

海表面流场微波遥感研究进展及其关键技术问题分析* Research Progress in Microwave Remote Sensing of Sea-surface Currents and Analysis of the Key Problems

杨小波,刘保昌,何宜军,张 彪,刘国强

YANG Xiaobo, LIU Baochang, HE Yijun, ZHANG Biao, LIU Guoqiang

(南京信息工程大学海洋科学学院, 江苏南京 210044)

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

摘要:海表面流场是海洋学中十分重要的研究对象,本文综述了海表面流场微波遥感所涉及的海表面建模、计算电磁学、合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)海面成像及 SAR 信号等基础研究领域,梳理了海表面流场微波反演的研究进展,分析了目前已有反演方法的利弊并找出待研究的科学问题,逐一剖析这些问题并提出解决方法。针对海表面流场微波遥感中有待解决的在动态海表面建模中如何引入海表面流场因素、运动海面电磁散射特征表征中如何选取参数和反演过程中需要注意的图像分辨率等问题,提出了研究策略,指明了海表面流场微波遥感的路线和研究方向,最后对海表面流反演工作进行了展望,探讨了高分辨率海流反演的下一步工作。

关键词:动态海面建模 海表面流反演 多普勒谱 多普勒中心

中图分类号:P731.21 文献标识码:A 文章编号:1005-9164(2016)06-0499-08

Abstract: To demonstrate the research direction of the sea surface current remote sensing, an overview on the present progresses of the electromagnetic scattering theory about dynamic sea surface and the sea surface current retrieval is made, and the analyses based on existing methods help to find out the questions, which need to clarify, then to analyze and finally make a determination of solving methodology. Key issues are proposed, such as how to incorporate sea-surface currents into the modeling of the dynamic ocean surface, how to select appropriate parameters to characterize the electromagnetic scattering properties of sea-surface currents, and how to deal with the issue of the image resolution and so on. The research strategy is proposed as follows: Sea surface current remote sensing need the combination of the satellite retrieval results with the electromagnetic scattering theory, and it also need further work on the high resolution retrieval.

Key words: dynamic ocean surface modeling, sea surface current retrieval, Doppler spectrum, Doppler centroid

0 引言

在海洋学中研究海表面流场(以下简称海流)的特征及其变化规律,并获取准确的海流信息,对数值海洋预报、海洋生态保护、海上船只航行、海上军事行

收稿日期:2016-10-31

作者简介:杨小波(1988-),男,博士研究生,主要从事海流微波遥感反演及海气相互作用方面的研究工作。

* 国家自然科学基金项目(41576173, 41606201 和 41620104003),国家重点研发计划项目课题(2016YFC1401002)和江苏省优势学科二期资助。

** 通信作者:刘保昌(1981-),男,讲师,主要从事海表面流场微波遥感反演及雷达信号处理方面的科研及教学工作, E-mail: beliu1981@163.com。

动和海洋渔业生产乃至全球气候变化研究等,均具有极其重要的意义。卫星遥感反演是目前获取大范围海流信息最经济、最有效的方法,并由此产生了光学遥感反演和微波遥感反演,光学遥感反演一般是根据示踪物(如叶绿素、海表面温度和悬浮物等)随运动产生的位移特征间接获得海流的运动信息^[1],但也有根据图像上的海浪纹理信息计算背景流场中的波浪运动,再结合理论分析间接计算获得海流流速和流向^[2-3],此外还有微波遥感里的高频地波雷达海流反演方法,也采用了与光学遥感类似的图像序列分析方法。总之,光学遥感方法都是通过间接手段获取海流信息,没有涉及到复杂的海洋上边界层运动作用的机制,反演的精度也十分有限。就目前的发展状况,海流的微波遥感方法在海流遥感反演方面将会居于主流地位,该方法充分考虑了复杂的海洋表面状况,建立了静态或动态的海洋表面模型,并结合不同尺度波浪的电磁散射特征建立了不同入射角情况下海面的电磁散射机制。最近逐渐发展完善的动态海面建模理论、多普勒谱及多普勒中心理论,为研究运动海面电磁散射特征提供了很好的理论基础,同时也为高分辨率、高精度的海流反演工作开辟了光明的前景。本文从海流微波遥感的发展脉络中,寻找高分辨率海流反演的发展趋势和方向,在目前低分辨率的多普勒海流反演和高分辨率的干涉合成孔径雷达(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)海流反演成果的基础上,在海流微波遥感的相关基础理论研究并不完善的情况下,找出海流遥感中海流的电磁散射表征,探讨海流对海面电磁散射的影响以及如何提高反演的分辨率等问题,确定研究策略和方法。

