

林文明,潘晨阳.多源星载微波散射计海面风场误差分析[J].海洋气象学报,2025,45(3):51-61.

LIN Wenming, PAN Chenyang. Error characterization of sea surface winds from multi-satellite microwave scatterometers[J]. Journal of Marine Meteorology, 2025, 45(3): 51-61. DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20250214001. (in Chinese)

多源星载微波散射计海面风场误差分析

林文明^{1,2}, 潘晨阳¹

(1. 南京信息工程大学海洋科学学院, 江苏 南京 210044; 2. 自然资源部空间海洋遥感与应用重点实验室, 北京 100081)

摘要 目前国内外已有8颗卫星搭载了不同形式的微波散射计,为全球海面风场遥感观测提供了不可或缺的支撑。定量、全面评估这些微波散射计海面风场的误差,是实现多源卫星散射计遥感数据协同优化应用的前提。利用2022年浮标风场和欧洲中期天气预报中心(ECMWF)海面风场,结合两两对比法、柯尔莫哥洛夫谱分析和三元匹配数据分析技术,对我国在轨运行的5颗散射计以及欧洲气象卫星组织的2颗先进散射计(ASCAT)的海面风场资料进行了精度评估。结果表明:(1)所有星载微波散射计海面风场的空间变异性均大于ECMWF风场,表明卫星散射计比ECMWF能够更好地解析中等尺度(小于100 km)海面风场动态变化的特征;(2)三元匹配数据分析不仅可以定量评估匹配数据集中每种数据源的固有误差,还可以用于横向比较不同散射计风场数据的误差特性;(3)总体上,这些散射计海面风场 u 、 v 分量的固有误差为 $0.5\sim 1.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。研究结果可为多源星载微波散射计海面风场资料应用中的误差协方差设置提供重要的依据。

关键词 散射计;海面风场;误差分析;三元匹配数据分析

中图分类号: P732.7 文献标志码: A 文章编号: 2096-3599(2025)03-0051-11

DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20250214001

Error characterization of sea surface winds from multi-satellite microwave scatterometers

LIN Wenming^{1,2}, PAN Chenyang¹

(1. School of Marine Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Key Laboratory of Space Ocean Remote Sensing and Applications, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China)

Abstract To date, there are 8 satellites worldwide carrying various types of microwave scatterometers, providing indispensable support for the remote sensing of global sea surface winds. Quantitative and comprehensive evaluation of the error characteristics of those microwave scatterometer-derived sea surface winds is a prerequisite for the optimal application of multi-satellite wind data. This study conducts quality assessments on the sea surface wind data for 5 Chinese operational scatterometers and two Advanced Scatterometers (ASCAT) from the European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT), using both buoy wind and European Centre for Medium Range Weather Forecasts (ECMWF) data in 2022. The analytical techniques include pairwise comparison, Kolmogorov spectral analysis and triple collocation analysis. The results of spectral analysis are as follows. (1) All spaceborne scatterometers are able to depict more spatial variability compared to the ECMWF data,

收稿日期: 2025-02-14; 修回日期: 2025-03-24

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3104900, 2022YFC3104902); 江苏省高等学校大学生创新创业训练计划项目(XJDC202310300125)

第一作者: 林文明, wenminglin@nuist.edu.cn。

indicating that satellite scatterometers outperform ECMWF in resolving mesoscale (below 100 km) dynamic characteristics over sea surface. (2) The triple collocation analysis method not only enables quantitative evaluation of the inherent errors in each data source within the triple collocated datasets, but also facilitates cross-comparison of error characteristics among different scatterometers' wind products. (3) Overall, the inherent random errors of scatterometer wind u and v components range between 0.5 and $1.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. The results provide crucial references for the error covariance settings in applications utilizing multi-satellite sea surface wind data.

Keywords scatterometer; sea surface wind; error analysis; triple collocation analysis

0 引言

海面风场是海洋表面和大气下垫面的基本变量之一,通过调制海气之间的热通量、水汽通量以及二氧化碳等气体通量影响全球天气和气候。准确、稳定和持续的海面风场遥感观测在现代海洋和大气科学研究与业务应用中具有重要的意义。星载微波散射计是全球海面风场遥感观测最主要的技术手段,具有全天时、全天候、宽刈幅的优点,过去数十年为海洋动力环境监测、海洋气象预报以及海气相互作用研究等提供了不可替代的数据。

当前,在轨运行的星载微波散射计主要有我国的海洋二号(HY-2)系列卫星散射计(HSCAT)、风云三号E星(FY-3E)风场雷达(WindRAD)以及中法海洋卫星(CFOSAT)微波散射计(CSCAT)^[1-3];国外的星载微波散射计则主要有欧洲气象卫星组织的先进散射计(ASCAT)以及印度空间研究组织的海洋三号卫星散射计(OSCAT-3)^[4-5]。这些散射计的信号处理、天线体制以及工作频率与极化不尽相同,因此其遥感反演的海面风场精度难免存在差异。定量、详细地评估在轨多源星载微波散射计海面风场的误差特性,是实现多源卫星遥感海面风场数据协同优化应用的前提。

以往海面风场的误差分析往往是通过对比遥感风场与参考风场[如锚定浮标风力计的风场或数值天气预报(numerical weather prediction, NWP)模式的预报风场]的差异,揭示遥感反演的风速和风向偏离参考风场的程度,并不能客观反映散射计海面风场的绝对误差^[6-9]。一些学者^[10-11]基于两种及以上独立的参考风场,利用三元匹配数据误差分析技术进一步分析了匹配数据集中各种海面风场数据的固有误差特性,表明星载微波散射计的海面风场数据通常具有最高的精度。由于浮标、散射计以及NWP风场的空间分辨率不同,更加细致的误差分析需要把海面风场的代表性误差考虑在内,进而分析

多源海面风场数据在不同空间尺度下的误差特性。

针对各种星载微波散射计海面风场的误差特性已有不少研究,但对不同散射计遥感反演的海面风场数据还没有进行全面深入的横向比较,同时对多源海面风场数据代表性误差的探究较少。因此,利用直接比较法、谱分析以及三元匹配数据分析技术等,在前人研究基础上对目前在轨运行的HSCAT、CSCAT、WindRAD以及ASCAT等7颗星载微波散射计展开研究,详细分析多源星载微波散射计海面风场的误差特性,为多源卫星海面风场数据定量协同应用提供科学的参考依据。

1 数据与方法

1.1 数据

研究时段为2022年1—12月,其间我国在轨运行的星载微波散射计有5颗,分别是国家卫星海洋应用中心运行的HSCAT-B、HSCAT-C、HSCAT-D、CSCAT以及国家卫星气象中心运行的WindRAD。其中,CSCAT由于偶发天线停转的现象,缺失2022年9月和12月的部分数据。与此同时,欧洲气象卫星组织在轨运行2颗先进散射计,即ASCAT-B和ASCAT-C,其数据由荷兰皇家气象研究所提供。表1总结了这些星载微波散射计及其海面风场数据的主要特征参数和指标。需要注意的是,这些海面风场数据均由最大似然估计风场反演、二维变分分析去模糊以及基于反演残差的质量控制等处理技术得出,最大程度地减小了反演方法对多源数据误差横向比较的影响,可更为客观准确地评估不同星载微波散射计运行期间数据的精度和一致性。

使用的参考风场数据如下:(1)同时期全球锚定浮标风力计的风场数据,利用经典的Liu-Katsaros-Businger(LKB)模型将风力计高度的风速转换成海面10 m高度的风速^[12],以便与微波散射计海面风场数据比对;(2)欧洲中期天气预报中心(European Centre

for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 提供的海面 10 m 高度的预报风场数据, 网格分辨率为 0.125° 或 0.25° 、时间分辨率为 3 h。考虑微波散射计获取的是中等尺度的海面风场信息(如表 1 最后一列所示), 因此浮标数据与微波散射计数据时空匹配的原则是两者的空间距离小于 25 km、时间差异小于 $0.5 \text{ h}^{[10]}$; 如果有多个风矢量单元(wind vector cell, WVC)与同一个浮标在匹配时满足上述条件, 则只取位置最接近

浮标的 WVC 作为匹配的散射计样本。ECMWF 与微波散射计数据使用匹配的原则是利用空间双线性插值和时间维度的样条插值, 将 ECMWF 风场的东向分量(u)和北向分量(v)分别插值至微波散射计的每个 WVC, 根据插值后的 u 、 v 分量得出匹配的 ECMWF 风速和风向。由于数据发布机构提供的星载微波散射计海面风场数据均已包含了匹配的 ECMWF 数据, 实际数据分析中直接使用数据文件中的 ECMWF 风场。

表 1 研究使用的多源星载微波散射计及其数据描述

Table 1 Multi-source spaceborne microwave scatterometers used in the study and their data descriptions

微波散射计	卫星平台	发射时间	频率	极化方式	天线体制	风场分辨率/km
HSCAT-B	HY-2B	2018-10	Ku 波段	VV+HH	笔形波束旋转扫描	25.0
HSCAT-C	HY-2C	2020-09	Ku 波段	VV+HH	笔形波束旋转扫描	25.0
HSCAT-D	HY-2D	2021-05	Ku 波段	VV+HH	笔形波束旋转扫描	25.0
CSCAT	CFOSAT	2018-10	Ku 波段	VV+HH	扇形波束旋转扫描	12.5 或 25.0
WindRAD	FY-3E	2021-07	Ku 波段+C 波段	VV+HH	扇形波束旋转扫描	20.0
ASCAT-B	MetOp-B	2012-09	C 波段	VV	固定扇形波束	12.5 或 25.0
ASCAT-C	MetOp-C	2018-11	C 波段	VV	固定扇形波束	25.0

注: VV 表示垂直极化, HH 表示水平极化。

1.2 方法

1.2.1 直接比较法

分别将各种微波散射计的风场数据与一种参考风场(浮标或 ECMWF)比较, 统计两两比对的偏差(Bias)、标准差(standard deviation, SD)、相关系数(correlation coefficient, CC)等指标。由于海面风场的定量应用(如数据同化)可能使用到风速、风向^[13], 也可能使用风场的 u 、 v 分量^[14], 故统计的要素包括风速(w)、风向(d)、 u 以及 v 分量。考虑风向的圆周特性, 这里利用 Yamartino^[15] 方法来估计风向偏差(b_θ)和标准差(SD_θ), 具体如下。

$$b_\theta = \arctan \frac{S}{C} \quad (1)$$

$$SD_\theta = \sqrt{2(1 - \sqrt{S^2 + C^2})} \quad (2)$$

式中: S 和 C 分别表示风向的正弦平均值和余弦平均值。具体为

$$S = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sin d_i \quad (3)$$

$$C = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \cos d_i \quad (4)$$

式中: N 表示统计样本数, d_i 表示第 i 组匹配数据微波散射计风向与参考风向的差值。风速小于 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 海面风向固有的变异性远超 20° (海面风向常见的指标需求)^[16], 因此统计风向指标时仅考虑散射计与参考风场平均风速大于 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的匹配样本^[11]。

1.2.2 谱分析方法

柯尔莫哥洛夫谱分析方法常用于估计风场的谱密度, 描述了海面风场的空间变化特征, 反映了数据真实的空间分辨力^[10]。研究^[10]表明, 从中尺度(25 km)到大尺度(800 km), 散射计风场的空间变异特性均比 ECMWF 更大, 表明星载微波散射计通常能够解析比 ECMWF 更小尺度的风场变异性。对于给定的风场分量(u 或者 v), 可以通过计算散射计风场能量谱和 ECMWF 风场能量谱差异的积分来估计不同空间分辨率海面风场数据之间的代表性误差(记作 r^2)。具体如下。

(1) 针对散射计的每一列数据, 依次截取 N 点数据(建议值 $N=128$), 用于分别计算散射计风场和 ECMWF 匹配风场的 u 、 v 分量的能量谱。离散单边带谱的计算公式如下。

$$\psi_j = \psi(k_j) = \begin{cases} \frac{\Delta}{N} |z(k_j)|^2, & j = 0 \text{ 或 } \frac{N}{2} \\ \frac{\Delta}{N} [|z(k_j)|^2 + |z(k_{-j})|^2], & j = 1, \dots, \frac{N}{2} - 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中: 下标 j 表示离散数据的序号, ψ_j 是第 j 个空间波数对应的谱密度, 单位为 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-2}$; Δ 表示风矢量单元的网格分辨率, 单位为 m, 一般为 25 000 m 或 12 500 m; $z(k_j)$ 是 N 点数据快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)输出的结果, k_j 记作

$$k_j = \frac{j}{N\Delta}, j = -\frac{N}{2} + 1, \dots, \frac{N}{2} \quad (6)$$

(2) 对待评估的数据集, 分别累加散射计风场和 ECMWF 匹配风场 u 、 v 分量的能量谱, 最后取平均值得到 2 种数据的谱密度。

(3) 计算散射计风场能量谱和 ECMWF 风场能量谱差异的积分 (r^2), 积分区间为 25 ~ 800 km^[10]。 r^2 可以用来定性分析风场的真实空间分辨率, 其值越大则微波散射计和模式参考风场真实空间分辨率的差异也就越大。

1.2.3 三元匹配数据分析法

三元匹配数据分析法是一种常用的多源数据误差方法, 在一定的假设前提下, 一方面可用于估计不同数据相对于“真实”值的固有随机误差 (以下简称“固有误差”), 另一方面也可以用于对数据进行线性偏差订正^[17]。对于海面风场, 通常假设三元匹配数据集中每一种数据 x 相对于“真实”值 t 的关系均满足以下线性关系^[17]。

$$x_i = a_i t + b_i + \delta_i \quad (7)$$

式中: $i=1, 2, 3$ 分别表示浮标现场观测的风场、卫星遥感的风场以及 ECMWF 风场, a 、 b 表示数据的比例和偏差订正系数, δ 表示固有误差。不失一般地, 进一步假设: (1) 随机误差与“真实”值是非相关的, 即 $\langle t\delta_i \rangle = 0$ ($i=1, 2, 3$); (2) 浮标和微波散射计能够解析比 ECMWF 尺度更小的风场变异性, 这种被粗分辨率系统 (ECMWF) 忽略、但是能够被较高空间分辨率的观测系统共同解析的风场变异性 (记作 $\langle \delta_1 \delta_2 \rangle$) 即为代表性误差 r^2 , 在一些应用中要当作观测误差的一部分; (3) ECMWF 不包含小尺度的风场变异性, 因此 $\langle \delta_i \delta_3 \rangle = 0$ ($i=1, 2$)。那么, 通过计算三元匹配数据集的混合二阶矩, 可得^[11]:

$$\begin{cases} M_{12} = a_1 a_2 \langle w \rangle + r^2 \\ M_{13} = a_1 a_3 \langle w \rangle \\ M_{23} = a_2 a_3 \langle w \rangle \end{cases} \quad (8)$$

由于未知量多于已知量, 式 (8) 为欠定方程。实际求解时以浮标风场为准, 其他 2 种数据相对于浮标风场求解比例和偏差订正系数。即

$$\begin{cases} a_1 = 1 \\ a_2 = \frac{M_{23}}{M_{13}} \\ a_3 = \frac{M_{23}}{M_{12} - r^2} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} b_1 = 0 \\ b_2 = M_2 - a_2 M_1 \\ b_3 = M_3 - a_3 M_1 \end{cases} \quad (10)$$

式中: M_i 表示第 i 种数据的一阶矩。最后, 在 ECMWF 空间尺度下, 三元匹配数据集中各种数据的随机方差如下。

$$\langle \delta_i^2 \rangle = M_{ii} - M_{23}, i = 1, 2, 3 \quad (11)$$

如果要评估微波散射计空间尺度下各种数据的随机方差, 则式 (11) 得到的 $\langle \delta_1^2 \rangle$ 和 $\langle \delta_2^2 \rangle$ 要减去 r^2 , 而 $\langle \delta_3^2 \rangle$ 要加上 r^2 。

2 多源卫星海面风场数据定性比较

图 1 给出了 2022 年 6 月 29 日多源星载微波散射计观测的南海热带低压 (7 月 1 日后迅速发展为台风“暹芭”) 的海面风场。不同散射计遥感反演的风场总体上具有较好的空间一致性, 且均能够清晰反映气旋的结构特征。多颗星载微波散射计协同观测, 可以清晰地刻画该热带低压快速增强的过程。

多源星载微波散射计的轨道差异促进了多星协同观测与应用, 但也给多星观测数据的直接比较带来了不便。正如图 1 所示, 在一个快速变化的天气系统中, 海面风场在 1 h 之内就可能发生明显的变化。缩小多源卫星数据比对的时间窗口有可能减小海面风场变异性对误差分析的影响, 但也会导致无法获取足够的多星时空匹配数据集。因此, 要客观评价多源星载微波散射计遥感反演的海面风场, 一方面可以统计并对比各散射计长时序的风速直方图, 定性评估其风速的总体分布; 另一方面, 分别将每颗卫星散射计的数据与相同的参考风场 (如浮标或 ECMWF) 进行时空匹配, 进而利用相同的参考数据实现多星遥感数据的横向比较。

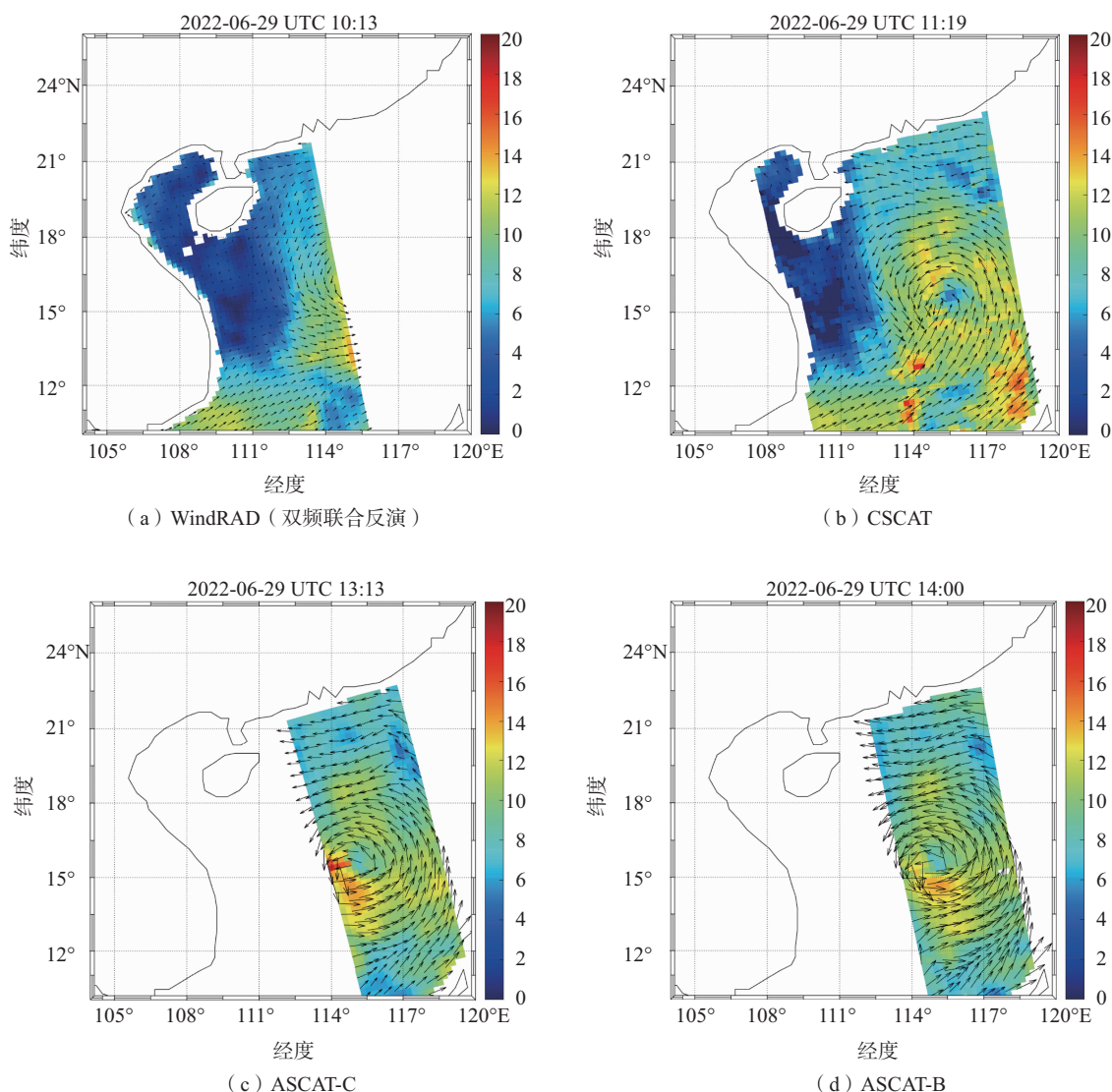
由于 WindRAD 是全球首个双频微波散射计, 其数据产品包括 C 波段单独反演、Ku 波段单独反演以及 2 个波段联合反演 (记作“WindRAD-Du”), 共 3 种不同的海面风场。由 WindRAD 三种风速在 2022 年的统计结果 (图 2a) 可以看出, Ku 波段的风速总体上大于 C 波段的风速, 双波段联合反演的结果则是 C 波段和 Ku 波段折中的效果。文中关于 WindRAD 的图示均使用双波段联合反演的结果。通过对比 2022 年 7 颗微波散射计海面风速 (图 2b), 得出如下主要结论: (1) WindRAD 的低风速 ($w < 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 明显高于其他星载微波散射计, 可能的原因是在后

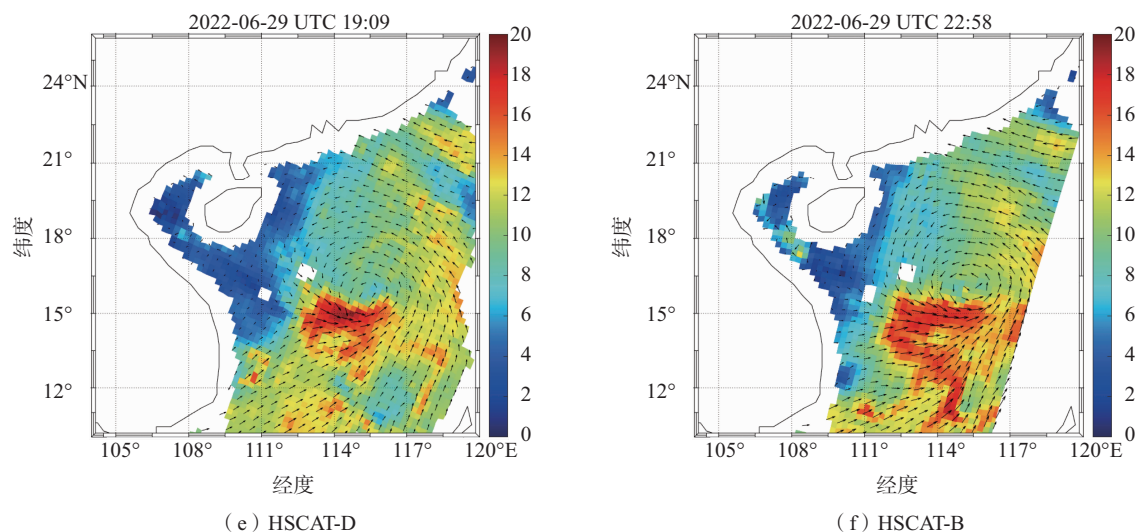
向散射系数估计时没有充分消除噪声的影响,导致后向散射系数估计结果偏高,即低风速的反演结果有一部分来自噪声的贡献。但是具体原因要通过分析 WindRAD 各个通道的原始观测值才能得知,不在本文讨论范围之内。(2)HSCAT-B 与 2 颗 ASCAT (太阳同步轨道) 的风速直方图最为接近,而 HSCAT-C 和 HSCAT-D (倾斜轨道) 的风速直方图基本一致。考虑 HSCAT 系列微波散射计的硬件设计和反演方法基本一致,上述差异主要由卫星轨道、观测范围及采样周期的差异引起。(3)CSCAT 中等风速的直方图与其他散射计也有较明显不同,这种差异可能主要是因为其缺失了 9 月和 12 月部分数据;此外,研究^[18]表明,2022 年 6—8 月 CSCAT 风场存在异常偏差,因此本文仅给出 CSCAT 的计算结果作参考,不予细致讨论。(4)不同微波散射计的年平均

均风速为 $7.92 \sim 8.14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,最大差异 (HSCAT-C/D 和 HSCAT-B) 约为 $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

3 海面风场谱分析和代表性误差

以往的研究^[10]通常仅利用 1 个月的数据即可以得到风场谱密度的准确估计。以 WindRAD 为例,图 3a 给出了该微波散射计 2022 年 8 月风场 u 分量的谱密度 (黑色曲线)。由图可见, WindRAD 风场的空间变异性 (不同距离风场的变化程度) 明显大于 ECMWF 风场 (蓝色曲线),特别是在空间尺度小于 100 km ($k_s > 10^{-5} \text{ m}^{-1}$) 的情况。这表明 WindRAD 比 ECMWF 能够更好地解析中等尺度海面风场的变化特征。WindRAD 海面风场 v 分量的谱密度以及其他星载微波散射计海面风场的谱密度与图 3a 类似,不再赘述。





箭头—风场，风速单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ；色阶—风速，单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

图1 2022年6月29日多源星载微波散射计观测的南海热带低压的海面风场

Fig.1 Sea surface wind fields of a tropical depression in the South China Sea observed by multi-source spaceborne microwave scatterometers on 29 June 2022

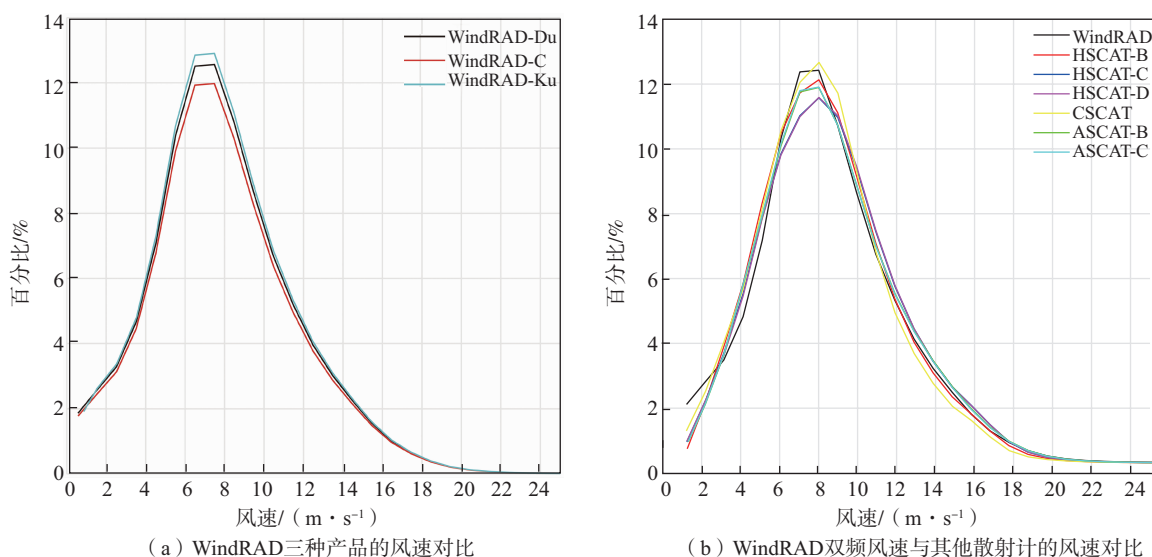


图2 2022年海面风速统计对比

Fig.2 Statistical comparison of sea surface wind speed in 2022

不同星载微波散射计的观测范围、采样周期不同,因此谱分析得到的与各个散射计时空匹配的ECMWF风场谱密度也有所不同。为了便于利用谱分析横向比较不同散射计海面风场的空间变异性(尺度特征),图3b给出了同时期7颗散射计归一化谱密度的曲线,即 $\delta\psi = \psi_{\text{SCAT}}(k)/\psi_{\text{ECMWF}}(k)$ 。总体而言尺度小于100 km时,所有微波散射计风场的空间变异性均明显大于ECMWF风场,且这种差异随着尺度的减小线性增大,表明微波散射计比ECMWF能够解析更小空间尺度的风场变异性。空

间尺度为50 km时,ASCAT的归一化谱密度最大,表明该微波散射计海面风场的真实空间分辨率最高。这主要是因为ASCAT采用3个固定方位角的观测波束,且相邻2个波束的方位角间隔 45° ,比WindRAD、HSCAT、CSCAT等旋转扫描微波散射计更有利于获取高精度的风向信息^[19]。空间尺度小于50 km时,WindRAD的归一化谱密度仅次于ASCAT,但比其他Ku波段微波散射计的谱密度大,这是因为其空间分辨率(20 km)略高于其他Ku波段星载微波散射计(25 km)。

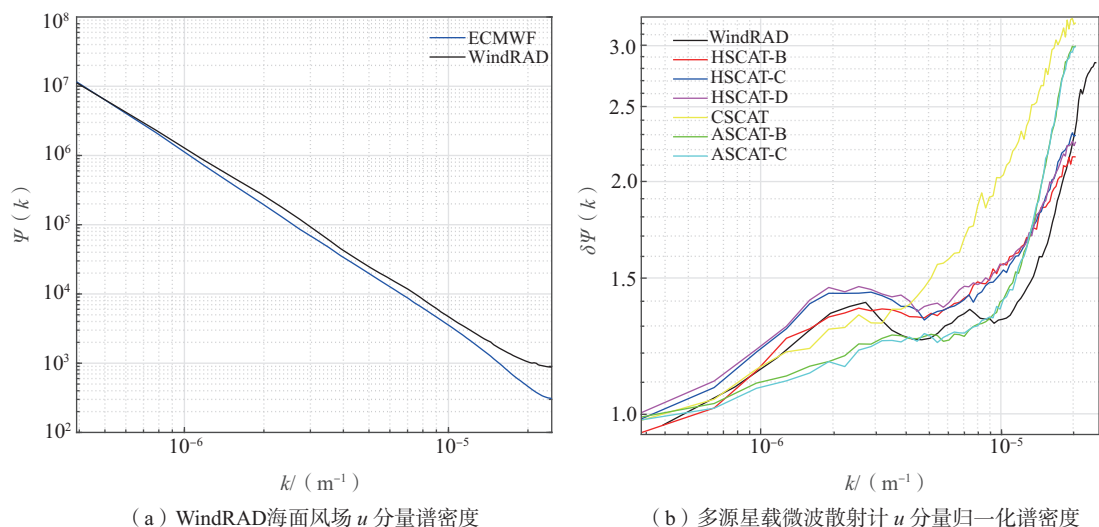
(a) WindRAD海面风场 u 分量谱密度(b) 多源星载微波散射计 u 分量归一化谱密度

图3 海面风场谱分析结果示意图

Fig.3 Illustration of spectral analysis results for sea surface wind fields

利用 1.2 节的方法进一步估计每种星载微波散射计海面风场的代表性误差 (r^2), 结果如表 2 所示。表中同时给出了 ASCAT-B 12.5 km 风场的代表性误差, 其结果与前人文献^[10]中的值基本一致, 表明文中计算结果是可靠的。CSCAT 风场 u 、 v 分量的代表性误差相对一致, 其他微波散射计 v 分量的 r^2 通常大于 u 分量的值。这或许是因为 CSCAT 是唯一一颗大扇形波束 (俯仰向波束宽度接近 20°) 旋转扫描的微波散射计, 其观测方位角和入射角多样性最强, 风场反演时不同角度的观测对代价函数的贡献往往相互补充^[20]。空间分辨率相同时, HSCAT-B 的代表性误差最大, 其次是 ASCAT。代表性误差随着空间分辨率的提升而增大, 说明较高网格分辨率的微波散射计风场往往具有较强的风场变异性。

表2 星载微波散射计海面风场 u 、 v 分量的代表性误差Table 2 Representative errors of wind u and v components derived from spaceborne microwave scatterometers

序号	微波散射计	分辨率/km	$r^2/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2})$	
			u 分量	v 分量
1	WindRAD	20.0	0.19	0.28
2	HSCAT-B	25.0	0.12	0.17
3	HSCAT-C	25.0	0.08	0.10
4	HSCAT-D	25.0	0.07	0.10
5	CSCAT	25.0	0.11	0.10
		12.5	0.23	0.20
6	ASCAT-B	25.0	0.09	0.17
		12.5	0.41	0.74
7	ASCAT-C	25.0	0.08	0.17

4 多源卫星海面风场误差分析

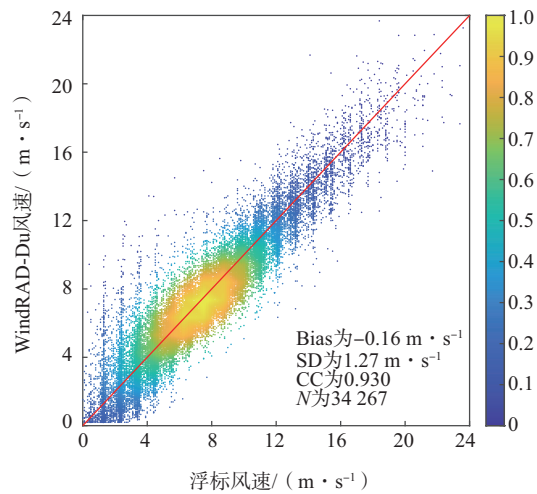
将每种微波散射计的海面风场与浮标参考风场进行比较, 结果如图 4 所示。为了节省篇幅, 同一个卫星系列只展示一种散射计风场的对比结果。

由所有星载微波散射计与浮标对比的统计指标 (表 3) 可见, WindRAD 三种风场产品中 C 波段的海面风场与浮标最为一致, 而 Ku 波段的风场则与浮标风场差异最大。需要注意的是, 不同卫星散射计的匹配数据时空分布不尽相同, 因此与参考风场的一致性不能用于横向比较多源卫星散射计风场的相对精度。例如, WindRAD 相对于浮标风场的各项统计指标最大, 而 WindRAD 匹配的 ECMWF 风场与浮标风场的一致性也明显低于其他星载微波散射计所匹配的 ECMWF 数据 (表 3 中粗体展示), 说明较大的统计值也有可能是因为所匹配的浮标风场本身存在较大的不确定性引起的, 因此很难通过两两比对来确定不同卫星散射计海面风场精度的排序。

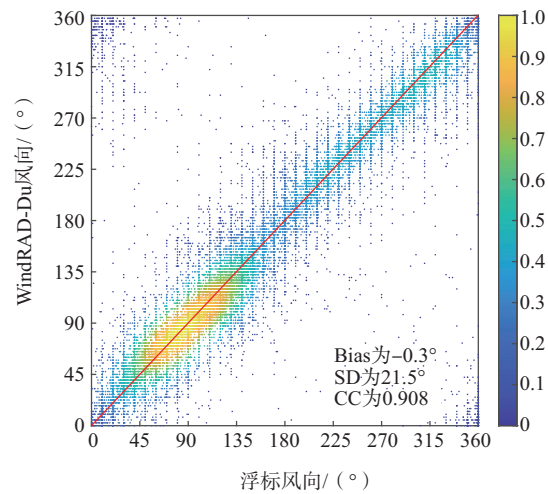
为更加客观比较多源星载微波散射计海面风场的精度, 利用三元匹配数据分析方法估计各个散射计匹配数据集中每种数据源的误差。这里仅对风场 u 、 v 分量进行分析, 数据分析所需的代表性误差如表 2 所示。表 4 首先给出每种匹配数据集中海面风场各分量的订正系数, 由此可见: (1) WindRAD 的订正系数略大于其他散射计, 这与表 3 中两两比对的结果一致; 也就是说, 与浮标风场的一致性越差, 利

用浮标风场对散射计风场进行订正时的系数越大。
(2) 各种匹配数据集中 ECMWF 风场 u 分量的比例订正系数(相对于浮标风场)均接近 1, 偏差订正系数则为 $0.2 \sim 0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; ECMWF 风场 v 分量的比例

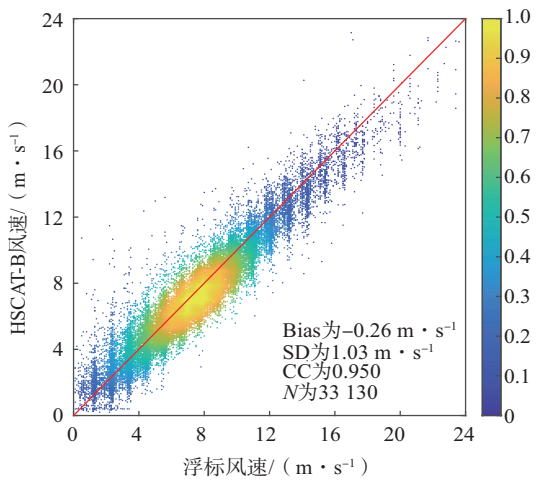
订正系数较大, 而偏差订正系数明显小于 u 分量。总体而言, 表中所列的各种风场具有较好的一致性, 每种数据相对于浮标风场的比例订正系数不超过 5%、偏差订正系数一般小于 $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。



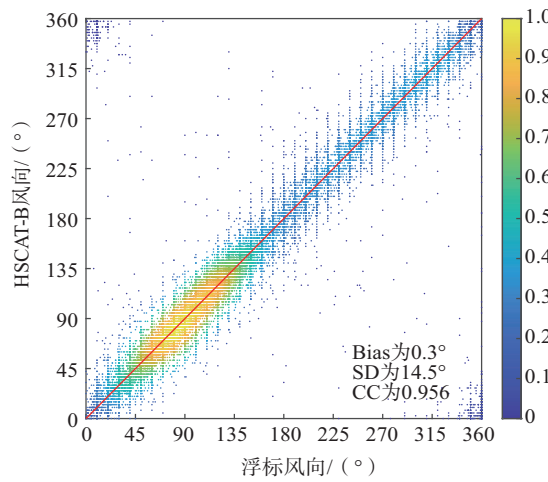
(a) WindRAD-Du 风速



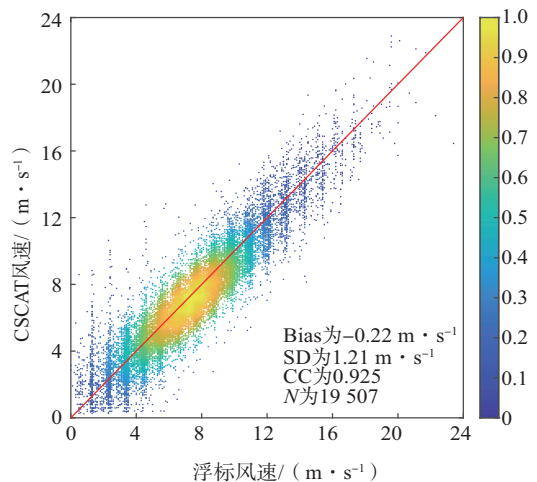
(b) WindRAD-Du 风向



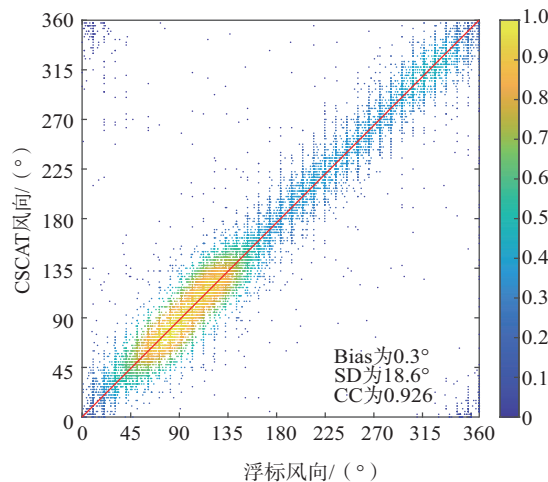
(c) HSCAT-B 风速



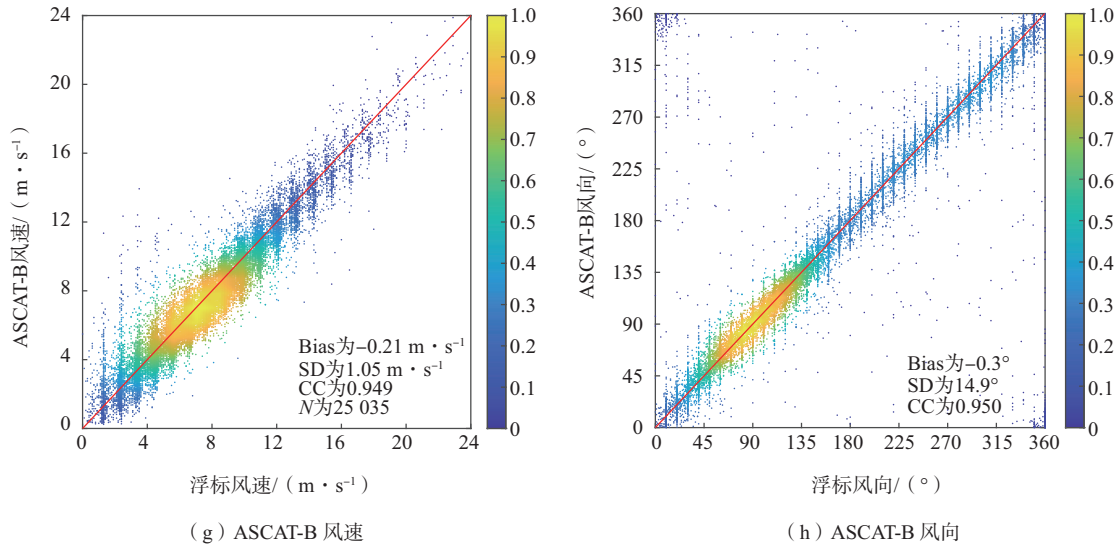
(d) HSCAT-B 风向



(e) CSCAT 风速



(f) CSCAT 风向



色阶—数据分布的相对密度。

图4 星载微波散射计风速和风向与浮标风场散点密度对比

Fig.4 Scatter density plots of wind speed and direction between spaceborne microwave scatterometers and buoy wind data

表3 星载微波散射计及其匹配的ECMWF海面风场相对浮标参考风场的统计指标

Table 3 Statistical scores of spaceborne microwave scatterometers and their collocated ECMWF sea surface winds with respect to buoy reference wind data

数据对	微波散射计	风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)		风向/($^{\circ}$)		u 分量/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)		v 分量/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)		样本数
		Bias	SD	Bias	SD	Bias	SD	Bias	SD	
微波散射计 vs 浮标	WindRAD-Du	-0.16	1.27	-0.3	21.5	0.24	2.09	0.04	2.01	34 259
	WindRAD-C	-0.41	1.25	-0.2	20.6	0.36	2.02	0.04	1.95	
	WindRAD-Ku	-0.31	1.33	-0.5	24.3	0.34	2.29	0.01	2.25	
	HSCAT-B	-0.26	1.03	0.3	14.6	0.18	1.55	-0.02	1.51	33 130
	HSCAT-C	-0.21	1.06	0.2	15.7	0.13	1.64	0.02	1.69	42 637
	HSCAT-D	-0.22	1.01	-0.3	15.0	0.11	1.55	0.01	1.60	44 155
	CSCAT	-0.22	1.21	0.3	18.6	0.26	1.77	-0.01	1.84	19 507
	ASCAT-B	-0.21	1.05	-0.3	14.9	0.18	1.50	0.04	1.59	25 035
ECMWF vs 浮标	ASCAT-C	-0.22	1.03	-0.2	14.9	0.17	1.49	0.02	1.60	24 652
	WindRAD	-0.23	1.60	2.3	18.9	0.36	1.95	0.18	2.00	34 259
	HSCAT-B	-0.25	1.38	2.4	15.8	0.26	1.69	0.07	1.79	33 130
	HSCAT-C	-0.22	1.39	2.7	16.1	0.24	1.72	0.10	1.86	42 637
	HSCAT-D	-0.22	1.37	2.5	16.0	0.24	1.70	0.08	1.81	44 155
	CSCAT	-0.20	1.46	2.0	17.1	0.28	1.72	0.05	1.85	19 507
	ASCAT-B	-0.20	1.44	2.2	17.5	0.24	1.80	0.04	1.93	25 035
	ASCAT-C	-0.20	1.42	2.2	17.5	0.24	1.80	0.03	1.95	24 652

表4 三元匹配分析法各匹配数据集的订正系数

Table 4 Calibration coefficients of triple collocation analysis for different match-up datasets

各微波散射计 数据集	微波散射计订正系数				ECMWF 订正系数			
	u 分量		v 分量		u 分量		v 分量	
	a	b	a	b	a	b	a	b
WindRAD-Du	0.988	0.21	1.033	0.01	0.996	0.33	1.030	0.15
WindRAD-C	1.041	0.28	1.024	0.03	0.998	0.33	1.036	0.15
WindRAD-Ku	1.036	0.22	1.066	-0.03	0.994	0.34	1.028	0.15
HSCAT-B	1.022	0.15	1.007	-0.03	1.001	0.24	1.039	0.06
HSCAT-C	1.011	0.11	1.004	-0.01	1.001	0.23	1.036	0.08
HSCAT-D	1.012	0.09	1.004	-0.01	1.003	0.22	1.039	0.07
CSCAT	1.015	0.20	1.003	-0.03	0.994	0.25	1.030	0.04
ASCAT-B	1.005	0.15	1.016	0.01	1.004	0.21	1.045	0.01
ASCAT-C	1.007	0.15	1.015	-0.01	1.004	0.22	1.047	0.01

表 5 给出了 ECMWF 风场尺度下各种数据源固有误差标准差($\sqrt{\langle \delta^2 \rangle}$)估计的结果。与上述分析类似,不同卫星散射计所匹配的 ECMWF 风场的随机误差也具有良好的一致性,因此,可以利用散射计

与 ECMWF 风场随机误差的比值来横向比较不同微波散射计海面风场随机误差的大小。总体来看,ASCAT 风场的随机误差最小,HSCAT 和 CSCAT 次之,WindRAD 风场的随机误差则最大。

表 5 ECMWF 风场尺度下三元匹配分析法估计的各种匹配数据源的随机误差标准差
Table 5 Standard deviations of random errors for different match-up datasets estimated by triple collocation analysis at ECMWF wind scale

各微波散射计 数据集	浮标风场		微波散射计风场		ECMWF 风场	
	<i>u</i> 分量	<i>v</i> 分量	<i>u</i> 分量	<i>v</i> 分量	<i>u</i> 分量	<i>v</i> 分量
WindRAD-Du	1.45	1.55	1.29	1.27	1.01	1.06
WindRAD-C	1.44	1.49	1.26	1.22	1.04	1.13
WindRAD-Ku	1.48	1.57	1.48	1.56	0.98	1.03
HSCAT-B	1.25	1.34	0.76	0.63	0.92	1.00
HSCAT-C	1.26	1.33	0.81	0.71	0.92	1.00
HSCAT-D	1.23	1.30	0.73	0.64	0.92	1.01
CSCAT	1.30	1.38	1.08	1.01	0.92	0.98
ASCAT-B	1.15	1.23	0.53	0.61	1.07	1.16
ASCAT-C	1.15	1.21	0.51	0.61	1.08	1.17

5 总结与讨论

利用 2022 年在轨运行的星载微波散射计海面风场资料以及同时期的浮标数据、ECMWF 预报风场数据,结合定性比较和定量分析的方法,对 7 颗卫星散射计的海面风场误差进行了较为全面的分析,得到以下主要结论:

(1)WindRAD 三种产品中 C 波段的海面风场与浮标风场的一致性最好,总体精度也最高,其次分别是双波段和 Ku 波段反演的风场。

(2)现有星载微波散射计遥感反演的海面风场与浮标风场、ECMWF 预报风场两两对比时均呈现良好的一致性。这些散射计风场的空间变异性均明显大于 ECMWF 风场,且这种差异随着尺度的减小而增大;在 25 km 尺度下,HSCAT-B 的代表性误差最大,其次是 ASCAT。

(3)三元匹配数据分析表明,当前星载微波散射计均具有较高精度,固有误差为 0.5~1.3 m·s⁻¹。尽管遥感风场资料应用通常需要进行更加精细化的线性偏差订正,其比例订正系数一般不超过 5%、偏差订正系数小于 0.3 m·s⁻¹。

横向比较多源星载微波散射计海面风场资料的总体精度发现,在 ECMWF 风场尺度下,ASCAT 风场的总体固有误差最小,其次是 HSCAT 系列散射

计。这些定量分析的结果可以作为多源星载微波散射计海面风场的协同应用(如多源数据融合、同化预报)中误差协方差矩阵设置的重要依据。最后需要说明的是,文中仅针对海面风场的总体误差进行分析,所得结论并不适用于一些特殊的海洋气象条件,如锋面、降雨等情况。进一步探究特殊海洋气象条件下海面风场的误差特性,有助于深入了解不同形式微波散射计的优缺点。

参考文献:

[1] JIANG X W, LIN M S, LIU J Q, et al. The HY-2 satellite and its preliminary assessment[J]. Int J Digit Earth,2012,5(3):266-281.

[2] SHANG J, WANG Z X, DOU F L, et al. Preliminary performance of the WindRAD scatterometer onboard the FY-3E meteorological satellite[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens,2024,62:5100813.

[3] 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.

[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 wind scatterometers[J]. Can J Remote

- Sens, 2002, 28(3): 404-412.
- [5] SHENOY M, DUTTA S, DESAMSETTI S, et al. Assessing the impact of Oceansat-3 surface winds on monsoonal low-pressure systems using WRF ARW model [J/OL]. J Indian Soc Remote Sens, 2025, [2025-02-14]. <https://doi.org/10.1007/s12524-024-02079-7>.
- [6] 穆博,郎姝燕,卫然,等.中法海洋卫星微波散射计风场产品精度评价[J].海洋气象学报,2024,44(4):22-29.
- [7] 高理,孔祥宁,李玉,等.CFOSAT与MetOp卫星散射计12.5 km产品反演风速交叉验证分析[J].海洋气象学报,2024,44(4):91-100.
- [8] WANG Z X, ZOU J H, STOFFELEN A, et al. Scatterometer sea surface wind product validation for HY-2C[J]. IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sens, 2021, 14: 6156-6164.
- [9] YANG S, MU B, SHI H Q, et al. Validation and accuracy analysis of wind products from scatterometer onboard the HY-2B satellite[J]. Acta Oceanol Sin, 2023, 42(2): 74-82.
- [10] VOGELZANG J, STOFFELEN A, VERHOEF A, et al. On the quality of high-resolution scatterometer winds[J]. J Geophys Res: Oceans, 2011, 116(C10): C10033.
- [11] LIN W M, PORTABELLA M, STOFFELEN A, et al. ASCAT wind quality under high subcell wind variability conditions[J]. J Geophys Res: Oceans, 2015, 120(8): 5804-5819.
- [12] LIU W T, KATSAROS K B, BUSINGER J A. Bulk parameterization of air-sea exchanges of heat and water vapor including the molecular constraints at the interface [J]. J Atmos Sci, 1979, 36(9): 1722-1735.
- [13] HUANG X Y, GAO F, JACOBS N A, et al. Assimilation of wind speed and direction observations: a new formulation and results from idealised experiments [J]. Tellus A: Dyn Meteor Oceanogr, 2022, 65(1): 19936.
- [14] CHEN Y D, CUI Y M, LIN W M, et al. The impacts of assimilating CFOSAT scatterometer winds for typhoon cases based on real-time rain quality control [J]. Atmos Res, 2023, 285: 106621.
- [15] YAMARTINO R J. A comparison of several "single-pass" estimators of the standard deviation of wind direction [J]. J Climate Appl Meteor, 1984, 23(9): 1362-1366.
- [16] LIN W M, PORTABELLA M. Characterizing global sea surface local wind variability from ASCAT data [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2022, 60: 4212210.
- [17] 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.
- [18] MOU X H, LIN W M, HE Y J. Towards a consistent wind data record for the CFOSAT scatterometer [J]. Remote Sens, 2023, 15(8): 2081.
- [19] PORTABELLA M. Wind field retrieval from satellite radar systems [D]. Barcelona: University of Barcelona, 2002: 17-25.
- [20] ZHAO X K, LIN W M, PORTABELLA M, et al. Effects of rain on CFOSAT scatterometer measurements [J]. Remote Sens Environ, 2022, 274: 113015.