

SAR 反演邻近岸海面风场方法

王珂^{*①} 洪峻^{②④} 张问一^{③④} 张月婷^{③④} 惠延波^① 明峰^{②④}

^①(河南工业大学信息科学与工程学院 郑州 450001)

^②(微波成像技术国家级重点实验室 北京 100190)

^③(中国科学院空间信息处理与应用系统技术重点实验室 北京 100190)

^④(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

摘要: 该文对 SAR 反演邻近岸海面风场的有关问题进行了深入研究。首先提出了邻近海面风向估计方法, 在最小距离准则下利用邻近海域的风向估计所需的邻近岸海面风向。然后给出了使用 ENVISAT/ASAR 的 IM 成像模式 PRI 数据反演邻近岸海面风速的方法, 比较了地球物理模型函数(Geophysical Model Function, GMF)模型性能, 提出了海面风速分段反演算法。它们组成了完整的 SAR 反演邻近岸海面风场方法。通过实验、比较, 验证了上述方法的有效性和合理性。

关键词: 合成孔径雷达; 反演; 邻近岸; 海面风场

中图分类号: TP722.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)08-1800-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.0391

Method of SAR Retrieving Ocean Surface Wind in Near Shore

Wang Ke^① Hong Jun^{②④} Zhang Wen-yi^{③④} Zhang Yue-ting^{③④} Hui Yan-bo^① Ming Feng^{②④}

^①(School of Information Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

^②(National Key Laboratory of Microwave Imaging Technology, Beijing 100190, China)

^③(Key Laboratory of Spatial Information Processing and Application System Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^④(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: In this paper, related issues of SAR retrieving ocean surface wind in near shore are discussed thoroughly. First, a method of estimating ocean surface wind direction in near shore is proposed, which uses wind direction of closed ocean surface to estimate needed ocean surface wind direction in near shore based on minimum distance principle. Second, a retrieval method of ocean surface wind speed in near shore using ENVISAT/ASAR IM imaging mode PRI data is given, which Geophysical Model Function (GMF) models' capability is compared and a segment retrieval algorithm of ocean surface wind speed is proposed. They constitute an integral method of SAR retrieving ocean surface wind in near shore. By experiment and comparison, the effectiveness and rationality of above mentioned method are verified.

Key words: SAR; Retrieval; Near shore; Ocean surface wind

1 引言

海面风场影响着海洋环境、海洋工程、海上航运、海上搜救等, 同时也是军事海洋学的重要研究内容。合成孔径雷达SAR具有全天候、全天时、高分辨率的海洋遥感观测能力, 已成为海面风场反演的重要手段^[1-4]。对此, 国内外学者已开展了大量

的理论和实验研究^[1-10]。SAR反演海面风场时, 需要首先获得海面风向信息, 然后由地球物理模型函数(Geophysical Model Function, GMF)反演海面风速。利用SAR图像中的风条纹特征获取海面风向, 已被广泛应用^[1,5-9]。但SAR图像中的风条纹, 仅在不稳定的大气条件下比较明显, 而在中性稳定的大气条件下有时根本不存在^[5]。另外, SAR图像中还可能存在其它一些与风条纹相似的线性特征。它可能是由大气、海洋的复杂现象引起的, 其空间尺度虽然与风条纹近似, 但方向信息与局部风向却不一致^[5]。此外, 还可利用数值预报模式获得海面风向^[5],

2013-03-27 收到, 2013-06-14 改回

国家自然科学基金重大项目(60890071), 国家自然科学基金(61071197) 和河南工业大学高层次人才基金(2011BS044)资助课题

*通信作者: 王珂 email_of_paper@yahoo.com.cn

但其准确性和空间分辨率在某些情况下难以满足应用需要。利用星载散射计也可获得海面风向,且具有较高的准确性和空间分辨率。例如美国的 QuikSCAT,能提供全球海面风场反演产品,已被广泛应用^[1,3,6,8-10]。

