

陈艳玲, 黄 , 丁晓利等. ERS-2 SAR 反演海洋风矢量的研究. 地球物理学报, 2007, 50(6): 1688~ 1694

Chen Y L, Huang C, Ding X L, et al. Study on ocean wind vector retrieval from ERS-2 SAR image. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, 50(6): 1688~ 1694

ERS-2 SAR 反演海洋风矢量的研究

陈艳玲^{1,2,3}, 黄¹, 丁晓利³, 李志伟³

1 中国科学院上海天文台, 上海 200030

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

3 香港理工大学土地测量与地理资讯学系, 香港

摘要 SAR (Synthetic Aperture Radar) 反演海洋风矢量是当今微波遥感领域非常有意义的前沿课题. 本文首先介绍了星载 SAR 估算海面风向、风速的基本原理和三种主流反演算法, 接着给出反演的流程图以及重要步骤. 然后, 以 2002 年 5 月 7 日香港地区 ERS-2 SAR 海洋图像为例, 对经典的 SWDA (SAR Wind Direction Algorithm) - 谱分析方法加以改进, 求得具有 180° 模糊度的风向, 并用香港天文台气象浮标实测数据消除了风向不确定性. 最后, 利用 CMOD4 GMF (Geophysical Model Function, 地球物理模式函数) 计算得到海面上 10m 高的风速. 与气象浮标站实测资料相比, 利用 ERS-2 SAR 图像获取的海面风向、风速的精度均较高. 这一结果表明: 如果对 SAR 预先进行 ADC (Analog to Digital Converter) 改正以及精确校准, 结合改进的 SWDA 和 CMOD4, 可以获得高精度的风矢量.

关键词 SAR, 风矢量, 谱分析, 风向模糊度, CMOD4

文章编号 0001-5733(2007)06-1688-07

中图分类号 P406

收稿日期 2006-11-01, 2007-07-25 收修定稿

Study on ocean wind vector retrieval from ERS-2 SAR image

CHEN Yan-Ling^{1,2,3}, HUANG Cheng¹, DING Xiao-Li³, LI Zhi-Wei¹

1 Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China

2 Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Department of Land Surveying & Geo-Information, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China

Abstract SAR (Synthetic Aperture Radar) wind retrieval is a hot research topic in current Remote Sensing field. In this paper the principle of space borne SAR ocean wind retrieval and three related retrieval algorithms are introduced firstly. Then, the flowchart of the retrieval procedures is provided. As an example, ERS-2 SAR image covering Hong Kong region acquired on May 7, 2002 is used for wind vector retrieval. The classic SAR Wind Direction Algorithm - spectral method is improved, and applied for the retrieval. The wind direction thus estimated is however with 180° ambiguity. Buoy data collected by the Hong Kong Observatory are then used to resolve the uncertainty. Finally, the GMF (Geophysical Model Function) - CMOD4 is adopted to estimate the wind speed at the height of 10m above sea level. Compared with the data recorded by Hong Kong Observatory, the error in the wind direction and average wind speed are very small. The results show that accurate ADC (Analog to Digital Converter) compensation and image calibration, together with improved SWDA and CMOD4 algorithms, could offer high quality wind vector.

Keywords Synthetic Aperture Radar, Wind vector, Spectrum analysis, Wind direction ambiguity, CMOD4

基金项目 香港 RGC (polyu 5157/05E) 和国家自然科学基金 (40404001) 资助.

作者简介 陈艳玲, 女, 1980 年生, 博士研究生, 主要从事微波遥感方面的研究. E-mail: ylchen@shao.ac.cn

1 引言

海面风是影响海浪、海流、水团等要素的活跃因子,也是海浪、海洋环流、海气边界层气象学以及海气相互作用研究中非常重要的参数,海洋学和气象学领域绝大部分研究都需要海面风场的资料。但是,风矢量场却是海上大气观测中最难监测的物理量。

传统的监测海面风场的手段有浮标和不定期的船舶报告等,但是时间和空间分布极其有限。随着遥感技术的迅猛发展,各种主动及被动微波传感器已成为现代获取海洋风场的主要手段,如风散射计、高度计、星载 SAR(Synthetic Aperture Radar,合成孔径雷达)和辐射计等。风散射计是最为有效的获取全球海面风场的手段,可用于海洋风场和海浪预报,但是分辨率极其有限,ERS-2 搭载的散射计分辨率仅为 25 km,对于海面风中尺度和小尺度的波动,以及近海岸约 50 km 范围内的风场估算无能为力。高度计仅能进行天底点测量,有着沿轨道 7 km 的分辨率,但是缺少风向信息,且扫幅很窄。微波辐射计对海面相对辐射进行测量,仅能得到与散射计相同的 25 km 分辨率的风速资料。与前述几种技术相比,SAR 的优点是空间分辨率极高,最高已达 1 m,并且能够全天候、全天时地工作,因此能够提供海洋及沿海岸地区风场的细节信息,是其他几种遥感手段所不能替代的。