1 海流微波遥感理论基础

海流微波遥感反演涉及到海表面电磁散射理论的各个方面,主要包括海表面建模理论、海面电磁散射理论、多普勒谱及多普勒中心理论、海杂波及其多普勒谱统计理论和合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)信号仿真及信号处理技术等。存在于海表面的海流,通过变形作用影响海表面^[4]和对微波信号的散射,造成后向散射系数及多普勒谱的变化^[5-9],并以多普勒中心频移的形式体现在 SAR 的回波信号中^[10]。因此,如何在海表面建模中引入海表面流场,研究其对海面后向散射的定量化影响,都与海流的反演工作密切相关。下面分别简要介绍这几个理论技术目前的发展状况。

海表面建模主要是针对海洋表面边界层建立能够表征其形状的几何模型,由于海表面主要由各种不

同尺度的海浪组成,现有的几何模型主要围绕着海浪建模构造静态或动态的海表面模型。线性海面的建模中,海浪频谱模型最常被用于构建静态或动态的海表面,该模型能反映风对海表面的作用,适当地耦合具备海洋学意义的数值模式,还可以模拟复杂的非线性海表面特征;其他建模方法还包括以经验函数构造法为基础建立的纹理映射模型、噪声模型和 Peachy 模型等,能较好地模拟出海面的质感;以运动粒子群为基础建立的粒子系统模型和元胞自动机模型^[11],便于飞沫、碎波和泡沫等的模拟;此外还有较简化的流体动力学模型^[11-12]。非线性海面模型主要以 Creamer 构建的非线性海面模型和 Franceschetti 等构建的分数布朗运动分形海面模型(fBm)及 Jaggard 等构建的带限 Weierstrass 分形海面模型为主^[11,13],其他还有基于非线性水动力学推导的 West 模型及基于 Gerstner 余摆线波浪理论的二维非线性尖浪模型(CWM)^[11]。在研究海表面电磁散射机制过程中,也发展了一些专门的海表面散射模型,如二尺度模型、三尺度模型和全波模型等^[14],这些模型通过对不同尺度重力的叠加,构成了便于分析后向散射场的约化的海面模型,其中以二尺度海面模型应用最为广泛。

在计算电磁学领域,海面的电磁散射计算属于粗糙面电磁散射理论范畴,在计算时需要克服粗糙面轮廓的随机不确定性和电大尺寸性,目前发展起来了近似计算和数值计算两大类方法^[11,13]。其中,近似计算方法常用的有 Kirchhoff 近似(KA)、微扰法(SPM)、小斜率近似(SSA)及加权曲率近似方法、双尺度方法(TSM)及复合表面方法,此外还有消光定理方法、全波法(FWA)、相位微扰法(PPT)和积分方程模型(IEM)等方法。数值计算方法依据所求解的方程类型可以分为微分方程法(DE)和积分方程法(IE)两类,依据求解的对象可以分为频域和时域两大类,因而数值计算方法总的可以分为4类:频域微分方程方法(FDDE)、时域微分方程方法(TDDE)、频域积分方程方法(FDIE)和时域积分方程方法(TDIE)。FDDE 中最常用的一种方法是有限元方法(FEM),TDDE 中最常用的方法是有限差分方法(FDTD),FDIE 中具有代表性的方法是矩量法(MOM)、基于矩量法的稀疏矩阵正则网格法(SMCG)和快速多极子方法(FMM)。总之,海面电磁散射计算的本质在于求解以海面为边界条件的 Maxwell 微分或积分方程,近似计算方法由于采用了各种物理近似,因而具有一定的适用范围,而数值计算方法由于海面电大尺寸性的影响而增加了计算的复杂性^[13]。

雷达微波对海洋的穿透深度很小,最深约 10 cm,而且海面的导电性趋于均匀分布,因此,海面的散射主要由表面散射和海况决定^[12,14]。海面的粗糙度对海面的电磁散射有着重要的影响,粗糙的海面就会产生漫散射,而光滑的海面主要是镜面散射。海表面的光滑与粗糙,主要依据瑞利准则进行划分。海面的电磁散射机制的研究与海面电磁散射计算方法的发展密切相关,并随着近似计算方法的发展而逐步完善。从最初的微扰法和 Kirchhoff 近似,再到双尺度模型、复合表面模型和全波模型,海表面存在着的倾斜调制、流体力学调制、轨道调制、布拉格散射、镜面散射、波破碎影响、多重散射效应及其他高阶统计特征(如海浪水平及垂直方向上的不对称性和非高斯各向异性海面的斜率联合概率密度修正等),大入射角下存在的阴影调制、遮蔽效应和曲率修正效应等^[13,15-16],还有 SAR 特有的速度聚束调制等影响电磁场后向散射场的调制机制或效应特征,都是伴随着近似计算模型的发展而逐步讨论完善的。1985 年, Hasselmann 总结了 SAR 对海洋的成像机制,使人们对海面的电磁散射特性以及 SAR 成像机制有了较为完整的认识^[12,17]。

