

# 基于影像纹理特征和外部风向的星载 SAR 海面风场反演研究

程玉鑫, 艾未华, 孔毅, 赵现斌

(解放军理工大学 气象海洋学院, 江苏 南京 211101)

**摘要:** 在合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)海面风场反演中, 基于风条纹影像纹理特征的海面风向反演方法精度高, 但是依赖于图像风条纹的存在, 而外部风向信息与 SAR 资料时空分辨率不易匹配、精度较低, 从而影响大面积、高分辨率海面风场反演的精度。针对此问题, 提出一种将 SAR 图像风条纹线性纹理特征与外部风向信息相结合的星载 SAR 海面风向获取方法, 在 SAR 影像线性纹理特征明显的区域采用二维连续小波变换得到高精度的海面风向, 其余区域采用与之时空相匹配的数值预报模式风向填充; 并利用地球物理模型函数进一步得到海面风速, 进而实现高精度、大范围海面风场的反演。为验证本文方法的有效性, 利用 ENVISAT/ASAR 数据进行风场反演试验, 并将反演结果与浮标实测数据进行比对。结果表明: 在线性纹理特征明显的区域, 小波方法的反演精度优于快速傅里叶变换(FFT)法和数值预报模式风向; 外部风向精度略低, 但与 SAR 观测资料时空匹配性较好, 弥补了风条纹风向的不足。二者的结合为星载 SAR 海面风场反演的业务化应用提供了支持。

**关键词:** 星载 SAR; 小波变换; 外部风向; 海面风场

中图分类号: P732.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2015)12-0157-08  
doi: 10.11759/hyqx20141027002

海面风场是大气和海洋的重要参数, 它与海洋中绝大多数的物理过程密切相关。为了能够大范围地获知海面风场, 人们普遍采用遥感反演的方法。现行遥感探测手段主要包括微波散射计、微波辐射计、卫星高度计和合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)。其中, 星载微波散射计已实现大范围海面风场遥感观测的业务化应用, 其海面风场的测量精度已达到风速误差  $\pm 2$  m/s, 风向误差  $\pm 20^\circ$ , 但其空间分辨率通常在  $25\sim 50$  km<sup>[1]</sup>, 同时散射计也无法测量近岸几十公里内以及冰缘和岛屿附近的风场, 不能满足某些大范围高分辨率海面风场探测的应用需要; 微波辐射计也已实现海面风场的业务化探测, 可测海面风速范围为  $4\sim 50$  m/s, 同时可以利用极化信息获得风向, 但对定标精度和极化的测量要求较高, 且其空间分辨率仅为  $50$  km<sup>[2]</sup>; 卫星高度计只能测量风速而无法得到风向, 其风速测量范围也只有  $2\sim 15$  m/s<sup>[3]</sup>。星载 SAR 所具有的全天时、全天候、高分辨率(数十米至数米)探测海面风场的特点, 尤其适用于海岸带和岛屿区的观测, 弥补微波散射计的不足<sup>[4-5]</sup>。由于合成孔径雷达无法对海面不同的方位角进行多次测量<sup>[6]</sup>, 导致其反演风矢量时需先获取风向信息再进行风速反演。通常利用 SAR 图像线性纹理特征反演的风向、散射计的海面风向和数值

预报模式风向等作为地球物理模型函数的相对风向输入, 同时输入定标后的后向散射系数和入射角, 通过迭代计算得到海面风速。

SAR 是一种主动式微波成像传感器, 通过测量海面后向散射信号的幅值及其时间相位, 能产生海面后向散射强度在海面分布的图像<sup>[7-8]</sup>。由于大气海洋边界层的不稳定性引起的海面粗糙度变化, 在 SAR 图像中表现为黑白相间的风条纹。大量的观测和研究表明, 风条纹的轴线方向与海面风矢量的方向基本一致<sup>[9]</sup>, 可以从图中直接反演出海面风向。Vachon 等<sup>[10]</sup>对 SAR 图像实施二维快速傅立叶变换(FFT), 通过计算低波数谱反演海面风向; 杨劲松等采用二维 FFT 法反演了我国海南省东南部近岸海区海面风向, 反演结果与预报风场相符较好<sup>[5]</sup>。Wolfgang 等<sup>[11]</sup>采用局部梯度法, 在获取了 RADARSAT-1 探测数据风向信息的同时, 将星载 SAR 风向反演的空间分辨率由  $10$  km $\times$  $10$  km 提高至  $1$  km $\times$  $1$  km。姜祝辉等<sup>[12]</sup>提出