目前,国内关于星载 SAR 的反演海面风场的研究相对较少^[1-3],大多集中在散射计上^[4]。鉴于此,文中选取 2002 年 5 月 7 日香港地区的 ERS-2 SAR SLC(Single Look Complex,单视复数)图像,首先对其进行 ADC(Analog to Digital Converter,模数转换器)饱和改正以及精确校准,然后对经典的反演风向的谱分析方法加以改进,获取了具有 18° 模糊度的风向,接着用实测浮标数据消除了模糊度。在此基础上,再利用 CMOD-4 得到了风速图。与距离试验区约 50 km 的浮标气象站平均风向和平均风速实测值相比,两次实验在同类试验中所得的风矢量精度均较高。

2 SAR 反演风场的算法

SAR 反演风向和风速的物理基础可用布拉格(Bragg)散射模型解释。由于雷达后向散射系数与海

面风向风速、雷达频率、入射角以及极化状态等因素有关,所以如果风向风速以外的参数已知,则可以根据它们之间的关系式来求得风向和风速。但是由此建立的关系式中两个未知数,显然此方程解不惟一,需要外部资料来消除这一不确定性。一般可采用浮标、散射计、数值天气预报模型和不定期船舶报告等来消除。

SAR 求解风场的算法,大致可以归结为三类:SWDA(SAR Wind Direction Algorithm)+GMF(Geophysical Model Function,地球物理模式函数)、统计分析法以及其他算法。

2.1 SWDA+GMF

此方法是反演风场时使用最为广泛的方法,适用于 C 波段 SAR 图像,特点是风向由 SAR 图像预分析得到,风速则由用于散射计的经验模型来确定。

SWDA 由 Fetterer 等人^[5]和 Wackermann 等人^[6]提出。Wackermann 等人发现 SAR 图像的二维傅里叶谱峰值走向与阵风所产生的条纹方向垂直,据此可以求得具有模糊度的风向。

GMF 起初是为散射计所设计,后来被证明用于 SAR 反演风速也切实可行^[5,7]。最常用的 GMF 即为 CMOD4^[8]、CMOD-IFR2^[9]等。如果 SAR 图像为 HH 极化方式,如 RADARSAT-1 获取的图像,那么直接使用已有的 C 波段 VV 极化的散射计 GMF 显然不合理,这时需要建立一个适合 HH 极化的 GMF。一般将 C 波段 VV 极化的 GMF 与一个合适的极化比相乘,得到一个混合 GMF。记 $M_{VV}(v, \varphi)$ 为 C 波段 VV 极化 GMF,则 HH 极化 GMF $M_{HH}(v, \varphi)$ 为^[10]

$$M_{HH}(v, \varphi) = \frac{(1 + \alpha \tan^2 \theta)^2}{(1 + 2 \tan^2 \theta)^2} M_{VV}(v, \varphi), \quad (1)$$

其中, φ, v 分别为风向、风速, α 为与散射理论有关的常数, θ 为入射角。

这种方法简便实用,但是也有局限性:首先,求出的风向具有 18° 模糊度,这一不确定性可由海岸阴影效应,或者浮标、散射计、ECMWF 等资料来消除;其次,如果 SAR 图像中没有明显的低频风条纹,这种方法估计的风矢量将不再可靠。

2.2 统计分析法

这种方法由 Portabella 和 Stoffelen 等^[11]提出,他们通过组合 SAR 数据和背景场(如数值天气预报模型、实测浮标气象数据等)来获得风向风速的最佳估计值。其基本思想来源于气象学中的资料同化,即通过设置一系列标准假设条件,根据多维概率分布函数,利用贝叶斯条件概率公式实现最优化的结果。

Portabella 等人定义了风险函数 J , 假设 SAR 与 NWP(Numerical Weather Prediction) 模型两种“观测”都有误差且噪声服从高斯分布, 观测误差与模型误差之间独立同分布, 那么风险函数 J 可以简化为

$$J = \left[\frac{\sigma_m^0 - \sigma^0}{\Delta\sigma} \right]^2 + \left[\frac{u_H - u}{\Delta u} \right]^2 + \left[\frac{v_H - v}{\Delta v} \right]^2, \tag{2}$$

