

何宜军¹ 杨小波¹ 矣娜¹ 刘保昌¹

星载 SAR 测量海洋流场研究进展

摘要

多普勒信息是合成孔径雷达(SAR)进行海洋动力遥感的一个重要参数,自从20世纪80年代末就已经开始利用该参数反演海表面动力过程的相关研究。本文重点论述了星载SAR多普勒信息反演海表面流及其应用研究,主要包括SAR干涉测量方法获取海洋流场信息的主要技术手段及研究进展;多普勒频移方法反演表层海洋流场的发展历程及在上层海洋现象(包括地转流、准地转流以及中小尺度过程)中的应用研究;相关的国外重要数据融合计划和研发计划。目前国内在海洋流场的遥感方面还处于起步阶段,重点关注于反演理论和方法,而将反演信息应用于上层海洋动力的研究,还十分缺乏。希望通过本文的综述,为后续在该方向的研究提供借鉴。

关键词

海表面流;微波遥感;多普勒中心;次级中尺度

中图分类号 P731.21;P715.7

文献标志码 A

收稿日期 2019-10-19

资助项目 国家重点研发计划项目(2016YFC1401002);国家自然科学基金国际合作重点项目(41620104003);国家自然科学基金青年基金(41606201)

作者简介

何宜军,男,博士,教授,博士生导师,长期从事海洋微波遥感机理、海上台风遥感、海流遥感技术以及海气相互作用等工作。yjhe@nuist.edu.cn

0 引言

海气界面是海洋与大气之间交换物质和能量的通道,海表面的波浪场、风场、流场以及混合过程等都是海表面动力学主要的研究对象。海流是海水运动的重要方式之一,并且在海流运动过程中会对海洋上空的天气和气候产生重要的影响^[1-2]。例如,来自低纬度的海流向高纬度传输时,发生潜热,海表的水汽向上输送,就会带来降水,因而需要增强对海洋-大气耦合系统的了解和认识,这对海洋循环和气候模型具有重要意义^[2]。海表面流也决定了海洋中生物和化学成分的输送和分布,如海上溢油和其他污染物^[3]。除此之外,船舶航运路线的制定、海洋环境的监测和预报以及海上救援,都需要考虑海洋表面流的影响,因此需要对海面流场信息进行研究。

遥感方式获取海表面的动力信息是目前一种相对高效且花费低廉的方法。微波遥感反演海表面动力场,除常用的辐射亮温和后向散射系数外,最近30多年,多普勒信息也逐渐成为一种重要的海表动力遥感参数,尤其对海表流场和中尺度-次中尺度过程的研究,该参数具有十分重要的作用。有关海表动力场对于多普勒信息的影响以及信号仿真方面的综述,已有专文论述^[4],本文将就星载SAR多普勒信息反演海表面流场以及研究海表面中尺度-次中尺度过程的相关文献进行梳理和综述,为后续研究提供借鉴。

在雷达多普勒反演海表流场方面,目前国际上主要有两种遥感测量方式,其一是干涉测量法,最早由Goldstein等^[5-6]和Shemer等^[7]提出,后来以Romeiser等^[8-15]为主,发展完善了顺轨干涉测量(ATI)技术及M4S反演海表层流方法。此外还有英国南安普顿大学的Gommenginger等^[16]提出的斜视SAR概念,马来西亚Marghany等^[17-20]提出的鲁棒多普勒中心模型反演海流等。另一种是Chapron及其团队等^[21-34]先后研发出了RIM模型及其扩展模型、CDOP模型、DopRIM模型以及利用多普勒中心反演海表面流场的相关方法。

在多普勒反演海表层流的同时,还进一步研究和探讨了海表存在的中尺度-次中尺度过程对海流反演的影响,进而从侧面说明了多普勒信息对海表中尺度-次中尺度过程的成像能力,从而为利用多普勒信息(或多普勒与后向散射系数结合)研究中尺度-次中尺度过程提供了良好的分析基础和借鉴案例。

除了星载SAR多普勒外,研究人员还提出了多普勒散射计反演

¹ 南京信息工程大学 海洋科学学院,南京,210044

海表层流的方法等^[35-37],这方面的内容已经超出本文的范围,在此不再赘述.

1 干涉 SAR 海流测量

合成孔径雷达的干涉又称为干涉合成孔径雷达(InSAR).干涉合成孔径雷达(InSAR)是近几十年来在射电天文学中发展起来的常规 SAR 技术和干涉测量技术的综合^[38].干涉雷达由于两个接收天线与飞行轨迹的不同,又可以分为顺轨干涉(ATI)和交轨干涉(XTI).

顺轨干涉法(ATI)的基本原理就是利用在顺轨方向上间隔一定距离的两个天线获取同一场景的两幅复图像,这两幅复图像的相位差刚好反映了海流的径向(沿雷达视线向)速度信息.顺轨干涉法反演流场的处理流程包括 SAR 成像、配准、滤波、相位校正等几个步骤,过程如图 1 所示.



图 1 海面流场反演流程

Fig. 1 Sea surface currents retrieval process using along-track interferometric method

Romeiser 等构建了新的海面后向散射模型^[8-9],其后正式称为 M4S 模型^[10].该模型与 RIM 模型都是在海面散射的双尺度模型基础上发展起来的模型,不同之处只在于对海面后向散射机制的理解和解

释.M4S 模型的散射机制有镜面散射和布拉格散射,并通过时间松弛法引入波流相互作用,来反映流场对后向散射的影响.Romeiser 等^[10]利用 M4S 模型,通过模拟结果与观测结果之间的循环迭代逼近算法,模拟并反演了海面流场特征,反演的准确度在 20%,空间分辨率 50 m,主要影响因素为风和浪、水深调制、海洋动力现象的空间尺度以及反演所用的图像数目多少,并指出高分辨率海流反演结果的验证是最具有挑战性的.

