

郎姝燕,孙从容,鲁云飞,等.中法海洋卫星微波散射计近海岸产品在台风遥感监测中的应用[J].海洋气象学报,2022,42(2):74-80.

LANG Shuyan, SUN Congrong, LU Yunfei, et al. Application of Chinese-French Oceanography Satellite Scatterometer coastal product in typhoon remote sensing monitoring[J]. Journal of Marine Meteorology, 2022, 42(2): 74-80. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2022.02.008. (in Chinese)

中法海洋卫星微波散射计近海岸产品在台风遥感监测中的应用

郎姝燕^{1,2}, 孙从容^{1,2}, 鲁云飞^{1,2}, 林文明³, 董楹³, 刘建强^{1,2}

(1.国家卫星海洋应用中心,北京 100081;2.自然资源部空间海洋遥感与应用研究重点实验室,北京 100081;3.南京信息工程大学,江苏 南京 210044)

摘要:中法海洋卫星(Chinese-French Oceanography Satellite, CFOSAT)搭载的微波散射计(CFOSAT Scatterometer, CSCAT)采用Ku波段扇形波束旋转扫描体制,具有观测几何信息丰富、观测样本数多的特点,是一种新型的海面风场遥感仪器。CSCAT的原始空间分辨率可达10 km×12.5 km,是目前空间分辨率最高的微波散射计,为开发高质量的近海岸高分辨率海面风场产品提供了可能性。首先,回顾了CSCAT近海岸风场遥感的原理,并利用辅助数据验证了这种新的科学产品的有效性。然后,利用CSCAT近海岸风场开展了台风灾害监测研究。与标准25 km分辨率的产品相比,CSCAT近海岸风场可以更细致地描绘台风结构,能够为气象和海洋防灾减灾提供更精准的信息支持与决策服务。

关键词:中法海洋卫星(CFOSAT);微波散射计(CSCAT);近海岸风场产品;台风监测

中图分类号: P412.27 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2022)02-0074-07

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2022.02.008

Application of Chinese-French Oceanography Satellite Scatterometer coastal product in typhoon remote sensing monitoring

LANG Shuyan^{1,2}, SUN Congrong^{1,2}, LU Yunfei^{1,2}, LIN Wenming³, DONG Ying³, LIU Jianqiang^{1,2}

(1. National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081, China; 2. Key Laboratory of Space Ocean Remote Sensing and Applications, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, Beijing 100081, China; 3. Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract The scatterometer onboard Chinese-French Oceanography Satellite (CFOSAT) adopts the Ku-band fan-beam rotating scanning system, which has the characteristics of rich observation of geometry information and large number of observation samples. The CFOSAT Scatterometer (CSCAT) is a new type of remote sensing equipment for sea surface wind field. The original spatial resolution of CSCAT is 10 km×12.5 km, which is the highest spatial resolution of microwave scatterometer at present, and it provides the possibility of developing high-quality coastal high-resolution sea surface wind products. Firstly, the principle of CSCAT remote sensing of coastal wind field is reviewed, and the effectiveness of this new scientific product is verified by ancillary data. Then, the typhoon disaster monitoring research is carried out by using CSCAT coastal wind field. Compared with the standard product with a resolution of

收稿日期:2021-08-10; 修订日期:2021-11-12

基金项目:国家重点研发计划“海洋环境安全保障”重点专项(2018YFC1407200)

第一作者:郎姝燕,女,硕士,副研究员,主要从事海面风场遥感反演和台风监测工作,langshuyan@mail.nsoas.org.cn。

通信作者:孙从容,女,硕士,正高级工程师,主要从事海洋遥感和地面系统建设工作,sunrc@mail.nsoas.org.cn。

25 km, CSCAT coastal wind field can describe typhoon structure in more detail and provide more accurate information support and decision-making service for meteorological and oceanic disaster prevention and mitigation.

