

SeaWinds 散射计海面风场的几何反演算法

陈晓翔, 戴泳斯, 吴 波, 解学通

中山大学地理学院遥感与地理信息工程系, 广东 广州 510275

摘 要: 基于 SeaWinds 散射计雷达后向散射截面随风速和相对方位角的变化规律, 从信息图谱几何形态特征出发, 提出了一种新的海面风场反演方法。它不同于传统的依据最小概率误差的遍历搜索算法, 反演时不依赖方差, 仅从信息图谱几何形态特征就可以反演风矢量。实验共用了 218623 条数据(即 218623 个风元)。实验结果表明, 与对应的美国 NASA 反演数据(L2B)对比, 风速平均相对偏差为 7.4%, 风向平均偏差为 9.5°。

关键词: SeaWinds 散射计, 风场反演, 信息图谱, 聚合节点集, 重心点

中图分类号: P47

文献标识码: A

1 引 言

海面风场信息对于区域或全球的各种海洋、气象及气候等现象的研究与预报具有重要作用。随着空间技术的发展, 星载散射计遥感在全天时、全天候、快速为海洋与气象等研究领域提供高精度、高分辨率全球海面风场信息方面发挥越来越重要的作用(Freilich, 2000, Graf 等, 1995)。SeaWinds 散射计于 1999-06-19 随 Quikscat 卫星发射升空, 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, 是目前在轨运行的一种最新的散射计(Freilich 等, 1994; Tsai 等, 2000)。

从第一颗专门用于海洋遥感的卫星 SEASAT 发射到现在, 人们不断提出用于散射计海面风场遥感的模型函数和反演方法, 模型函数的非线性决定了风场反演方法的复杂性(Schroeder, 1982; Nghiem, 1996)。传统的星载散射计海面风场反演算法主要有: 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(Chi & Li, 1988)。以上反演算法必须以目标函数值作为确定风矢量解的度量指标, 即需要在风速、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小值的风矢量可能解。

目标函数计算复杂, 对方差敏感导致对反演精度有很大影响。方差的来源主要由大气传输过程中的不确定性(如: 大气中的水汽含量与分布)、仪器与传感器本身的噪音信号、非海风引起的海面粗糙度变化(如: 地形、海流、波浪等引起的海面粗糙度变化)3 个干扰因素构成。要准确确定方差是极其困难的。

本文依据 SeaWinds 雷达后向散射截面随风速和相对方位角的变化规律, 基于信息图谱几何形态特征, 提出一种新的海面风场反演方法。该反演方法不依赖于方差, 因此对影响方差的 3 个因素不必进行严格的校正。

2 传统的风场反演方法

2.1 风场反演的原理

海面风场反演的原理是依据实测得到的海面雷达后向散射截面(σ_0)和风速、相对方位角(风向与雷达观测方向之间的夹角)之间的关系(图 1), 对于不同的入射角及极化方式有类似的曲线图。为了用函数的方式表达这种关系, 人们发展了多种目标函数, 并提出了相应的反演算法(Freilich, 2000; Schroeder, 1982; Nghiem, 1996; Chi & Li, 1988)。

2.2 传统的海面风场反演算法

传统的各种反演算法经过理论推导, 大多归纳为统一的目标函数形式:

收稿日期: 2006-11-13; 修订日期: 2008-04-10

基金项目: 国家 863 项目(编号: 2001AA512042); “985 工程”GIS 与遥感地学应用科技创新平台项目(编号: 105203200400006)。

第一作者简介: 陈晓翔(1956—), 男, 教授, 博士生导师, 遥感信息提取与 GIS 应用方向, 发表论文 50 余篇。E-mail: eescxx@mail.sysu.edu.cn。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

