

合成孔径雷达图像反演海面风向新方法的研究*

姜祝辉[†] 黄思训[‡] 石汉青 张伟 王彪

(解放军理工大学气象学院, 南京 211101)

(2010年11月25日收到; 2011年4月19日收到修改稿)

提出了利用基于 Tikhonov 正则化的二维数值微分方法来反演合成孔径雷达图像海面风向的新方法. 首先将高分辨率合成孔径雷达图像去噪、降采样并分割成数个子图像, 利用基于 Tikhonov 正则化的二维数值微分方法求解所关注子图像每一个点的梯度方向, 在此基础上通过带有距离权重的目标函数确定子图像整体强度的梯度方向, 该梯度的垂线方向就是所要求解的风向, 然后进行模拟试验, 在添加误差为 10% 的随机扰动情况下, 分别基于 Tikhonov 正则化的二维数值微分方法与基于有限差分的 Sobel 算子方法来反演风向, 结果表明, 前者误差为 0.7293° , 后者误差为 13.5069° , 最后进行了实例试验, 结果显示, Sobel 算子方法的部分风向反演结果偏离整体风向明显, 而基于 Tikhonov 正则化的二维数值微分方法的风向反演结果一致性较好. 将三个船舶报风向与相应位置合成孔径雷达图像的海面风向反演结果进行对比, Sobel 算子方法的风向反演结果平均误差在 9.0331° , 而基于 Tikhonov 正则化的二维数值微分方法的风向反演结果平均误差仅为 1.1148° .

关键词: 合成孔径雷达, 海面风向, 数值微分, Sobel 算子

PACS: 84.40.Xb, 92.60.Gn

1. 引言

海面风场对海洋环境数值预报、海洋灾害监测、海气相互作用、气象预报、气候研究等具有重要意义^[1]. 通过浮标、船舶等传统手段探测海面风场的不足是在某些海区和大洋观测数据量极少. 星载微波散射计的应用极大地改变了这种状况, 使全球海面风场的观测成为现实. 而散射计分辨率较低, 不能满足某些高分辨率海面风场的需求. 此外, 散射计无法测量近海岸数十千米以内的海面风场. 而高空间分辨率的合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 适用于近海、岛屿、海冰等附近海域局地海面风场的探测, 能够在很大程度上弥补散射计的不足, 因而近些年来受到人们的关注^[2-4].

Gerling^[5], Vachon 等^[6], He 等^[7]均提出了 SAR 反演海面风场的方法, 其中基于散射计地球物理模型函数反演海面风场的方法被绝大多数学者采用^[8]. 该方法利用已知的风向、后向散射截面、雷达方位角和入射角等信息, 通过散射计地球物理模型

函数来反演风速. 该方法的主要问题是需要事先指定风向. 部分学者^[9-11]提出利用浮标测得的风向代替整幅 SAR 图像的风向或利用数值模式输出、散射计测得的风向来指定风向, 但由于浮标资料较少, 数值模式输出、散射计测得的风向的分辨率较低, 可能引入较大误差. 另有学者提出利用 SAR 图像的风条纹信息指定风向^[12-14]. Gerling^[5], Alpers 等^[15]指出, 由于大气海洋边界层的不稳定性, 大气边界层涡旋作用于海面, 使海面产生辐散和辐聚, 从而改变了海面粗糙度, 在 SAR 图像上形成黑白相间的条纹. 理论研究和数值模拟均表明, SAR 图像上由边界层涡旋引起的风条纹方向和海面风向基本一致^[16], 所以 SAR 图像上的风条纹方向可表征风向. 风条纹方向的求解有多种方法, 如基于频域的分析方法、基于空域的分析方法等. Vachon 等^[6]提出频域分析方法, 即利用 SAR 图像上风条纹的二维波数谱峰值连线的垂直方向来指定风向; Koch^[17], Horstmann 等^[18], Fichaux 等^[19]基于空域的分析方法, 利用数字图像处理理论中的边缘检测来求取条纹边缘并以梯度最大方向来指定风向. 基

* 国家自然科学基金 (批准号: 40775023) 资助的课题.

[†] E-mail: jiangzhuhui@sina.com

[‡] 通讯联系人. E-mail: huangxp@yahoo.com.cn

于频域的分析方法需要将关注的子图像的像素数尽量设置为 2 的 N 次幂, 否则运算次数将从 $O(M \log_2 N)$ 迅速增加到 $O(N^2)$, 从而使运算时间急速上升, 计算精度大大下降. Koch^[17] 指出, 空域分析方法有着更高的空间分辨率的优势.