Key words Chinese-French Oceanography Satellite (CFOSAT); CFOSAT Scatterometer (CSCAT); coastal wind product; typhoon monitoring

引言

星载微波散射计是目前能够获取全球海面风场资料的主要仪器。1978年,第一个业务化应用的散射计 SASS (Seasat-A Satellite Scatterometer) 发射^[1],此后,美国、欧洲、印度、中国也陆续发射了可以探测全球海面风场的散射计。散射计所获取的风场产品能够在台风灾害监测、数值天气模式、海气相互作用研究等方面发挥重要的作用^[2-5]。散射计提供的全球海面风场产品在台风监测中可以提供台风中心位置、最大风速、风圈半径等定量信息。然而,传统卫星散射计的海面风场标准产品的典型分辨率为 25~50 km,不能满足一些高分辨率的应用,例如近海岸地区的监测以及中小尺度海面动力过程的需要等。

近二十年,欧美遥感学家在卫星散射计近海岸高分辨风场遥感方面开展了大量的研究。LONG et al.^[6]利用反卷积的方法开发了一种高分辨率后向散射图像重构的算法,并给予重构的雷达后向散射信息开展近海岸风场研究。FORE et al.^[7]首先计算 QuikSCAT (Quick Scatterometer) 散射计后向散射测量的陆地污染率,然后将陆地污染率较大的数据剔除,再对剩下的数据进行风场反演,最后得到 12.5 km 网格分辨率的海面风场。VERHOEF et al.^[8]则通过改进后向散射系数重组算法提高反演风场的网格分辨率。近年来,VOGELZANG and STOFFELEN^[9]进一步开发了基于 LCR 技术的 5~6 km 网格分辨率的 ASCAT (Advanced Scatterometer) 风场产品。需要注意的是,这些近海岸风场处理都是通过改进数据处理方法得到的,虽然能够一定程度上提高海面风场的网格分辨率,但数据的真实分辨率和精度仍有欠缺。例如,ASCAT 原始后向散射测量的分辨率约为 10 km×25 km,改进算法开发的高分辨率风场的真实分辨率约为 17 km,距风场离岸最近的距离约为 20 km。

中法海洋卫星 (Chinese-French Oceanography Satellite, CFOSAT) 搭载的微波散射计 (CFOSAT Scatterometer, CSCAT) 是目前原始空间分辨率最高

的散射计,其后向散射测量的分辨率可达 10 km×12.5 km,并且可以通过重新配置星上信号处理查找表进一步提高俯仰方向的空间分辨率^[10-11]。林文明等^[12]开发了一种通过条带组合的方式将 L1B 级高分辨率数据组合到相应的风向矢量单元中的方法,以实现海面风场反演的快速预处理。研究^[12]表明 CSCAT 的近海岸风场具有较好的一致性,本文为开展台风遥感监测研究提供了新的数据基础。

1 近海岸风场遥感

1.1 CSCAT 简介

中法海洋卫星是由中法两国联合研制、用于探测海面波浪谱和海洋风场的国际合作卫星,也是我国海洋卫星系列的重要组成部分。卫星有效载荷包括海浪波谱仪 (surface wave investigation and monitoring, SWIM) 和微波散射计 (scatterometer, SCAT)^[13-14]。中法海洋卫星所搭载的微波散射计首次采用了旋转扇形波束扫描体制,具有如下优点^[15]:

- (1) 同一时间可获取海面多角度后向散射信息;
- (2) 可同时对俯仰向和方位向的后向散射系数进行连续观测;
- (3) 同一时间获得的后向散射系数独立样本数较多;
- (4) 天线低转速扫描有利于获得更高的方位向后向散射测量数据冗余,通过分辨率增强处理技术可进一步提高测量单元的空间分辨率。

国家卫星海洋应用中心负责 CSCAT 数据的接收、处理与分发。自 2018 年 10 月卫星发射以来, CSCAT 的地面处理系统经过了多次升级。经国内外多家单位联合评估,目前该散射计标准风场产品 (25 km 网格分辨率) 的风速精度优于 $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、风向精度优于 20° , 总体风场质量达到国际先进水平^[16]。这为进一步开发高质量的近海岸高分辨率海面风场奠定了基础。

