

星载合成孔径雷达遥感海洋风场波浪场

李晓峰^{*①} 张彪^② 杨晓峰^③

^①(中国科学院海洋研究所 青岛 266071)

^②(南京信息工程大学 南京 210044)

^③(中国科学院空天信息创新研究院 北京 100101)

摘要: 星载合成孔径雷达(SAR)能够全天时、全天候、高空间分辨率、宽刈幅观测海洋表面,是获取海面风场和波浪场信息的重要微波传感器。该文综述了多极化SAR海面风场遥感原理、地球物理模式函数,以及潜在应用(海气边界层现象、海上风能资源开发、台风监测与预警预报),系统总结了传统星载SAR、新型干涉和极化SAR海浪遥感方法和技术。随着雷达卫星编队飞行技术的逐步成熟,未来海洋卫星组网将成为全球海洋和极地观测新趋势,合成孔径雷达海面风场和波浪场定量遥感将从科学研究向业务化海洋动力环境监测发展。

关键词: 合成孔径雷达; 海面风场; 海浪

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2020)03-0425-19

DOI: 10.12000/JR20079

引用格式: 李晓峰, 张彪, 杨晓峰. 星载合成孔径雷达遥感海洋风场波浪场[J]. 雷达学报, 2020, 9(3): 425–443. doi: 10.12000/JR20079.

Reference format: LI Xiaofeng, ZHANG Biao, and YANG Xiaofeng. Remote sensing of sea surface wind and wave from spaceborne synthetic aperture radar[J]. *Journal of Radars*, 2020, 9(3): 425–443. doi: 10.12000/JR20079.

Remote Sensing of Sea Surface Wind and Wave from Spaceborne Synthetic Aperture Radar

LI Xiaofeng^{*①} ZHANG Biao^② YANG Xiaofeng^③

^①(*Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China*)

^②(*Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China*)

^③(*Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*)

Abstract: Spaceborne Synthetic Aperture Radar (SAR) can observe the ocean surface with high spatial resolution and wide swath under all-weather conditions, day and night. Thus, it is a crucial microwave sensor for obtaining information on sea surface wind and wave fields. This paper reviews various geophysical model functions for wind and wave retrieval and SAR applications in studies of marine atmospheric boundary layer phenomena, offshore wind energy resource development, typhoon monitoring/forecast. The use of traditional SAR and new types of interferometric and polarized SAR data in ocean research are discussed. With the advance of radar satellite technology, the constellation of SAR satellites has become a new trend in the global ocean observations. Many SAR research algorithms have become mature enough to be implemented operationally to provide sea surface wind and wave fields to the scientific communities for ocean dynamic environment monitoring.

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR); Sea surface wind; Wave

收稿日期: 2020-06-10; 改回日期: 2020-06-20

*通信作者: 李晓峰 lixf@qdio.ac.cn *Corresponding Author: LI Xiaofeng, lixf@qdio.ac.cn

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC1401001), 国家自然科学基金(41622604, 41776183), 中国科学院(Y9KY04101L), 山东省重点研发计划(重大创新工程)(2019JZZY010102)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (2016YFC1401001), The National Natural Science Foundation of China (41622604, 41776183), The CAS Program (Y9KY04101L), The Key R & D Project of Shandong Province (2019JZZY010102)

责任编辑: 严卫 Corresponding Editor: YAN Wei

1 引言

1978年,美国国家航空航天局(NASA)发射了SEASAT卫星,这是第1颗以海洋为探测目标的民用海洋观测卫星,其搭载了高度计、辐射计、散射计、合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)共4型微波遥感器^[1]。由于系统故障,SEASAT只工作了不到3个月,但是SEASAT SAR搜集了大量图像,使人们清晰地看到海洋洋流、内波、涡旋、海冰等^[2,3]。90年代以来,加拿大的RADARSAT-1/2/Constellations,欧洲航天局的ERS-1/2, Envisat, Sentinel-1系列,德国DLR的TerraSAR-X系列卫星,日本的ALOS系列、中国的高分系列卫星所携带的SAR传感器在沿海和海洋提供了大量的SAR图像。基于这些海洋SAR数据,海洋遥感界进行了大量工作来反演SAR图像中的大气和海洋状况。基础研究包括沿岸流、海洋锋面,大气边界层现象、海洋内波等等^[4-6]。SAR海洋学取得了长足的进步,有些算法已经成熟并可以应用到业务化产品当中去,其中技术最成熟的两个算法是海面风场反演^[7]和海浪信息提取^[8]。

在中低风速条件下,风场反演是基于同极化(VV或者HH)海面归一化雷达横截面(Normalized Radar Cross Section, NRCS)的地球物理模式函数模型,此类模型是风速、风向以及SAR视线方向和入射角的函数。在高速风速条件下(>25 m/s),同极化海面后向散射信号趋于饱和,基于交叉极化(HV或者VH)海面后向散射信号的海面风场反演成为发展方向。

早期海浪信息的提取是基于经典的海浪方向谱与雷达图像谱非线性积分映射模型。利用SAR图像获取海浪方向谱,然后计算有效波高、主波波长、主波波向和周期等特征参数。然而,传统星载SAR海浪谱反演方法存在一定的局限性:(1)海浪谱反演结果依赖于海浪数值模式提供的先验波谱信息;(2)海浪方向谱与雷达图像谱非线性积分映射模型中涉及的水动力调制传递函数计算并不准确;(3)无法有效解决反演的海浪谱中固有的180°方向

模糊问题。随着新型雷达卫星干涉和极化成像模式的出现,双天线SAR测量的干涉相位和全极化SAR测量的目标散射矩阵信息,逐渐应用于发展海浪遥感新理论和新方法,有望解决传统星载合成孔径雷达海浪遥感面临的瓶颈问题。

本文系统地总结了SAR在海面风场、波浪场研究中的成果。第2部分论述了海面风场反演的基本原理、典型大气现象的图像特征以及风场反演信息的误差。第3部分总结了传统合成孔径雷达海浪遥感方法以及存在的问题,详细介绍新型干涉与极化合成孔径雷达海浪遥感研究进展,并指出了其潜在优势和未来发展方向。结语在第4部分。

2 SAR海面风场反演及其应用

2.1 基本原理

在微波波段,海面微波后向散射信号的强度与海面风场的强度存在明显正相关关系。在无风或极低风速条件下,海面可以视为准镜面,SAR作为侧视雷达接收到的海面回波信号非常小;随着风速的增加,海面粗糙度变大,海面回波信号也逐渐增强,如图1所示。后向散射信号在雷达入射方向与风向平行时达到最大值,并且风吹向雷达时的回波信号强度稍强于风背离雷达方向的强度。海面雷达回波信号随着风速和风向存在规律变化,是海面风场定量遥感的理论基础。

上世纪60年代美国学者就发现了在20°~60°入射角范围内,雷达海面后向散射信号主要来自于与雷达波长接近的海面波的Bragg散射作用^[9]。Bragg散射的产生需要入射电磁波 λ 和海面波的波长 L 满足关系

$$L = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta}, \quad n = 1, 2, \dots \quad (1)$$

当海面各反射点反射的回波信号距离差 ΔR 满足($\Delta R = n\lambda/2$)时,回波相位相差为 2π 的整数倍,各回波信号同相相加,产生共振加强效应。例如,对于X波段电磁波其对应Bragg波范围为1.9~4.3 cm, C波段对应的Bragg波长在3.7~8.2 cm之间,而L波段对应的Bragg波长则为33.6~48.4 cm。

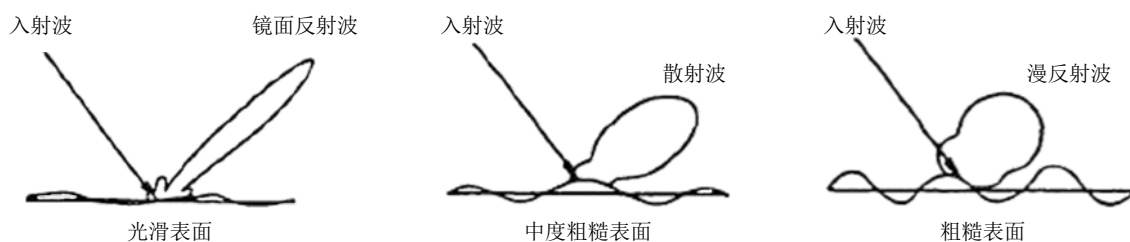


图1 雷达波在光滑表面、中度粗糙表面和粗糙表面的微波散射和反射分布

Fig. 1 Radar scattering from surfaces with different roughnesses

产生Bragg共振的海面波较小但其回波信号却没有被更大的海面波信号所淹没是因为：空间上随机分布的海面长波产生的雷达回波平均功率正比于观测范围内的有效散射点数，但是Bragg共振条件下的雷达回波平均功率正比于散射数的平方。因此共振效应会形成一个显著的雷达回波信号，同时也对应着海面特定波长的表面波谱。

需要特别注意的是海面短波主要是由海面风产生的，并随着风速的改变而快速变化。因此，不同的雷达频段对风速变化的敏感性是不同的，更高频段(更短波长)的雷达接收到的海面回波信号会更快的随风速的变化而改变，对风场更敏感。因此，业务化的气象海洋卫星通常使用频率更高的Ku或者C波段进行海面风场遥感。

2.2 反演方法

为了从雷达后向散射信号定量反演海面风场，必须建立海面风场与雷达后向散射之间的正向模型。但是，由于目前描述海面起伏拓扑关系的理论分析模型还不够完善，表面长波与短波间的相互作用机理还不完全明了，海面波浪破碎、泡沫、油膜覆盖等现象各自对毛细重力波波谱密度的贡献机理尚不清楚，此外雷达电磁波与复杂粗糙海面的相互作用也难以准确建模，导致基于物理机理的海面风场微波遥感模型精度明显低于基于统计的经验模型^[10-15]。因此，当前业务化的海面风场雷达遥感反演均使用基于统计的经验模型^[16]。

2.2.1 地球物理模式函数

描述雷达后向散射信号与海面风场之间定量关系的经验模型在风场遥感中被称为“地球物理模式函数(Geophysical Model Function, GMF)”。好的模式函数必须满足以下条件：

- (1) 可通过星载雷达系统观测值计算对应的海面风速和风向；
- (2) 模式函数可表格化或具备函数形式；
- (3) 不依赖于业务运行中难以实时获得的气象海洋附加数据。

各种非天底观测雷达系统其风场反演地球物理模式函数的基本表达式都是相似(示例见图2)。式(2)为一个通用的地球物理模式函数

$$\sigma^0 = B_0[1 + B_1 \cos(\phi) + B_2 \cos(2\phi)]^z \quad (2)$$

其中， ϕ 为风向与雷达入射方向的夹角，系数 B_0 、 B_1 和 B_2 由风速、雷达波入射角、极化方式和频率决定，指数 z 随不同模式函数调整。

地球物理模式函数最初是被设计用于微波散射计的风场反演，并且经过了长期的业务化优化。因

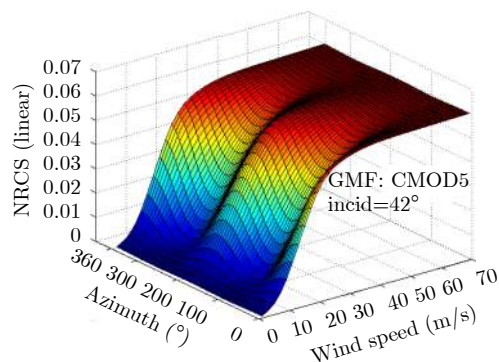


图2 在42°雷达入射角条件下，CMOD5地球物理模式函数描述的雷达后向散射系数NRCS与风速和相对风向之间的函数关系

Fig. 2 CMOD5 GMF at 42° incident angle. CMOD5 is a GMF which described the relationship of NRCS, wind speed and rela-tive wind direction

为散射计和SAR获取的海面后向散射信号特征相似，因此当SAR具有与散射计系统相同的雷达波频率、极化方式和入射角分布范围时，散射计的模式函数也可用于SAR风场反演^[17-19]。

