

# 变分同化结合广义变分最佳分析对微波散射计 资料进行海面风场反演\*

张 亮 黄思训<sup>†</sup> 刘宇迪 钟 剑

(解放军理工大学气象学院, 南京 211101)

(2009 年 3 月 27 日收到; 2009 年 7 月 22 日收到修改稿)

针对微波散射计资料的海面风场反演, 本文首先利用 QuikSCAT 卫星散射计的近实时资料, 借助荷兰皇家气象学会的 SeaWinds 散射计数据处理模式, 在不同风速和海域的情况下, 采用多解方案结合二维变分同化方法进行风向的模糊去除, 达到消除解的不唯一性的目的, 且对 4 种反演结果(低速风、中速风、高速风和近海岸风)与美国国家海洋和大气管理局卫星资料中心的近实时风场数据的对比分析, 说明了该技术的有效性. 在此基础上, 对反演得到的中速风场利用广义变分最佳分析方法进行了调整, 调整后的风场结构有了进一步的改善. 此方法可为我国散射计资料反演海面风场的研究提供新的思路和方法.

关键词: 多解方案, 二维变分同化, 广义变分最佳分析, 正则化方法

PACC: 9160P, 9260X

## 1. 引 言

海面风场是海洋学的重要物理参数, 几乎与所有的海水运动直接相关<sup>[1]</sup>. 星载微波散射计能够全天候、大面积获得海面风场信息而成为目前海洋、气象和气候学研究海面风场的主要测量工具<sup>[2]</sup>. 目前为止, 已成功发射并正常工作的微波散射计的乘载卫星主要包括 ERS-2/SCAT, QuikSCAT, SeaWinds 和 ASCAT 等.

利用微波散射计资料获取海面风场, 主要包括地球物理模型函数 (geophysical model function, GMF) 的求解和风向的模糊去除两个过程. 其中的 GMF 描述了海面风场与微波散射计测量得到的后向散射系数、天线方位角、波束局地入射角以及波束极化方式等参数的关系. 当前业务化使用的 GMF 均是依统计而建立的经验模型函数, 需通过一定的算法来实现 GMF 的求解, 而由 Bayes 理论发展而来的最大似然估计 (maximum likelihood estimation, MLE)<sup>[2,3]</sup>是目前公认的最佳求解方法. 由于微波散射计测量得到的后向散射系数存在测量噪声以及 GMF 在逆风和顺风观测时具有的各向异性不是很

明显, 通过 MLE 得到的风矢量解往往不唯一, 需要从这些模糊解中选择一个最接近真实解的风矢量作为反演的风矢量解, 这个过程称为风向的模糊去除, 也是微波散射计资料的海面风场反演中一个公认的难题. 国内外不少学者对此问题均进行了深入研究, Levy 等<sup>[4]</sup>于 1986 年提出了基于观测资料以及雷达数据分析排除风向伪解. 1990 年, Schultz<sup>[5]</sup>开创性的利用专家系统的知识提出了利用循环滤波法排除风向伪解. 林明森<sup>[6]</sup>在 1997 年提出基于风速等值线图判断风场结构的方法, 实现了风场的模糊去除, 而且结果表明, 其方法对于大尺度海面风场的反演能取得较好的效果. 1998 年, Long 等<sup>[7]</sup>建立了场方式模型的反演方法. 2000 年, 林明森<sup>[8]</sup>针对 Long 等建立的场方式模型反演方法存在计算量过大等问题, 提出压力投影法对速度和压力进行分解, 改进原方法中的地转风假设, 同时构造了新的差分格式及优化算子, 对原方法进行了简化和改进.

本文利用 QuikSCAT 散射计的近实时资料, 借助荷兰皇家气象学会 (Royal Netherlands Meteorological Institute, KNMI) 的 SeaWinds 散射计处理模式 (SeaWinds data processor, SDP), 在不同的风

速情况下,对比分析了二维变分同化方法(two-dimensional variational assimilation, 2DVAR)和2DVAR结合多解方案(multiple solution scheme, MSS)进行风向模糊去除的结果,并对2DVAR结合MSS进行风向模糊去除得到的海面风场与美国国家海洋和大气管理局卫星资料中心(NOAA/NESDIS)近实时风场做了定量比较,结果验证了2DVAR结合MSS进行风向模糊去除是一种合理而有效的方法.在此基础上,我们对反演得到的中速海面风场实施了广义变分最佳分析<sup>[9,10]</sup>,以风场的不可压缩性作为约束条件,并对涡度进行控制,从而实现对面场的调整,调整后的结果表明,风场结构得到了进一步改善.此方法可为我国散射计资料反演海面风场的研究提供一种新的思路和方法.

## 2. MSS 和 2DVAR

### 2.1. MSS

在微波散射计资料反演海面风场的过程中,对于GMF的求解(即求取风矢量单元(wind vector cell, WVC)处的风速与风向),通常是采用MLE进行求解.这里,我们记 $N$ 表示后向散射系数的测量次数 $\sigma_{mi}^o = \sigma_{mi}^o(w, \varphi_i)$ 为微波散射计测量得到的后向散射系数值 $\sigma_{si}^o = \sigma_{si}^o(w, \varphi_i)$ 表示针对不同的风速和风向,通过GMF得到的后向散射系数的模拟值,其中 $w$ 表示风速矢量的模,而 $\varphi_i$ 表示相对于雷达波束方位角的风向( $i = 1, \dots, N$ ),包含着风向 $\theta$ 的信息,通常

$$\sigma^o(w, \varphi_i) = B_0 [1 + B_1 \cos(\varphi_i) + B_2 \cos(2\varphi_i)]^z, \tag{1}$$

其中,系数 $B_0, B_1, B_2$ 是取决于风速、局地入射角、波束极化方式及微波频率的函数, $z$ 依赖于具体的GMF. MLE的代价函数定义为

$$J_1(w, \theta) = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[ \frac{(\sigma_{mi}^o - \sigma_{si}^o)^2}{C(\sigma_{si}^o)} + \ln(C(\sigma_{si}^o)) \right], \tag{2}$$

为了计算方便,常将上式中的负号去掉,这样可将MLE的代价函数表示为

$$J_2(w, \theta) = -J_1(w, \theta) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[ \frac{(\sigma_{mi}^o - \sigma_{si}^o)^2}{C(\sigma_{si}^o)} + \ln(C(\sigma_{si}^o)) \right], \tag{3}$$

其中 $C(\sigma_{si}^o) = \alpha(\sigma_{si}^o)^2 + \beta(\sigma_{si}^o) + \gamma$ 表示测量方差,系数 $\alpha, \beta, \gamma$ 是与天线和WVC相关的物理量.

针对QuikSCAT散射计的风场反演,通常将风向从 $0^\circ$ 到 $360^\circ$ 每 $2.5^\circ$ 分割,对每一个风向 $\theta$ ,通过对代价函数 $J_2(w, \theta)$ 求取极小值,可得到与每一个风向 $\theta$ 相对应的风速矢量的模 $w$ 值.风向搜索一圈,可得到共计144个风矢量解及与之对应的144个 $J_2$ 值.接着将这144个 $J_2$ 值依照风向连续变化的顺序排列,可得到如图1所示的 $J_2$ 的分布图.

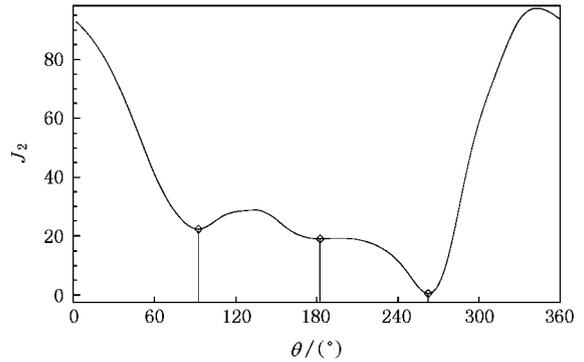


图1 某WVC处的 $J_2$ 随风向的分布<sup>[2]</sup>

通过比较相邻的 $J_2$ 值,可得到2—4个极小值,标准方案就是利用这2—4个极小值进行风向模糊去除,消除解的不唯一性,最终得到真实且唯一的风矢量解.

但对于星下点刈幅区域内WVC的 $J_2$ 值,由于前后两次扫描时,天线方位角相差近 $180^\circ$ ,且多样性很差,造成 $J_2$ 值随风向的分布变化较小,极小值不易区分选取.若单从 $J_2$ 值的大小出发,选择2—4个极小值进行风向的模糊去除,往往造成星下点刈幅区域内的风场模糊去除效果不理想. MSS就是将得到的144个风矢量解都用于风向的模糊去除,保证将全部的反演质量信息传递给模糊去除,从而进一步提高QuikSCAT散射计,特别是星下点刈幅区域内的模糊去除效果.

### 2.2. DVAR 的实施

变分同化的方法在大气科学及各个学科领域的研究中已得到广泛的应用<sup>[11-14]</sup>,它是利用一切有价值的信息,对大气与海洋的状态进行精确的描述.该方法可应用于风向的模糊去除,通过利用近表面风场的先验信息,可克服解的不适定性,即消除风向的不唯一性,从而找到最具可能的近表面风场解.

解的概率为

$$P(x \cap v_o^i) \propto P(v_o^i | x)P(x | x_b), \quad (4)$$

其中  $x$  为控制变量,  $x_b$  为背景场的信息,  $v_o^i$  为散射计反演得到的风矢量解,  $P(x \cap v_o^i)$  为近表面风场的真实场  $x$  与观测场  $v_o^i$  的联合概率,  $P(v_o^i | x)$  表示在给定状态  $x$  下观测到  $v_o^i$  的条件概率,  $P(x | x_b)$  表示在给定背景场  $x_b$  前提下, 得到近表面风场  $x$  的条件概率.

在此情况下, 求最大概率问题等价于

$$J(x) = -2\ln P(v_o^i | x) - 2\ln P(x | x_b) \\ \triangleq J_o^{\text{scat}}(v_o^i, x) + J_b(x) = \min!. \quad (5)$$

为了便于计算, 引入增量

$$\delta x = (x - x_b) = \begin{pmatrix} u' \\ v' \end{pmatrix} \\ (u', v' \text{ 分别为 } u, v \text{ 风的增量}), \quad (6)$$

从而代价函数可转化为

$$J(x) = J_o^{\text{scat}}(v_o^i, \delta x) + J_b(\delta x). \quad (7)$$

下面对(7)式等号右边二项分别进行计算:

### 1) 背景场项 $J_b(\delta x)$ 的计算

设背景场误差服从 Gauss 分布, 即

$$P(\delta x) \propto \exp\left\{-\frac{1}{2}\delta x^T B^{-1}\delta x\right\}, \quad (8)$$

$B$  为背景风场的协方差, 假定在  $i, j$  节点,  $B$  为  $2 \times 2$  风矢量分矩阵, 在均匀与各向同性假定下,  $B_{i,j}$  决定于距离  $|i-j|$ , 因而  $B$  对称, 于是  $J_b(\delta x)$  的计算方案如图 2 所示.

### 2) 观测场项 $J_o^{\text{scat}}(v_o^i, \delta x)$ 的计算

对于观测场项, 仪器、空间特征以及反演过程均会产生误差, 依据 Stoffelen<sup>[16]</sup> 关于散射计的模糊风矢量的误差分布在风矢量分量周围满足高斯分布特征的假定, 引进分析函数, 每一个风矢量单元的观测代价函数项可表示为:

$$J_o^{\text{scat}} = \left[\sum_{i=1}^N J_i^{-p}\right]^{-1/p}, \quad (p = 4), \quad (9) \\ J_i = -2\ln P(v_o^i | \delta x) \\ = \frac{(H(u) - u_i)^2 + (H(v) - v_i)^2}{\varepsilon_{si}^2} - 2\ln P_i, \quad (10)$$

式中  $N$  表示状态风矢量解个数,  $v_o^i$  表示状态风矢量解,  $\varepsilon_{si}$  表示总的平均风分量误差的期望标准偏差, 依据统计分析, 给定  $\varepsilon_{si} = 1.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $u_i, v_i$  为(观测值减去背景场值)风矢量分量的增量,  $H$  为观测

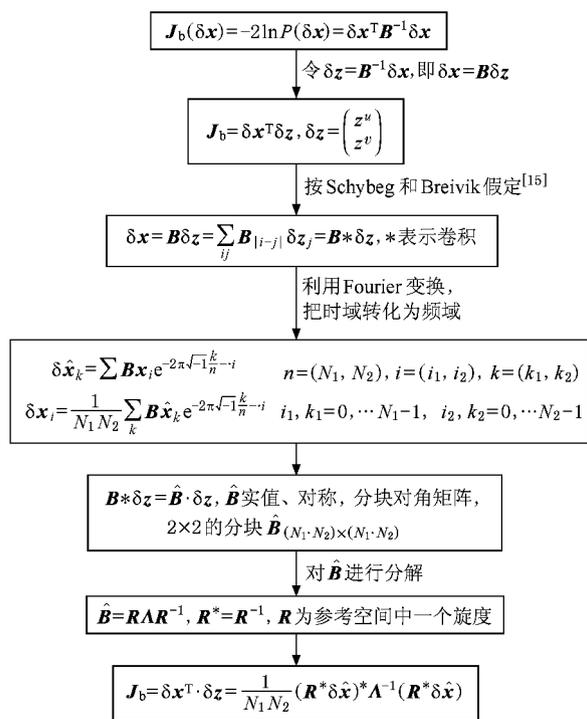


图 2  $J_b(\delta x)$  的计算流程图

算子, 在风场反演过程中, 表示将状态矢量映射到观测场的空间插值算子.  $P_i$  表示状态矢量成为真实解的概率, 例如, 对于 ERS/SCAT 散射计,  $P_i = 0.5$ , 因为两种状态矢量解(方向相反)几乎是具有相等的概率.

为了提高计算效率, 背景场代价因子项中的背景误差协方差矩阵  $B$  定义为对称正定矩阵, 假定其满足均匀各向同性, 可将协方差矩阵表示为距离的函数. 由于背景误差协方差无法直接观测得到, 在此, 采用经验协方差函数, 在气象上也称为观测方法, 基于观测场减去背景场的偏离量来获得背景误差协方差矩阵.

采用共轭梯度法对代价函数的极小化问题进行求解, 最优解可通过梯度方程求解得到

$$\nabla J(\delta x) = 0. \quad (11)$$

该方法将背景场项考虑到目标函数中, 利用风场结构去订正误差, 将产生在气象上更加相容的近表面风场的分析场<sup>[15, 17]</sup>.

## 3. 处理流程和数据来源

借助 SDP 处理模式, 按照图 3 所示的流程进行资料处理. 所用数据为 QuickSCAT 卫星上搭载的

SeaWinds 散射计所获取的近实时海面雷达后向散射系数值,由 NOAA/NESDIS 制作并分发,资料数据

格式为 BUFR. 该模式背景风场为 NCEP 模式风场,用于风向模糊去除. 模式输出分辨率选择为 25 km.

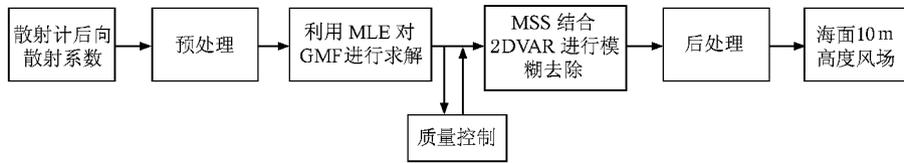


图 3 处理流程图

### 4. 数值结果及分析

#### 4.1. 低风速个案

本文选取的是 2006 年 9 月 12 日,世界时 22:20 QuikSCAT 扫描西太平洋—菲律宾群岛西南海域的风场个例. 结果如图 4 所示.

低风速通常指海面风场速度小于  $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的情况,风驱动生成的毛细波不明显,整个海面的“粗糙”度不够充分,与无风的平静海面差异不是很大.

海面对散射计的电磁波的散射作用是比较弱的,散射计接收的雷达后向散射系数值非常小,这种情况下的海面风场反演的效果往往是不理想的. 特别是在星下点刈幅区域,由于标准方案仅仅提供了至多 4 个模糊解,且极小值与其他值的区分不够明显,使得采用标准方案结合 2DVAR 的反演效果不理想,但是在采用 MSS 结合 2DVAR 后,由于 MSS 将所有的反演信息传递给了模糊去除阶段,使得风场反演效果得到显著改善,整个流场很平滑. 但同时也可以看到,由于对受质量控制和降水影响的雷达后向散射系数值进行了剔除,反演得到的风场不够完整.

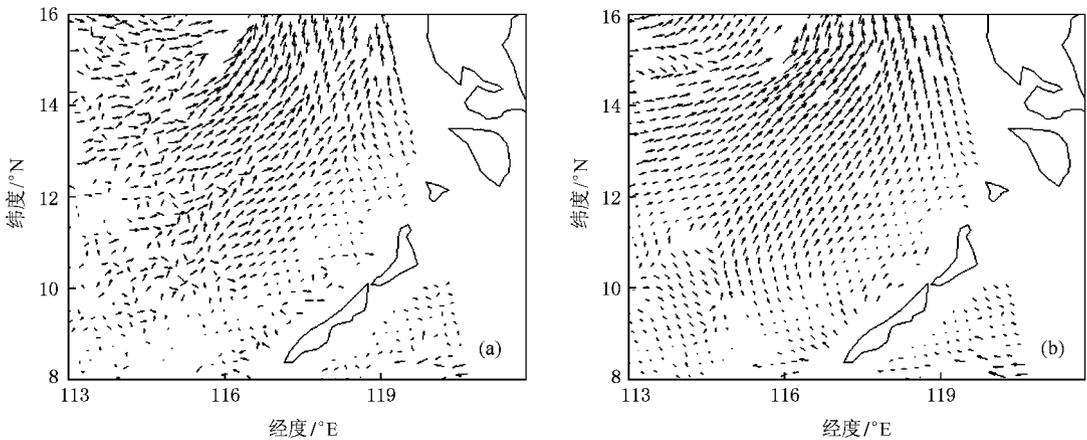


图 4 低风速情况下的海面风场反演 (a)2DVAR ,(b)2DVAR + MSS

#### 4.2. 中等风速个案

本文选择的是 2006 年 4 月 16 日,世界时 08:55 QuikSCAT 扫描西太平洋—菲律宾群岛以东海域的风场个例. 结果如图 5 所示.

中等风速通常指海面风场速度处于  $5-12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的情况,风驱动生成的毛细波明显,整个海面的“粗糙”度很充分,海面对散射计的电磁波的散射作用强,这种情况下的海面风场反演的效果往往是最理想的. 从图中也可以看到,采用标准方案结合

2DVAR 与采用 MSS 结合 2DVAR 的结果相差不大,只是由于 MSS 将所有的反演信息传递给了模糊去除阶段,使得风场反演效果得到进一步改善,流场更加平滑. 同时由于对受质量控制和降水影响的雷达后向散射系数值进行了剔除,反演得到的风场也是不够完整的.

#### 4.3. 高风速个案

本文选择的是 2006 年西北太平洋的第 13 号“珊珊”台风. 9 月 11 日,世界时 21:05,QuikSCAT

扫描到该次台风中心时的风场个例. 结果如图 6 所示.

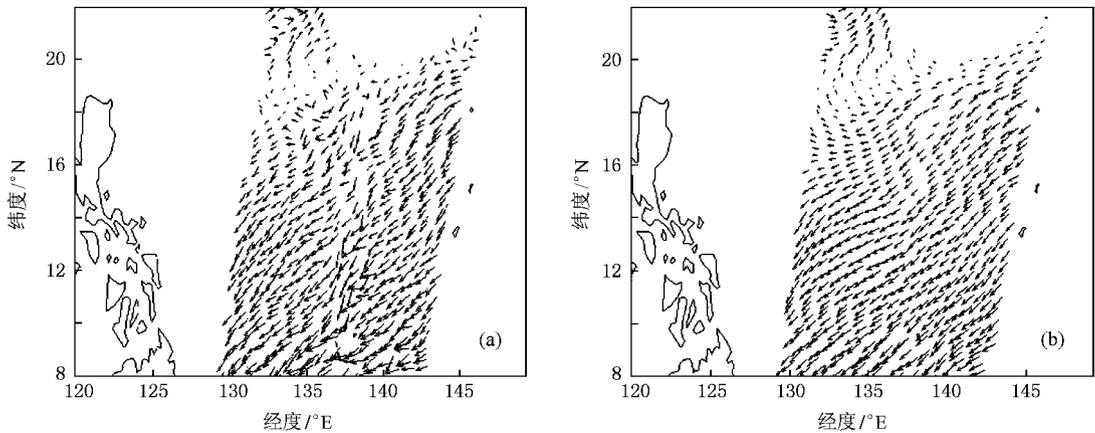


图 5 中等风速情况下的海面风场反演 (a)2DVAR ,(b)2DVAR + MSS

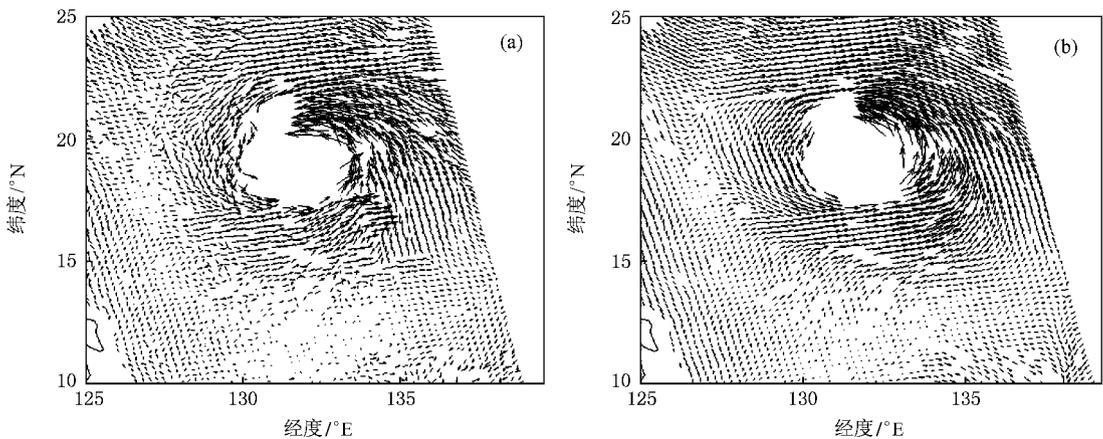


图 6 高风速情况下的海面风场反演 (a)2DVAR ,(b)2DVAR + MSS

高风速通常指风速大于  $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的情况. 风驱动生成的毛细波明显, 整个海面的“粗糙”度很充分, 海面对散射计的电磁波的散射作用强, 风场反演效果是很好的. 从图中也可以看到, 采用标准方案结合 2DVAR 与采用 MSS 结合 2DVAR 的结果相差不大, 只是由于 MSS 将所有的反演信息传递给了模糊去除阶段, 使得风场反演效果得到进一步改善, 流场更加平滑. 但是对受质量控制和降水影响的雷达后向散射系数值进行了剔除, 使得台风中心的风场没有反演出来, 出现了一个明显的空白区域.

#### 4. 4. 近海岸个例

本文选择的是 2006 年 9 月 8 日, 世界时 22:25, QuikSCAT 扫描我国南海海域的风场个例. 结果如图 7 所示.

近海岸风场的情况, 由于受到大陆地表的影 响, 海岸附近的风速不是很大. 尤其是在近海岸的低风速情况, 此种情况下的海面风场反演效果与低风速海面风场反演的情况一样. 同样采用标准方案结合 2DVAR 后, 由于标准方案仅仅提供了至多四个模糊解, 且极值与其他值的区分不够明显, 使得整个流场反演的效果很不理想, 甚至有些杂乱. 但是在采用 MSS 结合 2DVAR 后, 由于 MSS 将所有的反演信息传递给了模糊去除阶段, 使得风场反演效果得到显著改善, 整个流场很平滑. 但也可以看到, 部分风场区域由于受质量控制和降水影响而出现空白, 使得风场不完整.

从定量的角度对 2DVAR 模糊去除方案结合 MSS 的反演性能进行分析. 假定 NOAA/NESDIS 近实时风场为真实风场, 分别对风速和风向进行统计分析.

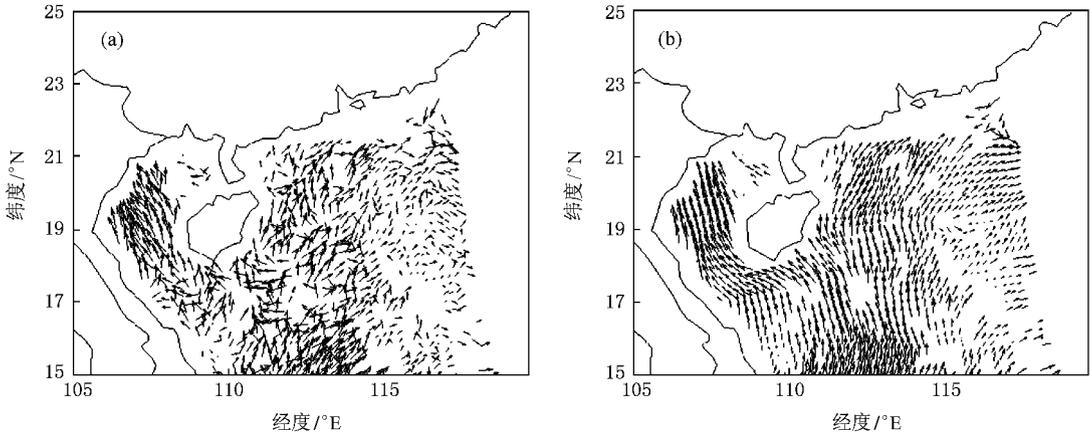


图 7 近海岸情况下的海面风场反演 (a)2DVAR ,(b)2DVAR + MSS

平均绝对误差  $\sigma_a$  的定义为

$$\sigma_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |a_i - b_i|. \quad (12)$$

均方根误差 (标准差)  $\sigma_s$  的定义为

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (a_i - b_i)^2}, \quad (13)$$

其中  $a_i, b_i$  为分析比较两个风场的第  $i$  个风速或风向. 选取 QuikSCAT 卫星 2006 年 9 月份的观测数据进行分析. 所选区域为西北太平洋上一个  $5^\circ \times 5^\circ$  的矩形范围, 具体为东经  $125^\circ-130^\circ$ , 北纬  $15^\circ-20^\circ$ . 在 2006 年 9 月份共收集处理了 41 个时次共计 13606 对风矢量样本数据. 分析结果如表 1 所示.

表 1 统计分析结果

	$\sigma_a$	$\sigma_s$
风速 / $m \cdot s^{-1}$	0.737044	1.07437
风向 / ( $^\circ$ )	26.0519	40.7728

### 5. 风场调整

利用 2DVAR 结合 MSS 进行散射计资料的海面风场反演, 取得了很好的效果. 但是由于模式的预处理程序对受降水等影响的雷达后向散射系数值进行了剔除, 没有进行海面风场反演, 造成散射计划幅区域内的风场不完整. 为了补全反演得到的风场, 并对结果进行质量控制, 现考虑中等风速情况下的个例 (2006 年 4 月 16 日, 世界时 08:55, QuikSCAT 扫描西太平洋—菲律宾群岛以东中纬度海域的风场). 由于该时次资料的海上大气满足中性层结, 因此海上 10 米高度处的风场满足准水平无

辐散条件, 即

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0. \quad (14)$$

采用微分约束下的条件变分 (变分最佳分析) 来进行风场调整, 进而达到改进风场反演的效果.  $(\tilde{u}, \tilde{v})$  表示反演得到的风场,  $(u, v)$  为分析场, 即调整得到的风场

$$J[u, v] = \frac{1}{2} \int_{\Omega} [(u - \tilde{u})^2 + (v - \tilde{v})^2] dx dy = \min!$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0. \quad (15)$$

为此, 引进 Lagrange 算子  $\lambda(x, y)$ , 则新泛函

$$J^*[u, v] = \int_{\Omega} \left[ \frac{1}{2} (u - \tilde{u})^2 + \frac{1}{2} (v - \tilde{v})^2 - \lambda(x, y) \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] dx dy = \min!. \quad (16)$$

通过计算可得到分析场如下:

$$\begin{aligned} u &= \tilde{u} - \frac{\partial \lambda}{\partial x}, \\ v &= \tilde{v} - \frac{\partial \lambda}{\partial y}, \end{aligned} \quad (17)$$

(17) 式还可写为

$$(u, v) = (\tilde{u}, \tilde{v}) - \nabla \lambda.$$

调整风场后, 风场既保证了不可压缩性, 又保证了涡度守恒性, 即  $\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x} - \frac{\partial \tilde{u}}{\partial y}$ . 而  $\lambda$  满足

Poisson 方程的 Dirichlet 边界条件

$$\Delta \lambda = \frac{\partial \tilde{u}}{\partial x} + \frac{\partial \tilde{v}}{\partial y}$$

$$\lambda|_{\partial\Omega} = 0. \quad (18)$$

解出  $\lambda(x, y)$  即可求出分析场  $(u, v)$ , 即调整得到的风场. 数值求解可采用松弛迭代法进行. 对所选散射计刈幅区域内的风场进行规则化网格点处理, 选取调整区域中间范围内的随机 400 个风矢量单元与作为 NOAA/NESDIS 近实时风场进行分析, 结果如表 2 所示.

表 2 对比分析结果

风速分量	$\sigma_a$		$\sigma_s$	
	初始风场	变分最佳调整	初始风场	变分最佳调整
$u/m \cdot s^{-1}$	0.86183	0.73762	1.24568	1.03079
$v/m \cdot s^{-1}$	0.81351	0.70412	0.93543	0.82511

结果表明, 利用仅有的观测资料  $(\tilde{u}, \tilde{v})$ , 采用变分最佳分析方法可使风场调整得到的  $(u, v)$  得到一定的改善. 为了消除高频成分, 我们设计如下的广义变分最佳分析方法: 在泛函  $J[u, v]$  中引入稳定的泛函

$$\gamma \int_{\Omega} \zeta^2 d\Omega = \gamma \int_{\Omega} \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 d\Omega, \quad (19)$$

$\zeta$  为垂直涡度, 此泛函在正则化中相当于半范的作用, 其目的是对垂直方向的涡度做了一定的限制, 其中  $\gamma$  为正则化参数, 引进新的泛函如下:

$$\begin{aligned} J^* [u, v] = & \int_{\Omega} \left[ \frac{1}{2} (u - \tilde{u})^2 + \frac{1}{2} (v - \tilde{v})^2 \right. \\ & \left. - \lambda(x, y) \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] dx dy \\ & + \frac{1}{2} \gamma \int_{\Omega} \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 dx dy, \quad (20) \\ 0 = \frac{\delta J^*}{2} = & \int_{\Omega} \left[ \left( u - \tilde{u} + \frac{\partial \lambda}{\partial x} + \gamma \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right) \delta u \right. \\ & \left. + \left( v - \tilde{v} + \frac{\partial \lambda}{\partial y} - \gamma \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right) \delta v \right] dx dy \\ & - \int_{\Omega} \frac{\partial \lambda}{\partial x} \delta \left( \frac{u}{v} \right) \cdot \mathbf{n} ds + \int_{\Omega} \frac{\partial \lambda}{\partial y} \delta \left( \frac{v}{-u} \right) \cdot \mathbf{n} ds, \quad (21) \end{aligned}$$

其中  $\mathbf{n}$  为  $\partial\Omega$  的单位外法向量, 由于  $\delta u, \delta v$  的任意性, 推出 Euler-Lagrange 方程如下:

$$\begin{aligned} u &= \tilde{u} - \frac{\partial \lambda}{\partial x} - \gamma \frac{\partial \zeta}{\partial y}, \\ v &= \tilde{v} - \frac{\partial \lambda}{\partial y} + \gamma \frac{\partial \zeta}{\partial x}. \quad (22) \end{aligned}$$

导出涡度的关系式, 由前式可得

$$\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial \tilde{u}}{\partial y} = \frac{\partial^2 \lambda}{\partial x \partial y} - \gamma \frac{\partial^2 \zeta}{\partial y^2}, \quad (23a)$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x} - \frac{\partial^2 \lambda}{\partial x \partial y} + \gamma \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2}, \quad (23b)$$

记  $\tilde{\zeta} = \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x} - \frac{\partial \tilde{u}}{\partial y}$  为垂直方向的观测涡度, 则  $\zeta$  满足如下的 Helmholtz 方程:

$$\Delta \zeta - \frac{\zeta}{\gamma} = -\frac{\tilde{\zeta}}{\gamma} \quad (24)$$

取边界条件为  $\zeta|_{\partial\Omega} = 0$ , 于是可解出  $\zeta$ , 进而求得  $(u, v)$  分析值.

上述方法即为广义变分最佳分析方法, 此方法不同于通常所说的弱势约束的方法, 因为我们没有假设  $\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \approx 0$  的条件, 只是对垂直涡度  $\zeta$  做了

有界性的限制, 泛函中加的  $\gamma \int_{\Omega} \zeta^2 d\Omega$  是稳定泛函. 由于风场反演往往是不适定的, 对于不适定问题, 采用 Tikhonov 正则化方法是非常必要的<sup>[18-20]</sup>. 在我们处理风场反演中, 引入正则化的目的是克服不适定性, 同时使风场反演具有较好的稳定性.  $\zeta$  数值求解可类似地采用松弛迭代法进行. 通过对正则化参数  $\gamma$  的选取, 当  $\gamma = 0.1d^2$  ( $d$  为网格点的格距) 时达到最佳效果, 进一步改进了风场. 调整风场结果与 NOAA/NESDIS 近实时风场进行分析, 结果如表 3 所示.

表 3 对比分析结果

风速分量	$\sigma_a$		$\sigma_s$	
	初始风场	广义变分最佳调整	初始风场	广义变分最佳调整
$u/m \cdot s^{-1}$	0.86183	0.73725	1.24568	1.03018
$v/m \cdot s^{-1}$	0.81351	0.70111	0.93543	0.82295

## 6. 结 论

结果说明利用 2DVAR 结合 MSS 进行散射计资料的海面风场反演可取得很好的效果. 对于散射计资料的海面风场反演, 该方法具有普遍的应用性. 本文的统计结果再一次说明了在 QuikSCAT 散射计资料的海面风场反演过程中, 风向的模糊去除是海面风场反演的主要难题, 这不仅与 QuikSCAT 散射计的自身刈幅特性有关, 特别是星下点刈幅区域的天线相对方位角较差; 也与统计分析中作为真实值的 NOAA/NESDIS 近实时风场自身存在误差有关. 通过引入变分控制方法, 对中等风速的海面风场进行了局部调整, 一方面实现了对反演风场的质量控

制,另一方面也达到了对反演风场的补缺,使反演效果得到进一步改善.对于结果的统计分析,应考虑引进浮标、商船等实际测量数据,以替代假定为真实风场的 NOAA/NESDIS 近实时风场,提高结果的可信度.下一步,对于高风速、强降水的台风风场的反演,应考虑降水等因素的影响,能否建立起一个更加完善的 GMF 是十分重要的,这也是 SDP 处理模式今后改进的方向;其次是模糊去除过程,能否引进更加高效的背景场从而对 2DVAR 作进一步

改进,仍有待继续深入研究,特别是借助于三维变分同化思想再结合反问题中正则化思想进行模糊去除是值得尝试的新方法;最后,对于不同情况下的海面风场,尤其是强涡旋的台风场,如何利用变分控制方法来改进风场的反演效果,这是我们继续研究的问题.

感谢 KNMI 为本研究提供了 SDP 处理模式及 SeaWinds 散射计近实时资料.

- [1] Liu L M 2005 *An Introduction to Satellite Oceanic Remote Sensing* (Wuhan: Wuhan University Press) p245 (in Chinese) [刘良明 2005 卫星海洋遥感导论 (武汉:武汉大学出版社) 第 245 页]
- [2] Marcos P A 2002 *Ph. D. Dissertation* (Barcelona: University of Barcelona)
- [3] Chi C Y, Li F K 1988 *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* **26** 115
- [4] Levy G, Brown R A 1986 *J. Geophys. Res.* **91** 5153
- [5] Schultz H 1990 *J. Geophys. Res.* **95** 5291
- [6] Lin M S, Sun Y, Zheng S Q 1997 *Acta Oceanologica. Sin.* **19** 35 (in Chinese) [林明森、孙 瀛、郑淑卿 1997 海洋学报 **19** 35]
- [7] Long D G, Medel J M 1990 *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* **28** 349
- [8] Lin M S 2000 *J. Remote Sensing* **4** 61 (in Chinese) [林明森 2000 遥感学报 **4** 61]
- [9] Sasaki Y K 1970 *Mon. Wea. Rev.* **98** 875
- [10] Huang S X, Xu D H, Lan W R, Teng J J 2005 *J. Hydrodynam. B* **17** 459
- [11] Huang S X, Wu R S 2005 *Mathematical and Physical Problems in Atmospheric Sciences* (Version 2) (Beijing: Chinese Meteorological Press) p460 (in Chinese) [黄思训、伍荣生 2005 大气科学中的数学物理基础 (第二版) (北京:气象出版社) 第 460 页]
- [12] Huang S X, Cai Q F, Xiang J, Zhang M 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3022 (in Chinese) [黄思训、蔡其发、项 杰、张 铭 2007 物理学报 **56** 3022]
- [13] Cao X Q, Huang S X, Du H D 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1984 (in Chinese) [曹小群、黄思训、杜华栋 2008 物理学报 **57** 1984]
- [14] 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]
- [15] Vogelzang J *Two dimensional variational ambiguity removal (2DVAR)* <http://www.metoffice.gov.uk/research/interproj/nwpsaf/scatterometer> [2007]
- [16] Stoffelen A, Anderson D 1997 *Quart. J. Roy. Met. Soc.* **123** 491
- [17] John D V, Stoffelen A *2D Variational Ambiguity Removal* <http://kodac.knmi.nl/publications/showAbstract.php?id=4213> [2000]
- [18] Tikhonov A N, Arsenin V Y 1997 *Solutions of Ill-Posed Problems* (Winston VH Sons: Washington DC Press)
- [19] Kirsch A 1996 *An Introduction to the Mathematical Theory of Inverse Problems* (New York: Springer-Verlag)
- [20] Huang S X, Han W, Wu R S 2004 *Sci. China D* **47** 630 (in Chinese) [黄思训、韩 威、伍荣生 2004 中国科学 **D 47** 630]

# Variational assimilation combined with generalized variational optimization analysis for sea surface wind retrieval from microwave scatterometer data<sup>\*</sup>

Zhang Liang Huang Si-Xun<sup>†</sup> Liu Yu-Di Zhong Jian

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

(Received 27 March 2009; revised manuscript received 22 July 2009)

## Abstract

In order to retrieve sea surface wind field from microwave scatterometer data, the SDP (SeaWinds Data Processor) model produced by KNMI (Royal Netherlands Meteorological Institute) was used to retrieve sea surface wind from near real time data of SeaWinds obtained by on aboard QuikSCAT in different regions under different wind speeds. In the case of integrating MSS (multiple solution scheme) with 2DVAR (two-dimensional variational assimilation) method for ambiguity removal, the effectiveness of this approach was demonstrated by comparing the four results (low speed wind field, middle speed wind, high speed wind field, coast region wind field) with NOAA/NESDIS (the National Oceanic and Atmospheric Administration's National Environmental Satellite, Data, and Information Service) near real time wind data model wind. Then we used generalized variational optimization analysis method to adjust the middle speed wind field, and the structure of the wind field was further improved. This paper offers a new idea for the study of sea surface wind retrieval from microwave scatterometer data.

**Keywords:** multiple solution scheme, two dimensional variational assimilation, generalized variational optimization analysis, regularization method

**PACC:** 9160P, 9260X

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 40775023) and the National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (Grant No. 2008BAC37B03)

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: huangxp@yahoo.com.cn