本文提出了通过 SAR 图像反演海面风向(以下简称风向)的新方法. 首先借助于文献[17]中的思想, 将高分辨率 SAR 图像去噪、降采样及分割成数个子图像, 在此基础上利用基于 Tikhonov 正则化的二维数值微分方法(以下简称数值微分方法)求解所关注的子图像的每一个点的梯度方向, 在此基础上建立了带有距离权重的目标函数以确定子图像整体强度的梯度方向, 该梯度方向的垂线方向就是所要求的风向, 然后对该方法进行数值模拟, 在添加误差为 10% 的随机扰动情况下, 数值微分方法比 Sobel 算子方法确定风条纹的梯度方向精度提高了 10°左右, 原因在于 Sobel 算子方法未考虑 SAR 图像强度中存在误差, 最后进行真实 SAR 图像反演风向试验, 试验结果表明, Sobel 算子方法的部分风向反演结果偏离整体风向明显, 而数值微分方法的风向反演结果一致性较好. 通过三个船舶报风向与相应位置的合成孔径雷达图像的风向反演结果之间比较后得出结论, Sobel 算子方法的风向反演结果平均误差为 9.0331°, 而数值微分方法的风向反演结果平均误差仅为 1.1148°. 本文研究流程如图 1 所示.

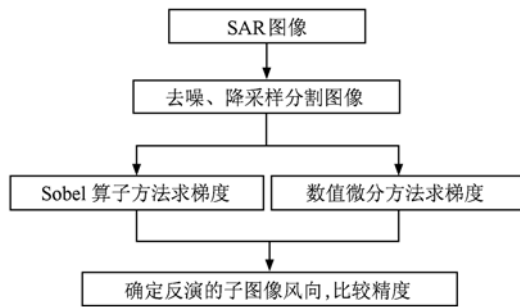


图 1 本文研究流程

2. 图像降采样

SAR 图像的空间分辨率为几米到几十米不等, 利用 SAR 图像反演海面风场的空间分辨率常常在千米级, 基于去噪和提高运算效率的考虑, 需要对 SAR 图像进行降采样处理, 使图像空间分辨率降低

到百米级. 本文采用金字塔式的降采样方法. 金字塔降采样通过逐次低通滤波和增大采样间隔的方式得到一个像元总数逐渐变小的影像序列^[20], 即

$$G^{(q+1)} = \psi_{\downarrow 2} G^{(q)},$$

$\psi_{\downarrow 2}$ 指在原图像的基础上将分辨率降低一半的操作, $G^{(q)}$ 为第 q 次降采样后的图像, $G^{(q+1)}$ 为经 $\psi_{\downarrow 2}$ 操作的第 $q+1$ 次采样后的图像. 具体的实施步骤是首先设置合理的低通滤波卷积核, 然后通过卷积运算得到去噪后的图像, 最后进行降采样得到降采样后的图像. 卷积核采用第 4 阶杨晖三角滤波矩阵, 在一维情况下, 令 H_x^4, H_y^4 分别为 x 轴和 y 轴方向的滤波矩阵,

$$H_x^4 = \frac{1}{16}(1 \ 4 \ 6 \ 4 \ 1), \quad H_y^4 = \frac{1}{16}(1 \ 4 \ 6 \ 4 \ 1)^T,$$

其中上标 T 表示矩阵的转置. 在各向同性二维的情况下, 卷积核可表示为

$$H^4 = H_y^4 H_x^4 = \frac{1}{256} \begin{pmatrix} 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \\ 4 & 16 & 24 & 16 & 4 \\ 6 & 24 & 36 & 24 & 6 \\ 4 & 16 & 24 & 16 & 4 \\ 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \end{pmatrix}.$$

仅考虑一种极化方式的情况下, SAR 图像为二维矩阵, 所以采用二维情况下的卷积核 H^4 通过逐像素运算可将卷积和降采样操作合并表示为

$$g^{(q+1)}(i, j) = \sum_{m=-2}^2 \sum_{n=-2}^2 h(m, n) g^{(q)}(2i+m, 2j+n),$$

其中 $g^{(q)}(i, j)$ 为 SAR 图像 $G^{(q)}$ 中第 (i, j) 个像素的强度值, $h(m, n)$ 为卷积核 H^4 在位置 (m, n) 处的值.

3. 梯度求解方法

空域分析方法是将 SAR 图像等分成 N 个矩形子图像, 计算每一个子图像整体强度梯度方向的垂直方向, 由于观测得到的图像强度中含有噪声, 增加了梯度求解的难度. 求梯度的方法很多, 如 Koch^[17] 提出的基于有限差分的 Sobel 算子方法, Fichaux 等^[19] 提出的小波分析方法等. 本文采用数值微分方法进行梯度求解, 该方法可以有效抑制图像中的噪声, 同时又能保证与“真实”图像强度的梯度之间的误差最小, 随后将 Sobel 算子求梯度的方法与数值微分方法进行对比试验, 说明该方法是有效的.