式中, σ_m^0 和 σ^0 分别为 SAR 图像观测所得的归一化散射系数和由 CMOD 模型得到的散射系数; u_H 和 v_H 分别为 NWP 模型(如 HIRLAM VHR 模型)得到的风矢量分量; u 和 v 分别为风矢量分量的估值; $\Delta\sigma$ 、 Δu 、 Δv 分别为由相应的概率分布函数求出的高斯标准差。 J 最小时对应的风矢量即为最佳估值。 Portabella 首先用第一种方法, 即 SWDA+ CMOD4 得到风矢量, 然后用统计方法将 SAR 数据与中尺度 NWP 模型 HIRLAM V55 加权组合, 以 $0.25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的间隔计算每次的风险函数 J , 最后得到风矢量最优估值。

这种方法克服了第一种方法风向不确定性的局限, 并且对条纹没有严格要求, 反演风速的精度不受风向误差影响, 具有较大的潜力。 但是, 它也有其自身的问题: 实验中, 低风速的条件下, 风速估值比真实值要小 $0.65 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。 误差分析得知, 统计法求出的风矢量与真实值之间有一个系统偏差。 此外, 权系数的选择也是今后需要深入研究的问题, 这足以改变估算的质量。 总之, 这种方法还有待于使用更多的 SAR 数据做深入研究。

2.3 其他算法

除上述两类方法, 还有许多出发点各异的风场反演算法。 比较典型的是从方法论角度上提出的一种反演思想^[12]。

从物理学角度来看, 这种方法基于海洋微粒轨道运行引起的 SAR 系统方位向截断效应。 这种效应与 r/v 的比值成正比, r 为视线向距离, v 为平台速度。 ERS-1/2、RADARSAT-1 和 ENVISAT 的 r/v 比值均为 120 s。 算法的关键是从图像谱或自相关函数, 以及半经验模型计算风速的过程中估算方位向截止波长 Λ_c 以及如何定义局地风速 v 和 Λ_c 之间的关系式。 假设入射角为 20.2° , 图像为 ERS 数据, 则 v 和 Λ_c 之间的关系式可表示为^[13]

$$v = 4.75 \left[\frac{\Lambda_c - 30}{110} \right]. \tag{3}$$

如果估计风速, 这种方法不需要任何风向信息。 如果给定风速估计风向, 那么就要在散射计 GMF 基础上建立反演程序。 这种情况下, 反演风向比第一

类算法更具挑战性。 经验表明, 实例不同, 反演精度也随之变化, 风速估计误差平均为 $3.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 风向误差为 23° 。

除此之外, 诸多国内外专家学者不断对风矢量的估算方法加以改善, 近年来又涌现出不少新的海洋风场算法, 如神经网络法^[14] 以及基于邻域分析的方法^[15] 等。

3 数据处理流程

经过比较和分析上述几类算法的运算效率和实用性, 本文采用第一种方法进行风矢量反演的实验。 有研究^[16,17] 表明, 如果 ERS 及 RADARSAT SAR 数据没有经过精确校准和 ADC 补偿, 则估算结果会有较大的误差。 因此文中首先对 SAR 进行这两项改正, 然后再采用经典的 SWDA+ GMF 算法进行反演风矢量的实验。 实验过程中发现传统的谱分析方法估计风向有较大偏差, 因此又对其做了相应改进, 详细过程见第 4 节。 图 1 为数据处理的流程框图。