通过以上 M4S 模型的构建和反演流场的实例研究,Romeiser 教授开始理解海面流场在海面后向散射机制中的作用,并着手建立流场信息与干涉相位信息之间的联系.2000 年,Romeiser 等^[11]在基于 50 m 分辨率海表面流对海面波谱存在水动力调制的假设下,全面分析了通过多普勒谱计算干涉相位,并反演得到海面流场的过程,主要的结果有:1) ATI 适用于数平方千米内米级(50 m 分辨率)的表面流观测,其中还包含有海面长波的轨道速度分量;2) 由于构造的多普勒谱的复杂性,在计算多普勒谱前,简化后向散射模型很重要;3) 影响模拟的主要因素是入射角和 R/V 比率,高频的 X 波段雷达更适用于海面流场的测量,VV 极化更适用于大尺度的后向散射场,高风速会增强流场梯度与反演的多普勒速度之间的线性相关,低风速响应更长的去相干时间从而使得 ATI 图像相位差不易测到,所以 ATI 测流的理想风速是 5~10 m/s,风向信息也是必须的,用于校正长波和布拉格波相速度产生的轨道运动对 ATI 速度的影响;4) 高频和大入射角对于流场反演有利,反演的流场对流场梯度的分辨率优于 0.1 m/s.2001 年,他们将 ATI 的反演结果与 ADCP 和环流模型结果对比,分析 ATI 反演流场的可行性及局限性,结果表明 ATI 能高分辨地反演海岸带区域的流场信息,并可以利用反演的流场继续反演高分辨率的水下地形,然而反演的流场信息在近岸或岛礁附近效果极差^[12].Kersten 等^[13]利用美国海军研究实验室的 WINSAR-ATI 系统获得的福弗尔野外观测站附近的河流区域的数据,证明了顺轨干涉 SAR 相比于单向 SAR 得到的相位误差更小,也就是反演得到的流速误差更小.并且,对于系统相同的功率和天线总尺寸,顺轨干涉法具有更高的灵敏度^[14].2009 年,Romeiser 等^[15]首次对 TerraSAR-X 干涉合成孔径雷达(InSAR,ATI)数据进行了德国易北河河口的表面流场分析,在有效空间分辨率大于 1 km 时,能得到

0.1 m/s 的测流精度,适用于沿海区域的洋流观测。

虽然顺轨干涉方法对天线方向图没有严格的要求,与任何成像模式都是兼容的,并且能达到一定的测流精度,但是该方法也有一定的局限性,比如它只能得到一维的海洋表面流场的径向流速信息,而对于流向没有办法得到。因此,为了获取流向信息,还需要增加额外的自由度。Gommenginger 等^[16]的研究表明,可以利用测高仪的原理解决流向的反演,也就是联合顺轨和交轨干涉,但目前存在的问题是无法将顺轨的干涉相位与交轨的干涉相位进行分离。2018年,日本科学家 Ouchi 等^[39]在顺轨干涉方法的基础上,提出了多孔径顺轨干涉合成孔径雷达系统(Multi-Aperture Along-Track Interferometric, MA-ATI),生成四幅子图像,两幅为前向子图像,另外两幅为后向子图像,由此得到不同方向的干涉图,最后由方位向速度分量求出海表面流矢量方向,对机载 L 波段的 MA-ATI 系统模拟得到的方向估计与理论值较为吻合。

在顺轨干涉测量的基础上,还扩展出了双波束干涉的概念,即利用两个斜视波束来获得速度的两个分量^[40]。该方法弥补了顺轨干涉法只能测得雷达视线向海流流速这一不足。双波束干涉最早由 Rodriguez 等^[41]提出,该系统的成像几何如图 2^[42]所示。飞行平台上搭载了一对干涉仪,分别前后放置,每个干涉仪都发送前向波束和后向波束。

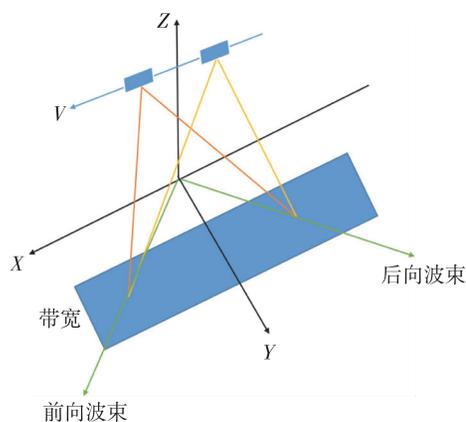


图 2 双波束干涉模式成像几何^[42]

Fig. 2 Imaging geometry of InSAR dual beam mode^[42]

2005年, Buck^[43]针对宽刈幅海洋高度计(WSOA)设计的不足(由于极低的人射角使得导出的表面速度矢量的主要分量在垂直方向上)提出了 Wavemill 方案,该方案设置了两根天线沿轨迹放置,各产生四个波束,进行飞行方向双边的前向、后向的

顺轨干涉测量,这些波束从 45°斜视前后向对表面流场正交采样,再结合顺轨干涉方法,从而得到二维表面流场。2011年10月, Wavemill 的机载实验在英国西海岸爱尔兰海的多个地点进行^[44], Martin 等^[44]利用 2011年10月25日到26日的 Wavemill 数据估算了径向表面速度,同时也验证了风浪对表面速度多普勒测量的强烈影响,并发现了逆风和顺风下速度的不对称性。