3.1. Sobel 算子方法

Sobel 算子是一种用于图像处理中边缘检测的常用算子,通过计算一阶导数来寻找图像边缘,边缘点在图像梯度最大值处^[20]. Sobel 算子中的各向同性 Sobel 算子的位置加权系数相对于普通 Sobel 算子更为准确,在检测不同方向的边缘时梯度的幅度一致. 所以本文采用各向同性 Sobel 算子(以下简称 Sobel 算子)方法进行对比试验. Sobel 算子中用到了两个卷积模板,一个反映 X 轴方向的变化程度(1)式,一个反映 y 轴方向的变化程度(2)式,它们是一种奇数模板(3×3)的全方向微分算子,对检测点的上下左右进行加权. 用 Sobel 算子来检测边缘的时候,先分别用上述模板对图像进行卷积,得到 X 轴方向和 Y 轴方向的梯度矩阵,根据这两个梯度矩阵可计算出图像中的每一点的梯度矩阵.

$$D_x = \frac{1}{32} \begin{pmatrix} 3 & 0 & -3 \\ 10 & 0 & -10 \\ 3 & 0 & -3 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$D_y = D_x^T. \quad (2)$$

3.2. 数值微分方法

数值微分是一个不适定问题,测量中的微小误差可能造成结果的巨大误差. 当理论研究不考虑数据误差的时候,一般的有限差分方法就能求得近似的导数,但如果数据有误差,用有限差分法求解则有可能造成非常大的误差. 所以一般要求划分的间距不能太小,即测量点不能太多. 而这一要求跟人们的思维习惯是不相符的,人们习惯认为,测量数据越多,越能帮助得到更精确的结果. 因此,很多学者从其他角度来考虑求解数值微分问题^[21],另一种求解数值微分的方法就是用 Tikhonov 正则化方法,该方法已被证实对于解不适定问题以及反问题是非常有效的.

设 $\Omega = (0, W) \times (0, H) \in R^2$ 是 SAR 图像中的一个矩形分块,其中 W, H 分别为该矩形区域的长和宽. N 是一个自然数, $\{(x_i, y_i)\}_{i=1}^N$ 是 Ω 中的一组观测点. 假设 Ω 被分成 N 份: $\{\Omega_i\}_{i=1}^N$, 记 d_i 为矩形区域 Ω_i 的对角线长度,令 $d = \max\{d_i\}$.

若已知精确函数 $u(x, y)$ 在点 (x_i, y_i) 处的测量值为 u_i^δ, δ 为观测误差,令

$$L^2(\Omega) = \left\{ u \left| \left(\int_{\Omega} u^2(x) dx \right)^{\frac{1}{2}} < +\infty \right. \right\},$$

寻找函数 $f(x, y)$ 满足

$$J[f(x, y)] = \min \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f(x_i, y_i) - u_i^\delta)^2 \right],$$

$$\lim_{d \rightarrow 0, \delta \rightarrow 0} \|\nabla f - \nabla u\|_{L^2(\Omega)} = 0.$$

可以证明,上面的问题等价于

$$J[f(x, y)] = \min \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f(x_i, y_i) - u_i^\delta)^2 + \alpha \|\Delta f(x, y)\|_{L^2(\Omega)}^2 \right]. \quad (3)$$

文献[21—23]指出,可以利用 Green 函数来重构 $f(x, y)$, 设 Ω 的边界为 s, ϕ 为 $f(x, y)$ 边界上的值, 在矩形区域 Ω 中 Green 函数为 $G(x, y)$ (G 的表达式见附录), 记,

$$a_j(x) = \int_{\Omega} G(x_j, y) G(y, x) dy,$$

$$b(x) = \int_{\partial\Omega} \frac{\partial}{\partial n} G(y, x) \phi(y) ds_y,$$

n 为 $\partial\Omega$ 的外法线方向, 则由(3)式重构的函数 f 可表示成

$$f(x, y) = \sum_{j=1}^N c_j a_j(x) + b(x),$$

其中 $C = (c_1, \dots, c_N)^T$ 满足代数方程组 $AC = B, A, B$ 分别表示为

$$A = \alpha NI + (a_{ij})_{N \times N},$$

$$B = (u_1^\delta - b(x_1), \dots, u_N^\delta - b(x_N)),$$

α 是正则化参数, 由文献[22]可知, 取 $\alpha = \delta^2$ 时, 该问题的解是存在且唯一的. 通过求解上式即可求得 $f(x, y)$, 同时得到 $\partial f / \partial x, \partial f / \partial y$. 在实际计算过程中, 如果子图像的划分间隔不变的话, 则 Green 函数不变, 无需重复计算, 这样可以大大节省时间.

4. 确定子图像整体强度的梯度方向

经上一节的求解梯度的方法可以得出 SAR 子图像每一个像素点的梯度值, 而由于噪声等情况的存在, 子图像中每一个像素点的梯度很可能是不同的, 如何根据每一个像素点的梯度计算子图像整体强度的梯度方向是风向求解的又一关键环节. 直接利用最小二乘法求解整体强度的梯度方向会忽略梯度大小对它的影响, 部分学者提出统计子图像中所有梯度值并选取最大值所对应的方向作为整体强度的梯度方向, 如果子图像每一点强度的梯度足够精确则能够得到理想的解, 但如果存在误差, 将子图像中梯度最大值所对应的方向当作整体强度