海面后向散射幅度的多普勒谱及其中心理论的研究早在 20 世纪 50 年代就已经开始了,并伴随着海面电磁计算方法和海面散射机制的发展而发展, Crombie、Barrick、Bass、Zavorotny 和 Toporkov 等都分别研究了不同电磁散射模型和不同散射机制条件下多普勒谱频移及展宽的特性,国内郭立新、王运华、金亚秋、许晓剑和李晓飞等的研究也促进了多普勒谱研究的进展^[11,13,18]。由于海面后向散射回波的多普勒谱特征反映的是海面本身的动态时变特性,因此多普勒谱主要基于动态时变海面进行建模和分析,并在海杂波的研究中被广泛和深入地讨论,同时还建立了海杂波多普勒谱的高斯模型、马尔柯夫模型、全极点模型和立方谱模型以及平均多普勒谱的 Ward 模型和全参数平均谱模型^[19]。海杂波理论也主要建立在运动海面模型的基础上,因此,它在海态参数反演和目标识别等领域都有着非常重要的应用。这里需要补充说明的是,海杂波的分析对象主要包括其幅度分布特性及时间相关特性。其中,关于海杂波幅度分布特性的研究和分析理论发展相对成熟,主要包括海杂波幅度概率密度分布函数(PDF)特性分析理论、海杂波混沌特性分析理论和海杂波分形特性分析理论等;关于海杂波时间相关特性的分析主要是基于其多普勒谱特性的研究,包括一阶和二阶谱峰、中心频率和展宽特征分析等^[11]。

SAR 回波的原始信号中本身包含有平台与目标间相对运动的多普勒频移信息,可以用于海流的反演^[20-21],因此,回波的多普勒中心相关理论也有助于运动海面的研究。SAR 发射的电磁波波束增益在波束中心方向上最大,某点目标回波接收信号慢时间序列强度的峰值出现在波束中心穿越目标的方位时刻,此时的多普勒频率称为多普勒中心频率,或简称为多普勒中心。要准确地获取包含海面运动信息的多普勒中心,就需要进行回波信号的多普勒中心估计,该技术是 SAR 成像的关键技术,常用的算法有相位增量法、匹配相关法、最大似然法和频谱能量均衡法等^[22-25]。

2 海流微波反演研究进展

海流的微波遥感反演目前主要有高度计反演地转流方法,岸基雷达反演近岸流场方法和星载 SAR 反演方法。雷达高度计反演海流主要利用高度计测得的海表面高度距平,结合海洋方面的地转平衡方程,计算得到地转流流速和流向。岸基雷达包括 X 波段雷达和低频地波雷达两种,反演近海流场一般是利用雷达测得的图像序列,通过图像纹理追踪或者测量参数比较等手段反演流场^[1,26]。由于高度计和岸基雷达的反演方法都有一定的使用范围和局限,这里不再详述,重点介绍星载 SAR 反演方法,主要包括多普勒中心反演方法和顺轨干涉测量方法。

由 Goldstein、Zebker 及 Romeiser 等^[27-29]分别提出和发展的顺轨干涉测量(along-track interferometry, ATDI)方法,也称沿轨干涉测量方法,是利用成像时间间隔很短且以相同几何方式对同一研究区成像的两幅图像,计算图像间对应像素的相位差,从而获得地物相对于卫星视向的运动速度分量。多普勒中心海流反演方法是利用 SAR 成像过程中的回波信号测量参数,插值生成海面的多普勒频移图像,从而得到海面的流场结构信息。在多普勒中心反演海流方面, Kim 等^[30-31]采用欧空局 ERS-1/2 Raw SAR 数据,通过理论分析,得到初步的海表流速反演结果; Marghany 等^[32-33]采用 Radarsat 卫星提供的 SAR 数据,在多普勒频谱模型的基础上,构建了海流流速流向与多普勒中心之间的经验性鲁棒模型; Chapron 等^[21]和 Johannessen 等^[10]基于欧空局 Envisat-1 卫星 ASAR 数据,分析了从多普勒频移中反演所得海流速度的组成成分,并结合后向散射系数的影响,讨论了不同极化方式和入射角对反演精度的影响; Rouault 等^[34]对从 ASAR 数据反演得到的厄加勒斯流进行了精度评估; Kang 和 Kim^[31]利用加拿大 Ra-

darsat-1 卫星 ScanSAR 的初始数据,反演估计得到热带气旋作用下的海表流速;Hansen 等^[35]系统总结并校正了多普勒中心估计中存在的卫星姿态运动导致的预测多普勒频移误差、后向散射强度对回波强度影响造成的误差以及卫星雷达入射角变化造成的误差,建立了海表面风场影响海流反演的 CDOP 模型,用以扣除风对海流反演造成的影响;国内,王利花^[36]采用 Hansen 等提供的方法,反演了长江口区域近海海流,并结合实测站点的数据进行了误差分析。

