

海表温度对中法海洋卫星散射计测量的影响*

赵晓康¹ 林文明^{1,2} 王志雄^{1,2} 何宜军^{1,2}

1(南京信息工程大学海洋科学学院 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 卫星散射计通过测量海表粗糙度反演全球海面风场。对于 Ku 波段散射计,海表粗糙不仅和海面风场相关,还受海表温度的二阶效应调制。定量研究了海表温度对中法海洋卫星(CFOSAT)散射计(CSCAT)反演风速和后向散射测量的影响。结果表明,CSCAT 两种极化方式测量的后向散射系数都会受到海表温度的影响,但是垂直极化中低入射角($\theta < 36^\circ$)测量的后向散射系数几乎不随温度变化。因此 CSCAT 的风速偏差也随海表温度的变化而变化,且随着入射角的增大和风速的减小,海表温度对风速偏差的影响程度增大。在数据分析的基础上提出了一种考虑海表温度影响机制的地球物理模式函数,为未来 CFOSAT 散射计风场反演的海温校正提供参考。

关键词 中法海洋卫星,散射计,海表温度,雷达后向散射系数,地球物理模式函数

中图分类号 P732

Effects of Sea Surface Temperature on the CFOSAT Scatterometer Measurements

ZHAO Xiaokang¹ LIN Wenming^{1,2} WANG Zhixiong^{1,2} HE Yijun^{1,2}

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

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

Abstract Satellite scatterometer is designed to retrieve global sea surface winds by measuring the sea surface roughness. For Ku-band scatterometers, the sea surface roughness is not only affected by winds, but also by certain secondary effect, namely Sea Surface Temperature (SST). This paper presents a quantitative analysis of the SST effects on the China-France Oceanography Satellite (CFOSAT) scatterometer (CSCAT) backscatter measurements and wind retrievals. The results show that the backscatter coefficients measured by CSCAT vertically and horizontally polarized beams are both effected by SST, while for vertically polarized beams, the SST effect is nearly negligible at moderate and low inci-

* 国家自然科学基金项目资助(41706197, 42027805)

2022-02-15 收到原稿, 2022-11-09 收到修定稿

E-mail: 20191209013@nuist.edu.cn. 通信作者 林文明, E-mail: wenminglin@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/>)

dence angles ($\theta < 36^\circ$). Consequently, the wind speed bias of CSCAT also changes along with SST, *e.g.*, large SST-induced bias is associated with high incidence angles and/or low wind speed conditions. Finally, an SST-dependence Geophysical Model Function (GMF) is proposed, which opens a door for further improving the quality of CFOSAT scatterometer wind products.

Key words China-France Oceanography Satellite (CFOSAT), Scatterometer, Sea Surface Temperature (SST), Radar backscatter coefficient, Geophysical Model Function (GMF)

0 引言

自 1978 年全球第一个业务化星载微波散射计 SASS 运行以来,经过 40 多年的发展,散射计测风技术已趋于成熟,散射计遥感风场因具有近实时观测和时空分辨率较高的特点广泛应用于气象学和海洋学的研究和应用中^[1]。目前为止,散射计主要工作在 C 和 Ku 波段,基于特定的地球物理模式函数(Geophysical Model Function, GMF)反演海面 10 m 风^[2,3]。中国于 2018 年 10 月 29 日发射的中法海洋卫星(CFOSAT)搭载了散射计和波谱仪两种载荷,其中 CFOSAT 散射计载荷(CSCAT)是自主设计的全球第一款 Ku 波段的扇形波束旋转扫描体制散射计,具有双极化、多角度测量的特点,能够提供高分辨率、高精度的海面风场数据^[4,5]。但是,散射计在测量海表风场时,往往会受到复杂海况、降雨、海表温度和盐度等因素的影响,其中海表温度(Sea Surface Temperature, SST)对散射计海面风场测量有重要影响。

Liu^[6]对比了 SASS 和船舶走航测量的数据,分析了海表温度对散射计风场测量的影响,但由于数据量的限制并没有实施更深入的研究。随着散射计载荷数量和类型的增加,借助于不同散射计匹配的长时序和全覆盖的数据集,海表温度对散射计测量的影响逐渐清晰。研究人员利用 QuikSCAT 和 ASCAT 大量的匹配数据,详细描绘了海表温度对散射计风速偏差的影响特征^[7,8]。Bentamy 等^[9]结合雷达成像模型和匹配的 QuikSCAT 和 ASCAT-A 数据,进一步研究了海表温度对雷达后向散射的直接影响,结果表明海水动力黏滞系数是 QuikSCAT 和 ASCAT-A 风速差异重要因素。Wang 等^[10,11]研究了海表温度导致的雷达后向散射系数变化,表明海表温度对散射计风场的影响取决于散射计工作频率、极化和入射角,其中 Ku 波段对海表温度依赖显著, C 波段受到的影响可忽略不计。Chen 等^[12]的研究结果与之类似。

