0254-6124/2023/43(6)-1100-11 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

ZHONG Junjie, WANG Zhixiong, ZOU Juhong, LIN Wenming. Comparisons of SFMR and Satellite Microwave Remote Sensed Sea Surface Wind Speed in Hurricane Weather (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2023, **43**(6): 1100–1110. DOI:10.11728/cjss2023.06.2023–0062

飓风天气下机载 SFMR 与星载微波遥感海面风速的对比分析*

钟俊杰[1] 王志雄[1] 邹巨洪[2] 林文明[1]

1(南京信息工程大学海洋科学学院 南京 210044)

2(国家卫星海洋应用中心 北京 100081)

摘 要 飓风天气下多种探测技术提供的海面风速的一致性备受关注。飓风侦察机搭载的步进频率微波辐射计（SFMR）提供的海面高风速数据是海面风速最主要的现场观测数据源。本文旨在分析 SFMR 风速与星载微波散射计（C 波段欧洲 MetOp 系列卫星散射计 ASCAT，Ku 波段中法海洋卫星散射计 CSCAT 和中国 HY-2 系列卫星散射计 HSCAT）和微波辐射计（SMAP 和 SMOS）遥感风速的一致性。通过分析 SFMR 风速随空间尺度变化的关系，进而提出了 SFMR 与散射计和辐射计数据进行时空匹配的方法。结果表明，高风速（$>15\ \mathrm{m\cdot s^{-1}}$）辐射计比散射计风速与 SFMR 风速的一致性更好，风速高于 $25\ \mathrm{m\cdot s^{-1}}$ 时 Ku 波段散射计风速趋于饱和。高风速下降雨也是影响散射计风速误差的重要因素，但依赖于风速的误差显著高于降雨影响带来的误差。基于 SFMR 数据进一步揭示了星载微波散射计和辐射计提供海面风速的误差特征，为遥感数据应用提供参考。

关键词 飓风，SFMR，微波散射计，微波辐射计，高风速，真实性检验

中图分类号 P732

Comparisons of SFMR and Satellite Microwave Remote Sensed Sea Surface Wind Speed in Hurricane Weather

ZHONG Junjie[1] WANG Zhixiong[1] ZOU Juhong[2] LIN Wenming[1]

1(*School of Marine Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing* 210044)

2(*National Satellite Ocean Application Service, Beijing* 100081)

Abstract The accuracy and consistency of sea surface wind speed measurements during hurricane conditions have garnered significant attention. Among the various techniques, the Stepping Frequency

* 国家重点研发计划项目资助（2022YFC3104901）

2023-06-02 收到原稿，2023-08-16 收到修定稿

E-mail：20211237010@nuist.edu.cn. 通信作者 王志雄，E-mail：wangzhixiong@nuist.edu.cn

©The Author(s) 2023. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Microwave Radiometer (SFMR) provides crucial in-situ data on sea surface high wind speeds. This study aims to compare wind speed measurements obtained from SFMR with those from space-borne microwave scatterometers such as the C-band European MetOp series satellite Scatterometer ASCAT, the Ku-band China-France Oceanography Satellite (CFOSAT) Scatterometer CSCAT, and the Chinese HY-2 series satellite Scatterometer HSCAT, as well as microwave radiometers such as SMAP and SMOS. We establish the relationship between SFMR wind speed and spatial scale and propose a spatio-temporal matching method to align SFMR data with scatterometer and radiometer data. This method assumes that the spatial distribution of TC wind field is unchanged relative to the hurricane direction in a certain time range. According to the TC center path information of IBTrACS, the trajectory of SFMR is transformed into the relative coordinates of storm movement, which effectively extending the matching time difference between SFMR, scatterometer and radiometer sea surface wind speed data to 3 hours. Our findings indicate that radiometer measurements of high wind speeds (>15 $m \cdot s^{-1}$) exhibit greater consistency with SFMR compared to scatterometer measurements, and Ku-band scatterometer measurements tend to saturate when wind speeds exceed 25 $m \cdot s^{-1}$. The spatio-temporal matching results of SMAP and HSCAT also showed the same distribution characteristics. However, the ASCAT wind speed of C-band scatterometer still shows the overall increasing distribution characteristics. Additionally, Rainfall during high wind conditions significantly affects scatterometer wind speed error is still observed by us, although the error associated with wind speed is more pronounced. This study contributes to a better understanding of the error characteristics of sea surface wind speed measurements obtained from space-borne microwave scatterometers and radiometers, thereby offering valuable insights for the application of remote sensing data, subsequent research can analyze the contribution of different data sources in the physical meaning of wind speed to the consistency analysis results.

Key words Hurricane, SFMR, Microwave scatterometer, Mcrowave radiometer, High wind speed, Authenticity test

0 引言

热带气旋(Tropical Cyclone, TC)是一种发生在热带或副热带洋面的灾害性天气系统,也是影响中国的主要灾害性天气系统之一。准确获取 TC 海面风场信息对于 TC 活动的监视和预报具有重要意义。近年来,针对 TC 海面风场的多种探测技术取得了重要发展,包括星载微波辐射计遥感技术,机载步进频率微波辐射计(Stepped Frequency Microwave Radiometer, SFMR)探测技术,无人船现场观测技术等[1–5]。星载主动微波散射计和被动微波辐射计具有空间覆盖范围大、观测频次较高等优点,其观测数据在 TC 定位、风场结构、强度估计和路径预报等方面具有重要贡献[6]。2019 年以来,同期在轨运行且能够探测 TC 海面风速的星载微波遥感器数据较多,其中微波散射计主要有中国 HY-2 号系列 B, C 和 D 星散射计 HSCAT,欧洲 MetOp 系列 A, B 和 C 星散射计 ASCAT,以及中法海洋卫星(Chinese-French Oceanography Satellite, CFOSAT)散射计 CSCAT;微波辐射计主要有美国 SMAP(Soil Moisture Active and Passive)和欧洲 SMOS(Soil Moisture and Ocean Salinity)。

热带气旋下海面风速的遥感反演依赖于经验反演模型,而模型的构建和定标需要真实性高的海面风速数据。迄今,美国国家海洋和大气管理局(National Oceanographic and Atmospheric Administration, NOAA)飓风侦察机搭载的下投式探空仪(Dropsonde)和 SFMR 提供的海面高风速数据是 TC 海面风速最主要的现场观测数据源[3]。为减弱 Dropsonde 接近海面时由于下降速度快等因素对海面 10 m 处风速估计值的影响,Uhlhorn 等[7] 提出了用海面 150 m 高度以下多处风速测量值加权平均方式计