ATI 方法成像图像的分辨率很高,一般是米级的分辨率,而多普勒中心反演方法所用图像的分辨率很低,一般是公里级的分辨率。图像的分辨率是海流反演过程中的关键因素,不同的图像分辨率下,图像所能展示的海洋现象不同。在较高分辨率的海面状况图像上,波浪运动是影响海流反演的主要因素,需要考虑倾斜调制、流体力学调制和速度聚束调制对布拉格波的影响,并需考虑波-波和波-流之间的非线性相互作用影响,并从反演得到的海面运动速度中予以去除;而在较低分辨率(如公里级的分辨率)的海面状况图像上,图像本身不能够展示更多的细节信息,如波浪的各种运动及非线性相互作用等,而对于海流这样的大规模海水相对运动目标,则非常具有表现能力,因此更适合海流的反演。

3 海流反演亟待解决的问题

现有的海流反演方法逻辑是通过建立雷达所测得的运动参数与海流的数量关系,进而反演得到海流的运动结构。结合海流微波遥感基础理论可知,现有的海流反演过程中,较少从理论上说明海流是如何作用于海表面的^[37],因而也没有具体、定量地探讨海流对海面后向散射场的影响,这就是现有海流反演方法存在明显不足的地方。如果没有从理论上说明海流的电磁散射机制,那么,海流反演方法的验证只能通过实测或者与海洋模式的结果进行对比来完成,这样耗费的反演成本和计算的复杂度将大大提升,不利于海流反演方法的推广使用。这样的情况下,研究海流存在情况下动态海面的电磁散射问题势在必行,而在现有海面电磁散射机制中如何合理地引入海流因素,如何选择合适的散射场参数表征海流运动的散射影响以及如何选择合适的尺度和分辨率等问题,都是目前亟待解决的理论问题。

首要关键问题是分析如何在海面的电磁散射机制中合理地引入海流因素的问题,梳理现有文献,海流的引入方法大致有 3 种。第一种是在海面几何模型理论中,通过波形函数直接引入,然后进行电磁计

算求解^[6];第二种是将水平流速引入到不同水深条件下的简化流体力学方程,通过求解方程得到相应的频散关系,代入到海面谱模型或非线性模型中计算其电磁散射场^[8-9];第三种是在建立海面谱的过程中,将海流流速引入到相应的波数谱平衡方程中求解,得到流速对海面的调制状况,并在电磁散射中计算其影响^[5]。从理论分析的角度来看,第一种方法较为简单直接,便于计算海面散射场,然而没有体现出海流与海面的相互作用过程,也不利于分析波流相互作用等非线性过程的电磁散射表示;第二种相比第一种,引入了简化的流体力学方程,从频散关系中体现了背景流场对波浪的影响,因而更具有海洋学意义,然而需要注意的是,从这个方式引入的流场体现的是流体力学尺度的波流相互作用,不适宜用于大尺度海流对大范围海面影响作用的表示;相比前两种方法,第三种则从波数谱平衡方程出发引入海流的影响,这种方法以海洋学背景为出发点,充分考虑了海流的尺度,通过倾斜调制机制来反映大范围流场的影响,比较恰当合理,此外流场的引入还可通过耦合区域海洋模式完成。然而,目前还没有对这 3 种引入方法进行相关实验对比分析的研究,这是亟待解决的关键问题,因为这个问题的解决将极大地促进海流微波遥感的基础理论研究,并为高分辨率海流反演奠定坚实的基础。

第二个关键问题是如何选择合适的参数表示海流运动的散射影响,这是与海流反演最密切相关的问题。散射场的多普勒谱及其频移是表示海面运动特征的最佳工具,然而目前对于多普勒谱及其频移的定义并不统一,从文献中整理的结果来看存在 4 种定义方式:

1) 一般情况下,多普勒谱 $S(f)$ 及其频移 f_s 和谱宽 f_w 的定义如式(1)^[11,38-39]。

$$S(f) = \left\langle \frac{1}{T} \left| \int_0^T E^s(t) e^{-i2\pi ft} dt \right|^2 \right\rangle, \quad (1. a)$$

$$f_s = \frac{\int f S(f) df}{\int S(f) df}, \quad (1. b)$$

$$f_w^2 = \frac{\int (f - f_s)^2 S(f) df}{\int S(f) df}, \quad (1. c)$$

上式中 $E^s(t)$ 为后向散射的电磁场,式(1. a)说明了该定义下多普勒谱为动态海面后向散射场的时间平均,多普勒频移 f_s 主要体现的是海面与雷达的相对运动,而谱宽 f_w 体现的是海面不同波分量与电磁波谐振的分布范围。