实际上,在风驱动海面波浪生长的过程中,海表温度通过影响海水黏滞系数、海表张力和海水介电常数等参数影响散射计对海表小尺度毛细重力波后向散射的测量^[13]。首先,海水黏滞系数主要与海表温度和海表盐度有关,后者的变化很小,因此海表温度是主要影响因素。海水动力黏滞系数影响海表波浪的能量耗散,最终影响海面短重力波和毛细波的等短波海浪的分布,根据 Sharqawy 等^[14]提出的估算模型, 0℃ 海水的动力黏滞系数是 30℃ 海水的两倍。其次,随着海表温度的增大海水表面张力减小,风对海表的拖曳力度减弱,波浪增长速率和测量的后向散射减小^[15]。最后,海水的介电常数是海表温度和微波频率的函数。与 C 波段散射计相比, Ku 波段的介电常数对海温变化更为敏感,因此其后向散射测量更容易受海表温度影响^[16]。此外, Ku 波段散射计后向散射测量随海表温度变化的趋势与极化和入射角也有关。

由此推测,海表温度对 CSCAT 后向散射测量及其风场反演的影响不可忽略。本文旨在阐明不同入射角、极化方式和风速等条件下,海表温度对 CSCAT 测量的影响机制,进而获得一种能够用于校正海表温度影响风场反演的地球物理模式函数。通过对 CSCAT 二级数据、温度数据和风场数据进行时空匹配,分析了海表温度对 CSCAT 风场及后向散射系数的影响特征。在现有的 NSCAT-4 模型的基础上,提出了一种考虑海表温度影响的地球物理模式函数。

1 数据方法

为了全面分析海表温度对 CSCAT 的影响,采用 CSCAT 二级数据、欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)的再分析温度数据和风场数据研究海表温度的影响机制与散射计各参数的相关性。基于以上数据形成两种匹配数据集,其中 CSCAT

L2 B 和海表温度的匹配数据集(2020 年全年)用于研究海表温度对反演风速的影响, CSCAT L2 A, L2 B 和海表温度匹配数据集(2020 年 2—3 月)用于研究海表温度对雷达后向散射测量的影响。匹配数据经过严格的降雨标识和质量控制, 数据剔除率约 20%。

1.1 CSCAT 二级数据

CFOSAT 散射计二级数据包含 L2 A 和 L2 B 两种数据, 分辨率均为 $25\text{ km}\times 25\text{ km}$, 其中 L2 A 是经过预处理、几何定位和面元匹配的数据, 包含后向散射(σ^0)、天线方位角、入射角、风单元质量标识、大气衰减和后向散射标识等参数。L2 A 每轨数据维度为 $16\times 1720\times 42$, 即每轨数据最多有 1720×42 个风单元, 每个风单元最多有 16 次测量, 对应不同入射角和方位角。L2 B 包含反演风速、风向、背景风场、质量标识等信息。

1.2 ECMWF 风场与海表温度数据

ECMWF 风场是同化了多源卫星遥感数据和观测数据的全球海面 10 m 高度的风场数据。分析采用的 ECMWF 风场有两种, 一是 CSCAT 数据中的背景风场(CECMWF), 在 CSCAT 前期数据处理中已完成时空插值和匹配, 表示海面 10 m 高度的真实风场; 二是 ASCAT 数据中的背景风场(AECMWF), 在 ASCAT 数据处理中已转换为海面 10 m 高度的等效应力风数据^[17]。海表温度数据是由哥白尼海洋环

境监测服务中心(CMEMS)提供的 ECMWF 再分析数据, 网格分辨率为 $0.25^\circ\times 0.25^\circ$ 、时间分辨率为 24 h^[18]。与 ECMWF 风场一样, 海表温度数据也通过时空插值与 CSCAT 观测数据相匹配, 图 1 给出了匹配数据集的年平均海表温度在全球 $1^\circ\times 1^\circ$ 网格中分布。