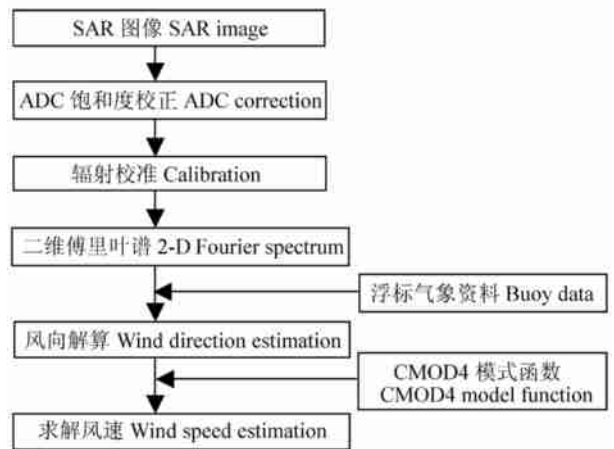


图 1 SAR 风矢量反演流程图

Fig. 1 Flowchart of SAR wind vector inversion

4 实验

4.1 数据说明

文中所采用的整景 SAR 数据的基本参数以及参考图如表 1 和图 2, 图 2a 中倾斜的实线框对应图 2b 整幅 SAR 图像。

4.2 预处理

在求解风向及风速之前, 首先要对 SAR SLC 图像进行预处理, 包括 ADC 饱和度改正、精确校准、图像旋转、平均采样以及降噪滤波等。

表 1 SAR 图像基本参数

Table 1 Basic parameters of SAR image

传感器	轨道编号	数据类型	Frame	影像中心成像 时间(UTC)	影像中心 经度(°E)	影像中心 纬度(°N)	成像地区	轨道方向
ERS-2	36831	SLC	3159	2002- 05- 07 02: 53: 26337	114.300	22.097	香港	下行

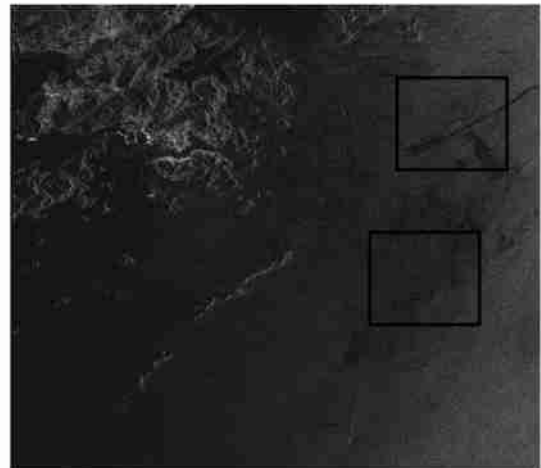
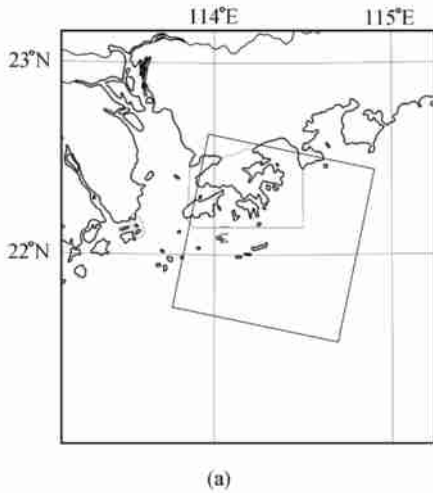


图 2 SAR 地理位置(a) 及灰度图像(b)

Fig. 2 (a) Geographical location and (b) amplitude image of SAR

ADC 在将模拟信号转化为数字信号时, 由于饱和引起的量化非线性会造成输出功率偏离输入功率, 即有功率损失(Power loss, PI), 因此要对其加以补偿, 以消除 ADC 饱和度的影响. 其基本思想即求得一定尺度范围内的回波强度 P , 将 P/K (K 为校准常数) 单位换算为 dB, 然后查表得到对应的功率损失.

然后, 对 SAR 图像进行精确校准获得归一化雷达后向散射截面 σ^0 , 这是从 SAR 强度图中反演高精度风场一个非常重要的步骤. σ^0 可以表示为

$$\sigma^0 = \frac{1}{N} \sum_{i,j=1}^N P_{i,j} \cdot \frac{1}{K} \cdot \frac{\sin \alpha}{\sin \alpha_{\text{ref}}} \cdot C \cdot \frac{\text{PRP}}{\text{RRP}} \cdot \text{PI}, \quad (4)$$

其中, $P_{i,j}$ 为回波强度, 即经过数字化的 SLC 像元 (i,j) 振幅 A 的平方; α 为入射角; α_{ref} 为参考入射角, ERS 卫星一般取 23° ; K 为辐射定标常数, 对于 ERS-2 来说, $K = 93325.3$; PRP 为 Product Replica Power, RRP 为 Reference Replica Power, 均在头文件中给出. PI 即为 ADC 功率补偿.

经 ADC 补偿和精确校准后, 得到后向散射系数图. 因卫星为下降轨道, 所以要对其进行左右镜像,

使位于 $(1, 1)$ 坐标的像元对应整幅图的西北顶点.

