

基于小波的多极化机载合成孔径雷达海面风向反演*

艾未华[†] 孔毅 赵现斌

(解放军理工大学气象学院, 南京 211101)

(2011年10月26日收到; 2011年12月17日收到修改稿)

为了实现从合成孔径雷达 (SAR) 图像本身提取高精度的海面风向信息, 提高 SAR 海面风场反演精度, 研究了多极化机载 SAR 海面风向反演技术, 借助小波分析相对傅里叶分析和局部梯度更精细的时-频分析能力, 将二维连续小波变换与快速傅里叶变换 (FFT) 相结合, 提出一种新的机载 SAR 海面风向反演方法. 为验证反演方法的有效性, 通过海上同步飞行试验获取多极化机载 SAR 数据及同步调查船实测风向数据, 用于反演试验的数据比对. 采用本文提出的方法, 利用多种小波基对机载 C 波段 SAR 的同极化和交叉极化数据进行风向反演, 将反演结果与美国国家环境预报中心再分析资料以及调查船实测风向进行比对. 结果表明, 本文提出的基于小波分析的海面风向反演方法适用于机载 SAR 探测数据, 反演精度优于二维 FFT 法和局部梯度方法; 小波基的选择对反演结果影响较大, Mexican-Hat 小波基是机载 SAR 海面风向反演的最优小波基, 且同极化与交叉极化机载 SAR 数据均可用于海面风向的反演.

关键词: 机载 SAR, 海面风向, 小波分析, 多极化

PACS: 84.40.Xb, 92.60.Gn

1 引言

海面风场是海洋上层运动的主要动力来源, 几乎与海洋中所有的物理过程关系密切, 是研究海洋动力过程的重要基础. 微波散射计是大范围海面风场的遥感观测的有效方法. 但微波散射计分辨率较低, 通常的空间分辨率为 12.5—25 km, 不能满足某些高空间分辨率风场数据的应用需求, 尤其不能满足海岸带和岛屿区的观测要求. 合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 原理上相当于成像散射计, 具有全天候、全天时、高空间分辨率等特点, 可用于提取高精度的海面风场, 弥补微波散射计的不足. 海面风场遥感探测的主要平台是卫星, 受轨道的限制, 星载 SAR 探测不能满足定时定点的需求; 机载 SAR 机动性较好, 可对区域海面风场实施精细化探测. 利用 SAR 探测数据反演海面风场, 通常先获取海面风向信息, 再将已知相对风向、定

标后的 VV 极化 SAR 图像后向散射截面数值以及入射角作为 CMOD4, CMOD_IFR2, CMOD5 等经验反演模型的输入^[1,2], 通过迭代计算可得到海面风速. 因此, 较为准确的海面风向是获取高精度海面风场的基础. 目前, 常用的方法是利用数值预报值或散射计的海面风向信息作为 SAR 海面风速反演模型输入^[3-6], 通过分析解算得到 SAR 海面风场. 但通常这些海面风向信息的空间分辨率相对较低, 且与 SAR 探测时间不一致, 影响 SAR 海面风场反演的精度. 因此, 有必要研究直接从 SAR 图像本身提取海面风向信息以解决海面风向与 SAR 图像的时空不一致的问题, 提高海面风场反演的精度.

由于大气海洋边界层的不稳定性, 在平均海面风场之上形成螺旋状大气边界层涡旋, 其作用于海面使海面产生辐聚和辐散, 从而改变了海面粗糙度, 在 SAR 图像上则体现为黑白相间的风条纹^[7,8]. 大量观测和理论研究表明, 大气边界层涡旋的轴线方向与海面风矢量的方向基本一致^[9],

* 国家自然科学基金 (批准号: 41005018)、解放军理工大学气象学院基础理论基金 (批准号: 201001) 和中国气象局大气物理与大气环境重点实验室基金 (批准号: KDW1105) 资助的课题.

[†] E-mail: awh1979@126.com

因此可通过提取 SAR 图像上的风条纹信息获取海面风向. 文献 [10] 对 SAR 图像实施二维快速傅里叶变换 (FFT), 通过计算低波数谱获取海面风向信息; 杨劲松等 [11] 采用二维 FFT 法获取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. 文献 [12] 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 $10\text{ km} \times 10\text{ km}$ 提高至 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$. 文献 [13, 14] 提出基于 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. 文献 [15—17] 采用小波分析方法研究了 SAR 图像的海面风向反演, 但未对多种小波基的反演结果以及交叉极化数据的反演效果进行分析比较.

本文研究基于小波的多极化机载 SAR 海面风向反演技术, 利用小波分析的时-频局部化特性, 将二维连续小波变换与 FFT 相结合提出一种新的机载 SAR 海面风向反演方法. 为验证反演方法的有效性, 我们开展海上同步飞行试验, 利用多极化机载 SAR 对海探测获取海面 SAR 图像, 同时将调查船开至 SAR 探测区域, 获取同步海面风向信息用于数据比对. 采用多种海面风向反演方法对两组中国南海的机载 SAR 实测数据进行反演试验, 将反演结果与美国国家环境预报中心 (NCEP) 再分析资料以及实测数据进行比对. 结果表明, 在机载 SAR 海面风向反演方面, 本文提出的方法优于传统的二维 FFT 法和 LG 局部梯度法, 验证了其有效性; 而小波基的选择对反演结果影响较大; 在多极化 SAR 海面风向反演方面, 同极化与交叉极化机载 SAR 数据均可用于海面风向的反演.