1.2 近海岸风场反演

目前已有的近海岸高分辨率风场反演算法都

难以同时满足离岸更近与高精度两个要求。例如：基于图像重构技术的高分辨率风场反演算法可生产离岸 10 km 以内的风场产品,但由于重构后高分辨单元的测量误差较大,反演获取的风场无论是风速还是风向误差,都明显大于标准 25 km 分辨率的风场产品,在应用方面有很大的局限性^[6];ASCAT 的近海岸风场产品是通过减小后向散射测量的平均窗口尺寸来实现的^[8],虽然它具有与标准产品近似的反演精度,然而其高分辨率风场产品的真实分辨率(约为 17 km)明显大于网格分辨率。中法海洋卫星(CFOSAT)搭载的微波散射计(CSCAT)具备最高原始空间分辨率的产品,因此采用条带组合的方式可以将后向散射系数产品中高分辨率的数据组合到相应的风矢量单元中去^[13],这样就可以生产出既接近海岸线,又具有高精度的近海岸高分辨率风场产品。

由于 CSCAT 原始测量的空间分辨率约为 10 km×12.5 km,近海岸风场处理的网格分辨率设定为 12.5 km×12.5 km。海面风场处理流程包括:后向散射系数预处理、最大似然估计风场反演、风场模糊解去除、质量控制等。近海岸产品的反演流程与卫星散射计标准产品的反演流程基本一致,所不同的是前者在进行雷达后向散射系数预处理时需要在近海岸区域尽可能多地保留海洋后向散射测量信息,从而使反演获得的风场更接近海岸线。

预处理流程如下所述。首先,输入 CSCAT 一级数据(LIB),将 CFOSAT 散射计的观测剖面沿着交轨和顺轨方向进行网格划分,并按顺序赋予它们行号和列号。接着,确定每个条带在网格中的行号和列号,对每个条带进行地理位置定位,确定它们是否位于海面并且离岸距离小于 7.5 km,如果确定的话,则将它们进行条带平均。条带平均就是将具有相似的入射角和方位角的雷达后向散射系数所在的条带网格进行算术平均,从而获得该视角的风场观测信息。

CFOSAT 微波散射计近海岸海面风场产品反演使用的是与标准海面风场产品一样的最大似然估计法(maximum likelihood estimation, MLE),其代价函数写作:

$$f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(\sigma_{m,i}^0 - \sigma_{s,i}^0)^2}{\text{var}(\sigma_i^0)} \quad (1)$$

其中: N 表示观测视角的个数, N 的值为 4~16; $\sigma_{m,i}^0$ 是第 i 个视角测量的雷达后向散射系数, $\sigma_{s,i}^0$ 是通过 Ku 波段散射计地球物理模式函数(geophysical

model function, GMF)仿真的第 i 个视角的后向散射系数; $\text{var}(\sigma_i^0)$ 表示第 i 个视角雷达后向散射系数的测量方差。这里使用的 GMF 是荷兰皇家气象研究所改进的 NSCAT-4 模型^[17]。风场反演就是通过 GMF 寻找一组 $(\sigma_{s,i}^0)$,使等式(1)最小化,其对应的风场称为反演的模糊解,等式(1)的值称为残差。具体而言,将每个风矢量单元的风场模糊解个数设为 144(间隔 2.5°),对于每个风向值,寻找一个能够使式(1)最小的风速值,这样该风速与风向即构成一个模糊解。每个模糊解对应的残差表示该模糊解是真实解的概率,残差值越大表示该模糊解是真实解的概率就越小。

最后,利用二维变分分析去模糊法实现风向去模糊。给定的一组散射计观测数据 \mathbf{x}_o^k (\mathbf{x} 表示向量, k 表示第 k 个模糊解)和背景风场矢量 \mathbf{x}_b ,通过寻找目标函数的最小值来获得变分分析风场矢量 \mathbf{x} 。

$$\min[J(\mathbf{x}_o^k, \mathbf{x}, \mathbf{x}_b)] = J_o(\mathbf{x}_o^k, \mathbf{x}) + J_b(\mathbf{x}) \quad (2)$$

