

文章编号: 1007-4619 (2000) 01-0061-05

一种修正的星载散射计反演海面风场的场方式反演算法

林明森

(国家海洋局 第三海洋研究所, 福建 厦门 361005)

摘 要: 由于卫星散射计探测雷达回波的各向异性的双调和性质, 同时由于散射物理模型函数的非线性及信号中存在噪声, 使得常规点方式风场反演中风向有多至 4 个解的多解存在。给出了一种改进的场方式反演方法, 利用该方法从卫星散射计测量的后向散射强度的数据中唯一反演出大尺度海洋风场。通过数值模拟和实际算例计算表明反演结果在风向、风速上都与真解是吻合的。从结果可以看到, 所采用的改进的场方式反演方法对模拟数据或真实散射计探测海面风场的反演是成功的。

关键词: 风向模糊清除; 场方式; 散射计

中图分类号: TP79/TP721.2 **文献标识码:** A

1 引 言

根据风散射计的工作原理, 风散射计测风测的是海面微波后向散射归一化雷达横截面值 σ° (NRCS), 根据 σ° 值反演海面风速风向。然而, 传统使用的反演算法会引起风矢量估算值不唯一, 即风向模糊性问题, 对某一点的测量会反演出 2—4 个风矢量, 这是风散射计的一个技术难题^[1]。虽然近 20 年来, 风散射计在天线和极化方式方面进行了大量的工作, 企图解决这一问题, 但从硬件上都无法从根本上解决问题^[2]。由于大多数的海洋学和气象学研究都要求风场的唯一解所以目前的反演方法都采用一种多解的消除方法来最终确定风场的唯一解^[3]。这种多解消除方法, 需要借助空气动力学的约束条件或其它一些观测资料及专家系统知识来判断, 从这些可能的模糊解中剔除一些解, 从而得到唯一的风场解。对风向模糊的排除精度直接影响到最终的风场精度, 所以对风向模糊的排除方法的研究是风场反演的关键技术, 不仅对散射计的应用具有重要意义, 而且对中国海洋热带气旋的大范围监测也具有重要意义。

Long 等人发展了场方式模型的反演方法^[4]。

这种方法区别于传统的点方式的反演方法之处在于: (1) 它充分地考虑了风场的动力约束机制, 并以一个简化了边界条件的风场模型来体现。(2) 不是简单地将采样点上的 σ° 测量值同该点的风矢量相关, 而是将整个割幅内的 σ° 测量的数据同风场的模型参数相联系。(3) 整个风场是同步求出, 保证了风场的连续性, 因而实际上可以从根本上解决多解的消除问题。(4) 对那些由于散射计标准周期或面元配对所引起的只有一个 σ° 测量值, 采用点方式反演方法在这些点上风矢量空缺, 而用场方式可以克服这一点。(5) 场方式反演方法的最大似然估计是考虑全域的最佳估计, 所以最佳估算解实际上总对应风场真解, 准确率为 100%。然而由于该方法的数学复杂性大大增加, 而且数值计算量也非常大, 即使对于目前使用的地转风简单模型, 要计算 8×8 网格上风场也有将近 40 个参数待优化, 还存在许多问题需要进一步研究。几年来该方法没有大的进展。

本文对 long 1998 年提出的场方式的风场反演方法进行改进, 提出了压力投影法对速度和压力进行分解, 改进了原场方式的地转风假设, 同时构造了新的差分格式及优化算子, 简化了参数优化, 得到的初步结果表明, 模拟数据或真实散射计探测海面风

收稿日期: 1998-07-03; 修订日期: 1999-09-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目第 49506074 号, 国家高技术研究发展计划(863)资助。本文所采用的卫星散射计数据由 ESA 的 IFMER 中心提供, 在此谨表谢意。

作者简介: 林明森(1963—), 男, 研究员, HY-1 卫星地面应用系统副总师。从事海洋微波遥感特别是散射计的风矢量反演方法研究, 发表论文 20 余篇。

场的反演是成功的。

2 场方式反演方法原理

考虑任意一个二维风矢量 $\mathbf{U}=(u, v)^T$, 则有限定义域内, 其散度和涡度为 δ 和 ξ 。

流体力学理论给出风场控制方程为:

$$\Delta \cdot \mathbf{U} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \Delta \mathbf{U} + \Delta P = 0 \tag{2}$$