距离陆地(海陆交界)几十公里以内的邻近岸海域,其海面风场是星载散射计无法测量的^[1,10]。SAR 却可用于测量邻近岸、岛屿附近海域的海面风场。邻近岸海面风场是海洋环境监测的重要内容。但有关 SAR 反演邻近岸海面风场的问题和方法,国内外少有论述。本文对有关问题进行了深入研究,提出了 SAR 反演邻近岸海面风场的方法,具有广阔的应用前景。

2 邻近岸海面风向的估计方法

2.1 风向的估计方法

在距离陆地几十公里以内的邻近岸海域,由于有港湾、岛屿、航道、海上设施、水下地形等复杂因素的影响,使得 SAR 图像中往往很难形成明显的、稳定的、大面积的风条纹特征,难以获取风向信息。如何获取邻近岸海面风向成为关键问题。国内外的实验观测^[3,6,7]表明,海面风向通常具有“连续性”和“缓变性”。如图 1 所示,可见邻近海域的风向有一定的“连续性”和“缓变性”,即风向是接近的,仅有微弱、缓慢的变化。即使在邻近岸海域,风向的这种特点仍十分明显。因此,本文提出可利用邻近海域的风向估计所需的邻近岸海面风向。如图 2 所示,其中箭头代表了海面风矢量,需要获取的是区域①中邻近岸海域的风向,而区域②,③,④海域的风向可由 QuikSCAT 海面风场反演产品获得;则根据邻近海域风向的“连续性”和“缓变性”,可利用区域②,③,④海域的风向估计区域①中邻近岸海域的风向。称之为“邻近岸海面风向估计方法”获取风向信息。

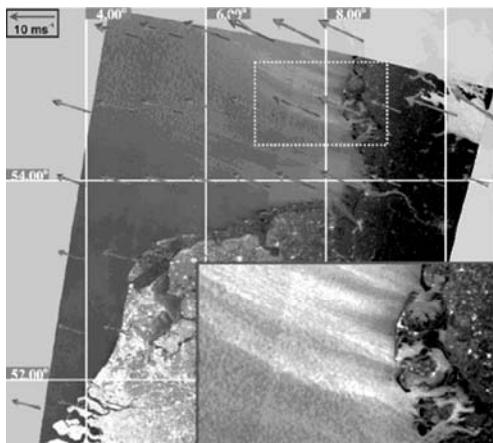


图 1 ENVISAT/ASAR 反演的德国 North Sea 近岸海面风场(Horstmann^[7])

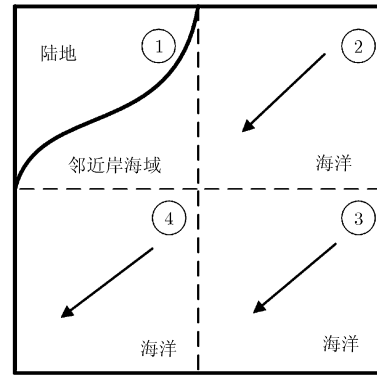


图 2 邻近岸海域的示意图

根据最小距离准则^[11],可定义距离为

$$d = \sqrt{\sum_{k=2}^4 [\varphi - \varphi_k]^2}, \quad k = 2, 3, 4 \quad (1)$$

其中 φ_k 为邻近海域②,③,④的风向, φ 为估计的区域①中邻近岸海域的风向。距离 d 表示了 φ 与其邻近海域风向的接近程度(相似程度),距离越小、接近程度越大。所以 φ 的取值应使距离 d 取得最小值。