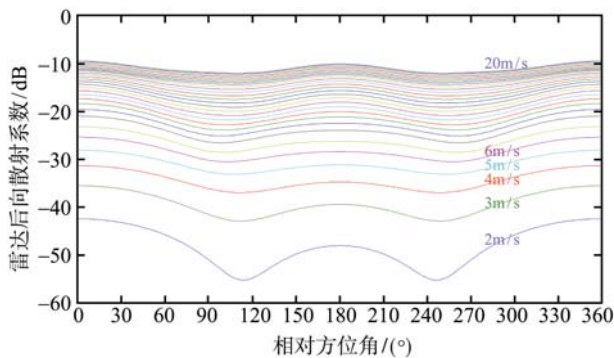


图1 SeaWinds/Quickscat 46°入射角的后向散射信息图谱

$$J(U, \phi) = \sum_{i=1}^N \left(\left| \frac{e_i}{\delta_i} \right|^p + q \ln \delta_i^p \right) \quad (1)$$

式中, U , ϕ 分别为风速和风向; δ_i 为模型误差和测量误差构成的总体误差的标准差; e_i 为后向散射测量值与模型值之差或真实风速与模型计算所得风速之差; p , q 为常数; N 为测量值数目。传统的风场反演算法就是要寻找使得上式取得局部最小值的风矢量。

由式(1)看出, 模型函数是非线形的。正是由于模型函数的非线性以及模型误差和测量误差的存在, 使得反演变得复杂, 不能简单采用解析的方法实现。传统的反演方法是在风速、风向二维空间中寻找使得目标函数值取得局部极值的风矢量作为可能解。这些可能解又称为模糊解, 模糊解的数目一般为 2—4 个, 其中一个较接近真解, 其他的称为伪解。要得到唯一的真解需要对初步反演结果进行模糊去除(Schultz, 1990), 散射计风场反演由模糊求解(解出 2—6 个模糊解)和模糊解消除(如: 圆中数滤波)构成。

最大似然法因其具有反演精度高、取值范围不受限制等优点, 被认为是目前风场反演的最佳方法, 可以用来处理 SeaWinds 散射计数据, 提取海面风场信息(Freilich, 2000)。但是与其他传统方法一样, 也依赖于目标函数来确定风矢量解。其原始目标函数形式如下(Freilich, 2000):

$$J_{MLE}(\omega, \phi) = - \sum_{i=1}^N \left[\frac{(\sigma_i^0 - M(\omega, \phi - \phi_i, \theta_i, p_i))^2}{2V_{Ri}} + \ln \sqrt{V_{Ri}} \right] \quad (2)$$

式中, σ_i^0 为某地面分辨单元内第 i 个雷达后向散射截面测量值; $M(\omega, \phi - \phi_i, \theta_i, p_i)$ 表示第 i 个测量值对应的雷达观测方位角为 ϕ_i 、入射角为 θ_i 、极化方式为 p_i , 并假定风速为 ω 、风向为 ϕ 时雷达后向散射截面积的模型预测值; V_{Ri} 为相同参数条件下, 模型误差与测量误差构成的总体误差的方差。在实际应用

计算中, 式(2)往往演化成各种简化的形式, 方差往往隐藏在由卫星数据接收部门(如: NASA)提供的系数中, 在大多数情况下, 卫星接收部门不提供(或不能及时提供)关键的系数。

传统的最大似然反演算法的一般步骤如下(Freilich, 2000):

(1) 首先取相对风向为 0° , 给定一个起始风速, 在风速区间范围内按一定间隔寻找使式(2)取得最大值的风速, 并记录风速值与相应的目标函数值。

(2) 相对风向增加一个间隔, 用上一个相对风向下找到风速作为起点, 按第(1)步的搜索策略寻找一个使式(2)取得最大值的风速, 并记录风速值与相应的目标函数值。

(3) 移向下一个相对风向, 重复第(2)步操作, 直到整个相对风向区间(0° — 360°)搜索完毕为止。

(4) 将上一步搜索到的目标函数最大值, 在相对风向上寻找局部最大值, 并作为初步反演的模糊解。

2.3 存在的主要缺点

由于传统风场反演算法依赖于目标函数, 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极值的风矢量可能解。因此, 传统风场反演算法存在如下几个缺点:

(1) 目标函数计算复杂, 导致传统算法的运算量大。传统反演算法实际上就是在某一搜索范围内将不同风矢量代入目标函数逐个测试的过程。目标函数计算次数随搜索间隔的减小成倍增大, 致使传统算法需要在运行效率与反演精度之间权衡;