2 海表温度对 CSCAT 风场测量的影响

ASCAT 风场数据是目前在轨的精度最高的散射计^[2], 其风场精度几乎不受海表温度和降雨的影响^[19,20], 因此本文采用 ASCAT-A 25 km 分辨率的风场数据验证 CSCAT 和 ECMWF 风场质量。图 2 给出了 CSCAT, ASCAT 和 ECMWF 两两对比的风速偏差和各自的风速概率密度函数(PDF)。值得注意的是, 由于 CSCAT 和 ASCAT 的本地过境时间相差 2.5 h, 匹配数据主要集中在中高纬度区域, 两者的风速差异要略大于以往研究结果。整体来看这四种风速概率密度分布接近。具体而言, ASCAT 风速比 CSCAT 高 $0.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右, 比 CECMWF 高 $0.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。CSCAT 与 CECMWF 风速相比, 在 $3\sim 19\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 区间整体误差低于 $0.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 两者具有良好的一致性。

基于一年的匹配数据集, 分析了 CSCAT 相对 CECMWF 的风速偏差全球的分布情况(见图 3)。在

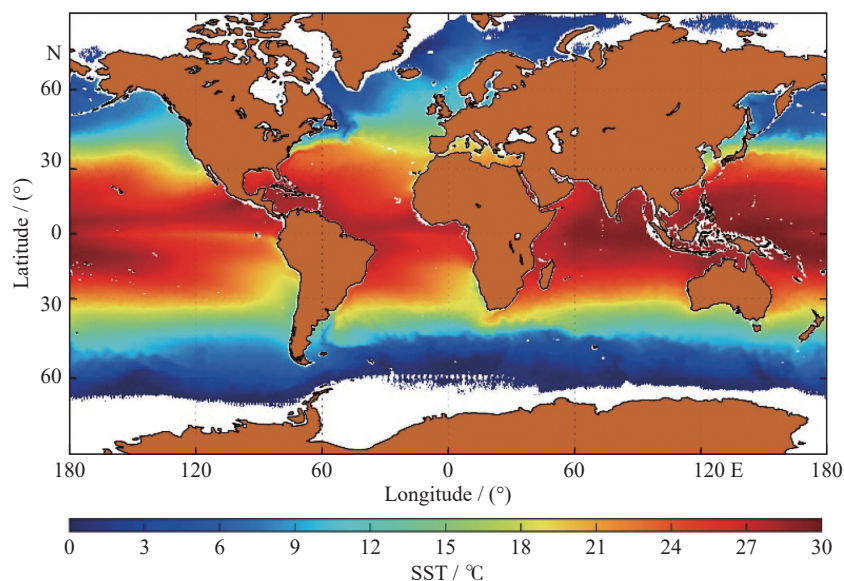


图 1 在 $1^\circ\times 1^\circ$ 全球网格中匹配数据集的年平均海表温度

Fig. 1 Annual mean Sea Surface Temperature (SST) on a $1^\circ\times 1^\circ$ grid

中低纬度, CSCAT 风速呈现出正偏差, 而在高纬度冷水区域则呈负偏差。值得注意的是, 在热带辐合带, 由于强对流天气的存在, 该区域易受降雨和风异变等非海温因素的影响, 风速偏差波动较大。图 4 显示高风速平均温度低, 低风速平均温度高(见黑实线), 因此在统计分析意义上, 由于风速随海表温度的全球分布特征, 导致反演风速的偏差不自然地与海表温度相关。为了减少风速偏差的影响, 在进一步开展海表温

度敏感性分析之前, 有必要进行整体的风速校正, 将整个风速范围内的 CSCAT-CECMWF 风速偏差降为零。CSACT 风速用 v_C 表示, CECMWF 风速用 v_E 表示, 两者的风速平均差异用 Δv_{CE} 表示, 即