其中, J_o 和 J_b 分别表示观测值与背景风场值^[18],最终选择最接近变分分析风场的风向模糊解作为反演的风向解。

1.3 近海岸风场验证

对 CSCAT 近期两种版本的数据(3.0 版本和 3.2 版本)、QuikSCAT 以及 ASCAT 散射计近海岸海面风场的反演数据进行统计分析。其中 CSCAT3.0 版本和 3.2 版本散射计使用的统计数据来自 2019 年 3 月的观测数据,QuikSCAT 散射计使用的统计数据来自 2009 年 3 月的观测数据,而 ASCAT 散射计使用的统计数据来自 2009 年 4 月的观测数据。由于这 4 个散射计的运行时间明显不同,所以无法通过直接匹配的方式来将四者进行交叉对比。因此,将这 4 个散射计的海面风场统计数据分别与数值天气预报模式的背景风场进行一一对比,以此来间接分析不同散射计的近海岸风场的统计特征。

图 1 展示了离岸 150 km 范围内,ASCAT、QuikSCAT 以及 CSCAT 的风速相对于背景风场风速的标准差和偏差随着离岸距离变化的趋势。整体而言,4 种数据的偏差和标准差都随着离岸距离的减小而增大。CSCAT3.2 版本的风速偏差和风速标准差小于 3.0 版本的统计结果,因此 CSCAT3.2 版本风场数据精度较高。ASCAT 的风速标准差一直呈下降趋势,而其余三种产品在当离岸距离小于 20 km 时,风速标准差才会显著上升。QuikSCAT 散射计风速标准差最大,但是当离岸距离大于 10 km

时, QuikSCAT 散射计存在负偏差, 可能是 QuikSCAT 散射计在进行近海岸风场数据的定标处理时存在后向散射系数的偏差。当离岸距离大于 40 km 时, 4 种产品的风速标准差和风速偏差都具有较好的一致性和精度, 但是随着离岸距离的减小, 这项指标都显著下降。出现这种情况大概有以下两种原因:

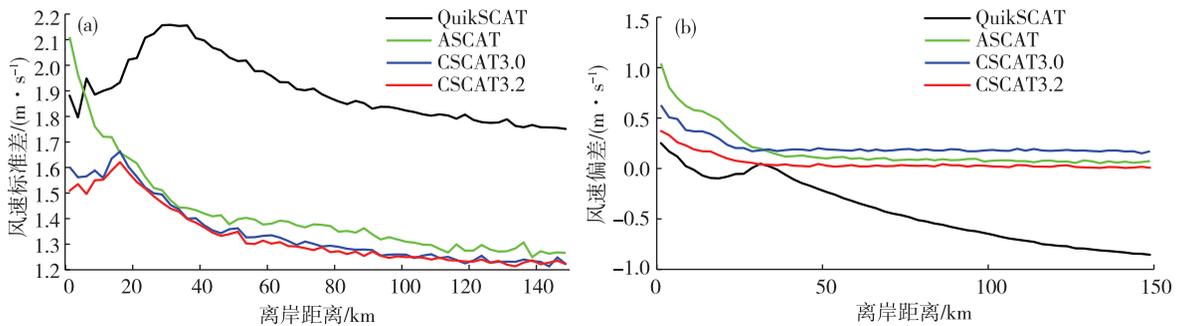


图 1 海岸区域 QuikSCAT 散射计(黑色曲线)、ASCAT 散射计(绿色曲线)、CFOSAT 散射计 3.0 版本(蓝色曲线)以及 CFOSAT 散射计 3.2 版本(红色曲线)的风速统计特征(a.风速标准差,b.风速偏差)

Fig.1 Statistical characteristics of wind speed by QuikSCAT (black curve), ASCAT (green curve), CFOSAT scatterometer version 3.0 (blue curve), and CFOSAT scatterometer version 3.2 (red curve) in coastal areas (a. standard deviation of wind speed, b. bias of wind speed)

2 海岸风场应用

CFOSAT 微波散射计近海岸风场产品于 2020 年 6 月正式发布, 随即在国家卫星海洋应用中心汛期台风遥感监测的服务保障工作中提供了大量及时、准确、精细的信息。用户可通过 <https://osdds.nsoas.org.cn/> 网址获取近海岸数据, 截止到 2021 年 9 月 30 日, CSCAT 近海岸风场产品已监测到 2020 年、2021 年共计 25 个台风, 制作专题图 65 张, 为汛期防灾减灾提供了信息支持。

2020 年 8 月 27 日, 第 8 号台风“巴威”在朝鲜平安北道沿海登陆, 登陆时中心附近最大风力 12 级^[19-20]。图 2 是 CFOSAT 微波散射计在 8 月 26 日“巴威”登陆前捕捉到的信息, 专题图以颜色棒与风向箭头的形式直接展示了台风的整体结构, 并给出了台风中心位置、台风强度、七级与十级风半径, 以及最大风速等定量信息。中央气象台于 8 月 26 日 18 时(UTC 10 时)发布的台风信息中显示, 台风中心位置为 34.6°N, 124.4°E, 与卫星监测结果一致; 七级风半径为东北 200 km, 东南 250 km, 西南 150 km, 西北 180 km; 十级风半径为 100 km; 七级风与十级风半径与卫星监测结果差异较大。CSCAT 风场产品在卫星运行期间, 经国内外业务机构、科研院所验证, 其所测风速精度小于 $1.5 m \cdot s^{-1}$ ^[11], 卫星

(1) 由于现有的散射计地理位置精度较低, 导致在预处理阶段错误地将某些非近海岸风场数据以及受陆地污染的数据纳入有效数据中。(2) 迄今为止, 近海岸风场反演的质量控制还是一种基于反演残差的经验方法, 并没有专门的阈值优化方法来剔除异常的雷达后向散射系数。

遥感监测专题图中给出的风圈半径值是根据落入七级风与十级风风速范围的风矢量单元中心距离台风中心位置计算得出的。需要注意的是, 卫星遥感监测获取的风圈半径与中央气象台发布的台风风圈半径通常差异较大, 主要原因是: 首先, 卫星散射计风场数据表征的是 $12.5 km \times 12.5 km$ 范围内海面 10 m 高度的风场, 该空间尺度与气象预报模式的尺度有较大的差异; 其次, 台风往往伴随着强降雨, 会影响 Ku 波段散射计风场的质量。如何科学对比不同空间尺度的数据特征, 有效提高台风降雨条件下的风场反演质量是当前散射计风场遥感面临的重大挑战, 不在本文讨论范围之内。尽管如此, 专题图给出的风圈半径还是能够反映台风的影响范围, 对于海洋气象灾害短时临近预报仍有重要的意义。

由 CSCAT 近海岸产品制作的遥感监测专题图(图 2)可以看出, 在台风即将登陆前, 依然可以完整地解译出台风的风速风向信息, 提供准确的台风中心位置, 以及更精确的台风强度, 离岸距离从图中来看也已没有明显的缝隙, 非常靠近海陆边界线。

图 3 是应用 ASCAT 微波散射计近海岸产品制作的台风“巴威”遥感监测专题图。与图 2 相比, ASCAT 近海岸产品离岸距离相比 CSCAT 稍远, 另

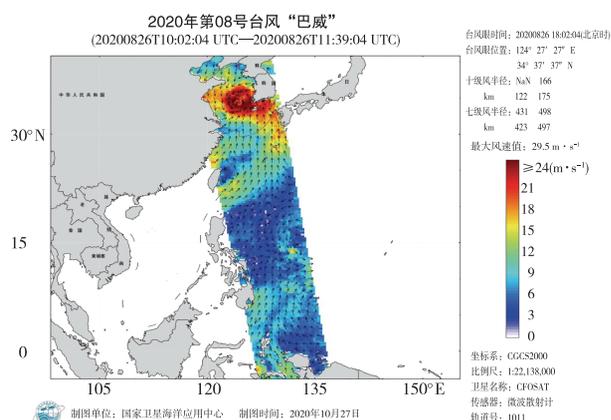


图2 CSCAT近海岸产品观测到的第8号台风“巴威”(2020年8月26日)

Fig.2 Typhoon Bavi observed by CSCAT coastal product (26 August 2020)

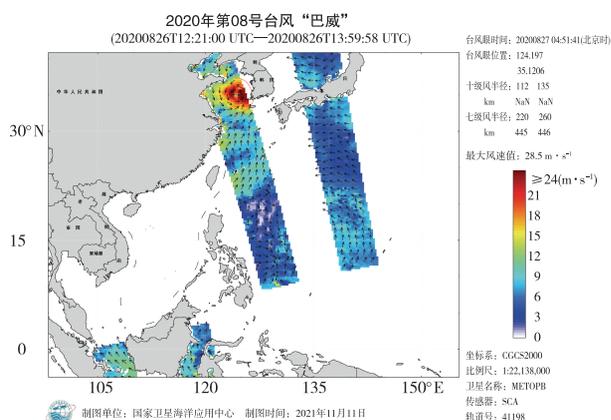


图3 ASCAT近海岸产品观测到的第8号台风“巴威”(2020年8月26日)

Fig.3 Typhoon Bavi observed by ASCAT coastal product (26 August 2020)

外,因扫描幅较窄,未能覆盖台风的整体结构,因此风圈半径数值较CSCAT差异较大。

2020年10月8日,由CFOSAT微波散射计近海岸产品制作的2020年第14号台风“灿鸿”监测专题图(图4)可以看出,台风“灿鸿”已移动至日本附近海域。“台风眼”清晰可见,最大风力已达12级,最大风速为 $29.9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。中央气象台在2020年10月9日05时(UTC 8日21时)发布的台风信息中显示,台风中心位置为 $30.1^{\circ}\text{N}, 133.5^{\circ}\text{E}$,与卫星监测结果一致;七级风半径为东北300 km,东南300 km,西南270 km,西北320 km;十级风半径为60 km;与图2类似,七级风与十级风半径仍与卫星监测结果差异较大。

图5是应用CSCAT标准网格产品制作的台风

“灿鸿”遥感监测专题图。与图4相比,标准产品的专题图在陆地附近有明显缝隙,台风中心尽管也清晰可见,但相对于近海岸产品来说,还是稍有逊色。

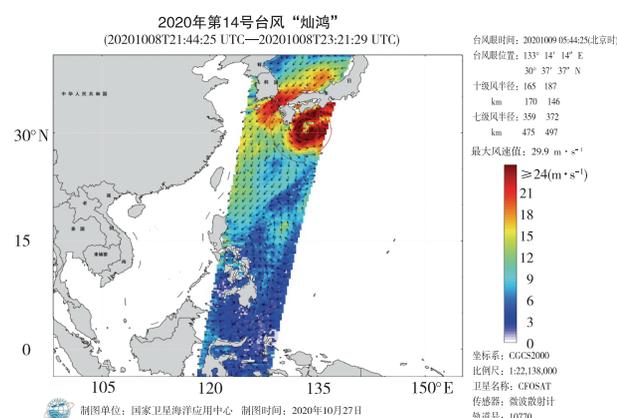


图4 CSCAT近海岸产品观测到的第14号台风“灿鸿”(2020年10月8日)

Fig.4 Typhoon Chan-hom observed by CSCAT coastal product (8 October 2020)

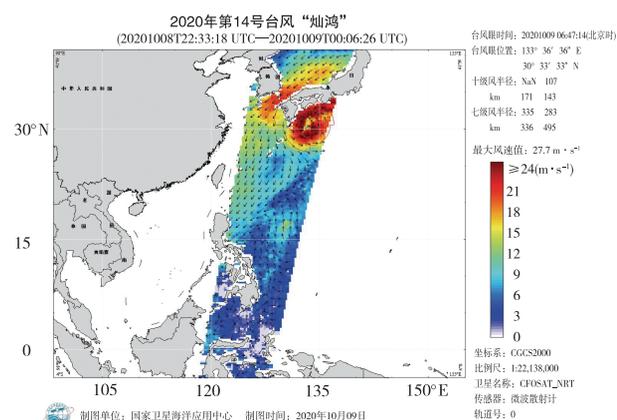


图5 CSCAT标准产品观测到的第14号台风“灿鸿”(2020年10月8日)

Fig.5 Typhoon Chan-hom observed by CSCAT standard product (8 October 2020)