2017年,德国宇航中心(DLR)的 Wollstadt 等^[45]提出了 Ku 波段双波束顺轨干涉 SAR,并应用了混合极化以提高不同海洋表面散射机制的信息水平,相比于 Wavemill 的设计,他们提出的双波束模式设计为单边的天线,能观测到更大范围的海洋场景,并且采用了较大的人射角以增加对水平方向速度的敏感性和提高风速的反演性能。

双波束干涉模式的基本原理就是利用一对干涉仪发射两组前向波束和后向波束,就等同于从两个方向对同一海洋表面流速度进行观测,该速度投影到两个方向,同时利用顺轨干涉的方法得到流速,结合双波束的两个方向就可以得到海洋表面流的流速矢量。首先利用顺轨干涉的方法计算出海流流速 U_{surf} ,用公式可表示为^[44]

$$U_{\text{surf}} = \Delta\phi \frac{\lambda_e}{2\pi B_e \sin \theta}, \quad (1)$$

其中, $\Delta\phi$ 是干涉相位, λ_e 是雷达电磁波波长, B_e 是有效基线, θ 是人射角。然后通过组合不同的干涉图得到海表面流矢量估计。

Wollstadt 等^[40]在 2015 年提出的星载双波束顺轨 InSAR 是建立在 Ku 波段的单平台系统,刈幅为 200 km。2017 年他们把该方法中的多个参数在不同波段的系统进行了优化,如有效基线这一参数,在 30°的人射角和不同的风速下,顺轨干涉的最优基线范围为电磁波长的 1 000 倍到 2 000 倍之间^[45]。如果电磁波在 X 波段、C 波段和 Ku 波段,那么与之相对应的最优基线分别是 50、100 和 22~44 m。该系统的测速精度达到 5 cm/s,其二级产品分辨率达到亚中尺度水平,为 4 km×4 km,即使风速低至 3 m/s 也能完成同等精度的海流流速测量^[45]。该方法最大的特点就是可以完成海流二维速度矢量的测量。该方法采用两种极化方式,发送采用的是圆极化,接受采用的是线极化,不考虑交叉极化,因此这也成为该方法的弊端,这是因为,在很强的风速下,交叉极化占据了信号的大部分,是不能忽略的。而 Martin 等^[46]研究

并测试了双波束斜视干涉 SAR 系统,获取的海表面流速的均方根误差优于 0.1 m/s.

我国学者对 SAR 模拟和反演海表层流的工作开展得相对较晚.2015 年,何宜军等^[1]论述了反演海表层流的常用方法,常亮等^[2]详细论述了星载 SAR 反演海表层流的两种方法,杨小波等^[4]分析了微波遥感反演海流中的若干主要问题.在干涉 SAR 海流反演方面,任永政^[47]利用 ATI 技术结合迭代算法以及 STRM 数据,反演了西欧海域流场,并与实测结果及 Romeiser 等^[15]的结果进行了对比验证,2017 年又采用 MCC 方法对星座 SAR 图像上海表层流进行了反演和验证^[48];此外,还有文献[35-37]建立的多普勒散射计海表层流仿真模拟.在借鉴国外研究经验的基础上,文献[49-50]也从基础理论出发,尝试构建新型干涉测量 SAR 系统(双波束和双通道双波束干涉 SAR)来模拟流场环境下的原始 SAR 数据,以及抑制方位向信号模糊造成的 InSAR 测流的影响. Pan 等^[51]基于机载圆形扫描 SAR 系统的实测数据,提取不同角度下的多普勒中心偏移,并考虑了雷达波束的方位指向和入射角引起的补偿误差,使得海表面流速估计结果更为接近实际海流流速.

2 SAR 多普勒中心偏移法

在研究海面多普勒信息之前,以法国国家海洋资源开发研究院(IFREMER)的 Charpon 等为核心的欧洲团队利用后向散射系数已经逐步建立起了分析海流存在状况下的海面后向散射模型^[21-29].该团队的 Kudryavtsev^[21]首先建立了综合考虑布拉格散射和非布拉格散射(镜面散射和波破碎)时的后向散射系数模型,并引入了风速的影响;2005 年 Kudryavtsev^[22]建立了二维的雷达成像模型 RIM, Johannessen^[23]在波浪谱中加入了背景流场,利用 RIM 模型分析了背景流场对后向散射的影响.至此,该团队已建立了以后向散射系数为中心,系统分析海表面流的研究方案.其后,该团队又将 RIM 模型的理念进一步扩展,2012 年发展了双共极化 SAR 的海面成像模型,将极化差异和极化比引入后向散射系数模型中^[24-25].2014—2016 年又发展了全极化 SAR 的海面成像模型^[26-28],分别用于研究海面流特征、C 波段和 L 波段共同成像的流特征以及浮油中的波破碎,另外还用 RIM 模型分析了存在潮流、径流和水深变化情况下的长江口微波成像^[29].然而值得注意的是,RIM 模型引入背景流场的方式是通过波浪谱,但是

西边界流或入海径流可以在多普勒图像上观测到,明显不是因为流作用于局部的风浪谱,所以从 RIM 模型或者后向散射系数分析的海表面流场,只能是流与浪相互作用的部分,并不是全部的海表面流场信息.从 RIM 模型的分析可以知道,后向散射系数模型比较适宜分析中小尺度运动中背景流场的辐散辐合作用,对于大尺度的海表面流场研究能力有限,需要引入多普勒信息.

在多普勒信息的建模和分析方面,Charpon^[30]首先从理论上分析了多普勒信号反演海流的可行性,分析了多普勒信号与后向散射系数之间的关系,给出了简化的多普勒中心模型,并分析了可能造成多普勒信息偏差的因素.Johannessen 等^[31]在 Charpon 分析的基础上建立了 RIM 模型与多普勒信息的关系,构建了 DopRIM 模型,在 RIM 模型的理论框架内引入了多普勒信息,用于分析多普勒或速度成像的海面状况下风、浪、流的相互影响. Johannessen 等^[32-33]将 DopRIM 模型用于分析南非南部海域阿古勒斯流的多普勒成像.Hansen 等^[34]用 DopRIM 模型模拟了强潮流区的波流相互作用,进一步说明了强表面流对海面粗糙度和斜距多普勒信号的调制作用,以及通过极化性质和入射角的差异,可以从 DopRIM 模型中分析和分离出非布拉格散射的部分.从 DopRIM 模型的相关论文可以看出,在构建该模型的过程中,Charpon 及其团队也在逐渐理解多普勒信息的成像机制、成像能力以及影响因素,虽然在此过程中,有些问题暂时没有明晰,但是对于研究多普勒信息反演海表动力过程,起到了很大的推动作用.

在研制模型的同时,Charpon 团队也在尝试着用多普勒信息反演大洋环流及其中尺度-次中尺度特征^[52-62].Danilo 等^[52]首先比较了强潮流区 HF 雷达与 SAR 测量的径向速度的差异,发现 HF 雷达与 SAR 分别响应不同尺度的波浪场,SAR 反演结果主要受风场影响,源于风浪与表层流的相互作用,且风浪会限制流反演的精度.Collard 等^[53]开始采用新的反演流的方法,利用神经网络方法构建了 CDOP 模型计算风生多普勒信号,再从星载 SAR 测量的多普勒信号中减去风影响的部分,反演得到径向流场.Rouault 等^[54]继续采用移除风场多普勒信息的方法,详细地反演了阿古勒斯流系.Backeberg 等^[55]进一步利用 HYCOM 和 ROMS 模式,对比分析该流系的地形剪切作用和上层流强度.Hansen 等^[56]继续采用从多普勒中心异常中移除风场影响的方法,反演了进

入挪威海的大西洋水的两条主要分支挪威大西洋坡流(NwASC)和挪威大西洋锋面流(NwAFC),另外还有挪威沿岸流(NCC).Hansen 等^[57]继续采用校正风影响的方法,反演多普勒流,并依据地转流时间尺度较长的特征,利用升降轨数据的时间平均分别反演地转流的纬向和经向分量.Dagestad 等^[58]依据地转流时间尺度较长的特点,利用时间平均的升降轨数据,反演得到了二维的多普勒流场,以及相应的纬向和经向地转流分量,并对比了高度计反演的地转流,在流的连续性和两者的相关性方面均令人满意,从而实现了多普勒信息反演二维地转流的重要突破.Johannessen 等^[59]对海洋流场反演和应用进行了一次较全面的总结,认为对于次中尺度涡旋(直径小于 50 km)的观测,SAR 显示出独有的能力.Johannessen 等^[60]还反演了湾流区的径向多普勒速度,并与 GOCE 测量的 MDT 反演的地转流做比较,进一步验证了多普勒在强流区的测量效果.Johannessen 等^[61]基于对阿古勒斯流的反演,总结认为将浮标数据、多普勒流场、高度计反演的地转流和 SST 等光学数据进行融合,多数据综合研究海面,不仅可以研究动力过程,还可以计算多种海洋现象的体积和热量输运,包括地转流的强度和输运量、涡度和辐散辐合场的非地转和垂向运动及其输运量.Husson 等^[62]利用多源数据,验证了 Sentinel-1 卫星在海态反演(包括表面风场、方向波数谱、有效波高以及海面流场)方面的能力。

通过以上的研究可以看出,DOPRIM 主要的作用是研究风、浪和流对平均的海面粗糙度的影响,以及造成的多普勒异常,但若用于反演海表面流则实际过程会非常复杂.Collard 等^[53]、Johannessen 等^[59-61]和 Hansen 等^[62],对 Charpon 等提出的反演方法进行简化,发展 CDOP 模型,采用移除风多普勒影响的方法来反演海表层流,从结果及验证结果来看,均较理想.而 Hansen 等^[63]继续对 Charpon 等的方法进行完善,提出了一个较全面的反演方法.从反演方法上看,该反演体系非常有助于理解多普勒中心,然而反演过程相当复杂,其中充分考虑了单个多普勒中心像元中后向散射系数的偏移,并依据陆地静止不动的特征来校正卫星与海洋的相对运动,考虑因素非常全面,然而从反演的结果上来看效果不佳,甚至没有给出反演的径向流场图像.分析其原因,除影响因素较多外,对多普勒中心的过度校正,也是很重要的一方面,而 Collard 等^[53]和 Johannessen 等^[59-61]

提供的通过 CDOP 校正风影响的方法,非常符合实际的动力过程.Rouault 等^[54]分析入射角小于 30°情况下多普勒速度的明显异常,更充分说明了风与海面流场之间密切的互相关关系.基于这些研究,以及 Mouche 等^[64]发展的利用后向散射系数及 CDOP 模型联合进行风场反演,结果都表明,采用风校正的方法反演海表层流,是目前最好的方法.正如文中结论所指出的,SAR 成像海表面,目前实现了多普勒信息和高分辨率的后向散射系数的结合,使得风、浪和流的联合反演成为可能,从而使得 SAR 遥感海表面动力具备了其他遥感手段无法比拟的优势。

国内也开展了海表层流反演的相关工作,Fu 等^[65]用 SAR 后向散射系数图像,通过迭代算法,反演了台湾海峡某浅滩的海表层流;Wang 等^[66]用 Hansen 等^[63]提出的方法,反演了长江口附近的表面流场分布;Yu 等^[29]用 RIM 模型模拟和分析长江口的遥感成像;杨小波^[67]用均值滤波的方法从多普勒中心中移除卫星运动造成的多普勒频移,反演得到江浙沿岸流的流场分布.对比国内和国外的研究进展可以看出,我国在该研究领域目前尚处在起始发展阶段,还需要投入大量的研究力量来发展和提高我国的研究水平。

3 海流遥感的研发计划

通过梳理文献发现,国外在海洋流场的遥感方面先后提出和发展了几个重要的研发和数据融合计划,分别是 GlobCurrent 计划、Wavemill 计划和 SKIM 计划.这些计划的实施,对于研究海洋流场的遥感具有极大的促进作用,在此简要进行介绍。

GlobCurrent 计划启动较早,最早开始于 2012 年的 GlobCurrent 论坛^[59],2014 年进行了相关的概念解释,主要的目的是利用卫星数据协同融合来提供海洋表面流场的定量估计,改善和增强卫星数据遥感上层海洋的应用,并展示以用户为主导的科学应用、业务化应用和商业应用的重要影响^[68].2015 年,该计划融合了欧空局 Sentinel-1、Sentinel-3 卫星与其他辅助支撑数据^[68];2016 年,分析了 GlobCurrent 数据的区域性特征^[69];2017 年在澳大利亚开展试验,对 GlobCurrent 计划的产品数据进行了充分的检验和验证,并在 2018 年将 Sentinel-2 卫星数据也融入到了该数据产品中^[70],并对 GlobCurrent 数据的误差校正进行了估算^[71].GlobCurrent 数据产品的开发和分布,对于反演和分析包括海表层流在内的上层海

洋动力现象,提供了极大的便利.

Wavemill 计划采用顺轨干涉测量来反演流场信息,最早的设计理念源于 2001 年的双波束干涉测量海表面流,2004 年发展成为双边顺轨干涉测量海表面流,并于 2005 年正式提出 Wavemill 的概念.2011 年,在英国中部的爱尔兰海进行了机载验证^[16],其后由英国南安普顿大学的 Gommenginger 及其研究团队相继开展了一系列研究,对风浪影响和风流联合反演等工作进行了分析和仿真^[44,72-75].该计划是由欧空局资助,英国对地观测仪器和空间技术中心(CEOI-ST)支持的研究项目,截至目前还没有相关的卫星发射计划发布.

SKIM 是英文 Sea Surface Kinematics Multiscale monitoring 的缩写,主要任务是发射雷达卫星观测海面流场和海面波浪场,并由海面流场和波浪场扩展开来,综合研究上层海洋现象和动力过程.SKIM 计划于 2017 年正式发布^[76-77],主要技术特征是结合了高度计和波谱仪的优点.其中雷达发射天线中,采用了 Ka 波段的 8 个波束进行干涉测量,其中 6° 和 12° 入射角的所有波束均为旋转波束,与波谱仪采用旋转多波束的特征类似,可以进行不同入射角的干涉测量,由此能够提供精确的海面流场和浪场测量^[77].SKIM 主要的测量参数为多普勒中心和后向散射系数,根据此测量特征,欧空局称其为多普勒海洋雷达,但遗憾的是未能列入未来卫星发射计划.

4 讨论与总结

4.1 存在的问题

星载 SAR 遥感海面流场方面,目前存在主要的问题主要有两个:1) 遥感反演的误差分析模型不完善;2) 反演结果的验证方法不完善.在第一个问题方面,干涉测量方法目前已经发展了一些分析反演误差的模型^[35-37],而多普勒中心偏移方法目前仅有一些对反演误差的定性分析结果,还没有发展出有效的误差分析模型.对于第二个问题,Chapron 团队通过与大量的高度计及光学图像的对比,对多普勒中心偏移法测量的径向流场进行了大量的结果验证,证明了 SAR 无论对于大尺度的地转流还是中小尺度过程,均具有较好的成像能力,反演的结果真实准确.而干涉测量方法方面,结果的验证则相对较少,且仅限于观测数据验证,不同遥感数据的交叉验证以及对反演结果的分析尚缺乏完善的研究.

虽然经过了十几年的研究,以上两个问题依然

存在,且未得到较好的解决,主要原因是 SAR 遥感海洋流场过程中,受到了卫星运动、复杂的海面散射以及复杂的风浪运动影响,使得解决这两个问题比较困难.就误差分析模型而言,反演结果的好坏受到诸多因素的影响,比如成像分辨率、海面的后向散射机制、反演的精度和反演对象的空间尺度等.这就使得在分析反演误差时,需要针对不同尺度的海洋现象在不同分辨率下分别做具体的分析,测量对象的时空尺度决定测量误差.因此每一种海洋现象都需要独立分析其反演误差,从而造成了反演结果验证和误差分析的复杂性.

然而,即便存在上述两个不确定的问题,合成孔径雷达依然是目前最理想的遥感手段.相比散射计、高度计等测量手段,SAR 或 InSAR 遥感海洋流场信息将测量后向散射系数、多普勒频率和干涉相位三个参数,它们分别具有不同的成像分辨率.对于时变海面的遥感而言,成像的时空分辨率决定了图像所能探测的上层海洋现象时空尺度的范围.后向散射系数图像和干涉 SAR 的相位图像分辨率较高,达到米级;多普勒频率的分辨率较低,为千米级.SAR 或 InSAR 具有的这种多分辨率优势,将极大扩展卫星所能探测的上层海洋动力的时空尺度,这是其他遥感手段所不具备的,因而它是最适合的海面流场遥感观测手段.

4.2 研究展望

随着遥感探测时空分辨率的逐步提高,海洋遥感所能探测的对象也日益丰富.星载 SAR 作为微波遥感海面动力的一个重要组成部分,可以预见在中尺度、次中尺度乃至小尺度海洋动力过程的研究中,将会逐渐起到主导性的作用.将不同时空尺度海洋动力过程的散射模型和反演方法建立起来,将会是未来很长一段时间内 SAR 动力遥感的核心研究方向.而随着上层海洋观测数据的日益完善,在传统观测和反演大尺度海洋环流和中尺度涡的基础上,海洋遥感开始重点关注海表面存在的次中尺度和小尺度混合过程,为全面理解上层海洋的物质能量演变乃至气候变化等重要课题奠定数据基础.

目前,国内在相关的研究方向上尚处在初期发展阶段,研究的成果还不是很丰富,研究的方向也相对单一,重点关注在遥感技术手段获得反演流场信息方面.遥感信息在海洋学的应用研究,目前还十分缺乏,希望通过本文的讨论,引起国内同行在该研究方向的关注和重视.

参考文献

References

- [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
HE Yijun, LIU Baochang, ZHANG Biao, et al. Overview on satellite remote-sensing methods for seasurface-current measurement [J]. Guangxi Sciences, 2015, 22 (3): 294-300
- [2] 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 Liang, GAO Guoping, GUO Lixin. Review on ocean surface current field measurement by space-borne SAR[J]. Advances in Marine Science, 2015, 33 (1): 107-117
- [3] Klemas V. Remote sensing of coastal and ocean currents: an overview [J]. Journal of Coastal Research, 2012, 28 (3): 576-586
- [4] 杨小波,刘保昌,何宜军,等.海表面流场微波遥感研究进展及其关键技术问题分析[J].广西科学,2016,23(6):499-506
YANG Xiaobo, LIU Baochang, HE Yijun, et al. Research progress in microwave remote sensing of seasurface currents and analysis of the key problems [J]. Guangxi Sciences, 2016, 23 (6): 499-506
- [5] Goldstein R M, Zebker H A, Barnett T P. Remote sensing of ocean currents [J]. Science, 1989, 246 (4935): 1282-1285
- [6] Goldstein R M, Zebker H A. Interferometric radar measurement of ocean surface currents [J]. Nature, 1987, 328 (6132): 707-709
- [7] Shemer L, Marom M, Markman D. Estimates of currents in the nearshore ocean region using interferometric synthetic aperture radar [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1993, 98 (C4): 7001-7010
- [8] Romeiser R, Alpers W, Wismann V. An improved composite surface model for the radar backscattering cross section of the ocean surface: 1. theory of the model and optimization/validation by scatterometer data [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1997, 102 (C11): 25237-25250
- [9] Romeiser R, Alpers W. An improved composite surface model for the radar backscattering cross section of the ocean surface: 2. model response to surface roughness variations and the radar imaging of underwater bottom topography [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1997, 102 (C11): 25251-25267
- [10] Romeiser R, Ufermann S, Alpers W. Remote sensing of oceanic current features by synthetic aperture radar: achievements and perspectives [J]. Annals of Telecommunications, 2001, 56 (11/12): 661-671
- [11] 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
- [12] Romeiser R, Hirsch O. Possibilities and limitations of current measurements by airborne and spaceborne along-track interferometric SAR [C] // IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium, 2001, DOI: 10.1109/IGARSS.2001.976227
- [13] Kersten P R, Toporkov J V, Ainsworth T L, et al. Estimating surface water speeds with a single-phase center SAR versus an along-track interferometric SAR [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48 (10): 3638-3646
- [14] 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
- [15] 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, 2009, 48 (2): 820-829
- [16] Gommenginger C, Chapron B, Marquez J, et al. Wavemill: a new mission for high-resolution mapping of total ocean surface current vectors [C] // EUSAR 2014: 10th European Conference on Synthetic Aperture Radar, 2014: 1-4
- [17] Marghany M, Hashim M, Cracknell A P. Hopfield neural network for sea surface current tracking from tiungsat-1 data [C] // International Conference on Computational Science and Its Applications, 2008: 950-958
- [18] Marghany M. Simulation sea surface current from RADARSAT-2 SAR data using Hopfield neural network [C] // IEEE 5th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR), 2015, DOI: 10.1109/APSAR.2015.7306326
- [19] Marghany M. Hopfield neural network and Pareto optimal algorithms for retrieving sea surface current from TanDEM-X data [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 169: 012023
- [20] Marghany M. Robust model for retrieval sea surface current from different RADARSAT-1 SAR mode data [C] // IEEE International Conference on Signal and Image Processing Applications, 2009, DOI: 10.1109/ICSIIPA.2009.5478705
- [21] Kudryavtsev V. A semiempirical model of the normalized radar cross-section of the sea surface 1. background model [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2003, 108 (C3): 8054
- [22] Kudryavtsev V. On radar imaging of current features: 1. model and comparison with observations [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2005, 110 (C7): C07016
- [23] Johannessen J A. On radar imaging of current features: 2. mesoscale eddy and current front detection [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2005, 110 (C7): C07017
- [24] Kudryavtsev V N, Chapron B, Myasoedov A G, et al. On dual co-polarized SAR measurements of the ocean surface [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2013, 10 (4): 761-765
- [25] Myasoedov A, Kudryavtsev V, Chapron B. Dual co-polarized SAR imaging of the ocean surface phenomena [C] // Conference Proceedings of 2013 Asia-Pacific Con-

- ference on Synthetic Aperture Radar (AP SAR), 2014, DOI: 10.1088/1742-6596/478/1/012001
- [26] Kudryavtsev V, Kozlov I, Chapron B, et al. Quad-polarization SAR features of ocean currents [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, 119(9): 6046-6065
- [27] Kudryavtsev V, Kozlov I, Chapron B, et al. Quad-polarized SAR measurements of ocean currents in C- and L-bands [C] // *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2015, DOI: 10.1109/IGARSS.2015.7326755
- [28] Hansen M W, Kudryavtsev V, Chapron B, et al. Wave breaking in slicks: impacts on C-band quad-polarized SAR measurements [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, 9(11): 4929-4940
- [29] Yu P, Johannessen J A, Kudryavtsev V, et al. Radar imaging of shallow water bathymetry: a case study in the Yangtze Estuary [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, DOI: 10.1002/2016jc011973
- [30] Chapron B. Direct measurements of ocean surface velocity from space: interpretation and validation [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2005, 110(C7): C07008
- [31] Johannessen J A, Kudryavtsev V, Chapron B, et al. Backscatter and Doppler signals of surface current in SAR images: a step towards inverse modelling [C] // *Advances in SAR Oceanography from Envisat and ERS Missions*, 2006
- [32] Johannessen J A, Collard F, Chapron B, et al. Combined backscatter and Doppler shifts from SAR images: observations, synergies and simulations [C] // *SEASAR 2008-Advances in SAR Oceanography from ENVISAT and ERS Missions*, 2008
- [33] 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): L22608
- [34] Hansen M W, 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 of Environment*, 2012, 120: 113-122
- [35] 鲍青柳. 多普勒雷达散射计的系统设计与仿真 [D]. 北京: 中国科学院空间科学与应用研究中心, 2015
BAO Qingliu. System design and simulation of Doppler scatterometer: wide swath ocean surface current measurement [D]. Beijing: Center for Space Science and Applied Research, 2015
- [36] 鲍青柳, 董晓龙, 朱迪, 等. 基于笔形波束扫描雷达散射计的海洋表面流测量 [J]. *电子学报*, 2015, 43(6): 1200-1204
BAO Qingliu, DONG Xiaolong, ZHU Di, et al. Ocean surface current measurement using rotating pencil-beam scatterometer [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2015, 43(6): 1200-1204
- [37] Miao Y J, Dong X L, Bao Q L, et al. Perspective of a Ku-Ka dual-frequency scatterometer for simultaneous wide-swath ocean surface wind and current measurement [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(7): 1042
- [38] Rosen P A, Hensley S, Joughin I R, et al. Synthetic aperture radar interferometry [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2000, 88(3): 333-382
- [39] Ouchi K, Yoshida T, Yang C S. Multi-aperture along-track interferometric SAR for estimating velocity vector of ocean currents [C] // *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2018, DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8517425
- [40] Wollstadt S, Lopez-Dekker P, de Zan F, et al. A Ku-band SAR mission concept for ocean surface current measurement using dual beam ATI and hybrid polarization [C] // *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2015
- [41] Rodriguez E, Imel D, Houshmand B. Two-dimensional surface currents using vector along-track interferometry [C] // *Proceedings PIERS'95*, 1995: 763
- [42] Buck C, Donlon C, Gebert N. A status update of investigations into the Wavemill concept [C] // *EUSAR 2014: 10th European Conference on Synthetic Aperture Radar*, 2014: 1-4
- [43] Buck C. An extension to the wide swath ocean altimeter concept [C] // *Proceedings of 2005 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2005, 8: 5436-5439
- [44] Martin A, Gommenginger C, Chapron B, et al. Dual beam along-track interferometric SAR to MAP total ocean surface current vectors with the airborne wavemill proof-of-concept instrument: impact of wind-waves [C] // *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2015, DOI: 10.1109/IGARSS.2015.7326719
- [45] Wollstadt S, Lopez-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
- [46] Martin A C H, Gommenginger C P, Quilfen Y. Simultaneous ocean surface current and wind vectors retrieval with squinted SAR interferometry: geophysical inversion and performance assessment [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 216: 798-808
- [47] 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
REN Yongzheng. 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
- [48] Ren Y Z, Li X M, Gao G P, et al. Derivation of sea surface tidal current from spaceborne SAR constellation data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(6): 3236-3247
- [49] Liu B C, He Y J, Li Y K, et al. A new azimuth ambiguity suppression algorithm for surface current measurement in coastal waters and rivers with along-track InSAR [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(6): 3148-3165
- [50] 端和阳, 刘保昌, 何宜军, 等. 一种改进的基于逆 Omega-K 算法的海面场景 SAR 原始数据仿真方法

- [J].海洋与湖沼,2019,50(2):291-300
DUAN Heyang, LIU Baochang, HE Yijun, et al. An improved raw data simulation method for measuring ocean surface current [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2019, 50(2): 291-300
- [51] Pan X L, Liao G S, Yang Z W, et al. Sea surface current estimation using airborne circular scanning SAR with a medium grazing angle [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(2): 178
- [52] Danilo C, Chapron B, Mouche A, et al. Comparisons between HF radar and SAR current measurements in the Iroise Sea [C] // *OCEANS 2007*, 2007, DOI: 10.1109/OCEANSE.2007.4302424
- [53] Collard F, Mouche A, Chapron B, et al. Routine high resolution observation of selected major surface currents from space [C] // *Proceedings of SEASAR*, 2008; 21-25
- [54] 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 Atmospheres*, 2010, 115(C10): C10026
- [55] Backeberg B C, Johannessen J, Rouault M, et al. Preliminary inter-model comparison of the Agulhas current with direct range Doppler velocity estimates from Envisat's Advanced Synthetic Aperture Radar (ASAR) [C] // *ESA Living Planet Symposium*, 2010
- [56] 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 Atmospheres*, 2011, 116(C12): C12008
- [57] Hansen M W, Johannessen J A, Raj R. Mapping the Nordic Seas surface velocity using Envisat ASAR [C] // *Pan Ocean Remote Sensing Conference (PORSEC)*, 2013, 709: 13
- [58] Dagestad K F, Hansen M W, Johannessen J A, et al. INCUSAR: a method to retrieve temporal averages of 2D ocean surface currents from synthetic aperture radar Doppler shift [M] // Fernández-Prieto D, Sabia R. *Remote Sensing Advances for Earth System Science*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013; 59-67
- [59] Johannessen J A, Holt B, Chapron B, et al. Ocean current retrievals and applications [C] // *SeaSAR 2012, 2013*, DOI: 10.1002/(SICI)1521-3773(19981204)37:223.0.CO;2-#
- [60] Johannessen J A, Chapron B, Collard F, et al. Range Doppler centroid shift-altimetry comparison [C] // *EUSAR 2014: 10th European Conference on Synthetic Aperture Radar*, 2014
- [61] Johannessen J A, Chapron B, Collard F, et al. Use of SAR data to monitor the Greater Agulhas current [M] // Barale V, Gade M. *Remote Sensing of the African Seas*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2014; 251-262
- [62] Husson R, Mouche A, Chapron B, et al. Taking advantage of Sentinel-1 acquisition modes to improve ocean sea state retrieval [C] // *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2016, DOI: 10.1109/IGARSS.2016.7730009
- [63] Hansen M W, Collard F, Dagestad K F, 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
- [64] 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
- [65] Fu B, Huang W G, Fan K G, et al. Method for ocean surface currents measurement by SAR [J]. *Proceedings of SPIE-the International Society for Optical Engineering*, 2008, DOI: 10.1117/12.804897
- [66] Wang L H, Zhou Y X, Ge J Z, et al. Mapping sea surface velocities in the Changjiang coastal zone with advanced synthetic aperture radar [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 33(11): 141-149
- [67] 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
- [68] Johannessen J A, Chapron B, Collard F, et al. GlobCurrent: sentinel-3 synergy in action [C] // *Proceedings of Sentinel-3 for Science Workshop*, 2015; SP-734
- [69] Danielson R E, Korosov A, Johannessen J A, et al. A regional characterization of the GlobCurrent ocean surface current analysis [C] // *Proceedings of Living Planet Symposium*, 2016
- [70] Johannessen J A, Chapron B, Collard F, et al. Advances in surface current observations from space: the GlobCurrent case [C] // *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2018, DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8519451
- [71] Danielson R E, Johannessen J A, Quartly G D, et al. Exploitation of error correlation in a large analysis validation: GlobCurrent case study [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 217: 476-490
- [72] Doody S, Marquez J, Dobke B, et al. A mission for measuring ocean surface current vectors [C] // *Proceedings of EUSAR 2016: 11th European Conference on Synthetic Aperture Radar*, 2016; 1-4
- [73] Martin A C H, Gommenginger C, Marquez J, et al. Wind-wave-induced velocity in ATI SAR ocean surface currents: first experimental evidence from an airborne campaign [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, 121(3): 1640-1653
- [74] Martin A C H, Gommenginger C. Towards wide-swath high-resolution mapping of total ocean surface current vectors from space: airborne proof-of-concept and validation [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 197: 58-71
- [75] Martin A C H, Gommenginger C P, Quilfen Y. Simultaneous ocean surface current and wind vectors retrieval with squinted SAR interferometry: geophysical inversion and performance assessment [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 216: 798-808
- [76] Nougouier F, Chapron B, Collard F, et al. Sea surface kinematics from near-nadir radar measurements [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018,

56(10):6169-6179

[77] Arduin F, Aksenov Y, Benetazzo A, et al. Measuring currents, ice drift, and waves from space: the Sea surface KI-

nematics Multiscale monitoring (SKIM) concept [J]. Ocean Science, 2018, 14(3):337-354

Progress in sea surface current retrieval from spaceborne SAR measurements

HE Yijun¹ YANG Xiaobo¹ YI Na¹ LIU Baochang¹

¹ School of Marine Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract Doppler signal is an important synthetic aperture radar (SAR) parameter for ocean dynamics remote sensing. It was first used for the retrieval of ocean surface dynamic processes in the late 1980s. In this paper, we review the researches on retrievals of sea surface dynamics from spaceborne SAR Doppler measurements including: (1) SAR interferometry techniques and related research progress for ocean surface currents retrieval; (2) SAR Doppler shift and its application in retrieval of upper ocean dynamics (i.e. geostrophic currents, quasi-geostrophic currents, and meso- and small-scale processes); (3) Relevant data fusion and important R&D programs around the world. However, China's remote sensing of sea currents is still in the initial stage, and highly focused on retrieval theory and techniques. The application of the retrieved information in study of upper ocean dynamics is still limited, so this review can serve as a reference for future studies in this direction.

Key words sea surface currents; microwave remote sensing; Doppler centroid; submeso-scale