2.2 风向的估计实验

使用 ENVISAT/ASAR 的 IM 成像模式 PRI 数据和浮标实测数据,来验证上述方法的有效性。IM 成像模式 PRI 数据是 ENVISAT/ASAR 的高分辨率、精确成像、地距图像数据,其能较好地满足定量反演高分辨率海面风场的需要。采用一景 ENVISAT/ASAR 的 IM 成像模式 PRI 数据,如图 3(a)所示。成像时间为 2008 年 7 月 4 日 02:06(UTC 时间),地点为青岛地区及其附近海域,数据为 C 波段 VV 极化,分辨率为 12.5 m,成像时卫星为降轨飞行。根据 ENVISAT/ASAR 的飞行方向可给出成像时的卫星姿态,已在图 3(a)中标注。作为对比验证的浮标实测数据来源于青岛邻近岸海域(即区域①),其在 SAR 图像中的位置已在图 3(a)中用方框标出。使用 EnviView 软件对 SAR 图像进行了逐块区域的人工目视判读,如图 3(b)所示,在邻近岸海域没有观察到明显的风条纹特征。需要指出的是,油膜、舰船等海洋现象会影响海面雷达后向散射截面^[12,13],进而会影响风速反演的精度。所以,选取风场反演区域时应排除它们的存在。油膜在 SAR 图像中表现为暗斑区域^[12],在风场、流场的作用下产生漂移、扩散、破碎,有复杂的“丝絮状”形态特征,空间尺度较大、覆盖面积可达上百平方公里;舰船在 SAR 图像中表现为亮斑区域^[13],有显著的对亮度特征、紧密的强散射点排列,有近似的长条状

椭圆形、长宽比等形状特征,空间尺度较小、一般为几十米到上百米。利用人工目视判读,由 SAR 图像特征可排除油膜、舰船的存在,选取出较为纯净的风场反演区域。

使用 Matlab 读取了 QuikSCAT 在 2008 年 7 月 3 日 22:02(UTC 时间),升轨飞行获得的全球海面风场反演产品。QuikSCAT 数据与 ENVISAT/ASAR 数据的获取时间相差仅约 4 个小时,能基本反映当时海面风场的真实情况。详细给出了区域②,③,④对应的 QuikSCAT 海面风场反演产品,如表 1 所示。其中,风向由风速的经度(南北方向)分量与纬度(东西方向)分量之比求得。区域②,③,④的空间大小由 QuikSCAT 数据的空间分辨率决定,为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (经纬度)。由表 1 中的降雨概率和降雨标志(0 表示没有降雨),可排除降雨带来的影响,保证了 QuikSCAT 数据的准确性。将区域②,③,④的 QuikSCAT 风向,代入式(1)可得到估计的区域①中的邻近岸风向为 54.18° 。实际上,QuikSCAT 获取的风向也总是一定空间分辨率内的平均风向。作为对比验证,给出了浮标实测风向,如表 2 所示。需要说明的是,浮标实测数据获取时间为北京时间,而北京时间与 UTC 时间相差 8 h,所以 ENVISAT/ASAR 成像时间即为北京时间 2008 年 7 月 4 日 10:

06。另外,实测风向的起始基准(即 0° 风向)为正北方向,顺时针旋转角度为正。所以表 2 中的实测风向需要减去 180° 即可换算为 QuikSCAT 风向。

通过与浮标实测风向的比较,可见本文方法获取的风向 54.18° ,比较接近实测风向;说明本文方法是有效的。同时,由表 2 可见实测风向在 ENVISAT/ASAR 成像前后 10 min 内就发生了一定的波动。考虑到海面风向的波动,及风向在一定空间分辨率内的平均效果,获取的风向 54.18° 也是比

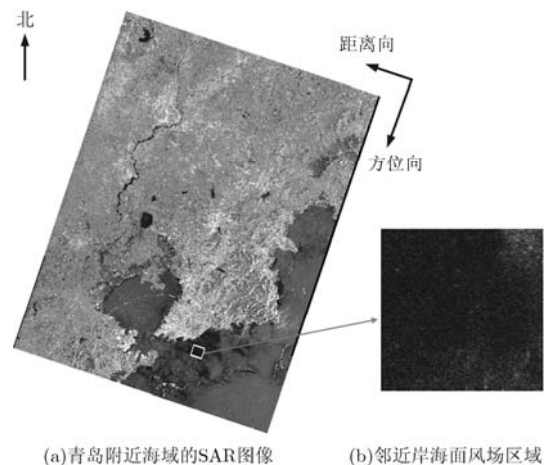


图 3 ENVISAT/ASAR 的 IM 成像模式 PRI 数据

表 1 QuikSCAT 海面风场反演产品

区域	风速 (m/s)	经度分量(m/s)	纬度分量 (m/s)	降雨概率(%)	降雨标志	风向 ($^\circ$)
②	8.62	7.65	3.98	3.3	0	62.51
③	7.33	4.77	5.57	3.9	0	40.58
④	6.12	5.27	3.11	0.6	0	59.45