算 Dropsonde 海面 10 m 处风速的方法。NOAA 机载 SFMR 采用 6 个 C 波段通道(4.55～7.22 GHz)测量辐射亮温,并通过经验物理模型反演得到海面 10 m 处风速和降雨率等物理参量;Dropsonde 与 SFMR 同平台准同步观测,因此 SFMR 风速反演模型的构建使用 Dropsonde 海面风速[7]。2019 年 Sapp 等[3] 研究发现风速在 15～45 $m\cdot s^{-1}$ 区间时,SFMR 反演风速相对 Dropsonde 风速偏低约 10%,并由此改进了 SFMR 反演模型,进而重处理了 2008 年以来的 SFMR 历史数据。

尽管 Dropsonde 数据稀少但可以很好地服务于 SFMR 反演模型的定标和验证,进一步将 SFMR 数据沿着飞机轨迹进行空间平均可使其能够很好地用于星载微波遥感器高风速反演模型的定标和验证[8]。例如,L 波段 SMAP 海面高风速反演模型的构建是基于飓风天气下 SMAP 与 SFMR 时空匹配数据[1];欧洲 L 波段 SMOS 海面高风速反演模型的构建同样是基于飓风天气下 SMAP 与 SFMR 时空匹配数据[2]。

研究表明,SMAP 和 SMOS 两个 L 波段(1.4 GHz)微波辐射计观测亮温值受到强降雨的轻微影响,但在高风速(>20 $m\cdot s^{-1}$)条件下 L 波段海面辐射亮温对风速变化具有较好地敏感性,表现为近似线性依赖关系[1,2]。然而,迄今高风速条件下微波散射计观测的海面雷达后向散射系数(σ^0)对风速增大的响应关系并无统一认识[9–12];实际用于散射计海面风场反演的地球物理模型函数(Geophysical Model Function, GMF)的高风速部分会采用模型参数外推的方法予以填补,例如 C 波段 CMOD7 GMF[13], Ku 波段 NSCAT-4 GMF[14] 或 Ku-2011 GMF[10]。

尽管多种 TC 探测技术可以提供 TC 海面风速,但不同数据源之间高风速的一致性仍有待分析和验证。热带气旋下海面风场的空间变异性强,因此在进行高风速的真实性检验时有必要考虑不同数据源在探测机理、空间尺度、探测时间和空间位置等方面存在的差异。本研究旨在探讨微波散射计和辐射计海面高风速的真实性检验方法和检验结果。

1 研究数据

1.1 SFMR 机载数据

美国 NOAA 组织实施的机载 SFMR 观测计划主要针对北大西洋和东太平洋的飓风,其数据由 NOAA 国家环境卫星、数据和信息服务 (National Environmental Satellite, Data, and Information Service, NESDIS)/卫星应用和研究中心 (Center for Satellite Applications and Research, STAR) 的海洋表面风小组 (Ocean Surface Winds Team, OSWT) 负责处理和发布。本文使用最新版本的(V1.2.0)数据[3],时间范围为 2019－2021 年。比较 SFMR 与星载微波散射计和辐射计数据,而后者在近岸区域由于受到陆地影响而缺失或误差较大;因此剔除了飓风中心在墨西哥湾区域的航次数据,剩余共 128 个飞行航次的 SFMR 观测数据文件(见图 1)。每个飞行航次的 SFMR 数据文件都包含经纬度、海面 10 m 处风速、降雨强度、质量标识和飞机飞行高度等信息;飞机在 TC 上空时的飞行高度在 3000 m 左右;机载 SFMR 工作频率为 4.5～7.2 GHz, 波束宽度(3 dB)为 20°～28°, 地面刈幅宽度约为 1100～1600 m, 沿飞机飞行轨迹将每一秒内的观测数据进行平均作为观测单元。总体而言,飞机飞行速度约为 100 $m\cdot s^{-1}$, 即相邻 SFMR 观测单元的间距约为 100 m。此外,研究仅保留质量标识(Quality Control, QC)数值为 0 的数据,即仅保留了高质量数据、剔除了数据质量可靠性较差的数据。

1.2 微波散射计

研究使用了三种类型的同时期在轨运行的星载散射计海面风场遥感数据,包括 HY-2 系列卫星(包括 B, C 和 D 星)微波散射计 HSCAT, 欧洲 MetOp 系列卫星(包括 A, B 和 C 星)微波散射计 ASCAT, 以及 CFOSAT 微波散射计 CSCAT;散射计波段信息和数据时间范围如表 1 所示。已有研究表明,HY-2

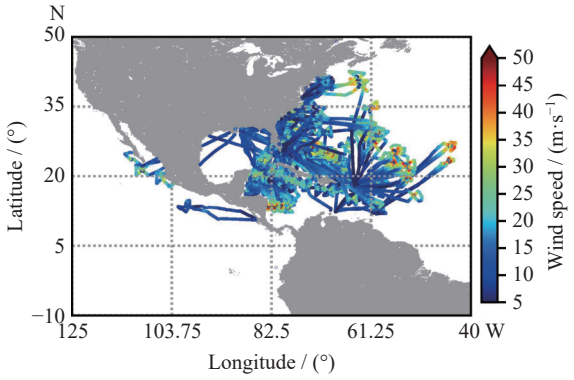


图 1 使用飓风探测航次的轨迹及 SFMR 海面风速

Fig. 1 Geographical distribution of SFMR sea surface wind speeds

系列或欧洲 MetOp 系列微波散射计观测数据交叉定标总体精度均优于 0.1 dB, 且海面风场数据具有较高的一致性[15,16], 因此将同系列不同卫星的散射计数据源合并视为同一数据源。

中国 HY-2 系列微波散射计海面风场反演采用多解反演算法和二维变分模糊解去除方法, 反演中所用地球物理模式函数为 NSCAT-5.HY-2 GMF[17]。中法海洋卫星搭载了首个扇形波束旋转扫描体制的微波散射计, 海面风场反演算法同样采用了多解反演算法和二维变分模糊解去除方法, 其反演中所用地球物理模式函数为 NSCAT-4 GMF[14]。欧洲 MetOp 系列卫星搭载了固定天线类型的微波散射计 ASCAT, 海面风场反演算法采用最大似然估计算法和二维变分模糊解去除方法, 其反演中所用地球物理模式函数为 CMOD7 GMF[13]。空间分辨率是海面风场数据对比分析中的重要影响因素, 为更好地揭示微波散射计共性问题, 选用各微波散射计准实时业务化处理和发布的空间分辨率为 25 km 的海面风场遥感数据。

1.3 微波辐射计

使用欧洲 SMOS 和美国 SMAP 两种微波辐射计海面风速数据, 数据基本信息如表 1 所示。使用的 SMOS 数据由欧空局(European Space Agency, ESA)SMOS 海面风数据服务系统获取, 选用将单日二级沿轨数据进行网格化处理得到的三级日风速数据, 数据为目前最新版本(V300)。尽管 SMOS 原始观测“足印”大小约为 40～50 km, 但三级数据采用 0.25°×0.25°的全球等经纬度地理网格。SMOS 数据文件中还包含质量标识信息, 本研究仅选用质量标识值为 0 的数据, 即剔除了质量等级不够可靠的数据。

使用的 SMAP 数据由美国 RSS(Remote Sensing System)公司处理和发布, 选用重处理的三级网格化(0.25°×0.25°)日风速数据, 数据版本为 V1.0[18]。RSS 在构建 SMAP 海面高风速反演模型时将海表温度作为了重要因子, 并且高风速(>15 $m\cdot s^{-1}$)反演模型仅适用于海表温度高于 25 °C 的海域。基于此, 仅选用 40°S－40°N 范围内的 SMAP 风速数据。SMAP 数据在反演过程中已将质量不可靠的数据设置为无效数值, 因此数据中并无质量标识。

1.4 IBTrACS 数据集

飓风活动资料(时间、中心位置等信息)由国际气候管理最佳路径档案(International Best Track Archive for Climate Stewardship, IBTrACS)数据集提供, 数据源为 NOAA 国家环境信息中心(National Centers for Environmental Information, NCEI), 数据版本为 v04 r00。IBTrACS 每日更新当前活动的全球热带气旋的最佳路径信息, 相同飓风信息的时间间隔为 3 h[19]。在进行 SFMR 与微波散射计和辐射计数据时空匹配时将使用 IBTrACS 提供的飓风中心位置和移动方向等信息。

2 研究方法

2.1 SFMR 风速与空间尺度

热带气旋下海面风场的空间变异性显著, 特别是在 TC 中心位置附近风速梯度大。因此, 空间尺度(即空间分辨率)是影响 TC 海面风速探测结果的真实性检验的重要因素之一。星载微波散射计和辐射

表 1 星载微波散射计和微波辐射计数据基本信息

Table 1 Basic information of space-borne microwave scatterometer and microwave radiometer data

卫星平台	遥感器	遥感器类型	主要波段	卫星降交点(LT)	数据时间(年/月)
MetOp-A	ASCAT-A	散射计	C波段	09:30	2019/01－2021/10
MetOp-B	ASCAT-B	散射计	C波段	09:30	2019/01－2021/11
MetOp-C	ASCAT-C	散射计	C波段	09:30	2019/01－2021/11
CFOSAT	CSCAT	散射计	Ku波段	06:30	2019/01－2021/12
HY-2B	HSCAT-B	散射计	Ku波段	06:00	2019/01－2021/12
HY-2C	HSCAT-C	散射计	Ku波段	不固定	2020/09－2021/12
HY-2D	HSCAT-D	散射计	Ku波段	不固定	2021/05－2021/12
SMAP	SMAP	辐射计	L波段	06:00	2019/01－2021/12
SMOS	SMOS	辐射计	L波段	18:00	2019/01－2021/08

计遥感海面风速的空间分辨率约为 25～40 km, 而 SFMR 探测海面风速的空间分辨率约为 100 m, 在进行 TC 风速对比分析时有必要考虑空间尺度的影响。

将 SFMR 数据进行空间重采样可构建不同空间尺度的 SFMR 风速数据, 进而分析飓风天气下海面风速随观测空间尺度变化的关系。以 101, 201, 301 和 401 s 为时间窗口将每个窗口内 SFMR 数据取平均值, 并把窗口内数据点经纬度取平均值作为新数据的中心位置, 由此可以得到具有不同空间分辨率的 SFMR 数据。重新采样后的 SFMR 数据的空间分辨率约为 10, 20, 30 和 40 km。以 2020 年 10 月 21 日对飓风艾普西隆(Epsilon)的飞行观测数据为例, 图 2 给出了 SFMR 原始分辨率(NO AVG)风速和降雨强度信息、四种空间尺度重采样后的 SFMR 风速、SFMR 重采样时所使用原始分辨率 SFMR 风速的标准差(Standard Deviation, SD), 以及与 SFMR 时空匹配的欧洲 ASCAT 散射计提供的海面风速。

由图 2 可以看出, 原始分辨率的 SFMR 海面风速(黑色实线)随空间位置变化的波动频次高, 在飓风中心位置附近相邻分辨率单元的风速变化幅度最为显著, 幅度可达到 10.0 $m\cdot s^{-1}$; 随着重采样分辨率增大, 飓风最大风速值随之减小并且对应的空间位置略微偏离飓风中心。以该航次数据为例, 原始分辨率和 20 km 分辨率 SFMR 数据给出的最大海面风速分别为 57.7 和 42.4 $m\cdot s^{-1}$, 降低了约 15.3 $m\cdot s^{-1}$; 分辨率为 20 和 40 km 的 SFMR 数据对应的最大风速 SD 分别为 17.7 和 15.5 $m\cdot s^{-1}$, 且对应的空间位置靠近飓风中心; 从图 2 可见, 飓风眼附近降雨强度较大, 极端高风速伴随着强降雨。

基于 SFMR 风速与空间尺度关系的分析结果, 可以预见若使用原始分辨率 SFMR 风速与微波散射计和辐射计风速进行匹配分析则会存在显著的系统误差。为减小空间尺度对风速数据对比的影响, 在进行 SFMR 与微波散射计和辐射计数据时空匹配时, 对落入微波散射计和辐射计风速中心位置 12.5 km 以内的有效(不少于 80 个)SFMR 风速数据取平均值作为 SFMR 风速。

2.2 星载微波散射计和辐射计与 SFMR 数据匹配方法

分别进行微波散射计和辐射计数据与 SFMR 风

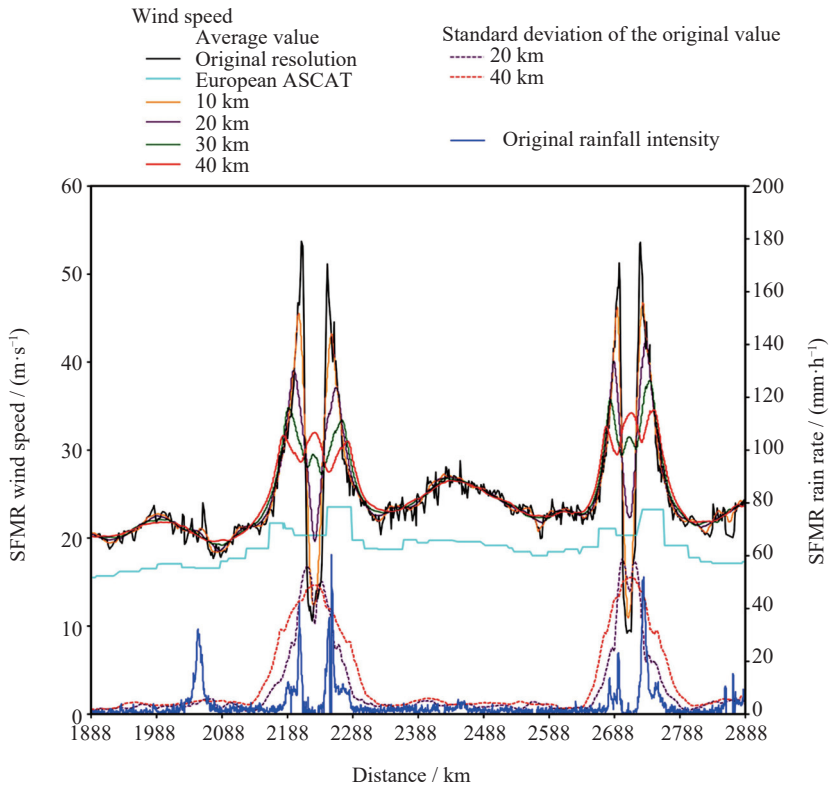


图 2 2020 年 10 月 21 日飓风 Epsilon 的 SFMR 风速

Fig. 2 Observation results of hurricane Epsilon wind speed by SFMR on 21 October 2020

速数据时空匹配, 两者匹配方法一致, 以散射计数据为例介绍匹配方法。现有研究在进行散射计与浮标现场数据匹配时, 匹配原则是限定时间窗口(多为 30 min)并取空间距离最近(不大于散射计分辨率)的数据点。然而, 该匹配方法并不适用于热带气旋下散射计与 SFMR 数据匹配, 主要是因为: 一方面, 有必要通过延长时间窗口来增加匹配数据量, Polverari 等[20]研究认为时间窗口可以延长至 3 h; 另一方面, TC 下海面风速的空间变异性强, 有必要考虑 TC 风场的移动。本研究设定时间窗口为 3 h, 并假设该时间范围内飓风风场的空间分布相对于飓风前进方向不变。基于此, 将 SFMR 平台的地面轨迹与冻结的飓风风场相匹配。为此, 可根据飓风中心位置和前进方向的变化(由 IBTrACS 数据集获取), 将 SFMR 数据空间位置进行平移和旋转, 进而完成 SFMR 与散射计和辐射计数据的时空匹配。设 SFMR 和散射计数据的平均观测时间分别为 T_1 和 T_2, 即便假设飓风风场被冻结, 仍需考虑飓风在两个时刻之间的移动, 包括空间平移和旋转。

SFMR 与微波遥感数据匹配流程如图 3 所示, 详细方法如下。

步骤 1 分别确定 SFMR 和微波散射计观测时刻的飓风中心位置和前进方向。取风速值大小为最高风速值 15% 的 SFMR 数据的平均观测时间为 T_1; 基于 IBTrACS 路径信息采用线性插值方法计算 T_1 时刻飓风的中心位置 L_1 和前进方向 D_1。以 L_1 为中心划定一个 10°×10°的空间范围 A_1, 取落入 A_1 范围内的散射计有效数据的平均观测时间为 T_2; 计算 T_2 时刻的飓风中心位置 L_2 和前进方向 D_2。

步骤 2 将 T_1 时刻的 SFMR 轨迹通过平移和旋转得到等效 T_2 时刻的 SFMR 轨迹。建立极坐标, 以 D_1 为 0 度方向, 顺时针方向为正, 并计算 SFMR 每个观测点相对飓风中心 L_1 的距离 d(km)和方位角 ψ(°)。以 2017 年 9 月 3 日飓风厄玛(Irma)期间 NOAA H1 观测航次为例, 图 4(a)(b) 分别给出了 SFMR 数据在地理坐标和极坐标下的地面轨迹以及观测时间, 图 4(a)中的黑色十字为对应的 L_1。计算 D_2 相对于 D_1 顺时针旋转的角度 θ(°), 将 T_1 时刻

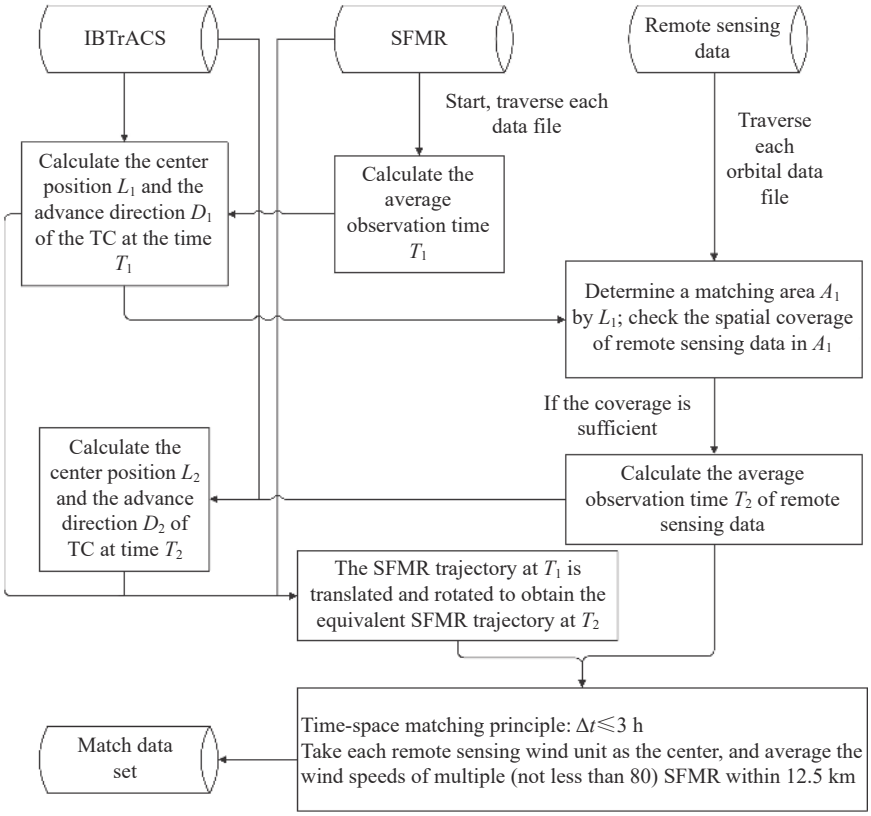


图 3 SFMR 与星载微波遥感数据匹配流程

Fig. 3 Matching process between SFMR and spaceborne microwave remote sensing data

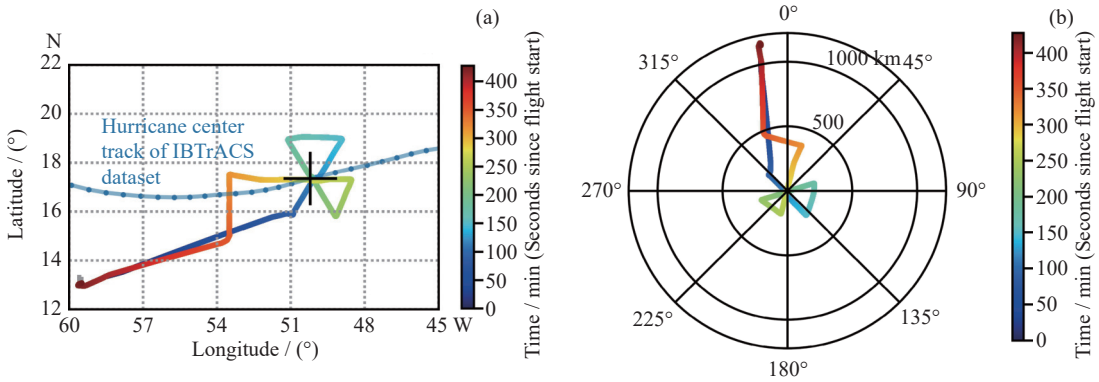


图 4 2017 年 9 月 3 日飓风 Irma 期间 NOAA SFMR170903 H1 航班（彩色线）的地理坐标（a）和极坐标（b）。散点的时间间隔为 3 h，黑色“+”号表示 SFMR 观测时间 T_1 对应的飓风中心位置

Fig. 4 Geographic coordinates (a) and polar coordinates (b) of NOAA SFMR flight 170903 H1 (color line) during Hurricane Irma on 3 September 2017. The time interval of each scatter point is 3 h. The marker “+” indicating the hurricane center at the time of SFMR T_1

SFMR 数据 ψ 都与θ相加，即实现了 SFMR 旋转；以 L_2 为极坐标原点，将 SFMR 轨迹数据从极坐标转化到地理坐标，即得到等效 T_2 时刻的 SFMR 轨迹。

步骤 3 将等效 T_2 时刻的 SFMR 数据与微波散射计数据进行时空匹配。散射计数据仅使用落入 A_1 区域的有效数据，以散射计观测网格点作为配对点坐标，匹配原则为空间距离小于 12.5 km、观测时间差小于 3 h。需要注意的是，如前文 2.1 节所述，对落入散射计数据 12.5 km 以内的有效（不少于 80 个）SFMR 风速和降雨强度数据取平均值作为 SFMR 配对风速和降雨强度，而并非取原始分辨率的风速和降雨强度。

使用 128 个飞行航次的 SFMR 观测数据文件，对每个数据文件遍历步骤 1～3，使每个 SFMR 飞行航次观测数据的空间位置平移和旋转，进而与微波散射计数据配对。

2.3 SMAP 与 SMOS 数据配对方法

2015 年以来美国 SMAP 和欧洲 SMOS 微波辐射计同期在轨运行，且均提供了海面风速遥感数据。由于 SMAP 和 SMOS 数据组织方式均为全球等经纬度网格，地理网格大小为 0.25°×0.25°。为分析 SMAP 和 SMOS 海面高风速（>15 $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$）的一致性，对 2019－2021 年期间 40°S－40°N 范围内的数据进行了时空配对，数据匹配原则主要为：以 SMAP 观测网格作为配对点坐标；观测时间差不大于 30 min；空间位置的经度和纬度差均小于 0.25°；仅保留 SMOS 数据 QC 标识为 0 的数据。

2.4 SMAP 与 HSCAT-B 数据配对方法

美国微波辐射计 SMAP 和中国 HY-2B 卫星 HSCAT-B 微波散射计均提供了海面风速遥感数据，并且两种观测仪器所搭载的卫星的降交点地方时都是上午 6 点，这也意味着两种数据存在较多观测时间，观测位置接近的风速数据，因此本研究对 2019－2021 年期间 40°S－40°N 范围内的两种数据进行了时空匹配。由于 SMAP 数据组织方式为全球等经纬度网格，地理网格大小为 0.25°×0.25°，而 HSCAT-B 是空间分辨率为 25 km 的沿轨数据，本研究的数据匹配原则为：以 SMAP 观测网格作为配对点坐标；观测时间差不大于 30 min；空间位置的经度和纬度差均小于 0.25°；当多个风矢量单元（Wind Vector Cell, WVC）满足配对条件时，选取距离最小的观测点作为配对结果。

3 结果与分析

3.1 微波散射计与 SFMR 比对分析结果

SFMR 与散射计和辐射计数据的匹配结果及基本比对信息列于表 2，表中 RMSE 和 BIAS 分别为风速对比总体数据的均方根误差和偏差，HSCAT 和 ASCAT 分别使用了 HY-2 系列（包括 B, C 和 D 星）、MetOp 系列（包括 A, B 和 C 星）微波散射计数据。由表 2 可以看出，三种散射计（包括 C 波段 ASCAT，以及 Ku 波段 CSCAT 和 HSCAT）相对 SFMR

风速的 RMSE 和 BIAS 都较接近, RMSE 位于区间 7.32～7.82 m·s^{-1}, BIAS 位于区间–4.67～–4.39 m·s^{-1}。

基于 SFMR 与微波散射计配对数据, 绘制海面风速对比的散点密度图, 结果如图 5 所示。由图可见, 当风速小于 15 m·s^{-1} 时, SFMR 与散射计海面风速的总体相关性较高; 当风速大于 15 m·s^{-1} 时, 三种散射计风速相对 SFMR 风速表现出了显著差异。具体而言, 随着 SFMR 风速的增大, C 波段散射计 ASCAT 风速仍然表现出总体增大的分布特点, 而 Ku 波段散射计 CSCAT 和 HSCAT 风速大约于 25 m·s^{-1} 时表现出趋于饱和的分布特点。

为进一步分析降雨对散射计反演风速的影响, 将散射计与 SFMR 配对数据按照平均风速和 SFMR 降雨率进行了数据分组, 分组信息和各组数据统计分析结果如表 3 所示。由表 3 可见, 相同降雨影响情况下(大于或小于 2.1 mm·h^{-1})三种散射计风速相对 SFMR 风速的 RMSE 和 BIAS 均随着风速增大而显著增大。相同风速情况下(分析三个风速区间)三种散射计风速相对 SFMR 风速的 RMSE 和 BIAS 均随降雨强度增大而增大, 但变化幅度显著小于风速变化对应的变化量。

高风速(>25 m·s^{-1})和强降雨(>2.1 mm·h^{-1})情况下三种散射计与 SFMR 匹配数据量均大于 100, 分析结果表明: Ku 波段 CSCAT 和 HSCAT 相对 SFMR 风速的 RMSE 或 BIAS 较为接近, 分别约为 18 和 –17 m·s^{-1}; C 波段 ASCAT 与 SFMR 风速相比的结果略优于 Ku 波段散射计, RMSE 和 BIAS 分别约为 13.7 和–12.4 m·s^{-1}。

3.2 微波辐射计与 SFMR 比对分析结果

SFMR 与辐射计数据的匹配结果及基本比对信息如表 2 所示。总体而言, 辐射计风速比散射计风速更接近 SFMR 风速。基于微波辐射计 SMAP 和 SMOS 与 SFMR 匹配数据, 绘制海面风速对比的散点图, 结果如图 6 所示。由图可见, SMAP 风速与 SFMR 风速总体一致性较好, 各风速区间数据的离散程度也较为一致; 然而, 存在少量风速值相差显著的分布, 且主要表现为 SMAP 风速较 SFMR 风速显著偏高。例如, 当平均风速大于 25 m·s^{-1} 时, 存在 7 个 SMAP 风速异常大于(平均偏差 33.1 m·s^{-1})SFMR 风速的配对结果。具体而言, 辐射计 SMOS 和 SMAP 相对 SFMR 风速的 RMSE 较为接近, 分别为 5.92 和 5.82 m·s^{-1}; 而两者 BIAS 相差显著, 分别为–1.52 和 0.52 m·s^{-1}; 下文 3.3 节将直接比较分析 SMAP 与 SMOS 风速。

表 2 散射计和辐射计与 SFMR 配对数据的总体对比结果

Table 2 Overall comparisons of scatterometer or radiometer and SFMR wind speed

遥感器类型	风速数据源	飓风数量	配对数据量	RMSE/(m·s^{-1})	BIAS/(m·s^{-1})
散射计	HSCAT	18	2126	7.82	–4.67
散射计	CSCAT	14	1234	7.72	–4.39
散射计	ASCAT	16	2739	7.32	–4.40
辐射计	SMOS	9	752	5.92	–1.52
辐射计	SMAP	13	519	5.82	+0.52

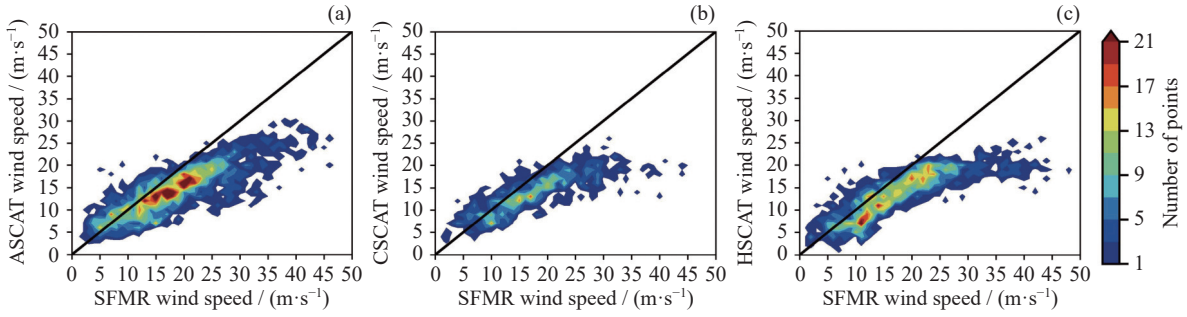


图 5 SFMR 与 ASCAT, CSCAT, HSCAT 匹配结果散点密度

Fig. 5 Scatter plot of wind speeds from matched SFMR and ASCAT, CSCAT, HSCAT

表 3 不同风速和降雨强度区间散射计与 SFMR 风速对比结果

Table 3 Comparisons of scatterometer and SFMR wind speed under different wind speed and rainfall intensity conditions

风速数据源	平均风速/(m·s^{-1})	降雨强度≤2.1 mm·h^{-1}			降雨强度>2.1 mm·h^{-1}		
		配对数据量	RMSE/(m·s^{-1})	BIAS/(m·s^{-1})	配对数据量	RMSE/(m·s^{-1})	BIAS/(m·s^{-1})
ASCAT	$v\leqslant15$	960	4.21	–1.11	215	3.82	–0.97
	$15<v\leqslant25$	566	6.70	–4.65	659	7.65	–6.07
	$v>25$	38	12.31	–10.42	301	13.74	–12.44
CSCAT	$v\leqslant15$	466	3.60	–0.56	98	4.18	–1.64
	$15<v\leqslant25$	273	6.48	–4.68	273	8.18	–6.62
	$v>25$	8	7.90	–6.77	116	17.48	–16.06
HSCAT	$v\leqslant15$	919	3.65	–1.49	82	4.98	+0.60
	$15<v\leqslant25$	463	5.64	–4.18	433	7.54	–6.30
	$v>25$	25	14.48	–13.47	204	18.66	–17.71

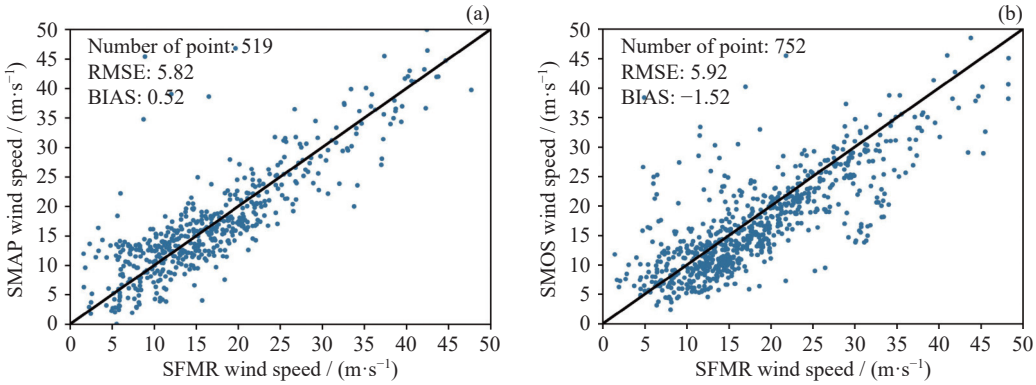


图 6 SFMR 与 SMAP，SMOS 风速对比

Fig. 6 Comparison of SFMR with SMAP and SMOS wind speed

进一步对比分析不同风速区间的辐射计与 SFMR 风速，统计分析结果如表 4 所示。在各风速区间，SMOS 风速总体均低于 SFMR 风速，风速偏差位于区间–2.97～–1.06 m·s^{-1}；SMAP 与 SFMR 风速相比的总体偏差随风速变化的幅度较大，这与匹配数据量和极端离散点的存在有关，配对结果中风速大于 25 m·s^{-1} 的数量只有 87 个，但是却存在 7 个 SMAP 风速异常大于(平均偏差 33.1 m·s^{-1})SFMR 风速的配对结果，导致风速大于 25 m·s^{-1} 时 SMAP 风速整体偏高于 SFMR 的程度上升明显。

3.3 SMAP 与 SMOS 比对分析结果

基于中低纬区域(40°S－40°N)的 SMAP 和 SMOS 配对数据集，绘制海面风速对比散点密度图，结果如图 7 所示。为清楚表达高风速下匹配数据点的分布情况，将平均风速高于 15 m·s^{-1} 的数据分布采用了不同的颜色棒绘图表达。中低风速(≤15 m·s^{-1})情况下，两者风速的 RMSE 和 BIAS 分别为 1.31 和 0.07 m·s^{-1}；而在高风速(>15 m·s^{-1})情况下，两者风速的 RMSE 和 BIAS 分别为 1.05 和 –0.21 m·s^{-1}。

3.4 SMAP 与 HSCAT-B 比对分析结果

基于中低纬区域(40°S－40°N)的 SMAP 和 HY-2B 卫星 HSCAT-B 散射计配对数据集，绘制海面风速对比的散点密度图，结果如图 8 所示。为清楚表达高风速下匹配数据点的分布情况，将平均风速高于 15 m·s^{-1} 的数据分布采用了不同的颜色棒绘图表达。中低风速(≤15 m·s^{-1})情况下，两者风速的 RMSE 和 BIAS 分别为 1.76 和 –0.18 m·s^{-1}；尽管中低风速区间两者风速一致性较好，但风速差超过 5 m·s^{-1} 的数据

表 4　不同平均风速区间 SFMR 分别与 SMOS 和 SMAP 风速对比结果

Table 4　Comparison results of SFMR with SMOS and SMAP in different average wind speed intervals

风速数据源	风速/(m·s^{-1})	配对数据量	RMSE/(m·s^{-1})	BIAS/(m·s^{-1})
SMAP	$v\leqslant15$	257	4.27	0.56
	$15<v\leqslant25$	175	4.09	–0.48
	$v>25$	87	10.70	2.40
SMOS	$v\leqslant15$	339	4.45	–1.06
	$15<v\leqslant25$	274	6.75	–1.35
	$v>25$	139	7.18	–2.97

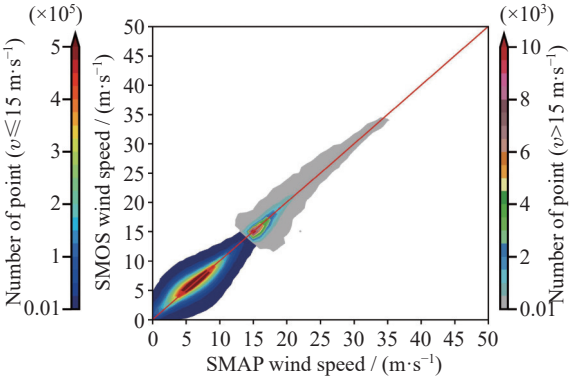


图 7　SMAP 与 SMOS 风速对比的散点密度

Fig. 7　Comparison of SMAP and SMOS wind speeds

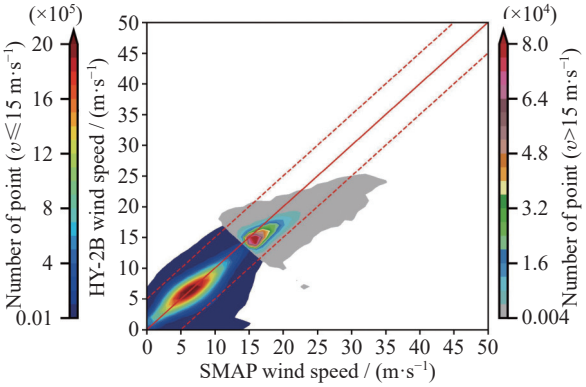


图 8　SMAP 与 HSCAT-B 风速对比的散点密度

Fig. 8　Comparison of SMAP and HSCAT-B wind speeds

分布较为显著。而在高风速(>15 m·s^{-1})情况下,两者风速的 RMSE 和 BIAS 分别为 2.47 和 –1.51 m·s^{-1}。与上文分析结果一致,HSCAT-B 风速高于 25 m·s^{-1} 时表现出了趋于饱和的分布特点。

4　结论

飓风天气下机载 SFMR 提供的海面风速被认为较为可靠,且较为广泛地用于星载微波遥感反演模型的定标。分析了微波散射计和微波辐射计海面风速分别与 SFMR 风速比对分析的结果。首先探讨了飓风下 SFMR 风速随空间尺度的变化关系;总体而言,飓风最大风速随空间尺度增大而减小。在考虑飓风下海面风场时空变异性强的前提下,论文提出了散射计和辐射计数据与 SFMR 数据的配对方法。该方法假设在某段时间范围内 TC 风场的空间分布相对于飓风前进方向不变,根据 IBTrACS 的 TC 中心路径信息将 SFMR 轨迹转换成风暴运动相对坐标,有效地将 SFMR 与散射计和辐射计海面风速数据的匹配时间差延长到 3 h。尽管因为 TC 中心地理位置不精确以及 SFMR 和卫星遥感数据之间的时间差会导致配对误差,配对结果仍然能展示出散射计和辐射计的偏差特征。基于 SFMR、散射计和辐射计数据之间的配对数据,分析表明高风速(>15 m·s^{-1})情况下辐射计(SMAP 和 SMOS)比散射计风速更接近于 SFMR 风速,散射计风速鲜有大于 30 m·s^{-1}。在高风速(>15 m·s^{-1})情况下,辐射计 SMAP 和 SMOS 提供海面风速的一致性较好,两者风速的 RMSE 和 BIAS 分别为 1.38 和 0.41 m·s^{-1}。

总体而言,高风速下辐射计风速比散射计风速更接近于 SFMR 风速。随着 SFMR 风速的增大,C 波段散射计 ASCAT 风速仍然表现出总体增大的分布特点,而 Ku 波段散射计 CSCAT 和 HSCAT 风速大约于 25 m·s^{-1} 时表现出趋于饱和的分布特点。进一步分析了不同风速和降雨率区间散射计风速与

SFMR 风速的比对情况，结果表明相同降雨影响情况下三种散射计（ASCAT, CSCAT, HSCAT）风速相对 SFMR 风速的 RMSE 和 BIAS 均随着风速增大而显著增大；相同风速情况下三种散射计风速相对 SFMR 风速的 RMSE 和 BIAS 均随降雨率增大而增大，但降雨影响引起的风速差异显著小于风速变化引起的风速差异。

所使用的配对方法有效增加了 SFMR 与散射计和辐射计的配对数据量，但由于星载微波遥感数据的空间分辨率为 25 km，并且配对方法限定了配对区域的大小，导致高风速匹配数据量仍然不够充足，易受极端偏离点的影响。

分析了不同探测技术提供的热带气旋海面风速的一致性，重点考虑了风速数据时空表征差异，后续研究可以分析不同数据源在风速物理意义的差异对一致性分析结果的贡献。

参考文献

[1] MEISSNER T, RICCIARDULLI L, WENTZ F J. Capability of the SMAP mission to measure ocean surface winds in storms[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2017, **98**(8): 1660-1677

[2] REUL N, CHAPRON B, ZABOLOTSKIKH E, *et al*. A revised L-band radio-brightness sensitivity to extreme winds under tropical cyclones: the five year SMOS-storm database[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, **180**: 274-291

[3] SAPP J W, ALSWEISS S O, JELENAK Z, *et al*. Stepped frequency microwave radiometer wind-speed retrieval improvements[J]. *Remote Sensing*, 2019, **11**(3): 214

[4] RICCIARDULLI L, FOLTZ G R, MANASTER A, *et al*. Assessment of saildrone extreme wind measurements in hurricane Sam using MW satellite sensors[J]. *Remote Sensing*, 2022, **14**(12): 2726

[5] TIAN D, ZHANG H, WANG S, *et al*. Sea surface wind structure in the outer region of tropical cyclones observed by wave gliders[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2023, **128**(3): e2022JD037235

[6] LIU Siqi, LIN Wenming, WANG Zhixiong, *et al*. Determination of tropical cyclone location and intensity using HY-2B scatterometer data[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2021, **43**(11): 146-156 (刘思琦, 林文明, 王志雄, 等. 基于 HY-2B 散射计的热带气旋定位定强研究 [J]. 海洋学报, 2021, **43**(11): 146-156)

[7] UHLHORN E W, BLACK P G, FRANKLIN J L, *et al*. Hurricane surface wind measurements from an operational stepped frequency microwave radiometer[J]. *Monthly Weather Review*, 2007, **135**(9): 3070-3085

[8] POLVERARI F, SAPP J W, PORTABELLA M, *et al*. On dropsonde surface-adjusted winds and their use for the stepped frequency microwave radiometer wind speed calibration[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, **60**: 4208308

[9] WENTZ F J, SMITH D K. A model function for the ocean-normalized radar cross section at 14 GHz derived from NSCAT observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1999, **104**(C5): 11499-11514

[10] RICCIARDULLI L, WENTZ F J. A scatterometer geophysical model function for climate-quality winds: QuikSCAT Ku-2011[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2015, **32**(10): 1829-1846

[11] SOISUVARN S, JELENAK Z, CHANG P S, *et al*. CMOD5. H— a high wind geophysical model function for C-band vertically polarized satellite scatterometer measurements[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, **51**(6): 3744-3760

[12] GOHIL B S, SIKHAKOLLI R, GANGWAR R K. Development of geophysical model functions for oceansat-2 scatterometer[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, **10**(2): 377-380

[13] STOFFELEN A, VERSPEEK J A, VOGELZANG J, *et al*. The CMOD7 geophysical model function for ASCAT and ERS wind retrievals[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, **10**(5): 2123-2134

[14] LIU J Q, LIN W M, DONG X L, *et al*. First results from the rotating fan beam scatterometer onboard CFOSAT[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, **58**(12): 8793-8806

[15] RICCIARDULLI L, MANASTER A. Intercalibration of ASCAT scatterometer winds from MetOp-A, -B, and -C, for a stable climate data record[J]. *Remote Sensing*, 2021, **13**(18): 3678

[16] WANG Z X, ZOU J H, ZHANG Y G, *et al*. Intercalibration of backscatter measurements among Ku-band Scatterometers onboard the Chinese HY-2 satellite constellation[J]. *Remote Sensing*, 2021, **13**(23): 4783

[17] WANG Zhixiong, ZOU Juhong, LIN Mingsen, *et al*. Development of a geophysical model function for HY-2 satellite microwave scatterometer wind retrievals[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2023, **27**(4): 871-880 (王志雄, 邹巨洪, 林明森, 等. HY-2 卫星微波散射计海面风场地球物理模式函数研究 [J]. 遥感学报, 2023, **27**(4): 871-880)

[18] MEISSNER T, RICCIARDULLI L, MANASTER A. Tropical cyclone wind speeds from WindSat, AMSR and SMAP: algorithm development and testing[J]. *Remote Sensing*, 2021, **13**(9): 1641

[19] SCHRECK III C J, KNAPP K R, KOSSIN J P. The impact of best track discrepancies on global tropical cyclone climatologies using IBTrACS[J]. *Monthly Weather Review*, 2014, **142**(10): 3881-3899

[20] POLVERARI F, PORTABELLA M, LIN W M, *et al*. On high and extreme wind calibration using ASCAT[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, **60**: 4202210