$$\Delta v_{CE} = \bar{v}_C - \bar{v}_E. \quad (1)$$

将 Δv_{CE} 加到 ECMWF 风速得到校正后的 ECMWF 风速, 有

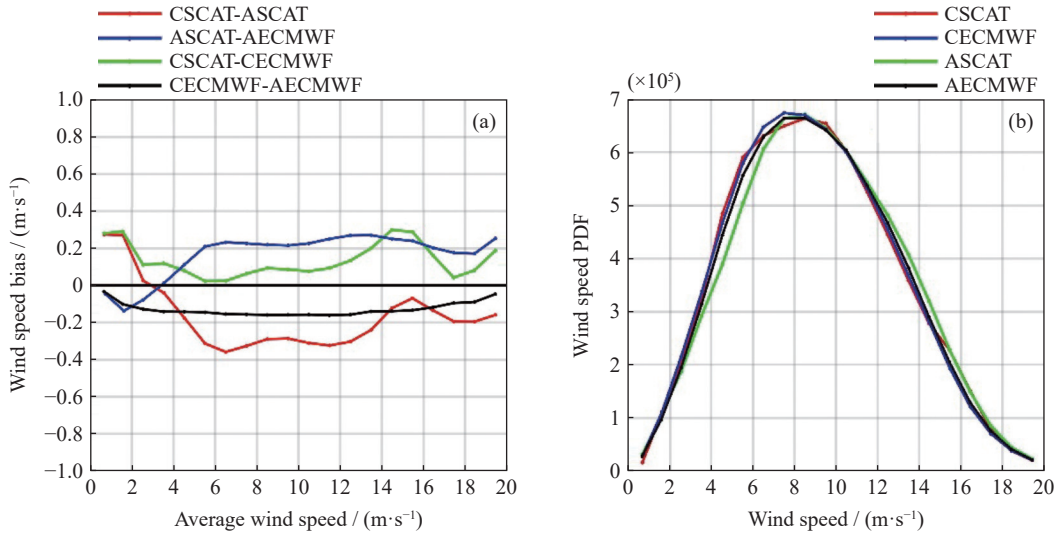


图 2 CSCAT 和 ASCAT 与对应 ECMWF 风速的偏差 (a) 及风速概率密度函数 (b)

Fig. 2 Wind speed differences between CSCAT, ASCAT and ECMWF(a) and the wind speed Probability Density Function (PDF) (b)

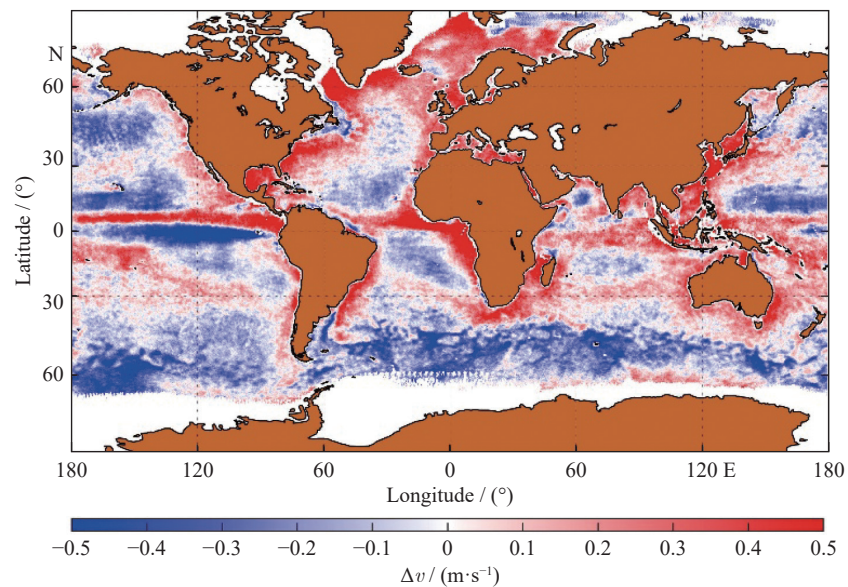


图 3 在 $1^\circ \times 1^\circ$ 全球网格上匹配数据集的平均风速偏差

Fig. 3 Mean wind speed difference between CSCAT and ECMWF, the grid size is of $1^\circ \times 1^\circ$