2) Thompson 提出了海面多普勒谱的时变复合

模型^[13,40-41],如式(2)所示,该模型基于 Maxwell 方程,并与 L 波段和 Ku 波段的观测结果进行了对比,证明了该模型的正确性。式(2)中 R 为后向散射场 E^s 的自相关函数,多普勒谱是该自相关函数的傅里叶变换。

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega t} R(t) dt, \\ R(t) = \langle E^s(t) \cdot E^s(t+\tau)^* \rangle. \quad (2)$$

3)2000 年,Romeiser 和 Thompson 为了从理论上分析 InSAR 的顺轨干涉测量^[28,41-42],又提出了如式(3)形式的多普勒谱定义。式中整个海浪谱的多普勒频率满足均值为 $\langle f_{\pm} \rangle_{\sigma}$,方差为 γ_{\pm}^2 的高斯分布。

$$S(f) = \frac{\sigma_+}{\sqrt{2\pi\gamma_+^2}} e^{-(f-f_{+0})^2/\gamma_+^2} + \frac{\sigma_-}{\sqrt{2\pi\gamma_-^2}} e^{-(f-f_{-0})^2/\gamma_-^2}, \quad (3. a)$$

$$f_{\pm\sigma} = \frac{\langle f_{\pm\sigma} \rangle}{\langle \sigma_{\pm} \rangle}, \quad (3. b)$$

$$\langle f_{\pm\sigma}^2 \rangle = \frac{\langle f_{\pm}^2 \sigma_{\pm} \rangle}{\langle \sigma_{\pm} \rangle}, \quad (3. c)$$

$$\gamma_{\pm}^2 = \langle f_{\pm}^2 \rangle_{\sigma} - \langle f_{\pm} \rangle_{\sigma}^2, \quad (3. d)$$

上式中, $\langle f_{\pm} \rangle_{\sigma}$ 也称为多普勒谱的一阶矩, $\langle f_{\pm}^2 \rangle_{\sigma}$ 称为多普勒谱的二阶矩, σ 为后向散射系数,符号 \pm 分别对应于靠近雷达方向和远离雷达方向的海浪波分量,符号 $\langle \rangle$ 表示求集平均。

4)在海杂波的研究中,为了便于表示频移与功率谱的统计关系,将多普勒谱表示为多普勒频率的函数^[19,43-44]。海杂波多普勒谱的统计模型有高斯模型、马尔柯夫模型、全极点模型和立方谱模型。式(4)为常用的运动状态海杂波多普勒谱高斯模型的定义式^[44],式中 f_D 为多普勒谱的中心频移,与海杂波的散射功率 x 呈近似线性关系, σ 为多普勒谱的谱宽,服从高斯分布。

$$S(f) = \frac{x}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left\{-\frac{[f-f_D(x)]^2}{\sigma^2}\right\}. \quad (4)$$

以上 4 种定义从物理本质上来看是相互对等的,

表 1 海表面重力波的小尺度波动特征量

Table 1 Characteristics of gravity waves in sea surface

类别 Group	波长 Wave length (m)	周期 Period(s)	群速度 Group velocity(m/s)	最大波高 Maximum wave height(m)	罗斯贝数 Rossby number
毛细波 Capillary wave	0.0167	0.0725	0.2305	0.001	2.6×10^{-9}
重力短波(风浪涌浪) Short gravity wave (Wind wave and swell wave)	1.56	1	1.56	0.2	2.45(风浪 ⁻⁷) 2.45(Wind wave ⁻⁷)
	39	5	7.8	3	6.12(风浪 ⁻⁶) 6.12(Wind wave ⁻⁶)
	156	10	15.6	6	2.45(风浪 ⁻³) 2.45(Wind wave ⁻³)

只有对于多普勒谱函数逼近程度的不同。然而,前两种定义侧重于从后向散射电磁场强度来计算多普勒谱,并且式(1)和式(2)是等价的,式(1)称为多普勒谱求解的周期图法,式(2)称为自相关函数法,相比式(1),式(2)所给的方法便于计算,并可以给出显式的多普勒谱表达式^[13];后两种定义强调多普勒谱与后向散射系数的联系,式(3)给出了多普勒谱的显式表达形式,便于代入计算,而式(4)则强调了多普勒谱函数的统计分布特征,便于与实测结果进行对比分析。4 种定义的实际对比效果目前还没有做过相关的研究,因此,这也是需要验证的一个重要问题。由于多普勒谱的计算需要涉及到时间步长的设定,这与 InSAR 反演海流时涉及到的海面场景的相干时间也有密切的联系,需要予以认真地研究探讨。