接着, 对图像进行平均采样, 将斜距分辨率为 $3.99 \text{ m} \times 7.90 \text{ m}$ 的 SLC 采样为 $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$, 采样后的图像为 2040×1960 (行数 \times 列数), 然后从整景数据中选取两个实验区域 ROI1 (Region of Interest) 和 ROI2 (见图 2b 上下方框). ROI1 起始像元位于 $(321, 1431)$, ROI2 起始像元位于 $(1001, 1331)$, 大小均为 400×400 像元, 对应海面 $20 \text{ km} \times 20 \text{ km}$. 表 2 列出了 ROI1 和 ROI2 的地理位置.

表 2 ROI 的地理位置

Table 2 Georeference coordinates of ROI

ROI1	经度(°E)	纬度(°N)	ROI2	经度(°E)	纬度(°N)
西北	114.650	22.489	西北	114.603	22.188
东北	114.840	22.308	东北	114.793	22.007
西南	114.440	22.313	西南	114.398	22.012
东南	114.630	22.132	东南	114.587	21.831
中心点	114.640	22.311	中心点	114.595	21.510

因 σ^0 图含有斑点噪声, 因此采用 3×3 像素的 Lee 滤波窗口对子图像进行降噪处理, 滤波后的 σ^0 图如图 3 和图 4 所示.

4.3 风向求解

以下以 ROI1 为重点, 详细介绍风向风速反演的

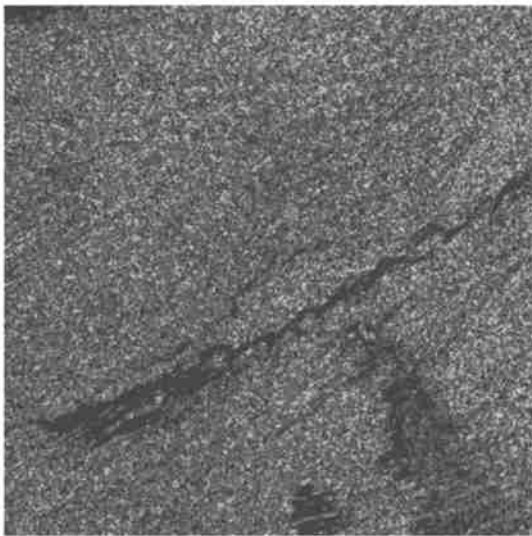


图3 滤波后的 ROI1 图像

Fig. 3 Filtered ROI1 image

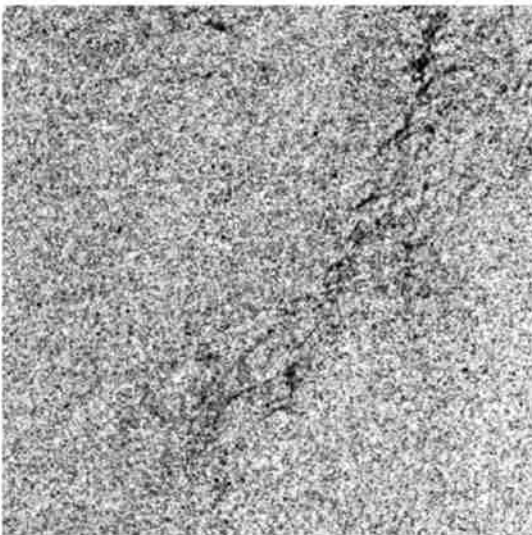


图4 滤波后的 ROI2 图像

Fig. 4 Filtered ROI2 image

具体过程.

首先求子图像的二维傅里叶谱,可以看出能量图中有高频噪声干扰.为消除噪声,设置模板为 $[1\ 1\ 1; 1\ 2\ 1; 1\ 1\ 1]$,在频域对二维波数谱进行平滑滤波,滤波前与滤波后的图像功率谱分别见图5、图6所示.图中峰值有一线性趋势项,由于风向与峰值方向垂直,所以可以根据峰值的方向推算出风向.峰值方向的求解有两种方法:求每行或每列的最大值,将最大值的位置作为功率最大值,对其进行线性拟合;或者对谱图进行二维高斯拟合,然后求出风向.

文中首先采取了第一种方法,对频谱峰值进行

最小二乘线性拟合,通过目视图6的红色直线可以看出拟合直线偏离正确的趋势较多.鉴于此,兼顾计算效率及实用性,文中对求解风向的方法进行了改进:依次对每列的功率值由大到小排序,分别对每一列最大值,以及前几个较大值平均值来进行线性拟合.经过测试,取前三个最大值均值的情况下,线性拟合出的直线最接近功率谱图的峰值方向,见图7所示.

