

合成孔径雷达资料反演海面风场的正则化方法研究*

姜祝辉 黄思训[†] 何然 周晨腾

(解放军理工大学气象学院, 南京 211101)

(2010年10月6日收到; 2011年1月18日收到修改稿)

针对基于散射计地球物理模型函数的合成孔径雷达资料反演海面风场中背景风向存在很大误差的问题, 提出了利用正则化方法反演海面风场, 并通过 L 曲线准则对正则化参数进行最优选择, 然后对该方法进行仿真试验. 试验结果显示, 正则化方法反演海面风场的风速和风向的反演精度均优于变分同化方法, 分析不同真实风向情况下的反演精度表明, 真实风向在 45° 和 135° 附近时, 风速反演的精度高, 真实风向在 0° 和 90° 时, 风向反演的精度高, 这种现象与地球物理模型函数中后向散射截面相对于风向的导数相关.

关键词: 合成孔径雷达, 正则化, L 曲线准则, 变分同化

PACS: 84.40.Xb, 92.60.Gn

1. 引言

尽管已经出现了一些新的针对于合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, 简记为 SAR) 资料反演海面风场的方法, 但基于散射计地球物理模型函数反演海面风场依旧被绝大多数学者认同^[1]. 对于散射计反演海面风场, 可通过多视角等探测方式和地球物理模型函数来共同确定风向风速, 再通过变分方法进行模糊去除^[2]. 而 SAR 在探测海面参数时, 没有散射计一样的多视角探测, SAR 探测的后向散射截面不能直接通过地球物理模型函数来反演风矢量. 这就需要先确定其中一个物理量, 再通过地球物理模型函数确定另外一个. 通常的做法是先确定风向, 再通过地球物理模型函数确定风速. 风向有时可以直接从 SAR 图像中提取条纹信息来确定, 但这种方法的缺点是反演得到的风向存在 180° 模糊问题, 有时图像中没有条纹信息而无法得到风向, 或者条纹被海洋内波所影响而严重影响风向反演的精度^[3]. 有学者^[4]提出利用数值预报结果来指定风向. 直接利用数值预报结果的风向会将其中的误差带入后续的风

速求解过程. 据统计, 30% 的风向误差将导致 40% 左右的风速误差^[5].

2002 年 Portabella 等^[6,7] 首次提出了利用统计反演方法来反演风矢量的方法, 该方法基于贝叶斯理论, 将后向散射截面与数值预报结果中的风向作为先验估计引入到代价函数中, 通过求取代价函数极小来确定最优风矢量. 随后 Walker 等^[8] 通过高斯-牛顿法求取代价函数极小, 从而分析了 ENVISAT 卫星的 ASAR (advanced SAR) 数据沿海风场结构. Choissnard 等^[5] 利用了变分同化方法, 在不同背景风场条件下, 地球物理模型函数线性与非线性情况下进行风场反演, 指出了该方法的有效性.

本文基于 Tikhonov 正则化理论, 提出了用正则化方法来反演 SAR 资料海面风场, 通过 L 曲线准则选取最优的正则化参数来实施海面风场反演. 通过与变分同化方法反演结果对比, 得出正则化方法反演海面风场的风速和风向的精度均优于变分同化方法的结论. 进一步研究不同真实风向情况下反演精度后发现, 真实风向在 45° 和 135° 附近时, 风速反演的精度高; 真实风向在 0° 和 90° 时, 风向反演的精度高. 这种现象与地球物理模型函数中后向散射截面相对于风向的导数直接相关.

* 国家自然科学基金 (批准号: 40775023) 资助的课题.

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

2. 地球物理模型函数

当给定雷达频率、极化方式、雷达天线方位角及入射角,且已知风向风速就可以通过地球物理模型函数求得后向散射截面.地球物理模型函数是通过统计后向散射截面与相应位置的浮标或数值预报结果资料得出的统计方程

$$\sigma^{\circ}(V, \theta, \phi) = B_0(V, \theta) (1 + B_1(V, \theta) \cos \phi + B_2(V, \theta) \cos 2\phi)^{\alpha},$$

其中 V 是距离海面高度为 10 m 处的风速; θ 是雷达相对于海面的入射角; ϕ 是风向相对于雷达天线方位角的角度,当风正对雷达天线吹的时候 $\phi = 0$, 本文假定雷达天线方位角为 0° , 那么这里的 ϕ 指的就是风向; B_0 描绘了风速和入射角的关系; B_1 是顺风-逆风幅度; B_2 是逆风-横向风幅度; α 是常数, 因地球物理模型函数的不同而不同, 对于 CMODIFR2^[9], 取 $\alpha = 1$, 对于 CMOD4^[10] 和 CMOD5^[11], 取 $\alpha = 1.6$. C 波段的地球物理模型函数最初是由 ERS 卫星上垂直极化的散射计资料统计而得到的.

