

穆博,郎姝燕,卫然,等.中法海洋卫星微波散射计真实性检验技术体系构建[J].海洋气象学报,2024,44(4):38-45.  
MU Bo, LANG Shuyan, WEI Ran, et al. Validation technology for CSCAT: system construction [J]. Journal of Marine Meteorology, 2024, 44(4): 38-45. DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20240516001. (in Chinese)

## 中法海洋卫星微波散射计真实性检验技术体系构建

穆博<sup>1,2</sup>, 郎姝燕<sup>1,2</sup>, 卫然<sup>1,2</sup>, 孙从容<sup>1,2</sup>, Deborah Hazan<sup>3</sup>

(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重点实验室, 北京 100081; 3. 法国国家空间研究中心, 法国 图卢兹 31401)

**摘要** 中法海洋卫星(China-France Oceanography SATellite, CFOSAT)是国际首次用于联合探测海面风场和波浪谱的科学观测卫星,搭载的微波散射计(CFOSAT SCATterometer, CSCAT)是国际上首次采用扇形波束旋转扫描体制的星载微波散射计,相比笔形波束旋转扫描体制,这种新体制可以实现海表同一面元的多入射角观测,观测样本数相比笔形波束体制更多,因而具备更高精度海面风场的观测能力。基于CSCAT产品业务化真实性检验相关工作的总结基础,结合卫星管理部门对卫星遥感产品检验体系的认识,针对CSCAT的载荷特性,提出一种卫星管理部门、数据用户、科研学者三方相互协作的、业务化评估和科学评估相结合的风场产品真实性检验技术体系,有助于卫星遥感产品的质量提升和观测技术及检验技术的发展。此外,面向业务化的检验技术体系有助于全面地、系统性地评价与监测CSCAT载荷的测量性能,支撑载荷性能优化以及反演算法改进;同时也可以帮助CSCAT产品用户更全面地了解其海面风场产品的精度特性,促进CSCAT海面风场产品的定量化应用。

**关键词** 中法海洋卫星(CFOSAT);微波散射计;中法散射计(CSCAT);海面风场;真实性检验  
**中图分类号**: V474; TP722.6 **文献标志码**: A **文章编号**: 2096-3599(2024)04-0038-08  
**DOI**: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20240516001

## Validation technology for CSCAT: system construction

MU Bo<sup>1,2</sup>, LANG Shuyan<sup>1,2</sup>, WEI Ran<sup>1,2</sup>, SUN Congrong<sup>1,2</sup>, Deborah Hazan<sup>3</sup>

(1. National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081, China; 2. Key Laboratory of Space Ocean Remote Sensing and Applications, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China; 3. Centre National d'Études Spatiales (CNES), Toulouse 31401, France)

**Abstract** The China-France Oceanography SATellite (CFOSAT) firstly makes joint observations of ocean surface wind vector and wave spectrum in the world. The CFOSAT SCATterometer (CSCAT) onboard adopts a new observation scheme of Ku-band fan-beam rotary scanning system, and can measure more incidence angles of the same wind vector cell and obtain more observation samples in contrast with the pencil-beam rotary scanning system. So, CSCAT could improve the wind product precision. Based on the summary of the work related to the operational-oriented validation of CSCAT and the satellite management department's understanding of the validation system for satellite remote sensing products, a validation technology system for CSCAT wind products is presented in terms of CSCAT's loading

收稿日期: 2024-05-16; 修回日期: 2024-07-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3101502)

第一作者简介: 穆博, 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事海洋微波遥感器辐射定标及真实性检验工作, mubo@mail.nsoas.gov.cn。

通信作者简介: 郎姝燕, 女, 硕士, 副研究员, 主要从事海面风场反演与应用工作, langshuyan@mail.nsoas.gov.cn。

characteristics. The system, including operational-oriented evaluation and scientific-oriented evaluation, is jointly implemented by the satellite management department, data users, and scientific researchers, which helps improving the quality of satellite remote sensing products and the development of observation and validation technologies. Also, the operational-oriented technology system is helpful to comprehensively and systematically evaluate and monitor the measurement performance of CSCAT, and could support for optimizing the instrument's performance and improving the wind retrieval algorithm. At the same time, the validation technology system can also help CSCAT product users to more comprehensively understand the accuracy characteristics of wind field products and promote the quantitative application of CSCAT wind field products.

**Keywords** China-France Oceanography SATellite (CFOSAT); microwave scatterometer; CFOSAT SCATterometer (CSCAT); sea surface wind field; validation

## 引言

海面风场是海洋学和气象学研究的基础要素之一,对于海气相互作用、海洋动力学、风能评估<sup>[1]</sup>等研究非常重要。自1978年国际上第一个微波散射计 SASS(Seasat-A Satellite Scatterometer)成功发射以来,美国、欧洲、日本、印度和中国都相继发射了可用于全天候观测全球海面风场信息的星载微波散射计<sup>[2]</sup>。当前,微波散射计观测得到的海面风场数据已成为台风灾害监测、数值天气预报、气候预报、海气相互作用等研究领域不可或缺的重要数据源之一。

为提高星载微波散射计反演海面风场的精度,中法海洋卫星(China-France Oceanography SATellite, CFOSAT)搭载的微波散射计(SCATterometer,简记为“CSCAT”)在国际上首次采用了扇形波束旋转扫描的观测体制,这种新的观测体制可以获取海表的多人射角的后向散射信息,同一面元的观测样本数也更多,更多的差异化信息和样本数使得CSCAT具备更高精度海面风场的反演能力<sup>[3-6]</sup>。由散射计的测量原理可以看出,CSCAT反演风场不可避免地存在测量误差,因此国内外学者针对星载微波散射计的海面风场产品开展了广泛的检验技术研究,但大都关注风场精度评价的某一特性或某一环节,比如空间匹配技术<sup>[7]</sup>、误差评价技术<sup>[8-9]</sup>、降雨条件下的精度特性<sup>[10]</sup>、近岸产品精度<sup>[11]</sup>、空间分布特征<sup>[12]</sup>、固有误差特征<sup>[13]</sup>、海表环境参数影响<sup>[14]</sup>等。文中针对CSCAT的载荷特性,提出一种全面的、业务化的风场产品真实性检验技术体系,该体系有助于全面地、系统性地评价与监测CSCAT载荷的测量性能,支撑载荷性能优化以及反演算法改进;同时,也可以帮助CSCAT产品用户更全面地了解其海面风场产

品的精度特性,促进CSCAT海面风场产品的量化应用。

## 1 海面风场遥感及真实性检验

### 1.1 CSCAT简介

CFOSAT由中国和法国联合研制,是用于联合探测海面风场和波浪谱的国际最新的科学观测卫星。中国负责提供卫星运载、发射、测控、平台和CSCAT,法国负责SWIM(Surface Wave Investigation and Monitoring)波谱仪的研制。另外,CSCAT和SWIM均是国际上首次上星的新型体制的主动微波遥感载荷。

CSCAT首次采用扇形波束旋转扫描体制,其原始测量后向散射系数的空间分辨率约为 $10.0\text{ km}\times 12.5\text{ km}$ ,采用条带组合的方式,将后向散射系数组合到中高分辨率的风矢量单元中,进而生产2种空间分辨率的海面风场产品<sup>[15]</sup>,即 $25.0\text{ km}$ 标准产品和 $12.5\text{ km}$ 近岸产品。这2种分辨率的风场反演处理流程基本相同,都包括后向散射系数预处理、最大似然估计(maximum likelihood estimation, MLE)风场反演、二维变分分析去除模糊解、质量控制等<sup>[11,15]</sup>。不同的是,近岸产品在后向散射系数预处理过程中尽可能地保留了海洋表面的观测信息,进而获取更为接近海岸线的风场产品。由CSCAT观测机制可以看出,近岸产品风矢量单元中的数据样本数明显小于标准产品的样本数,理论上近岸产品的噪声要大于标准产品。从应用的角度看,近岸产品可以大大提高卫星在接近岸线海域的风场获取能力,应用价值更高。

相比笔形波束旋转扫描体制微波散射计,CSCAT的最大差异和特点是笔形波束天线升级为扇形波束天线,优势是可以获取到更多入射角的

观测信息;但是,由于扇形波束天线的尺寸更大、重量更重,且天线峰值增益相对较小,因而 CSCAT 的设计、研制和加工的技术难度更大。因此,CSCAT 海面风场产品真实性检验必须包含与载荷观测体制相关的特征精度评价,图 1 给出了 CSCAT 扇形波束旋转扫描观测几何示意图。

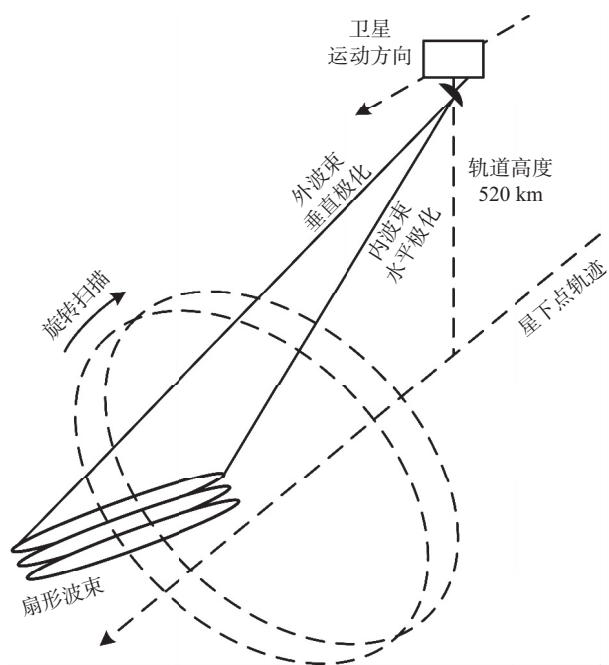


图 1 CSCAT 扇形波束旋转扫描观测几何示意图  
Fig.1 Measurement geometry of CSCAT fan-beam rotary scanning system

## 1.2 海面风场物理尺度特性

微波散射计直接测量的是海表的后向散射系数,与海面粗糙度大小相关;其定量反演的海面风场实际上是物理尺度空间瞬时平均的、假定表层大气层结稳定条件下的、海面 10 m 高度处的风速和风向<sup>[7]</sup>。现场测量的风速通常都是空间单点、时间平均、海面某一高度处、具体大气条件下的实际风速和风向。国内外大量研究结果表明,近海面风速随高度的分布近似呈对数规律,同时受大气稳定度与下垫面粗糙度的影响。因此,真实性检验必须解决散射计测量与现场测量风场之间物理尺度不一致的问题,才能精确地实现散射计产品检验的科学评估。

Liu 等<sup>[16]</sup>提出了一种中性稳定风速校正方法,已经广泛应用于散射计风场检验相关研究。近年来,为了进一步提高散射计风场检验的精度,研究<sup>[17]</sup>在现有中性稳定风速校正的基础上,提出了一种应力等效风速的校正技术,使得现场测量或模式

资料海面风速的物理尺度更加接近散射计风速,应力等效风速校正公式如下:

$$U_{10s} = U_{10n} \sqrt{\frac{\rho_{\text{air}}}{\langle \rho_{\text{air}} \rangle}} \quad (1)$$

其中: $U_{10s}$ 表示应力等效风速; $U_{10n}$ 表示中性稳定风速; $\rho_{\text{air}}$ 表示海表空气密度; $\langle \rho_{\text{air}} \rangle$ 表示全球平均的海表空气密度,可以取作常数  $1.225 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

## 1.3 检验源数据及其评估特性

目前,常用的星载卫星微波散射计海面风场检验源数据有 5 种:

(1) 现场测量(浮标、船舶)数据。尽管志愿船或者科考船等海上航行船舶可以获取大量的海面风场现场实测数据,但是,船载自动气象观测站测量精度容易受到船体随波晃动、船体气流扰动等影响<sup>[18]</sup>,且不同船舶安装自动气象观测站的精度及设备维护状态参差不齐,因而船舶海面风场资料目前并没有被广泛地应用到散射计业务化检验中。水文气象浮标观测风场数据是目前国际上公认的最好测量数据,被国内外已发射卫星散射计的业务化检验所采用,是当前星载散射计风场产品精度评价的参考基准<sup>[7,19-20]</sup>。受制于浮标布放及维护成本因素,远离海岸的浮标数量仍然很少,且主要集中在北半球,这些因素制约了浮标对散射计数据精度全面评价的效能。

(2) 同类卫星散射计海面风场数据。当前已发射星载散射计海面风场的空间分辨率大体相当,因而多星散射计海面风场数据之间物理尺度特性一致,这大大降低了物理尺度差异对产品精度评估的影响。但是,由于受卫星轨道限制,满足两者时空匹配的样本数并不多,且大都集中在高纬度海域。另外,星星交叉比对也是多星散射计海面风场订正及联合应用的前提保障。

(3) 星载微波辐射计海面风场数据。微波辐射计也可以观测海面风速,特别是可以实现较为精确的高风速范围的风速测量。缺点是只有全极化微波辐射计可以同时实现海面风速和风向的观测<sup>[21]</sup>。因此,星载辐射计风场数据是台风等极端海况条件下散射计风场精度评价不可或缺的重要补充数据源。

(4) 模式资料。模式资料尽管不是严格意义上的现场实测数据,但模式资料生产过程融合了很多现场实测资料,且在中高尺度应用领域,模式资料同样具有较好的数据精度,已经被广泛应用于各种资

料的精度评估<sup>[22-24]</sup>。模式资料物理尺度意义上的空间分辨率不高,一般认为在 100 km 左右,但模式资料具有非常好的全球覆盖特性,可以实现散射计任意时刻观测风场的精度评价和异常识别。此外,稳定运行的模式资料,在散射计长期观测性能稳定性评估方面也发挥着重要作用。

(5)融合风场资料。随着国际上在轨卫星散射计数量的增多,为了保障和促进多源卫星数据的联合量化应用,基于多源卫星交叉订正技术和融合技术,国内外已经生产了多个融合风场产品。例如,美国 RSS (Remote Sensing Systems) 公司生产的 CCMP (Cross Calibrated Multi-Platform) 融合风场数据<sup>[25]</sup>、国家卫星海洋应用中心的全球海面风场融合产品。需要注意的是,用作检验源的融合产品资料的输入数据中应该不包括被检验的散射计数据,否则会影响风场评估结果的独立性和可信度。

## 2 真实性检验技术体系构建

### 2.1 检验源数据

考虑到当前检验源数据的精度被学界认可的程度、数据源获取的稳定可靠程度,CSCAT 产品真实性检验技术体系选用现场浮标、同类卫星散射计、星载微波辐射计、模式资料和风场融合产品,详细描述如下:

(1)现场浮标。以国际上被广泛认可的、离岸 25.0 km 以外的美国国家数据浮标中心 (National Data Buoy Center, NDBC) 的浮标测量数据作为整体精度的参考基准,浮标站位分布如图 2 所示。国内当前布放的水文气象浮标数量太少,且大都位于近岸海域,不同机构的浮标维护质量参差不齐,数据获取途径不方便,目前仅作为科学评价使用。

(2)同类卫星散射计。包括 ASCAT-B/C (Advanced SCATterometer-B/C) 和国内海洋卫星搭载的 HSCAT-B/C/D (HY-2B SCATterometer-B/C/D),后续将逐步纳入气象卫星搭载的风场测量雷达 (WindRAD) 数据。

(3)星载微波辐射计。星载微波辐射计可以实现海面高风速的观测,是散射计  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以上风速检验的重要数据源之一。当前评价体系采用 WindSAT 全极化微波辐射计。

(4)模式资料。当前 CSCAT 检验技术体系选

用了 2 种,分别是欧洲中期天气预报中心 ERA5 资料和美国国家环境预报中心 (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 的 FNL (Final Operational Global Analysis) 资料 (ds083.3)。ERA5 资料海面风场数据的时间分辨率为 1 h,水平格点空间分辨率为  $0.25^\circ$ ,它还有一个突出优点是同化系统输出了海面 10 m 高度的中性层结稳定风速。FNL 资料由 NCEP 的全球资料同化系统 (Global Data Assimilation System, GDAS) 生产,每天在 00 时 (世界时,下同)、06 时、12 时和 18 时分别生产水平格点空间分辨率为  $1^\circ$  的资料。

(5)融合风场产品。采用美国 RSS 公司生产的 CCMP 融合风场产品,CCMP 的融合数据源包括快速散射计 (Quick SCATterometer, QuikSCAT)、ASCAT-A/B 散射计以及 SSM/I (Special Sensor Microwave/Imager)、SSMIS (Special Sensor Microwave Imager/Sounder)、TMI [Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Microwave Imager]、GMI [Global Precipitation Measurement (GPM) Microwave Imager]、AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS)、AMSR2、WindSAT 微波辐射计数据。

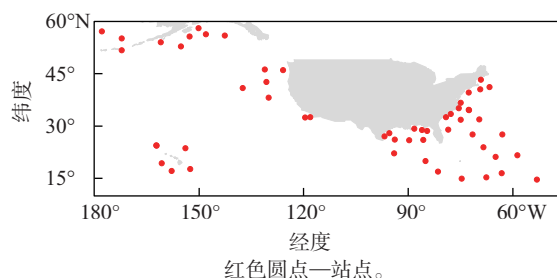


图2 选用 NDBC 浮标的站位分布  
Fig.2 Location of selected NDBC buoys

### 2.2 中性稳定风速校正

选用 2 种中性稳定风速校正方法。如果检验源数据参数齐全,则采用第 1 种校正方法,否则采用第 2 种方法。第 1 种校正方法采用 Liu 等<sup>[16]</sup>的方法,将匹配的 FNL 资料的海面风速转换为海面 10 m 高度处的中性稳定风速。但是,该校正模型需要输入海面的气象参数和温度数据。第 2 种校正方法采用简化的经验校正公式,该方法的优点是无需额外的海表环境参量,业务应用更简便可行。将现场实测风速校正到大气层结稳定条件的海面 10 m 高度处风速的近似计算公式<sup>[8]</sup>如下:

$$U_{10n} = U_z \sqrt{\frac{k^2}{C_d} \ln(z/z_0)} \quad (2)$$

其中： $U_{10n}$ 表示海面10 m的中性稳定风速； $U_z$ 表示在海面高度 $z$ 处实际测量的风速； $k$ 为卡门常数，近似取值为0.4； $C_d$ 是拖曳系数，近似取值为0.0012； $z_0$ 表示粗糙度长度，近似取值为0.000097 m。

### 2.3 地理时空匹配

CSCAT海面风场的标称空间分辨率为25.0 km和12.5 km，为此针对不同类别的检验源数据，采用2种地理时空匹配方式：(1)对于现场浮标、多源卫星之间的时空匹配，采用距离阈值和时间阈值的匹配策略，距离阈值应不大于25.0 km，推荐阈值为“空间分辨率 $\sqrt{2}$ ”；时间阈值应不大于30 min。(2)对于具有规则格点的模式资料等，根据国际上常用的时空匹配

方式，采用二维空间和时间的线性插值，将格点数据插值到所需匹配观测的时间和地理位置。

### 2.4 检验评价体系

根据散射计数据生产评估与科学应用的不同需求，将CSCAT海面风场产品真实性检验评价体系划分为2部分：业务化真实性检验评价体系和科学评价体系(图3)。业务化评价体系主要基于当前广泛采用的成熟技术，选用精度良好、稳定可靠的检验源数据，具备长期连续稳定的业务分析能力，侧重于载荷性能的全面评估以及产品质量的性能监测，服务于卫星数据的生产与分发。科学评价体系的评估内容更加广泛，可以采用最新的检验技术，也可以开展特例研究，侧重于检验评价技术的基础研究，以及卫星数据的典型应用需求等。

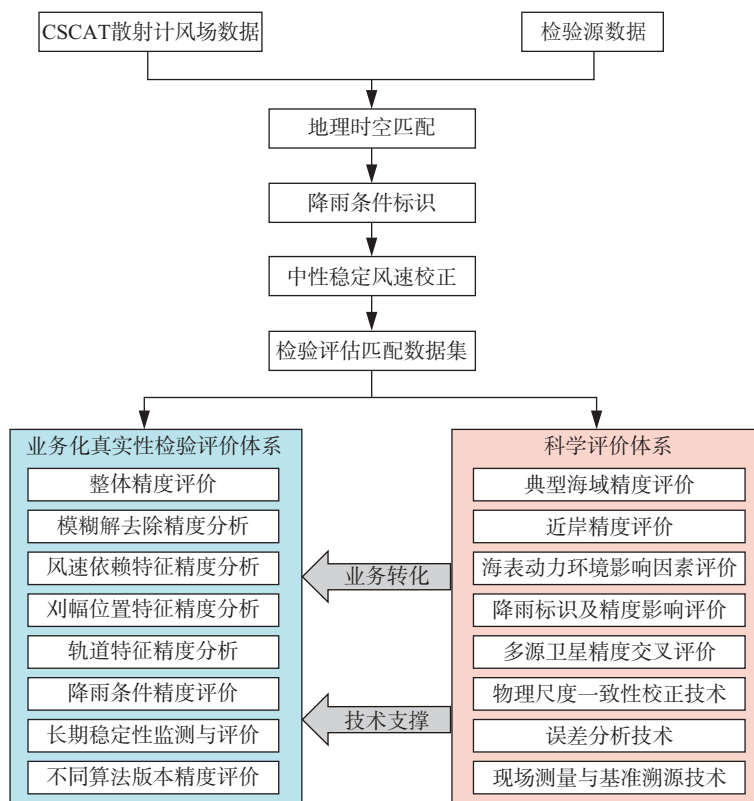


图3 CSCAT业务化真实性检验技术体系

Fig.3 Operational-oriented validation technology system for CSCAT

#### 2.4.1 业务化真实性检验评价体系

根据散射计测风原理及CSCAT的仪器特点，结合当前检验技术的成熟度和认可度，CSCAT业务化真实性检验评价体系包括8个方面，详细描述如下：

(1)整体精度评价。受制于低风速条件下的信

号信噪比太低、高风速条件下的信号饱和，微波散射计无法实现海面风场在全风速范围的有效测量。因此，只能针对散射计的有效测量范围，对其有效反演风矢量进行整体精度检验。SeaWinds和HSCAT-B/C/D散射计测量海面风矢量的研制指标要求为

[3,30]  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,而CSCAT测量风矢量范围的研制指标要求为[4,24]  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ [5]。

(2)模糊解去除能力的精度评价。微波散射计测量海面后向散射系数与“风向”(卫星观测方位角与海面风向之间的夹角,且卫星观测方位角可以精确测量)呈现近似的双余弦函数特征[2]。且在散射计风矢量反演过程中,由于测量数据的噪声污染、模式函数的误差等因素,目标函数通常会计算得到多个模糊解,从多个模糊解中寻找最优解的过程称为模糊解去除,这是散射计反演风场数据处理的关键技术流程。模糊解去除精度对微波散射计最终反演风矢量产品精度至关重要,因此需要评价散射计反演风矢量的模糊解去除精度。

(3)风速依赖特征的精度评价。微波散射计直接测量的是海表的后向散射系数,且海面后向散射系数随着风速的增大而增大。在低风速条件下,海面近似呈镜面状态,后向散射的能量非常小且回波信号的信噪比很低,测量精度显著下降,造成低风速条件下的风场精度下降[2]。目前,国内外微波散射计反演风速范围的研制指标要求都大于 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。另外,随着风速的增大,海面后向散射系数随风速增大的变化率也越来越小,逐渐趋于饱和[2],这也正是目前国内外星载微波散射计都只能有效反演小于 $30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速的原因。因此,需要结合散射计的测量机理与CSCAT的载荷研制特点,针对性地评价CSCAT在不同风速条件下反演风矢量的精度特性。

(4)交轨方向刈幅位置特征的精度评价。CSCAT采用旋转扫描体制,通过天线的扫描和卫星平台的运动,实现对海面同一面元的多方位向观测和全球覆盖观测,且射频信号可能受到旋转关节增益变化的影响,进而造成不同观测方位向之间或者交轨方向不同刈幅位置风矢量面元之间的精度差异。因此,需要开展不同交轨方向风矢量面元位置反演风矢量的精度评价。

(5)轨道特征的精度评价。星载微波散射计在轨运行期间,工作环境温度会受到太阳辐射的影响,导致系统增益产生变化,进而导致后向散射系数的精度变化[26]。因此,结合CFOSAT太阳同步轨道的特点,针对性地开展不同轨道位置风场产品精度的差异,是精细化产品精度评价以及载荷性能评估的

必要流程。

(6)降雨条件精度评价。在降雨条件下,大气中的雨滴会造成微波信号的散射和吸收,同时雨滴也会改变海表的粗糙度特性,进而影响散射计对海面后向散射的测量精度,导致反演风场精度变差。

(7)产品精度的长期稳定性评价。判断一种风场产品的质量好坏,除了要考虑其短周期内的精度水平,也要考虑其精度的长期稳定性。数据精度的长期稳定是气候尺度相关研究对长序列数据精度需求的重要因素之一。

(8)不同算法版本的精度评价。散射计测量及风场反演技术还在不断发展,因此,CSCAT在轨运行期间,可能会对数据处理算法和反演算法进行不断地优化调整,因此不同算法版本的精度比对将是确定算法业务化适用性的关键。

#### 2.4.2 科学评价体系

星载微波散射计通过发射特定频段的微波脉冲信号到海面,精确测量从海面后向散射返回到卫星天线的回波能量,根据雷达方程计算得到海面观测面元的后向散射系数;然后通过对同一面元的多方位向的观测信息,结合地球物理模式函数,反演得到海面风速和风向[2]。因此,科学评价需要涵盖散射计测量机理、观测技术、误差评价等相关的基础性检验技术研究,同时为业务化评价体系提供技术支撑,逐步地将成熟稳定的技术转化到业务化真实性检验评价体系。另外,考虑到微波散射计在典型海域、典型海况等的应用需求,开展相应的真实性检验评价,进一步完善CSCAT检验评价。综上所述,科学评估体系涵盖的评价内容更广泛、更基础,涉及到多学科交叉研究,其技术限制了业务化真实性检验技术的水平,也对微波散射计的技术发展具有重要推动作用。通过梳理散射计数据检验评估的国内外进展,初步归纳出以下8个检验评估内容:

(1)典型海域精度特性评价。根据局部海域的数据用户需求以及评价数据精度的全球空间内分布差异,引出了对典型海域精度特性的评价需求。

(2)近岸精度特性评价。对于CSCAT的近岸产品,区别标准产品的最大特性就是近岸观测数据的覆盖性更好,但近岸产品的精度更易受到影响,需要更为精细化地评估其精度特性。

(3)海表动力环境影响因素特性评价。与散射计观测海面风场的测量机理相关。当前,地球物理模式函数仅仅建立了海表后向散射的最主要因素(海面风场引起的粗糙度变化),实际上,海面有效波高、海面温度等环境因素变化同样会引起后向散射系数变化。但是,当前模式函数仅考虑了海面风场这一主要因素,没有考虑其他因素。因而,从检验内容的全面性以及测量机理的因素考虑,需要开展海表动力环境影响因素特性评价。

(4)降雨标识及其影响因素评价。降雨条件会引起海表后向散射特性变化以及影响微波信号的大气辐射传输,进而使海面后向散射测量产生误差,散射计在反演风场数据中进行了降雨标识,但仍需针对性地开展降雨标识的精度评价,以及降雨对风场测量精度的影响,尤其对台风等恶劣气象条件下的精度提升大有帮助。

(5)多源卫星交叉评价。单个在轨卫星的观测寿命通常小于10年,无法实现气候尺度的观测数据需求。多星观测既可以增加观测的时间分辨率,也可以实现长时间序列的气候尺度数据积累。但是,数据联合应用的前提是要评估多源卫星之间的精度差异,同时开展交叉订正。

(6)物理尺度的一致性校正技术。其与散射计观测海面风场机理相关。由于现场观测与卫星散射计观测之间存在物理尺度的不一致,因而精确的性能评价首先就需要实现两者的一致性校正。这一技术的提高,既有助于提升地球物理模式函数的精度,也有助于增加对海面后向散射机理的理解。

(7)误差分析技术。任何测量都存在误差,包括卫星散射计测量以及现场观测,因此,如何通过携带测量误差的检验源数据实现卫星散射计的精度评价,需要测量学的误差评价技术支撑。误差分析技术的进步,有助于更加精确地评估观测误差,进而实现卫星载荷观测技术的优化改进。比如,三元配准技术(triple collocation technique)就提供了一种分析各自观测数据固有误差的技术途径。

(8)现场测量与基准溯源技术。任何一种测量仪器,都可能存在一定的系统偏差,或者随着长时间的观测,其测量性能存在一定程度的精度漂移。因而,为了保障单星观测数据的基准或者气候尺度数

据的测量基准长期一致性,需要现场测量技术与基准溯源技术的支撑保障。

### 3 总结与讨论

CSCAT是国际上首次上星的扇形波束旋转扫描体制散射计,是一次对微波散射测量技术发展的有益探索。针对CSCAT的技术特点,提出了业务化真实性检验技术体系,对于保障在轨运行期间的遥感产品精度评价与监测、载荷性能评价与跟踪具有重要作用和实用价值,可以有效支撑后续载荷的性能优化以及反演算法改进;通过对CSCAT遥感风场产品不同检验评价特性的分析,也可以让产品用户更加全面地了解CSCAT产品的技术特点,从而在产品应用中进行针对性地数据处理,更好地开展产品的定量化应用。

除CSCAT之外,中国当前有4个在轨运行的散射计,即HSCAT-B/C/D和WindRAD散射计,是国际上在轨卫星微波散射计数量最多的国家,已经逐步建立了以自主海洋卫星为主导的海洋卫星观测体系,数据产品已经在台风监测、气候预报、海洋防灾减灾等领域得到应用。但自主海洋卫星微波散射计数据在国际上的影响力和被认可度还不是很高。因此,基于文中提出的业务化检验技术体系,开展CSCAT的精度评估,通过业务化长期性能监测与异常识别,可以提升分发数据产品的质量,从而逐步推动CSCAT更好地服务于海洋灾害监测和科学研究。

### 参考文献:

- [1] 周钰淇,崔佳乐,孙博雯,等.“21世纪海上丝绸之路”风能资源时空变化评估[J].海洋气象学报,2022,42(4):11-21.
- [2] MARTIN S.海洋遥感导论[M].蒋兴伟,等译.北京:海洋出版社,2008:246-265.
- [3] 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.
- [4] 林文明.星载扇形波束扫描微波散射计系统研究[D].北京:中国科学院研究生院(空间科学与应用研究中心),2011.
- [5] 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.

- [6] 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.
- [7] FREILICH M H, DUNBAR R S. The accuracy of the NSCAT 1 vector winds: comparisons with National Data Buoy Center Buoys [J]. *J Geophys Res: Oceans*, 1999, 104(C5):11231-11246.
- [8] RIBAL A, YOUNG I R. Global calibration and error estimation of altimeter, scatterometer, and radiometer wind speed using triple collocation [J]. *Remote Sens*, 2020, 12(12):1997.
- [9] STOFFELEN A. Toward the true near-surface wind speed: error modeling and calibration using triple collocation [J]. *J Geophys Res: Oceans*, 1998, 103(C4):7755-7766.
- [10] DRAPER D W, LONG D G. Evaluating the effect of rain on SeaWinds scatterometer measurements [J]. *J Geophys Res: Oceans*, 2004, 109(C12):C02005.
- [11] 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.
- [12] HE Y, FANG H, LI X H, et al. Assessment of spatiotemporal variations in wind field measurements by the Chinese FengYun-3E wind radar scatterometer [J]. *IEEE Access*, 2023, 11:128224-128234.
- [13] YANG S, ZHANG L, LIN M S, et al. Evaluation of sea surface wind products from scatterometer onboard the Chinese HY-2D satellite [J]. *Remote Sens*, 2023, 15(3):852.
- [14] YE H J, LI J M, LI B, et al. Evaluation of CFOSAT scatterometer wind data in global oceans [J]. *Remote Sens*, 2021, 13(10):1926.
- [15] 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.
- [16] LIU W T, TANG W Q. Equivalent neutral wind [R]. Pasadena, California: Jet Propulsion Laboratory, 1996.
- [17] DE KLOE J, STOFFELEN A, VERHOEF A. Improved use of scatterometer measurements by using stress-equivalent reference winds [J]. *IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sens*, 2017, 10(5):2340-2347.
- [18] BOURASSA M A, LEGLER D M, O'BRIEN J J, et al. SeaWinds validation with research vessels [J]. *J Geophys Res: Oceans*, 2003, 108(C2):3019.
- [19] EBUCHI N, GRABER H C, CARUSO M J. Evaluation of wind vectors observed by QuikSCAT/SeaWinds using ocean buoy data [J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 2002, 19(12):2049-2062.
- [20] CARUSO M J, DICKINSON S, KELLY K A, et al. Evaluation of NSCAT scatterometer winds using equatorial Pacific buoy observations [M]. Woods Hole, Massachusetts: Woods Hole Oceanographic Institution, 1999.
- [21] MEARS C A, SMITH D K, WENTZ F J. Comparison of Special Sensor Microwave Imager and buoy-measured wind speeds from 1987 to 1997 [J]. *J Geophys Res: Oceans*, 2001, 106(C6):11719-11729.
- [22] CHELTON D B, FREILICH M H. Scatterometer-based assessment of 10-m wind analyses from the operational ECMWF and NCEP numerical weather prediction models [J]. *Mon Wea Rev*, 2005, 133(2):409-429.
- [23] 邹双泽, 白爱娟, 何科, 等. ERA5 资料在蓟州复杂地形下的检验与应用 [J]. *海洋气象学报*, 2024, 44(1):118-128.
- [24] 沈学顺, 李兴良, 陈春刚, 等. 下一代大气模式中的数值方法综述 [J]. *海洋气象学报*, 2022, 42(3):1-12.
- [25] MEARS C A, SCOTT J, WENTZ F J, et al. A near-real-time version of the cross-calibrated multiplatform (CCMP) ocean surface wind velocity data set [J]. *J Geophys Res: Oceans*, 2019, 124(10):6997-7010.
- [26] MU B, ZHANG Y, LIN M S, et al. The gain-related calibration of HY-2B scatterometer using natural targets [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2022, 60:5212911.