图6是应用ASCAT微波散射计近海岸产品制作的台风“灿鸿”遥感监测专题图。与图4相比,ASCAT近海岸产品离岸距离相比CSCAT稍远。

相比于标准产品,近海岸产品在台风灾害的监测中,尤其是在即将登陆的台风监测中,近海岸风场产品可以用更高的空间分辨率描绘更多台风的细节信息,给出更细致的台风监测信息。相比于融合风场产品,近海岸产品具有更高的时效性,并且可保留更多真实的风场信息,能够为海洋防灾减灾提供更及时、更准确的信息支持。

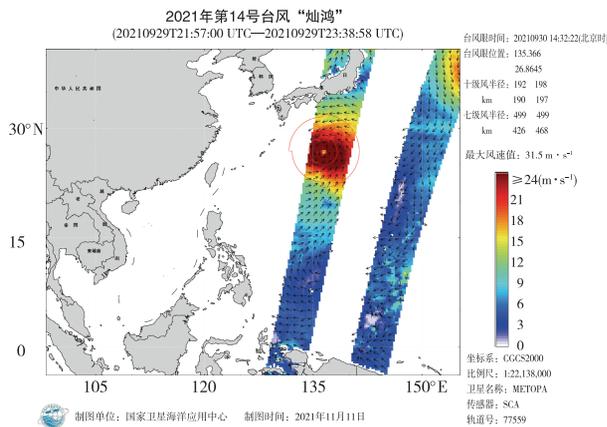


图6 ASCAT近海岸产品观测到的第14号台风“灿鸿”(2020年10月8日)

Fig.6 Typhoon Chan-hom observed by ASCAT coastal product (8 October 2020)

3 总结与展望

CFOSAT微波散射计是世界上第一个在轨运行的扇形波束旋转扫描散射计,它新颖的观测体制可以通过对海面同一风单元进行多入射角、多方位角的观测积累丰富的观测样本,另一方面,CFOSAT微波散射计具有高空间分辨率的原始分辨单元,新体制为近海岸产品的开发提供了机遇。

本文基于2020年新发布的CSCAT近海岸产品在台风遥感监测中的应用,对近海岸高分辨率风场产品生产的预处理、处理流程进行了简要介绍,预处理主要采用了条带组合的方法,风场反演时采用了多模糊解与二维变分分析相结合的方法。因此,近海岸风场数据具备离岸近与精度高的双重优势。文中还解译了2020年汛期监测到的典型台风,台风遥感监测专题图展示了近海岸产品在台风监测,尤其是台风即将登陆时的监测方面具有更明显的观测优势。近海岸产品充分发挥了扇形波束旋转扫描体制观测样本数多与原始空间分辨率高的优势。未来将在目前研究的基础上,继续提高CSCAT原始分辨单元的定位精度,并优化近海岸数据预处理中条带组合平均的窗口设计,从而继续提高近岸海域的风场数据质量。

近年来,以自主海洋卫星为主导的海洋卫星观测体系已逐步建立,在海洋防灾减灾、海洋资源开发、气候变化、海洋环境保护等方面对海面风场等海洋动力环境要素的要求也日益提高。高精度、高时间与空间分辨率日渐形成了新的观测需求,我国海洋卫星台风遥感监测服务正以天地协调、布局合

理、内容翔实、功能完善、产品丰富、信息共享、服务高效为目标,覆盖我国近海、兼顾全球,以产品多样化、数据标准化、服务高效化、推送人性化为重点,通过积极开发卫星新产品,不断提高海洋灾害预警的准确性与时效性,有效实施海洋灾害监测,为保护海洋环境、国民经济建设提供服务。

致谢:本文使用的CSCAT近海岸风场数据由国家卫星海洋应用中心提供,ASCAT近海岸风场数据由欧洲气象卫星开发组织(European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites, EUMETSAT)海洋与海冰卫星应用设施(Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility, OSI-SAF)提供,QuikSCAT近海岸风场数据由海洋学数据分发存档中心(Physical Oceanography Distributed Active Archive Center, PODAAC)提供。CSCAT近海岸风场数据通过中国海洋卫星数据服务系统 <https://osdds.nsoas.org.cn/> 获取,ASCAT与QuikSCAT通过 <https://podaac-tools.jpl.nasa.gov/drive/> 网址获取。感谢上述数据共享网站为本研究提供的所需数据。