的梯度方向必然引入很大误差^[24]. 本文通过引入带有距离权重的目标函数来求解整体风向, 令 SAR 子图像中每一点的梯度方向为 (d_{xi}, d_{yi}) , $(i = 1, \dots, N)$, 记 $R_i^2 = d_x^2 + d_y^2$, 建立目标函数

$$J(a) = \frac{1}{2} \min \left[\sum_{i=1}^N R_i^2 (d_y - ad_x)^2 \right], \quad (4)$$

其中 a 代表梯度方向, 是一个待定常数

$$a = \text{ctg}(\theta), \quad (5)$$

θ 是以正北为 0° 顺时针方向为正的风向, 仅考虑 $\theta \in [0, \pi)$ 的情况, 最终的风向 180° 模糊现象由 NCEP (national centers for environmental prediction) 资料中海面 10 m 风向来去除. 对(4)式求导可知

$$\frac{\partial J(a)}{\partial a} = \sum_{i=1}^N R_i^2 (d_y - ad_x) d_x = 0,$$

$$\sum_{i=1}^N d_y R_i^2 d_x - a \sum_{i=1}^N d_x R_i^2 d_x = 0,$$

即 $a = \frac{D_Y^T \Lambda D_X}{D_X^T \Lambda D_X}$, 其中 $\Lambda = \text{diag}(R_1^2, \dots, R_N^2)$, $D_X = (d_{x1}, d_{x2}, \dots, d_{xN})^T$, $D_Y = (d_{y1}, d_{y2}, \dots, d_{yN})^T$.

5. 试验分析

下面通过仿真试验和实例试验来对 Koch 提出的 Sobel 算子方法和本文提出的数值微分方法反演风向的精度之间进行比较.

5.1. 仿真试验

令仿真的理想 SAR 子图像(图 2(a))的每一点的强度值满足

$$u(x, y) = \sin(2x + y), \Omega = (0, 1) \times (0, \pi). \quad (6)$$

在 x 轴和 y 轴方向分别作 20 等分, 对(6)式添加幅度为 10% 的随机误差, 如图 2(b) 所示. 从(6)式可以计算出该子图像的理想梯度方向为 63.4349° , 我们最终要求取的风向是梯度方向的垂直方向, 即 153.4349° .

利用 Sobel 算子方法和数值微分方法计算得到的梯度与理想梯度比较后的误差如图 3 所示. 在二维数值微分中, 要求边界上是真值, 而实际上边界不可能很真实, 为了避免计算梯度带来的误差, 在计算整体强度梯度时, 忽略边界点上的梯度可以避免将边界梯度中的误差带入最终的计算结果. 由于 Sobel 算子方法无法求取边界上的梯度, 所以边界上的梯度用其内侧最临近点的梯度代替. 由于误差的

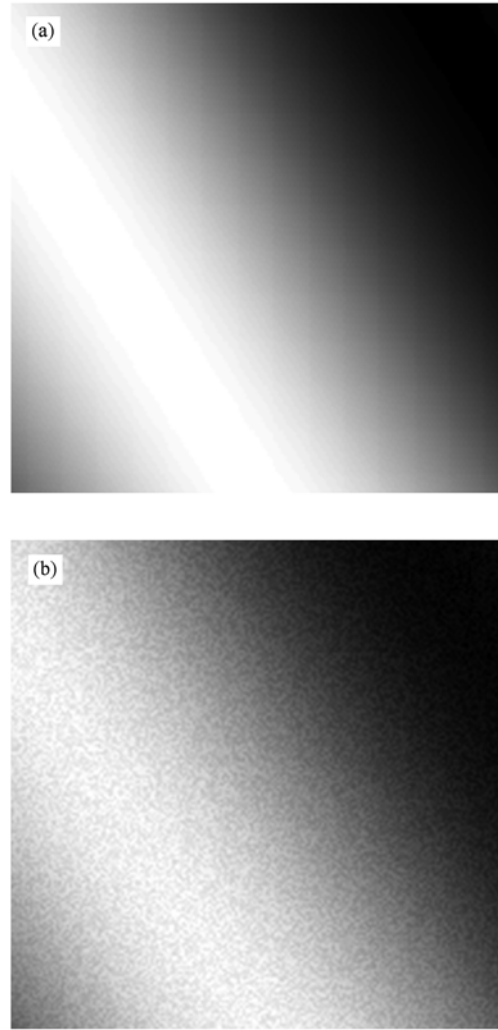


图 2 (a) 仿真的理想 SAR 子图像; (b) 添加误差的 SAR 子图像

存在, Sobel 算子方法求取的梯度杂乱无章, 在 x 轴方向产生了 $[-3 \ 3]$ 的误差, 在 y 轴方向产生了 $[-1.5 \ 1.5]$ 的误差, 而通过数值微分计算的梯度相对来说平滑得多, x 轴和 y 轴方向的误差仅在 $[-0.5 \ 0.5]$ 之间, 和理想梯度十分接近. 可见, 数值微分方法求取的梯度更加接近于理想梯度.