收稿日期: 2014-10-27; 修回日期: 2014-12-30

基金项目: 国家自然科学基金(41475019; 41375029)

作者简介: 程玉鑫(1990-), 男, 黑龙江鸡西人, 硕士研究生, 研究方向为微波海洋遥感, E-mail: 1073161081@qq.com; 艾未华, 通信作者, 硕士生导师, 主要从事现代气象海洋雷达技术方面的研究, 电话: 13814004679, E-mail: awhzjax@126.com

基于 Tikhonovz 正则化的二维数值微分方法来分别反演星载 SAR 图像的海面风向和海面风场。艾未华等<sup>[13]</sup>采用小波方法研究了机载 SAR 的海面风向反演,较好地解决了 SAR 图像的风条纹提取问题。但是基于风条纹反演风向存在的最大问题是与风向平行的线性纹理特征并不是均匀的分布在 SAR 图像中,统计表明,仅有 44% 左右的 SAR 图像可利用风条纹信息反演海面方向<sup>[14]</sup>,所以难以只利用风条纹开展海面风场反演工作。

通常采用外部风向对风条纹缺失的区域进行填充,常用的外部风向有散射计风向和数值天气预报模式(Numerical Weather Prediction Model, NWP)风向<sup>[15-16]</sup>。散射计风向空间分辨率较低且不易与 SAR 探测数据达到时空上的匹配,将其作为外部风向存在问题较多,因而考虑采用 NWP 风向作为 SAR 风场反演的外部风向,但传统的数值预报值分辨率较低,往往只提供  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  空间尺度上的风向,且时间间隔一般为 6h,难以与 SAR 观测资料时空匹配<sup>[17-19]</sup>。WRF (Weather Research Forecast)模式系统是美国气象界联合开发的新一代中尺度预报模式和同化系统,相较于传统的数值预报模式,它能够提供更高分辨率的风场信息,能够根据实际需求进行调整,可以胜任高精度海面风场反演的需求。但这并不意味着基于海面风条纹获取风向的方法可以完全被高分辨率 NWP 风向所取代,这是因为 SAR 影像中的线性纹理刻画了公里尺度上的风向变化信息,这是高分辨率 NWP 无法做到的。与此同时, SAR 影像中大部分区域并不包含风条纹信息,且容易受到其他因素影响而与真实风向存在偏差。因此本文提出 SAR 影像与高分辨率 NWP 协同反演海面风场,利用高分辨率 WRF 模式风向结合 SAR 图像进行海面风场反演研究。

## 1 反演方法

### 1.1 实验数据及反演流程

本文采用的实验数据是 WS(Wide Swath)成像模式的 ENVISAT/ASAR 图像,极化方式为垂直(VV)极化,如图 1 所示,探测时间为 2011 年 5 月 24 日 7 时 52 分,空间分辨率为 75 m,经过定标、滤波及几何校正处理,得到一块大小为  $3^{\circ} \times 3^{\circ}$  的区域(图 1 白框区域),影像中心地理坐标为  $(56.5^{\circ}N, 152.5^{\circ}W)$ ,位置在阿拉斯加湾内科迪亚克岛东南沿岸。作为外部风向的 WRF 风场数据的水平分辨率为  $0.3^{\circ} \times 0.3^{\circ}$  (20 km),时间间隔为 1 h,符合高分辨率风场反演的要求,为与 SAR 探测数据时间匹配,我们选用 8h 的 WRF 风场

数据。浮标数据采用 NDBC 提供的浮标观测资料,浮标号为 46078,所在位置为  $(55^{\circ}59'23"N, 152^{\circ}38'24"W)$ ,观测时间为 7:50AM,与 SAR 图像探测时间相差 2 min,图中白点处为浮标所在位置。