表 2 浮标实测数据

日期时间 (北京时间)	实测风 向 ($^\circ$)	换算为 QuikSCAT 风向 ($^\circ$)	实测风速 (m/s)
2008-7-4 10:00	204	24	2.30
2008-7-4 10:10	236	56	1.90

较合理的。综上所述,通过实验,验证了本文提出的邻近岸海面风向估计方法的有效性和合理性,其能在 SAR 图像中没有风条纹特征时获取风向信息,为邻近岸海面风速的反演创造了条件。

3 邻近岸海面风速的反演方法

3.1 风速的反演方法

获取风向信息后可反演邻近岸海面风速。本文以 ENVISAT/ASAR 的 IM 成像模式 PRI 数据为例,来说明 SAR 反演邻近岸海面风速的方法。给出 SAR

反演邻近岸海面风速的流程,如图 4 所示。首先,使用增强 Lee 滤波算法^[14]对 SAR 图像进行滤波,其以局域统计为基础,既适用于平稳,也适用于非平稳 SAR 图像区域,能较好地抑制斑点噪声。然后,需要对 SAR 图像数据进行辐射定标,对像元值进行转换,以获得精确的海面雷达后向散射截面 σ^0 。不同 SAR 系统、同一 SAR 系统的不同工作模式得到的 SAR 图像,其辐射定标方法往往是不同的^[15]。对于 ENVISAT/ASAR 的 IM 成像模式 PRI 数据,分布目标的 σ^0 与像元值(即 DN 值)的关系为^[15,16]

$$\sigma^0 = \left(\frac{1}{N} \sum_{i,j=1}^{i,j=N} DN_{ij}^2 \right) \cdot \frac{\sin \theta_i}{K} \quad (2)$$

其中 DN_{ij} 为像元 (i, j) 的像元值; K 为定标常数,仅与 SAR 处理系统有关; θ_i 为本地入射角。海面属分布目标,则式(2)可用于 SAR 海洋图像的辐射定标。Buck^[16]由理论和实验研究,给出 ENVISAT/ASAR

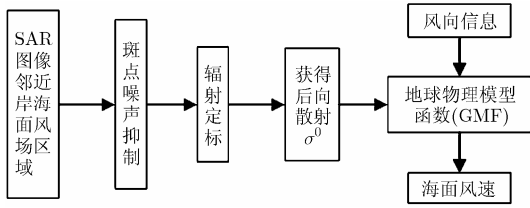


图 4 SAR 反演邻近岸海面风速的流程图

的 IM 成像模式 PRI 数据可取 K 为 55.3 dB。根据 SAR 系统参数和成像几何关系^[15], 可获得地球半径 R_T 、卫星距地面高度 H 、像元斜距 R_i ; 由式(3)可确定 θ_i , 即

$$\cos \theta_i = \left[(R_T + H)^2 - R_i^2 - R_T^2 \right] / (2 \times R_i \times R_T) \quad (3)$$

最后, 将风向信息和由辐射定标得到的 σ^0 代入 GMF 反向求解, 即可获得海面风速。使用 GMF 时, 需要根据其性能表现进行分段选择, 将在后面详细论述。

3.2 GMF 的性能比较

目前, 风场反演多使用 C 波段、VV 极化的 GMF, 主要包括^[9]: CMOD4 模型, CMOD_IFR2 模型, CMOD5 模型。它们性能各异, 需要对其进行合理地选择。Xu 等人^[9]使用香港近岸的 45 景 ENVISAT/ASAR 图像进行了风速反演实验。考虑到近岸海洋环境的相似性, 由文献[9]的研究, 以均方根误差、平均偏差和相关系数为指标, 可对 GMF 性能进行比较。其结果表明: 反演近岸风速时, CMOD4 模型性能最好, CMOD_IFR2 模型次之, CMOD5 模型最差。Horstmann 等人^[6]使用德国 North Sea 近岸的 61 景 ENVISAT/ASAR 图像进行了风速反演实验和 GMF 性能比较, 获得了同样的结论。所以从性能考虑, SAR 反演邻近岸海面风速时, 可使用 CMOD4 模型和 CMOD_IFR2 模型。