除此之外,目前还有一个尚不明确的问题就是星载 SAR 测得的多普勒中心参数与电磁散射多普勒谱频移之间的关系。按照定义,多普勒中心为卫星发射电磁波束中心穿越目标的方位时刻信号出现的峰值^[45],相比散射场多普勒谱的中心频率,多普勒中心除包括海面的运动因素外,还包括了卫星与海面的相对运动情况。然而,这也只是目前从定义出发分析的结果,还需要与计算的运动海面多普勒谱频移进行对比分析,从实验的角度予以证实,这也是研究海流电磁散射和反演需要解决的一个重要问题。

第三个关键问题是如何选择合适的尺度和图像分辨率研究海流的电磁散射和反演。现有的海流反演文章中,还没有专门关于这个问题的讨论。然而海洋学意义的海流一般是在次中尺度以上^[46],比如近海海域的次中尺度海流,罗斯贝数接近于 1;波浪发生的特征尺度一般在百米以下,时间尺度在 10 s 之内(表 1),运动速度一般大于海流流速,罗斯贝数远远大于 1;一般成像雷达,比如 SAR 的散射强度图像的分辨率在 10 m 至 100 m 范围,回波信号多普勒参

数的分辨率依赖于多普勒中心估计选择的尺度。在研究海流对海面的变形作用及运动影响过程中,必然要顾及微波雷达图像的分辨率,因为成像的分辨率决定了图像上反映的海流作用于海浪的尺度。因此,研究海流电磁散射和反演,首先需要从图像分辨率尺度出发,利用何宜军^[5]提出的海流调制机制求解海流作用的电磁影响和运动影响,研究不同分辨率的海流计算结果对动态海面的电磁散射影响,尤其是对多普勒谱的影响。这方面的工作还没有开展,海流分辨率对多普勒谱的影响效果,目前还不清楚,因此也是亟待解决的问题之一。

4 结论与展望

海流电磁散射涉及的问题可简要地总结为以参数化的海洋表面波数谱方程和海洋 N-S 方程为基础,构建海表面边界条件,并采用近似计算方法求解电磁场的 Maxwell 方程。目前,海流反演方面的相关研究发展很快,而海流作用下运动海面电磁散射方面的研究相对较少,是需要补充的一个重要方面。海流反演工作关注的重点是卫星信号分析,而海流电磁散射则注重理论分析和仿真,如果能将两者结合起来,将会为海流反演工作提供坚实的理论基础,同时也有利于海流反演方法的推广使用。因此,今后这方面的工作将大力开展。

另一方面,海表面本身就是海洋和大气相互作用的介质层面,海流反演需要综合考虑海洋、大气、波浪三者之间的相互作用过程。因此在研究中,结合目前国际上发展起来的海-气-浪耦合模式构建更具有海洋学意义的电磁散射界面,将会使海表存在着的流场、风场和波浪场对微波的后向散射作用得以综合体现,大大简化和深化海面的电磁散射理论研究。因此可以预期,后续开展这方面的工作会得到许多有益的成果。

综上所述,下一步的工作将围绕高分辨率海流反演的电磁散射机制问题、卫星信号仿真问题以及采用海-气-浪耦合模式研究电磁海面构建问题,展开实测研究、理论分析研究和数值模拟仿真研究等相关工作,进一步完善海流反演的方法论体系。

参考文献:

[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 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.

[2] 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.

[3] 乔远英.基于遥感 TM 影像纹理特征的长江河口流态信息分析[D].上海:华东师范大学,2014.
QIAO Y Y. Information Retrieval of the Flow Field in the Changjiang Estuary Based on the Texture Features in the TM Remote Sensing Images[D]. Shanghai: East China Normal University, 2014.

[4] 王涛,李家春.波流相互作用研究进展[J].力学进展,1999,29(3):331-343.
WANG T, LI J C. On wave-current interaction[J]. Advances in Mechanics, 1999, 29(3): 331-343.

[5] 何宜军.成像雷达海浪成像机制[J].中国科学: D 辑, 2000, 30(5): 554-560.
HE Y J. Ocean wave imaging mechanism by imaging radar[J]. Science in China: Series D, 2000, 30(5): 554-560.

[6] 郭立新,王运华,吴振森.双尺度动态分形粗糙海面的电磁散射及多普勒谱研究[J].物理学报,2005,54(1):96-101.
GUO L X, WANG Y H, WU Z S. Study on the electromagnetic scattering and Doppler spectra from two-scale time-varying fractal rough sea surface[J]. Acta Physica Sinica, 2005, 54(1): 96-101.

