

文章编号: 1007-4619(2006)02-0236-06

一种海面风场反演的快速风矢量搜索算法

解学通^{1,2}, 方 裕¹, 陈克海², 陈晓翔²

(1. 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871; 2. 中山大学 遥感与地理信息工程系, 广东 广州 510275)

摘 要: 本文以 SeaW inds 散射计为例, 从最大似然估计的海面风场反演方法出发, 根据其目标函数的一般分布特征, 提出并实现了一种快速风矢量搜索算法。然后采用美国 SeaW inds 散射计的部分 LA 实测数据对该搜索算法进行了验证, 并与常规算法对同一实验数据的反演偏差及运行时间进行了对比分析, 结果表明该算法在能够保证反演精度的前提下, 在较大程度上提高了运行效率。

关键词: 散射计; 风场反演; 目标函数; 搜索策略

中图分类号: TP702 **文献标识码:** A

A Fast Wind Vector Search Algorithm for Ocean Surface Wind Retrieval

XIE Xue-tong^{1,2}, FANG Yu¹, CHEN Ke-hai², CHEN Xiao-xiang²

(1. College of Earth and Spatial Sciences Peking University, Beijing 100871, China;

2. Department of Remote Sensing and GIS Engineering, Zhongshan University, Guangdong Guangzhou 510275, China)

Abstract Based on the MLE (Maximum Likelihood Estimation) algorithm for SeaW inds scatterometer wind retrieval and according to the general distribution characteristics of its objective function, a fast wind vector search algorithm is described and realized in this paper. Using some SeaW inds L2A data, the fast algorithm is validated and compared with the ordinary one. The results indicate that the fast algorithm is more efficient than the ordinary one without reducing the retrieval accuracy.

Key words scatterometer; wind retrieval; objective function; search strategy

1 引 言

1978 年美国发射的 SEASAT-A 卫星及其散射计 SASS (SEASAT Scatterometer), 证明了可以利用星载散射计数据来反演海面风场信息 (风速和风向)。从此以后, 人们提出了多种 Ku 波段用于风场反演的模型函数^[1-5]。相应的反演方法主要有: SOS (Sum-of-Square) 法、MLE (Maximum Likelihood Estimation) 法、LS (Least Squares) 法、WLS (Weighted Least Squares) 法、AWLS (Adjustable Weighted Least

Squares) 法、L¹ 法和 LWSS (Least Wind Speed Squares) 法等^[6]。其中 MLE 法由于具有深刻的理论依据、反演精度高、完全独立于模型函数和后向散射测量值采用自然单位、取值范围不受限制等优点, 被认为是风场反演的最佳方法, 目前被用来处理 SeaW inds 散射计数据^[7]。SeaW inds 是一种圆锥型扫描方式、双铅笔状波束的散射计, 工作在 Ku 波段 (频率为 13.402GHz), 只有两个侧视角, 内侧波束为 40° (水平极化方式 HH), 外侧波束为 46° (垂直极化方式 VV), 是目前在轨运行的最新的散射计, 有关 SeaW inds 散射计设计特征、技术参数、工作原理以及

收稿日期: 2004-11-01; 修订日期: 2005-08-19

基金项目: 国家 863 计划项目 (2002AA134100) 和 (2001AA512042); 985 工程项目 (105203200400006)。

作者简介: 解学通 (1975—), 男, 北京大学遥感与地理信息系统研究所在职博士研究生、中山大学遥感与地理信息工程系助教。主要研究方向为地理信息系统、微波遥感和定量遥感。已发表论文 7 篇。E-mail: xiexuetong@yahoo.com.cn.