2 SAR 反演海面风场的物理机制

SAR 是主动式遥感仪器, 通过向海表面发射电磁波测量海面的后向散射系数. 在雷达入射角为 20° — 70° 的条件下, SAR 测量的后向散射系数主要是由于海表面厘米尺度的表面波与电磁波发生布拉格共振引起, 其关系表达式为

$$k_r = 2k_{em} \sin \theta, \quad (1)$$

其中, k_r 为共振波数, k_{em} 为电磁波波数, θ 为电磁波的入射角. 小尺度的海面粗糙度对海面风场有重要的影响, 可从 SAR 后向散射系数提取出海面风场的信息. 在通常情况下, SAR 图像上存在与海

面风向平行的风条纹, 通过对风条纹的分析可得到海面风向信息. 二维 FFT 法和局部梯度法都是利用 SAR 图像风纹理计算海面风向. 小波分析是在傅里叶分析的基础上发展起来的新的信号处理方法, 具有较好的时-频局部化分析能力, 通过自动调节时-频窗实现信号的精细化分析. 因此, 可将小波分析技术应用于 SAR 图像风条纹信息的提取, 以获取比传统方法更好的海面风向反演结果.

3 二维连续小波变换

小波分析可实现信号的多尺度分析, 被誉为信号处理中的“数学显微镜”. 用传统的傅里叶变换分析信号的频谱, 只能对信号在整个时域内的频谱做分析, 难以做到局部的时-频分析. 虽然可以通过加窗函数对信号做局部化分析处理, 但会带来频谱泄漏, 存在局部化格式固定的缺点, 难以自适应地处理奇异信号和非平稳信号. 小波变换则克服了上述缺点, 具有能够平移和伸缩的特性, 可以在时域和频域上同时进行局部化处理.

(2) 式为小波基函数, $\psi_{a,b}(t)$ 是由小波母函数 $\psi(t)$ 经平移和缩放的结果, a 称为尺度因子, b 为缩放因子.

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \psi \left(\frac{t-b}{a} \right) \quad a, b \in R, a \neq 0. \quad (2)$$

利用这组小波基函数可以对任意信号 $f(x)$ 进行分解, 即进行小波变换, 将函数 $f(x)$ 投影到整个函数族. (3) 式为连续小波变换, $(W_\psi f)(a, b)$ 为一维连续小波变换后得到的小波系数.

$$(W_\psi f)(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \bar{\psi} \left(\frac{x-b}{a} \right) dx. \quad (3)$$

可将 SAR 图像看成二维信号, 需采用二维连续小波变换进行处理, 如 (4) 式所示:

$$(W_\psi f)(a_x, b_x; a_y, b_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{\psi}_{(a_x, b_x)}(x) \times \bar{\psi}_{(a_y, b_y)}(y) f(x, y) dx dy. \quad (4)$$

对于图像这种二维信号, 小波变换遵守能量守恒法则, 二维信号的能量守恒公式如 (5) 式所示:

$$\begin{aligned} E_f &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |f(x, y)|^2 dx dy \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{E_w(a)}{C_\psi a^2} da, \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $C_\psi = \int_{-\infty}^{\infty} (|\psi(\omega)|^2/|\omega|)d\omega$ 为容许性条件, $E_w(a) = \int_{-\infty}^{\infty} |(W_\psi f)_a(x, y)|^2 dx dy$ 为与二维连续小波尺度因子 a 相关的小波能量谱.

4 海面风向反演方法

4.1 局部梯度法

在 SAR 图像中, 理想风条纹的幅度在其方向上是个常量, 但在其方向的垂线方向上变化值最大, 也就是理想风条纹方向与它的梯度方向垂直, 因此可以通过求解风条纹的梯度方向进而求出海面风向 [7,18].

通过优化过的 Sobel 算子 D_x 和 D_y 来计算局部梯度的构成. 将 SAR 图像分解为若干子图像, 某个子图像 A 的梯度构成为: $G' = (D_x + iD_y) * (A)$, $*$ 表示卷积, 其中 D_x 和 D_y 分别为

$$\begin{cases} D_x = \frac{1}{32} \begin{bmatrix} 3 & 0 & -3 \\ 10 & 0 & -10 \\ 3 & 0 & 3 \end{bmatrix} \\ D_y = D_x^T \end{cases} \quad (6)$$

利用算子 R 对梯度的平方与平方的模做平滑, 分别表示为: $G'' = R * (G^2)$, $G''' = R * (|G|^2)$. 一致性参数 C 应符合 $0 \leq C = \frac{|G''|}{G'''} \leq 1$. 计算完子图像的梯度后, 由于经过卷积运算后矩阵的维数会增加, 应该去掉梯度矩阵第一和最后一行、列, 才能得到矩阵内部的正确结果. 通过计算机载 SAR 图像的局部梯度, 选择频率最高的梯度方向作为所求风向.