将 Sobel 算子方法和数值微分方法计算得到的梯度以散点的形式绘图(图 4). 由于图 2 在 x 轴方向和 y 轴方向的梯度均存在 180° 的不确定性, 所以梯度散点图的整体趋势亦具有 180° 的不确定性. 从图 4 中可见, 数值微分方法计算得到的梯度散点比 Sobel 算子方法计算得到的梯度散点更为集中. 理想图像中 $\frac{\partial u(x, y)}{\partial x} = 2 \cos(2x + y)$, 即 x 轴方向梯度绝对值的最大值为 2, Sobel 算子方法的结果在 x 轴方向梯度绝对值的最大值为 3.96, 而数值微分方法的结果在 x

轴方向梯度绝对值的最大值为 2.15, 与理想结果相当接近. 实线为利用本文提出的带有距离权重的目标函数方法确定的整体强度的梯度方向, 从图中可见, 该方法能够较准确的确定整体强度梯度的方向. Sobel 算子方法和数值微分方法计算的整体强度的梯度方向分别为 $76.9418^\circ, 62.7056^\circ$, 由 (5) 式可知, 两

种方法反演的风向分别为 $166.9418^\circ, 152.7056^\circ$. 图中虚线为理想风向 153.4349° , 从以上几个数字可以看出, Sobel 算子方法的风向反演结果误差为 13.5069° , 数值微分方法的风向反演结果误差为 0.7293° , 显然数值微分方法的风向反演结果好于 Sobel 算子方法的风向反演结果.

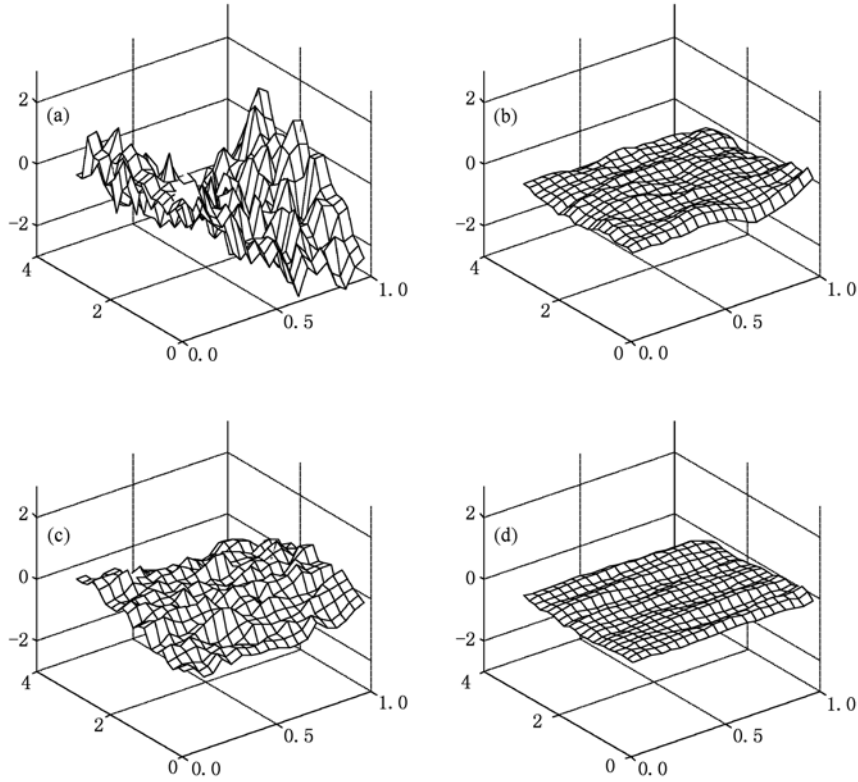


图3 利用 Sobel 算子方法计算得到的梯度误差 (a)x 轴方向 $\partial s(x,y)/\partial x - \partial u(x,y)/\partial x$; (b)y 轴方向 $\partial s(x,y)/\partial y - \partial u(x,y)/\partial y$ 及利用数值微分方法计算得到的梯度误差; (c)x 轴方向 $\partial f(x,y)/\partial x - \partial u(x,y)/\partial x$; (d) y 轴方向 $\partial f(x,y)/\partial y - \partial u(x,y)/\partial y$