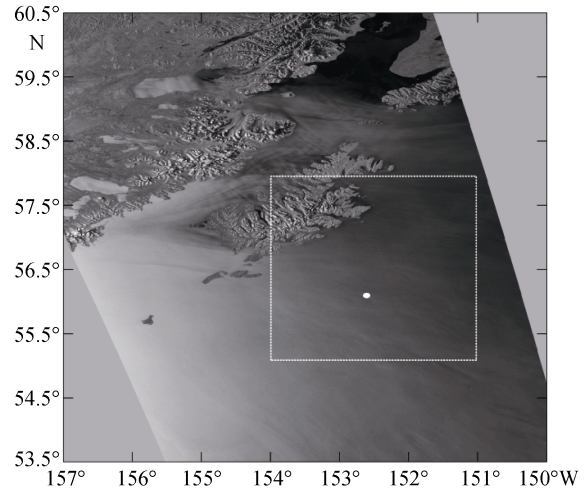


图 1 SAR 影像所在研究区域位置  
Fig.1 SAR image of the research area

采用基于影像纹理特征和外部风向信息相结合的星载 SAR 海面风场反演方法,充分利用小波变换的时—频局部化特性,在线性纹理特征明显的区域反演高精度的海面风向,其余区域利用高分辨率 WRF 数值预报模式风向填充,通过地球物理模型函数计算风速,最终实现高分辨率 NWP 与 SAR 影像协同获取海面风场信息,其反演流程如图 2 所示。

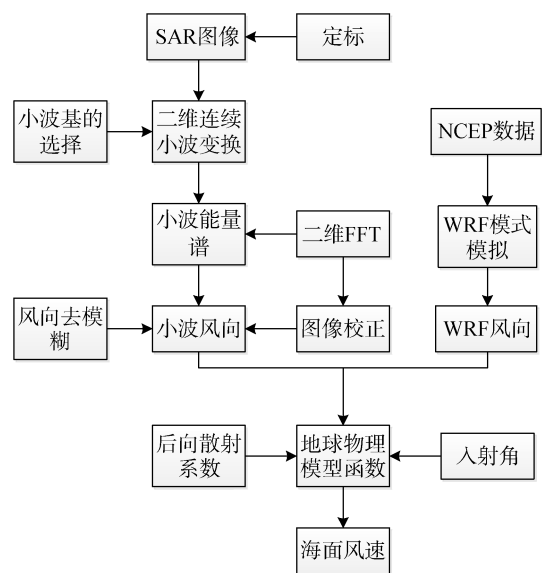


图 2 风场反演流程图  
Fig.2 Flow chart of the wind field

### 1.2 基于 Mexican-hat 小波的海面风向反演方法<sup>[20]</sup>

小波分析因其出色的时—频局部化特性被誉为信号处理中的“数学显微镜”，它比 Fourier 分析有着许多本质性的进步。小波分析提供了一种自适应的时域和频域同时局部化的分析方法，无论分析低频或高频局部信号，它都能自动调节时—频窗，以适应实际分析的需要。小波变换中最优小波基的选取十分关键，常见的小波母函数有 Haar 小波、Morlet 小波和 Mexican-hat 小波等。通过理论分析和实际的反演实验，Mexican-hat 小波在 SAR 海面风场反演方面取得了较好的反演效果。二维 Mexican-hat 小波变换具有较好的时域和频域局部化能力及信号能量集中特性，能够从高空间分辨率 SAR 图像中提取风条纹信息。

Mexican-hat 小波反演风向的过程是先对 SAR 图像进行二维连续 Mexican-hat 小波变换，获取不同尺度下的小波能量谱图像，提取风条纹信息。在空间—频率域，二维 Mexican-hat 小波变换可表示为

$$\Psi_H(\mathbf{k}) = (\mathbf{k} \cdot \mathbf{k}) e^{-\frac{1}{2(\mathbf{k} \cdot \mathbf{k})}} \quad (1)$$

其中， $\Psi_H$  表示小波母函数， $\mathbf{k}$  表示二维空间—频率

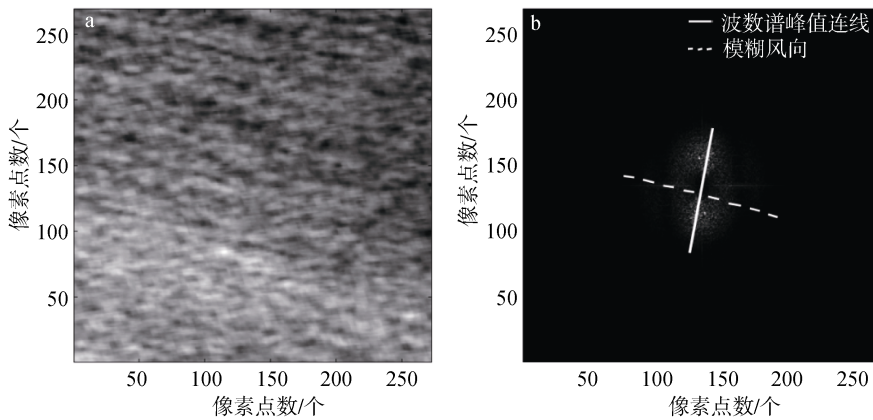


图 3 小波法反演 SAR 子图像(a)及风向(b)

