

文章编号: 1007-4619 (2001) 01-0013-04

# 合成孔径雷达图像的近岸海面风场反演

杨劲松, 黄韦良, 周长宝, 傅 斌, 史爱琴, 厉冬玲

(国家海洋局 海洋动力过程与卫星海洋学重点实验室, 国家海洋局 第二海洋研究所, 浙江 杭州 310012)

**摘 要:** 根据海面微波散射原理, 给出了星载合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)图像海面风场反演的方法。该方法包括 SAR 图像辐射定标、海面风向确定和风速计算。利用该方法由加拿大 Radarsat SAR 图像反演获得了中国海南省东南部近岸海区海面风场, 并与预报风场作了比较。结果显示, 二者相符得很好, 风速的均方根误差为 0.94m/s, 风向的均方根误差为 4.03°。

**关键词:** 合成孔径雷达; 海面风场; 反演

**中图分类号:** TP721.2/P732 **文献标识码:** A

## 1 引 言

海面风速风向是海洋和大气的重要要素。传统的测风方法采用岸基观测站、船只和浮标等, 因而某些海区特别是大洋观测数据极少。星载微波散射计的应用极大地改变了这种状况, 使全球海面风场的观测成为现实。目前星载散射计风速风向测量精度分别达到  $\pm 2\text{m/s}$  和  $\pm 20^\circ$ , 测量数据已广泛地应用于海洋风场、海浪场和天气预报以及海洋和大气研究等<sup>[1]</sup>。但是, 散射计测量的空间分辨率通常在 25—50km, 不能满足某些需要高空间分辨率风场数据的应用。星载合成孔径雷达(SAR)具有高空间分辨率(数米至数十米)测量海面风场的能力, 可弥补散射计测风的不足, 近年来受到人们的关注<sup>[2-4]</sup>。计划于 2001 年 6 月发射的欧洲 Envisat 卫星将不再装载散射计, 其上的 SAR 将兼任测量海面风场之重任, 更推动了 SAR 海面风场测量研究。本文将研究星载合成孔径雷达图像近岸海面风场反演方法, 并利用加拿大 Radarsat SAR 图像开展中国海区海面风场反演实例研究。

## 2 海面风场反演方法

### 2.1 风向的反演方法

在通常情况下, 合成孔径雷达图像上存在与海

面风向平行的条纹, 这种条纹称作风条纹(wind streak)。因此, 我们可由 SAR 图像计算低波数谱并获得风向信息<sup>[2]</sup>。SAR 图像低波数谱的计算方法如下:

$$Y_{l,m} = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N X_{j,k} e^{-2\pi i(jl+km)/N} \quad (1)$$

其中  $Y$  为图像低波数谱,  $X$  为图像灰度值,  $l, m = 1, 2, \dots, N$ 。

利用以上方法得到的风向有  $180^\circ$  的方向模糊。在近岸海区, 这种风向的不确定性可通过 SAR 图像纹理结构和落山风的走向等加以消除。

### 2.2 风速的反演方法

合成孔径雷达是主动式遥感仪器, 通过发射微波波束、接收来自海面的后向散射获取海面信息。在  $20^\circ-70^\circ$  的波束入射角的条件下, 海面的微波散射为布拉格散射<sup>[5]</sup>。由布拉格散射定理可知, 风致海面短波是产生雷达后向散射的主要散射体<sup>[6]</sup>。因此, 由风速与雷达后向散射截面之间的关系, 计算海面风速是星载 SAR 图像海面风速反演方法之一<sup>[2,7]</sup>。根据 SAR 图像的方位向模糊原理, 利用风速与高波数截断波长之间的关系, 计算海面风速是星载 SAR 图像海面风速反演的又一种方法<sup>[8]</sup>。本文将采用第一种方法反演海面风速。

目前国际上有一种由雷达后向散射截面  $\sigma^0$  反演海面风速的模式, 本文将采用 CMOD-IFR2 模式<sup>[9,10]</sup>。

收稿日期: 1999-12-02; 修订日期: 2000-07-21

基金项目: 本研究得到国家 863 项目(818-06-02)和国家海洋局海洋动力过程与卫星海洋学重点实验室开放基金的资助。

作者简介: 杨劲松(1969—), 男, 湖南宁远人, 副研究员, 主要从事海洋微波遥感, 已发表论文 10 余篇。

该反演模式的形式如下:

$$\sigma_{VV}^0 = 10 \log_{10} \left\{ 10^{a+b} \sqrt{u_{10}} [1 + b_1 \cos(\phi - \psi) + b_2 \cos 2(\phi - \psi)] \right\} \quad (2)$$