[7] KUDRYAVTSEV V, AKIMOV D, JOHANNESSEN J, et al. On radar imaging of current features: 1. Model and comparison with observations[J]. Journal of Geophysical Research, 2005, 110(C7): C07016. DOI: 10.1029/2004JC002505.

[8] XIE T, ZHAO S Z, PERRIE W, et al. Electromagnetic backscattering from one-dimensional drifting fractal sea surface I: Wave-current coupled model[J]. Chinese Physics B, 2016, 25(6): 064101.

[9] XIE T, PERRIE W, ZHAO S Z, et al. Electromagnetic backscattering from one-dimensional drifting fractal sea surface II: Electromagnetic backscattering model[J]. Chinese Physics B, 2016, 25(7): 074102.

[10] 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). DOI: 10.1029/2008GL035709.

[11] 陈琨.动态海面及其上目标复合电磁散射与多普勒谱研究[D].西安:西安电子科技大学,2012.
CHEN H. A Study of Electromagnetic Composite Scattering and Doppler Spectra of a Target at Time-evolving Sea Surface[D]. Xi'an: Xidian University, 2012.

- [12] 赵言伟.海面目标合成孔径雷达成像模拟研究[D].西安:西安电子科技大学,2011.
ZHAO Y W. Research on Synthetic Aperture Radar imaging Simulation from the Maritime Scene[D]. Xi'an; Xidian University, 2011.
- [13] 王运华.海面及其与上方简单目标的复合电磁散射研究[D].西安:西安电子科技大学,2006.
WANG Y H. Study on the Composite Electromagnetic Scattering from a Model of Oceanic Surface with a Simple Target above It[D]. Xi'an; Xidian University, 2006.
- [14] 郭丁.基于海面场景的 SAR 成像模拟及电磁散射特性研究[D].成都:电子科技大学,2011.
GUO D. SAR Imaging Simulations Based on the Ocean Scenes and the Electromagnetic Scattering Study[D]. Chengdu; University of Electronic Science and Technology of China, 2011.
- [15] 何宜军,丘仲锋,张彪,等.海浪观测技术[M].北京:科学出版社,2015.
HE Y J, QIU Z F, ZHANG B, et al. Ocean Wave Observation Technology[M]. Beijing; Science Press, 2015.
- [16] 陈卓.动态海面电磁后向散射仿真与雷达海杂波数据统计分析[D].西安:西安电子科技大学,2014.
CHEN Z. Simulation of Dynamic Sea Surface Electromagnetic Backscattering and Statistical Analysis of Sea Clutter Experimental Data[D]. Xi'an; Xidian University, 2014.
- [17] HASSELMANN K, RANEY R K, PLANT W J, et al. Theory of synthetic aperture radar ocean imaging: A MARSEN View[J]. Journal of Geophysical Research, 1985, 90(C3): 4659-4686.
- [18] 聂丁.动态海面电磁散射与多普勒谱研究[D].西安:西安电子科技大学,2012.
NIE D. Study on the Electromagnetic Scattering and Doppler Spectra from Dynamic Sea Surfaces[D]. Xi'an; Xidian University, 2012.
- [19] 张琳.海杂波多普勒谱分析与建模方法研究[D].西安:西安电子科技大学,2014.
ZHANG L. Analysis and Modeling Methods of Doppler Spectrum of Sea Clutter[D]. Xi'an; Xidian University, 2014.
- [20] CHAPRON B, COLLARD F, KERBAOL V. Satellite synthetic aperture radar sea surface Doppler measurements [C]//Proceedings of the 2nd Workshop on Coastal and Marine Applications of Synthetic Aperture Radar. Paris: ESA, 2003: 133-141.
- [21] CHAPRON B, COLLARD F, ARDHUIN F. Direct measurements of ocean surface velocity from space: Interpretation and validation[J]. Journal of Geophysical Research, 110 (C7): C07008. DOI: 10. 1029/2004JC002809.
- [22] MADSEN S N. Estimating the Doppler centroid of SAR data[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1989, 25(2): 134-140.
- [23] 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.
WANG S Q. Research on the Doppler Centroid Real-time Estimation Technology of Space-borne SAR[D]. Beijing; Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2005.
- [24] 刘利国,周荫清.星载 SAR 等效斜视波数域算法的实现方法[J].现代雷达,2004,26(11):34-37.
LIU L G, ZHOU Y Q. An implementation method of equivalent-squint wavenumber domain algorithm for spaceborne SAR[J]. Modern Radar, 2004, 26(11): 34-37.
- [25] WONG F, CUMMING I G. A combined SAR Doppler centroid estimation scheme based upon signal phase [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1996, 34(3): 696-707.
- [26] 崔利民. X 波段雷达海浪与海流遥感机理及信息提取方法研究[D].青岛:中国科学院海洋研究所,2010.
CUI L M. Study on Remote Sensing Mechanism and Retrieval Method of Ocean Wave and Current with X Band Radar[D]. Qingdao: The Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [27] GOLDSTEIN R M, ZEBKER H A. Interferometric radar measurement of ocean surface currents[J]. Nature, 1987, 328(6132): 707-709.
- [28] 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.
- [29] 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 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.
- [30] KIM J E, KIM D J, MOON W M. Enhancement of Doppler centroid for ocean surface current retrieval from ERS-1/2 Raw SAR[C]//Proceedings of the 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Anchorage, AK: IEEE, 2004, 5: 3118-3120.
- [31] KANG K M, KIM D J. Estimation of ocean surface velocity in tropical cyclones using RADARSAT-1 ScanSAR raw data[C]//Proceedings of the 3rd International Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar. Seoul: IEEE, 2011.
- [32] MARGHANY M, HASHIM M. Robust model for sea surface current simulation from radarsat-1 SAT data [J]. Journal of Convergence Information Technology,