地面数据处理方面的详细情况参见文献 [8, 9]。

风矢量搜索算法是海面风场反演过程的核心内容, 现有散射计遥感海面风场方面的有关文献, 大多集中于对模型函数和一般反演方法的研究与探讨上, 而很少涉及具体的风矢量搜索算法。这对于彻底掌握和弄清散射计海面风场反演的整套技术无疑是一大障碍。实验表明, 风矢量搜索策略的实施包括具体的搜索过程以及风速、风向搜索间隔等参数的设置, 对于反演结果和效率的影响十分敏感。因此, 本文的主要目的就是要探索出一套简单易行、高效、高精度的风矢量搜索算法, 为发展中国自己的散射计海面风场反演技术服务。

MLE法目标函数的具体形式决定了在风矢量求解过程中, 固定风向时不能得到风速的解析表达式, 而必须采用数值方法求解风矢量。此外, 模型函数的形状和目标函数的非线性, 使得在反演过程中无法预知目标函数局部最大值的具体位置及数目。因此, 常规风矢量搜索算法, 需要在风速、风向二维空间的搜索范围内按一定间隔逐点搜索使得目标函数取得局部最大值的风矢量可能解^[7]。而目标函数的计算过程复杂, 计算次数随搜索间隔的减小成倍增大, 致使常规算法需要在运行效率与反演精度之间权衡。

本文针对常规算法的上述缺点, 以 SeaW inds 散射计为例, 根据其 MLE 目标函数的一般分布特征, 提出了一套快速风矢量搜索算法, 然后用美国 SeaW inds 散射计的部分 L2A 实测数据对该算法进行验证, 最后通过与常规算法运行时间以及 L2B 风场结果的比较, 分析了其运行效率与反演精度。

2 风场反演的模型函数和目标函数

2.1 模型函数

在星载微波散射计风场反演中, 用模型函数来刻画海面雷达后向散射截面 (σ^0) 与海面风矢量 (风速、风向) 和雷达测量参数之间的关系。SeaW inds 散射计所采用的模型函数形式如下^[5]:

$$\sigma^0(w, \theta, p) = A_0(w, \theta, p) + A_1(w, \theta, p) \cdot \cos^x + A_2(w, \theta, p) \cdot \cos 2^x \quad (1)$$

式中, w 、 θ 、 p 分别表示风速、雷达入射角、极化方式, x 为相对方位角, 即风向与雷达观测方位角之间的夹角。由此可见, 在其他参数不变时, 后向散射截面是相对方位角的以 2π 为周期的周期函数, 且关于 π 对称。在实际应用中, 一般将雷达后向散射截

面积随风速、相对方位角、入射角、极化方式等参数的变化按一定间隔做成离散表格的形式。反演时, 按给定的测量参数和风速、风向即可查出对应的后向散射模型值。目前, SeaW inds 散射计采用 qscat-1 离散模型函数表进行风场反演^[10]。

2.2 最大似然估计的目标函数

最大似然估计的海面风场反演方法假定, 后向散射截面测量值与模型值 (预测值) 之间的总体偏差符合均值为 0 的高斯正态分布, 总体偏差由测量误差和模型误差叠加构成。为了说明 MLE 法的基本原理, 下面给出其目标函数的简单推导过程^[7]。

设某地面分辨单元内的后向散射截面测量值数目为 N , 第 i 个测量值的总体偏差为 R_i , 偏差方差为 V_{R_i} , 则单个测量值总体偏差的条件概率密度函数为:

$$p(R_i | \sigma_i^0) = p(R_i | (w, \Phi)) = (V_{R_i})^{-1/2} \exp\{- (R_i)^2 / 2V_{R_i}\} \quad (2)$$

式中, (w, Φ) 为条件风矢量, 上式表示当风速为 w , 风向为 Φ 的条件下, 测量值与模型值总体偏差为 R_i 的概率。

由于同一地面分辨单元内的所有测量值对应于同一个风矢量 (w, Φ) , 而且不同测量值对应的总体偏差之间相互独立, 因此所有测量值的总体偏差的联合条件概率密度为:

$$p(R_1, \dots, R_N | (w, \Phi)) = \prod_{i=1}^N p(R_i | (w, \Phi)) \quad (3)$$

上式被称为风场反演的似然函数, 两边取自然对数并整理, 即可得到最大似然估计风矢量反演的目标函数:

$$J_{MLE}(w, \Phi) = - \sum_{i=1}^N \left[\frac{(z_i - M(w, \Phi - \phi_r, \theta_r, p_i))^2}{2V_{R_i}} + \ln \sqrt{V_{R_i}} \right] \quad (4)$$