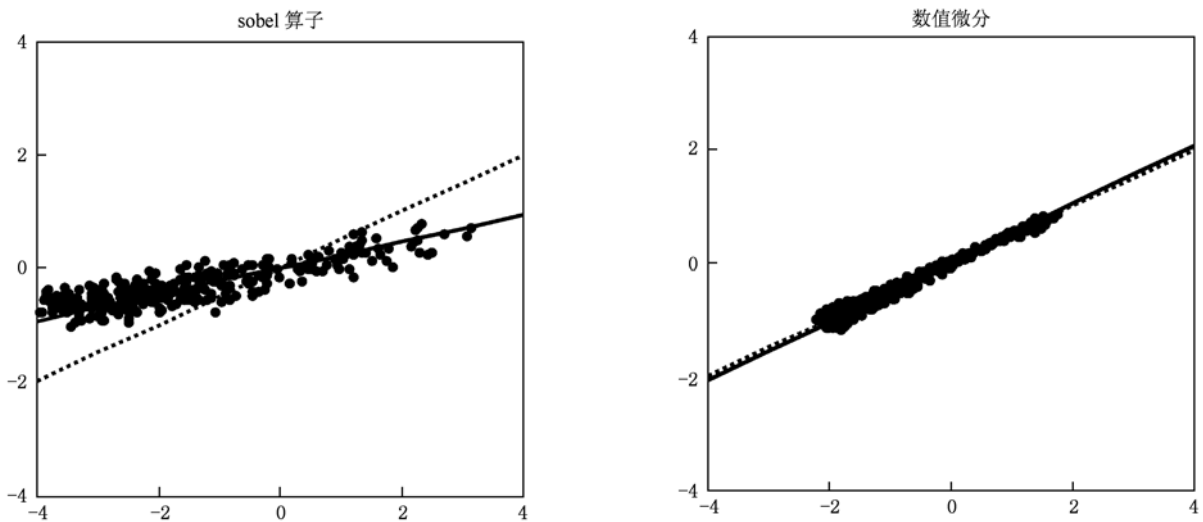


图4 Sobel 算子方法计算的梯度散点和数值微分方法计算的梯度散点, 实线为拟合的梯度方向, 虚线为理想梯度方向

5.2. 实例试验

本文选取的 ASAR (advanced synthetic aperture radar) 图像由欧空局接收, 中国科学院中国遥感卫星地面站提供, 版权归欧空局所有. 该图像运行模式为 Wide Swath, 距离方向象元间距 75 cm, 方位方向象元间距亦为 75 cm, 经等经纬度投影及双线性插值后, 空间分辨率为 75 m × 75 m, 资料获取时间为 2005 年 5 月 15 日 2 时 28 分, 当时 ASAR 刚好扫过海南岛及其东侧海域, 为计算方便且和船舶报资料作对比, 仅截取条纹信息明显的东侧部分图像, 如图 5 所示. 经降采样后分辨率降低为 150 m × 150 m. 将该图像分成多个子图像, 计算每一个子图像强度的梯度方向 (本文将子图像设置为 60 像素 × 60 像素, 即 9 km × 9 km), 再利用带有距离权重的目标函数方法求得每一个子图像整体强度的梯度方向, 该方向的垂线方向就是具有 180° 模糊的风向, 最后与 NCEP 资料的风向比较, 消除 180° 模糊, 即可得到最终的风向反演结果. 图 6 中黑色短箭头为数值微分方法计算得到风向, 白色短箭头为 Sobel 算子方法计算得到的风向. 黑色长箭头为日本气象厅提供的船舶报的风向. 从三个船舶报风向可以看出, 该区域的整体风向为南风. 通过 Sobel 算子方法和数值微分方法反演得到的风向亦基本为南风, 和资料的条纹方向基本一致, 风向连续性较好, 且两种方法反演的风向与日本气象厅的船舶报的风向偏差不大, 体现了这两种方法均可以用来反演海面风向. 进一步比较这两种方法的反演结果可以看出, 在 113°43' E, 20°19' N 和 113°38' E, 19°44' N 两处, Sobel 算子方法的反演结果偏离整体风向较明显, 而数值微分方法的反演结果和整体风向一致性较好, 其中可能的原因是在这两处的噪声较大, 致使 Sobel 算子方法不能有效反演风向, 而数值微分方法能够有效抑制噪声的干扰, 使结果趋向于真值.



图 5 SAR 强度图及截取的区域

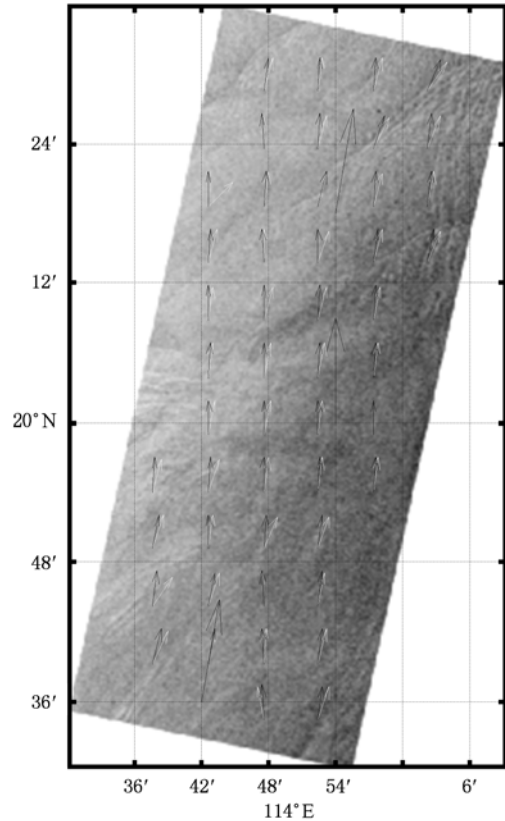


图 6 截取的 ASAR 图像中 Sobel 算子方法的风向反演结果 (白色短箭头)、数值微分方法的风向反演结果 (黑色短箭头) 及船舶报风向 (黑色长箭头)