很显然这样求出的风向具有不确定性,即具有 180° 模糊度,这时需要外部数据源来消除.文中用香港天文台浮标气象站实测1 min平均风向和风速数据作为校准源.由于2002年5月7日香港天文台仅有一个浮标站有风的记录,所以只能用此站的记录来消除模糊度.由此,可得ROI1和ROI2两个区域的相对风向,见图7、图8中黄色箭头所示,角度分别为 224.71° 、 208.00° ,归算到绝对风向,为 234.71° 、 218.00° .与浮标站实测的绝对风向相比,所做实验的风向误差为 23.71° 、 7.00° .

4.4 风速估算

相对风向确定之后,将其代入CMOD-4算法即可求得风速.CMOD4模型可以表示为^[8]

$$\sigma_0 = B_0(1 + B_1 \cos \varphi + B_2 \cos(2\varphi))^{1.6}, \quad (5)$$

其中, φ 为相对风向, B_0 、 B_1 、 B_2 分别为风速 v 及入射角 α 的函数.将上述所求风速代入此模型,可得ROI1与ROI2的风速图,见图9(a,b)所示,图像分辨率为 $50\text{ m} \times 50\text{ m}$,图像的亮度对应风速的大小.

ROI1求得的平均风速为 $1.98\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,ROI2求得的平均风速为 $1.59\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,与浮标站实测数据之差分别为 $0.18\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $-0.12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.而Fetterer等人^[9]利用谱方法获得了 25 km 分辨率的风向,用GMF得到了 $12.8\text{ km} \times 12.8\text{ km}$ 分辨率的风速,与浮标数据比较,风向误差为 $\pm 37^\circ$,风速误差为 $\pm 2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.由此看来,本文风向、风速的反演精度均较高.

5 讨论

本文通过对SAR影像进行严格的预处理,结合改进的谱分析算法和CMOD4模型,最终得到了高精度的风矢量,但是改进方法的普适性还需更多的实例来进一步验证.

反演过程中,风向、风速均有较小的误差.风向的误差是由于气象站距离实验区约 50 km ,导致估算值与实测值可能会不一致.此外,条纹与风向之间有一个补偿角,这个角度是变化的且无法估计,这