式中, z 表示雷达后向散射截面积的实际测量值, M 为由模型函数计算所得雷达后向散射截面积, φ 表示雷达观测方位角。总体误差的方差 V_R 由模型函数和散射计系统特性决定, 是散射计设计参数和测量参数的函数。

风场反演实际上就是寻找使得 (4) 式取得局部最大值的的风矢量。在实际风场反演中, 目标函数一般存在 2-4 个局部最大值。每个局部最大值对应的风矢量为一个可能解, 也称为模糊解。将得到的模糊解按目标函数值由大到小的顺序排列, 就得到一组模糊解序列。模糊解中只有一个是真实解, 要求得最终的真实解, 需要进行模糊去除。本文主要讨论风场反演中的风矢量搜索算法, 有关模糊去除

方面的内容请参考文献 [11], 限于篇幅, 这里不作详细介绍。

3 快速风矢量搜索算法

尽管 MLE 法在反演过程中, 由于模型函数和目标函数的非线性及模型误差和测量误差的存在, 使得目标函数在不同分辨单元上的具体分布形式具有较大随机性, 难以根据测量参数预先确定目标函数局部最大值的数目和位置。然而实验证明, 模型函数的周期性和对称性却使得目标函数具有如下一般分布特征: 几个局部最大值对应的风速相差较小, 风向存在较大差异 (即局部最大值以较大风向隔开), 相邻风向上目标函数最大值对应的风速值变化缓慢; 目标函数在局部最大值附近小区域内分布平滑连续, 当固定风速或风向时, 目标函数随另一变量连续变化, 且只有一个最大值^[7]。

本文提出的快速风矢量搜索算法, 正是基于上述目标函数的一般分布特征。其基本思想是, 通过引入二次搜索策略, 将风矢量搜索过程分为两个主要步骤: 粗搜索和精搜索^[7]。局部最大值在风向上以较大间隔彼此分开, 使粗搜索的有效实施成为可能, 而目标函数在局部最大值附近平滑连续单峰则保证了精搜索的准确性。

3.1 粗搜索

所谓粗搜索是指在风速、风向二维空间内, 先以较大间隔搜索目标函数的局部最大值, 实现目标函数局部最大值的粗略定位。实验表明, 目标函数局部最大值对风速较为敏感。如果风速单位取 m/s , 风向单位取度, 则在局部极值点附近目标函数在风速上的变化率要远远大于在风向上的变化率。这也是为什么风场反演结果的几个模糊解中一般风速相差很小, 而主要存在风向模糊的主要原因。

根据上述目标函数变化率的特点, 在实验中, 设定粗搜索的风速间隔与风向间隔之比为 1:20。例如, 若风速搜索间隔取 $0.5m/s$ 则风向搜索间隔取 10° 。

3.2 精搜索

精搜索是在粗搜索的基础上, 以粗搜索得到的目标函数局部极值点为中心, 在风向方向上左右一定范围内 (一般与粗搜索风向间隔相同), 按比例缩小风速、风向搜索间隔, 采取与粗搜索相似的搜索策略, 实现目标函数局部最大值的精确定位。因为目

标函数对风速变化敏感, 所以在精搜索中对风速搜索范围不作限定。

3.3 算法的具体步骤

对风场反演的某一地面分辨单元, 快速风矢量搜索算法的具体步骤如下。

3.3.1 粗搜索的步骤

(1) 首先取风向为 0° , 给定一个起始风速 (如 $7m/s$), 在风速区间范围内 ($0-50m/s$) 按所设间隔, 寻找使 (4) 式取得最大值的的风速, 记录风速值和相应的目标函数值。具体搜索策略为: 在风速方向上取起始点左边 (或右边) 的相邻点, 分别计算起始点和该点的目标函数值并进行比较, 如果相邻点的目标函数值大于起始点的目标函数值, 则继续向左 (或向右) 搜索, 反之向右 (或向左) 搜索, 直到找到一个使得目标函数取得最大值的的风速。

