

文章编号: 1007-4619 (2000) 01-0051-04

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

王 超, 潘广东

(中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101)

摘 要: 海洋雷达后向散射回波主要来自短重力波的 Bragg 散射, 这种散射与海面风场信息、边界层涡旋等密切相关。因此, 可以从雷达散射截面反演风场信息。对 1994 年 4 月航天飞机成像雷达(SIR-C/X-SAR)获取的南中国海合成孔径雷达(SAR)图像进行了分析研究。利用 SIR-C 数据, 从 SAR 图像谱提取了风向; 根据 CMOD4 模型, 从 C 波段雷达后向散射系数反演风速; 利用双尺度散射模型对反演的风速进行了对比分析。结果表明, 从 SIR-C 雷达数据可以反演海面风矢量, 星载 SAR 是提取海面风场信息的有效技术手段之一。

关键词: SIR-C/X-SAR; 风矢量; 散射模型

中图分类号: TP722.6/P71 **文献标识码:** A

1 引 言

70 年代末, 随着美国海洋卫星(Seasat)的升空, 海洋微波遥感迅速发展。从 SIR-A, SIR-B, SIR-C/X-SAR 到 ERS-1, 2, RADARSAT 及即将发射的 ENVISAT, 随着一系列携带 SAR 系统卫星的升空, 海洋雷达遥感理论与应用研究取得了很大的进展。

研究表明, 海面的微波散射主要来自短重力波引起的 Bragg 谐振, 而海面短重力波又与海面风场、长重力波、海气边界层等现象有关。因此, 可以通过对海面雷达散射截面的观测, 获取海面风场信息。有关海面雷达散射截面与风场的理论模型和经验模型得到不断发展并已用于海洋预报。

海洋风场的遥感观测, 散射计是有效的方法之一。但是, 微波散射计通常分辨率较低, 尤其不能满足海岸带和岛屿区的观测要求。SAR 原理上相当于成像散射计, 因此一些学者利用 ERS-1 SAR 数据研究海面风场信息的提取, 显示了其优势和潜力^[1,2]。

1994 年 4 月和 10 月, 美国奋进号航天飞机二次

升空, 其上携带的星载成像雷达(SIR-C/X-SAR), 获取了中国南海等海域的 SAR 图像。此次试验利用 SIR-C/X-SAR 获取的中国南海海域雷达数据, 开展了海面风矢量提取的研究工作, 并用海洋表面双尺度散射模型对提取结果进行了验证。结果表明, 用 SIR-C/X-SAR 数据提取风场信息是可行的。

2 试验数据

SIR-C/X-SAR 数据

1994 年 4 月 9 日, 美国奋进号航天飞机成功升空, 利用其上携带的 SIR-C/X-SAR 开展为期 11 天的对地观测任务。SIR-C/X-SAR 具有 L, C 和 X 波段, 其中前两种具极化模式, X 波段为 VV 极化方式。数据皆绝对定标^[3]。X-SAR 天线与 SIR-C 的 L, C 波段天线并列, 成像同步, 除成像区域稍有差异, 其余参数同 SIR-C。SIR-C/X-SAR 在过顶南中国海域时, 获取了南中国海域的 L, C, X 波段多极化 SAR 数据(封二图版 I 图 1), 用于此次试验的 SIR-C 数据有关参数列于表 1:

收稿日期: 1998-12-14; 修订日期: 1999-04-13

基金项目: 国家 863 计划 818 主题 06-02 课题资助项目。

作者简介: 王超(1963—), 男, 安徽蚌埠人, 研究员, 博士。主要研究领域: 干涉雷达、微波辐射与散射、海洋 SAR 遥感。

表 1 中国南海 1994 年 4 月 SIR-C 数据参数

Table 1 Parameters of SIR-C data acquired over South China Sea in April 1994

数据编号	图像中心时间(GMT)	图像中心经度/(°)	图像中心纬度/(°)	平台星下点走向/(°)	平台高度/km	轨道方面
136.10	1994-04-17 18:51:02.036	108.409	17.357	32.044	209.904	上行
波段	极化	图像中心入射角/(°)	视数	线距/m	像元距/m	辐射纠正
L,C	HH, HV	33.163	5.348	12.5	12.5	绝对定标

3 海面风场的提取

3.1 海浪谱与风向的确定

在一定条件下,边界层涡旋(boundary layer rolls)和风条纹(Wind streak)都可以在 SAR 图像上形式平行海面风向的低频线性现象^[1,2],因此可通过分析 SAR 图像谱提取风向信息。

考虑到速度聚束等雷达截面调制因素的 SAR 海浪成像模型通常是非线性的,这种非线性与斜距/速度比(range to velocity ratio, R/V)呈正相关^[4-6]。SIR-C/X-SAR 的 R/V(约 35s)比其它星载 SAR 的 R/V(例如 ERS 约 113s)小得多,这是由于其轨道高度较低的原因(前者约为 225 km,后者为 780 km)。因此,速度聚束成像作用相对较小,SIR-C/X-SAR 图像谱未受显著的非线性影响。主要成像影响是长波浪对 Bragg 波的倾斜调制和长短波浪间的水动力作用调制,因此长波浪对 SIR-C/X-SAR 雷达截面的调制起重要作用^[4]。

试验中处理的 SIR-C/X-SAR 数据为 L-HH(L 波段 HH 极化,下类同),L-HV,C-HH,C-HV 数据,考虑风阵的空间间距一般大于 1km,同时数据的分辨率为 25 m,因此试验将 1024×1024 图像均值法缩成 512×512,既减少冗余数据量和计算量,同时也相当进行了斑点滤波。封二图版 I 图 2 是试验区 SIR-C/

X-SAR 的图像谱,该图以 SIR-C/X-SAR 图像为参考框架,图像中心为原点,水平向右为轨道方向,垂直向上为斜距向,两坐标轴端点波长均为 50m。可以看出,不同波段的图像谱基本相同,主波向与斜距向 22°夹角;HV 图像谱不如 HH 图像谱清晰,尤其是 C-HV 像谱,其峰值区难以辨认。这是由于回波弱的缘故。由此可以得到具 180°模糊解的海面风向。风向模糊解通常是利用连续观测或实测数据来确定。

3.2 雷达散射截面估算风速

通常认为海面的雷达散射截面主要受海面风场的影响。因此,有关海面风场计算雷达散射截面的模型近 20 年来得到迅速发展。为了用 ERS 散射计数据反演海面风场,法国海洋研究所(IFREMER)利用 ERS 散射计数据、欧洲中期天气预报中心与美国 NOAA 浮标等风场数据发展了 C 波段散射计模型(CMOD4),该模型主要针对 ERS 的 C 波段 VV 极化数据,目前已用于 ERS 散射计数据产品的生产^[7]。

本试验只有 C-HH 数据,通常可由极化比推算出 C-VV^[8],但实际上研究表明 SIR-C 的 C-HH 和 C-VV 相差不大,这可能是数据定标的原因^[9]。同时,考虑到入射角较小,因此,试验中利用试验区 SIR-C 的 C 波段 HH 极化数据及上述计算的风向数据,由 CMOD4 模型反演出海面风速,结果见表 2。

表 2 中国南海试验区 SIR-C C-HH 数据反演海面风速结果

Table 2 Wind vector retrieval results from SIR-C C-HH data in South China Sea experiment region

编号	像元数	雷达截面	入射角/(°)	风向/(°)	风速/m/s
chh11	512 * 512	-12.69	30.329	82	6.0
chh12	512 * 512	-14.33	33.245	82	6.5
chh21	512 * 512	-13.00	30.329	82	5.5
chh22	512 * 512	-14.83	33.245	82	6.0

4 海面风场反演的微波散射模型验证

粗糙风浪海面散射机理研究自 50 年代以来,取

得了应用意义上的进步,Valenzuela 的工作对这一研究给了综述^[10]。Romeiser 等考虑了海洋中内波的影响,发展了三尺度海洋散射模型^[11]。本节用图像反演的风信息结合双尺度模型计算的后向散射系数,

对比讨论了计算 σ^0 与图像 σ^0 的差异。

4.1 海洋面散射的双尺度模型

双尺度模型散射解由反射率予以修正的大尺度起伏的 KA (Kirchhoff Approximation) 近似解和小尺度起伏的 SPA (Small Perturbation Approximation) 解对大尺度起伏造成的倾斜做平均后的解的总和。在海洋上, 我们可以认为长波为大尺度波, 而毛细波、短重力波等为小尺度波。海洋的微波面散射主要是由小尺度波的 Bragg 散射贡献, 大尺度波本身的微波散射较小, 它主要贡献是调制小尺度波的倾斜。结合海水相对介电常数的计算公式^[12], 再根据 Apel 等、文圣常等资料^[13,14] 计算相关海面参数, 利用双尺度模型^[15] 计算。

4.2 模型验证

4.2.1 从 SAR 图像反演的风场计算 σ_{HH}^0

结合 CMOD4 模型反演的风信息, 利用双尺度模型计算结果见表 3:

表 3 双尺度模型计算的 σ_{HH}^0

Table 3 Calculation of σ_{HH}^0 by two scale model

风速/m/s	入射角/(°)	风向/(°)	计算 σ_{HH}^0 /dB
5.0	30.329, 33.245	82	-18.40, -24.70
5.5	30.329, 33.245	82	-18.42, -24.35
6.0	30.329, 33.245	82	-16.45, -22.48
6.5	30.329, 33.245	82	-13.67, -19.60
7.0	30.329, 33.245	82	-13.17, -18.99
7.5	30.329, 33.245	82	-11.59, -17.18
8.0	30.329, 33.245	82	-9.57, -14.80

表中 σ_{HH}^0 列, 每行两值对应两入射角。从表 3 可知, 入射角变化对后向散射系数影响较大。

4.2.2 从 SAR 图像 σ_{HH}^0 反演风速

在假定 C 波段 σ_{HH}^0 已经定标前提下, 根据双尺度散射模型的计算, 我们得出 chh11 区风速约为 7.2 m/s, chh12 区风速约为 8.2 m/s, chh21 区风速约 6.9 m/s, chh22 区风速约 8.0 m/s。

4.2.3 误差分析

从图 3 可知 σ_{HH}^0 与 σ_{VV}^0 的差异随入射角增大而增加, 尤其在入射角大于 30° 后, 更加明显。从图 4 可知 σ_{HH}^0 与 σ_{VV}^0 随方位角(风向)变化, 后向散射系数对风向呈规律变化。同时 σ_{HH}^0 小于 σ_{VV}^0 。在风速确定时, 风向变化对 σ_{HH}^0 的影响可达 1dB, 而对于 σ_{VV}^0 的影响较小。

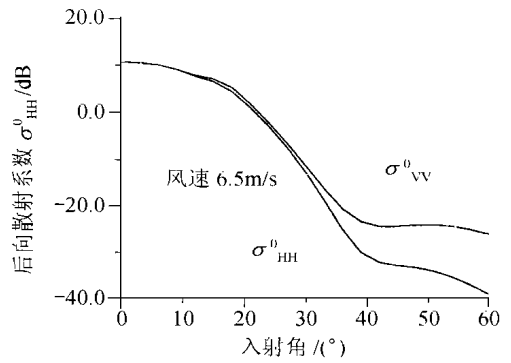


图 3 不同极化后向散射系数随入射角变化图

Fig. 3 σ^0 with different polarization versus incidence angle

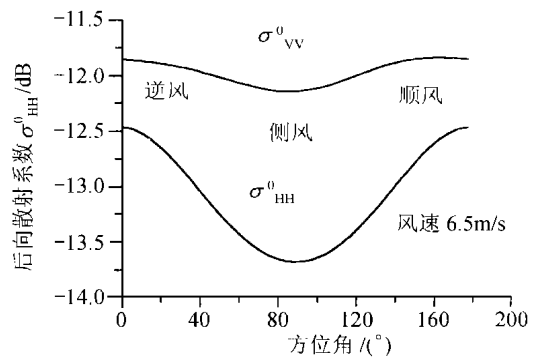


图 4 后向散射系数随方位角变化

Fig. 4 σ^0 versus azimuthal angle

5 结论与讨论

利用中国南海海域 SIR-C/X-SAR 数据的图像谱提取试验区海面风向信息, 试验表明, 不同波段的图像谱基本相同, HV 极化图像谱则与 HH 极化图像谱存在差异, 这种差异可能是由于 HV 回波信号弱造成的。

根据 SAR 获取的试验区海面雷达截面, 结合由 SAR 图像谱确定的海面风向, 由 CMOD4 模型反演出试验区海面风速。同时, 开展了双尺度散射模型海面风场的模拟研究与 SAR 图像提取海面风场试验的结果对比, 后者计算的风速稍低(约 1-2 m/s), 其主要原因有以下几点: CMOD4 是根据 ERS-1 散射计数据的统计模型, 应用于 SIR-C 数据的差异; 实际上存在 SIR-C 的 σ_{HH}^0 与 σ_{VV}^0 的差异, 用 CMOD4 需要考虑极化差异。

本研究利用 SAR 获取海面风场信息并用雷达散射模型进行验证分析。显示了 SAR 提取海面风场信息的能力, 有关海面同步观测研究将在今后工作中继续开展, 该方法获取的风场信息对数值海洋

预报模型的初始化具有重要意义。

致谢: 研究中得到了中国科学院徐冠华院士的热情支持。中国科学院遥感应用研究所郭华东研究员、国家海洋环境预报研究中心黄润恒研究员、中国科学院南海海洋研究所施平研究员、国家海洋局第二研究所黄韦良研究员及法国海洋研究所 Y. Quilfen 博士和加拿大遥感中心 P. W. Vachon 博士等提出了宝贵意见。SIR-C/X-SAR 数据由美国 NASA/JPL 和德国 DLR 处理, 海况数据由国家海洋环境预报中心提供, 在此表示诚挚的谢意。

参考文献 (References)

- [1] Wackeman, C. C., C. L. Rufenach, R. A. Shuchman, *et al.* Wind vector retrieval using ERS-1 synthetic aperture radar imagery [J]. *IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing*, 1996, **34**(6): 1343—1352.
- [2] Vachon, P. W., F. W. Dobson. 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] Wang Chao, Guo Huadong, Li Lin. Satellite-Airborne-Ground SAR Remote Sensing Experiment [J]. *Science Bulletin*, 1996, **41**(4): 377—380. [王超, 郭华东, 李林. 星-机-地雷达遥感试验 [J]. *科学通报*, 1996, **41**(4): 377—380.]
- [4] Alpers, W. C., Melsheimer, C. Bruening, Schmidt R. Imaging of ocean waves by SIR-C/X-SAR over the North Sea and North Atlantic. In: Proceedings of IGARSS '95 [C]. Firenze, Italy, 1995, 1317—1319.
- [5] Keyte, G. E., R. A. Cordey, Larsen R, Macklin J T. First results from the SIR-C/X-SAR experiment on ocean wave imaging in the N. E. Atlantic. In: Proceedings of IGARSS'95 [C]. Firenze, Italy, 1995, 1320—1322.

- [6] Gerling, T., P. Wittmann. Comparison of SAR estimated wave spectra with WAM model estimates during the SRL South Ocean experiment. In: Proceedings of IGARSS'95 [C]. Firenze, Italy, 1995, 1308—1310.
- [7] Quilfen, Y., A. Bentamy. Calibration/Validation of ERS-1 scatterometer precision products. In: Proceedings of IGARSS '94 [C]. Paasadena, US, 1994, 945—947.
- [8] Unal, C. M. H., P. Snoeij, P. J. F. Swart. The polarization-dependent relation between radar backscatter from the ocean and surface wind vector at frequencies between 1 and 18 GHz [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1991, **29**(4), 621—626.
- [9] Vachon, P. W., F. W. Dobson, R. Lalbeharry. SIR-C/X-SAR wind and wave observations in the gulf of St. Lawrence. In: Proceedings of IGARSS '95 [C]. Firenze, Italy, 1995, 1314—1316.
- [10] Valenzuela, G. R. Theories for the interaction of electromagnetic and ocean waves—A review [J]. *Boundary layer Meteorol.* 1978, **13**, 61—85.
- [11] Romeiser, R., W. Alpers. An improved composite surface model for the radar backscattering cross section of the ocean surface 1. Theory of the model and optimization/validation by scatterometer data. *J. G. R.* [J]. 1997, (102)(C11): 25237—25250.
- [12] Klein, L. A., C. T. Swift. An Improve Model for the Dielectric Constant of Sea Water at Microwave Frequencies [J]. *IEEE T&AP*, 1977, **AP-25**(1): 104—111.
- [13] Apel, J. R. An improved model of the ocean surface wave vector spectrum and its effects on radar backscatter [J]. *J. G. R.*, 1994, **99**(C8): 16269—16291.
- [14] Wen Shengchang, Yu Zhouwen. Ocean Wave Theory and Calculating Theory [M]. Beijing: Science Press, 1984. [文圣常, 余宙文. 海浪理论与计算原理 [M]. 北京: 科学出版社, 1984.]
- [15] Jin Yaqin. Remote Sensing Theory of Electromagnetic Scattering and Thermal Emission [M]. Beijing: Science Press, 1993. [金亚秋. 电磁散射和热辐射的遥感理论 [M]. 北京: 科学出版社, 1993.]

Research on Wind Vector Observation from SIR-C/X-SAR Data: Case Study of SIR-C/X-SAR Experiment over South China Sea

WANG Chao, PAN Guang-dong

(Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: The radar backscattering from the ocean surface results mainly from the Bragg scattering caused by the short gravity waves, which are related to wind vector, boundary layer phenomena, etc. Hence, it is reasonable to retrieve the wind field information from the radar cross section of the ocean surface. Much work has been done on deriving the ocean spectra from SAR imagery and wind speed from radar cross section. In this paper, the (SIR-C)/(X-SAR) data acquired in April, 1994 are analyzed over the South China Sea. Firstly, the SAR image spectra are calculated, and the wind direction is estimated. The wind speed is derived using the sigma naught of the C band data with the CMOD⁴ model. The results are validated with the composite model. It is shown that SAR is one of useful tools for the retrieval of comprehensive wind information over the ocean.

Key words: SIR-C/X-SAR; wind vector; scattering model