图 1 是 CMOD4, CMODIFR2 和 CMOD5 这 3 个地球物理模型函数在给定入射角的情况下, 风速和风向分别与后向散射截面之间的关系, 后向散射截面单位为 dB. 雷达天线方位角为 0° , 雷达入射角为 25° , 极化方式为垂直极化. 当风向为 0° 时, 风速 0—50 m/s 与后向散射截面的关系如图 1(a) 所示. 当风速在 2—20 m/s 之间时, 3 条曲线很接近. 当风速小于 2 m/s 时和大于 20 m/s 时 3 条曲线差别很大. CMOD5 是 CMOD4 的改进模型函数, 通过与浮标和模式预报结果进行统计分析, 提高了风速大于 20 m/s 时的精度. 本文将采用 CMOD5 进行海面风场仿真试验. 当风速等于 10 m/s 时, 相应的风向与后向散射截面关系如图 1(b) 所示, 3 条曲线较接近, 但在顺风-逆风方向和逆风-横向风方向稍有差异. 从图 1(a) CMOD5 曲线可见, 当风速为 10 m/s 时, 只有一个后向散射截面 $\sigma^{\circ} = -5.0623$ dB 与其对应. 而在图 1(b) 中当风向为 60° , 117.8° , 242.2° 和 300° 时对应了同一个后向散射截面, 这就势必造成了反演过程中风向的模糊. 当风向为 45° 或 135° 时, 对应的曲线斜率最大, 如果风向有较小的误差, 将导致对应的后向散射截面较大的误差, 导致最终的风速反演较大的风速误差. 所以利用先验的风向信息反演 SAR 海面风场而不考虑其误差是不合

理的.

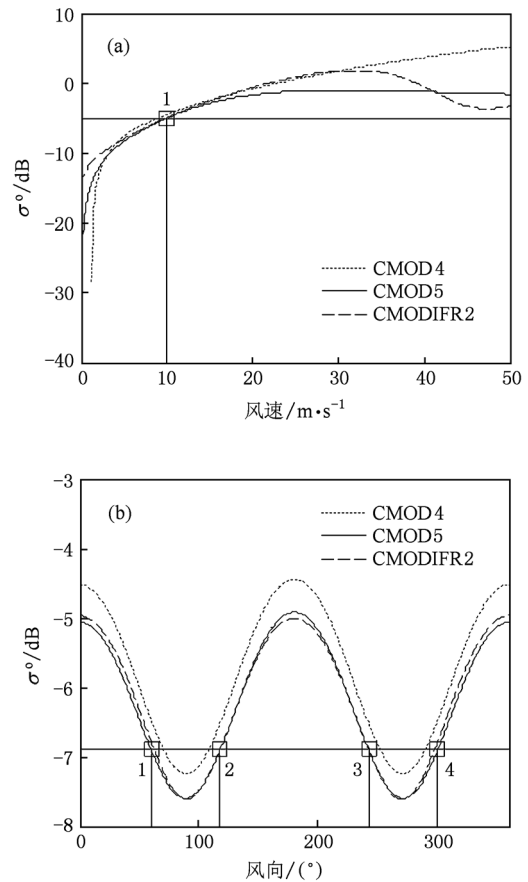


图 1 三个地球物理模型函数的对比

3. 变分同化方法

变分同化方法是数值天气预报中的一个重要方法. 多数数值预报模式采用变分同化的方法, 通过求取变分方程的极小值来确定分析场. 该变分方程包含了先验信息(背景场)和观测场信息, 其表达式为

$$J(\mathbf{x}) = J_0(\mathbf{x}) + J_b(\mathbf{x}). \quad (1)$$

这里 $J_b(\mathbf{x})$ 是背景场代价函数, 由控制变量 \mathbf{x} 和背景状态 \mathbf{x}_b 的所决定,

$$J_b(\mathbf{x}) = \frac{1}{2}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_b)^T \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_b);$$

$J_0(\mathbf{x})$ 是观测场代价函数, 由控制变量与观测量所决定

$$J_0(\mathbf{x}) = \frac{1}{2}(\mathbf{H}(\mathbf{x}) - \mathbf{y})^T \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{H}(\mathbf{x}) - \mathbf{y}),$$

其中 \mathbf{y} 是观测向量, $\mathbf{H}(\mathbf{x})$ 是将 \mathbf{x} 投射到观测空间

的正演算子, \mathbf{B} 和 \mathbf{R} 分别是背景场和观测场误差协方差矩阵. 本文采用 CMOD5 地球物理模型函数(详见附录 A)作为正演算子.

4. 正则化方法

变分同化方法需要满足 \mathbf{H} 为线性矩阵, \mathbf{B} 和 \mathbf{R} 为正定对称矩阵以及观测场与背景场不相关 3 个条件^[12]. Cardinali 等^[13] 指出, 在实施变分同化方法时, 分析场中仅有 15% 左右的信息来自观测场的贡献, 剩余 85% 左右的信息来自背景场的贡献. 对于 SAR 资料反演海面风场的问题, 要充分体现观测场的作用, 所以采用反问题的正则化方法^[14,15], 引入 Tikhonov 泛函^[16-19]

$$J(u, v) = J_0(u, v) + \gamma J_b(u, v), \quad (2)$$

其中 γ 为正则化参数, u 和 v 分别为分析风场在 x 方向和 y 方向的风速分量. 令 u_b 和 v_b 为背景风场在 x 方向和 y 方向的风速分量, 记背景风速和分析风速分别为 $V_b = \sqrt{u_b^2 + v_b^2}$, $V = \sqrt{u^2 + v^2}$, ϕ_b 与 ϕ 分别为背景风向和分析风向. 分别引入 $J_0(u, v)$ 与 $J_b(u, v)$ 为

$$J_0(u, v) = \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma^a(V, \theta, \phi) - \sigma^o}{SD_{\sigma^o}} \right)^2,$$

$$J_b(u, v) = \frac{1}{2} \left(\frac{V - V_b}{SD_V} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\phi - \phi_b}{SD_\phi} \right)^2.$$

这里的 $\sigma^a(V, \theta, \phi)$ 指的是通过 CMOD5 地球物理模型函数计算得到的分析后向散射截面, 其中 θ 为雷达入射角, ϕ 为风向; σ^o 为观测得到的 SAR 后向散射截面; SD_{σ^o} 为观测场的标准差, 取 $SD_{\sigma^o} = 0.1\sigma^o$; 背景风速的标准差 $SD_V = 0.3472 \text{ m/s}$; 背景风向的标准差 $SD_\phi = 8.7775^\circ$. (2) 式可转化为

$$J(V, \phi) = J_0(V, \phi) + \gamma J_b(V, \phi)$$

$$= \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma^a(V, \theta, \phi) - \sigma^o}{SD_{\sigma^o}} \right)^2$$

$$+ \gamma \left(\frac{1}{2} \left(\frac{V - V_b}{SD_V} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\phi - \phi_b}{SD_\phi} \right)^2 \right). \quad (3)$$

暂不考虑入射角 θ 的变化, 将 $\sigma^a(V, \theta, \phi)$ 简写为 $\sigma^a(V, \phi)$. 对 $\sigma^a(V, \phi)$ 在 $\sigma^a(V_b, \phi_b)$ 处进行泰勒展开可得

$$\sigma^a(V, \phi) \approx \sigma^a(V_b, \phi_b)$$

$$+ \left. \frac{\partial \sigma^a(V, \phi)}{\partial V} \right|_b (V - V_b)$$

$$+ \left. \frac{\partial \sigma^a(V, \phi)}{\partial \phi} \right|_b (\phi - \phi_b),$$

令 $\sigma^* = \sigma^o - \sigma^a(V_b, \phi_b)$, $A = \left. \frac{\partial \sigma^a(V, \phi)}{\partial V} \right|_b$, $B = \left. \frac{\partial \sigma^a(V, \phi)}{\partial \phi} \right|_b$, $U = V - V_b$, $\Phi = \phi - \phi_b$, 其中 A, B 的具体求解方法见附录 B. 经线性化后, (3) 式可表示为以下形式:

$$J(V, \Phi) = \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma^* - AU - B\Phi}{SD_{\sigma^o}} \right)^2$$

$$+ \frac{1}{2} \gamma \left(\left(\frac{U}{SD_V} \right)^2 + \left(\frac{\Phi}{SD_\phi} \right)^2 \right). \quad (4)$$

对(4)式进行变分, 于是

$$\delta J(U, \Phi) = - \frac{1}{(SD_{\sigma^o})^2} (\sigma^* - AU - B\Phi) (A\delta U + B\delta \Phi)$$

$$+ \frac{\gamma}{(SD_V)^2} U\delta U + \frac{\gamma}{(SD_\phi)^2} \Phi\delta \Phi$$

$$= \nabla_U J(U, \Phi) \delta U + \nabla_\Phi J(U, \Phi) \delta \Phi.$$

由此可以得出泛函的梯度 $\nabla_U J(U, \Phi)$ 与 $\nabla_\Phi J(U, \Phi)$ 的表达式形式为

$$\nabla_U J(U, \Phi) = - \frac{A}{(SD_{\sigma^o})^2} (\sigma^* - AU - B\Phi)$$

$$+ \frac{\gamma U}{(SD_V)^2}, \quad (5)$$

$$\nabla_\Phi J(U, \Phi) = - \frac{B}{(SD_{\sigma^o})^2} (\sigma^* - AU - B\Phi)$$