引入流函数 ψ , 速度热 χ , 根据 Helmholtz 定理, \mathbf{U} 可以分解为: $\mathbf{U} = \mathbf{K} \times \Delta \psi + \Delta \chi$ (3)

其中: $\mathbf{K} \times \Delta \psi$ 为无散度矢量场; $\Delta \chi$ 为无旋矢量场; \mathbf{K} 为垂直地面的单位矢量。

根据 ψ, χ 的定义, 有:

$$\Delta^2 \psi = \xi \tag{4}$$

$$\Delta^2 \chi = \delta \tag{5}$$

公式(4), (5)为经典的泊松方程, 但是把一个风场定义为它的旋度及无散度分量, 然后从给定的涡度、散度中反演速度热, 这种反演方法在有限区域内其解是不唯一的。这点从(3)式中容易看出, 加上任意的调和函数到 χ 中, 而 ψ 不变, 其风场是相同的。从这点可以总结出, χ 的边值可以设为任意值, 也可推论出 χ 的边值可以设为 0 值, 对边界值为 0 值的 χ 将使动能的散度分量最小。选择边界上 $\chi=0$ 就可使场方式风场反演解唯一。这是场方式的第一个假设(边界上 $\chi=0$)。

设边界上 $\chi=0$, 则方程(4), (5)的散度场、温度场及 ψ 的边界条件满足我们所描述的风矢量场。对于公式(4), (5)泊松问题, 一旦边界条件给定, 其求解方法已有成熟的算法, 关键在于边界条件 ψ 的确定, 而事实上给定流函数 ψ 的边界值, 相当于对边界上的流线趋势有一个初步给定, 显然 ψ 的边界值给定应与压力边界值 P 相关。

在文献[5]中, 为了使 ψ 的边界条件简化, 作了如下第 2 个假设: $\psi = \frac{P}{\rho_s f}$ (6)
其中, ρ_s 为空气密度, f 为柯氏力参数。

实质上(6)式即为“地转风”假设, 并且上式成立有很强的条件要求。

有了(6)式, 作第 3 个假设, 认为 $\rho_s f$ 是常数, 则可对压力归一化, (3)式为:

$$u = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \chi}{\partial x} \tag{7}$$

$$v = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \chi}{\partial y} \tag{8}$$

从公式(7), (8), (4), (5)可进行场方式的具体计算。

第 4 个假设散度场、涡度场是相对光滑的, 可用低阶双变量多项式表示, 多项式系数可由一些现场数据推(回归)出来。其表达式为:

$$\xi(x, y) = \sum_{m=0}^{M_C} \sum_{n=0}^{M_C} c_{m, n} x^m y^n \tag{9a}$$

$$\delta(x, y) = \sum_{m=0}^{M_D} \sum_{n=0}^{M_D} d_{m, n} x^m y^n \tag{9b}$$

其中 M_C, M_D 为多项式阶数, $c_{m, n}, d_{m, n}$ 为模式参数, 总的参数的数目为: $N_C = (M_C + 1)(M_C + 2)/2, N_D = (M_D + 1)(M_D + 2)/2$, 已有研究表明, $M_C = M_D = 2$ 是合适的选择。

为了求解(7), (8), (4), (5)式, 要对方程组进行离散差分计算, 设等距网格点为 $N \times N$ 个, 若对 600 km 刈幅, 网格距为 25 km, 则 $N=24$ 。事实上可用分区求解减少 N 的数目。

对方程组的离散系统, 压力及速度势可以通过组合相抵消, 速度场可以直接用压力边界条件项及涡度、散度系数描述出来(方程(11), (12))。最终的方程即速度分量与压力场边界条件、涡度散度模式