4.2 Gabor 变换法 [13,19]

Gabor 函数具有方向性, 可在时域和频域中获取理想的位置信息, 用于 SAR 图像的风条纹增强和风向检测. 二维 Gabor 函数定义如下:

$$g_{uv}(x, y) = \frac{k^2}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{k^2(x^2 + y^2)}{2\sigma^2}\right) \times \left[\exp\left(ik \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}\right) - \exp\left(-\frac{\sigma^2}{2}\right) \right], \quad (7)$$

其中

$$k = \begin{pmatrix} k_x \\ k_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_v \cos \varphi_u \\ k_v \sin \varphi_u \end{pmatrix}, \quad (8)$$

$$k_v = 2^{-\frac{v+2}{2}} \pi, \quad (9)$$

$$\varphi_u = u \frac{\pi}{K}, \quad (10)$$

v 的取值决定 Gabor 滤波器长度, u 的取值表示 Gabor 核函数的方向, K 表示总的方向数, 参数 σ/k 决定了高斯窗口的大小. 对 SAR 图像实施二维 Gabor 变换, 再对低通滤波后的 Gabor 变换系数采用二维 FFT 法, 谱连线最大值的垂线方向即为海面风向所在方向.

4.3 基于小波的海面风向反演方法

机载 SAR 图像分辨率较高, 可采用更为精细的方法来提取海面风向信息. 小波分析在时域和频域同时实现局部化功能, 且能自动调节时 - 频窗来适应实际分析的需求, 可作为机载 SAR 海面风向反演的一种有效方法, 具体反演流程如图 1 所示.

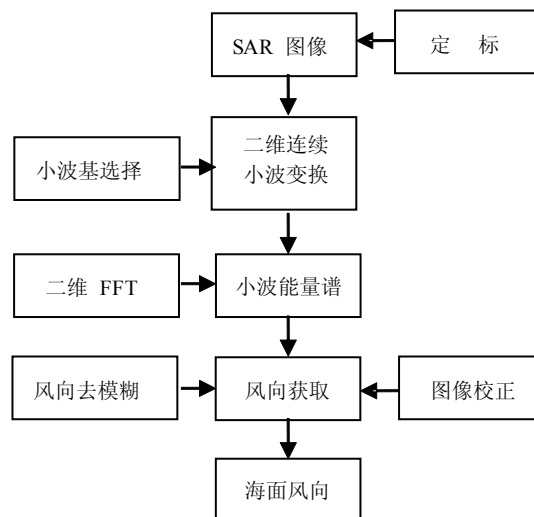


图 1 基于小波的机载 SAR 海面风向反演流程图

选择合适的小波基对定标后的机载 SAR 图像进行二维连续小波变换, 将 SAR 图像投影到二维小波域中, 利用小波分析的多尺度时 - 频局部化能力, 分析不同尺度下的小波能量谱图像, 获取 SAR 图像的风条纹信息. 对小波能量谱图像实施二维 FFT 法, 将二维波数谱峰值的连线做垂线, 结合风向去模糊方法和图像校正即可得到海面风向. SAR 图像

谱的计算方法如 (11) 式所示:

$$Y_{l,m} = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N X_{j,k} e^{-2\pi i(jl+km)/N}, \quad (11)$$

其中, Y 为图像波数谱, X 为图像灰度值, N 为图像尺寸, $l, m = 1, 2, \dots, N$.

从 (4) 式可知, 小波变换是将信号 $f(x)$ 以小波基 $\psi(x)$ 为核函数的积分变换, 选择不同小波基变换所得的小波能量谱不同. 因此, 针对机载 SAR 图像选择何种小波基进行变换将直接影响海面风向反演的结果. 通常选择具有较好的正交性、对称性、紧支撑、消失矩和正则性的小波基进行小波变换, 提取海面风向信息. 但不同小波基所得反演结果不同, 因此需要通过实验, 将反演结果与调查船实测结果进行比较, 确定适用于机载 SAR 的最优小波基. 通过理论与实际的反演试验, 我们认为 Mexican-Hat 小波在机载 SAR 海面风向反演方面可获得较好的反演效果. Mexican-Hat 小波的小波函数为高斯函数的二阶导数, 如下式:

$$\psi(x) = (x^2 - 1)e^{-\frac{x^2}{2}}, x \in R. \quad (12)$$

二维 Mexican-Hat 母小波函数 $\psi(x)$ 是一维 Mexican-Hat 小波母函数的反投影结果, 是时域和频域的窗函数, 具有任意阶的正则性, 同时具有较好的时域和频域局部化特性及信号能量集中特性. 二维 Mexican-Hat 小波函数可表示为 [20,21]