Fig.3 SAR (a) and wind direction (b) estimation using wavelet transform

### 1.3 外部风向为初始风向的海面风场反演方法

NWP 是根据大气实际情况，在一定的初值和边界条件下，通过计算机作数值计算，求解描写天气演变过程的流体力学和热力学方程组，预测未来一定时段内大气运动状态和天气现象的方法<sup>[21]</sup>。WRF 模式是由美国多家单位的科学家共同研究开发出来

域的变量；·表示向量内积。

然后对能量谱图像进行二维 FFT，计算 SAR 图像中风条纹的波数谱，二维 FFT 可表示为

$$Y_{l,m} = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N X_{j,k} e^{-2\pi i(jl+km)/N} \quad (2)$$

其中， $Y$  为 SAR 图像中风条纹的波数谱， $X$  为图像灰度值， $m=1,2,\dots,N$ ； $l=1,2,\dots,N$ 。

最后将二维波数谱峰值的连线做垂线，对其进行风向来模糊后得到海面风向。针对 Mexican-hat 小波法反演风向存在的 180°模糊问题，我们采用 NWP 风向对其进行去除。

以图 1 中浮标处为中心位置的一块大小为 267×267 像素点的 SAR 子图像(对应海面 20 km×20 km，如图 3a)为例，说明基于 Mexican-hat 小波变换的海面风向反演过程。采用 Mexican-hat 小波反演海面风向时，先进行二维连续小波变换获得小波能量谱，再对其进行二维 FFT 计算风条纹的波数谱，波数谱峰值连线(实线)的垂线(虚线)就是所求风向(如图 3b)。但图 3b 中所得风向存在 180°模糊，将 NWP 风向作为比对去模糊风向。根据 WRF 风向判断，2011 年 5 月 24 日 8 时左右探测区域为东南风，去除西北向的模糊风向，可得风向的反演结果为 101.1°。

的新一代中尺度预报模式和同化系统。WRF 模式功能强大，可以进行对流天气系统模拟、天气要素预报、旋涡中尺度对流系统预报、降雨模拟等<sup>[22]</sup>。

本文采用的 WRF 风场数据的水平分辨率为 20 km，时间间隔为 1 h，能够与 SAR 探测数据时空匹配，满足高分辨率海面风场反演的需求。利用 WRF 风向作为合成孔径雷达风场反演的初始风向时，其风向信



息获取方便且不存在风向 180°模糊, 首先获取 WRF 风向, 并结合对应像元的后向散射系数及入射角信息, 共同输入地球物理模型函数(CMOD\_IFR2)计算风速, 最终获取海面风场信息。

### 1.4 10 m 等效中性风转换方法

由于基于 SAR 数据反演出的海面风速为海面 10 m 高风速, 而本文采用的浮标风速为 NDBC 提供的 46078 号浮标观测风速, 其观测高度为 5 m, 因此需将浮标风速转化为 10 m 等效风速。根据风场剖面能量法则关系式进行风速转换, 如公式(3)所示<sup>[23]</sup>:

$$u/u_r = (z/z_r)^\alpha \quad (3)$$

其中,  $u$  (m/s)是高度  $z$  (m)处的风速,  $u_r$  是参考高度  $z_r$  处的已知风速,  $\alpha$  是依赖大气稳定性的经验系数, 对于开阔水域取值为 0.11。浮标式测风速为 11.4 m/s, 通过转换风速为 12.3 m/s。

## 2 反演过程

### 2.1 基于风条纹的海面风场反演

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不存在。因此在基于风条纹的海面风场反演时, 首先需要对星载 SAR 图像进行判别, 将风条纹明显的区域提取出来, 然后对其进行海面风场反演。