参数的关系为:
$$\begin{bmatrix} \bar{u} \\ \bar{v} \end{bmatrix} = F\bar{X} \tag{10}$$

其中
$$\bar{u} = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{n1} & u_{n2} & \cdots & u_{nn} \end{bmatrix},$$

$$\bar{v} = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \cdots & v_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ v_{n1} & v_{n2} & \cdots & v_{nn} \end{bmatrix}$$

\bar{X} 为 $4N-2$ 个边界点的压力边界值及 $N_C + N_D$ 个涡度、散度系数, F 是已知的一个满秩矩阵系数。(10)式可由(7), (8)式推导出来。

(10)式中的模型参数 \bar{X} 的求解, 可直接从 σ^0 测量值优化求得, 然后根据(10)式即可计算风场矢量。下面给出从散射计测量的后向散射系数 σ^0 值中求解 \bar{X} 的过程。

设目标函数

$$l(\bar{X}) = - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^{L_{ij}} \{ l_n [k_p^2 \sigma_{ij}^{02}(k)] + [Z_{ij}(k) - \sigma_{ij}^0(k)]^2 / [k_p^2 \sigma_{ij}^{02}(k)] \} \tag{11}$$

其中: $\sigma_{ij}^0(k)$ 由散射计地球模型函数计算出来, $\sigma_{ij}^{02}(k) = M((F\bar{X})_{ij, k})^2$; $Z_{ij}(k)$ 为第 K 个实测 σ^0 ; k_p 为仪器辐射分辨率。

所以场方式反演计算步骤实质上由下述组成：

- (1)通过已知样本数据，回归计算 $c_{m, n}, d_{m, n}$ ；
- (2)从实测后向散射系数 Z 数据集，据(11)式的目标函数求极值得模式参数 \mathbf{X} (即变分问题)；
- (3)从模式参数 \mathbf{X} 经(10)式，计算整区域风场 (u, v) 值。

从以上的计算过程可知：

- (1)场方式反演方法从原理上不存在多解；
- (2)虽然场方式的多解不存在，但是共有 4 个假设，特别是地转风假设太强，地转风假设事实上只能用于平流风场；
- (3)由于(11)式的变分问题，及(10)式的风场计算，存在大矩阵的运算，所以计算量较大，实际计算时对计算机的条件要求太多，实际应用受限。

3 分步投影法的分解定理

D·G·Long 提出的场方式共有 4 个假设，第 1 个假设是边界上的速度势为常数，这个假设基本上对不可压缩大气是正确的。第 3 个假设认为大气密度与科氏力的乘积为常数，虽然科氏力随纬度有所变化但变化不大，而低速运动的大气本身就是不可压缩的。第 4 个假设在大中尺度下对 25 km 的面元分辨率其分布可以按双线性表达。主要存在问题的是第 2 个假设，该假设对平流风场是成立的，而对气旋和锋面等复杂风场是不成立的，本文主要提出一种数值迭代求解方法，该方法利用分步计算实现了速度场和压力场的分离，避免了地转风假设。为了消除假设 2 的限制，直接从散度和旋度的定义出发并离散之。我们可以从理论上证明投影分步算法的正确性，下面直接给出投影分解定理的结论。结论 A 为解析表达式，结论 B 为其离散下的表达式。

结论 A 任意矢量函数 \tilde{U} 定义在 Ω 内，可以唯一分解为：

$$\tilde{U} = U + \text{grad } \varphi \tag{12}$$

其中满足：

$$\text{div } U^0 = 0 \quad \text{在 } \Omega \text{ 内} \tag{13}$$

$$U^0 \cdot n = 0,$$

$$\oint_{\partial\Omega} \varphi U^0 \cdot n ds = 0, \quad \text{在 } \partial\Omega \text{ 内} \tag{14}$$

结论 B 任意矢量函数其离散分量为 $\tilde{u}_{jk}, \tilde{v}_{jk}$ ，相应定义于离散区域 I^x, I^y ，可唯一分解为：

$$\tilde{u}_{jk} = u_{jk} + \left[\frac{\delta_x \varphi}{\Delta x} \right]_{jk}, \quad (j, k) \in I^x, \tag{15a}$$

$$\tilde{v}_{jk} = v_{jk} + \left[\frac{\delta_y \varphi}{\Delta y} \right]_{jk}, \quad (j, k) \in I^y, \tag{15b}$$

其中， φ_{jk} 定义于内点域 I ， u_{jk}, v_{jk} 相应定义于 $I^x \cup I^y$ 及 $I^y \cup I^x$ 且满足：

$$\left[\frac{\delta_x \varphi}{\Delta x} \right]_{jk} + \left[\frac{\delta_y \varphi}{\Delta y} \right]_{jk} = 0, \quad (i, k) \in I, \tag{15}$$

$$u_{1k} = u_{lk}, \quad u_{j+1k} = u_{rk} \tag{16a}$$

$$v_{j1} = v_{jB}, \quad v_{jK+1} = v_{jA} \tag{16b}$$

边值满足：

$$\sum_{k=2}^{K+1} u_{rk} \Delta y - \sum_{k=2}^{K+1} u_{lk} \Delta y + \sum_{j=2}^{J+1} u_{jA} \Delta x - \sum_{j=2}^{J+1} u_{jB} \Delta x = 0 \tag{17}$$

4 分步投影算法

根据以上的投影分解定理，我们的分步投影计算为(对时间维进行迭代计算)：

$$u^* = u^n - \Delta t F^n \tag{18a}$$

$$v^* = v^n - \Delta t G^n \tag{18b}$$

$$u^{n+1} = u^* - \frac{\Delta t}{\Delta x} \delta_x P^{n+1} \tag{19a}$$

$$v^{n+1} = v^* - \frac{\Delta t}{\Delta y} \delta_y P^{n+1} \tag{19b}$$

$$\frac{1}{\Delta x} \left[\frac{\delta_x P^{n+1}}{\Delta x} \Big|_r - \frac{\delta_x P^{n+1}}{\Delta x} \Big|_l \right] + \frac{1}{\Delta y} \left[\frac{\delta_y P^{n+1}}{\Delta y} - \frac{\delta_y P^{n+1}}{\Delta y} \right] = - \left[\frac{1}{\Delta x} (F_r^n - F_l^n) + \frac{1}{\Delta y} (G_a^n - G_b^n) \right] \tag{20}$$

在从(18a, b)式中计算出 u^*, v^* 后，对(19a, b)式的 u^{n+1}, v^{n+1} 进行分解计算，相应于结论 B 中的 $\tilde{u}, \tilde{v}, u, v, \varphi$ 。我们有 $u^*, v^*, u^{n+1}, v^{n+1}, \Delta t p^{n+1}$ ，从结论 B，我们知道，若边界条件给定，且满足(17)式，从(20)式 p^{n+1} 可唯一确定到只差一个常数，则 u^{n+1}, v^{n+1} 同样可唯一确定。

引入分步投影算法后，可以用投影定理来计算速度与压力的相关，而不作(6)式的“地转风”假设。

计算步骤与 2 节中的过程相似，而有关分步计算的误差问题，从(18a, b), (19a, b)式的精度分析可知该差分格式为二阶精度，截断误差为 $o(\Delta^2)$ ，在时间维迭代时，只要选择小的时间步长，就可得到小的误差，而计算结果却与时间步长无关。

5 计算结果

为了验证场方式的可行性和精度，我们用 Monte-Carlo 方法进行数值模拟风场反演，首先模拟一幅 19×19 个面元的海上风场，例 1 为圆形台风，例 2 为平流风场，把已知的风场矢量、散射计天线入射角和天线方位角等参数代入模型函数 CMOD4 计算出后向散射 σ_{mk}^0 值，而模拟的测量值由下式给出：

$$\sigma_k^0 = \sigma_{mk}^0 + tk_p \sigma_k^0$$

其中 t 是期望为 0, 标准差为 1 的正态分布随机数, k_p 为仪器辐射分辨率, 分别取 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30% 进行模拟计算。

图 1 是 J 氏台风模型模拟圆形台风风场, 作为海面真风场; 图 2 给出经场方式反演台的真解; 图 3、图 4 给出例 1 风速、风向误差直观图, 真解由 J 氏台风模型给出的作为数值模拟已知的输入风场。