$$\psi(x, y) = (2 - (x^2 + y^2))e^{-(x^2 + y^2)/2}. \quad (13)$$

5 海面风向反演结果及分析

5.1 试验数据

本文采用的试验数据是机载 SAR 探测的 C 波段多极化数据, 包含 VV 极化、HH 极化、HV 极化和 VH 极化四种数据. 两组机载 SAR 数据的探测时间分别为北京时间 2009 年 2 月 21 日 15 时和 3 月 9 日 10 时, 调查船实测风速 (海面 10 m 高度处) 分别为 6.5 m/s 和 8.3 m/s; SAR 探测区域和调查船所在区域均在北纬 19°, 东经 111° 附近; 数据图像分辨率分 7.5 m 和 5 m 两种, 载机飞行高度约为 5500 m, 起始斜距约为 7200 m. NCEP 再分析资料是美国环境预报中心和国家大气研究中心联合对外发布的 6 h 再分析资料, 该资料每日四个时次 (世界时 00 h, 06 h, 12 h 和 18 h), 经纬度网格距为 1°×1°. 调查船实测数据和 NCEP 再分析资料数

据的海面风向均为海面 10 m 高度处风向. NCEP 再分析资料用于去除反演风向的 180° 模糊和海面风向的总体趋势分析; 调查船实测风向用于反演精度的定量比对.

5.2 风向反演

利用二维 FFT 法、局部梯度法、Gabor 变换法以及本文提出的小波分析方法对机载多极化 SAR 数据进行反演实验获取海面风向 (海面 10 m 高度处), 并将反演结果与调查船实测风向以及 NCEP 再分析资料进行比对. 以 2009 年 3 月 9 日 10 时数据为例, 说明以上方法反演海面风向的过程. 图 2 是机载 SAR 的 VV 极化图像, 载机朝西南方向飞行, 雷达视向为左侧视; 图像分辨率是 5 m 每像素, 图像中心经纬度约为 (110.572°, 19.083°); 调查船位于机载 SAR 探测区域附近, 实测风向为 26°. 取图 2 白色方框区域进行反演试验, 该区域大小为 128×128, 从图 7 可看出该区域在我国海南岛东部近岸.

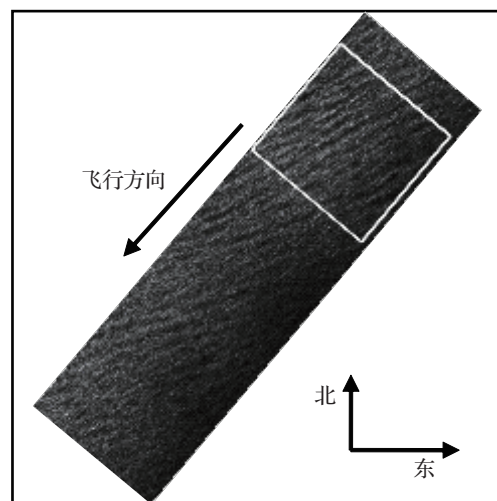


图 2 机载 SAR 图像

采用二维 FFT 法对图 2 所选区域 (白色框) SAR 图像进行海面风向反演. 对 SAR 图像实施二维 FFT 法, 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为海面风向所在方向, 图 3 中直虚线方向即为海面风向的所在方向.

在采用局部梯度法时, 通过优化过的 Sobel 算子来计算局部梯度的构成, 利用算子 R 对梯度的平方与平方的模做平滑, 选择频率最高的梯度方向的法线方向作为所求风向. 局部梯度法反演风向结果见图 4, 图中直虚线所示方向为海面风向所在方向.