参考文献:

- [1] JOHNSON J, WILLIAMS L, BRACALENTE E, et al. Seasat-A satellite scatterometer instrument evaluation[J]. IEEE J Oceanic Eng, 1980, 5(2): 138-144.
- [2] TSAI W Y, GRAF J E, WINN C, et al. Postlaunch sensor verification and calibration of the NASA scatterometer [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 1999, 37(3): 1517-1542.
- [3] 王新,唐世浩,曹治强.风云气象卫星“一带一路”热带气旋监测能力与最新进展[J].海洋气象学报, 2020, 40(2): 10-18.
- [4] FIGA-SALDAÑA J, WILSON J J W, ATTEMA E, et al. The advanced scatterometer (ASCAT) on the meteorological operational (Metop) platform: a follow on for European scatterometers [J]. Can J Remote Sens, 2002, 28(3): 404-412.
- [5] BHOWMICK S A, KUMAR R, KUMAR A S K. Cross calibration of the OceanSAT-2 scatterometer with QuikSCAT scatterometer using natural terrestrial targets [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2014, 52(6): 3393-3398.
- [6] LONG D G, LUKE J B, PLANT W. Ultra high resolution wind retrieval for SeaWinds [C]// 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Toulouse: IEEE, 2003: 1264-1266.

- [7] FORE A, STRUB T, JAMES C, et al. Evaluation of coastal scatterometer products [R]. Sapporo: Present at the International Ocean Vector Winds Science Team Meeting, 2016.
- [8] VERHOEF A, PORTABELLA M, STOFFELEN A. High-resolution ASCAT scatterometer winds near the coast [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2012, 50 (7): 2481-2487.
- [9] VOGELZANG J, STOFFELEN A. ASCAT ultrahigh-resolution wind products on optimized grids [J]. *IEEE J-STARS*, 2017, 10(5): 2332-2339.
- [10] LIN W M, DONG X L, PORTABELLA M, et al. A perspective on the performance of the CFOSAT rotating fan-beam scatterometer [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2019, 57(2): 627-639.
- [11] LIU J Q, LIN W M, DONG X L, et al. First results from the rotating fan beam scatterometer onboard CFOSAT [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2020, 58 (12): 8793-8806.
- [12] 林文明, 郎姝燕, 赵晓康, 等. 中法海洋卫星散射计近海岸海面风场反演研究 [J]. *海洋学报*, 2021, 43(10): 115-123.
- [13] 刘建强, 蒋兴伟, 王丽丽, 等. 中法海洋卫星工程与应用 [J]. *中国科技成果*, 2020, 21(15): 11-12, 14.
- [14] HAUSER D, TISON C, AMOIT T, et al. SWIM: the first space borne wave scatterometer [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2017, 55(5): 3000-3014.
- [15] 郎姝燕, 林文明. 星载微波散射计两种体制的比较 [J]. *海洋技术学报*, 2017, 36(1): 19-23.
- [16] 董晓龙, 朱迪, 林文明, 等. 中法海洋卫星微波散射计在轨性能验证 [J]. *空间科学学报*, 2020, 40(3): 425-431.
- [17] KNMI Scatterometer Team. NSCAT-4 geophysical model function [EB/OL]. (2020-09-15) [2020-09-10]. http://projects.knmi.nl/scatterometer/nscat_gmf/.
- [18] VOGELZANG J, STOFFELEN A, VERHOEF A, et al. Validation of two-dimensional variational ambiguity removal on SeaWinds scatterometer data [J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 2009, 26(7): 1229-1245.
- [19] 朱爱军, 胡秀清, 林曼筠, 等. 风云三号 D 气象卫星全球数据获取方法及数据分发 [J]. *海洋气象学报*, 2018, 38(3): 1-10.
- [20] 周冠博, 董林, 王海平, 等. 2020 年西北太平洋和南海台风活动概述 [J]. *海洋气象学报*, 2021, 41(1): 1-10.