合成孔径雷达海面风速反演通常基于由垂直极化卫星散射计观测建立的地球物理模式函数。随着合成孔径雷达长时间序列观测数据的积累，陆和张等人^[20]利用大量RADARSAT-2和Sentinel-1A垂直极化雷达图像和时空匹配的浮标风速观测，建立了垂直极化合成孔径雷达海面风速地球物理模式函数C_SARMOD2，并将该模式函数与各种散射计海面风场模式函数的反演结果与浮标观测进行了统计验证和比较，发现C_SARMOD2反演风速均方根误差最小，其值为1.84 m/s。对于传统合成孔径雷达海面风速反演，由于没有相应的地球物理模式函数，只能将各种极化比模型与散射计模式函数相结合，然而无论是经验还是理论极化比模型并不准确，在将水平极化后向散射转化为垂直极化后向散射过程中存在潜在的误差，从而影响海面风速的反演精度。为解决这个问题，张等人^[21]利用海量Envisat ASAR图像和时空匹配的ASACT风速和风向，首次建立了水平极化合成孔径雷达海面风速地球物理模式函数CMODH，利用该模式函数可以由水平极化合成孔径雷达图像直接反演海面风速，无需极化比模型转化雷达后向散射。通过与浮标观测的风速以及利用各种极化比模型反演的结果相比较，发现CMODH反演的风速精度较高，其均方根误差为1.66 m/s^[22]。

需要特别指出的是，每种经验模式函数只适用于单一雷达频段、单一极化方式和一定的雷达入射角范围。因此，针对不同的SAR载荷参数设置，在使用其观测数据进行风场反演时，需要选择或建立

不同的模式函数, 或者使用极化比模型将同一频段但是不同极化的SAR数据先转换为原有模式函数适用的极化方式^[23-27]。随着SAR卫星的增加, SAR海洋观测数据的积累, 目前在SAR海面风场反演中, 已经越来越多的使用针对SAR研发的地球物理模式函数(详见表1)。这些SAR专用模式函数的统计训练样本中, 相较于微波散射计的模式函数, 包含了更多的近岸观测, 在空间分辨率、雷达频率和入射角范围等方面更针对SAR载荷, 风场反演精度更高。

表 1 专用于SAR风场反演的地球物理模式函数汇总表

Tab. 1 GMFs developed for SAR wind retrieval

波段	极化	名称	参考文献
C波段	VV	C-SARMOD	Mouche等人 ^[28] , 2015
	VV	C-SARMOD2	Lu等人 ^[20] , 2018
	HH	CMODH	Zhang等人 ^[21] , 2019
X波段	VV	XMOD	Ren等人 ^[29] , 2012
	VV	XMOD2	Li等人 ^[30] , 2014
	HH	XMOD2+XPR	Shao等人 ^[26] , 2016
L波段	HH	LMOD-PALSAR	Isoguchi等人 ^[31] , 2009
	VV和HH	LMOD-SMAP	Zhou等人 ^[32] , 2017

交叉极化观测是极化合成孔径雷达独特的优势, 而过去和目前在轨的星载微波散射计卫星均没有交叉极化观测能力。2011年, Vachon和Wolfe, 张彪等人^[33]利用RADARSAT-2卫星观测, 首次发现C波段交叉极化海面后向散射信号对风向和雷达入射角不敏感, 只是风速的线性函数, 可直接用于风速反演^[34]。随后, 张彪等人^[35]同样基于RADARSAT-2卫星观测, 发现交叉极化雷达回波信号在高风速条件下不易饱和, 提出了适用于高风速反演的C-2PO模式函数; 张国胜等人^[36]通过考虑交叉极化波段非Bragg散射的贡献, 发现C波段交叉极化SAR海面回波信号存在对入射角的依赖性, 利用RADARSAT-2卫星和美国国家大气海洋局飓风飞机观测数据, 提出了改进的C-3PO模式函数。交叉极化SAR观测的引入, 显著地提高了C波段SAR反演风场在高风速条件下的精度^[37-43]。

2.2.2 风向提取

SAR是固定观测角度的侧视雷达, 每次卫星过境只能获取单一角度的海面观测。虽然, 已知风速、风向和观测几何, 可以通过地球物理模式函数准确的计算确定频段和极化的雷达海面后向散射强度, 但是, 只有单一雷达后向散射观测, 无法同时反演风速和风向。风向信息的获取成为SAR海面风场反演的难题。早在上世纪80年代, 基于美国

SEASAT卫星获取的L波段SAR图像, Gerling等人^[44]就发现了SAR图像上的公里尺度的条纹特征是由风场产生的, 通过将SAR图像进行傅里叶变化, 可以从图像频率谱中估计风向。但是该方法得到的风向存在180°风向模糊, 即, 无法区分顺风和逆风方向。随后, 该方法得到了学者们的进一步完善和改进, 提出了多种基于小波分析^[45-47]、局部梯度^[48-51]和图像非均匀性^[52,53]的风向提取算法。但是, 由于SAR成像的复杂性和海气环境的多变性, 并非所有的SAR图像都包含清晰的风条纹特征, 限制了此类方法的普适性和风向提取精度。张彪等人^[54]通过分析大量全极化合成孔径雷达图像和浮标观测数据发现同极化和交叉极化通道相关系数与海面风向呈奇对称, 该特征可以有效去除海面风向计算过程中存在的180°方向模糊问题, 获取海面风向唯一解。此外, 该研究建立了海面风速和风向协同反演模式, 并且获取了高空间分辨率(100 m)的海面风场, 能够反映海岸带区域海面风场在亚公里尺度变化的精细结构特征。统计验证结果表明, 基于该模式反演的海面风速均方根误差为1.39 m/s, 海面风向均方根误差为22.5°。对于高海况海面风向信息提取, 张彪等人^[55]利用垂直极化和水平极化雷达图像, 基于代价函数方法获取了包含风向模糊的台风海面风向, 然后采用参数化流入角模型消除了风向模糊。范和张彪等人^[56]建立了基于局地梯度的双极化合成孔径雷达台风海面风向反演方法, 结合台风风场结构特征获取了无模糊的风向, 并用浮标、卫星散射计、辐射计以及抛弃式探空仪观测风向验证了反演的海面风向, 其均方根误差为13.3°。

除了从SAR图像本身获取风向, 还可以通过外部辅助数据的方式, 获取风向信息。最常见的外部数据源包括: 海上浮标观测^[57]、散射计等其他卫星遥感产品^[58]和数值天气预报模式输出产品^[59,60]。考虑到外部数据获取的便利性、空间覆盖性和时间连续性等因素, 数值天气预报模式输出产品是最常用的风向数据来源。但是, 业务化模式的空间分辨率通常明显低于SAR, 因此, 在风场反演前需要对模式风向进行插值处理, 以保证每个反演的风单元都有对应的风向信息。

2.2.3 真实性检验

对SAR反演风场的真实性检验是其数据定量应用的前提^[61]。随着星载SAR的日益增多和SAR风场反演业务化系统的运行, 对SAR风场遥感产品的误差特性有了更准确的认识。表2给出了具有代表性的一些SAR风场遥感产品的误差统计结果。经过与海上固定浮标、数值模式再分析资料和微波散射计

表 2 SAR风速遥感误差统计结果汇总表
Tab. 2 SAR wind speed retrieval statistics

卫星	波段	极化	参考数据	反演误差*(m/s)	风速范围(m/s)	参考文献
RADARSAT-1	C	HH	浮标	1.76	<20	Monaldo等人 ^[62] , 2001
			QuikSCAT散射计	1.54	<20	Thompson等人 ^[63] , 2001
ENVISAT/ASAR	C	VV	浮标	1.41	<15	
			ASCAT散射计	1.77	<15	Yang等人 ^[64] , 2011
Sentinel-1	C	HH	NOGAPS数值模式	1.61	<15	
			ASCAT散射计	1.42	<20	Monaldo等人 ^[65] , 2016
			SMAP辐射计	2.59	<50	Mouche ^[66] , 2017
高分三号	C	VV	ASCAT散射计	2.04	<20	
			HY2A/SCAT散射计	1.93	<20	Ren等人 ^[67] , 2019
			ASCAT散射计	1.85	<20	
RADARSAT-2	C	VH	HY2A/SCAT	1.73	<20	
			QuikSCAT	3.63	<40	Zhang等人 ^[55] , 2014
TS-X/TD-X	X	HH	SFMR辐射计	2.81	<40	Zhang等人 ^[42] , 2017
			浮标	1.44	<20	Li等人 ^[30] , 2014
ALOS/PALSAR	L	HH	浮标	1.79	<15	Shao等人 ^[26] , 2016
			ASCAT散射计	1.87	<20	Isoguchi等人 ^[31] , 2009
			ASCAT散射计	1.85	<25	

*注：反演误差指均方根误差或标准偏差。

风场遥感产品的对比，可以发现，SAR遥感风场产品整体上与其他风场资料均有很好的 consistency，数据之间的均方根差异或标准偏差均小于2.0 m/s这一风场业务化精度要求。但是，不同卫星或者同一卫星不同极化数据得到的反演精度还存在差异，这与卫星载荷的数据质量、定标精度、模式函数和外部辅助数据的使用有关。整体上看，在中低风速条件下(<20 m/s)，SAR反演风场可以实现与其他遥感手段相近或相同的反演精度；而在高风速条件下，SAR反演风场仍然面临挑战。

2.3 SAR风场资料应用

2.3.1 海气边界层现象研究

海气边界层(Marine Atmospheric Boundary Layer, MABL)指的是在大气逆温层之下，海洋表面之上的大气层。虽然海气边界层仅存在于海洋表面之上1~2 km，但它决定着海气之间的能量、动量和物质的交换。海气边界层内存在着多种重要的物理现象，包括大气重力波、边界层风条纹、强降水、大气热/冷锋面、锢囚锋面、大气涡街等。由于此类现象的空间尺度对常规气象观测网而言太小，对单个观测站点来讲又太大，因此关于它们发生发展的动力学过程机制的研究在相当长的一段时间内进展缓慢。近年来，随着高分辨率卫星遥感技

术和中尺度数值预报模式的发展，该领域的研究有了快速突破。

海气边界层现象会改变海面风场的分布，对海洋表面毛细波和重力波波谱产生调制，影响到海面粗糙度，因而可被SAR图像记录。随着SAR卫星的不断发射，SAR观测到的MABL现象也不断增多。受益于SAR极高的空间分辨率和风场定量反演能力，为海气边界层现象生消机制的研究提供了新的观测资料，在大气重力波(atmospheric gravity waves)^[68-76]、大气涡街(vortex streets)^[77,78]、下坡风(katabatic winds)^[79,80]、布拉风(bora winds)^[81-86]、极地气旋(polar lows)^[87-91]、边界层涡旋(boundary layer rolls)^[92-97]、锢囚锋(occluded fronts)^[98]等现象的研究中，发挥了重要作用。图3给出了我国海南岛东部一次陆海风过程和渤海海域一次大风寒潮过程的SAR图像及其对应的风速反演结果，可以发现SAR的高分辨率和近岸观测能力对此类中小尺度的近岸过程研究具有显著的优势。通过SAR卫星遥感和数值模式的结合，还可弥补高分辨率遥感资料在重访周期上的不足，并且实现了与遥感数据同步的各类大气海洋环境参量信息的获取，可以更加全面的分析边界层物理过程的生消机制。此外，卫星遥感观测数据也是数值模式精度检验的重要手段，通

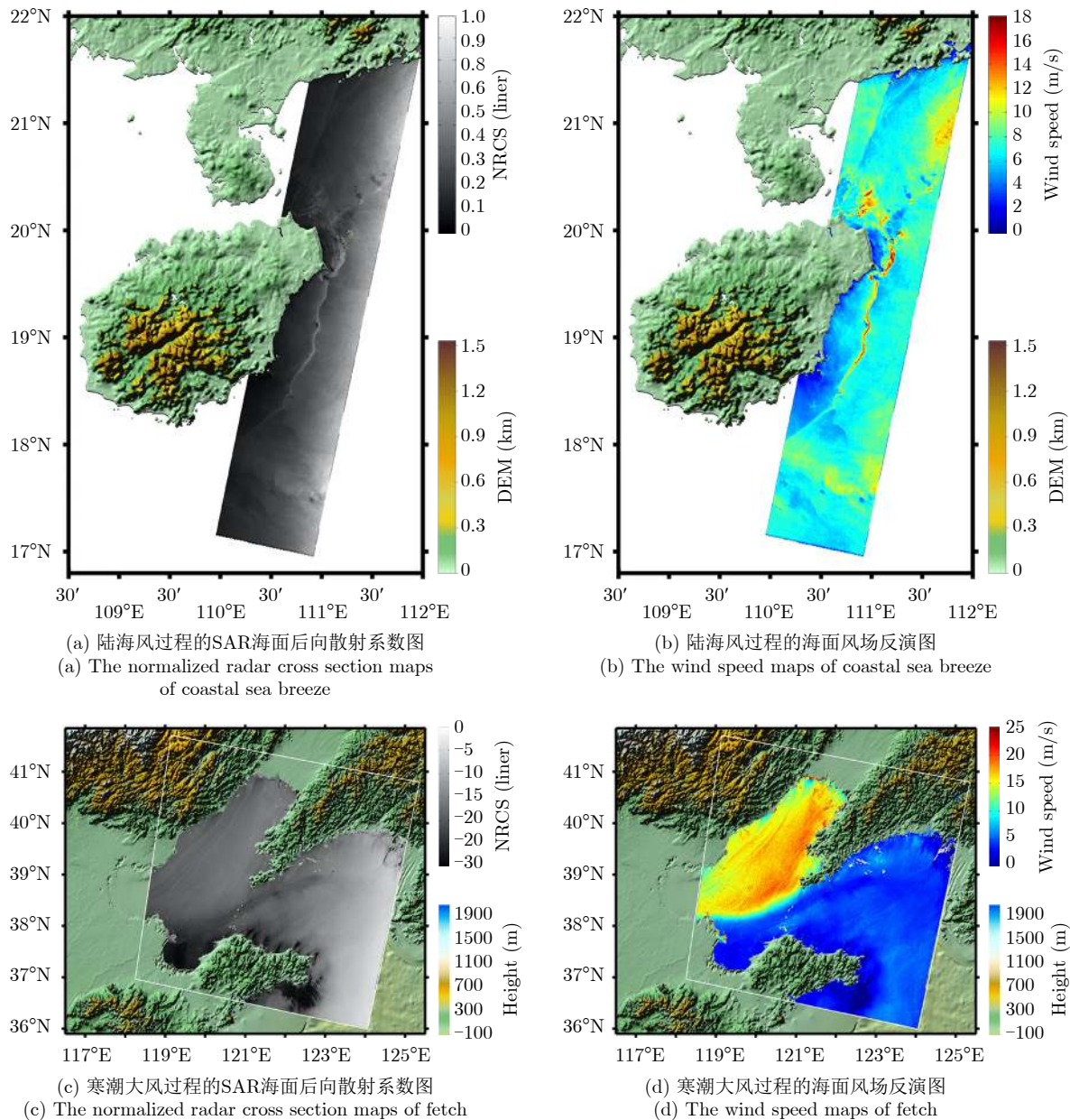


图 3 不同过程的SAR图像及其对应的风速反演结果

Fig. 3 SAR images of different processes and their corresponding wind speed

过对比模拟结果和遥感影像的差异,可以直观并定量的判断数值模式对特定天气现象的模拟能力,为模式资料同化方法和参数化方案的优化提供依据。

2.3.2 海上风能资源开发

SAR可以得到高分辨率的近岸风场资料,通过收集长时序SAR卫星观测资料,可以对近海风能资源进行定量评估。2000年前后,欧洲航天局率先资助了利用星载SAR卫星数据进行海上风能资源评估的研究项目(FP5-WEMSAR)。在该项目资助下,丹麦Risø国家实验室利用近岸测风塔观测数据验证了利用卫星遥感资料估算近海平均风速、风速Weibull分布参数和功率密度分布的可行性,并估算出了

计算上述参数所需的最小卫星遥感数据量^[99]。2004年,上述研究团队进一步研究了风速Weibull分布参数不同数学拟合方法导致的风功率密度分布结果的不确定性,提出了基于观测样本均值和偏斜度的最佳拟合方法,该方法在保证风功率密度估算精度的前提下,可大幅减少拟合所需的卫星观测数据量^[100]。2006年,基于前述研究成果,丹麦Risø国家实验室基于SAR数据,利用欧空局ESR-2和ENVISAT/ASAR载荷观测数据,计算得到了北海Horns Rev海上风电场海域的平均风速和功率密度分布,估算结果与测风塔实测数据取得很好的一致性,验证了利用卫星遥感数据进行海上风能评估

的能力。2010年，在中欧环境项目支持下，国家卫星气象中心和丹麦Risø国家实验室合作，利用148景C波段SAR数据，得到了江苏近海1 km分辨率的平均风速和风功率密度分布数据。2013年，美国国家海洋大气局环境卫星中心(NOAA/NESDIS)利用12年的1439景RADARSAT-1和11500余景ENVISAT/ASAR数据，得到了马里兰州近海区域的平均风速和风功率密度分布数据^[7]。2019年，丹麦Risø国家实验室和NOAA/NESDIS进一步合作基于卫星SAR风场资料完成了美国东部沿海区域的风能资源评估，并发现SAR风场资料比传统数值模式再分析资料对风能评估中的风速梯度和变化参数的估计更准确^[101]。

2.3.3 台风监测与预警预报

极端天气尤其是台风的遥感监测一直是SAR海洋学研究的热点和难点。上世纪70年代随着第1颗海洋卫星SEASAT的升空，研究人员就试图利用L波段的SAR观测提取飓风风速^[102]。随后，基于ERS系列卫星和Radarsat-1卫星观测，学界对典型热带气旋过程进行了观测试验，初步验证了SAR台风反演的可行性^[103,104]。然而，与数值模式和现场观测资料对比发现，SAR台风风场存在显著的低估。利用交叉极化SAR可以比同极化SAR获得更准确的中高风速反演结果，但是在风速 >35 m/s时，仍然存在较大误差^[66,68]。

台风是复杂的天气系统，其内部通常包含强降雨和剧烈的海气相互作用过程。由于其巨大的破坏性，台风条件下的有效气象海洋观测非常缺乏，不足以支撑经验统计模型的开发。此外，对台风及其生消过程的地球物理认识尚不清晰，也无法建立准确的机理模型对其三维形态和运动过程进行模拟，更加难以对其电磁散射特性进行定量描述^[105,106]。2016年，欧空局发起了名为ESA SHOC的台风观测计划，通过与WMO区域天气预报中心等组织的合作，利用5天内的台风中心位置预报数据，结合卫星轨道，制定台风SAR任务规划，并根据台风发展的情况对未来3天的观测计划进行更新，确保制定的观测计划能够准确覆盖台风中心。该计划的实施，极大提高了对台风中心区域的观测成功率和同一台风生命周期内的重复观测能力，为全球台风科研人员积累了非常宝贵的台风极化SAR观测资料，支撑了台风形态学和台风动力过程的相关研究^[107-111]。

由于SAR卫星观测的空间覆盖能力弱、重访周期长，目前尚未通过资料同化方式进入业务化的数值天气预报系统。但是，世界各主要气象海洋机构均开展了相关的预先研究，向预报员和预报产品用

户展示SAR风场资料在气象水文预报领域的应用潜力^[112]。在台风预报方面，通过将SAR海面风场反演数据输入变分同化系统，结合中尺度数值天气预报模式，选取典型台风过程进行了同化应用研究；已经在变分同化框架内引入了风场地球物理模式函数，实现了遥感资料筛选、变分偏差订正、变分质量控制等资料同化；建立了适于SAR遥感风场的变分同化流程，成功实现了高分辨率卫星遥感风场资料的同化，并在西北太平洋区域的试验中，取得了对台风路径和强度预报的初步效果^[113,114]。

3 SAR海浪遥感

3.1 传统SAR海浪遥感

传统单天线合成孔径雷达遥感海浪方向谱及特征参数主要有4种方法，分别是初猜谱方法、交叉谱方法、半参数化方法和经验方法。上世纪90年代初期，为了利用星载合成孔径雷达图像定量获取海浪方向谱信息，Hasselmann等人^[115]发展了海浪方向谱与雷达图像谱积分映射模型，由于该模型呈现高度非线性特征，无法直接求逆，需要输入海浪数值模式提供的初始猜测谱并进行迭代求解，因此称为初猜谱方法。该方法建立了海浪谱与图像谱之间的数学物理模型，但利用该模型反演的海浪方向谱结果依赖于初猜谱的准确性。此外，初猜谱方法反演的海浪方向谱存在 180° 方向模糊，无法知晓真实的海浪传播方向，因而需要先验波谱信息去除模糊解。为了解决这个问题，Engen等人^[116]提出了交叉谱方法，基于海浪谱与图像交叉谱映射模型，利用SAR图像交叉谱反演海浪方向谱。图像交叉谱不仅较大程度减小斑点噪声，而且保留了重要的谱形特性。更重要的是，交叉谱能够提供海浪传播方向的信息。欧洲地球资源卫星ERS上搭载了SAR和散射计，利用这两个载荷可以同步获取海面波浪和风场信息。针对这一特点，Mastenbroek等人^[117]构建了一种半参数化海浪谱反演方法，其优点在于不需要先验海况信息。该方法首先利用散射计风速构造包含波龄和主波传播方向的参数化风浪谱，使其结合非线性映射模型模拟的风浪图像谱与观测图像谱差别最小，得到最优风浪参数对应的风浪谱。其次，利用雷达图像谱与风浪图像谱做差，获取涌浪图像谱，再结合线性映射模型计算涌浪谱。最后，将最优风浪谱与涌浪谱相加即可得到反演的海浪方向谱。然而，该方法也存在局限性，即利用前向映射的风浪图像谱去逼近风浪和涌浪共存的观测图像谱并不十分合理。上述3种方法均基于图像谱与海浪谱非线性映射模型，利用SAR图像反演海浪方向

谱, 然后计算有效波高、主波波长、主波波向和周期等特征参数。Schulz-Stellenflehth等人^[118]发展了一种新的反演海浪特征参数的经验方法, 首先通过二次函数将海浪特征参数与ERS-2雷达后向散射系数、图像方差以及利用正交函数和图像方差谱计算的20个参数建立关联, 然后采用逐步回归方法拟合二次函数中的系数。该方法的优点是计算效率高, 不用反演海浪方向谱, 利用辐射定标后的ERS-2波模式图像直接计算海浪特征参数, 这种方法也被应用于Envisat ASAR海浪参数计算^[119]。

3.2 干涉SAR海浪遥感

双天线干涉合成孔径雷达是在平行或垂直于卫星飞行方向上以一定间距(基线)安置两幅天线的双天线SAR, 前者称为沿轨或顺轨干涉SAR, 后者称为交轨干涉SAR。相对于单天线合成孔径雷达, 双天线干涉SAR观测能够同时测量目标的振幅和相位信息。对于沿轨干涉SAR, 沿卫星飞行方向上前后两幅天线在较短的时间间隔内分别向海面同一目标区域发射电磁波, 接收到的信号经过匹配滤波, 分别产生两幅复图像, 经过干涉相干处理得到干涉SAR复图像, 其中干涉相位包含海浪轨道速度信息。对于交轨干涉SAR, 与卫星飞行方向垂直的两幅天线同时向海面相同目标点发射电磁波, 接收到海面回波信号具有一定的相干性, 经过干涉处理后的相位差与两幅天线至海面目标之间的路径差有关。由于目标点高程信息与路径差存在一定的几何关系, 因而可以将干涉相位转化为高程信息。双天线SAR海浪测量的优势体现在两个方面: (1)干涉复图像的相位正比于海浪轨道速度的径向分量, 其成像机制较传统单天线雷达更为直接; (2)真实孔径雷达调制传递函数对相位图像几乎没有影响, 因而双天线相位图像相对于单天线振幅图像更适合遥感海浪。

上世纪90年代初期, Marom等人^[120]发现机载沿轨干涉SAR图像呈现了清晰的海面波浪特征, 并率先利用相位图像获取了二维海浪方向谱, 其结果与现场浮标观测较为一致, 这一奠基性的重大科学发现从此开启了双天线雷达海浪遥感研究的序幕。对于传统单天线SAR, 当海浪沿着或接近于卫星飞行方向传播时, 速度聚束会引起高波数区域信息损失, 导致波长较短的海浪无法成像。Lyzenga等人^[121]通过理论研究发现双天线SAR能够拓展海浪波长的探测范围, 进一步掀起了干涉雷达海浪遥感的热潮。Shemer^[122]推导了单天线和双天线SAR单频海浪成像解析表达式, 可用于定量分析二者测量海浪的优势和局限性。为进一步研究沿轨干涉SAR

海浪成像机制, Bao等人^[123]建立了包含速度聚束调制和长波后向散射调制海浪成像模型, 并基于蒙特卡洛方法数值仿真了不同海况和雷达参数条件下的振幅图像谱和相位图像谱, 发现速度聚束会影响沿轨干涉SAR海浪成像。然而, 蒙特卡洛方法存在统计取样不确定性, 而且需要对每个样本逐要素计算相位图像, 因而计算量较大。为解决这个问题, Bao等人^[124]建立了沿轨干涉SAR海浪方向谱与相位谱非线性积分映射模型, 便于由输入的海浪方向谱前向仿真相位图像谱。在建立该模型之前, 需要确定相位图像表达式, 但在推导过程中遗漏了狄拉克 δ 函数项, 导致所建立的非线性积分映射模型丢失了海浪径向轨道速度的导数项。He等人^[125]在相位图像中加入了狄拉克函数项, 得到了较为完整的海浪谱与相位谱非线性积分映射模型。张彪等人^[126]全面综述了沿轨干涉SAR海浪遥感理论和关键技术, 指出了海浪测量存在的具体问题和下一步研究的方向。为了深入研究沿轨干涉合成孔径雷达海浪成像机制, 张彪等人^[127]数值模拟了不同距离速度比率、不同有效波高和波长比率对应的相位图像谱, 发现当速度聚束比率逐渐增大时, 速度聚束引起的海浪成像非线性逐渐增强, 导致相位谱发生变形; 当有效波高与波长比率逐渐增大时, 相位谱逐渐变窄且向距离轴旋转。此外, 上述研究还发现当两幅天线的间距即基线逐渐增大时, 相位谱逐渐变形, 产生这种现象的主要原因是两天线对海面同一目标区域观测的时间间隔大于海面相关时间, 从而导致接收的回波信号失去相关性。在上述研究的基础上, 张彪等人^[128]发展了沿轨干涉SAR参数化海浪方向谱反演方法, 利用机载C波段和X波段干涉相位图像获取了海浪方向谱, 并与同步浮标观测进行了定量比较和验证, 发现沿轨干涉合成孔径雷达不仅可以探测波长较长的涌浪, 而且可以探测波长较短的风浪。如图4, 其中, “A”表示方位向, “R”表示距离向。

对于交轨干涉合成孔径雷达海浪遥感, Schulz-Stellenflehth等人^[129]发展了交轨干涉SAR海浪成像模型, 计算了数字高程模型方差谱, 发现对低振幅的涌浪, 利用失真的数字高程模型计算的波高误差在10%以内, 且误差依赖于海浪传播方向和海面相关时间。此外, Schulz-Stellenflehth等人^[130]发现当海浪成像非线性较弱时, 利用交轨SAR海面数字高程模型计算的有效波高和海浪频谱与浮标测量较为一致, 然而计算的主波传播方向与浮标观测相差 30° 。张彪等人^[131]建立了包含海面高度和速度聚束的交轨干涉SAR涌浪干涉相位模型, 得到了涌浪成

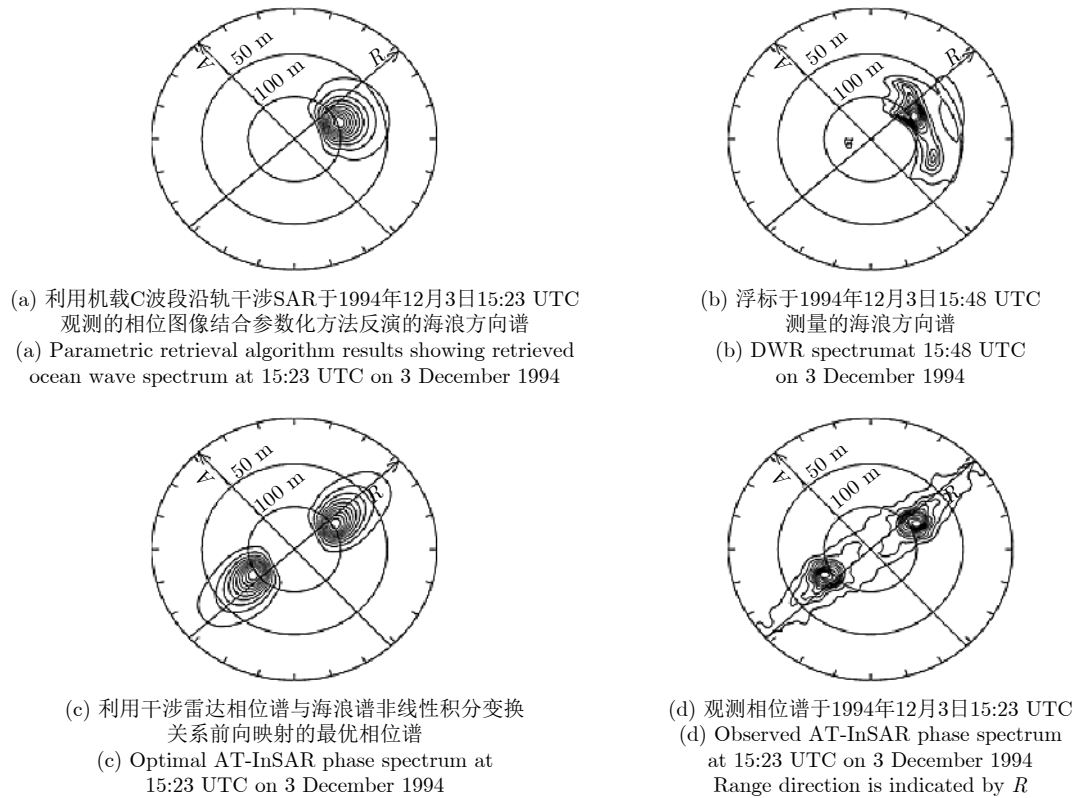


图4 文献[128]的海浪波谱反演方法

Fig. 4 Ocean wave spectrum retrieval algorithm of Ref. [128]

像的解析表达式，进一步研究了沿方位向传播的涌浪成像机制。此外，通过定义二次谐波振幅与基波振幅比率来表征海浪成像非线性，通过比较交轨和沿轨干涉SAR相位的2阶调和分量，分析了不同海况和干涉雷达参数条件下的数值模拟结果，发现当速度聚束较强时，交轨干涉SAR更适合测量海浪；当速度聚束较弱时，沿轨干涉SAR更适合测量海浪。此外，张彪^[132]利用多维高斯变量特征函数方法建立了交轨干涉SAR海浪方向谱与相位图像谱非线性积分映射模型，并指出长波径向轨道速度的1阶导数项不能忽略。

3.3 极化SAR海浪遥感

由于速度聚束的影响，传统单极化SAR不能较好地成像沿方位向传播的海浪。方位向图像强度调制的衰减使得利用垂直或水平极化SAR图像计算海浪方向谱并不准确。此外，当海浪沿方位向传播时，倾斜调制和水动力调制会明显衰减，导致反演的海浪谱与观测的海浪谱存在较大的差距。上世纪90年代中期，Schuler等人^[133]利用机载全极化SAR海浪图像发现了一种新的极化方向调制，相对于倾斜调制和水动力调制，极化方向调制在方位向最强，不仅能够提高雷达对方位向传播海浪的观测能力，还能够改进海浪谱反演的准确度，该项研究为极化

SAR海浪测量指出了光明的方向。为了进一步构建全极化SAR海浪测量的关键技术，Schuler等人^[134]发展了全极化SAR遥感海浪斜率和海浪谱的新方法，即利用海浪运动引起的极化方向角调制计算方位向斜率，使用极化分解理论计算的散射角参数计算距离向斜率。该方法的优点是不需要计算复杂的参数化倾斜、水动力和速度调制传递函数，可以由极化雷达数据直接测量海浪斜率，较大程度简化了海浪谱计算的过程，且反演的海浪谱与浮标观测结果较为一致。然而，该方法依然没有解决由于非线性聚束效应引起的方位向海浪测量不准确问题，仍需要采用Hasselmann等人^[115]提出的SAR基于后向散射强度的海浪测量方法辅助解决。He等人^[135]推导了线性极化SAR极化方向调制函数和倾斜调制传递函数，通过数值模拟研究了雷达和海浪参数对线性极化雷达图像谱的影响，提出了一种剔除海浪180°方向模糊的方法。在此基础上，He等人^[136]发展了一种利用全极化真实孔径雷达测量方位向和距离向海浪斜率的新方法，该方法利用两种线性极化图像信息将有关弱极化项剔除，不用计算水动力调制传递函数，利用机载全极化合成孔径雷达AIRSAR图像进行海浪反演，获得了与浮标一致的结果。张彪等人^[137]利用RADARSAT-2星载全极化SAR图像验

证了该方法,反演的有效波高、主波周期和波长等参数与浮标观测相吻合,如图5,其中,“Azimuth direction”表示方位向,“Radar illumination”表示雷达视向,“N”表示正北方向,“Azimuth wavenumber”表示方位向波数,“Range wavenumber”表示距离向波数。此外,在速度聚束模式情况下,何等人^[138]推导了双极化SAR图像谱与海浪方向谱的非线性变化关系,该关系有潜力应用于星载合成孔径雷达反演海浪谱及特征参数。此外,张彪等人^[139]发展了全极化SAR海浪和海面风场协同遥感方法,同步获取了海面风场和海浪谱信息,较大程度提高了极化SAR海洋动力环境定量遥感水平,如图6、图7,其中,图7中“N”表示正北方向,“flight”表示卫星飞行方向,“Azimuth wavenumber”表示方位向波数,“Range wavenumber”表示距离向波数。

4 结 语

合成孔径雷达海面风场反演已经在多国气象海洋部门实现了业务化运行。与微波散射计和微波辐射计等同样具备海面风场监测能力的微波遥感器相比,SAR风场反演精度已到达与之相近的水平,并且具有更高的空间分辨率和近岸海域观测能力。随着各国SAR卫星计划的陆续实施,以及SAR卫星组网和编队技术的发展,SAR海面风场资料的空间覆盖能力和连续观测能力也将进一步提升,有望实现对全球海域的动态连续观测。在SAR风场技术方面,也仍然存在一些需要攻克的前沿技术:(1)35 m/s以上的高风速反演仍然存在较大不确定性;(2)降雨等强对流天气对海面雷达后向散射信号干扰很大,能否实现降雨和风场的协同反演?(3)海面风场、浪场和流场是相互耦合的,但是当前SAR业务系统仍然将3个参量分别反演,应该建立海面风浪

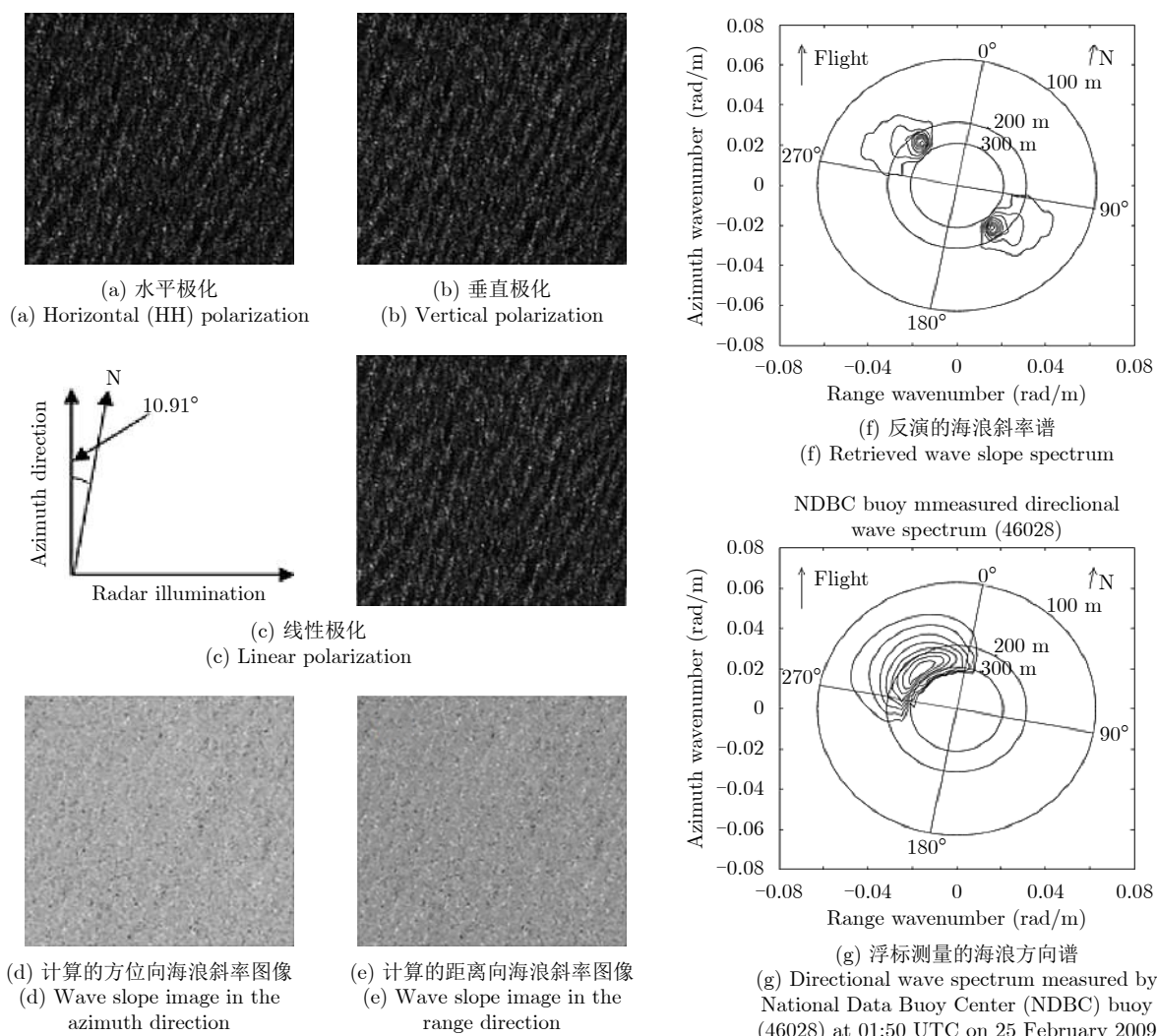


图 5 从RADARSAT-2卫星于2009年2月25日02:09 UTC 获取的SAR图像中截取的512×512像元子图像
Fig. 5 Corresponding 512 × 512 pixel size images of area northwest of Morro Bay, CA selected from SAR image acquired at 02:09 UTC on 25 February 2009

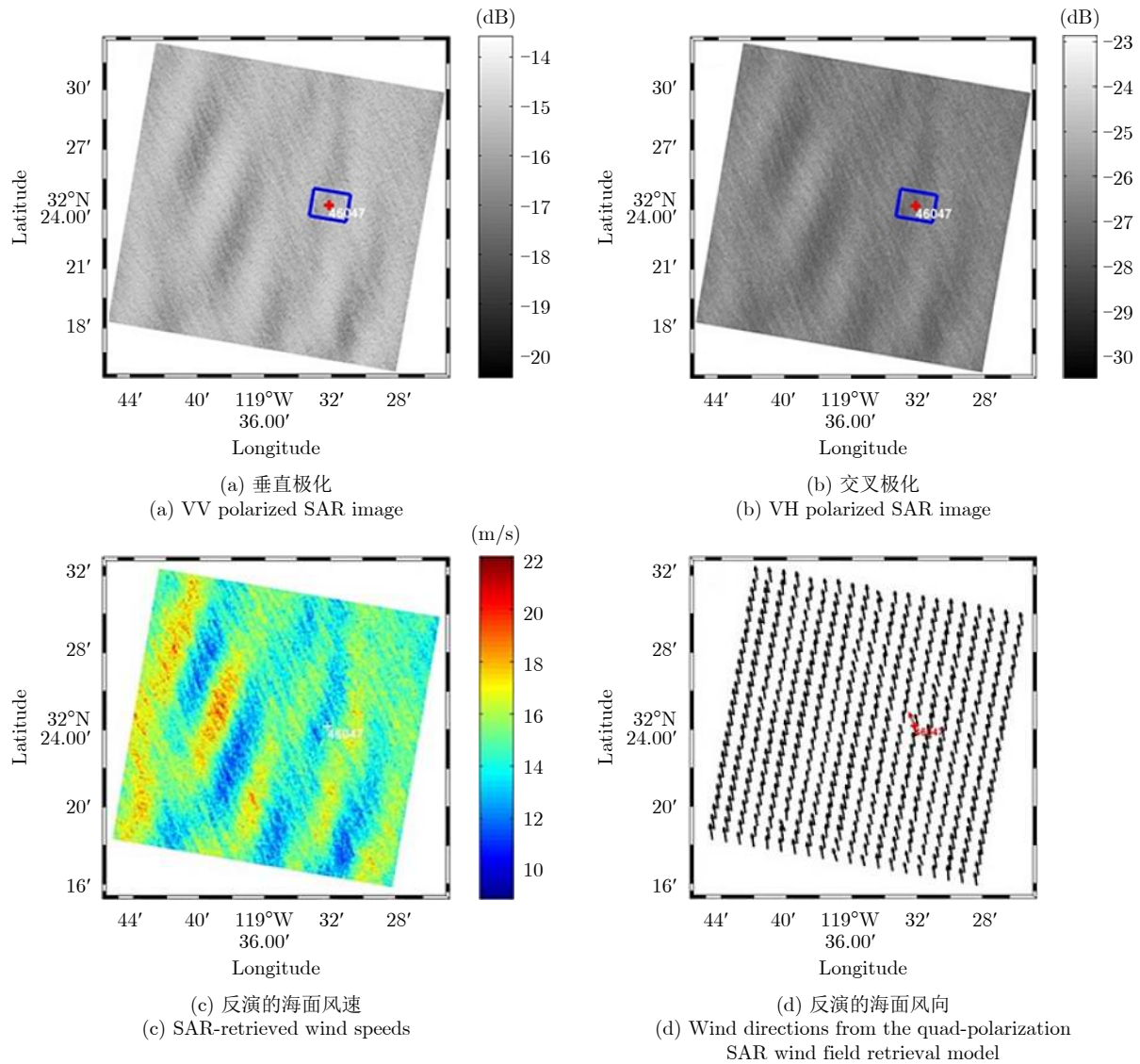


图 6 RADARSAT-2卫星于2012年5月24日13:53 UTC获取的SAR图像

Fig. 6 SAR images off the U.S. West Coast (Tanner Bank) from RADARSAT-2 fine quad-polarization SAR data acquired on 24 May 2012, at 13:53 UTC

流场的综合反演系统，实现对海面动力环境的最优监测；(4)SAR卫星技术发展迅速，极化干涉SAR、MIMOSAR、多频段SAR等新体制雷达卫星均已纳入多国的卫星发展规划，为海面动力参数反演提供了新的机遇和挑战。

国内外学者近20年在传统和新型星载SAR海浪遥感方面取得了一系列创新成果，建立了海浪遥感理论、方法和关键技术的系统研究体系。随着卫星技术的快速发展和日益增长的海洋动力环境监测需求，逐渐出现了以下亟需解决的关键科学和技术问题：(1)海岸带区域地形复杂，经常出现波浪的折射和绕射，海面风场在该区域亚公里尺度内会发生剧烈变化，如何获取该区域内波长较短的风浪信息以及波场的空间演变特征？(2)传统星载SAR海浪

遥感普遍关注中低海况下的海浪谱和特征参数信息提取。台风产生的巨浪对于沿海地区建筑物具有较大的破坏性，能否定量获取台风波浪场及空间分布特征？(3)传统SAR海浪成像受到“速度聚束”的影响，只能探测波长较长的涌浪，中法卫星波谱仪能够测量波长较短的风浪。能否同时利用SAR和波谱仪协同观测获取高分辨率海浪谱并拓展波长探测范围？(4)星载SAR海洋遥感的区域通常是开阔大洋和近岸区域，对于北极海冰和海水混合区域内的海浪研究较少，常规研究主要聚焦于提取主波波长和波向信息，缺乏边缘冰区(marginal ice zones)海浪有效波高的定量遥感研究；(5)传统星载SAR海浪遥感方法是基于海浪谱和图像谱非线性映射或交叉谱的物理驱动模型，随着全球海洋长时间序列数

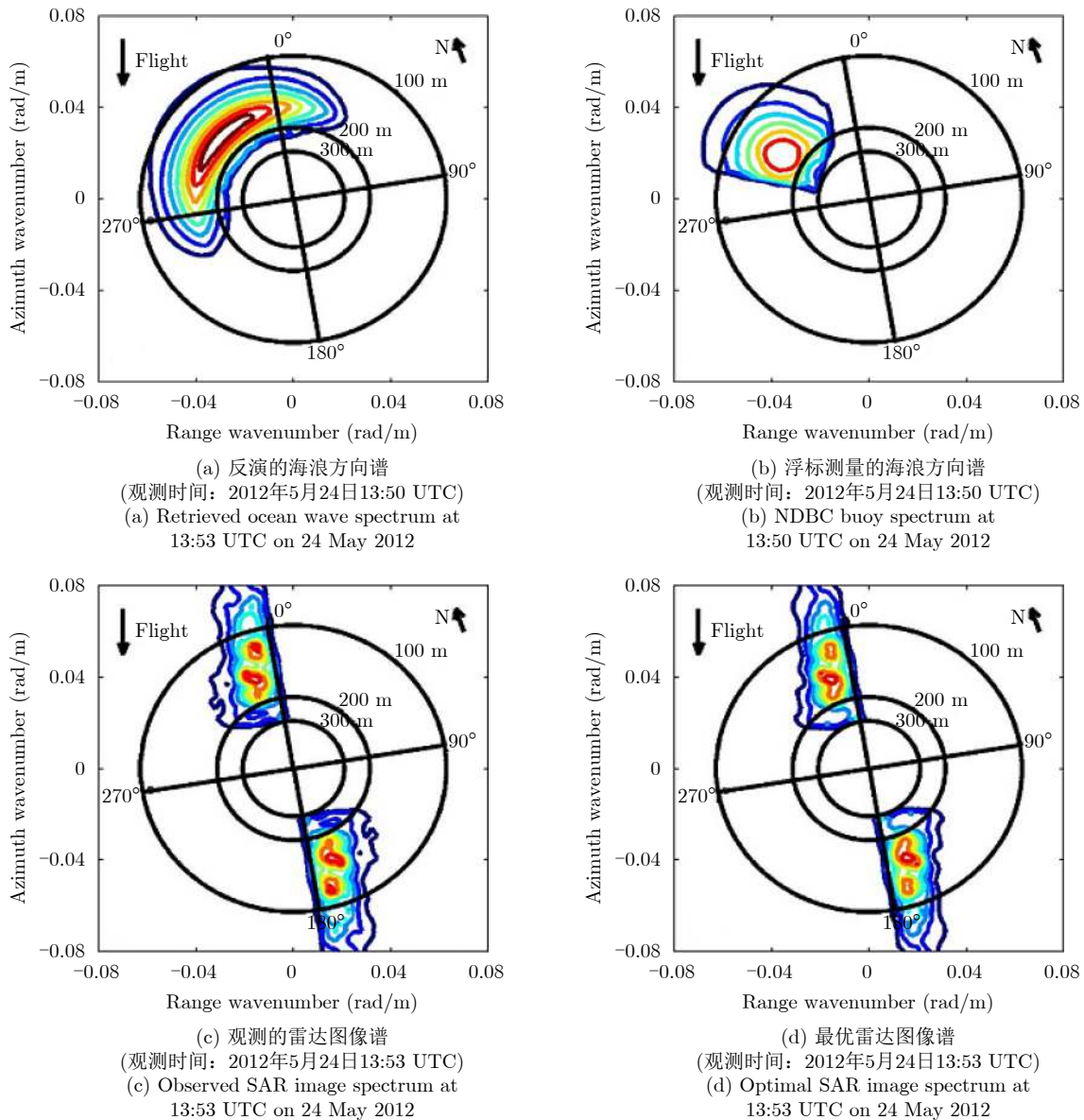


图7 文献[139]的海浪波谱反演方法

Fig. 7 Ocean wave spectrum retrieval algorithm in Ref. [139]

据的积累, 面向数据驱动和机器学习的海浪特征参数信息提取技术将是一种新的尝试。

参考文献

- [1] BORN G H, DUNNE J A, LAME D B. Seasat mission overview[J]. *Science*, 1979, 204(4400): 1405–1406. doi: [10.1126/science.204.4400.1405](https://doi.org/10.1126/science.204.4400.1405).
- [2] STEWART R H. Seasat: Results of the mission[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1988, 69(12): 1441–1447. doi: [10.1175/1520-0477\(1988\)069<1441:SROTM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1988)069<1441:SROTM>2.0.CO;2).
- [3] EVANS D L, ALPERS W, CAZENAVE A, *et al.* Seasat—A 25-year legacy of success[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 94(3): 384–404. doi: [10.1016/j.rse.2004.09.011](https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.09.011).
- [4] JACKSON C R and APEL J R. Synthetic Aperture Radar: Marine User's Manual[M]. Washington: NOAA, 2014: 1–464.
- [5] LI Xiaofeng, GUO Huadong, CHEN Kunshan, *et al.* Advances in SAR Remote Sensing of Oceans[M]. Boca Raton, FL 33487, USA: CRC Press, 2018. doi: [10.1201/9781351235822](https://doi.org/10.1201/9781351235822).
- [6] LI Xiaofeng. Hurricane Monitoring With Spaceborne Synthetic Aperture Radar[M]. Singapore: Springer, 2017:1–398. doi: [10.1007/978-981-10-2893-9](https://doi.org/10.1007/978-981-10-2893-9).
- [7] MONALDO F M, LI Xiaofeng, PICHEL W G, *et al.* Ocean wind speed climatology from spaceborne SAR imagery[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2014, 95(4): 565–569. doi: [10.1175/BAMS-D-12-00165.1](https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00165.1).

- [8] STOPA J E and MOUCHE A. Significant wave heights from Sentinel - 1 SAR: Validation and applications[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2017, 122(3): 1827–1848. doi: [10.1002/2016JC012364](https://doi.org/10.1002/2016JC012364).
- [9] WRIGHT J. Backscattering from capillary waves with application to sea clutter[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1966, 14(6): 749–754. doi: [10.1109/TAP.1966.1138799](https://doi.org/10.1109/TAP.1966.1138799).
- [10] CHEN K S, FUNG A K, and WEISSMAN D A. A backscattering model for ocean surface[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(4): 811–817. doi: [10.1109/36.158877](https://doi.org/10.1109/36.158877).
- [11] APEL J R. An improved model of the ocean surface wave vector spectrum and its effects on radar backscatter[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(C8): 16269–16291. doi: [10.1029/94jc00846](https://doi.org/10.1029/94jc00846).
- [12] ROMEISER R, ALPERS W, and 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*, 1997, 102(C11): 25237–25250. doi: [10.1029/97jc00190](https://doi.org/10.1029/97jc00190).
- [13] HWANG P A and PLANT W J. An analysis of the effects of swell and surface roughness spectra on microwave backscatter from the ocean[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(C4): C04014. doi: [10.1029/2009JC005558](https://doi.org/10.1029/2009JC005558).
- [14] DU Yanlei, YANG Xiaofeng, CHEN Kunshan, *et al.* An improved spectrum model for sea surface radar backscattering at L-band[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(8): 776. doi: [10.3390/rs9080776](https://doi.org/10.3390/rs9080776).
- [15] XIE Dengfeng, CHEN Kunshan, and YANG Xiaofeng. Effects of wind wave spectra on radar backscatter from sea surface at different microwave bands: A numerical study[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(9): 6325–6334. doi: [10.1109/TGRS.2019.2905558](https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2905558).
- [16] PORTABELLA M, STOFFELEN A, and JOHANNESSEN J A. Toward an optimal inversion method for synthetic aperture radar wind retrieval[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(C8): 3086. doi: [10.1029/2001JC000925](https://doi.org/10.1029/2001JC000925).
- [17] STOFFELEN A and ANDERSON D. Scatterometer data interpretation: Estimation and validation of the transfer function CMOD4[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(C3): 5767–5780. doi: [10.1029/96jc02860](https://doi.org/10.1029/96jc02860).
- [18] HERSBACH H, STOFFELEN A, and DE HAAN S. An improved C-band scatterometer ocean geophysical model function: CMOD5[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(C3): C03006. doi: [10.1029/2006JC003743](https://doi.org/10.1029/2006JC003743).
- [19] SOISUVARN S, JELENAK Z, CHANG P S, *et al.* CMOD5. H—A high wind geophysical model function for C-band vertically polarized satellite scatterometer measurements[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(6): 3744–3760. doi: [10.1109/TGRS.2012.2219871](https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2219871).
- [20] LU Yiru, ZHANG Biao, PERRIE W, *et al.* A C-band geophysical model function for determining coastal wind speed using synthetic aperture radar[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, 11(7): 2417–2428. doi: [10.1109/JSTARS.2018.2836661](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2018.2836661).
- [21] ZHANG Biao, MOUCHE A, LU Yiru, *et al.* A geophysical model function for wind speed retrieval from C-band HH-polarized synthetic aperture radar[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2019, 16(10): 1521–1525. doi: [10.1109/LGRS.2019.2905578](https://doi.org/10.1109/LGRS.2019.2905578).
- [22] LU Yiru, ZHANG Biao, PERRIE W, *et al.* CMODH validation for C-band synthetic aperture radar HH polarization wind retrieval over the ocean[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2020: 1–5. doi: [10.1109/LGRS.2020.2967811](https://doi.org/10.1109/LGRS.2020.2967811).
- [23] THOMPSON D R, ELFOUHAILY T M, and CHAPRON B. Polarization ratio for microwave backscattering from the ocean surface at low to moderate incidence angles[C]. *Sensing and Managing the Environment. 1998 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings, Seattle, USA, 1998*: 1671–1673. doi: [10.1109/IGARSS.1998.692411](https://doi.org/10.1109/IGARSS.1998.692411).
- [24] MOUCHE A, HAUSER D, DALOZE J F, *et al.* Dual-polarization measurements at C-band over the ocean: Results from airborne radar observations and comparison with ENVISAT ASAR data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(4): 753–769. doi: [10.1109/TGRS.2005.843951](https://doi.org/10.1109/TGRS.2005.843951).
- [25] LIU Guihong, YANG Xiaofeng, LI Xiaofeng, *et al.* A systematic comparison of the effect of polarization ratio models on sea surface wind retrieval from C-band synthetic aperture radar[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2013, 6(3): 1100–1108. doi: [10.1109/jstars.2013.2242848](https://doi.org/10.1109/jstars.2013.2242848).
- [26] SHAO Weizeng, LI Xiaoming, LEHNER S, *et al.* Development of polarization ratio model for sea surface wind field retrieval from TerraSAR-X HH polarization data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, 35(11/12): 4046–4063. doi: [10.1080/01431161.2014.916059](https://doi.org/10.1080/01431161.2014.916059).
- [27] BERGERON T, BERNIER M, CHOKMANI K, *et al.* Wind speed estimation using polarimetric RADARSAT-2

- images: Finding the best polarization and polarization ratio[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2011, 4(12): 896–904. doi: [10.1109/JSTARS.2011.2158067](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2011.2158067).
- [28] MOUCHE A and CHAPRON B. Global C-band Envisat, RADARSAT-2 and Sentinel-1 SAR measurements in copolarization and cross - polarization[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2015, 120(11): 7195–7207. doi: [10.1002/2015jc011149](https://doi.org/10.1002/2015jc011149).
- [29] REN Yongzheng, LEHNER S, BRUSCH S, *et al.* An algorithm for the retrieval of sea surface wind fields using X-band TerraSAR-X data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2012, 33(23): 7310–7336. doi: [10.1080/01431161.2012.685977](https://doi.org/10.1080/01431161.2012.685977).
- [30] LI Xiaoming and LEHNER S. Algorithm for sea surface wind retrieval from TerraSAR-X and TanDEM-X data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(5): 2928–2939. doi: [10.1109/TGRS.2013.2267780](https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2267780).
- [31] ISOGUCHI O and SHIMADA M. An L-band ocean geophysical model function derived from PALSAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(7): 1925–1936. doi: [10.1109/TGRS.2008.2010864](https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.2010864).
- [32] ZHOU Xuan, CHONG Jinsong, YANG Xiaofeng, *et al.* Ocean surface wind retrieval using SMAP L-band SAR[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, 10(1): 65–74. doi: [10.1109/JSTARS.2016.2630919](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2630919).
- [33] ZHANG Biao, PERRIE W, and HE Yijun. Wind speed retrieval from RADARSAT-2 quad-polarization images using a new polarization ratio model[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(C8): C08008. doi: [10.1029/2010JC006522](https://doi.org/10.1029/2010JC006522).
- [34] VACHON P W and WOLFE J. C-band cross-polarization wind speed retrieval[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(3): 456–459. doi: [10.1109/LGRS.2010.2085417](https://doi.org/10.1109/LGRS.2010.2085417).
- [35] ZHANG Biao, PERRIE W. Cross-polarized synthetic aperture radar: A new potential measurement technique for hurricanes[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, 93(4): 531–541. doi: [10.1175/BAMS-D-11-00001.1](https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00001.1).
- [36] ZHANG Guosheng, LI Xiaofeng, PERRIE W, *et al.* A hurricane wind speed retrieval model for C-band RADARSAT-2 cross-polarization ScansAR images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(8): 4766–4774. doi: [10.1109/TGRS.2017.2699622](https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2699622).
- [37] TROITSKAYA Y, ABRAMOV V, BAIDAKOV G, *et al.* Cross-polarization GMF for high wind speed and surface stress retrieval[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2018, 123(8): 5842–5855. doi: [10.1029/2018JC014090](https://doi.org/10.1029/2018JC014090).
- [38] HWANG P A, STOFFELEN A, VAN ZADELHOFF G J, *et al.* Cross-polarization geophysical model function for C-band radar backscattering from the ocean surface and wind speed retrieval[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2015, 120(2): 893–909. doi: [10.1002/2014JC010439](https://doi.org/10.1002/2014JC010439).
- [39] HWANG P A, PERRIE W, and ZHANG Biao. Cross-polarization radar backscattering from the ocean surface and its dependence on wind velocity[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(12): 2188–2192. doi: [10.1109/LGRS.2014.2324276](https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2324276).
- [40] VAN ZADELHOFF G J, STOFFELEN A, VACHON P W, *et al.* Retrieving hurricane wind speeds using cross-polarization C-band measurements[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2014, 7(2): 437–449. doi: [10.5194/amt-7-437-2014](https://doi.org/10.5194/amt-7-437-2014).
- [41] YE Xiaomin, LIN Mingsen, ZHENG Quanan, *et al.* A typhoon wind-field retrieval method for the Dual-polarization SAR imagery[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2019, 16(10): 1511–1515. doi: [10.1109/LGRS.2019.2902418](https://doi.org/10.1109/LGRS.2019.2902418).
- [42] ZHANG Guosheng, PERRIE W, LI Xiaofeng, *et al.* A hurricane morphology and sea surface wind vector estimation model based on C-band cross-polarization SAR imagery[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(3): 1743–1751. doi: [10.1109/TGRS.2016.2631663](https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2631663).
- [43] SHAO Weizeng, YUAN Xinzhe, SHENG Yexin, *et al.* Development of wind speed retrieval from cross-polarization Chinese gaofen-3 synthetic aperture radar in typhoons[J]. *Sensors*, 2018, 18(2): 412. doi: [10.3390/s18020412](https://doi.org/10.3390/s18020412).
- [44] GERLING T W. Structure of the surface wind field from the Seasat SAR[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1986, 91(C2): 2308–2320. doi: [10.1029/JC091iC02p02308](https://doi.org/10.1029/JC091iC02p02308).
- [45] LEHNER S, HORSTMANN J, KOCH W, *et al.* Mesoscale wind measurements using recalibrated ERS SAR images[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(C4): 7847–7856. doi: [10.1029/97JC02726](https://doi.org/10.1029/97JC02726).
- [46] DU Yong, VACHON P W, WOLFE J. Wind direction estimation from SAR images of the ocean using wavelet analysis[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2002, 28(3): 498–509. doi: [10.5589/m02-029](https://doi.org/10.5589/m02-029).
- [47] FICHAUX N and RANCHIN T. Combined extraction of high spatial resolution wind speed and wind direction from SAR images: A new approach using wavelet transform[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2002, 28(3): 510–516. doi: [10.5589/m02-038](https://doi.org/10.5589/m02-038).

- [48] HORSTMANN J, KOCH W, LEHNER S, *et al.* Ocean winds from RADARSAT-1 ScanSAR[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2002, 28(3): 524–533. doi: [10.5589/m02-043](https://doi.org/10.5589/m02-043).
- [49] HORSTMANN J, KOCH W, and LEHNER S. Ocean wind fields retrieved from the advanced synthetic aperture radar aboard ENVISAT[J]. *Ocean Dynamics*, 2004, 54(6): 570–576. doi: [10.1007/s10236-004-0098-3](https://doi.org/10.1007/s10236-004-0098-3).
- [50] KOCH W. Directional analysis of SAR images aiming at wind direction[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(4): 702–710. doi: [10.1109/TGRS.2003.818811](https://doi.org/10.1109/TGRS.2003.818811).
- [51] ZHOU Lizhang, ZHENG Gang, LI Xiaofeng, *et al.* An improved local gradient method for sea surface wind direction retrieval from SAR imagery[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(7): 671. doi: [10.3390/rs9070671](https://doi.org/10.3390/rs9070671).
- [52] ZHENG Gang, LI Xiaofeng, ZHOU Lizhang, *et al.* Development of a gray-level co-occurrence matrix-based texture orientation estimation method and its application in sea surface wind direction retrieval from SAR imagery[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(9): 5244–5260. doi: [10.1109/TGRS.2018.2812778](https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2812778).
- [53] WANG He, YANG Jingsong, MOUCHE A, *et al.* GF-3 SAR ocean wind retrieval: The first view and preliminary assessment[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(7): 694. doi: [10.3390/rs9070694](https://doi.org/10.3390/rs9070694).
- [54] ZHANG Biao, PERRIE W, VACHON P W, *et al.* Ocean vector winds retrieval from C-band fully polarimetric SAR measurements[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(11): 4252–4261. doi: [10.1109/TGRS.2012.2194157](https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2194157).
- [55] ZHANG Biao, PERRIE W, ZHANG J A, *et al.* High-resolution hurricane vector winds from C-band dual-polarization SAR observations[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2014, 31(2): 272–286. doi: [10.1175/JTECH-D-13-00006.1](https://doi.org/10.1175/JTECH-D-13-00006.1).
- [56] FAN Shengren, ZHANG Biao, MOUCHE A A, *et al.* Estimation of wind direction in tropical cyclones using C-band dual-polarization synthetic aperture radar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 58(2): 1450–1462. doi: [10.1109/TGRS.2019.2946885](https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2946885).
- [57] MONALDO F. The Alaska SAR demonstration and near-real-time synthetic aperture radar winds[J]. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 2000, 21(1): 75–79.
- [58] XU Qing, LIN Hui, LI Xiaofeng, *et al.* Assessment of an analytical model for sea surface wind speed retrieval from spaceborne SAR[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 31(4): 993–1008. doi: [10.1080/01431160902922870](https://doi.org/10.1080/01431160902922870).
- [59] PICHEL W G, LI Xiaofeng, MONALDO F, *et al.* Envisat ASAR applications demonstrations: Alaska SAR demonstration and Gulf of Mexico hurricane studies[C]. Envisat Symposium 2007, Montreux, Switzerland, 2007: 23–27.
- [60] YANG Xiaofeng, LI Xiaofeng, ZHENG Quanan, *et al.* Comparison of ocean-surface winds retrieved from QuikSCAT scatterometer and radarsat-1 SAR in offshore waters of the U. S. west coast[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(1): 163–167. doi: [10.1109/LGRS.2010.2053345](https://doi.org/10.1109/LGRS.2010.2053345).
- [61] VACHON P W and DOBSON F W. Validation of wind vector retrieval from ERS-1 SAR images over the ocean[J]. *Global Atmosphere and Ocean System*, 1996, 5(2): 177–187.
- [62] MONALDO F M, THOMPSON D R, BEAL R C, *et al.* Comparison of SAR-derived wind speed with model predictions and ocean buoy measurements[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(12): 2587–2600. doi: [10.1109/36.974994](https://doi.org/10.1109/36.974994).
- [63] THOMPSON D R, MONALDO F M, BEAL R C, *et al.* Combined estimates improve high-resolution coastal wind mapping[J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2001, 82(41): 469–469. doi: [10.1029/01EO00278](https://doi.org/10.1029/01EO00278).
- [64] YANG Xiaofeng, LI Xiaofeng, PICHEL W G, *et al.* Comparison of ocean surface winds from ENVISAT ASAR, MetOp ASCAT scatterometer, buoy measurements, and NOGAPS model[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(12): 4743–4750. doi: [10.1109/TGRS.2011.2159802](https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2159802).
- [65] MONALDO F, JACKSON C, LI Xiaofeng, *et al.* Preliminary evaluation of sentinel-1A wind speed retrievals[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, 9(6): 2638–2642. doi: [10.1109/JSTARS.2015.2504324](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2504324).
- [66] MOUCHE A A, CHAPRON B, ZHANG Biao, *et al.* Combined co- and cross-polarized SAR measurements under extreme wind conditions[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(12): 6746–6755. doi: [10.1109/TGRS.2017.2732508](https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2732508).
- [67] REN Lin, YANG Jingsong, MOUCHE A A, *et al.* Assessments of ocean wind retrieval schemes used for Chinese gaofen-3 synthetic aperture radar co-polarized data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(9): 7075–7085. doi: [10.1109/TGRS.2019.2911325](https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2911325).
- [68] TOPOUZELIS K and KITSIOU D. Detection and classification of mesoscale atmospheric phenomena above sea in SAR imagery[J]. *Remote Sensing of Environment*,

- 2015, 160(4): 263–272. doi: [10.1016/j.jrse.2015.02.006](https://doi.org/10.1016/j.jrse.2015.02.006).
- [69] XU Qing, LI Xiaofeng, BAO Shaowu, *et al.* SAR observation and numerical simulation of mountain Lee Waves near Kuril islands forced by an extratropical cyclone[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(12): 7157–7165. doi: [10.1109/TGRS.2016.2596678](https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2596678).
- [70] CHUNCHUZOV I, VACHON P W, and LI X. Analysis and modeling of atmospheric gravity waves observed in RADARSAT SAR images[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 74(3): 343–361. doi: [10.1016/S0034-4257\(00\)00076-6](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00076-6).
- [71] VACHON P W, JOHANNESSEN O M, and JOHANNESSEN J A. An ERS 1 synthetic aperture radar image of atmospheric lee waves[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(C11): 22483–22490. doi: [10.1029/94JC01392](https://doi.org/10.1029/94JC01392).
- [72] LI Xiaofeng, DONG Changming, CLEMENTE - COLÓN P, *et al.* Synthetic aperture radar observation of the sea surface imprints of upstream atmospheric solitons generated by flow impeded by an island[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109(C2): C02016. doi: [10.1029/2003JC002168](https://doi.org/10.1029/2003JC002168).
- [73] LIU Shuming, LI Ziwei, YANG Xiaofeng, *et al.* Atmospheric frontal gravity waves observed in satellite SAR images of the Bohai Sea and Huanghai Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2010, 29(5): 35–43. doi: [10.1007/s13131-010-0061-8](https://doi.org/10.1007/s13131-010-0061-8).
- [74] CHENG C and ALPERS W. Investigation of trapped atmospheric gravity waves over the South China Sea using Envisat Synthetic Aperture Radar images[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 31(17/18): 4725–4742. doi: [10.1080/01431161.2010.485145](https://doi.org/10.1080/01431161.2010.485145).
- [75] LI Xiaofeng, ZHENG Weizhong, YANG Xiaofeng, *et al.* Sea surface imprints of coastal mountain lee waves imaged by synthetic aperture radar[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(C2): C02014. doi: [10.1029/2010JC006643](https://doi.org/10.1029/2010JC006643).
- [76] ALPERS W and HUANG Weigen. On the discrimination of radar signatures of atmospheric gravity waves and oceanic internal waves on synthetic aperture radar images of the sea surface[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(3): 1114–1126. doi: [10.1109/TGRS.2010.2072930](https://doi.org/10.1109/TGRS.2010.2072930).
- [77] LI Xiaofeng, ZHENG Weizhong, YANG Xiaofeng, *et al.* Coexistence of atmospheric gravity waves and boundary layer rolls observed by SAR[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2013, 70(11): 3448–3459. doi: [10.1175/JAS-D-12-0347.1](https://doi.org/10.1175/JAS-D-12-0347.1).
- [78] LI Xiaofeng, CLEMENTE-COLÓN P, PICHEL W G, *et al.* Atmospheric vortex streets on a RADARSAT SAR image[J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(11): 1655–1658. doi: [10.1029/1999GL011212](https://doi.org/10.1029/1999GL011212).
- [79] LI Xiaofeng, ZHENG Weizhong, ZOU Chengzhi, *et al.* A SAR observation and numerical study on ocean surface imprints of atmospheric vortex streets[J]. *Sensors*, 2008, 8(5): 3321–3334. doi: [10.3390/s8053321](https://doi.org/10.3390/s8053321).
- [80] LI Xiaofeng, ZHENG Weizhong, PICHEL W H, *et al.* Coastal katabatic winds imaged by SAR[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(3): L03804. doi: [10.1029/2006GL028055](https://doi.org/10.1029/2006GL028055).
- [81] CHELTON D B, FREILICH M H, and ESBENSEN S K. Satellite observations of the wind jets off the pacific coast of Central America. Part I: Case studies and statistical characteristics[J]. *Monthly Weather Review*, 2000, 128(7): 1993–2018. doi: [10.1175/1520-0493\(2000\)128<1993:SOOTWJ>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2000)128<1993:SOOTWJ>2.0.CO;2).
- [82] GOHM A and MAYR G J. Numerical and observational case-study of a deep Adriatic bora[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2005, 131(608): 1363–1392. doi: [10.1256/qj.04.82](https://doi.org/10.1256/qj.04.82).
- [83] WINSTEAD N S, COLLE B, BOND N, *et al.* Using SAR remote sensing, field observations, and models to better understand coastal flows in the gulf of Alaska[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2006, 87(6): 787–800. doi: [10.1175/BAMS-87-6-787](https://doi.org/10.1175/BAMS-87-6-787).
- [84] ALPERS W, IVANOV A, and HORSTMANN J. Observations of bora events over the adriatic sea and black sea by spaceborne synthetic aperture radar[J]. *Monthly Weather Review*, 2009, 137(3): 1150–1161. doi: [10.1175/2008MWR2563.1](https://doi.org/10.1175/2008MWR2563.1).
- [85] SHIMADA T and KAWAMURA H. Summertime gap winds of the Soya Strait induced by the developed Okhotsk high[J]. *Atmospheric Science Letters*, 2011, 12(3): 316–320. doi: [10.1002/asl.345](https://doi.org/10.1002/asl.345).
- [86] LI Xiaofeng, ZHENG Weizhong, YANG Xiaofeng, *et al.* Sea fetch observed by synthetic aperture radar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(1): 272–279. doi: [10.1109/TGRS.2016.2605670](https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2605670).
- [87] SIKORA T D, FRIEDMAN K S, PICHEL W G, *et al.* Synthetic aperture radar as a tool for investigating polar mesoscale cyclones[J]. *Weather and Forecasting*, 2000, 15(6): 745–758. doi: [10.1175/1520-0434\(2000\)015<0745:SARAAT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(2000)015<0745:SARAAT>2.0.CO;2).
- [88] CHUNCHUZOV I, VACHON P W, and RAMSAY B. Detection and characterization of mesoscale cyclones in RADARSAT synthetic aperture radar images of the Labrador sea[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*,

- 2000, 26(3): 213–230. doi: [10.1080/07038992.2000.10874771](https://doi.org/10.1080/07038992.2000.10874771).
- [89] MOORE G W K and VACHON P W. A polar low over The Labrador Sea: Interactions with topography and an upper-level potential vorticity anomaly, and an observation by RADARSAT-1 SAR[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(16): 1773. doi: [10.1029/2001GL014007](https://doi.org/10.1029/2001GL014007).
- [90] FUREVIK B R, SCHYBERG H, NOER G, *et al.* ASAR and ASCAT in polar low situations[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2015, 32(4): 783–792. doi: [10.1175/JTECH-D-14-00154.1](https://doi.org/10.1175/JTECH-D-14-00154.1).
- [91] IVANOV A Y. Novaya Zemlya bora and polar cyclones in spaceborne SAR and optical imagery[J]. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2016, 52(9): 1142–1154. doi: [10.1134/S0001433816090127](https://doi.org/10.1134/S0001433816090127).
- [92] THOMPSON T W, LIU W T, and WEISSMAN D E. Synthetic aperture radar observation of ocean roughness from rolls in an unstable marine boundary layer[J]. *Geophysical Research Letters*, 1983, 10(12): 1172–1175. doi: [10.1029/GL010i012p01172](https://doi.org/10.1029/GL010i012p01172).
- [93] ALPERS W and BRÜMMER B. Atmospheric boundary layer rolls observed by the synthetic aperture radar aboard the ERS-1 satellite[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(C6): 12613–12621. doi: [10.1029/94JC00421](https://doi.org/10.1029/94JC00421).
- [94] MÜLLER G, BRÜMMER B, and ALPERS W. Roll convection within an arctic cold-air outbreak: Interpretation of in situ aircraft measurements and spaceborne SAR imagery by a three-dimensional atmospheric model[J]. *Monthly Weather Review*, 1999, 127(3): 363–380. doi: [10.1175/1520-0493\(1999\)127<0363:RCWAAC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1999)127<0363:RCWAAC>2.0.CO;2).
- [95] VANDEMARK D, MOURAD P D, BAILEY S A, *et al.* Measured changes in ocean surface roughness due to atmospheric boundary layer rolls[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(C3): 4639–4654. doi: [10.1029/1999JC000051](https://doi.org/10.1029/1999JC000051).
- [96] LEVY G. Boundary layer roll statistics from SAR[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(10): 1993–1995. doi: [10.1029/2000GL012667](https://doi.org/10.1029/2000GL012667).
- [97] HUANG Lanqing, LI Xiaofeng, LIU Bin, *et al.* Tropical cyclone boundary layer rolls in synthetic aperture radar imagery[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2018, 123(4): 2981–2996. doi: [10.1029/2018JC013755](https://doi.org/10.1029/2018JC013755).
- [98] LI Xiaofeng, YANG Xiaofeng, ZHENG Weizhong, *et al.* Synergistic use of satellite observations and numerical weather model to study atmospheric occluded fronts[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(9): 5269–5279. doi: [10.1109/TGRS.2015.2420312](https://doi.org/10.1109/TGRS.2015.2420312).
- [99] BARTHELMIE R J and PRYOR S C. Can satellite sampling of offshore wind speeds realistically represent wind speed distributions?[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2003, 42(1): 83–94. doi: [10.1175/1520-0450\(2003\)042<0083:CSSOOW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2003)042<0083:CSSOOW>2.0.CO;2).
- [100] PRYOR S C, NIELSEN M, BARTHELMIE R J, *et al.* Can satellite sampling of offshore wind speeds realistically represent wind speed distributions? Part II: Quantifying uncertainties associated with distribution fitting methods[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2004, 43(5): 739–750. doi: [10.1175/2096.1](https://doi.org/10.1175/2096.1).
- [101] AHSBAHS T, MACLAURIN G, DRAXL C, *et al.* US East Coast synthetic aperture radar wind atlas for offshore wind energy[J]. *Wind Energy Science*, 2019. doi: [10.5194/wes-2019-16](https://doi.org/10.5194/wes-2019-16).
- [102] WEISSMAN D E, KING D B, and THOMPSON T W. Relationship between hurricane surface winds and l-band radar backscatter from the sea surface[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1979, 18(8): 1023–1034. doi: [10.1175/1520-0450\(1979\)018<1023:RBHWSA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1979)018<1023:RBHWSA>2.0.CO;2).
- [103] HORSTMANN J, THOMPSON D R, MONALDO F, *et al.* Can synthetic aperture radars be used to estimate hurricane force winds?[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(22): L22801. doi: [10.1029/2005GL023992](https://doi.org/10.1029/2005GL023992).
- [104] KATSAROS K B, VACHON P W, BLACK P G, *et al.* Wind fields from SAR: Could they improve our understanding of storm dynamics?[J]. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 2000, 21(1): 86–93.
- [105] VALENZUELA G R. Theories for the interaction of electromagnetic and oceanic waves—A review[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1978, 13(1/4): 61–85. doi: [10.1007/bf00913863](https://doi.org/10.1007/bf00913863).
- [106] KUDRYAVTSEV V, HAUSER D, CAUDAL G, *et al.* A semiempirical model of the normalized radar cross-section of the sea surface 1. Background model[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(C3): 8054. doi: [10.1029/2001jc001003](https://doi.org/10.1029/2001jc001003).
- [107] LI Xiaofeng, ZHANG J A, YANG Xiaofeng, *et al.* Tropical cyclone morphology from spaceborne synthetic aperture radar[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2013, 94(2): 215–230. doi: [10.1175/BAMS-D-11-00211.1](https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00211.1).
- [108] REPPUCCI A, LEHNER S, SCHULZ-STELLENFLETH J, *et al.* Tropical cyclone intensity estimated from wide-swath SAR images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(4): 1639–1649. doi: [10.1109/TGRS.2009.2037143](https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2037143).
- [109] ZHOU Xuan, YANG Xiaofeng, LI Ziwei, *et al.* Estimation of tropical cyclone parameters and wind fields from SAR images[J]. *Science China Earth Sciences*, 2013, 56(11): 1977–1987. doi: [10.1007/s11430-013-4633-2](https://doi.org/10.1007/s11430-013-4633-2).

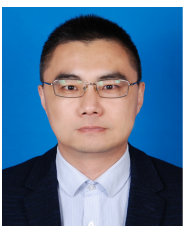
- [110] SHAO Weizeng, LI Xiaofeng, HWANG P, *et al.* Bridging the gap between cyclone wind and wave by C-band SAR measurements[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2017, 122(8): 6714–6724. doi: [10.1002/2017JC012908](https://doi.org/10.1002/2017JC012908).
- [111] JIN Shaohui, LI Xiaofeng, YANG Xiaofeng, *et al.* Identification of tropical cyclone centers in SAR imagery based on template matching and particle swarm optimization algorithms[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(1): 598–608. doi: [10.1109/tgrs.2018.2863259](https://doi.org/10.1109/tgrs.2018.2863259).
- [112] KHURSHID S, BRADLEY D, and MANORE M. National SAR wind product – user requirements document, meteorological service of Canada[R]. Montreal, QC, Canada: Environment Canada, 2012.
- [113] YU Yi, YANG Xiaofeng, ZHANG Weimin, *et al.* Assimilation of sentinel-1 derived sea surface winds for typhoon forecasting[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(8): 845. doi: [10.3390/rs9080845](https://doi.org/10.3390/rs9080845).
- [114] DUAN Boheng, ZHANG Weimin, YANG Xiaofeng, *et al.* Assimilation of typhoon wind field retrieved from scatterometer and SAR based on the Huber norm quality control[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(10): 987. doi: [10.3390/rs9100987](https://doi.org/10.3390/rs9100987).
- [115] HASSELMANN K and HASSELMANN S. On the nonlinear mapping of an ocean wave spectrum into a synthetic aperture radar image spectrum and its inversion[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1991, 96(C6): 10713–10729. doi: [10.1029/91jc00302](https://doi.org/10.1029/91jc00302).
- [116] ENGEN G and JOHNSEN H. SAR-ocean wave inversion using image cross spectra[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33(4): 1047–1056. doi: [10.1109/36.406690](https://doi.org/10.1109/36.406690).
- [117] MASTENBROEK C and DE VALK C F. A semiparametric algorithm to retrieve ocean wave spectra from synthetic aperture radar[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105(C2): 3497–3516. doi: [10.1029/1999jc900282](https://doi.org/10.1029/1999jc900282).
- [118] SCHULZ-STELLENFLETH J, KÖNIG T, and LEHNER S. An empirical approach for the retrieval of integral ocean wave parameters from synthetic aperture radar data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(C3): C03019. doi: [10.1029/2006JC003970](https://doi.org/10.1029/2006JC003970).
- [119] LI Xiaoming, LEHNER S, and BRUNS T. Ocean wave integral parameter measurements using Envisat ASAR wave mode data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(1): 155–174. doi: [10.1109/TGRS.2010.2052364](https://doi.org/10.1109/TGRS.2010.2052364).
- [120] MAROM M, GOLDSTEIN R M, THORNTON E B, *et al.* Remote sensing of ocean wave spectra by interferometric synthetic aperture radar[J]. *Nature*, 1990, 345(6278): 793–795. doi: [10.1038/345793a0](https://doi.org/10.1038/345793a0).
- [121] LYZENGA D R and BENNETT J R. Estimation of ocean wave spectra using two-antenna SAR systems[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1991, 29(3): 463–465. doi: [10.1109/36.79437](https://doi.org/10.1109/36.79437).
- [122] SHEMER L. On the focusing of the ocean swell images produced by a regular and by an interferometric SAR[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1995, 16(5): 925–947. doi: [10.1080/01431169508954452](https://doi.org/10.1080/01431169508954452).
- [123] BAO Mingquan, BRUNING C, and ALPERS W. Simulation of ocean waves imaging by an along-track interferometric synthetic aperture radar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(3): 618–631. doi: [10.1109/36.581977](https://doi.org/10.1109/36.581977).
- [124] BAO Mingquan, ALPERS W, and BRUNING C. A new nonlinear integral transform relating ocean wave spectra to phase image spectra of an along-track interferometric synthetic aperture radar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(1): 461–466. doi: [10.1109/36.739088](https://doi.org/10.1109/36.739088).
- [125] HE Yijun and ALPERS W. On the nonlinear integral transform of an ocean wave spectrum into an along-track interferometric synthetic aperture radar image spectrum[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(C6): 3205. doi: [10.1029/2002JC001560](https://doi.org/10.1029/2002JC001560).
- [126] 张彪, 何宜军. 干涉合成孔径雷达海浪遥感研究[J]. *遥感技术与应用*, 2006, 21(1): 11–17. doi: [10.3969/j.issn.1004-0323.2006.01.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-0323.2006.01.003).
ZHANG Biao and HE Yijun. The study on remote sensing of ocean wave by interferometric synthetic aperture radar[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2006, 21(1): 11–17. doi: [10.3969/j.issn.1004-0323.2006.01.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-0323.2006.01.003).
- [127] ZHANG Biao, HE Yijun, and VACHON P W. Numerical simulation and validation of ocean waves measured by an along-track interferometric synthetic aperture radar[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2008, 26(1): 1–8. doi: [10.1007/s00343-008-0001-z](https://doi.org/10.1007/s00343-008-0001-z).
- [128] ZHANG Biao, PERRIE W, and HE Yijun. Remote sensing of ocean waves by along-track interferometric synthetic aperture radar[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114(C10): C10015. doi: [10.1029/2009JC005310](https://doi.org/10.1029/2009JC005310).
- [129] SCHULZ-STELLENFLETH J and LEHNER S. Ocean wave imaging using an airborne single pass across-track interferometric SAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(1): 38–45. doi: [10.1109/36.898663](https://doi.org/10.1109/36.898663).
- [130] SCHULZ-STELLENFLETH J, HORSTMANN J,

- LEHNER S, *et al.* Sea surface imaging with an across-track interferometric synthetic aperture radar: The SINEWAVE experiment[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(9): 2017–2028. doi: [10.1109/36.951092](https://doi.org/10.1109/36.951092).
- [131] 张彪, 何宜军. 交轨干涉SAR涌浪干涉相位模型及数值模拟[J]. *电波科学学报*, 2007, 22(6): 1014–1019, 1028. doi: [10.3969/j.issn.1005-0388.2007.06.024](https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-0388.2007.06.024).
- ZHANG Biao and HE Yijun. Interferometric phase model and numerical simulations of swell for across-track interferometric SAR[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2007, 22(6): 1014–1019, 1028. doi: [10.3969/j.issn.1005-0388.2007.06.024](https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-0388.2007.06.024).
- [132] 张彪. 干涉合成孔径雷达海浪遥感[M]. 北京: 科学出版社, 2019: 84–86.
- ZHANG Biao. Remote Sensing of Ocean Wave by Interferometric Synthetic Aperture Radar[M]. Beijing: Science Press, 2019: 84–86.
- [133] SCHULER D L and LEE J S. A microwave technique to improve the measurement of directional ocean wave spectra[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1995, 16(2): 199–215. doi: [10.1080/01431169508954390](https://doi.org/10.1080/01431169508954390).
- [134] SCHULER D L, LEE J S, KASILINGAM D, *et al.* Measurement of ocean surface slopes and wave spectra using polarimetric SAR image data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 91(2): 198–211. doi: [10.1016/j.rse.2004.03.008](https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.03.008).
- [135] HE Yijun, PERRIE W, XIE Tao, *et al.* Ocean wave spectra from a linear polarimetric SAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(11): 2623–2631. doi: [10.1109/TGRS.2004.836813](https://doi.org/10.1109/TGRS.2004.836813).
- [136] HE Yijun, SHEN Hui, and PERRIE W. Remote sensing of ocean waves by polarimetric SAR[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2006, 23(12): 1768–1773. doi: [10.1175/JTECH1948.1](https://doi.org/10.1175/JTECH1948.1).
- [137] ZHANG Biao, PERRIE W, and HE Yijun. Validation of RADARSAT-2 fully polarimetric SAR measurements of ocean surface waves[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(C6): C06031. doi: [10.1029/2009JC005887](https://doi.org/10.1029/2009JC005887).
- [138] 何宜军, 孟雷, 李海艳, 等. 全极化合成孔径雷达海浪遥感方法[J]. *遥感技术与应用*, 2007, 22(2): 177–182. doi: [10.3969/j.issn.1004-0323.2007.02.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-0323.2007.02.012).
- HE Yijun, MENG Lei, LI Haiyan, *et al.* Ocean wave measured by fully polarimetric synthetic aperture radar[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2007, 22(2): 177–182. doi: [10.3969/j.issn.1004-0323.2007.02.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-0323.2007.02.012).
- [139] ZHANG Biao, LI Xiaofeng, PERRIE W, *et al.* Synergistic measurements of ocean winds and waves from SAR[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2015, 120(9): 6164–6184. doi: [10.1002/2015JC011052](https://doi.org/10.1002/2015JC011052).

作者简介



李晓峰(1963–), 男, 山东青岛人, IEEE fellow、研究员、博士生导师。长期从事海洋雷达遥感、人工智能海洋学基础理论与前沿技术研究, 担任IEEE TGRS和IJRS期刊副主编。
E-mail: lixf@qdio.ac.cn



张彪(1979–), 男, 新疆石河子人, 教授, 博士生导师, IEEE 高级会员, 江苏省海洋学会理事, 2016年国家优秀青年基金获得者。2018年入选江苏省六大人才高峰和“333”高层次人才工程。主要从事海洋和极地遥感、海气界面移动观测设备研制、海洋信息智能感知研究, 2014年获教育部自然科学二等奖和国家海洋科学技术一等奖, 2017年获江苏省科学技术一等奖。
Email: zhangbiao@nuist.edu.cn



杨晓峰(1982–), 男, 四川成都人, 研究员、硕士生导师, 主要从事海洋微波遥感和海洋动力环境遥感监测方法与技术研究, 兼任中国空间科学学会空间地球科学专委会秘书长, 曾获省部级科技进步一等奖3项。
E-mail: yangxf@radi.ac.cn