表 1 给出不同 k_p 值上收敛速度情况, 可以看出随着 k_p 值的增大, 迭代次数逐渐增大, 甚至不收敛, 可见当仪器误差较大时, 场方式反演方法也存在计算时间长及可能不收敛的情形。但是只要收敛, 结果都是一致的。

例 2 为星载散射计数据的台风场数据, 取自 ERS-1 散射计 1992 年 10 月 14 日 14 点 (GMT) 中国台湾岛以东的太平洋上, 反演范围为 127°-133°E, 18°-24°N 区域的气旋风场, 该风场为反时针气旋风场, 图 5 为场方式反演后的结果。

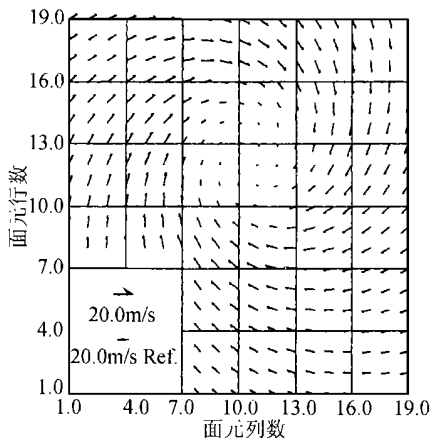


图 1 J 氏台风模拟风场

Fig. 1 Simulation J typhoon wind field

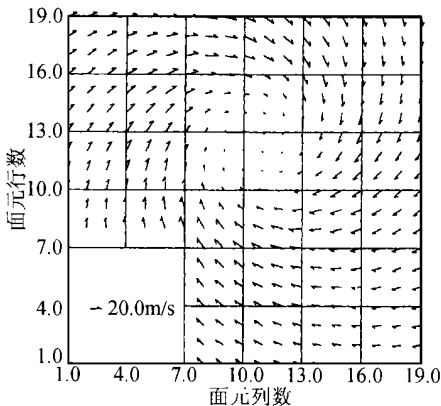


图 2 经反演后得到的风场

Fig. 2 The result retrieved from model-based

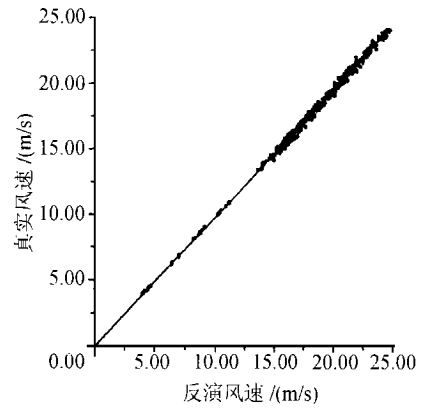


图 3 风速反演误差直观图

Fig. 3 The wind speed error map of results

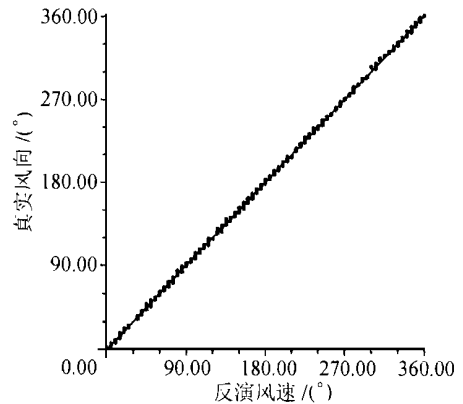


图 4 风向反演误差直观图

Fig. 4 The wind direction error map of results

表 1 不同 k_p 值时的收敛速度

Table 1 The convergence speed with various k_p value

k_p 值	气旋	平流
0.05	58	36
0.10	85	44
0.15	107	73
0.20	144	84
0.25	146	99
0.30	不收敛	109

第 3 个例子我们选取 ERS-1 卫星散射计 1992 年 10 月 14 日 15 点 (GMT) 的数据, 计算的区域选在 279°-286°E, 36°-42°S, 本算例包含有收敛线的风场, 其收敛线在智利以西的太平洋上, 收敛线位置为 283.7°E, 40.8S 的东南方向。图 6 为反演后的结果。