取入射角为 30° 、方位角(即风向与雷达波束指向的夹角)为 90° 时, 对 CMOD4 模型和 CMOD_IFR2 模型反演的风速进行比较, 如图 5 所示。CMOD_IFR2 模型的风速反演结果需要进行修正^[17], 图 5 中已做过修正。由图 5 可见, CMOD4 模型和 CMOD_IFR2 模型在风速 4 m/s 左右时有“拐点”现象, 即与 CMOD4 模型相比, CMOD_IFR2 模型高估了 4 m/s 以上的风速, 但低估了 4 m/s 以下的风速。入射角、方位角取其它值时, 可获得同样的结论。3.4 节中反演的邻近岸海面风速, 证明了反演低风速时 CMOD4 模型具有较好的准确性。此时如果选择 CMOD_IFR2 模型, 风速反演结果将为 0 m/s。这是因为 CMOD_IFR2 模型低估了 4 m/s 以下的风速, 甚至已不能正确地反演风速。

3.3 分段反演算法

实际上, CMOD 系列模型的性能各有优势和不

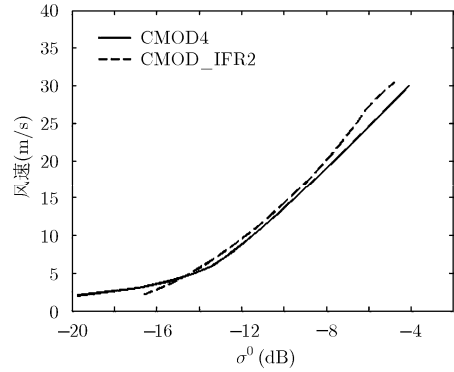


图 5 入射角为 30° 、方位角为 90° 时反演的风速

足。文献[9]由风速反演实验, 发现与 CMOD4 模型相比, CMOD_IFR2 模型和 CMOD5 模型都低估了 4 m/s 以下的风速, 并认为 CMOD4 模型更适合反演 15 m/s 以下的风速。Song 等人^[8]由风速反演实验, 认为与 CMOD4 模型相比, CMOD_IFR2 模型更适合反演 10 m/s 以上的高风速。这是因为风速大于 10 m/s 时, CMOD_IFR2 模型对风速反演结果进行了修正^[17]。Hersbach^[18]指出 CMOD5 模型作为 ECMWF(欧洲中期天气预报中心)对 CMOD4 模型的升级, 主要改善了反演高风速时的准确性; 与 CMOD4 模型相比, 其更适合反演 25 m/s 以上的风速。但 CMOD5 模型与 CMOD_IFR2 模型反演 25 m/s 以上风速的性能比较, 尚未见实验报道。综合目前国内外的研究成果, 本文提出了海面风速分段反演算法, 以合理地选择 GMF; 即反演低风速(风速小于等于 10 m/s)时采用 CMOD4 模型, 而反演高风速(风速大于 10 m/s)时采用 CMOD_IFR2 模型。给出分段反演算法的流程, 如图 6 所示。反演风速时, 在得到风向信息和后向散射 σ^0 后, 首先使用 CMOD4 模型反演获得风速的初步结果; 然后判断其是否大于 10 m/s, 当其小于等于 10 m/s 时, 初步结果即为风速反演的最终结果; 但当其大于 10 m/s 时, 则使用 CMOD_IFR2 模型重新反演获得风速, 即为风速反演的最终结果。

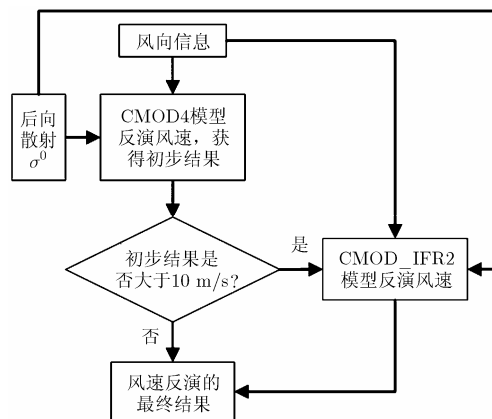


图 6 分段反演算法的流程图

综上所述, 本文提出的海面风速分段反演算法, 根据 GMF 的性能表现, 对其进行合理地分段选择, 以尽量减小由于 GMF 自身准确性导致的风速反演误差, 能较好地满足 SAR 反演邻近岸海面风速的需要。需要指出的是, 文献[9], 文献[6]的风速反演实验区域均为近岸海域; 使用美国 Google Earth 观测可知, 文献[8]的风速反演实验区域($N18^{\circ} 56' 8''$, $W155^{\circ} 49' 37''$)^[8]距夏威夷海岸仅约 8 km; 所以他们对 GMF 性能的实验结果, 仅限于近岸海域, 其是否具有全球海域的普适性, 还有待进一步的研究。

3.4 风速的反演实验

在 ENVISAT/ASAR 的 IM 成像模式 PRI 数据中, 以浮标位置为中心选取 200×200 像元的邻近岸海面风场区域(对应海面 $2.5 \text{ km} \times 2.5 \text{ km}$), 如图 3(b) 所示。按图 4, 图 6 所示的流程, 采用分段反演算法, 分段选择的结果是 CMOD4 模型, 可反演获得上述区域的海面风速为 1.58 m/s。作为对比验证, 给出了浮标实测风速, 如表 2 所示。

通过与浮标实测风速的比较, 可见本文反演获得的风速 1.58 m/s, 比较接近实测风速; 说明反演方法是有效的。同时, 由表 2 可见实测风速在 ENVISAT/ASAR 成像前后 10 min 内就发生了一定的波动。考虑到海面风速的波动, 及风速在一定空间分辨率内的平均效果, 反演获得的风速 1.58 m/s 也是比较合理的。此外, 由于 CMOD4 模型自身的准确性, 用其反演风速会存在一定的误差。文献[9]由实验统计, 给出 CMOD4 模型反演风速的均方根误差为 1.74 m/s。可见, 反演获得的风速与实测风速的误差也在合理范围内。综上所述, 通过实验, 验证了本文给出的使用 ENVISAT/ASAR 的 IM 成像模式 PRI 数据反演邻近岸海面风速方法的有效性和合理性; 这也证明了邻近岸海面风向估计方法获取的风向, 能够满足高分辨率海面风场反演的需要。

4 结束语

本文对 SAR 反演邻近岸海面风场的有关问题进行了深入研究, 提出了 SAR 反演邻近岸海面风场的方法。主要包括: 提出了邻近岸海面风向估计方法, 其能在 SAR 图像中没有风条纹特征时获取风向信息; 给出了使用 ENVISAT/ASAR 的 IM 成像模式 PRI 数据反演邻近岸海面风速的方法, 证明了邻近岸海面风向估计方法获取的风向, 能够满足高分辨率海面风场反演的需要; 提出了海面风速分段反演算法, 以尽量减小由于 GMF 自身准确性导致的风速反演误差。它们组成了完整的 SAR 反演邻近岸

海面风场方法。通过实验、比较, 验证了上述方法的有效性和合理性。这为距离陆地几十公里以内的邻近岸海域风场反演提供了技术手段, 对实现无缺失、全覆盖的海洋环境监测具有重要意义。