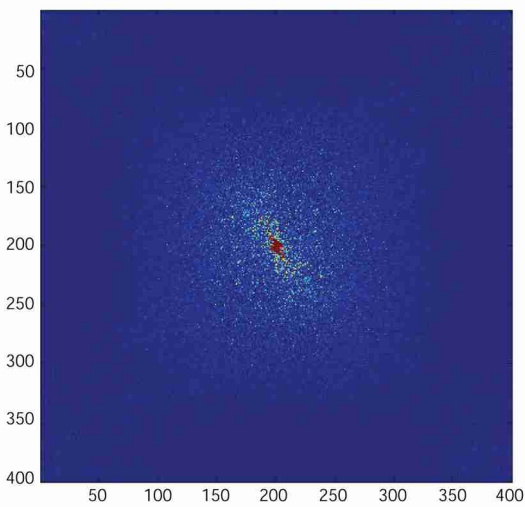


图 5 未滤波的 ROI1 功率谱

Fig. 5 Power spectra of unfiltered ROI1 image

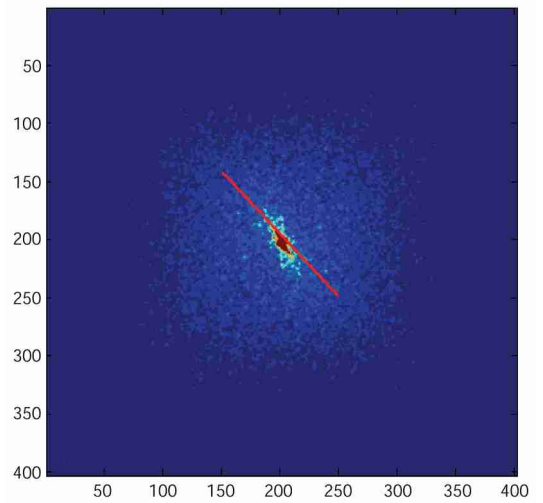


图 6 ROI1 功率谱每列最大值拟合出的直线

Fig. 6 Line fitted from the maximal values of each column of ROI1 power spectra

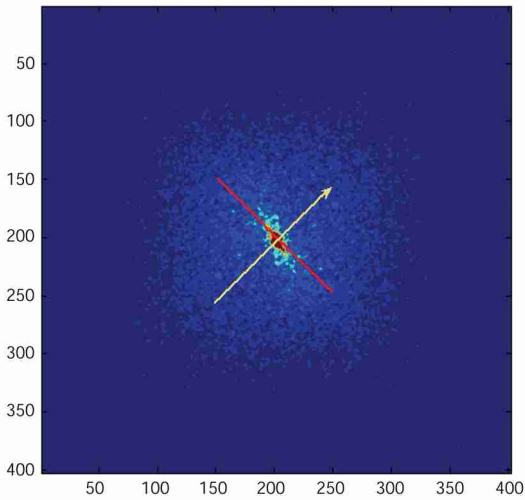


图 7 由 ROI1 功率谱得到的风向

Fig. 7 Wind direction estimated from ROI1 power spectra

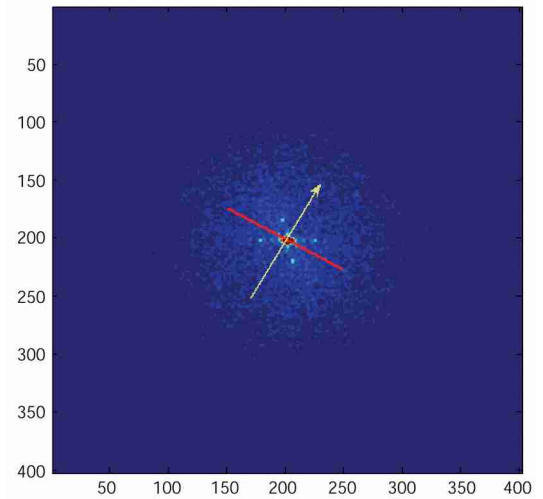


图 8 由 ROI2 功率谱得到的风向

Fig. 8 Wind direction estimated from ROI2 power spectra

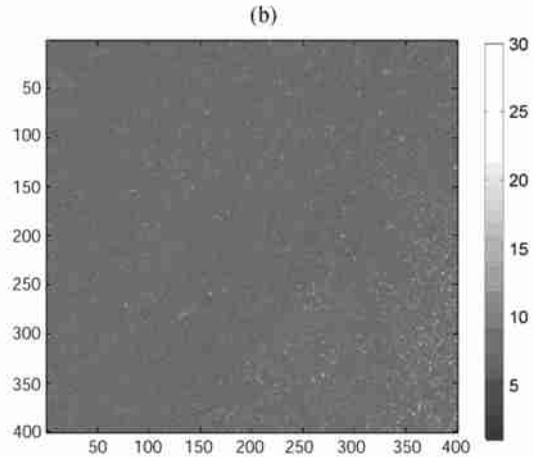
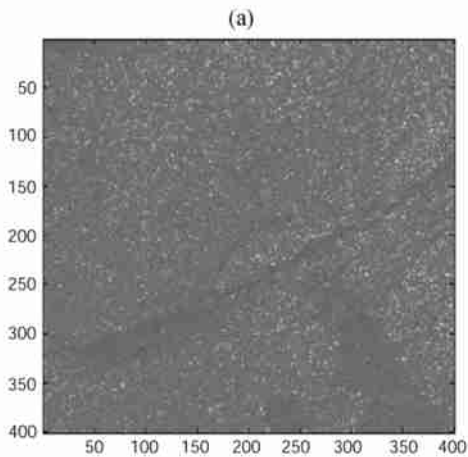


图 9 (a) ROI1 风速图, (b) ROI2 风速图

Fig. 9 Wind speed derived from (a) ROI1 and from (b) ROI2

也造成了风向估计有偏差. 导致风速有偏差的因素如下: 一是 SWDA 估计的风向不够精确; 二是由于浮标气象站风速计的高度距离平均海平面约 8.5 m, 而 CMOD4 模型定义的风速距海面高 10 m, 不同的高度导致了估算值与实测值的不同; 三是针对散射计与 SAR 的尺度不同, 将适用散射计的 GMF 用于 SAR 风速反演并不是十分合适.

就 SAR 自身而言, 基于 SAR 的风场反演技术仍然存在一些问题. 这些问题是: 一是 SAR 全球覆盖周期太长, 获得的风场谱和波浪谱还不够充分; 二是至今没有专门针对 SAR 开发的 GMF, SAR 与散射计成像尺度不同, 必然会导致反演过程中不可预知的误差; 三是由 SAR 获得的风向具有不确定性, 需要外部数据源来校准. 但是, 前两个问题并不是不可逾越的, 随着 SAR 技术的不断发展可逐步解决. 至于风向模糊度, 是 SAR 反演风矢量时大多情况下都会遇到的问题.