以选取的三个船舶报所处经纬度为中心, 在原始 ASAR 图像中提取 60 像素 × 60 像素的子图像来反演船舶报位置的风向, 如图 7 所示. 从图中可见, 数值微分方法更接近于船舶报风向. 船舶报风向及两种方法反演的风向结果和误差如表 1 所列. Sobel 算子方法的反演结果平均误差为 9.0331°, 而数值微分方法的反演结果平均误差仅为 1.1148°.

表 1 日本气象厅船舶报风向信息及相应位置的的反演结果

时间 /h	经纬度	风向 / (°)	Sobel 算子 风向 / (°)	数值微分 风向 / (°)	Sobel 算子 风向误差 / (°)	数值微分 风向误差 / (°)
00	113°54' E, 20°00' N	180	189.0924	180.6655	9.0924	0.6655
06	113°54' E, 20°18' N	190	196.5796	187.4874	6.5796	2.5126
06	113°42' E, 19°36' N	190	201.4274	189.8336	11.4274	0.1664
平均误差 / (°)					9.0331	1.1148

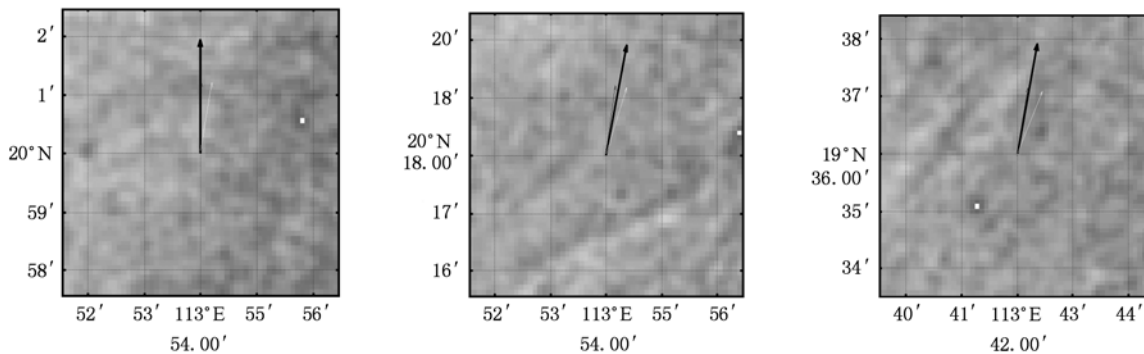


图7 三个子图像中 Sobel 算子方法的风向反演结果(白色短箭头)、数值微分方法的风向反演结果(黑色短箭头)及船舶报风向(黑色长箭头)

6. 结 论

SAR 图像中的风条纹信息可以反演海面风向, 本文提出了利用数值微分方法反演海面风向. 由于 SAR 图像中包含了大量的观测误差, 而差分方法不考虑观测误差, 所以利用差分方法计算梯度必然引入巨大误差, 而数值微分方法正是针对该问题而提出来的新方法. 模拟试验表明, 数值微分方法的风向反演结果(误差为 0.7293°) 优于基于有限差分的 Sobel 算子方法的风向反演结果(误差为 13.5069°). 实例试验中 Sobel 算子方法的部分风向反演结果偏离整体风向明显, 而数值微分方法的风向反演结果一致性较好. 将船舶报风向与相应位置的合成孔径雷达图像的海面风向反演结果进行对比, Sobel 算子方法的风向反演结果平均误差为 9.0331° , 而数值微分方法的风向反演结果平均误差为 1.1148° . 当然, 船舶报风向本身存在一定的误

差, SAR 图像中风条纹方向亦不一定和真实风向完全符合, 数值微分方法风向反演结果和真实风向之间的误差可能要比本文统计的三个船舶报位置风向反演结果的平均误差大, 但从仿真试验和风向一致性方面看, 数值微分方法的风向反演结果比 Sobel 算子方法的风向反演结果好.

附 录

在第一类边界条件下, 矩形区域 $\Omega = (0, W) \times (0, H) \in R^2$, Laplace 算子的 Green 函数定义为

$$-\nabla^2 G = \delta(x, x'; y, y'),$$

$$x, x' \in (0, W), y, y' \in (0, H),$$

$$G|_{x=0} = G|_{x=W} = G|_{y=0} = G|_{y=H} = 0,$$

则 Green 函数为

$$G(x, y; x', y') = \frac{4}{WH\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\left(\frac{m}{W} \right)^2 + \left(\frac{n}{H} \right)^2 \right]^{-1}$$

$$\times \sin \frac{m\pi x}{W} \sin \frac{m\pi x'}{W} \sin \frac{n\pi y}{H} \sin \frac{n\pi y'}{H}.$$