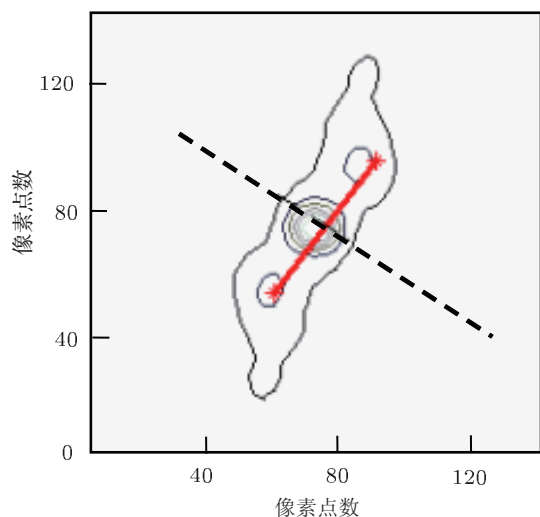


图3 二维 FFT 法海面风向反演示意图

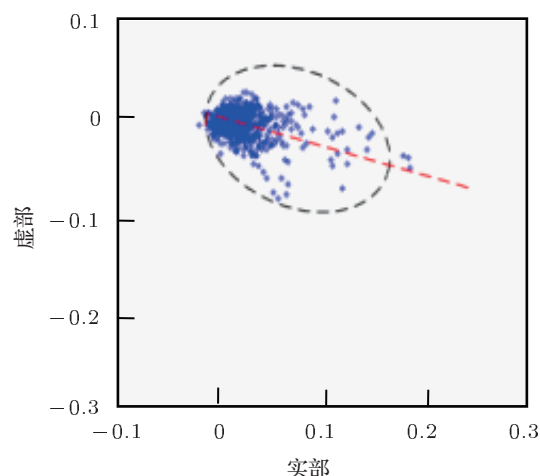


图4 局部梯度法海面风向反演示意图

在采用小波法反演海面风向时, 尺度变换因子 a 决定了小波基函数紧支撑集的大小和小波基函数的形状, 在 a 值不同情况下所得连续小波能量谱不同. SAR 图像二维连续小波变换的小波能量谱体现图像与小波基函数的拟合程度, 小波系数越大, 说明信号的波形与小波形吻合性越高; 从 (5) 式可知, 图像的小波能量谱是尺度因子 a 的函数. 因此, 选择何种二维连续小波变换尺度直接影响海面风向反演结果. 大量试验表明, 当二维连续小波变换的分解尺度 $a = 8$ 时获取的海面风速反演效果较好. 图 5 为该尺度下机载 SAR 图像的小波二维能量谱图.

采用 Mexican-Hat 小波对机载 SAR 图像在尺度 $a = 8$ 时进行二维连续小波变换获取二维小波能量谱, 再利用 (11) 式对能量谱图实施二维 FFT 法, 将其谱峰值连线做垂线即为海面风向所在方向. 如图 6 所示, 直虚线方向即为风向的所在方向.

NCEP 再分析资料的空间分辨率为经纬度网格距为 $1^\circ \times 1^\circ$, 每 6 h 发布一次. 机载 SAR 探测时间为北京时间 10 时, 与之相关的 NCEP 资料时间应为世界时 00 时和 06 时, 如图 7 所示. 从该图可知, 海面上大片区域的风向基本是一致的, 为东南风向; 由于受到建筑物等影响, 海岛内风向发生改变, 风速减小. NCEP 再分析资料提供的海面风场时间和空间分辨率较低, 无法直接得到机载 SAR 探测区域的风向信息, 但可分析出总的海面风场趋势, 用于去除风向的 180° 模糊. 因此, 我们取与 SAR 探测区域空间距离最为接近的网格点, 即北纬 19° , 东经 111° 点上的海面风向进行比对. 从图 7 可看出, 该点的 00 时风向为 24.19° , 06 时风向为 25.46° , 与调查船实测海面风向接近.

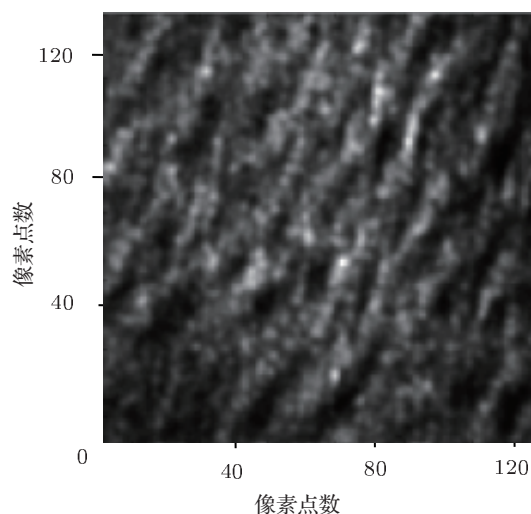


图5 机载 SAR 图像二维小波变换能量谱图 ($a = 8$)