(2) 传统算法依赖于方差, 且对方差反应敏感。方差的来源主要由大气传输过程中的不确定性(如: 大气中的水气含量与分布)、仪器与传感器本身的噪音信号、非海风引起的海面粗糙度变化(如: 地形、海流、波浪等引起的海面粗糙度变化)3 个干扰因素构成。要准确确定方差是极其困难的。

(3) 传统反演算法相对固定, 可调节性差, 导致风向经常有较大误差, 而又难以改进。

3 新的反演方法

3.1 新反演方法的思路

SeaWinds 散射计只有 2 个入射角, 即 46° (H-Pol)和 54° (V-Pol), 分别对应水平极化方式和垂直极化方式。图 1 是水平极化方式(46° 入射角)下雷达后向散射截面随风速和相对方位角的变化情况, 也

就是实际测量得到的 SeaWinds/Quickscat 46°天线的后向散射信息图谱。

图 1 中不同的曲线对应不同的风速。曲线对应的风速由下往上递增。图 1 中最下面的曲线对应的风速为 2m/s, 最上面的曲线对应的风速为 20m/s, 每条曲线的间隔为 1 m/s。

对于一定的风速, 雷达后向散射截面随相对方位角的变化呈一连续曲线, 不同的风速所对应曲线彼此不相交; 风速越大, 雷达后向散射截面越大; 雷达后向散射截面在风向方向(或逆风方向)上是对称的, 即在 0° (或 360°)和 180° 方向上对称。

传统反演方法采用能够合理表达该特征图谱的目标函数, 通过一定的算法寻找可能的模糊解。本反演方法的思路是直接通过特征图谱寻找可能的模糊解。

对于确定的风速, 不同的相对方位角(雷达波与风向的夹角)会有不同的雷达后向散射截面, 因此必需同时获得一个风单元的多个角度的观测值才可能反演一个风单元风速和风向。

依据特征图谱(图 1), 利用图解法和差值法, 对于一个雷达后向散射截面观测值, 会有一组两两对应的风速与相对方位角, 即: 对于一个雷达后向散射截面观测值, 可以描述出一条风速风向曲线。一个观测地理单元内若有 n 个观测值, 便可以作出 n 条关于风速和风向的曲线(图 2)。其中, n 条细曲线分别对应于 n 个观测值。

本反演方法的假定: 因为图 1 所示的特征图谱是一系列连续曲线, 不同的风速所对应曲线彼此不相交, 所以, 如果不存在干扰噪音和测量误差, 同一分辨单元内各雷达后向散射截面测量值所对应的可能风矢量解曲线应在风速、风向二维空间内交

于一点或几个点, 即图 2 中的 n 条曲线应交于一点或几个点, 分别对应风矢量解的各模糊解。由于存在干扰噪音与测量误差, n 条曲线并不交于一点或几点, 而是围绕这一点或几点, 形成几个分布相对密集的区域(两两曲线的交点的集合)。我们认为模糊解应位于这几个交点集的中心或该处附近的某个特征位置, 交点集的分布及形态特征表达了干扰噪音和测量误差的大小和产生的原因。因此, 我们的求解方法可理解为依据交点集的形态特征寻找模糊解。由于该特征位置的选择方法有较大的灵活性, 因此有很大的可调节空间。