6 结 论

在以上几个例子的选择中, 我们通过模拟数据和真实散射计数据, 同时考虑了平流风场、气旋、锋面及收敛线等情形的复杂风场结构, 对场方式反演方法进行实验。可以看出, 场方式反演方法对星载

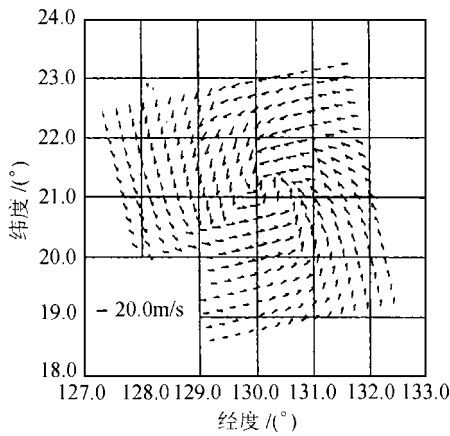


图5 例2经反演后的风场矢量图

Fig. 5 The result retrieved by model-based algorithm

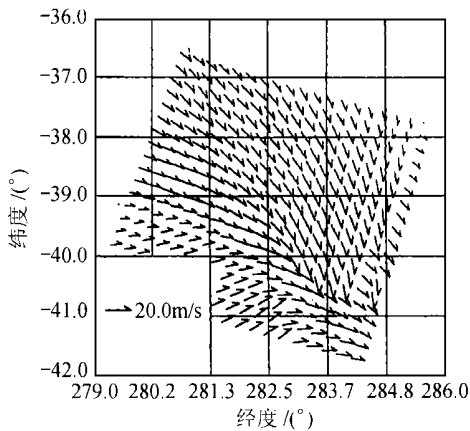


图6 例3反演后的风场矢量图

Fig. 6 The results of test 3

散射计数据反演的是成功的。虽然本文对场方式进行了改进,优化参数已有所减少,并且计算机的容量及速度都已大大改善,但是我们计算过程中仍然存在计算量过大的缺点。场方式反演方法有其特长之处,但是还不是一个可用于业务运行的方法。

参考文献 (References)

- [1] Jones W. L., et al. The SEASAT-A satellite scatterometer: The Geophysical Evaluation of Remote sensing wind vector over the ocean [J]. *J. of Geophysical Research*, 1982, **87**(C5): 3297-3317.
- [2] Bartoloni, et al. Wind reconstruction from scatterometer data [J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote and Sensing*, 1993, 31(5).
- [3] Schroeder, L. C., W. L. Grantham, et al. Removal of ambiguous wind direction for a Ku-band wind scatterometer using three different azimuth angle [J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1985, **23**(2): 91-100.
- [4] Long D. G., J. M. Mendel. Model-Based estimation of wind field over the ocean from wind scatterometer measurement. I: Development of the wind field model [J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1990, **28**(3): 349-360.
- [5] Lin Mingsen, Sun Ying. A study on a new retrieval algorithm for measurement of oceanic wind vectors using satellite microwave scatterometer [J]. *ACTA Oceanologica Sinica*, 1997, (5). [林明森, 孙瀛等. 用星载微波散射计测量海洋风场的反演方法研究 [J]. 海洋学报, 1997, (5).

A Modified Model Based on Estimation of Sea Surface Wind Field from Spaceborne Scatterometer

LIN Ming-sen

(The Third Institute of Oceanography, SOA, Amoy, 361005, China)

Abstract: Owing to the anisotropic and the biharmonic nature of microwave radar backscatter on spaceborne scatterometer, and to the scatter model function nonlinear and the existence of various noise sources in the measurements in addition to the model function, the retrieval wind results consist of as many as four wind directions. We introduce a modified model approach to estimate the unique synoptic oceanic wind field from backscatter of spaceborne scatterometer. The comparison those estimated from numerical simulation with real data shows the agreement largely in wind direction and in the true wind speed. It is demonstrated very successfully that the simulated or real scatterometer data with the modified model estimation has been retrieved in this paper.

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>
Key words: wind direction ambiguity removal; model-based estimation; Scatterometer