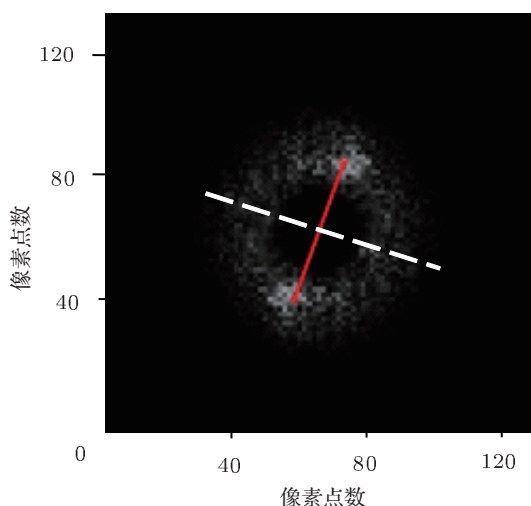


图6 基于 Mexican-Hat 小波的机载 SAR 海面风向反演示意图

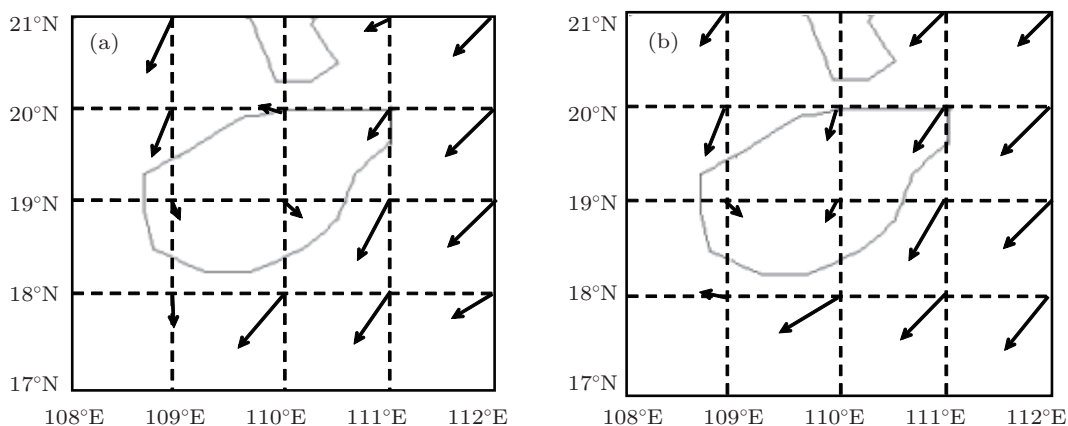


图7 NCEP 资料风场图 (a) 00 时; (b) 06 时

5.3 结果及分析

为验证本文所提出方法的有效性, 定量分析海面风向反演的结果, 采用以上方法对多极化机载 SAR 图像的多个区域进行反演试验, 这些区域在北纬 19°, 东经 111° 附近. 采用小波方法反演海面风向时, 利用多种小波基进行反演实验, 以测试不同小波基的反演效果.

表 1 和表 2 分别列出了 2009 年 2 月 21 日 15 时和 3 月 9 日 10 时的 5 m 分辨率的 VV 极化机载 SAR 图像采用 FFT 法、局部梯度法、Gabor 变换法以及采用 Morlet、DOG 和 Mexican-Hat 三种小波基的小波方法反演结果, 将结果与 NCEP 再分析资料、调查船实测风向进行比较, 计算了风向反演结果与实测风向的均方根误差. NCEP 再分析资料取北纬 19°, 东经 111° 点风向信息, 表 1 中为 06 时和 12 时海面风向, 结果分别为 96.1° 和 142.1°; 表 2 中为 00 时和 06

时海面风向, 结果为 24.19° 和 25.46°. 从这两组数据可看出, 由于 NCEP 数据和调查船实测数据在空间和时间有较大差别, 因而出现海面风向的不一致.

从表 1 和表 2 的反演结果可知, 基于 Mexican-Hat 小波的海面风向反演结果与实测值相比较的均方根误差分别为 9.1° 和 3.2°, 反演精度最高, 采用 Morlet 小波和 DoG 小波反演所得风向与实测风向的均方根误差在 50° 左右, 且部分图像的反演结果出现很大误差, 这是由于 Mexican-Hat 小波基具有较好的紧支撑、消失矩和正则性, 且与风条纹的拟合程度较好. 例如, 表 1 中 0221125 数据的 Morlet 小波基的反演结果为 268.0°, 与实测风向相差 124°. 这说明不同的小波基对于风向反演结果的影响很大, Mexican-Hat 小波基在风向反演中表现出较好的稳定性, 适用于机载 SAR 海面风向的反演. 在实际试验中, 我们还测试了其他小波基, 但反演效果不理想.

表 1 VV 极化机载 SAR 数据海面风向反演结果 (单位: (°)) (2009-02-21)

试验数据	FFT 法	局部梯度法	Gabor 变换法	小波法			NCEP 资料		实测风向
				Morlet	DoG	Mexican-Hat	06 时	12 时	
0221015	196.0	163.0	178.0	182.7	161.2	164.0			
0221025	202.6	170.0	244.8	176.1	156.0	157.4			
0221115	206.8	145.0	214.8	183.3	157.5	158.3			
0221125	196.0	165.0	159.5	268.0	164.7	164.0	96.1	142.1	170.0
0221215	200.4	159.0	151.4	178.0	166.9	168.5			
0221225	201.7	158.0	156.6	177.0	160.2	163.1			
RMS	33.8	13.9	40.5	44.9	10.6	9.1	—	—	—

表2 VV 极化机载 SAR 数据海面风向反演结果 (单位: (°)) (2009-03-09)

试验数据	FFT 法	局部梯度法	Gabor 变换法	小波法			NCEP 资料		实测风向
				Morlet	DoG	Mexican-Hat	06 时	12 时	
0309017	9.4	16.0	20.4	83.6	4.4	26.6			
0309027	23.1	35.0	57.9	63.4	5.2	20.6			
0309037	15.6	22.0	23.0	150.0	115.0	28.3			
0309117	18.4	24.0	42.1	59.0	120.9	28.3	24.19	25.46	26.0
0309127	10.4	24.0	30.7	29.1	41.6	26.6			
0309217	26.5	11.0	43.2	45.0	39.8	23.2			
0309227	11.3	11.0	26.5	84.8	37.2	22.4			
RMS	12.3	10.4	13.5	64.5	55.3	3.2	—	—	—

在 FFT 法、局部梯度法和 Gabor 变换法这三种风向反演方法中, Gabor 变换法的反演结果较差, 个别数据出现了较大的偏差. 因为 Gabor 变换本质是一种窗口傅里叶变换, 虽然通过加窗函数对图像做局部化分析处理, 但其时 - 频窗固定, 无法实现时 - 频同时局部化, 难以自适应地处理奇异信号和非平稳信号, 因而反演效果不理想. 例如, 2 月 21 日数据的均方根误差在 40° 左右, 而 0221025 数据的反演值为 244.8°, 存在较大误差. 局部梯度法的反演结果较为稳定, 这与相关文献中星载 SAR 图像海面风向反演的结论是一致的 [1,2,22], 即局部梯度法的反演精度要优于二维 FFT 法.

