

LANG Shuyan, HU Weiping, LI Xiuzhong, LI Yuyang, ZHAO Xinhua. Validation and Discrepancy Analysis of Sea Surface Mean Square Slope Measured by SWIM and CYGNSS (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2026, 46(3): 718–725. CSTR:32142.14.cjss.2025-0076. DOI:10.11728/cjss2026.03.2025-0076

基于卫星遥感的海浪斜率方差验证 与差异原因分析*

郎姝燕^{1,3} 胡晔平² 李秀仲^{2,3}
李雨阳² 赵新华⁴

1(国家卫星海洋应用中心 北京 100081)

2(南京信息工程大学海洋科学学院 南京 210044)

3(自然资源部空间海洋遥感与应用重点实验室 北京 100081)

4(江苏海洋大学 江苏省海洋资源开发研究院 连云港 222001)

摘要 海面斜率方差 MSS (Mean Square Slope) 是海洋微波遥感领域表征海面粗糙度的关键参数, 对研究海气耦合过程及海洋气象监测意义重大. 对中法海洋卫星 CFOSAT (China France Oceanography Satellite) 搭载的海浪波谱仪 SWIM (Surface Waves Investigation and Monitoring) 和旋风全球卫星导航系统 CYGNSS (Cyclone Global Navigation Satellite System) 反演的 MSS 展开对比分析. SWIM 通过拟合不同入射角和方位角下的二维归一化雷达后向散射截面反演 MSS, CYGNSS 则在初步观测基础上减去一个校正量以获取局地风引起的 MSS. 对 2023 年 1 月数据进行时空匹配后进行直接对比, 发现小风速下 SWIM 反演的 MSS 大于 CYGNSS, 而风速超过约 $7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, CYGNSS 的 MSS 大于 SWIM 反演的 MSS, 这主要归因于二者微波波段不同及 CYGNSS 反演过程中减去涌浪产生的 MSS 校正量. 利用 Elfouhaily 谱模型对 SWIM MSS 校正后, 二者平均偏差约为 0.03, 随机均方误差为 0.0323, 此误差源于涌浪产生的 MSS 及截止波长差异. 研究结果明确了两种星载传感器反演 MSS 的差异与误差来源, 为 MSS 数据校准及后续海洋研究与应用提供了重要参考.

关键词 海面斜率方差, 微波遥感, 中法海洋卫星, 海浪波谱仪, 旋风全球卫星导航系统

中图分类号 P71

Validation and Discrepancy Analysis of Sea Surface Mean Square Slope Measured by SWIM and CYGNSS

LANG Shuyan^{1,3} HU Weiping² LI Xiuzhong^{2,3}
LI Yuyang² ZHAO Xinhua⁴

1(National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081)

* 国家自然科学基金重大项目 (42192531) 和山东省自然科学基金项目 (ZR202102240074) 共同资助

2025-05-12 收到原稿, 2025-09-03 收到修定稿

©The Author(s) 2026. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

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

3(Key Laboratory of Space Ocean Remote Sensing and Applications, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081)

4(Jiangsu Marine Resources Development Research Institute, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222001)

Abstract The Mean Square Slope (MSS) of the sea surface is a key parameter for characterizing sea surface roughness in the field of marine microwave remote sensing, and it is of great significance for studying the air-sea coupling process and marine meteorological monitoring. This paper conducts a comparative analysis of the MSS retrieved by the Surface Waves Investigation and Monitoring (SWIM) on the China-France Oceanography Satellite (CFOSAT) and the Cyclone Global Navigation Satellite System (CYGNSS). SWIM retrieves the MSS by fitting the two-dimensional normalized radar backscatter cross-section under different incident angles and azimuth angles. CYGNSS obtains the MSS caused by local winds by subtracting a correction amount on the basis of preliminary observations. In this paper, after collocating the data from SWIM and CYGNSS in January 2023, a direct comparison has been made. It is found that the MSS derived from SWIM is higher than that retrieved by CYGNSS under low wind speeds, while when the wind speed exceeds approximately $7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, the MSS derived from CYGNSS is higher than that given by SWIM. This is mainly attributed to the differences in the microwave bands of the two and the correction amount of the MSS generated by swell subtracted during the retrieval process of CYGNSS. After correcting the SWIM MSS using the Elfouhaily spectrum model, the bias between the two is approximately 0.03, and the random root mean square error is 0.0323. This error is caused by the MSS generated by swell and the differences in the cutoff wavelength. The research results clarify the differences and error sources of the MSS retrieved by the two spaceborne sensors, providing an important reference for the calibration of MSS data and subsequent marine research and applications.

Key words Sea surface mean square slope, Microwave remote sensing, CFOSAT, Surface Waves Investigation and Monitoring (SWIM), Cyclone Global Navigation Satellite System (CYGNSS)

0 引言

在大气运动的持续驱动下, 海洋表面始终处于动态变化之中, 形成了不同尺度的波浪起伏. 海面斜率方差 (Mean Square Slope, MSS) 作为表征海面粗糙度的核心参数, 能够定量刻画海面的不规则程度与动态演变特征, 与海浪生长、传播以及海面风速的变化密切相关^[1-4]. 精确获取 MSS 数据对于深入研究波-波相互作用、海气耦合过程以及海洋气象监测等领域具有关键意义.

在海洋微波遥感领域, 微波传感器发射的电磁波与海面发生相互作用时, 海面粗糙度会显著影响电磁波的散射与反射特性^[5,6]. 作为海面粗糙度的直接度量, MSS 直接影响雷达后向散射截面 (Radar Cross-Section, RCS) 这一重要参数^[7]. 而高度计与散射计风速测量原理就是利用 RCS 与风速的经验关系^[8,9]. 因此准确获取 MSS, 有助于揭示电磁散射的物理机制,

进而提高风速反演的精度与可靠性. 另外, 辐射计盐度反演的精度在考虑了 MSS 的影响后, 也得到了显著提高^[10].

随着海洋微波遥感技术的不断发展, 大量星载微波传感器, 例如合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR)、散射计和高度计等, 被广泛应用于海洋观测. 由于 MSS 无法直接观测, 一般是利用微波传感器获取的 RCS, 结合相关的海面散射模型来反演 MSS^[11-13]. 目前, 能够反演海面斜率方差的星载雷达传感器有 SAR, GPM (Global Precipitation Measurement) 和 TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) 卫星搭载的降雨雷达 (Precipitation Radar, PR)、中法海洋卫星 CFOSAT (China France Oceanography Satellite) 搭载的海浪波谱仪 SWIM (Surface Waves Investigation and Monitoring) 以及旋风全球卫星导航系统 CYGNSS (Cyclone Global Navigation Satellite System) 搭载的延迟多普勒标测

仪 DDMI (Delay Doppler Mapping Instrument). 然而, 受限于微波频段特性及传感器技术参数, 各传感器对海面斜率的探测存在波长阈值, 无法捕捉波长低于特定值的海面波动, 因而仅能获取特定波长范围内的 MSS 数据^[14].

不同传感器工作波段的差异, 导致各卫星反演的 MSS 数值存在偏差. 例如 SAR 能测量截断波长 150 m 以上的海浪谱, 进而可以获取截断波长的 MSS^[15]. GPM 和 TRMM 均可以测量某一方位向的 MSS^[11,16]. 目前, 能提供业务化 MSS 全球数据的数据仅有 CYGNSS. 本文对 CYGNSS 卫星数据与 SWIM 观测结果所反演的 MSS 进行对比分析. 通过对不同卫星观测的海面斜率数据开展交叉验证, 能够系统分析探测手段与反演方法引入的误差来源, 为 MSS 数据校准提供依据, 进而提升数据的准确性与可靠性, 为后续海洋研究与应用提供准确的数据支撑.

1 数据

1.1 SWIM 二维 NRCS 数据

SWIM 是搭载于 CFOSAT 上的一个多波束真实孔径雷达, 工作波段为 Ku 波段 (13.575 GHz), 具有 6 个不同入射角 (分别为 0°, 2°, 4°, 6°, 8° 和 10°) 的探测波束. 其侧波束 (非 0° 波束) 具备旋转探测的特性, 使 SWIM 可获取不同入射角和方位角下的归一化雷达后向散射截面 (Normalized Radar Cross-Section, NRCS), 即二维 NRCS 数据. SWIM 二维 NRCS 数据为星下点轨道在左右两侧垂直距离 90 km、沿轨距离 70 km 范围内的侧波束观测结果, 因此星下点轨道左右两侧 90 km×70 km 的区域合并后即为 SWIM L2 数据的空间单元 (SWIM 数据中称之为 box)^[17]. 此外, SWIM 二级数据的每个 box 所对应的 ECMWF 风速可从数据中直接获取, 该风速是通过时空线性插值得到的. 使用的 SWIM 数据为 2023 年 1 月 6.0.1 版本的 L2 数据.

1.2 CYGNSS L2 数据

CYGNSS 是由 NASA 研发的一个用于监测热带气旋的卫星系统, 共由 8 颗低轨卫星组成. CYGNSS 中的每颗卫星均能够同时测量 4 个反射信号, 这样在全球范围内每秒可进行 32 次风速测量. 其每个观测卫星均能通过所配备的延迟-多普勒测绘仪 DDMI,

接收来自 GPS 卫星的直接信号, 以及 38°N—38°S 范围内经海面散射后的 GPS 信号, 并利用直接信号可精确定位观测卫星的位置. 其对反射信号的时延和多普勒频移进行选择滤波之后, 可根据信号功率计算延迟多普勒图谱, 以此反演 RCS 以及 MSS, 进而实现对海面风速的反演^[18,19]. 利用空间采样生成的 CYGNSS L2 数据由 32 个“扫描带”组成, 每个扫描带宽为 25 km. 使用的 CYGNSS 数据为 2023 年 1 月 3.2 版本的 L2 数据.

2 方法

2.1 SWIM 数据反演 MSS 方法

SWIM L2 数据中包含了二维 NRCS, 因此需要对二维 NRCS 进行一定处理, 才能得到 SWIM 所观测的 MSS. SWIM 观测的 NRCS 可近似用准镜面散射模型表示^[20], 其表达式为

$$\sigma_0^{\text{SW}}(\theta) = \frac{|R_{\text{eff}}(0)|^2}{\sigma_{\text{SW}}^2 \cos^4 \theta} \exp\left(-\frac{\tan^2 \theta}{\sigma_{\text{SW}}^2}\right). \quad (1)$$

其中, σ_0^{SW} 为 SWIM 测量的 NRCS, θ 为入射角, $R_{\text{eff}}(0)$ 为有效 Fresnel 反射系数, σ_{SW}^2 为 SWIM 观测的 MSS. 理论上利用空间同一位置不同入射角下的 σ_0^{SW} 即可拟合出 MSS. 然而, 实际上当入射角大于 0° 时, σ_0^{SW} 会随雷达观测方位发生变化, 导致 MSS 也会随雷达观测方位发生变化, 因此, 根据式(1)仅能计算单个方位角处的部分斜率方差. 准确反演 σ_{SW}^2 需要考虑多个方位下的 σ_0^{SW} , 需要考虑波的各向异性^[12], 则 $\sigma_0^{\text{SW}}(\theta)$ 具有以下形式:

$$\sigma_0^{\text{SW}}(\theta) = \frac{|R_{\text{eff}}(0)|^2}{2 \cos^4 \theta \sqrt{\sigma_{xx}^2 \sigma_{yy}^2 - \sigma_{xy}^2}} \exp\left[-\frac{\tan^2 \theta}{2(\sigma_{xx}^2 \sigma_{yy}^2 - \sigma_{xy}^2)} \sigma_{yy}^2\right]. \quad (2)$$

式(2)将总斜率方差分解为沿雷达观测方位的部分斜率方差 σ_{xx}^2 和垂直于雷达观测方位的部分斜率方差 σ_{yy}^2 , σ_{xy}^2 是沿雷达观测方向和垂直于雷达观测方向的斜率之间的未归一化相关系数. 为了简化拟合过程, 将式(2)两边取对数, 有

$$\sigma_0^{\text{SW}}(\text{dB}) + \frac{10}{\ln 10} \ln(\cos^4 \theta) = A_0 + B_0 \tan^2 \theta. \quad (3)$$

其中,

$$A_0 = 10 \times \lg \left(\frac{|R_{\text{eff}}(0)|^2}{2\sqrt{\sigma_{xx}^2 \sigma_{yy}^2 - \sigma_{xy}^2}} \right) = \sigma_0^{\text{SW}} (\text{dB}), \quad (4)$$

$$B_0 = -\frac{\sigma_{yy}^2}{2(\sigma_{xx}^2 \sigma_{yy}^2 - \sigma_{xy}^2)} 10 \times \lg e. \quad (5)$$

σ_{xy}^2 远小于 σ_{xx}^2 和 σ_{yy}^2 , 相比于 $\sigma_{xx}^2 \sigma_{yy}^2$, σ_{xy}^2 可以忽略不计^[12], 则式(5)可化简为

$$B_0 \approx -\frac{1}{2\sigma_{xx}^2} 10 \times \lg e. \quad (6)$$

SWIM 二级数据已经对 box 范围内 24 个不同方位下的 NRCS 廓线进行了拟合, 对于每个方位均可得到一对 A_0 与 B_0 的值, 并且可在数据中直接读取. 根据式(6)可以得到 24 个不同方位下的 σ_{xx} , 那么由 SWIM 观测的总斜率方差为

$$\sigma_{\text{SW}}^2 = \sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2. \quad (7)$$

SWIM 可以获取雷达观测中心方向, σ_{xx} 随着雷达观测方位变化且服从以下规律:

$$\sigma_{xx}^2(\phi) = 0.5\sigma_{\text{SW}}^2 + 0.5\Delta\sigma \cdot \cos(2\phi - 2\phi). \quad (8)$$

其中, ϕ 为雷达观测方位角, $\Delta\sigma = \max(\sigma_{xx}^2) - \min(\sigma_{yy}^2)$, φ 为海浪传播方向. 根据式(8)将 24 对 σ_{xx}^2 与 ϕ 拟合, 即可估计反演出总斜率方差 σ_{SW}^2 . 该方法对单一风浪或者涌浪主导的海况比较准确, 然而实际上海面会有少部分风浪和涌浪成分占比相差不大的情况出现, 这种情况会导致 SWIM 数据存在少量观测数据 σ_{xx}^2 与 ϕ 并不符合式(8), 在处理过程中舍去了拟合优度较低的数据.

2.2 CYGNSS 数据反演 MSS 方法

CYGNSS L2 数据中可直接读取 MSS, 该参数表示由局地风引起的 MSS, 并非海面总斜率方差. 这里对 CYGNSS L2 数据中 MSS 的反演方法进行简要分析, 从而明确其与 SWIM 观测的 MSS 的具体差异.

在几何光学模型近似下^[21], CYGNSS 测量的 NRCS 形式为

$$\sigma_0^{\text{CY}}(\theta) = \frac{|R(\theta)|^2}{\sigma_{\text{CY}}^2}. \quad (9)$$

其中, σ_0^{CY} 为 CYGNSS 测量的 NRCS; $R(\theta)$ 表示左旋圆极化复 Fresnel 反射系数, 其由入射角 θ 和海水介电常数 ε 决定; σ_{CY}^2 为 CYGNSS 初步观测的 MSS. 然而, 在 CYGNSS L2 数据中可读取到的斜率方差参数并不是式(9)中 σ_{CY}^2 所表示的 MSS, 而是经进一步处理后

的由局地风引起的 MSS. 根据风浪谱理论, 卫星或浮标获取的海浪谱 $\Psi(k)$ 为局地风浪谱 $\Psi(k)_{\text{local}}$ 与涌浪谱 $\Psi(k)_{\text{swell}}$ 的和^[22], 可表示为

$$\Psi(k) = \Psi(k)_{\text{local}} + \Psi(k)_{\text{swell}}. \quad (10)$$

由于 CYGNSS 数据的最终目的是准确获取真实的海面风速, 而涌浪的存在对于风速的反演是一个不利因素, Wang^[23] 对 CYGNSS L2 数据风场反演算法提出了一种改进方法, 旨在将反演得到的 MSS 中排除任何非本地产生的涌浪以及有限风区效应的影响. 该方法是通过从 CYGNSS 观测到的 MSS 中减去一个校正量 (即非局地风产生的 MSS) 来实现的, 该校正量可表示为

$$\Delta\sigma^2 = \sigma_{\text{WW}}^2 - \sigma_{\text{FD}}^2. \quad (11)$$

其中, σ_{WW}^2 为 WW3 模式计算出的 MSS, σ_{FD}^2 则为在风浪充分发展假设下 (逆波龄为 0.84), 由 Elfouhaily 风浪谱模型^[24] 计算的 MSS. 该校正量代表了与局地风无关的海面长波的 MSS, 进而 CYGNSS L2 数据的 MSS 被修正为

$$\tilde{\sigma}_{\text{CY}}^2 = \sigma_{\text{CY}}^2 - \Delta\sigma^2. \quad (12)$$

综上, CYGNSS L2 数据中所读取的 MSS 实际是波长从 CYGNSS 截止波长到一定值范围内的海面斜率方差, 而 SWIM 所观测的 MSS 则是波长从 SWIM 截止频率到正无穷的海面斜率方差, 二者间存在较大差异.

2.3 MSS 与风速的经验函数

风吹过海面时, 大气流动所产生的切应力会将能量传递给海水, 使海面发生起伏. 风速越大, 风应力越强, 大气传递给海水的能量越多, 激发的海面波动也更为显著, MSS 即会随之增大. 经典的描述海面坡度统计特性的 Cox-Munk 模型^[25] 认为, 无论是仅存在重力波的低通滤波表面, 还是包含毛细波的粗糙表面, 其 MSS 与海面 10 m 处风速均呈线性相关关系. 在仅存在重力波的低通滤波表面下, Ku 波段 MSS 与风速 v 的关系可以表示为

$$\sigma_{\text{CM}}^2 = C_0 + C_1 v. \quad (13)$$

其中, $C_0 = 0.0160$, $C_1 = 0.0016$. 研究发现, 在低风速下, MSS 的增加趋势并不像 Cox-Munk 模型中线性关系所描述的那样迅速, 且在高风速下, MSS 随着风速的增加会更加显著. Wu^[26,27] 对 Cox-Munk 模型

进行了修正, 认为 MSS 与风速的对数存在函数关系, 可以表示为

$$\sigma_{wu}^2 = W_0 + W_1 \lg v. \quad (14)$$

Freilich 和 Vanhoff^[11] 利用 Ku 波段的 TRMM 降雨雷达观测数据对式(14)中的系数进行了估计. 结果表明, 在风速低于 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, $W_0 = 0.0036$, $W_1 = 0.0280$; 在风速高于 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, $W_0 = -0.0184$, $W_1 = 0.0500$.

另外, Katzberg^[28] 利用海面反射的 GPS 信号数据计算了 L 波段 MSS 与风速的经验关系, 其认为 L 波段 MSS 在低风速下与风速呈线性关系, 在高风速下与风速的对数存在相关关系, 可表示为

$$\sigma_{KB}^2 = \begin{cases} 0.0035(v + 0.62), & v \leq 3.49 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}; \\ 0.0035(6 \ln v - 3.39), & v > 3.49 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}. \end{cases} \quad (15)$$

3 结果

SWIM 二级数据的空间分辨率大于 CYGNSS 的空间分辨率, 这里对 SWIM 二级数据 box 中心 50 km 范围内、观测时间 1 h 以内 CYGNSS 观测点数据进行插值, 共得到 6741 对匹配数据集.

图 1 为利用 SWIM 二级数据参数所计算的 SWIM MSS 与 ECMWF 风速的散点图. 由图 1 可以看出, SWIM MSS 与 Cox-Munk 线性模型以及 Freilich and Vanhoff^[11] 得到的 Ku 波段 MSS 与风速的经验函数关系基本一致, 但是在风速超过约 $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 经验模型给出的结果要高于 SWIM 观测结果的均值. 这是由于 Cox-Munk 模型采用了光学手

段. 为了防止利用经验函数校正时产生偏差, 这里利用 SWIM 的观测结果对式(13)重新拟合, 得到 $C_0 = 0.0151$, $C_1 = 0.0016$; 对式(14)重新拟合, 得到风速低于 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 条件下 $W_0 = 0.0096$, $W_1 = 0.0204$, 风速高于 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 条件下 $W_0 = -0.0205$, $W_1 = 0.0505$. 图 2 为 CYGNSS MSS 与 ECMWF 风速的散点图. 可以看出, 匹配的 CYGNSS MSS 与 ECMWF 风速散点图与 Katzberg^[28] 给出的经验模型一致性较好. 此外, 利用 CYGNSS 的观测结果对式(13)进行重新拟合, 得到系数 $C_0 = 0.0065$, $C_1 = 0.0029$, 如图 2 中虚线所示. 该线性经验函数计算的 MSS 在风速超过 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时与 Katzberg^[28] 的经验模型存在较大差异.

根据 2.1 节和 2.2 节对 SWIM 与 CYGNSS 各自 MSS 反演方法的阐述, 虽然二者均是根据雷达后向散射系数来计算 MSS, 但 CYGNSS 二级数据中的 MSS 经过了额外的校正处理. 另外, SWIM 与 CYGNSS 使用的微波波段不同, 也会导致他们各自获取的 MSS 有所差异. 一般情况下, 小入射角真实孔径雷达测量的是海浪波长大于 $3\sim 6$ 倍雷达波长的海面斜率. SWIM 使用 Ku 波段进行观测, 其探测波长约为 2 cm , 因此能够测量波长大于约 0.1 m 的海面斜率. 根据 Wang^[23] 的研究结果, CYGNSS 所反演的 MSS 截止波数在 $4\sim 12 \text{ rad}\cdot\text{m}^{-1}$ 之间, 也就是说 CYGNSS 能够测量波长大于约 0.5 m 的海面斜率. 综上, 两个雷达的工作波段不同以及 MSS 计算方法的不同共同导致了最终如图 3 所示的结果. 由于前面已经通过式(13)~(15)得到了 SWIM 与 CYGNSS 的 MSS 和风速的经验关系, 可以根据线性经验函数

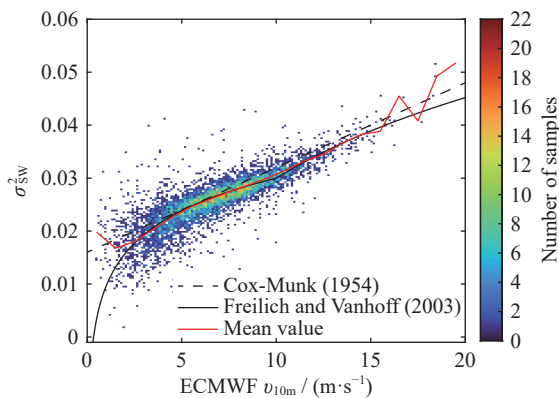


图 1 SWIM MSS 随风速的变化

Fig. 1 Dependence of SWIM MSS on wind speed

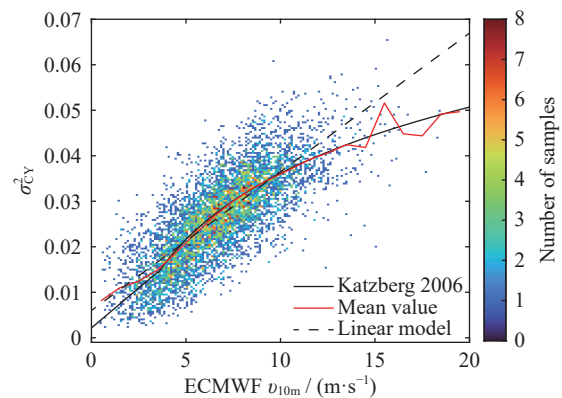


图 2 CYGNSS MSS 随风速的变化

Fig. 2 Dependence of CYGNSS MSS on wind speed

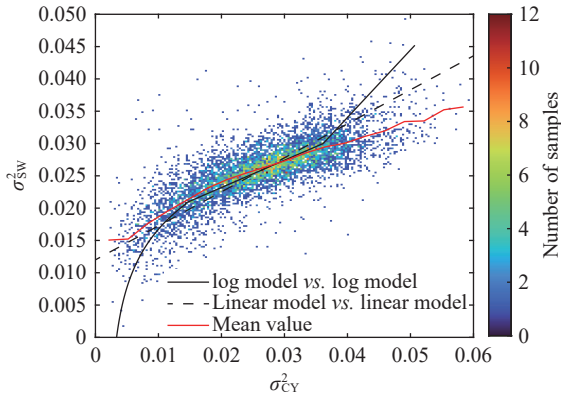


图3 SWIM 与 CYGNSS 海面斜率方差对比
Fig. 3 Comparison between SWIM and CYGNSS MSS

和对数经验函数估计给定风速条件下二者的 MSS, 从而绘制图 3 中的黑色实线与虚线. 从图 3 可以看出, 在风速超过约 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 由对数经验函数计算的 MSS 的对比结果与实际的对比结果一致性较差, 这可能是大风速条件下海面波浪破碎导致 MSS 与风速的关系变得更加复杂, 二者的非线性关系变得更加显著, 而以上经验关系并未考虑到波浪破碎的影响. 图 4 给出了 CYGNSS 与 SWIM 的 MSS 之差随风速大小的变化, 从图 4 可以看出, 在风速小于约 $7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, CYGNSS 的 MSS 要低于 SWIM 的 MSS, 二者之间的差距随风速上升逐渐减小. 当风速继续增大时, CYGNSS 的 MSS 开始超过 SWIM 的 MSS. 风速超过 $11 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 后, 线性经验函数与对数经验函数的对比结果开始出现显著差异. 相比而言, 对数经验函数的对比结果更接近于二者之差的统计平均值.

然而根据理论的海浪谱模型, MSS 可表示为波数从 0 至截止波数的斜率谱的积分, 由于 SWIM 雷达波段频率高于 CYGNSS 雷达波段频率, 理论上 SWIM 的 MSS 应高于 CYGNSS 的 MSS. 但由于 CYGNSS 的 MSS 经过额外的处理, 并且实际海况较为复杂, 理论的海浪谱模型相比实际海浪谱仍存在一定差距, 本文仅利用了 MSS 与风速的经验函数关系对匹配数据集中的 SWIM 的 MSS 进行了校正, 再将二者进行对比, 得到一个经验性的对比结果, 如图 5 所示. 图 5(a) 为利用线性经验函数校正后的对比结果, 图 5(b) 为利用对数经验函数校正后的对比结果, 根据两种不同经验函数校正后, SWIM 与 CYGNSS 的 MSS 基本一致, 二者的随机均方误差约为 0.006.

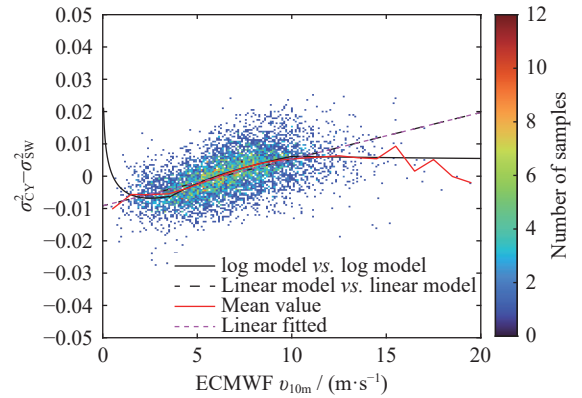


图4 SWIM 与 CYGNSS MSS 之差随风速的变化
Fig. 4 Dependence of the difference between SWIM and CYGNSS MSS on wind speed

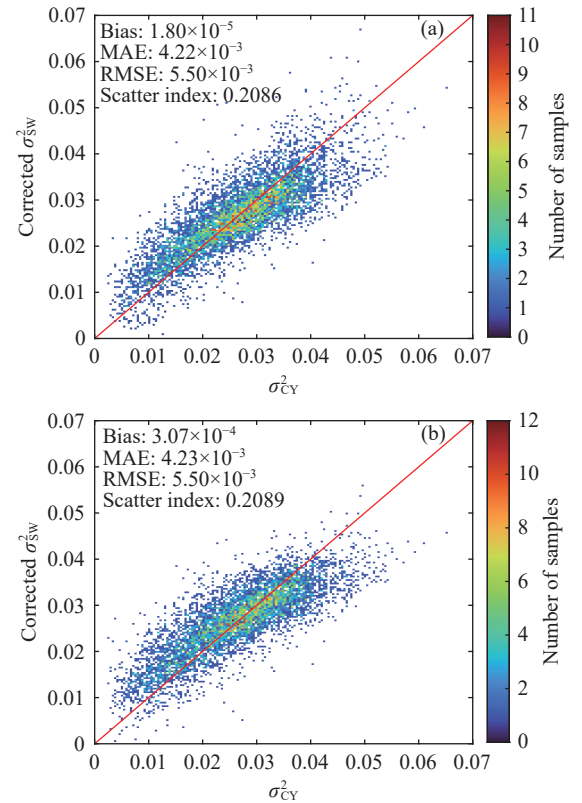


图5 校正后的 SWIM MSS 与 CYGNSS MSS 对比.
(a) 利用线性经验关系, (b) 利用对数经验关系

Fig. 5 Comparison between SWIM and CYGNSS MSS after calibration. (a) Using linear empirical relationship, (b) using logarithmic empirical relationship

4 结语

海面斜率方差 MSS, 作为一个能够量化海面粗

糙程度的参数,在海面微波遥感领域具有重要的应用价值.中法海洋卫星 CFOSAT 搭载的海浪波谱仪 SWIM 与美国 CYGNSS 卫星系统均能反演 MSS,但其技术原理与数据特性存在显著差异.中法海洋卫星上搭载的海浪波谱仪 SWIM 通过借助不同方位角下所观测的 NRCS 廓线来实现对 MSS 的反演,而 CYGNSS 基于被动接收 GPS 信号散射的延迟多普勒图谱来实现对 MSS 的反演,其 L2 数据经校正后仅保留由局地风所导致的 MSS.因此在选取 MSS 数据对于海面风浪关系研究时,应根据实际情况的需要选取不同的 MSS 观测数据.

利用已有的 MSS 与风速的经验关系对 SWIM 和 CYGNSS 的 MSS 进行分析,利用式(13)~(15)对二者的实际观测结果进行拟合,借助 MSS 与风速的经验关系开展由 SWIM 数据所反演的 MSS 与 CYGNSS 数据中读取的 MSS 的对比分析.其直接对比分析结果显示,由于二者工作波段的不同以及 MSS 估计方法的差异,在小风速情况下,SWIM 的 MSS 略高于 CYGNSS;风速超过 $7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 后, CYGNSS 的 MSS 开始超过 SWIMDE 的 MSS.通过 MSS 与风速的经验函数对 SWIM 数据校正后,二者随机均方误差为 0.0060.

未来对于 MSS 以及风浪关系的研究中,应考虑到风浪发展状态对于 MSS 的影响,可以结合实测波龄数据,动态优化复杂海况下局地风致 MSS 的反演精度.并且对于不同微波波段之间所观测的 MSS 之间的差异,还需要更多遥感实测数据的对比以及进一步的研究.

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突.

参考文献

- [1] LI S Q, ZHAO D L, ZHOU L M, *et al.* Dependence of mean square slope on wave state and its application in altimeter wind speed retrieval[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, **34**(1): 264-275
- [2] ROMERO L, LUBANA K. On the bimodality of the wind-wave spectrum: mean square slopes and azimuthal overlap integral[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2022, **52**(7): 1549-1562
- [3] ZHONG Y Z, CHIEN H, CHANG H M, *et al.* Ocean wind observation based on the mean square slope using a self-developed miniature wave buoy[J]. *Sensors*, 2022, **22**(19): 7210
- [4] HWANG P A. Ocean surface roughness from satellite observations and spectrum modeling of wind waves[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2022, **52**(9): 2143-2158
- [5] GUO M D, CHEN K S, YANG Y, *et al.* Effective surface roughness in radar ocean backscattering[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, **61**: 2004113
- [6] XIE D F, GUO F. Quantitative evaluation of the effects of large-scale sea wave components on microwave backscattering from ocean surface[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2022, **15**: 5853-5864
- [7] LIU Y G, SU M Y, YAN X H, *et al.* The mean-square slope of ocean surface waves and its effects on radar backscatter[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2000, **17**(8): 1092-1105
- [8] SHARONI S M H, REBA M N M, LIM H S. Improved tropical cyclone wind speed estimation for microwave altimeter using machine learning[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2024, **301**: 113961
- [9] ZHANG Y, ZHAO X Y, YANG S H, *et al.* Research on sea surface wind speed FM based on CYGNSS and HY-2B microwave scatterometer[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2024, **62**: 1-15
- [10] GARRISON J L, VOO J K, YUEH S H, *et al.* Estimation of sea surface roughness effects in microwave radiometric measurements of salinity using reflected global navigation satellite system signals[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, **8**(6): 1170-1174
- [11] FREILICH M H, VANHOFF B A. The relationship between winds, surface roughness, and radar backscatter at low incidence angles from TRMM precipitation radar measurements[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2003, **20**(4): 549-562
- [12] LI X Z, KARAEV V, PANFILOVA M, *et al.* Measurements of total sea surface mean square slope field based on SWIM data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, **60**: 5114109
- [13] SCHULER D L, LEE J S, KASILINGAM D, *et al.* Measurement of ocean surface slopes and wave spectra using polarimetric SAR image data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, **91**(2): 198-211
- [14] MONALDO F, DOBSON E. On using significant wave height and radar cross section to improve radar altimeter measurements of wind speed[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1989, **94**(C9): 12699-12701
- [15] BAO L W, ZHANG X, CAO C H, *et al.* Impact of polarization basis on wind and wave parameters estimation using the azimuth cutoff from GF-3 SAR imagery[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, **60**:

- 5234716
- [16] HOSSAN A, JONES WL. Ku- and Ka-band ocean surface radar backscatter model functions at low-incidence angles using full-swath GPM DPR data[J]. *Remote Sensing*, 2021, **13**(8): 1569
- [17] HAUSER D, TOURAIN C, HERMOZO L, *et al.* New observations from the SWIM radar on-board CFOSAT: instrument validation and ocean wave measurement assessment[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, **59**(1): 5-26
- [18] BU J W, YU K G. A new integrated method of CYGNSS DDMA and LES measurements for significant wave height estimation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, **19**: 1505605
- [19] CHRIS R. CYGNSS Handbook[M/OL]. (2022-04-01)[2024-04-20]. <https://www.fulcrum.org/concern/monographs/g445cg50v?locale=en>
- [20] VALENZUELA G R. Theories for the interaction of electromagnetic and oceanic waves — a review[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1978, **13**(1): 61-85
- [21] BARRICK D. Rough surface scattering based on the specular point theory[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1968, **16**(4): 449-454
- [22] BU J W, YU K G, NI J, *et al.* Combining ERA5 data and CYGNSS observations for the joint retrieval of global significant wave height of ocean swell and wind wave: a deep convolutional neural network approach[J]. *Journal of Geodesy*, 2023, **97**(8): 81
- [23] WANG T L, ZAVOROTNY V U, JOHNSON J, *et al.* Modeling of sea state conditions for improvement of CYGNSS L2 wind speed retrievals[C]//IGARSS 2018 - 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Valencia, Spain: IEEE, 2018: 8288-8291
- [24] ELFOUHAILY T, CHAPRON B, KATSAROS K, *et al.* A unified directional spectrum for long and short wind-driven waves[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1997, **102**(C7): 15781-15796
- [25] COX C, MUNK W. Statistics of the sea surface derived from sun glitter[J]. *Journal of Marine Research*, 1954, **13**(2): 198-227
- [26] WU J. Sea-surface slope and equilibrium wind-wave spectra[J]. *Physics of Fluids*, 1972, **15**(5): 741-747
- [27] WU J. Mean square slopes of the wind-disturbed water surface, their magnitude, directionality, and composition[J]. *Radio Science*, 1990, **25**(1): 37-48
- [28] KATZBERG S J, TORRES O, GANOE G. Calibration of reflected GPS for tropical storm wind speed retrievals[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, **33**(18): L18602

作者简介



郎姝燕 女, 1983 年出生于山西, 硕士, 现为国家卫星海洋应用中心研究员, 主要研究方向为海洋遥感。

E-mail: langshuyan@mail.nsoas.org.cn



李秀仲 (通信作者) 男, 1985 年出生于山东, 博士, 现为南京信息工程大学海洋科学学院副教授、硕士生导师, 主要研究方向为海洋微波遥感。

E-mail: lixuzhong@nuist.edu.cn