采用二维 FFT 法进行海面风向反演时, 首先对 SAR 图像实施二维 FFT 变换, 然后对图像谱进行低通滤波, 再将二维波数谱峰值的连线做垂线即得到海面风向所在方向, 并利用 NWP 资料去除模糊风向, 最后将获取的风向输入到地球物理模型函数中获得相应的海面风速。图 4 为利用二维 FFT 法反演获得的 20 km 分辨率海面风场反演结果, 箭头方向表示风向, 箭头长度表示风速, 图中右上角为风速标尺, 标尺长度代表风速为 10 m/s。

采用 Mexican-hat 小波对星载 SAR 图像进行二维连续小波变换获取二维小波能量谱, 再对能量谱实施二维 FFT 变换, 将其谱峰值的连线做垂线即得到海面风向所在方向, 同样利用 NWP 去除风向模糊, 并结合地球物理模型函数计算海面风速。图 5 为利用 Mexican-hat 小波法反演获得的 20 km 分辨率海面风场反演结果。

### 2.2 WRF 风向作为初始风向的海面风场反演

外部风向选用 8 h 的 20 km 分辨率 WRF 风场数据, 与 SAR 数据探测时间仅相差 10 min, 时空分辨

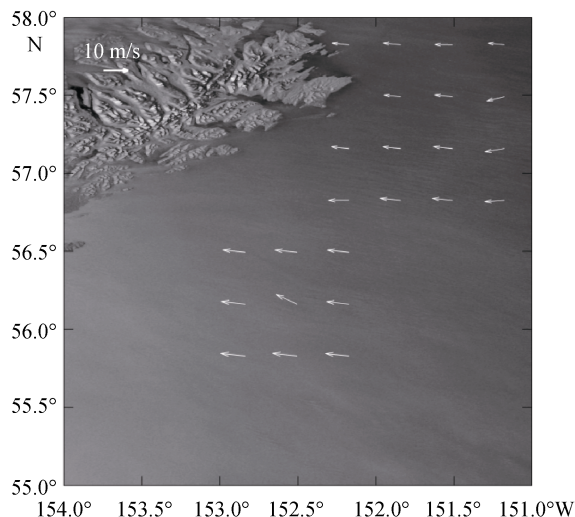


图 4 二维 FFT 法反演风场结果

Fig.4 Results of wind field retrieval by two-dimensional FFT algorithm

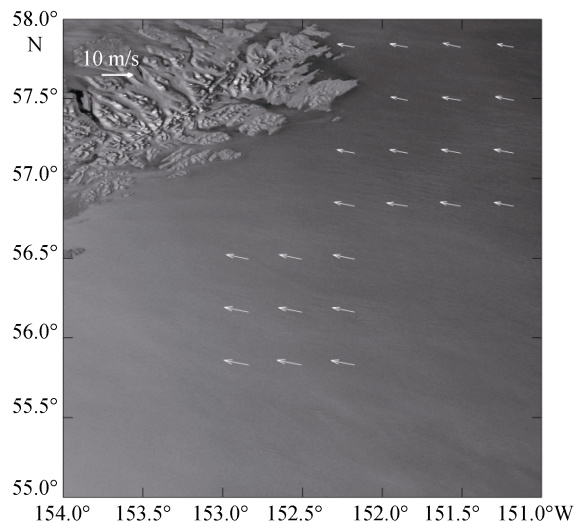


图 5 Mexican-hat 小波法反演风场结果

Fig.5 Results of wind field retrieval by Mexican-hat wavelet algorithm

率较为匹配。首先对 SAR 影像进行海陆分割, 并按 20 km 分辨率对影像进行网格化分, 最后将 WRF 风向匹配到各风场单元作为初始风向。利用地球物理模型函数计算相应的海面风速。图 6 为 SAR 影像利用 WRF 风向作为初始风向的 20 km 分辨率海面风场反演结果。