(2) 风向增加一个间隔, 以前一个风向下找到的风速为起点, 按同样的搜索策略寻找一个使 (4) 式取得最大值的的风速, 记录该风速值及相应的目标函数值。

(3) 移向下一风向, 重复第 (2) 步操作, 直到在整个风向区间 ($0-360^\circ$) 搜索完毕为止。

(4) 将上一步搜索到的目标函数最大值, 再在风向方向上寻找局部最大值, 并记录其对应的风速、风向。

3.3.2 精搜索的步骤

(1) 以粗搜索得到的局部最大值点作为起点, 以局部最大值点对应的风速为起始风速, 采用与粗搜索相同的搜索策略, 按所设定的风速间隔, 寻找使 (4) 式取得最大值的的风速, 记录风速值和相应的目标函数值。

(2) 风向向左 (或向右) 增加一个间隔, 以前一个风向下找到的风速作为起始风速, 按同样的搜索策略寻找一个使 (4) 式取得最大值的的风速, 记录该风速值及相应的目标函数值。

(3) 比较以上两个相邻方向上的目标函数值, 确定搜索方向。若左边方向大于右边方向上的目标函数值, 则需继续向左搜索, 反之需向右搜索。

(4) 重复第 (2) 和第 (3) 步操作, 直到找到一个使得目标函数取得最大值的位置点或风向已超出所设定的搜索范围为止。

(5) 对其余局部最大值点重复第 (1) 至第 (4) 步。将局部最大值按从大到小的顺序排列, 取出前四个对应的风速、风向作为模糊解。

3.4 算法分析

这里通过与常规算法的比较来简单分析快速算法的运算复杂度。本文所提到的常规风矢量搜索算法,在搜索策略上与上述快速算法中的粗搜索过程完全相同。搜索完毕后,直接将第(4)步得到的目标函数局部最大值按从大到小的顺序排列,取出前四个对应的风速、风向作为模糊解。因此,常规算法在选择风向搜索间隔时,需要在运行效率与反演精度之间权衡。

根据两种算法的具体反演过程,当常规算法的搜索间隔与快速算法精搜索阶段的搜索间隔相同时,两者的反演精度相当,而快速算法的运算量将显著低于常规算法。由于在实际风场反演过程中,要求风速搜索间隔与风向搜索间隔的选择应该保持大致相等的比例,所以尽管搜索间隔取值不同,在某一固定风向上两种算法搜索风速时目标函数计算次数的差异却不大。其运算复杂度的差异,主要体现在风向搜索间隔的不同造成的影响。如果常规算法风速、风向搜索间隔分别取 0.1m/s 和 2° ;快速算法风速、风向的粗搜索间隔分别取 0.5m/s 和 10° ;精搜索间隔与常规算法相同,那么在暂且忽略精搜索运算复杂度时,常规算法的运算量约为快速算法的 5 倍。快速算法在大大减少目标函数计算次数的前提下,只需在几个局部最大值点左右两侧较小风向邻域内作精搜索。此外,在精搜索时,风向上也采取了与风速向上相同的搜索策略,即不需要在所取的风向搜索范围内的各个风向上都进行风速搜索,而是先确定搜索方向再进行搜索,从而有效降低了精搜索的运算量。同时,粗搜索得到的目标函数最大值个数少,一般仅为 2—6 个。所以,与常规算法相比,精搜索的运算量相对很小。这一点将会在下面运行时间的比较中得到证实。

4 实验与分析

4.1 数据选取与描述

这里采用 2000 年美国 SeaWiFS 散射计、轨道号为 07391 的部分 L2A 实测数据,对本文提出的快速风矢量搜索算法进行验证。所选数据的行号为:1130—1189,列号为 1—30。SeaWiFS 散射计一条轨道包括 1624 行、76 列个地面分辨单元,每个地面分辨单元大小为 $25\text{km} \times 25\text{km}$ 。行号的记录顺序沿卫星飞行方向,列号从左到右分别为 1 至 76。因

此,所选区域为地面左半个轨道的一部分。数据的选取主要考虑到运算量和受散射计本身特征影响星下点附近区域反演精度低等因素。

4.2 结果分析

本实验快速算法的主要参数设置为:粗搜索风速、风向间隔分别设为 0.5m/s 和 10° ;精搜索风速、风向间隔分别设为 0.1m/s 和 2° ;精搜索风向搜索范围为 20° (以粗搜索得到的局部最大值点为中心左右各取 10°)。

图 1 为快速算法对实验数据反演后的第一模糊解风场,图 2 为模糊去除后的风场,图 3 为 NASA 对同一区域反演并经模糊去除后的 L2B 风场。各图中的箭头方向表示风向,箭头长度和灰度表示风速,长度越大、灰度越黑,表示风速越大,反之风速越小。由于所选数据行数较多,为了显示方便和节约篇幅,这里采用隔行显示。

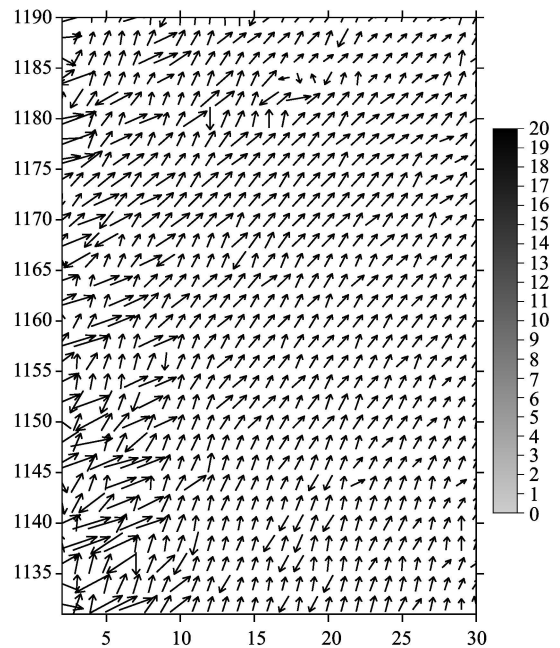


图 1 快速算法反演后的第一模糊解风场图

Fig 1 The first ambiguity wind vector field retrieved by fast algorithm

从图 1 可以看出,图中大部分区域风矢量分布连续,只有轨道左侧边缘条带区域内的部分单元以及其他个别单元的风矢量分布紊乱,呈现局部不连续现象,说明这部分单元反演出的第一模糊解极可能是伪解。伪解的分布与 SeaWiFS 散射计特性有关,这里不作详细讨论。图 2 与图 1 相比,局部区域及个别单元的风向分布不连续现象基本得到消除。

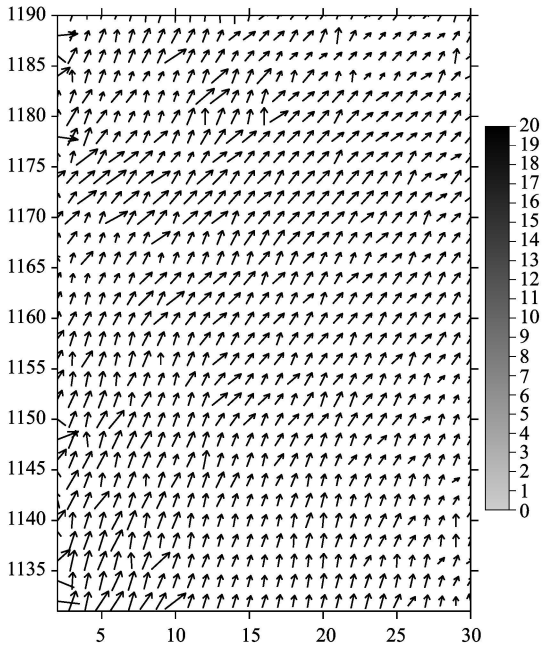


图 2 快速算法模糊去除后的风场图

Fig 2 The wind vector field after ambiguity removal for ordinary algorithm

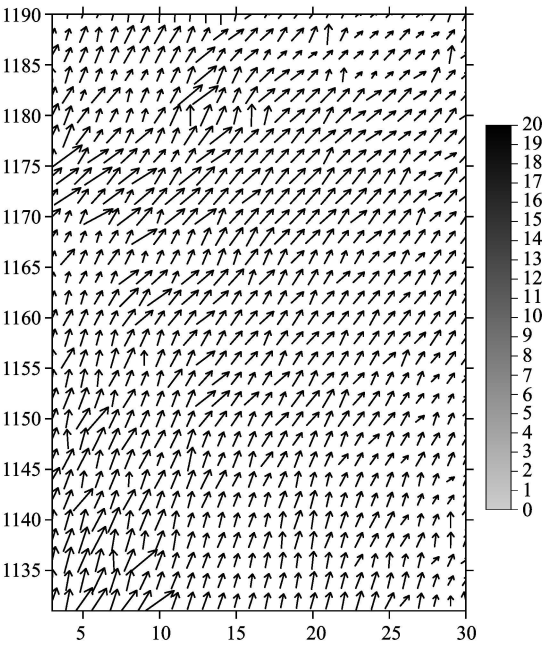


图 3 美国 L2B 同区域风场图

Fig 3 American L2B wind vector field for the same region

和图 3 中风矢量的宏观分布特征基本一致。这从定性的角度说明反演结果是基本正确的。

4.3 精度分析

以上从宏观和定性的角度分析了算法潜在的可

行性,下面从定量的角度进一步分析其运行结果与 L2B 的偏差情况,考察反演精度。为了便于对比,将常规算法和快速算法反演并经模糊去除后的结果与同区域美国 L2B 的风场逐单元地进行了偏差统计。常规算法风速、风向搜索间隔分别设为 0.1m/s 和 2° 。两种算法反演偏差统计结果见表 1 和表 2。

表中各项偏差都是基于绝对偏差进行统计的,因为对于风速来说,计算值是高于参考值还是低于参考值具有较大随机性;而对于风向而言其偏离值根本无所谓正负。从这个角度讲,绝对偏差更具有统计意义和便于比较。由于风矢量偏差的计算是逐个按分辨单元进行的,而不同分辨单元的风速存在着差异,特别是统计区域较大时,这种差异会更加显著。为了消除风速大小对偏差估计的影响,还对风速进行了平均相对偏差的统计。而风向是以 2π 为周期的圆分布,不存在相对偏差。偏差方差反映了不同分辨单元之间偏差的波动情况。表 1 和表 2 的统计结果表明,快速算法与常规算法在各统计指标上的差异不大,特别是风速、风向平均偏差和风速平均相对偏差数值相差很小,证明两种算法的反演精度相当。并且两者风速、风向的平均偏差和风速的平均相对偏差,都远远小于风场反演精度要求所规定的阈值(风速误差 $<2\text{m/s}$ 或相对误差 $<10\%$, 风向误差 $<20^\circ$)。尽管缺乏海面实测数据进行精度检验,但考虑到美国 L2B 反演精度比较稳定,而且 L2B 与真实风矢量的偏差以及两种算法运行结果与 L2B 的偏差均符合正态分布,两者叠加的结果使得两种算法在风速、风向上的平均最大误差分别为:常规算法风速平均最大误差为 2.066218m/s 或相对误差为 10.5772% 、风向平均最大误差为 20.817227° (常规算法);快速算法风速平均最大误差为 2.065616m/s 或相对误差为 10.5775% 、风向平均最大误差为 20.814426° 。而绝大多数分辨单元的反演误差都应该落在精度要求的范围之内,即能够达到反演精度的要求。

4.4 效率分析

在实验中,还对快速算法与常规算法的运行时间进行了比较。两种算法有关参数设置与上文保持一致。实验所用工作平台为 733MHz 主频, 256M 内存的微机。表 3 给出了两种算法每个分辨单元的平均运行时间和目标函数平均计算次数。可以发现,在上述平台和参数设置条件下,快速算法的运行时间和目标函数计算次数约为常规算法的 $1/4$, 运行效率约为常规算法的 4 倍。

表 1 常规算法模糊去除后的风场与 L2B 风场偏差统计表

Table 1 The statistics on biases between wind vector field retrieved with ordinary algorithm and L2B wind vector field after ambiguity removal