参考文献

- [1] 张雷, 石汉青, 龙智勇, 等. 星载合成孔径雷达图像反演海面风场方法综述[J]. 海洋通报, 2012, 31(6): 713-720.
Zhang Lei, Shi Han-qing, Long Zhi-yong, et al. Overview of the ocean wind retrieval from space-borne SAR images[J]. *Marine Science Bulletin*, 2012, 31(6): 713-720.
- [2] 赵风军, 刘凡, 邓云凯, 等. 一种基于灰度互相关法的扫描模式下的风场反演算法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(7): 1667-1670.
Zhao Feng-jun, Liu Fan, Deng Yun-kai, et al. A new wind vector algorithm in scanning mode based on gray cross-correlation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(7): 1667-1670.
- [3] 张毅, 蒋兴伟, 林明森, 等. 基于小波分析的近岸海面风场反演研究[J]. 高技术通讯, 2011, 21(10): 1056-1061.
Zhang Yi, Jiang Xing-wei, Lin Ming-sen, et al. On the retrieval of coastal wind direction based on wavelet analysis[J]. *High Technology Letters*, 2011, 21(10): 1056-1061.
- [4] 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 Remote Sensing*, 2012, 50(11): 4252-4261.
- [5] 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 Remote Sensing*, 2001, 39(12): 2587-2600.
- [6] Horstmann J and Koch W. Measurement of ocean surface winds using synthetic aperture radars[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2005, 30(3): 508-515.
- [7] Horstmann J and Koch W. High Resolution Wind Field Retrieval from Synthetic Aperture Radar: North Sea Examples, Remote Sensing of the European Seas[M]. Germany: Springer Press, 2008: 331-342.
- [8] Song Gui-ting, Hou Yi-jun, and He Yi-jun. Comparison of two algorithms of ENVISAT ASAR at high wind[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2006, 24(1): 92-96.
- [9] Xu Qing, Lin Hui, Zheng Quan-an, et al. Evaluation of ENVISAT ASAR data for sea surface wind retrieval in Hong Kong coastal waters of China[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2008, 27(4): 57-62.
- [10] Yang Xiao-feng, Li Xiao-feng, Zheng Quan-an, 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.
- [11] 康欣, 韩崇昭, 杨艺. 基于结构的SAR图像配准[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(5): 1307-1310.
- Kang Xin, Han Chong-zhao, and Yang Yi. Structure-driven SAR image registration[J]. *Journal of System Simulation*, 2006, 18(5): 1307-1310.
- [12] 刘杨, 邵芸, 于五一, 等. 基于ENVISat的海洋污染性油膜雷达散射特征与扩散趋势分析[J]. 遥感技术与应用, 2010, 25(3): 311-317.
- Liu Yang, Shao Yun, Yu Wu-yi, et al. Analysis on radar backscatter feature and evolution of ocean pollution oil slick with ENVISat SAR[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2010, 25(3): 311-317.
- [13] 陈琪, 陆军, 王娜, 等. 一种基于SAR图像鉴别的港口区域舰船目标新方法[J]. 宇航学报, 2011, 32(12): 2582-2588.
- Chen Qi, Lu Jun, Wang Na, et al. An SAR images-based new method for ship discrimination in harbor region[J]. *Journal of Astronautics*, 2011, 32(12): 2582-2588.
- [14] Lopes A, Touzi R, and Nezry E. Adaptive speckle filters and scene heterogeneity[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1990, 28(6): 992-1000.
- [15] Laur H, Bally P, Meadows P, et al. ERS SAR calibration: derivation of the backscattering coefficient σ^0 in ESA ERS SAR PRI products[OL]. http://earth.esa.int/ers/pub/ESA_DOC/ers_sar_calibration_issue2_5f.pdf. 2012.2.
- [16] Buck C. ASAR external calibration[OL]. http://earth.esa.int/envisat/calval/proceedings/asar/asar_08.pdf. 2012.2.
- [17] Quilfen Y, Chapron B, Elfouhaily T, et al. Observation of tropical cyclones by high resolution scatterometry[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(C4): 7767-7786.
- [18] Hersbach H. CMOD5: an improved geophysical model function for ERS C-band scatterometry[OL]. http://earth.esa.int/pub/SCATTEROMETER/ecmwf_rep/cmod5.pdf. 2012.2.
- 王珂: 男, 1981年生, 讲师, 博士, 研究方向为SAR遥感信息处理与应用.
- 洪峻: 男, 1960年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为SAR遥感信息处理与应用.
- 张问一: 男, 1984年生, 助理研究员, 博士, 研究方向为SAR海洋成像处理与应用.