虽然星载 SAR 求解风场有上述不足之处, 但是它的高分辨率是其他几种技术无法取代的, 已有逐步取代散射计的趋势. 2002 年发射的 ENVISAT 卫星有效载荷中风散射计就被 ASAR 成像模式所代替. 可以预见, 星载 SAR 技术将在海洋遥感领域受到更多的关注, 获得更加广泛、深入的应用.

参考文献(References)

- [1] 王 超, 潘广东. 航天飞机成像雷达海面风矢量观测研究——以 1994 年 4 月南中国海试验区为例. 遥感学报, 2000, 4(1): 51~ 54
Wang C, Pan G D. Research on wind vector observation from SIR-C/X-SAR data: case study of SIR-C/X-SAR experiment over South China Sea. *Journal of Remote Sensing* (in Chinese), 2000, 4(1): 51~ 54
- [2] 杨劲松, 黄伟良, 周长宝等. 合成孔径雷达图像的近岸海面风场反演. 遥感学报, 2001, 5(1): 15~ 16
Yang J S, Huang W G, Zhou C B, et al. Coastal ocean surface wind retrieval from SAR imagery. *Journal of Remote Sensing* (in Chinese), 2001, 5(1): 15~ 16
- [3] 冯 倩. 多传感器卫星海面风场遥感研究[博士论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2004
Feng Q. Study of sea surface wind remote sensing by satellite multi-sensor data [Ph. D. thesis] (in Chinese). Qingdao: Ocean University of China, 2004

- [4] 林明森. 一种修正的星载散射计反演海面风场的场方式反演算法. 遥感学报, 2000, 4(1): 61~ 65
Lin M S. A modified model based on estimation of sea surface wind field from spaceborne scatterometer. *Journal of Remote Sensing* (in Chinese), 2000, 4(1): 61~ 65
- [5] Fetterer F, Gineris D, Wackeman C. Validating a scatterometer wind algorithm for ERS-1 SAR. *IEEE Trans. on Geosciences and Remote Sensing*, 1998, 36(2): 479~ 492
- [6] Wackemann C C, Rufener C L, Shuchman R A, et al. Wind vector retrieval using ERS-1 Synthetic Aperture Radar imagery. *IEEE Trans. on Geosciences and Remote Sensing*, 1996, 34(6): 1343~ 1352
- [7] Johannessen J A, Vachon P W, Johannessen O M. ERS-1 SAR imaging of marine boundary layer processes. *ESA, Earth Observation Quarterly*, Paris, France, 1994, 46: 1~ 256
- [8] Stoffelen A, Anderson D L T. Scatterometer data interpretation: estimation and validation of the transfer function CMOD4. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(C3): 5767~ 5780
- [9] Quillen Y, Chapron B, Elfohaily T, et al. Observation of tropical cyclones by high-resolution scatterometry. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(C4): 7767~ 7786
- [10] Thompson D R, Beal R C. Mapping high-resolution wind fields using Synthetic Aperture Radar. *J. Hopkins APL Tech. Digest*, 2000, 21(1): 58~ 67
- [11] Portabella M, Stoffelen A, Johannessen J A. Toward an optimal inversion method for Synthetic Aperture Radar wind retrieval. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(C8): 1~ 13
- [12] Kerbaol V, Chapron B, Vachon P W. Analysis of ERS-1/2 Synthetic Aperture Radar wave mode images. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(C4): 7833~ 7846
- [13] Korsbakken E, Johannessen J A, Johannessen O M. Coastal wind field retrievals from ERS Synthetic Aperture Radar images. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(C4): 7857~ 7874
- [14] Horstmann J, Schiller H, Schulz-Stellenfleth J, et al. Global wind speed retrieval from SAR. *IEEE Trans. on Geosciences and Remote Sensing*, 2003, 41(10): 2277~ 2286
- [15] Yijun He, William Perrie, Qingping Zou, et al. A new wind vector algorithm for G-band SAR. *IEEE Trans. on Geosciences and Remote Sensing*, 2005, 43(7): 1453~ 1458
- [16] Horstmann J, Koch W, Lehner S, et al. Wind retrieval over the ocean using Synthetic Aperture Radar with G-band HH polarization. *IEEE Trans. on Geosciences and Remote Sensing*, 2000, 38(5): 2122~ 2131
- [17] Vachon P W, Dobson F W. Validation of wind vector retrieval from ERS-1 SAR images over the ocean. *Global Atmos. Ocean Syst.*, 1996, 5(2): 177~ 187

(本文编辑 何 燕)