$$+ \frac{\gamma \Phi}{(SD_\phi)^2}. \quad (6)$$

由泛函梯度, 利用迭代方法可求取 U, Φ ,

$$U_{n+1} = U_n - \nabla_U J(U_n, \Phi_n) \rho_U,$$

$$\Phi_{n+1} = \Phi_n - \nabla_\Phi J(U_n, \Phi_n) \rho_\Phi,$$

其中 ρ_U 和 ρ_Φ 为迭代步长, n 为迭代次数. 通过迭代可得 U, Φ . 由此可求出分析风速和分析风向分别为 $V = U + V_b$, $\phi = \Phi + \phi_b$.

这里涉及到对正则化参数 γ 的处理, 正则化参数的选取方法有多种, 例如偏差原理, 交叉检验和 L 曲线准则等. 由于 J_0 中不仅包含着 σ^o 的误差信息, 又包含着背景场的误差信息, 故在不需要预先知道观测误差的情况下, 采用 L 曲线准则选择正则化参数 γ 是可取的. 令 $J_0(\gamma) = J_0(u_\gamma, v_\gamma)$, $J_b(\gamma) = J_b(u_\gamma, v_\gamma)$. 所谓 L 曲线是一组正则化参数所对应的 $J_0(\gamma)$ 与 $J_b(\gamma)$ 的对数值构成的图形, 即 $(\lg(J_0(\gamma)), \lg(J_b(\gamma)))$ 所构成的图形, 因该图形呈现 L 形, 故称为 L 曲线. 确定正则化参数的 L 曲线准

则^[20,21]是找到对应于L曲线“角点”的正则化参数,该“角点”是L曲线上曲率最大的点.这种方法不需要预先知道观测误差,具有很强的实用性.

5. 模拟分析

由于地球物理模型函数 $\sigma^\circ(V, \theta, \phi)$ 满足 $\sigma^\circ(V, \theta, \pi - \phi) = \sigma^\circ(V, \theta, \pi + \phi)$ (试验中假定雷达天线方位角为 0° ,那么这里的 ϕ 指的就是风向),即以 $\phi = 180^\circ$ 为对称轴对称(图1(b)),所以本文假定真实风速为10 m/s,讨论真实风向为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 这4种典型情况下的正则化反演结果.在这4种情况下,通过CMOD5地球物理模型函数可计算出相应的后向散射截面分别为 $-5.0623, -6.2328,$

$-7.5973, -6.1111$ dB,将这4个后向散射截面当作后向散射截面的观测值.对真实风速添加10%的无偏随机误差,对真实风向添加 20° 的无偏随机误差,得到扰动后的风速和风向,视为背景风速和背景风向,利用本文提出的正则化方法,可得出分析风速和分析风向.在实际反演过程中可将模式预报结果中的风速和风向或散射计、辐射计等的反演结果作为背景风速和风向.图2为不同正则化参数情况下,观测代价函数 J_o 的对数值和背景代价函数 J_b 的对数值之间关系的连线组成的L曲线.当该L曲线曲率最大时,相应的正则化参数为最优的正则化参数.当真实风向分别为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 和 135° 时,正则化参数取 $\gamma = 0.01$,如图2中菱形符号所示.

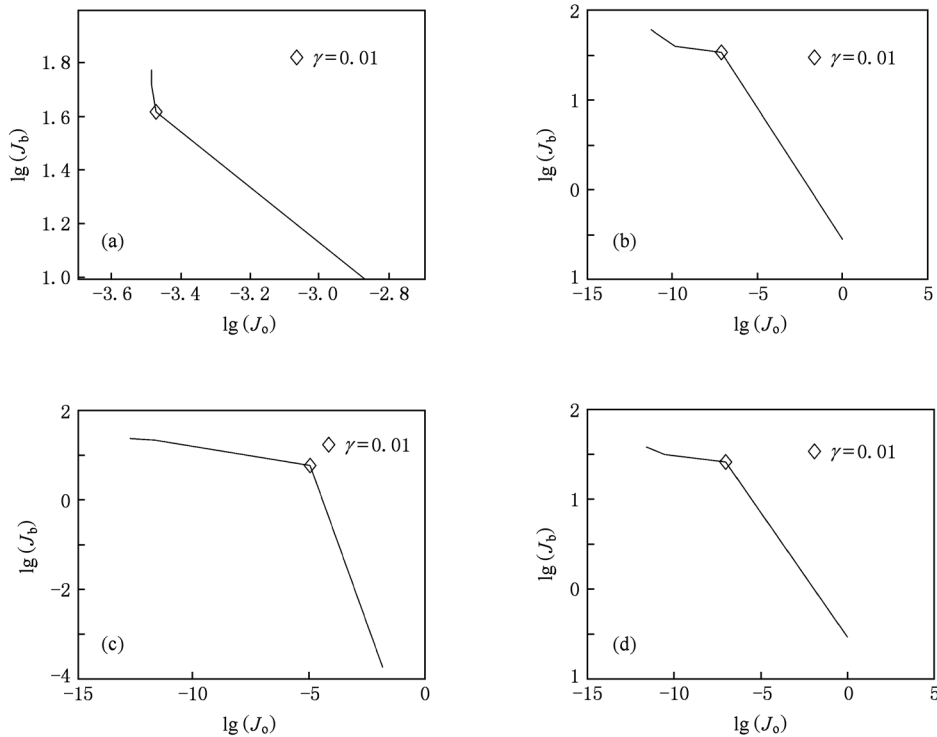


图2 不同真实风向情况下的L曲线 (a)真实风向为 0° ; (b)真实风向为 45° ; (c)真实风向为 90° ; (d)真实风向为 135°

5.1. 不同正则化参数对反演结果的影响分析

图3为真实风向分别为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 和 145° 时,不同正则化参数反演得到分析风速和分析风向相对于真实风速和真实风向的误差统计.随着正则化参数的增大,分析风速误差和分析风向误差均经历一个先下降,后上升的过程.其原因可以

从代价函数(2)式中进行分析.当正则化参数较小时,(2)式中的观测场起到更加重要的作用,而背景场的作用相对较小,背景风向对分析风向的约束作用较小,这样分析风向必然偏离真实风向很大,导致分析风速亦偏离真实风速较大.随着正则化参数的增大,风速和风向的误差均达到最小值.随着正则化参数继续增大,观测场的作用变小,背

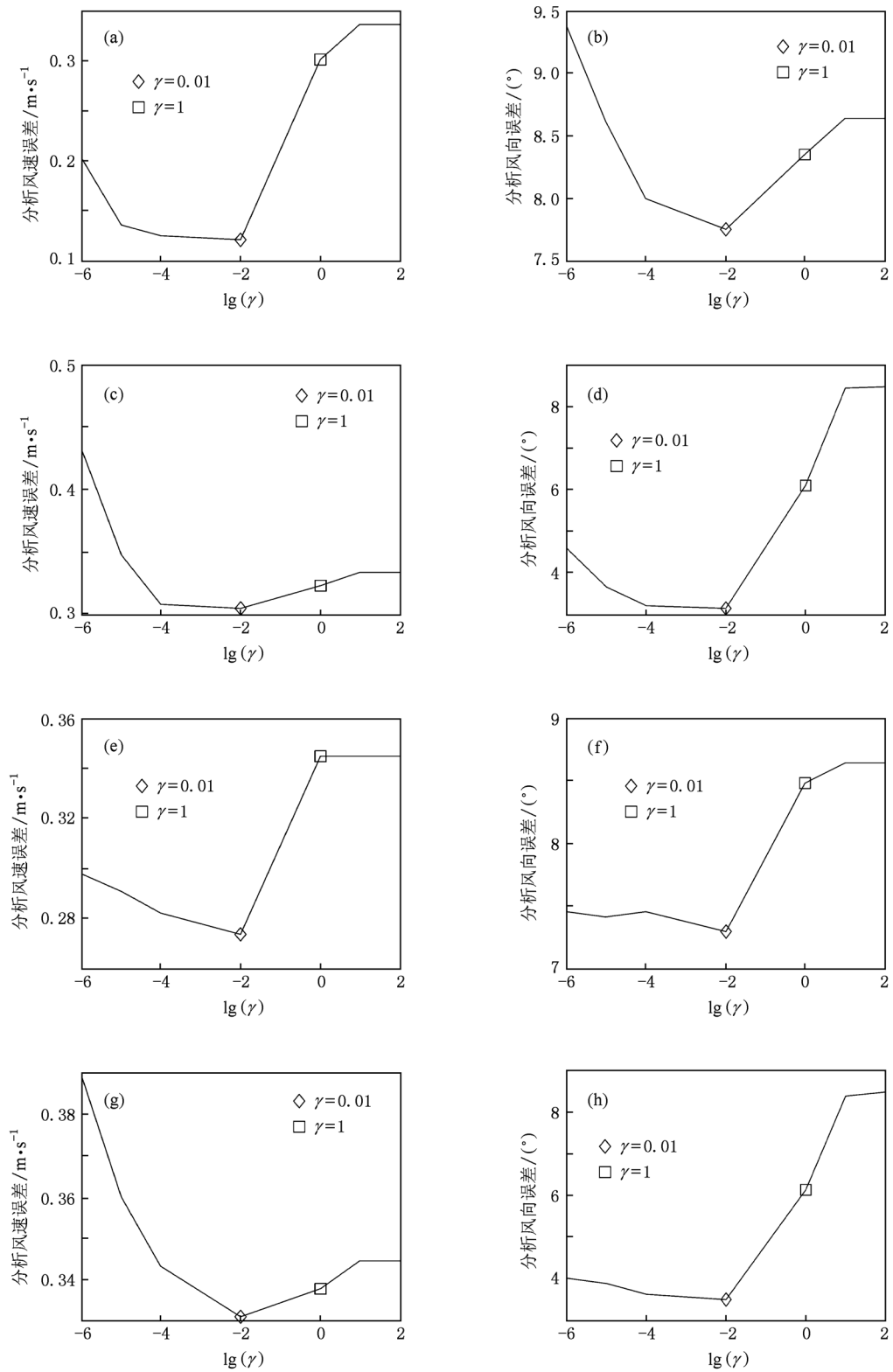


图3 不同真实风向情况下,不同正则化参数反演与变分同化反演得到的分析风速误差与分析风向误差 (a), (c), (e)和(g)分别为真实风向为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 时的分析风速误差,与之对应的(b), (d), (f)和(h)为分析风向误差

景场起到了主导作用. 当正则化参数足够大 ($\gamma = 100$) 时, 分析风速等于背景风速, 分析风向等于背景风向, 观测的后向散射截面不起作用, 这时风速误差等于背景误差, 风向误差亦等于背景风向误差. 当 $\gamma = 0.01$ 时, 风向和风速的误差均达到最小值, 由此可说明利用 L 曲线选择正则化参数的方法可以使得分析结果误差达到最小. 图 3 方形符号为在代价函数中正则化参数 $\gamma = 1$ 的反演结果, 这种情况就是变分同化反演的结果; 而菱形符号为正则化参数 $\gamma = 0.01$ 时的反演结果. 由此可见, 无论变分同化方法还是正则化方法均对风速和风向的反演有积极作用, 而正则化方法反演结果明显优于变分同化方法的反演结果.

5.2. 不同真实风向情况下反演结果分析

从表 1 中亦能得出正则化参数 $\gamma = 0.01$ 时的反演结果要明显优于变分同化方法 ($\gamma = 1$) 的结果. 下面仅考虑正则化参数 $\gamma = 0.01$ 的情况下, 分析风速误差和分析风向误差. 综合分析表 1 中不同真实风向情况下分析风速误差可以看出, 真实风向为 45° 和 135° 时, 分析风速误差为 0.33 m/s 左右, 明显大于真实风向为 0° 和 90° 时的分析风速误差 0.1202 m/s 和 0.2734 m/s . 而从分析风向误差可以看出, 真实风向为 45° 和 135° 时, 分析风向误差为 3.2° 左右, 明显小于真实风向为 0° 和 90° 时的分析风向误差 (7.7482° 和 7.2988°).

表 1 不同真实风向情况下分析风速误差与分析风向误差

真实风向 / ($^\circ$)	$\gamma = 1$ 时 分析风速 误差/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\gamma = 0.01$ 时 分析风速 误差/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\gamma = 1$ 时 分析风向 误差/ $^\circ$	$\gamma = 0.01$ 时 分析风向 误差/ $^\circ$
0	0.3005	0.1202	8.3512	7.7482
45	0.3235	0.3047	6.0917	3.1415
90	0.3447	0.2734	8.4771	7.2988
135	0.3380	0.3312	6.1368	3.4994

可以通过分析图 1 来找到这种现象与 CMOD5 地球物理模型函数之间存在的某种联系. 从图 1(a) 可见, 无论真实风向为多大, 背景风速误差的存在所导致的后向散射截面误差相同. 从图 1(b) 可见, 当真实风向为 45° 和 135° 时, $\partial\sigma^\circ(V, \theta, \phi)/\partial\phi$ 很大, 而当真实风向为 0° 和 90° 时, $\partial\sigma^\circ(V, \theta, \phi)/\partial\phi$ 很小, 真实风向为 0° 时 $\sigma^\circ(V, \theta, \phi)$ 的变化较真实风向为 90° 时更为缓慢, 这就导致了当真实风向为 0° 时, 相同的背景风向误差产生的后向散射截面误差

很小, 当真实风向为 90° 时较小, 而真实风向为 45° 和 135° 时, 相同的背景风向误差产生的后向散射截面误差很大. 后向散射截面误差增大导致了分析风速误差减小, 而分析风向误差增大. 这种因真实风向不同而导致的后向散射截面误差不同的内在联系直接影响到了反演结果.

6. 结 论

利用 SAR 资料反演海面风场通常的方法是利用先验风向信息和地球物理模型函数联合反演, 而先验风向中存在误差, 该误差直接导致风速反演中的误差. 变分同化方法虽考虑了先验风向中存在的误差, 但该方法在模型建立时有背景场与观测场不相关的假定. 本文采用了正则化的方法来反演海面风场. 通过仿真试验得出如下结论: 正则化方法反演海面风场是有效的; 不同的正则化参数反演结果的精度不同, 而通过 L 曲线准则选取最优正则化参数后, 无论风速反演精度还是风向反演精度均高于变分同化方法; 真实风向在 45° 和 135° 附近时, 风速的反演精度高, 真实风向在 0° 和 90° 时, 风向的反演精度高, 这种现象和 CMOD5 地球物理模型函数中后向散射截面相对于风向的导数相关. 由于资料受限, 文中仅进行了仿真试验, 在今后的工作中可将该方法运用到实际反演中, 并通过浮标等现场观测资料来验证方法的可行性, 亦可将 SAR 图像中的条纹信息与模式预报结果等背景场信息综合起来共同反演海面风场.

附录 A

CMOD5 的表达式形式为^[11]

$$\sigma^\circ = B_0 (1 + B_1 \cos\phi + B_2 \cos 2\phi)^{1.6},$$

其中 B_0, B_1, B_2 是风速 V 和入射角 θ 的函数, ϕ 为风向. B_0, B_1, B_2 定义为

$$B_0 = 10^{a_0+a_1V} f(a_2V, s_0)^\gamma,$$

$$B_1 = \frac{c_{14}(1+x) - c_{15}V(0.5+x - \tanh[4(x+c_{16}+c_{17}V)])}{1 + \exp(0.34(V-c_{18}))},$$

$$B_2 = (-d_1 + d_2v_2) \exp(-v_2),$$

令

$$x = \frac{\theta - 40}{25},$$

$$f(s, s_0) = \begin{cases} (s/s_0)^\alpha g(s_0) & (s < s_0), \\ g(s) & (s \geq s_0). \end{cases}$$

这里

$$\alpha = s_0(1 - g(s_0)),$$

$$g(s) = \frac{1}{1 + \exp(-s)},$$

v_2 的定义为

$$v_2 = \begin{cases} a + b(y - 1)^n & (y < y_0), \\ y & (y \geq y_0), \end{cases}$$

$$y = \frac{V + v_0}{v_0}.$$

以上函数中 $a_0, a_1, a_2, \gamma, s_0, v_0, d_1$ 和 d_2 只是入射角的函数,

$$a_0 = c_1 + c_2x + c_3x^2 + c_4x^3,$$

$$a_1 = c_5 + c_6x,$$

$$a_2 = c_7 + c_8x,$$

$$\gamma = c_9 + c_{10}x + c_{11}x^2,$$

$$s_0 = c_{12} + c_{13}x,$$

$$a = y_0 - \frac{y_0 - 1}{n},$$

$$b = \frac{1}{n(y_0 - 1)^{n-1}},$$

$$v_0 = c_{21} + c_{22}x + c_{23}x^2,$$

$$d_1 = c_{24} + c_{25}x + c_{26}x^2,$$

$$d_2 = c_{27} + c_{28}x,$$

$$y_0 = c_{19}, n = c_{20}.$$

附录 B

由附录 A 中 CMOD5 的表达式形式, 计算 σ° 相对于风速 V 和风向 ϕ 的偏导数

$$\frac{\partial \sigma^\circ}{\partial \phi} = -1.6B_0(B_1 \sin \phi + 2B_2 \sin 2\phi) \times (1 + B_1 \cos \phi + B_2 \cos 2\phi)^{0.6},$$

$$\frac{\partial \sigma^\circ}{\partial V} = \frac{\partial B_0}{\partial V}(1 + B_1 \cos \phi + B_2 \cos 2\phi)^{1.6} + 1.6B_0(1 + B_1 \cos \phi + B_2 \cos 2\phi)^{0.6} \times \left(\frac{\partial B_1}{\partial V} \cos \phi + \frac{\partial B_2}{\partial V} \cos 2\phi \right).$$

这里

$$\frac{\partial B_0}{\partial V} = \ln 10 \cdot 10^{a_0+a_1V} a_1 f(a_2V, s_0)^\gamma + 10^{a_0+a_1V} \gamma f(a_2V, s_0)^{\gamma-1} \frac{\partial f(a_2V, s_0)}{\partial V},$$

$$\frac{\partial f(a_2V, s_0)}{\partial V} = \begin{cases} a_2 \alpha g(s_0) (s/s_0)^{\alpha/s} & (s = a_2V < s_0), \\ \frac{\partial g(s)}{\partial s} \frac{\partial s}{\partial V} = a_2 \frac{\exp(-s)}{(1 + \exp(-s))^2} & (s \geq s_0), \end{cases}$$

$$\frac{\partial B_1}{\partial V} = -0.34 \exp(0.34(V - c_{18})) \frac{c_{14}(1+x) - c_{15}V(0.5+x - \tanh[4(x+c_{16}+c_{17}V)])}{(1 + \exp(0.34(V - c_{18})))^2} - c_{15} \frac{(0.5+x - \tanh[4(x+c_{16}+c_{17}V)]) - 4c_{17}(\cosh[4(x+c_{16}+c_{17}V)])^{-2}}{1 + \exp(0.34(V - c_{18}))},$$

$$\frac{\partial B_2}{\partial V} = \frac{\partial B_2}{\partial v_2} \frac{\partial v_2}{\partial V} = (d_1 + d_2 - d_2v_2) \exp(-v_2) \frac{\partial v_2}{\partial V},$$

$$\frac{\partial v_2}{\partial V} = \frac{\partial v_2}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial V} = \begin{cases} (y-1)^{n-1} \frac{bn}{v_0} & (y < y_0), \\ \frac{1}{v_0} & (y \geq y_0). \end{cases}$$

- [1] Zecchetto S, Biasio D 2008 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **46** 2983
- [2] Monaldo F, Thompson D R, Pichel W G, Clemente C P 2004 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **42** 283
- [3] Wolfgang K 2004 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **42** 702
- [4] Gladeston C L, Ushizima D M, Medeiros N S, Lima G G 2010 *Sensors* **10** 5994
- [5] Choisnard J, Laroche S 2008 *J. Geophys. Res.* **113** C05006
- [6] Portabella M, Stoffelen A, Johannessen J A 2002 *J. Geophys. Res.* **107** 3086
- [7] Portabella M 2002 *Ph. D. Dissertation* (Barcelona: University of Barcelona)
- [8] Walker N, Woodhouse I H, Cameron I D 2007 *Proceedings of International Geoscience Remote Sensing Symposium* (Barcelona: IEEE) p3273
- [9] Quilfen Y, Chapron B, Elfouhaily T M, Katsaros K, Tournadre J 1998 *J. Geophys. Res.* **103** 7767
- [10] Stoffelen A, Anderson D 1997 *J. Geophys. Res.* **102** 5767
- [11] Hersbach H, Stoffelen A, Haan S D 2007 *J. Geophys. Res.* **112** C03006

- [12] Kalnay E 2005 *Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability* (Beijing: China Meteorological Press) p141 (in Chinese) [Kalnay E 2005 大气模式、资料同化和可预报性 (北京: 气象出版社) 第 141 页]
- [13] Cardinali C, Pezzulli S, Andersson E 2004 *Quart. J. R. Meteorol. Soc.* **130** 2767
- [14] Tikhonov A N 1963 *Soviet Math. Dokl.* **5** 1035
- [15] Huang S X, Wu R S 2005 *Mathematical and Physical Problem in Atmospheric Science* (Beijing: China Meteorological Press) p422 (in Chinese) [黄思训、伍荣生 2005 大气科学中的数学物理问题 (北京: 气象出版社) 第 422 页]
- [16] 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]
- [17] Cai Q F, Huang S X, Gao S T, Zhong K, Li Z Q 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3912 (in Chinese) [蔡其发、黄思训、高守亭、钟科、李自强 2008 物理学报 **57** 3912]
- [18] Sheng Z, Huang S X 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1738 (in Chinese) [盛 峥、黄思训 2010 物理学报 **59** 1738]
- [19] Sheng Z, Huang S X 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3912 (in Chinese) [盛 峥、黄思训 2010 物理学报 **59** 3912]
- [20] Engl H W, Grever W 1994 *Numer. Math.* **69** 25
- [21] Hansen P C, O' Leary D P 2003 *SIAM J. Sci. Comput.* **14** 1487

Regularization method to retrieve synthetic aperture radar sea surface wind*

Jiang Zhu-Hui Huang Si-Xun[†] He Ran Zhou Chen-Teng

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

(Received 6 October 2010; revised manuscript received 18 January 2011)

Abstract

Due to the fact that the error exists in the priori wind direction for the problem of synthetic aperture radar data sea surface wind field retrieval, the regularization method is used to retrieve the wind field, while the L-curve method is adopted to select the optimal regularization parameter. Simulation experiments show that the retrieval accuracy of the regularization method is better than that of the variational method. Further researches in different true wind direction situations indicate that when the real wind direction is in the vicinity of 45° or 135° , the wind speed retrieval accuracy is higher, when the real wind direction is in the vicinity of 0° or 90° , the wind direction retrieval accuracy is higher, this phenomenon may be related to the derivative of backscatter cross section with respect to the wind direction in geophysical model function.

Keywords: synthetic aperture radar, regularization, L-curve, variational assimilation

PACS: 84.40.Xb, 92.60.Gn

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

[†] Corresponding author. E-mail: huangsxp@yahoo.com.cn