然而,当陆地 SAR 数据缺失时该方法会失效。

4 合成孔径雷达沿航向干涉法

4.1 发展历史

合成孔径雷达沿航向干涉法(SAR-ATI)是另外一种利用 SAR 数据(复数据,包含相位)反演海表面流场的方法。SAR-ATI 法最初由 Goldstein 与 Zebker^[32]在 1987 年提出,之后,该方法在机载 SAR 系统^[33,34,36]中得到了验证。2000 年,美国 NASA 以及德国与意大利航天机构共同合作完成了 SRTM 系统,并把该系统搭载于美国的“奋进”号航天飞机。SRTM-SAR 数据验证了 SAR-ATI 方法在海流测量中的有效性^[37]。2010 年, Romeiser 等^[39]将 SAR-ATI 法应用于德国的星载 SAR 系统 TerraSAR-X,数据处理结果也验证了 SAR-ATI 方法在流场反演中的有效性。

4.2 海流反演原理

SAR-ATI 方法反演海流的原理如图 4 所示,两个 SAR 天线以一前一后的方式沿着卫星飞行的方向放置,它们之间的间距为 d 。假定两个 SAR 天线均

工作在条带模式,且它们在时间上一前一后扫过海面上同一个区域。那么,天线 2 到达天线 1 照射的同一海面区域所需要的时间为

$$\Delta T = \frac{d}{V}. \quad (10)$$

式中 V 为卫星平台的速度。另一方面,由于存在海流径向速度 v_r ,被天线 1 照射的那块区域在被天线 2 照射时移动了距离(径向距离):

$$\Delta R = v_r \cdot \Delta T = v_r \cdot \frac{d}{V}. \quad (11)$$

因此,天线 1 与天线 2 将会产生如下干涉相位:

$$\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2\Delta R = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{d}{V} \cdot v_r. \quad (12)$$

式中的 $2\Delta R$ 是由于考虑了雷达脉冲的“双程”传播路径。由(12)式可以看出海流的径向速度正比于干涉相位 Φ 。因此,通过计算两幅 SAR 图像的干涉相位即可估计海流的径向速度。

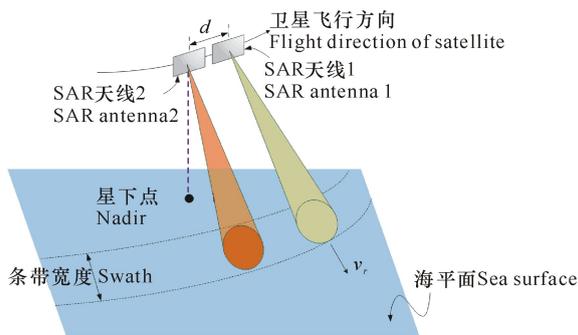


图 4 SAR-ATI 方法原理示意图

Fig. 4 Illustration of the principle of the SAR-ATI method

从理论上讲,SAR-ATI 法估计海流的空间分辨率与 SAR 成像的分辨率是一样的。然而,为了提高海流测量的精度,往往需要在空间上进行“平均处理”。另外,为了去除海浪的运动对海流估计的影响,通常也需要空间上的平均。因此,SAR-ATI 法得到的海洋流场的空间分辨率往往比 SAR 成像分辨率要低。SAR-ATI 法反演流场径向速度的流程图见图 5。

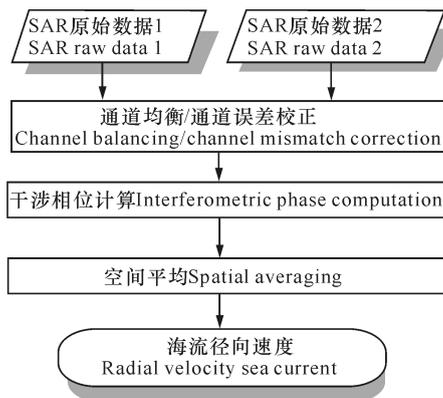


图 5 SAR-ATI 法反演流场径向速度的流程

Fig. 5 Flowchart of the SAR-ATI method for measuring the radial-velocity component of the sea surface current

4.3 海流反演性能

根据文献[39]描述的 TerraSAR-X 数据处理结果,利用 SAR-ATI 方法反演得到的海流径向速度的精度误差大约为 8~11 cm/s。然而,部分海面区域的海流反演精度却高达 42 cm/s。因此,SAR-ATI 方法的海流反演性能还需要进一步提高。此外,SAR-ATI 方法还存在一些其它的局限性:(1)与 SAR 多普勒中心偏移法类似,基于两天线的 SAR-ATI 方法也只能得到海流的径向速度,而无法得到完整的海流二维速度矢量;(2)如何去除掉海面波浪运动对海流速度反演的影响目前还没有得到很好的解决。

5 展望

与“现场”观测相比,海洋卫星遥感在海面流场反演时具有独特的优势,然而,卫星遥感方法仍然存在一些局限性。多时相示踪物方法往往受到“云层覆盖”的制约。尽管利用 SAR 图像作为示踪物的方法能克服光学图像受云雨等天气的影响,但同样存在与光学图像类似的困难,难以获取粗糙度较均匀海面的流场,业务化应用受到很大的限制。高度计测流法只能反演地转流,而且易受到来自陆地回波信号的“污染”以及大气误差的影响,离海岸线 50 km 以内的高度计数据通常不能用。基于星载 SAR 的两种方法,即 SAR-ATI 法与 SAR 多普勒中心偏移法往往只能反演海流的径向速度而难以得到完整的二维速度矢量,且它们的测流精度还需要进一步的提高。因此,目前的卫星遥感方法远没有达到成熟甚至业务化的阶段。

为了进一步推进卫星遥感手段在海流反演中的应用,未来可以在如下几个方面做工作:

1)在卫星传感器系统设计层面,可以考虑增加系统的自由度与复杂度,有望解决 SAR-ATI 方法及 SAR 多普勒中心偏移法无法估计海流二维速度矢量的问题,同时有望进一步提高海流反演的精度。

2)在海流反演算法层面,还需要作进一步的研究,比如,如何提高 MCC 法遥感图像匹配的精度是一个值得研究的问题。如何有效地消除海面波浪运动对 SAR-ATI 方法的影响也是需要深入研究的问题。

3)需要研究新的卫星遥感手段来进一步提高海流反演的精度与实用性。

参考文献:

[1] Pinet P R. Invitation to Oceanography[M]. 5th Edition. 广西科学 2015 年 6 月 第 22 卷第 3 期

- Sudbury, Massachusetts: Jones and Bartlett, 2009.
- [2] Purkis S, Klemas V. Remote Sensing and Global Environmental Change [M]. Oxford: Wiley-Blackwell, 2011.
- [3] Santos A M P. Fisheries oceanography using satellite and airborne remote sensing methods: A review [J]. Fisheries Research, 2000, 49: 1-20.
- [4] Klemas V. Tracking oil slicks and predicting their trajectories using remote sensors and models: Case studies of the Sea Princess and Deepwater Horizon oil spills [J]. Journal of Coastal Research, 2010, 26: 789-797.
- [5] Morang A, Gorman L T. Monitoring coastal geomorphology [M]// Schwartz M L (ed). Encyclopedia of Coastal Science. Dordrecht, the Netherlands: Springer, 2005.
- [6] Fratantoni D M. North Atlantic surface circulation during the 1990s observed with satellite-tracked drifters [J]. J Geophys Res, 2001, 106(C10): 22067-22094.
- [7] Senet C M, Seemann J, Ziemer F, et al. The near surface current velocity determined from image sequences of the sea surface [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2001, 39(3): 492-505.
- [8] Gangeskar R. Ocean current estimated from X-band radar sea surface images [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2002, 40(4): 783-792.
- [9] Barrick D E. First-order theory and analysis of MF/HF/VHF scatter from the sea [J]. IEEE Trans Antennas Propagation, 1972, AP-20: 2-10.
- [10] Emery W J, Thomas A C, Collins M J, et al. An objective method for computing advective surface velocities from sequential infrared satellite images [J]. J Geophys Res, 1986, 91(C11): 12865-12878.
- [11] Emery W J, Fowler C, Clayson A. Satellite image-derived Gulf Stream currents compared with numerical model results [J]. J Atmos Oceanic Technol, 1992, 9: 286-304.
- [12] Kelly K A, Strub P T. Comparison of velocity estimates from advanced very high resolution radiometer in the coastal transition zone [J]. J Geophys Res, 1992, 97(C6): 9653-9668.
- [13] Cote S, Tatnall A. The hopfield neural network as a tool for feature tracking and recognition from satellite sensor image [J]. International Remote Sensing, 1995, 18: 871-885.
- [14] Garcia C A, Robinson I S. Sea surface velocities in shallow seas extracted from sequential coastal zone color scanner satellite data [J]. J Geophys Res, 1989, 94(C12): 12681-12691.
- [15] Tokmakian R T, Strub P T, McClean-Padman J. Evaluation of the maximum cross-correlation method of esti-

- mating sea surface velocities from sequential satellite images[J]. *J Atmos Ocean Technol*, 1990, 7: 852-865.
- [16] Crocker R, Matthews D K, Emery W, et al. Computing coastal ocean surface currents from infrared and ocean color satellite imagery[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2007, 45: 435-447.
- [17] Liu A K, Zhao Y, Hsu M K. Ocean surface drift revealed by synthetic aperture radar images[J]. *AGU/ EOS*, 2006, 87: 233-239.
- [18] Qazi W A, Emery W J, Fox-Kemper B. Computing ocean surface currents over the coastal California current system using 30-Min-Lag Sequential SAR Images[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2014, 52: 7559-7580.
- [19] Bowen M, Emery W, Wilkin J. Extracting multiyear surface currents from sequential thermal imagery using the maximum cross-correlation technique[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 2002, 131: 1665-1676.
- [20] Wunsch C, Gaposchkin E M. On using satellite altimetry to determine the general circulation of the oceans with application to geoid improvement[J]. *Rev Geophys Space Phys*, 1980, 18: 725-745.
- [21] Ducet N, LeTraon P Y, Reverdin G. Global high resolution mapping of ocean circulation from the combination of TOPEX/POSEIDON and ERS-1/2[J]. *J Geophys Res*, 2000, 105: 19477-19498.
- [22] Tapley B D, Bettadpur S, Ries J C, et al. GRACE measurements of mass variability in the earth system[J]. *Science*, 2004, 305: 503-505.
- [23] Niiler P P, Maximenko N A, McWilliams J C. Dynamically balanced absolute sea level of the global ocean derived from near-surface current[J]. *J Geophys Res*, 2003, 110: C11008.
- [24] Kovaly J J. *Synthetic Aperture Radar* [M]. Norwood, MA, USA: Artech House, 1978.
- [25] Henderson F M, Lewis A J. *Manual of Remote Sensing: Principles and Applications* [M]. New York, NY, USA: Wiley, 1998.
- [26] Chapron B, Collard F, Ardhuin F. Direct measurements of ocean surface velocity from space: Interpretation and validation[J]. *J Geophys Res-Oceans*, 2005, 110(C7): C07008.
- [27] Kudryavtsev V, Akimov D, Johannessen J, et al. On radar imaging of current features: Model and comparison with observations [J]. *J Geophys Res*, 2005, 110: C07016.
- [28] Johannessen J A, Chapron B, Collard F, et al. Direct ocean surface velocity measurements from space: Improved quantitative interpretation of Envisat ASAR observations[J]. *Geophys Res Lett*, 2008, 35(22): L22608.
- [29] Mouche A, Chapron B, Reul N, et al. Predicted doppler shifts induced by ocean surface displacements using asymptotic electromagnetic wave scattering theories[J]. *Waves Random Complex Media*, 2008, 18(1): 185-196.
- [30] Rouault M J, Mouche A, Collard F, et al. Mapping the agulhas current from space: An assessment of ASAR surface current velocities [J]. *J Geophys Res*, 2010, 115: C10026.
- [31] Hansen M W, Collard F, Dagestad K F, et al. Retrieval of sea surface range velocities from envisat ASAR doppler centroid measurements[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2011, 49(10): 3582-3592.
- [32] Goldstein R M, Zebker H A. Interferometric radar measurement of ocean surface currents [J]. *Nature*, 1987, 328(6132): 707-709.
- [33] Thompson D R, Jensen J R. Synthetic-aperture radar interferometry applied to ship-generated internal waves in the 1989 Loch Linnhe experiment [J]. *J Geophys Res-Oceans*, 1993, 98(C6): 10259-10269.
- [34] Graber H C, Thompson D R, Carande R E. Ocean surface features and currents measured with synthetic aperture radar interferometry and HF radar[J]. *J Geophys Res*, 1996, 101(C11): 25813-25832.
- [35] Romeiser R, Thompson D R. Numerical study on the along-track interferometric radar imaging mechanism of oceanic surface currents [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2000, 38(1): 446-458.
- [36] Romeiser R. Current measurements by airborne along-track InSAR: Measuring technique and experimental results[J]. *IEEE J Ocean Eng*, 2005, 30(3): 55-56.
- [37] Romeiser R, Breit H, Eineder M, et al. Current measurements by SAR along-track interferometry from a space shuttle[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2005, 43(10): 2315-2324.
- [38] Romeiser R, Runge H. Theoretical evaluation of several possible along-track InSAR modes of TerraSAR-X for ocean current measurements [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2007, 45(1): 21-35.
- [39] Romeiser R, Suchandt S, Runge H, et al. First analysis of TerraSAR-X along-track InSAR-Derived current fields[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2010, 48(2): 820-829.

(责任编辑:尹 闯)