- 2008,3(2):45-49.
- [33] MARGHANY M, HASHIM M. Doppler algorithm for modeling sea surface current from RADARSAT-1 SAR images[J]. International Journal of Computer Science and Network Security, 2008, 8(5):17-22.
- [34] 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, 2010, 115(C10). DOI:10.1029/2009JC006050.
- [35] 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.
- [36] 王利花. 长江河口及邻近海域表层水体关键动力参数的遥感反演研究及应用[D]. 上海: 华东师范大学, 2014.
WANG L H. Remote Sensing Retrieval Study and Application of the Surface Key Kinetic Parameters in the Yangtze Estuary and Its Adjacent Waters[D]. Shanghai: East China Normal University, 2014.
- [37] 管长龙. 我国海浪理论及预报研究的回顾与展望[J]. 青岛海洋大学学报, 2000, 30(4):549-556.
GUAN C L. A review of history and prospect for study of sea wave theory and its forecast in China[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 2000, 30(4):549-556.
- [38] 丁慧芬. 动态海面及其与上方目标电磁散射杂波的特性分析[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
DING H F. Analysis of Characteristics of Electromagnetic Scattering Sea Clutter from Target above Time-varying Sea Surface [D]. Xi'an: Xidian University, 2012.
- [39] 齐聪慧. 动态海面及其上方目标的电磁散射建模与回波特性分析[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
QI C H. Characteristics Analyses and Electromagnetic Modeling of Scattering from Time-Evolving Sea Surface and Target[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.
- [40] THOMPSON D R, GOTWOLS B L, KELLER W C. A comparison of Ku-band Doppler measurements at 20° incidence with predictions from a time-dependent scattering model [J]. Journal of Geophysical Research, 1991, 96(C3):4947-4955.
- [41] 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 Q L. System Design and Simulation of Doppler Scatterometer [D]. Beijing: Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [42] 姜文正, 袁业立, 王运华, 等. 海面微波散射场多普勒谱特性研究[J]. 物理学报, 2012, 61(12):124213.
JIANG W Z, YUAN Y L, WANG Y H, et al. Investigation on Doppler spectra of microwave scattering from sea surface [J]. Acta Physics Sinica, 2012, 61(12):124213.
- [43] 刘磊, 王小青, 于祥祯, 等. 海面受限波和自由波的多波段雷达多普勒谱模型[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(12):2959-2965.
LIU L, WANG X Q, YU X Z, et al. Doppler spectra from bound and free gravity-capillary wave under different radar frequencies [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(12):2959-2965.
- [44] 王佳宁, 许小剑. 一种小擦地角下空时相关的海杂波仿真模型[J]. 制导与引信, 2014, 35(4):7-13.
WANG J N, XU X J. A model for spatially and temporally correlated low grazing angle sea clutter simulation [J]. Guidance & Fuze, 2014, 35(4):7-13.
- [45] 刘保昌. SAR解多普勒模糊与双基 SAR成像算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
LIU B C. Doppler Ambiguity Resolving for SAR and Processing Algorithms for Bistatic SAR [D]. Xi'an: Xidian University, 2010.
- [46] 秦曾灏. 海洋运动的尺度分析[J]. 地球物理学报, 1984, 27(1):16-30.
QIN Z H. Scale analysis of oceanic motion systems [J]. Acta Geophysica Sinica, 1984, 27(1):16-30.

(责任编辑: 陆 雁)