其中 VV 为垂直极化,  $u_{10}$  为海面以上 10 m 处的高速,  $\phi$  和  $\psi$  分别为风向和雷达天线方位角,  $a, b, b_1$  和  $b_2$  与雷达波束入射角  $\varphi$  的关系分别为

$$a = c_1 + c_2 P_1 + c_3 P_2 + c_4 P_3 \quad (3)$$

$$b = c_5 + c_6 P_1 + c_7 P_2 \quad (4)$$

$$b_1 = c_8 + c_9 V_1 + c_{10} Q_1 + c_{11} Q_1 V_1 + c_{12} Q_2 + c_{13} Q_2 V_1 \quad (5)$$

$$b_2 = c_{14} + c_{15} Q_1 + c_{16} Q_2 + (c_{17} + c_{18} Q_1 + c_{19} Q_2) V_1 + (c_{20} + c_{21} Q_1 + c_{22} Q_2) V_2 + (c_{23} + c_{24} Q_1 + c_{25} Q_2) V_3 \quad (6)$$

(2)~(6) 式中  $P_1 = x, P_2 = (3x^2 - 1)/2, P_3 = x(5x^2 - 3)/2, x = (\varphi - 36)/19, Q_1 = y, Q_2 = 2y^2 - 1, y = (2\varphi - 76)/40, V_1 = (2u_{10} - 24)/22, V_2 = 2V_1^2 - 1, V_3 = (2V_2 - 1) V_1, c_1 - c_{25}$  为常数。当海面风速大于 10m/s 时, 由(2) 式反演得到的  $u_{10}$  还需加一个校正量  $u_{bias}$ , 其值为

$$u_{bias} = \begin{cases} 0.081 \times u_{10} - 0.0173 \times u_{10}^2 + 0.0009 \times u_{10}^3 & \text{当 } 10 < u_{10} \leq 22 \text{ m/s 时} \\ \arctan(u_{10} - 22) + 3.0382 & \text{当 } u_{10} > 22 \text{ m/s 时} \end{cases}$$

(2) 式只适用于 C 波段 VV 极化的 ERS( 欧洲遥感卫星) SAR 的风速反演。对于工作在相同波段, 但不同极化(HH 极化) 的加拿大 Radarsat SAR 的风速反演, 必须对后向散射截面  $\sigma_{HH}^0$  进行极化校正, 校正模式如下<sup>[11]</sup>:

$$\sigma_{VV}^0 = \sigma_{HH}^0 + 10 \times \log_{10} \left[ \frac{(1 + \tan^2 \varphi)^2}{(1 + 2 \tan^2 \varphi)^2} \right] \quad (7)$$

通过上式的校正, 可用(2) 式反演 Radarsat SAR 图像海面风速。

### 3 风场反演结果

#### 3.1 SAR 图像

本研究所用的 SAR 图像( 图 1) 来自加拿大 Radarsat。该卫星的工作波段为 C 波段( 5.3GHz), 极化方式为 HH。图 1 为标准模式 4(S4) 图像, 其空间分辨率为 25m( 像元大小为 12.5m), 像幅宽为 100km, 图像中心入射角为 36.5°。该图像成像时间为 1997 年 2 月 16 日 6 时 33 分。图像中心位置为北

纬 18.27°, 东经 109.91°, 覆盖了海南省东南部地区及其近岸海区。

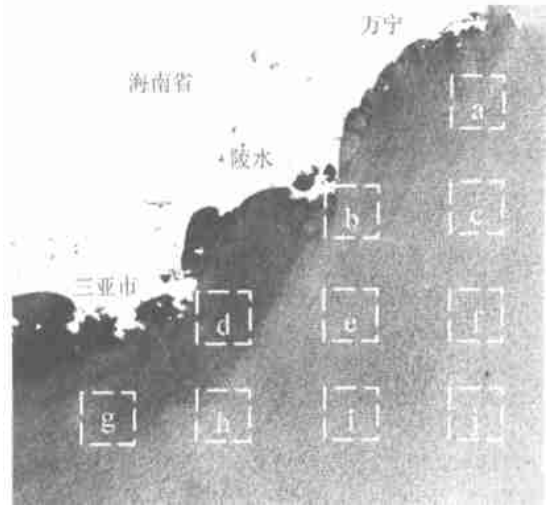


图 1 1997 年 2 月 16 日 6 时显示海南省东南近岸海区海面风场信息的 Radarsat SAR 图像(图中 a-j 为子图像中心点)  
Fig. 1 Radarsat SAR image off southeast coast of Hainan province on Feb. 16th 1997, showing ocean surface wind information (a-j are the centers of the subimages)

#### 3.2 SAR 图像的辐射定标

由 SAR 图像定量反演海面风速, 辐射定标是关键。本文根据加拿大数据处理中心提供的有关数据, 采用以下定标公式对图像进行逐个像元点定标<sup>[12,13]</sup>:

$$\sigma^0 = 10 \log_{10} [(X^2 + A_1)/A_2] + 10 \log_{10} [\sin \varphi] \quad (8)$$

其中  $A_1$  为偏移量,  $A_2$  为增益,  $\varphi$  由下式给出

$$\varphi = \arccos \left[ \frac{h^2 - R^2 + 2rh}{2rR} \right] \quad (9)$$

其中  $h$  为卫星轨道高度,  $r$  为地球半径,  $R$  为斜距。

#### 3.3 风向的反演

风向的反演按照 2.1 节中介绍的方法进行。将整幅图像分成若干个子图像, 每个子图像将产生一个风向数据, 本研究选取的子图像为 1024 × 1024 个像元。子图像选定后, 对其作二维快速傅立叶变换, 就得到二维低频谱。图 2 为图 1 中子图像 e 的二维低频谱。图 2 中低频谱峰值连线的垂线就是该子图像中心点的风向( 图中虚线)。但该风向还存在着 180° 的不确定性, 即该风有可能由西南向东北吹, 也可能由东北向西南吹。为此我们利用 SAR 图像提供的其它信息确定风的方向。由图 1 可看到近岸海区特别是三亚、陵水近岸海区, 图像呈暗色, 这是背

山风所致。在陵水—万宁近岸海区呈亮色, 这是落山风之故。近岸海区的背山风和落山风表明该地区的风由陆地吹向海洋。因此, 我们可确定 e 子图像的风为东北风。其它子图像的风向也由此原理确定。

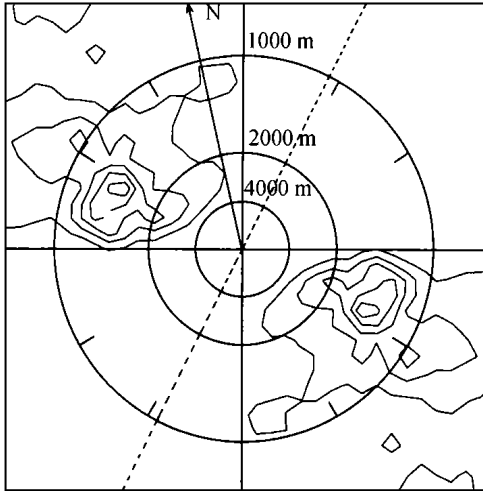


图 2 为图 1 中子图像 e 的二维低频谱(图中虚线为风向)

Fig. 2 Two-dimensional spectrum of the subimage e in Fig. 1. The dashed line is along the wind direction

### 3.4 风速的反演

风速的反演由 3 个步骤组成: (1) 对子图像进行辐射定标, 得到每个像元的后向散射截面  $\sigma_{HH}^0$ ; (2) 对  $\sigma_{HH}^0$  进行极化校正, 得到  $\sigma_{VV}^0$ ; (3) 输入后向散射截面  $\sigma_{VV}^0$ 、入射角  $\varphi$  和风向值, 由公式(2) 反演子图像的风速  $u_{10}$ 。

### 3.5 结果

表 1 给出由 SAR 图像反演得到的子图像中心点 a-j 的风速和风向以及相应的数值预报值。数值预报值由杭州市气象局风场预报模式计算得到, 其风速和风向的精度分别为  $\pm 1\text{m/s}$  和  $\pm 10^\circ$ 。图 3 为由 10 个反演风矢量组成的海南省东南近岸海区海面风场。图 3 显示该海区为东北风, 风速为  $7.47\text{m/s} - 12.8\text{m/s}$ 。图 4 是根据数值预报模式提供的 1997 年 2 月 16 日 8 时海南省附近海域海面风场绘制的。SAR 图像反演风场和预报风场在时间上相差 1 小时 27 分, 但在空间位置上是一致的。比较图 3 和图 4, 可看到在海南省东南海区 SAR 反演风场和数值预报风场结构是十分相符的。为定量讨论 SAR 海面风场反演的精度, 我们利用表 1 计算了研

究海区内风速风向的均方根误差, 结果表明, SAR 反演的海面风速风向与数值预报的风速风向十分吻合, 风速和风向的均方根误差分别为  $0.94\text{m/s}$  和  $4.03^\circ$ 。

表 1 由 SAR 图像反演得到的子图像中心点 a-j 的风速风向以及相应的数值预报值

Table 1 Wind speed and wind direction of a-j retrieved from the SAR image and calculated from the numerical model

	风速/(m/s)		风向/(°)	
	反演结果	数值预报值	反演结果	数值预报值
a	8.11	8.53	57.7	51.8
b	7.91	8.01	39.3	40.6
c	11.08	10.06	34.5	35.5
d	7.58	7.60	46.4	44.2
e	12.58	12.00	26.7	24.7
f	12.80	13.21	20.8	23.9
g	7.47	8.97	45.4	54.8
h	11.65	10.05	46.4	46.6
i	11.77	13.03	39.3	43.5
j	12.75	11.88	26.0	25.3

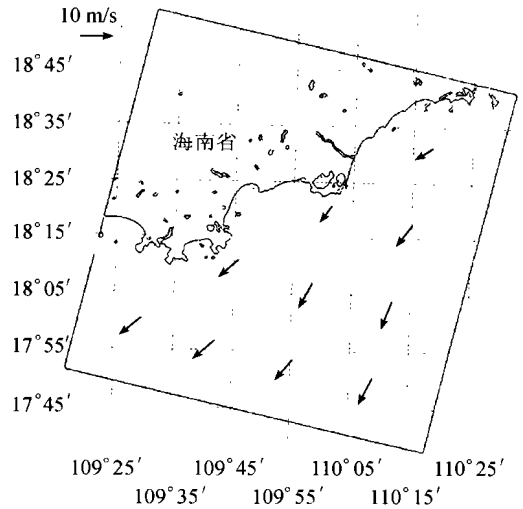


图 3 反演得到的海南省东南近岸海区海面风场

Fig. 3 Retrieved ocean surface wind field off the southeast coast of Hainan province

## 4 结 论

本文给出了星载合成孔径雷达图像的近岸海面风场反演方法, 该方法不仅可用于反演 Radarsat SAR 图像, 而且也可用于反演 ERS-1/2 SAR 图像。利用近岸海区的背山风和落山风图像特征, 很好地解决了风向的  $180^\circ$  不确定性。中国海南省东南部近岸海区海面风场反演结果表明, 该方法具有较高的反演

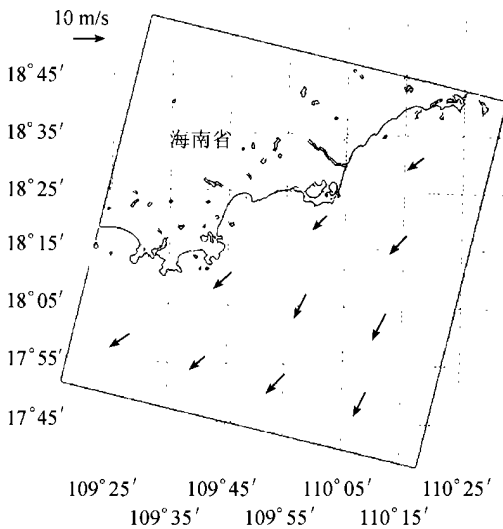


图 4 数值预报模式得到的海南省东南近岸海区海面风场

Fig. 4 Surface wind field from the numerical model

精度, 显示了星载 SAR 测量海面风场的能力。该方法作进一步的实验验证和完善, 可用于中国近岸海区风场的业务化测量。

**致谢** 本文得到加拿大遥感中心 P. Vachon 博士的帮助。Radarsat SAR 图像和数值预报风场分别由加拿大 Radarsat 公司和杭州市气象台提供, 在此表示衷心的感谢。

## 参 考 文 献 (References)

- [1] Stoffelen A, Anderson D L T. ERS-1 scatterometer data and characteristics and wind retrieval skills [A]. Proceedings of First ESA-1 Symposium [C]. ESA SP-359, 1993.
- [2] Vachon P W, Dobson F W. Validation of wind vector retrieval from ERS-1 SAR images over the ocean [J]. *The Global Atmosphere and Ocean System*, 1996, **5**: 177—187.

- [3] Johannessen O M, Johannessen J A *et al.* COAST WATCH' 95: ERS-1/2 SAR applications of mesoscale upper ocean and atmospheric boundary layer processes off the coast of Norway [A]. Proceedings of IGARSS' 96 [C]. Lincoln, Nebraska, USA, 1996.
- [4] Wang Chao, Pan Guangdong. Research on wind vector observation from SIR-C/X SAR data: case study of SIR-C/X SAR experiment over South China Sea [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2000, **4**(1): 51—54. [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 [J]. *遥感学报*, 2000, **4**(1): 51—54.]
- [5] Valenzuela G R. Theories for the interaction of electromagnetic and oceanic waves—a review [J]. *Boundary Layer Meteorol.*, 1978, **13**: 61—85.
- [6] Hasselmann K *et al.* Theory of synthetic aperture radar ocean imaging: a MARSEN view [J]. *J. Geophys. Res.* 1985, **90**(C3): 4659—4686.
- [7] Korabakken E, Johannessen J A, Johannessen O M. Coastal wind field retrievals from ERS synthetic aperture radar images [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, **103**(C4): 7857—7874.
- [8] Kerbaol V, Chapron B, Vachon P W. Analysis of ERS-1/2 SAR wave mode images [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, **103**(C3): 7833—7846.
- [9] IFREMER-CERSAT. Off-line wind scatterometer ERS Products; User Manual, Technical Report C2 MUT-W-01-HE. Version 2.0, [R]. IFREMER-CERSAT, BP 70, 29280, PLOUZANE, France, 1996.
- [10] Quilfen Y, Chapron B, Elfouhaily T *et al.* Observation of tropical cyclones by high resolution scatterometry [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, **103**(C4): 7767—7786.
- [11] Elfouhaily T, Thompson D R, Vandemark D, Chapron B. A new bistatic model for electromagnetic scattering from perfectly conducting random surfaces [J]. *Waves in Random Media*, 1999, **9**: 281—295.
- [12] Shepherd N. Extraction of beta naught and sigma naught from Radarsat CDPF products [R]. Report No.: AS97-5001, ALTRIX Systems, 22nd, 1998.
- [13] McCann S. Radarsat CDPF products specification RZ SP-50-5313 5/1 [R]. 28h, 1995.

## Coastal Ocean Surface Wind Retrieval from SAR Imagery

YANG Jin song, HUANG Wei gen, ZHOU Chang bao, FU Bin, SHI Ai qin, LI Dong ling

(Key Lab. of Ocean Dynamic Processes and Satellite Oceanography, Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China)

**Abstract:** This paper presents an approach to the retrieval of high resolution ocean surface wind fields from spaceborne synthetic aperture radar (SAR) imagery based on scattering theory of microwave for ocean surface. It consists of three procedures: radiometric calibration of SAR image, wind direction determination and wind speed calculation. As a case study, a Radarsat SAR image of the coastal zone near the Hainan Island, China is analyzed. The results are compared with those calculated from a numerical model. It is shown that they are in good agreement. The root mean square errors of wind speed and wind direction are 0.94m/s and 4.03° respectively.

**Key words:** synthetic aperture radar (SAR); ocean surface wind field