本文仅用最简单的重心点法求解风矢量, 探讨从信息图谱几何形态特征反演风矢量的可行性。

3.2 具体的反演算法

反演算法由密集子区域选定、子区域内交点集的提取、重心点确定、模糊解排续 4 部分构成。

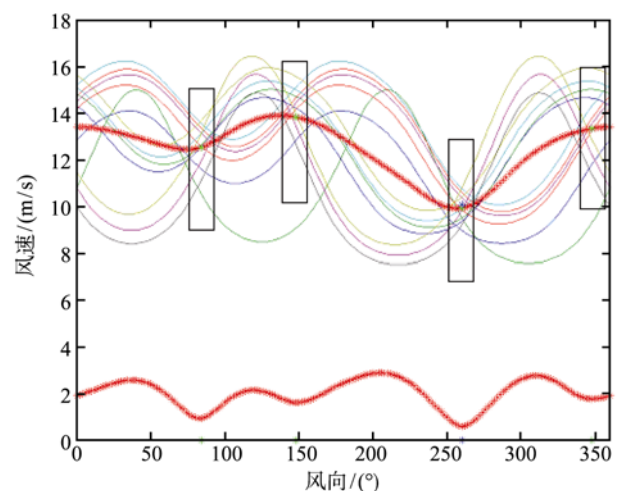


图 3 模糊解求解方法的信息图谱表示形式 B

图 3 与图 2 是基本相同的, 只是多了两条红色粗线, 上面的红线表示 n 条曲线的平均值, 下面的红线表示 n 条曲线的方差。此方差不同于传统方法中的方差, 只是 n 条曲线在某个风向上所对应的风速方差, 用于找出密集子区域。

下面说明对于某一个分辨单元, 新反演算法的具体步骤(不包括模糊去除步骤):

(1) 利用该分辨单元的 n 个观测值, 即雷达散射计测得的雷达观测方向和雷达后向散射面积等参数, 根据风速、相对方位角、雷达后向散射面积三者的变化规律, 作出 n 条对应的风速、风向二维曲线。

(2) 对整个风向区间(0° — 360°), 按一定的间隔

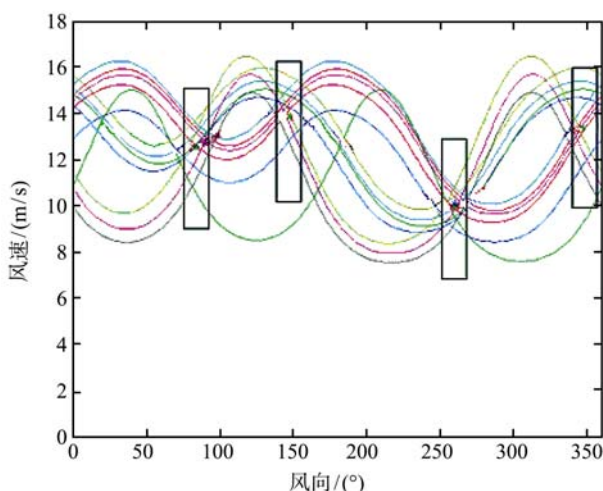


图 2 模糊解求解方法的信息图谱表示形式 A

(如 2°)搜索具有风速方差为极小值的风向,并记录下来。一般有 2—4 个风速方差极小值。

(3) 基于所需的风向反演精度为 20° ,不妨以第(2)步所记录下来的风向的 $\pm 10^\circ$ 作为风速、风向二维空间中分布相对密集的区域(如图 2 聚合节点区域),并记录下来。

(4) 在每个密集区域内找出所有节点。我们从信息图谱特征来看(图 2),在较小的风向区域内(如 2°),曲线几乎是单调并接近于直线的,容易求出两直线在某个区域内的交点。于是,在每个密集区域内,按此方法容易搜索出所有的任意两条曲线的节点,并记录下来。

(5) 对于每个密集区域,按重心法计算密集区域内节点的重心,如下式:

$$x_c = \frac{1}{n} \sum a_i x_i, y_c = \frac{1}{n} \sum b_i y_i \quad (3)$$

式中(x_c, y_c)为节点集的重心坐标, n 为节点个数, (x_i, y_i)为不同节点的坐标, a_i 和 b_i 分别代表节点所对应的权重,由于这里只针对图谱上密集区域的节点,所以 a_i 和 b_i 都取 1。

(6) 把算得的几个重心所对应的风速、风向值作为风矢量反演的模糊解。

(7) 依据各重心点处方差的大小,从小到大为各模糊解排序。

4 方法验证

4.1 方法验证

海面反演风场的验证是非常困难的,原因如下:

微波遥感观测的风场是观测单元(通常是 $50\text{km} \times 50\text{km}$ 或 $25\text{km} \times 25\text{km}$)内的平均风速,而现场测点观测的风速是点风速,两者之间的物理量不一致,存在着较大的差异。如果采用大规模布点计算平均风速,海上建立测点的费用极大,且船速、航向的误差也难以控制。因此,采用大规模的现场观测数据建模进行遥感风场验证,几乎是不可行的。

我们选用 2001 年美国 SeaWinds 散射计共 113 个轨道共 218623 条的 L2A 实测数据用本文提出的方法进行反演,用美国 L2B 数据作为验证参考数据。实验结果:风速的平均相对偏差为 7.4%,风向的平均偏差为 9.5° 。以上统计是基于偏差绝对值进行的。风向的偏差就是指反演风向与对照风向的夹角。

SeaWinds 散射计的 L2A 数据产品包含全球后

向散射截面数据,它包括以时间为序的全球后向散射截面测量值、入射角(incidence angle)、方位角(azimuth angle)和雷达有关信息(如测量标准差等),以及一些辅助信息。L2B 数据包含了利用 L2A 数据通过美国 SeaWinds 散射计反演模型进行风场反演后得到的每个风元的风矢量值。据 NASA 技术文件介绍,该风场反演数据的精度在外海区域达到 90% 以上,达到应用的技术要求,已在网上进行业务化发布。

为了比较密集子区域大小的选择对反演结果的影响,分别对 $\pm 5^\circ$ 、 $\pm 10^\circ$ 、 $\pm 15^\circ$ 的区域范围做了比较(表 1),可见反演结果是相当接近的,即区域选择的大小对反演结果影响很小($<1\%$)。

表 1 不同区域范围内的风场反演结果

密集子 区域($^\circ$)	风速平均偏差 /(m/s)	风速的平均相 对偏差/%	风向的平均 偏差($^\circ$)
± 5	0.682	7.42	9.34
± 10	0.683	7.37	9.47
± 15	0.679	7.31	9.54

4.2 实验特例

随机选取 4 幅反演与验证风场,图 4—图 7 中,箭头方向表示风向,箭头长度和灰度表示风速,长度越大或灰度越深表示风速越大,反之风速越小。图中(a)部分为用新方法进行反演的经模糊去除后的风场;图中(b)部分为同一区域同一时刻 L2B 风场。

示例 1 2001 年第 302 天 22 点 40 分风场,与 L2B 对比,风速平均偏差 0.74m/s,相对偏差 7.53%;风向平均偏差 3.8° (图 4)。

示例 2 2001 年第 283 天 22 点 24 分风场,与 L2B 对比,风速平均偏差 0.96m/s,相对偏差 9.82%;风向平均偏差 9.7° (图 5)。

示例 3 2001 年第 293 天 21 点 30 分风场,与 L2B 对比,风速平均偏差 0.57m/s,相对偏差 6.91%;风向平均偏差 10.45° (图 6)。

示例 4 2001 年第 338 天 22 点 23 分风场,与 L2B 对比,风速平均偏差 0.48m/s,相对偏差 10.19%;风向平均偏差 17.14° (图 7)。

5 结 论

由上述分析及实验得出的结果可见,本文提出的基于信息图谱形态特征的 SeaWinds 散射计风场反演方法是可行的。与传统方法相比,新方法不依

赖于目标函数, 因此不用受制于测量误差方差和模型误差方差。新方法既保证了风场反演的精度, 又具有直观及灵活性。

本文所述的反演方法是针对 SeaWinds 散射计提出的, 但是对于不同的散射计测风, 有其固有的

各参数间的关系, 即有其固有的图谱, 因此, 它也可以被推广到其他散射计的风场反演中。另外, 根据信息图谱几何形态特征, 特征点位置的选择方法有较大的灵活性, 可能会使反演精度有进一步的提高。