## 3 结果与分析

为验证本文提出方法的合理性, 定量分析海面风场的反演结果, 采用上述方法对图 3 中部 9 个 267×267 像素点数据块进行反演实验, 从左到右、从

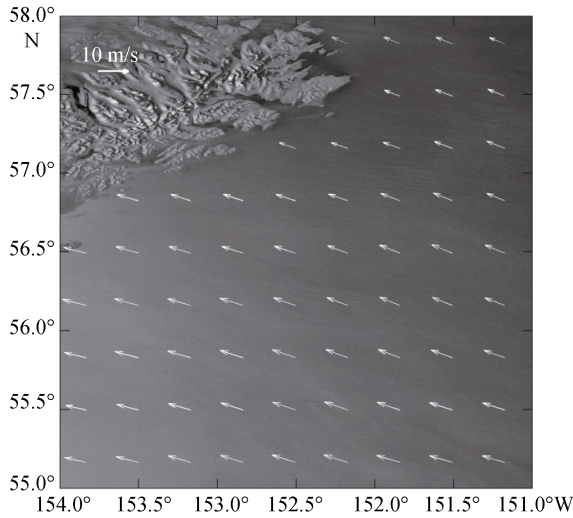


图 6 采用 WRF 风向的 20 km 分辨率风场反演结果  
Fig.6 Wind field retrieval results of 20 km resolution with WRF wind direction

上到下依次标记为 0524-01~0524-09(0524-05 数据块在最中间, 同时也是浮标所在位置), 将反演结果与浮标实测值进行对比分析。

表 1 和表 2 分别列出了 2011 年 5 月 24 日 8 时 75 m 分辨率的 VV 极化星载 SAR 数据采用 FFT 法、Mexican-hat 小波法和 WRF 风向作为初始风向 3 种方法反演所得的风向和风速结果, 以及 WRF 模式风向和风速值, 将它们分别与浮标实测值进行对比, 并计算风场反演结果与浮标实测值的均方根误差。

从表 1 的反演结果可知, 基于 Mexican-hat 小波的海面风向反演结果与浮标实测风向的均方根误差为 1.0°, 反演精度最高。基于 FFT 法的海面风向反演结果与浮标实测风向的均方根误差为 7.1°, 二者相差较大, 这是因为 Mexican-hat 小波基具有较好的紧支撑、消失矩和正则性, 且与风条纹的拟合度较好。

表 1 星载 SAR 数据海面风向反演结果

Tab.1 Results of wind direction retrieval fromspaceborne SAR image

实验数据	反演风向(°)			实测风向(°)
	FFT 法	Mexican-hat	WRF	
0524-01	95.9	101.1	107.0	
0524-02	96.1	100.9	108.1	
0524-03	95.9	100.9	109.8	102
0524-04	96.1	100.9	107.0	
0524-05	115.0	101.1	108.8	
0524-06	96.1	100.9	110.5	
0524-07	96.1	101.1	107.6	
0524-08	95.9	100.9	109.1	
0524-09	95.9	101.1	110.2	
RMS	7.1	1.0	6.7	—

表 2 星载 SAR 数据海面风速反演结果

Tab.2 Results of wind speed retrieval fromspaceborne SAR image

实验数据	反演风速(m/s)			实测风速(m/s)
	FFT 法	Mexican-hat	WRF	
0524-01	13.0	13.0	12.0	
0524-02	13.0	13.0	11.9	
0524-03	12.4	12.4	11.6	12.3
0524-04	12.8	12.8	11.2	
0524-05	12.6	12.2	11.0	
0524-06	11.8	11.8	10.9	
0524-07	11.9	11.9	10.1	
0524-08	11.8	11.8	9.2	
0524-09	11.4	11.4	9.5	
RMS	0.56	0.55	1.76	—

例如,表1中0524-05数据的FFT法反演结果为 $115^{\circ}$ ,与浮标实测风向相差 $13^{\circ}$ 。这说明FFT法的反演结果波动性较大,Mexican-hat小波基在风向反演中表现出较好的稳定性,能够胜任高精度的星载SAR海面风向反演。WRF模式风向与浮标实测风向的均方根误差为 $6.7^{\circ}$ ,反演精度略高于FFT法,但低于Mexican-hat小波法。

本文采用的地球物理模型函数为CMOD\_IFR2模型,该模型在风速大于 $10\text{ m/s}$ 时对反演结果进行了修正,根据浮标实测值判断,适用于该区域的风速反演。从表2的反演结果可知,基于FFT法反演的海面风速反演结果与浮标实测风速的均方根误差为 $0.56\text{ m/s}$ ,基于Mexican-hat小波的海面风速反演结果与浮标实测风速的均方根误差为 $0.55\text{ m/s}$ ,二者比较接近;基于WRF模式风向反演的海面风速与浮标实测风速的均方根误差为 $1.76\text{ m/s}$ ,误差较大,其原因是WRF模式风向与浮标实测风向误差较大且稳定性较差,影响其风速反演结果。基于Mexican-hat小波的海面风速反演结果精度较高,与浮标风速比较吻合。图7为基于SAR影像纹理特征和外部风向信息相结合反演的海面风场图,即将图5中采用Mexican-hat小波法反演出的风矢量替换至图6中相应的区域。该方法在稳定可靠的外部风向数据的基础上,充分利用Mexican-hat小波法与风条纹拟合程度较好及其海面风向反演精度较高的特性,在SAR图像中线性纹理特征明显的区域采用Mexican-hat小波法反演海面风向,其它区域采用高时空分辨率的WRF数值预报模式风向作为初始风向,并利用地球物理模型函数通过分析解算得到海面风速。该方法适用于大范围的星载SAR海面风场反演,为未来开拓星载SAR海面风场反演的业务化应用提供了重要支撑。

## 4 结论

本文以2011年阿拉斯加湾西部近岸的一组ENVISAT/ASAR实测数据为例,研究了基于影像纹理特征和外部风向信息的星载SAR海面风场反演技术。首先在SAR影像纹理特征明显的区域,利用小波分析的时-频局部化特性,采用Mexican-hat小波法反演高精度的海面风向,同时在其他区域采用高时空分辨率WRF数值预报模式风向作为初始风向,并结合地球物理模型函数计算相应的海面风速。Mexican-hat小波基具有良好的紧支撑、消失矩、正

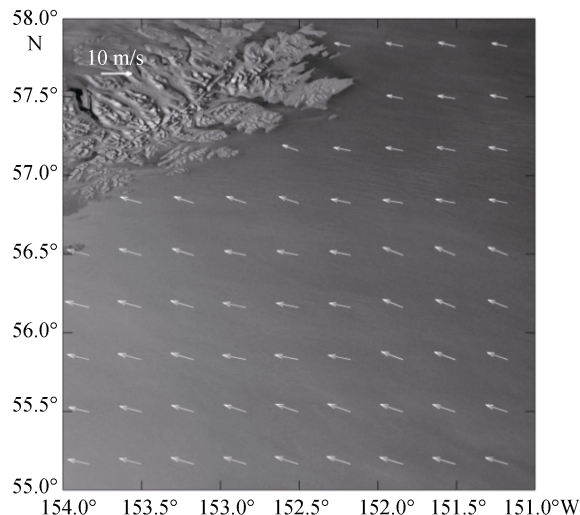


图7 基于风条纹和外部风向信息的SAR图像风场反演结果

Fig.7 Wind field retrieval results of combining wind streaks with external wind direction

则性等特性,并且同风条纹有较好的拟合程度,其反演结果较为理想,且没有明显的偏离值。将反演结果与浮标实测数据进行比对分析,验证该方法的有效性。结果表明,在信噪比较高、风条纹较为明显的区域,Mexican-hat小波的风向反演结果均方根误差最小,仅为 $1.0^{\circ}$ ,其精度在整体上优于FFT法和WRF风向作为初始风向的反演方法,说明小波的时-频局部化特性在海面风向的反演中表现出色,有利于提取高精度的海面风向;而WRF模式风向的精度虽然低于Mexican-hat小波法,但比FFT法略高,且与SAR观测图像时空匹配,有效地弥补了风条纹风向的不足,因此采用其作为外部风向信息填充到线性纹理特征不明显的区域,二者结合组成了完整的星载SAR反演大范围、高分辨率海面风场的方法,这对实现SAR图像无缺失、全覆盖海面风场反演具有重要意义。

### 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.
- [2] 王蕊.全极化微波辐射计遥感海面风场研究[D].南京:中国人民解放军理工大学气象学院,2008.
- [3] 王迎强.GNSS反射信号遥感技术研究[D].南京:中国人民解放军理工大学气象学院,2009.
- [4] Lin H, Xu Q, Zheng Q. An overview on SAR measurements of sea surface wind[J]. Progress in Natural

- Science, 2008, 18(8): 913-919.
- [5] 杨劲松, 黄韦良. 合成孔径雷达图像的近岸海面风场反演[J]. 遥感学报, 2001, 5(1): 13-16.
- [6] Chris O, Shaun Q. Understanding synthetic aperture radar images [M]. Johnson: Science Technology Publishing, 2004: 11-14.
- [7] 李海艳, 杜涛. 海洋内波 SAR 影像成像理论[J]. 海洋科学, 2005, 10: 86-89.
- [8] 黄韦良. 摘要集锦——浅海水下地形的星载合成孔径雷达遥感[J]. 海洋科学, 1995, 6: 26.
- [9] Ulaby F T, Moore R K. Microwave remote sensing-radar remote sensing and surface scattering and emission theory [M]. London: Addison-Wesley Publishing Company, 1982: 245.
- [10] Vachon P W, Dobson F W. Validation of wind vector retrieval from ERS-1 SAR images over the ocean[J]. The Global Atmosphere and Ocean System, 1996, 5: 177-187.
- [11] Wolfgang K. Directional Analysis of SAR Images Aiming at Wind Direction[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(4): 702-710.
- [12] 姜祝辉, 黄思训, 杜华栋, 等. 利用变分结合正则化方法对高度计风速资料调整海面风场的研究[J]. 物理学报, 2010, 59(12): 8968-8977.
- [13] 艾未华, 孔毅, 赵现斌, 等. 基于小波的多极化机载合成孔径雷达等海面风向反演[J]. 物理学报, 2012, 61(14): 148403.
- [14] Levy G, Brown R A. Detecting planetary boundary layer rolls from SAR[C] //Brown R A. Remote Sensing of the Pacific Ocean from Satellites. Australia: Earth Ocean and Space, 1998: 128-134.
- [15] Horstmann J, Koch W, Lehner S. Wind retrieval over the ocean using synthetic aperture radar with C-band HH polarization[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Society, 2002, 38(5): 2122-2131.
- [16] 张毅, 蒋兴伟, 宋清涛. 基于外部风向初始信息的 SAR 影像海面风场反演研究[J]. 遥感技术与应用, 2011, 26(4): 461-468.
- [17] Monaldo F, Thompson D R. A systematic comparison of QuikSCAT and SAR ocean surface wind speeds[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(2): 283-291.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 孔毅, 赵现斌, 艾未华, 等. 基于墨西哥帽小波变换的机载 SAR 海面风场反演[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2011, 12(3): 301-306.
- [21] Haltiner G J. Numerical weather prediction[M]. New York: John Wiley & Sons, 1971.
- [22] 章国才. 美国 WRF 模式的进展和应用前景[J]. 气象, 2004, 30(12): 27-31.
- [23] 张婷, 张杰, 王进, 等. HY-2 扫描辐射计风速数据产品与平台基观测数据的比较研究[J]. 海洋科学, 2014, 38(6): 43.

## Ocean wind retrieval from spaceborne synthetic aperture radar images based on wind streaks and external wind direction

CHENG Yu-xin, AI Wei-hua, KONG Yi, ZHAO Xian-bin

(Institute of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China)

Received: Oct., 27, 2014

**Key words:** Spaceborne synthetic aperture radar; wavelet transform; external wind direction; ocean wind field

**Abstract:** The accuracy of synthetic-aperture-radar (SAR)-retrieved ocean wind direction based on wind streak texture features is high, but it heavily relies on wind streaks; moreover, it is not easy to match the space- and time-scale resolutions of low-precision external wind direction with SAR data. This affects the retrieval accuracy of large-area and high-resolution sea surface wind field data. Therefore, in this study, we propose a method for retrieving ocean wind data from spaceborne SAR images, which combines wind streak texture features with the external wind direction. We apply a two-dimensional continuous wavelet transform to obtain accurate surface wind



direction in areas where the texture features of SAR images are obvious and derive the wind direction from a numerical weather prediction model to fill the rest of the area. We then use a C-band empirical model to calculate wind speed, thus retrieving sea surface wind field data with high precision and at a broad range. To verify the validity of this method, we perform a windfield retrieval experiment using ENVISAT/ASAR sounding data and compare the retrieval results with buoy data. The results show that the retrieval accuracy using the wavelet method is better than that using the fast Fourier transform method and numerical prediction models, while the external wind direction of slightly low precision agrees better with the SAR observation data in space and time scale and makes up the deficiency of the wind streaks. A combination of both methods can support industry applications for ocean wind field retrieval from spaceborne SAR images.

(本文编辑: 李晓燕)