- [1] Jiang Z H, Huang S X, Du H D, Liu B 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8968 (in Chinese) [姜祝辉、黄思训、杜华栋、刘博 2010 物理学报 **59** 8968]
- [2] Portabella M, Stoffelen A, Johannessen J A 2002 *J. Geophys. Res.* **107** 10.1029/2001JC000925
- [3] Zhong J, Huang S X, Du H D, Zhang L 2011 *Chin. Phys. B* accepted
- [4] Yang J S 2005 *SAR Remote Sensing techniques of sea surface wind, surface wave and internal wave* (Beijing: Ocean Press) p31—32 (in Chinese) [杨劲松 2005 合成孔径雷达海面风场、海浪和内波遥感技术(北京:海洋出版社)第31—32页]
- [5] Gerling T W 1986 *J. Geophys. Res.* **91** 2308
- [6] Vachon P W, Dobson F W 1996 *Global Atmos. Ocean Syst.* **5** 177
- [7] He Y J, Perrie W, Zou Q P, Vachon P W 2005 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **43** 1453
- [8] 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]
- [9] Monaldo F M, Thompson D R, Winstead N S, Pichel W G, Clemente C P, Hristiansen M B 2005 *Johns Hopkins APL Tech. Dig.* **26** 102
- [10] Horstmann J, Koch W 2005 *IEEE J. Oceanic Engineering* **30** 508

- [11] Shen H, Perrie W, He Y J 2006 *Proc. Int. Geosci. Remote Sens. Symp.* 2228
- [12] Walker N, Woodhouse H, Cameron D 2007 *Proc. Int. Geosci. Remote Sens. Symp.* 3273
- [13] Lin H, Xu Q, Zheng Q 2008 *Progress in Nature Science* **18** 913
- [14] Xu Q, Lin H, Zheng Q, Xiu P, Cheng Y, Lin Y 2008 *Acta Oceanol. Sin.* **27** 57
- [15] Alpers W, Brummer B 1994 *J. Geophys. Res.* **99**(C6) 12613
- [16] Levy G 1998 *Proc. Int. Geosci. Remote Sens. Symp.* 1437
- [17] Koch W 2004 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **42** 702
- [18] Horstmann J, Koch W, Lehner S, Tonboe R 2000 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **38** 2122
- [19] Fichaux N, Rachin T 2002 *Can J Remote Sens.* **28** 510
- [20] Jähne B 2002 *Digital Image Processing. Concepts, Algorithms, and Scientific Applications, 5th ed.* (Berlin: Springer-Verlag) p138—140, p334
- [21] Wang Y B 2005 *Ph. D. Dissertation* (Shanghai: Fudan University) (in Chinese) [王彦博 2005 博士学位论文 (上海: 复旦大学)]
- [22] Wang Y B, Wei T W 2005 *J. Math. Anal. Appl.* **312** 121
- [23] Wang Y G, Cai Q F, Huang S X 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 4359 (in Chinese) [王业桂、蔡其发、黄思训 2010 物理学报 **59** 4359]
- [24] Chen Y L 2007 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: The Graduate School of Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [陈艳玲 2007 博士学位论文 (北京: 中国科学院研究生院)]

A new research on sea surface wind direction retrieval of synthetic aperture radar image^{*}

Jiang Zhu-Hui[†] Huang Si-Xun[‡] Shi Han-Qing Zhang Wei Wang Biao

(Institute of Meteorology, People's Liberation Army University of Science and Technology, Nanjing 211101, China)

(Received 25 November 2010; revised manuscript received 19 April 2011)

Abstract

A new method to retrieve sea surface wind direction using synthetic aperture radar image is presented. Some pretreatment steps such as suppressing noise, down sampling and dividing into several sub-images are presented first. The method of two-dimensional numerical differentiation based on Tikhonov regularization is introduced to compute the gradient direction in the sub-image intensity of every point. The distance weighted objective function is used to compute the overall gradient direction in the sub-images. The retrieved wind direction is orthogonal to the overall gradient. When adding 10% of random errors, numerical simulations show that the result of numerical differentiation is better than that from the Sobel operator which is based on the finite difference method: the former error is 0.7293° , and the latter error is 13.5069° . Finally, an experiment based on real SAR data shows that the wind direction deviates from the overall direction determined by the method of Sobel operator, and the direction determined by the method of numerical differentiation is consistent well with the overall wind direction. Comparing the ship board wind direction and the corresponding location wind direction retrieved from the synthetic aperture radar sub-images with the two methods, the average result error of Sobel operator method is 9.0331° , while that of numerical differentiation method is 1.1148° . This new method is an effective and high accurate method to retrieve the sea surface wind direction of synthetic aperture radar image.

Keywords: synthetic aperture radar, wind direction, numerical differentiation, Sobel operator

PACS: 84.40. Xb, 92.60. Gn

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 40775023).

[†] E-mail: jiangzhuhui@sina.com

[‡] Corresponding author. E-mail: huangxp@yahoo.com.cn