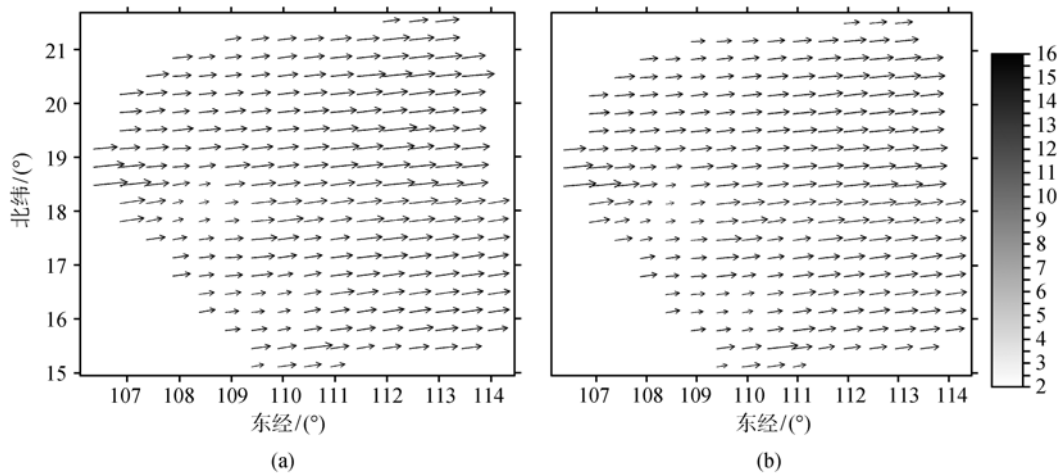


图 4 2001 年第 302 天风场

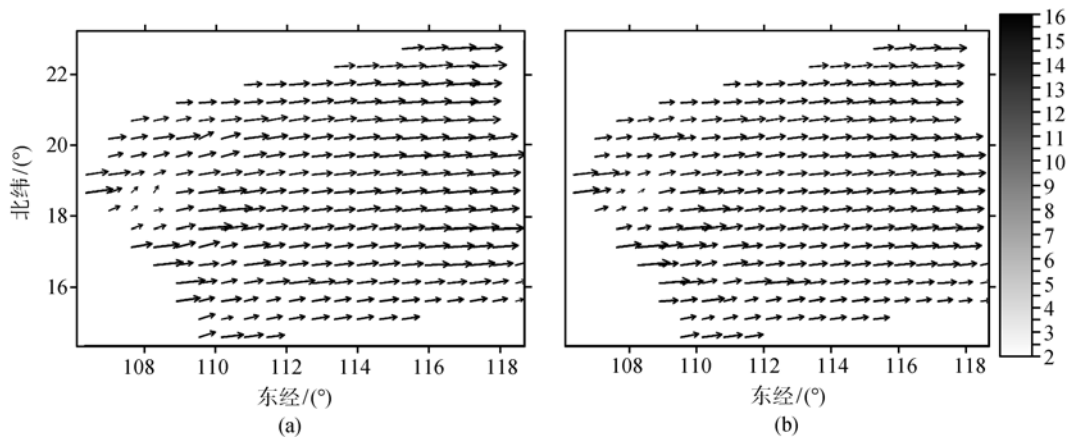


图 5 2001 年第 283 天风场

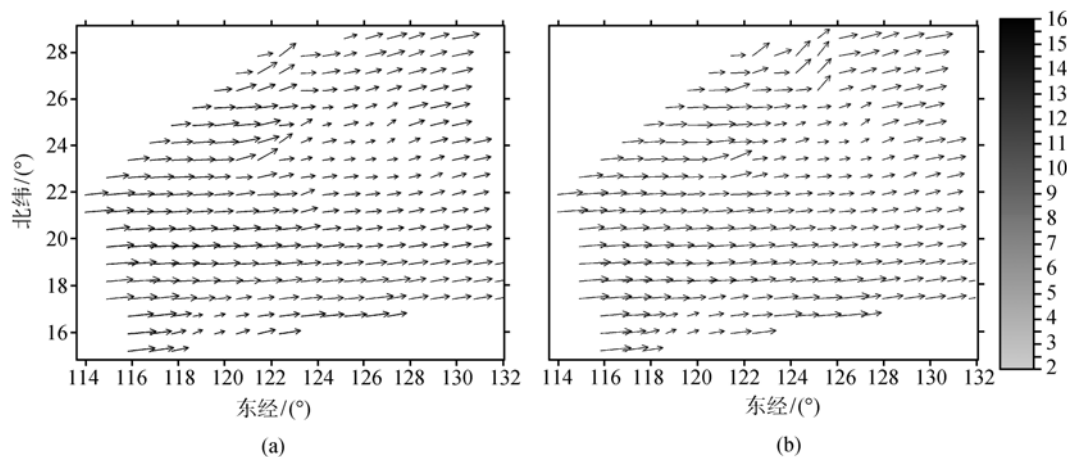


图 6 2001 年第 293 天风场

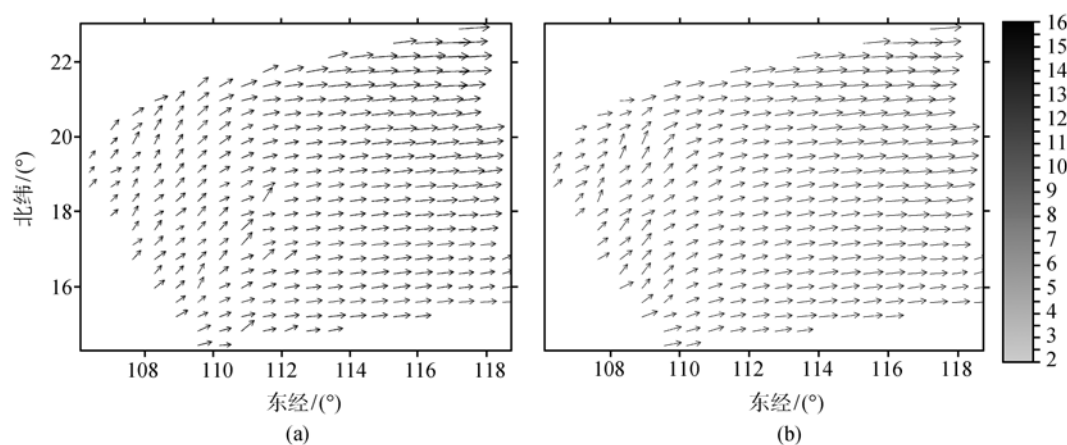


图 7 2001 年第 338 天风场

REFERENCES

- Chi C Y and Li F K. A comparative study of several wind estimation algorithms for spaceborne scatterometers. *IEEE Trans Geosciand Rem Sens*, 1988, **26**(2): 115—121
- Freilich M H, Long D G and Spencer M W. 1994. SeaWinds: a scanning scatterometer for ADEOS-II-science overview. Proceedings of the 1994 International Geoscience and Remote Sensing Symposium on Surface and Atmospheric Remote Sensing: Technologies, Data Analysis and Interpretation
- Freilich M H, P I. 2000. SeaWinds Algorithm Theoretical Basis Document. NASA <<http://podaac.jpl.nasa.gov/quikscat/qscat-doc>>(2002-08)
- Graf J E, Naderi F and Tsai W Y. 1995. Overview of NASA scatterometers projects. Proceedings of the 1995 International Geoscience and Remote Sensing Symposium on Quantitative Remote Sensing for Science and Applications
- Nghiem S V, Li F K and Neumann G. 1996. Ku-band ocean backscatter functions for surface wind retrieval. Proceedings of the 1996 International Geoscience and Remote Sensing Symposium on Remote Sensing for a Sustainable Future
- Schroeder L C, Boggs D H, Dome G J, Halberstam I M, Jones W L, Pierson W J and Wentz F J. 1982. The relationship between wind vector and normalized radar cross section used to derive SEASAT-A satellite scatterometer winds. *J. Geophys Res.* **87**(5): 3318—3336
- Schultz H. A circular median filter approach for resolving directional ambiguities in wind fields retrieved from spaceborne scatterometer data. *J Geophys Res*, 1990, **95**(4): 5291—5303
- Tsai W T, Spencer M, Wu C, Winn C and Kelloqq K. 2000. SeaWinds on QuikSCAT: sensor description and mission overview. Proceedings of the 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium