

一种基于灰度互相关法的扫描模式下的风场反演算法

赵凤军^① 刘凡^{*①②} 邓云凯^① 禹卫东^① 冯锦^①

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要: 该文分析了传统风场反演算法的理论依据、特点和不足, 提出一种新的扫描模式下的风场反演算法。该算法考虑两幅相邻扫描周期所合成孔径雷达图像中海浪波纹的相关特性, 应用互相关方法, 求解波纹运动矢量, 确定风场风向, 然后代入地球物理模型求解风速。与传统风场反演算法及浮标实测数据对比可知, 该算法提高了风场反演的精确度, 且不存在风向模糊问题。机载雷达实测数据的处理结果证明了方法的有效性。

关键词: 扫描雷达; 风场反演算法; 灰度互相关法; 风向模糊

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)07-1667-04

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.01320

A New Wind Vector Algorithm in Scanning Mode Based on Gray Cross-correlation

Zhao Feng-jun^① Liu Fan^{①②} Deng Yun-kai^① Yu Wei-dong^① Feng Jin^①

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Theory, characteristics and shortcomings of traditional wind vector algorithm are analyzed in the beginning of this paper, and then, a new wind vector algorithm in scanning mode is delivered. The correlation of ocean wave in two neighboring scanning period Synthetic Aperture Radar (SAR) images is discussed, and the wind direction is determined by displacement vector of the wind-induced streaks using gray cross-correlation. Eventually, the GMF (Geophysical Model Function) is adopted to estimate the wind speed. Compared with traditional wind vector algorithm and wind measurement from buoy, the new algorithm, which has no problem with the wind direction ambiguity, is more accurate. The processing results of real airborne radar data prove the effectiveness of the algorithm.

Key words: Scanning radar; Wind vector algorithm; Gray cross-correlation; Wind direction ambiguity

1 引言

海洋表面风场是海洋动力学的基本参数, 对于人们理解和预测许多海洋、气象和气候现象非常重要。传统的测风方法采用岸基观测站、浮标和船只等, 但收集的数据有限^[1]。岸基观测站和浮标的风场测量精度高, 但是数量少, 并大多分布在北半球的近海岸区域。船只的测量精度受观测人员的操作、风速计的放置、船速的校正等因素的影响而得不到保证。而机载、星载微波散射计的应用极大地改变了这种情况, 使大范围风场观测成为现实。和风散射计、高度计、辐射计等其他微波散射计相比, 合成孔径雷达(SAR)具备分辨率高, 可以不受气候、昼夜因素等影响, 能够全天候的工作等特点, 是对

海面风场观测的有效手段, 近年来被广泛应用于海面风场反演领域^[2-5]。利用 SAR 图像反演风场的方法主要分为两种。一种是根据 SAR 图像方位向模糊原理, 利用风速与高波数截断波长之间的关系计算海面风速。另外一种, 也是比较常用的, 就是首先建立经验性的地球物理模型(Geophysical Model Function, GMF), 来表示海面后向散射系数 σ^0 (又称为归一化雷达散射截面积, NRCS)与海面风场之间的关系, 从而通过绝对定标后的海面 NRCS 反演海洋表面风场的方法^[1,6]。应用此方法, 通常首先将海洋波纹 SAR 图像 2 维傅里叶变换得到风向, 再将风向、入射角等参数代入 GMF 计算得到风速。然而这种算法求得的风向具有 180° 方向模糊, 必须通过浮标、散射计、气象台等辅助信息消除^[4-6]。此外, SAR 图像中波浪纹理与风向之间并非完全吻合, 而是有一个补偿角, 这个角度是变化且无法估

计,这也造成了风向估计的偏差^[1]。

针对以上因素,本文利用灰度交互信息法,在合成孔径雷达扫描模式下提出一种新的海面风场反演算法,通过实测数据的验证,该算法能够比传统风场反演算法更为准确地反演海面风场。

2 风场反演理论

散射计经过绝对定标后,可以用来测量目标的后向散射系数。散射计测量的海洋表面 NRCS,可被进一步反演为海洋表面风场。这种散射计测量海面风场的技术现在已经比较成熟。在大多数入射角范围内,海面的后向散射与海面的风速、风向有着密切的关系。在中等入射角(20°-70°左右)的条件下,布拉格散射是主要的散射机理^[6]。

海洋表面波可分为长波和短波两种。其中长波为长重力波,波高达数米。短波为短重力波或表面张力波,统称为张力波,波高只有 10^{-4} m 量级。张力波叠加在重力波上,并会对散射计发射的雷达波产生布拉格谐振。图 1 表示了布拉格谐振现象。在海面波中有以波长为 L 的正弦波分量,雷达波长为 λ ,入射角为 θ 。如果从发射元到每个逐次波峰的附加距离为 $\lambda/2$,那么从各逐次波峰反射回来的来回路程的相位差 360° ,因而各回波信号为同相位相加。相反,如果是另外的路程差(不是 $\lambda/2$ 的整数倍),则为非同相位相加。据此,可以推导出布拉格谐振条件为

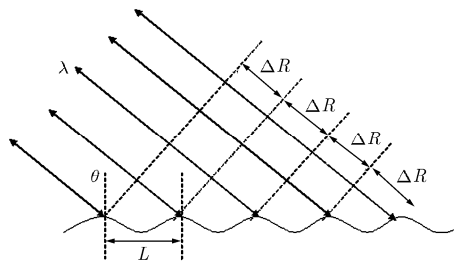


图 1 布拉格谐振示意图

$$(2L/\lambda) \sin \theta = n, \quad n = 0, 1, 2 \dots \quad (1)$$

若散射计的雷达波束照射范围内包含的谐振散射体较少,则产生的谐振效应不强。但对于机载和星载散射计,其雷达波束的照射面积为几百或几千平方米,因而即使谐振散射体非常小,谐振效应也是很强的,在回波中占支配地位^[6]。布拉格谐振散射机理使海面风矢量和散射计测量的海面 NRCS 相互联系起来。通过这种联系,可以从散射计测量的海面 NRCS 反演出海洋表面的风场。

3 风场反演算法

经过绝对定标后,得到海面 NRCS,从而可以对风场进行反演。风场反演算法分为风向反演和风速反演两个部分,分别在本文的下面两个部分加以介绍。

3.1 风向的反演方法

一般机载雷达在大范围扫描模式下,扫描周期较短,成像区域辽阔,相邻扫描周期所成图像重合区域很大,而相对与载机运动速度而言,海浪波纹的移动缓慢且连续,因此本文提出一种新的风场反演方法,就是利用扫描模式下,两幅相邻扫描周期所成的 SAR 图像中海波纹相关特性,利用互相关法^[7]进行区域图像配准,从而确定海浪流动方向,得到准确的风场方向。该方法首先将第 1 幅 SAR 图像 T 分割成若干大小相同的子图像(本文以 9 块子图像为例),作为模版 $T_1 \sim T_9$ (大小为 $x \times y$),设下一周期扫描所成的 SAR 图像为 I_2 ,则利用互相关法,构建归一化的 2 维交互相关函数 $C(u, v)$ 来表示每一个位移位置的相似程度:

$$C_n(u, v) = \frac{\sum_x \sum_y T_n(x, y) I(x-u, y-v)}{\left[\sum_x \sum_y I(x-u, y-v)^2 \right]^{1/2}}, \quad n=1, 2, \dots, 9 \quad (2)$$

如果模版 T_n 能够和图像 I 恰当地匹配,在最佳匹配的位移点 (i, j) 上,交互相关函数将会出现峰值 $C_n(i, j)$,从而可以对相邻扫描周期内的两幅 SAR 图像进行配准,再根据载机运动矢量、海波纹流动矢量计算风向,如图 2 所示。

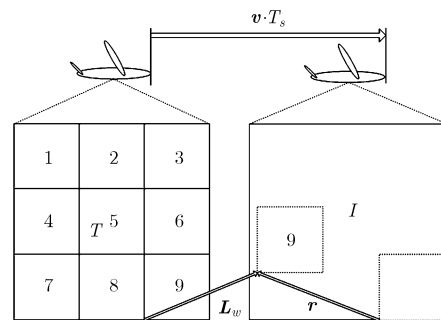


图 2 子图像配准方法反演风向示意图

图中飞机运动矢量为 v ,扫描周期为 T_s ,子图像位移矢量为 r ,海波纹流动矢量为 L_w ,则由图 2 中各个矢量的几何关系,可以求得海波纹运动矢量为

$$L_w = v \cdot T_s + r \quad (3)$$

在无雨天气下,海洋表面波纹运动矢量主要由风力决定,因此可以由海浪运动方向确定风场方向。

3.2 风速的反演方法

本文采用已经被广泛应用的 CMOD4 模型计算风速^[8]，CMOD4 模型由式(4)表达：

$$\sigma_{VV}^0 = b_0 \cdot (1 + b_1 \cos \phi + b_3 \tanh b_2 \cos 2\phi)^{1.6} \quad (4)$$

其中

$$b_0 = b_R 10^{\alpha + \gamma \cdot f_1(v + \beta)} \quad (5)$$

$$f_1(s) = \begin{cases} -10, & s \leq 10^{-10} \\ \lg s, & 10^{-10} < s \leq 5 \\ \sqrt{s} / 3.2, & s > 5 \end{cases} \quad (6)$$

式(5)中的 b_R 为 b_0 的修正因子，由入射角 θ 决定，而 α ， γ ， β 以及式(4)中的 b_1 ， b_2 ， b_3 等因子，则由式(7)-式(14)给出：

$$\alpha = c_1 P_0 + c_2 P_1 + c_3 P_2 \quad (7)$$

$$\gamma = c_4 P_0 + c_5 P_1 + c_6 P_2 \quad (8)$$

$$\beta = c_7 P_0 + c_8 P_1 + c_9 P_2 \quad (9)$$

$$b_1 = c_{10} P_0 + c_{11} V + (c_{12} P_0 + c_{13} V) f_2(x) \quad (10)$$

$$b_2 = c_{14} P_0 + c_{15} (1 + P_1) V \quad (11)$$

$$b_3 = 0.42(1 + c_{16} (c_{17} + x)(c_{18} + V)) \quad (12)$$

$$b_R = \text{LUT}(\theta) \quad (13)$$

$$f_2(x) = \tanh[2.5(x + 0.35)] - 0.61(x + 0.35) \quad (14)$$

式(7)-式(14)中，勒让德多项式系数为 $P_0 = 1$ ， $P_1 = x$ ， $P_2 = (3x^2 - 1)/2$ ，而 $x = (\theta - 40)/25$ 。 ϕ 和 θ 分别为风向和入射角，单位是度($^\circ$)； V 为海面高 10 m 处的风速，单位是 m/s。 $c_1 \sim c_{18}$ 为常数。式(4)是适用于 C 波段垂直极化(VV)条件下的地球物理模型，如处理同波段水平极化(HH)情况下的风速反演，需要对后向散射系数进行极化校正，校正公式为

$$\sigma_{HH}^0 = \left(\frac{1 + a \tan^2 \theta}{1 + 2 \tan^2 \theta} \right)^2 \sigma_{VV}^0 \quad (15)$$

由于本文所选取的散射模型为布拉格散射模型，故而式(15)中 $a = 0$ 。

4 实验结果对比分析

实验中选用海洋机载扫描的实测数据，分别应用本文提出的新的风场反演算法和传统的风场反演算法(即：将海洋波纹 SAR 图像经过 2 维傅里叶变换得到 180° 方向模糊的风向，通过辅助信息消除方向模糊后，再将风向、入射角等参数代入 GMF 计算得到风速)对海面风场进行反演，通过结果的比较来验证本文提出的新的风场反演算法。考虑到扫描模式下合成孔径雷达成像质量一般，本文采用高分辨率 DBS 成像算法来弥补这一不足^[8-10]，图 3，图

4 为成像结果。

应用本文提出的新方法，首先对两幅扫描模式下的 SAR 图像进行幅度校正和绝对定标，将第 1 幅 SAR 图像分为 9 个大小相同的子图像，设为 $T_1 \sim T_9$ ，如图 3 所示。应用互相关法依次将 9 个模块对第 2 幅 SAR 图像进行配准，配准结果如图 4 所示，求得矢量 r 。由载机速度矢量 v 和扫描周期 T_s 可以求得载机运动矢量 $l = v \cdot T_s$ 。代入式(3)可以求得海波纹位移矢量 L_w ，计算得到海波纹位移方向，从而求得风场方向为 11.9° ，代入 COMD4 模型求得风速为 7.6 m/s。

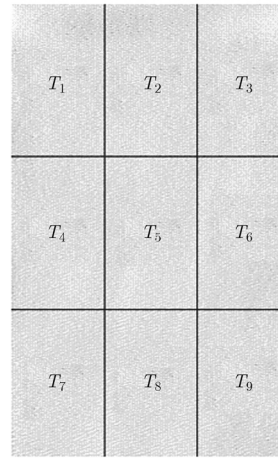


图 3 第 1 幅 SAR 扫描图像分割为 9 幅子图像

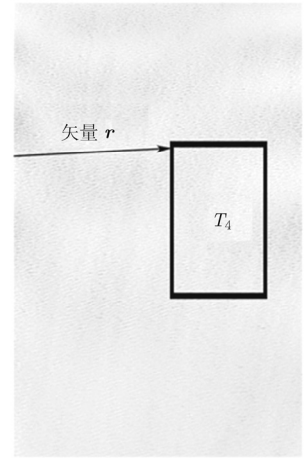


图 4 相邻扫描周期第 2 幅 SAR 图像应用互相关法配准

应用传统风场反演方法，分别对两幅经过幅度校正和绝对定标后的 SAR 图像应用 2 维傅里叶变换得到 2 维频谱，如图 5，图 6 所示。图 5 为 I_1 经过 2 维傅里叶变换得到的结果，可以求得带有 180° 方向模糊的风向为 14.2° 或 -165.8° ，根据浮标参数得到风向为 14.2° ，代入 CMOD4 模型可以求得风速为 7.7 m/s。图 6 为 I_2 经过 2 维傅里叶变换得到的结果，可以求得带有 180° 方向模糊的风向为 13.9° 或 -166.1° ，根据浮标参数得到风向为 13.9° ，代入 CMOD4 模型可以求得风速为 7.7 m/s。

由当地浮标的测量，此地当时风向为 11.3° ，风速为 7.1 m/s。本文提到的新的风场反演方法所得到的风矢量与真实值的误差：风向误差为 0.6° ，风速误差为 0.5 m/s；而用传统风场反演方法得到的结果与真实值的误差： I_1 风向误差为 2.9° ，风速误差为 0.6 m/s， I_2 风向误差为 2.6° ，风速误差为 0.6 m/s，所以用传统方法得到的风场与真实值的平均误差为：风向误差为 2.75° ，风速误差为 0.6 m/s。

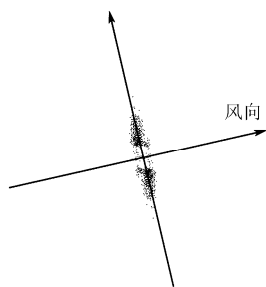


图5 I_1 经过2维傅里叶变换后的频谱

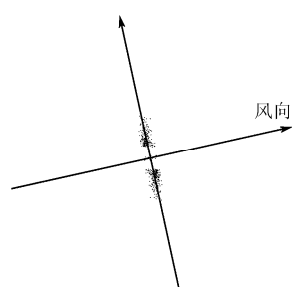


图6 I_2 经过2维傅里叶变换后的频谱

通过两种方法得到结果与真实值之间的比较,可以看出采用新的风场反演算法所得到的风矢量更精确,也更接近真实值。从风向误差对比来看,本文提到的新方法比较传统风场反演方法在精度上提高的幅度较大;而从风速误差对比来看,这种精度上提高的幅度并不明显。造成这一现象的原因,从以上两种风场反演方法的求解过程可以看出,是CMOD4模型本身对风向的灵敏度不高,模型本身对风速的计算存在误差。

5 结论

本文研究了传统风场反演算法的特点和局限性,分析了作为风场反演方法理论依据的散射机理模型,总结了现有的地球物理模型,在此基础上给出了一种扫描模式下的风场反演算法,该算法利用扫描模式下,两幅相邻扫描周期所成的SAR图像中海波纹相关特性,采用互相关法进行区域图像配准,从而确定海浪流动方向,得到准确的风场方向;再利用相应的地球物理模型对风速进行反演。该算法解决了传统方法中风向模糊问题,得到了高精度的风矢量,有很好的应用价值。

参考文献

- [1] 陈艳玲, 黄斌, 丁晓利, 李志伟. 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, and Li Z W. Study on ocean wind vector retrieval form ERS-2 SAR image. *Chinese Journal of Geophysics*, 2007, 50(6): 1688-1694.
- [2] Guo J, He Y J, William P, Shen H, and Chu X Q. A new model to estimate significant wave heights with ERS-1/2 scatterometer data. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2009, 27(1): 112-116.
- [3] 孟雷, 何宜军, 伍玉梅. 一种改进海面风速反演的分类神经网络方法. *海洋与湖沼*, 2009, 40(2): 122-128.
Meng L, He Y J, and Wu Y M. An improved algorithm for sea surface wind speed retrieval of a classified neural network. *Oceanologia ET Limnologia Sinica*, 2009, 40(2): 122-128.
- [4] He Y J, William P, Zou Q P, and Paris W. A new wind vector algorithm for C-band SAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(7): 1453-1458.
- [5] Zou Q P, He Y J, Will P, and Paris W. Wind-vector estimation for radarsat-1 SAR images: validation of wind-direction estimates based upon geometry diversity. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2007, 4(1): 176-180.
- [6] 杨劲松, 黄韦良, 周长宝, 傅斌, 史爱琴, 厉冬玲. 合成孔径雷达图像的近岸海面风场反演. *遥感学报*, 2001, 5(1): 13-16.
Yang J S, Huang W G, Zhou C B, Fu B, Shi A Q, and Li D L. Coastal ocean surface wind retrieval from SAR imagery. *Journal of Remote Sensing*, 2001, 5(1): 13-16.
- [7] Rosenfeld A and Kak A C. *Digital Picture Processing*[M]. Academic Press, Orlando, 1982, Vol.1 and Vol.2.
- [8] Stoffelen A D and David A. Scatterometer data interpretation: derivation of the transfer function CMOD4. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(C3): 5767-5780.
- [9] 魏红亮, 李明. 机载扫描雷达 DBS 模式下的锐化比恒定技术研究. *火控雷达技术*, 2009, 38(2): 14-18.
We H L and Li M. Study on keeping sharpening ratio constant technique in DBS mode of mechanical scanning radar. *Fire Control Radar Technology*, 2009, 38(2): 14-18.
- [10] 王宏远, 危嵩, 孙文. DBS 高分辨率成像及动目标轨迹处理. *电波科学学报*, 2005, 20(5): 637-641.
Wang H Y, Wei S, and Sun W. High resolution DBS imaging and moving target trajectory processing. *Chinese Journal of Radio Science*, 2005, 20(5): 637-641.

赵凤军: 男, 1963年生, 研究员, 长期从事雷达系统和射频微波技术的研究。

刘凡: 男, 1984年生, 博士生, 从事成像技术和信号处理方面的研究。

邓云凯: 男, 1962年生, 研究员, 博士生导师, 长期从事微波遥感、通信和天线技术的研究。