	最小偏差	最大偏差	平均偏差	偏差方差	平均相对偏差 /%
风速 / (m/s)	0.0	3.51	0.066218	0.208675	0.5772
风向 / (°)	0.0	39.0	0.817227	2.703217	—

表 2 快速算法模糊去除后的风场与 L2B 风场偏差统计表

Table 2 The statistics on biases between wind vector field retrieved with fast algorithm and L2B wind vector field after ambiguity removal

	最小偏差	最大偏差	平均偏差	偏差方差	平均相对偏差 /%
风速 / (m/s)	0.0	1.74	0.065616	0.195892	0.5775
风向 / (°)	0.0	39.0	0.814426	2.691388	—

表 3 常规算法与快速算法运行时间及目标函数计算次数比较

Table 3 The comparison on run time and calculation times of objective function between ordinary algorithm and fast algorithm

	平均运行时间 /s	目标函数平均计算次数
常规算法	0.016185	788 779769
快速算法	0.004046	196 872832

to Derive SEASAT-A Satellite Scatterometer Winds [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1982, **87**(5): 3318—3336

[3] Wentz F J, Peteherych S, Thomas L A. A Model Function for Ocean Radar Cross Sections at 14.6GHz [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1984, **89**(3): 3689—3740

[4] Wentz F J, Mattox L A. New Algorithms for Microwave Measurements of Ocean Winds: Application to Seasat and the Special Sensor Microwave Imager [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1986, **91**(2): 2289—2307.

[5] Nghiem S V, Li F K, Neumann G. Ku-Band Ocean Backscatter Functions for Surface Wind Retrieval [C]. In: *Proceedings of the 1996 International Geoscience and Remote Sensing Symposium on Remote Sensing for a Sustainable Future*, May 1996, **3**: 1469—1471.

[6] Chi C Y, Li F K. A Comparative Study of Several Wind Estimation Algorithms for Spaceborne Scatterometers [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1988, **26**(2): 115—121.

[7] Freilich M H. SeaWinds Algorithm Theoretical Basis Document [R]. http://podaac.jpl.nasa.gov/quikscat/qscat_doc/NASA/JPL_2000

[8] Freilich M H, Long D G, Spencer M W. SeaWinds: A Scanning Scatterometer for ADEOS-II-science Overview [C]. In: *Proceedings of the 1994 International Geoscience and Remote Sensing Symposium on Surface and Atmospheric Remote Sensing: Technologies, Data Analysis and Interpretation*, Aug 1994, **2**: 960—963.

[9] Tsai W T, Spencer M, Wu C, et al. SeaWinds on QuikSCAT: Sensor Description and Mission Overview [C]. In: *Proceedings of the 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, July 2000, **3**: 1021—1023.

[10] ftp://podaac.jpl.nasa.gov/pub/ocean_wind/quikscat/model_function/

[11] Howard Schultz. A Circular Median Filter Approach for Resolving Directional Ambiguities in Wind Fields Retrieved From Spaceborne Scatterometer Data [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1990, **95**(4): 5291—5303.

5 结 论

从反演精度与运行效率来看,本文提出的快速风矢量搜索算法是可行的,在能够保证反演精度的前提下,在较大程度上提高了运行效率。特别是在需要以整条轨道为单位、大规模处理数据的情况下,该算法将发挥更大的优势。需要指出的是,快速算法可以通过减小精搜索阶段的搜索间隔来提高反演精度,而运算量并无明显增大,因此选择搜索间隔时不必像常规算法那样,需要在运行效率与反演精度之间权衡。

尽管不同的散射计由于其工作波段不同,采用的模型函数及目标函数不同,在反演中目标函数形态可能存在细微差异,但其目标函数的一般分布特征是一致的,反演过程存在共同的一般规律。所以该算法可以推广到其他散射计的风场反演中。

参 考 文 献 (References)

[1] Jones W J, Schroeder L C, Boggs D H, et al. The SEASAT-A Satellite Scatterometer: The Geophysical Evaluation of Remote Sensed Wind Vectors over the Ocean [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1982, **87**(5): 3297—3317.

[2] Schroeder L C, Boggs D H, Dome G J, et al. The Relationship between Wind Vector and Normalized Radar Cross Section Used