因此, 不难看出, 基于连续小波变换的机载 SAR 海面风向反演方法, 在采用 Mexican-Hat

小波基时其反演精度明显优于局部梯度法、二维 FFT 法以及 Gabor 变换法, 体现了小波分析在时 - 频局部化方面的优越性, 证实了前文所述观点.

为验证不同分辨率机载 SAR 图像对海面风向反演结果的影响, 对同一区域 5 m 和 7.5 m 分辨率的图像进行反演试验. 采用反演效果较好的 Mexican-Hat 小波法和局部梯度法对 2 月 21 日 15 时和 3 月 9 日 10 时 7.5 m 分辨率的机载 SAR 数据进行风向反演, 结果如表 3 所示. 通过对比分析探测分辨率分别为 5 m 和 7.5 m 时的风向反演结果不难看出, 两种分辨率的机载 SAR 图像都适用于海面风向的反演, 高分辨率的机载 SAR 探测数据反演精度略高.

表3 7.5 m 分辨率机载 SAR 数据海面风向反演结果 (单位: (°))

试验数据	反演结果		观测值	试验数据	反演结果		观测值
	小波法	梯度法			小波法	梯度法	
2009-02-21				2009-03-09			
0221017	163.3	161.0		0309017	12.5	19.0	
0221027	160.6	139.0		0309027	25.0	13.0	
0221117	151.4	145.0		0309037	25.0	15.0	
0221127	151.4	147.0	170.0	0309117	22.3	14.0	26.0
0221217	168.5	153.0		0309127	18.4	7.0	
0221227	168.5	149.0		0309217	21.8	11.0	
	—			0309227	12.5	11.0	
RMS	12.9	24.2	—	RMS	8.7	14.7	—

表4 多极化机载 SAR 数据反演结果 (单位: (°))

数据方法	FFT 法	2009-2-21-15		数据方法	FFT 法	2009-3-9-10	
		局部梯度法	小波法			局部梯度法	小波法
VV	33.8	13.9	9.1	VV	12.3	10.4	3.2
HH	33.9	8.51	9.58	HH	10.1	4.3	3.2
HV	32.3	13.2	9.48	HV	13.4	9.5	3.5
VH	31.5	10.4	9.55	VH	11.6	9.2	3.4

多极化 SAR 可获取同一目标同极化和交叉极化的后向散射系数, 即可同时拥有 VV, HH, HV 和 VH 四种数据. 为测试各种极化数据的反演效果, 采用 FFT 法、局部梯度法和 Mexican-Hat 小波法对 5 m 分辨率的机载 SAR 数据的多个区域进行反演试验, 并与实测风向比较, 计算均方根误差, 结果如表 4 所示. 不难看出, 各种极化方式数据的反演结果均方根误差比较接近, 均适用于海面风向的反演, 同极化数据的反演结果要略优于交叉极化.

6 结论

本文以 2009 年中国南海海域两组机载 SAR 实测数据为例, 研究了基于二维连续小波变换的多极化机载 SAR 海面风向反演技术. 采用多种方法进行反演试验, 将反演结果与调查船实测数据比对, 验证方法的有效性. 小波基的选择对于风向反演的影响较大, 由于 Mexican-Hat 小波基良好的紧支撑、消失矩、正则性等特性以及与风条纹较好的拟合程度, 其反演结果最为理想, 没有明显偏离真值. Mexican-Hat 小波的风向反演结果均方根误差最小, 其精度在整体上优于二维 FFT 法、局部梯度

法以及 Gabor 变换法, 说明小波分析的时-频局部化功能最好, 有利于对 SAR 图像风条纹信息的提取. 由于同极化和交叉极化 SAR 数据的风条纹结构基本一致, 因此采用小波分析方法都可得到较好的反演效果; 而同极化数据图像更为清晰, 其反演结果略优. 较高空间分辨率的机载 SAR 探测数据的风向反演精度略高.

本文提出的基于小波的风向反演方法适用于有由海洋大气边界层不稳定引起的风条纹信息的机载 SAR 图像; 对于星载 SAR 图像该方法同样适用. 此外, 对于信噪比较高、风条纹更为清晰的 SAR 图像, 该方法可获取较高的海面风向反演精度. 下一步, 我们将获取更多的 SAR 数据, 通过反演试验充分验证本文提出方法的有效性, 并研究海洋动力背景场对风向反演结果的影响. 随着多极化 SAR 技术的日益成熟, 还将进一步研究如何利用 SAR 交叉极化数据的振幅和相位信息解决风向的 180° 模糊问题.

感谢中国电子科技集团公司第三十八研究所提供的机载多极化 SAR 试验数据和调查船观测结果.

- [1] Lin H, Xu Q, Zheng Q 2008 *Prog. Nat. Sci.* **18** 913
- [2] Zecchetto S, Biasio D 2008 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **46** 2983
- [3] Horstmann J, Koch W, Lehner S, Tonboe R 2000 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **38** 2122
- [4] Thompson D R, Beal R C 2000 *Johns Hopkins APL Tech. Dig.* **21** 58
- [5] Monaldo F 2000 *Johns Hopkins APL Tech. Dig.* **21** 75
- [6] Cameron I, Lumsdon P, Walker N, Woodhouse I 2006 *In Proceedings of SEASAR: Advances in SAR Oceanography from ENVISAT and ERS Missions* Frascati, Italy, January 23–26, 2006 p1
- [7] Yang J S 2005 *SAR Remote Sensing Techniques of Sea Surface Wind, Surface Wave and Internal Wave* (Beijing: Ocean Press) pp31–32 (in Chinese) [杨劲松 2005 合成孔径雷达海面风场、海浪和海洋内波遥感技术 (北京: 海洋出版社) 第 31—32 页]
- [8] Apel J R 1994 *J. Geophys. Res.* **99** 16269
- [9] Levy G 1998 *Proc. Int. Geosci. Remote Sens. Symp.* 1437
- [10] Vachon P W, Dobson F W 1996 *The Global Atmosphere and Ocean System* **5** 177
- [11] Ynag J S, Huang W G, Zhou C B 2001 *J. Remote Sens.* **5** 13 (in Chinese) [杨劲松, 黄韦良, 周长宝 2001 遥感学报 **5** 13]
- [12] Wolfgang K 2004 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **42** 702
- [13] Jiang Z H, Huang S X, Shi H Q, Zhang W, Wang B 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 108402 (in Chinese) [姜祝辉, 黄思训, 石汉青, 张伟, 王彪 2011 物理学报 **60** 108402]
- [14] Jiang Z H, Huang S X, He R, Zhou C T 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 068401 (in Chinese) [姜祝辉, 黄思训, 何然, 周晨腾 2011 物理学报 **60** 068401]
- [15] Zhang R W, Yan W, Ai W H, Ma S 2011 *J. Microwave* **27** 79 (in Chinese) [张日伟, 严卫, 艾未华, 马烁 2011 微波学报 **27** 79]
- [16] Kong Y, Zhao X B, Ai W H, Han D, Xue J 2011 *J. PLA Univ. Sci. Tech.* **12** 301 (in Chinese) [孔毅, 赵现斌, 艾未华, 韩丁, 薛剑 2011 解放军理工大学学报 **12** 301]
- [17] Gladeston C L, Daniela M U, Fátima N S 2010 *Sensors* **10** 5994
- [18] Zhu H B, Wen B Y, Huang J 2005 *J. Wuhan Univ.* **51** 375 (in Chinese) [朱华波, 文必洋, 黄坚 2005 武汉大学学报 **51** 375]
- [19] Almeida L B 1994 *IEEE Trans. Signal Proc.* **42** 3084
- [20] Kutter M, Bhattacharjee S K, Ebrahimi T 1999 *Proceedings of IEEE International Conference Image Processing Japan, Kobe, October 25–28, 1999* p320
- [21] Merete B C, Wolfgang K, Horstmann J 2006 *Remote Sens. Environ.* **105** 68

Ocean surface wind direction retrieval from multi-polarization airborne SAR based on wavelet*

Ai Wei-Hua[†] Kong Yi Zhao Xian-Bin

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

(Received 26 October 2011; revised manuscript received 17 December 2011)

Abstract

An ocean surface wind direction retrieval method from multi-polarization airborne synthetic aperture radar images is presented in order to retrieve high precision wind direction SAR image and improve the accuracy of ocean surface wind. The method relies on the ability of two-dimensional (2D) continuous wavelet technique with better time-frequency than Fourier transform and local gradient, which combines 2D continuous wavelet and FFT to exact the ocean surface wind direction from airborne SAR images. The proposed method is executed by using several kinds of mother wavelet functions for the C-band co-polarization and cross-polarization airborne sounding images, and the retrieved ocean surface wind direction is compared with NCEP data and buoy data. The verification results show that the wavelet based ocean surface wind direction retrieval algorithm is suited to retrieve wind direction from airborne SAR sounding data. The choice of mother wavelet function has a certain influence on the results, and 2D Mexican-Hat is the best mother wavelet for wind retrieval. Both co-polarization and cross-polarization airborne sounding images are suited to retrieve ocean wind direction.

Keywords: airborne SAR, ocean surface wind, wavelet, multi-polarization

PACS: 84.40.Xb, 92.60.Gn

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41005018), the Institute of Meteorology of PLA University of Science and Technology Foundation of China (Grant No. 201001), and the Foundation of CMA Key Laboratory for Atmospheric Physics and Environment, China (Grant No. KDW1105).

[†] E-mail: awh1979@126.com