$$v'_E = v_E + \Delta v_{CE}. \quad (2)$$

由此 CSCAT 相对 ECMWF 风速偏差定义为

$$\Delta v'_{CE} = v_C - v'_E. \quad (3)$$

最后使用 v_C 和 v'_E 的平均值 (即 $v = (v_C + v'_E)/2$) 来划分风速区间, 研究海表温度对风速的影响。

图 4 给出了刈幅不同位置风矢量单元的 $\Delta v'_{CE}$ 随平均风速 v 和海表温度的变化情况, 风速偏差表现出对风速和海表温度的双重依赖性。给定风速区间, 风速偏差与海表温度近似呈线性关系。风速 $7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 海表温度引起的 CSCAT 风速偏差达到最大值; 风速大于 $14 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 海表温度对风速偏差的影响较小。这可能是因为海面风场产生的布拉格散射与海水黏滞系数和海表张力相关。风速较大时, 风浪发生破碎, 海表后向散射对温度依赖性降低, 即风速越大, 波浪破碎导致海表温度对散射计后向散射测量的影响越小。对比图 4(a) 和图 4(b) 可以看出, 刈幅远端 (大入射角测量, $\theta > 43^\circ$) 的风速偏差对温度变化更加敏感, 低温区域 CSCAT 的风速负偏差 ($-0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) 高于刈幅中间位置的风速偏差。图 4 中右上角高温、高风速区域的负偏差则归因为两方面。其一, 尽管质量控制能够较好地剔除降雨污染的数据, 如何有效区分反演的高风速和强降雨仍是 Ku 波段散射计处理的难点^[21], 因此研究所用的数据仍可能有部分数据受降雨影响 (特别是在热带区域)。其二, 高风速条件下, 强

降雨对 Ku 波段电磁波的衰减效应导致 CSCAT 测量的后向散射系数小于海面真实的后向散射系数, 因此反演的风速小于真实 (或模式) 的风速^[22]。

通过分析风速偏差在刈幅不同位置随平均风速和平均海表温度的变化特征可以发现, 海表温度对 CSCAT 风的影响主要是在低温产生抑制作用, 在高温有一定增强, 这种影响随风速、入射角和海表温度变化。

3 海表温度对 CSCAT 后向散射系数测量的影响

调查后向散射系数 (NRCS, σ^0) 对风速、入射角、极化方式和海表温度的依赖特征, 基于 NSCAT-4 揭示 CSCAT 后向散射系数对海表温度的依赖关系。需要注意的是, 本研究未考虑风向的影响, 在 Wang 等^[10] 的研究中已经说明由海温效应引起的后向散射系数的变化是与风向无关的。正如预期的那样, 在图 5 中采用 NSCAT-4 仿真 (以下仿真均以 v'_E 为风速输入) 的 σ^0 对海表温度未表现出依赖特性, 但是在低温 (海表温度 $< 6^\circ\text{C}$) 出现微小的变化, 这可能与风速分布对海表温度的依赖有关 (见图 4 黑实线), 虽然经过了校正, 但这种特征无法完全消除。

对于多入射角, 垂直极化测量的 σ^0 的整体上不受

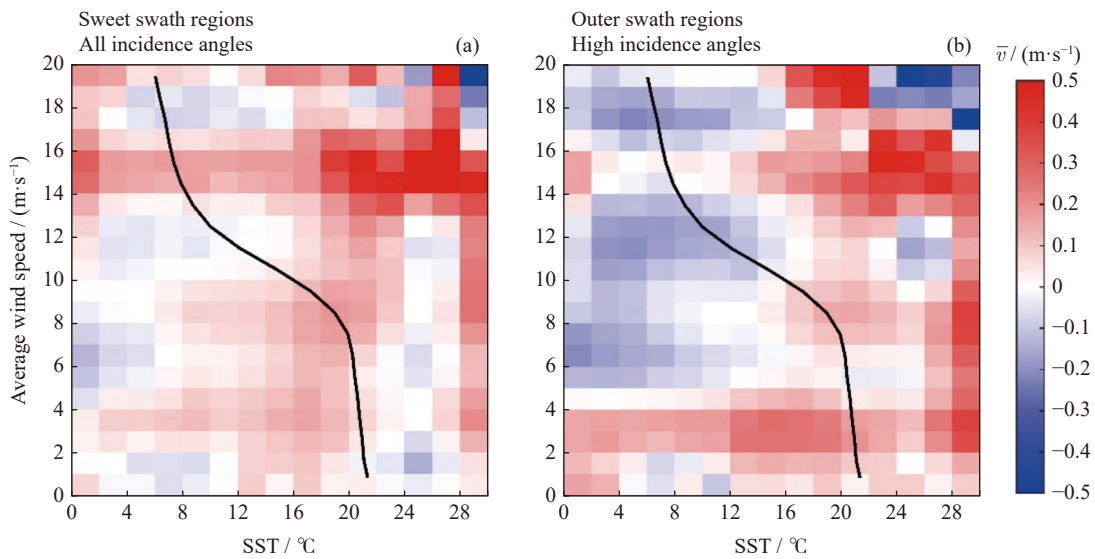


图 4 $\Delta v'_{CE}$ 随海表温度和平均风速的变化。黑实线代表每个风速区间的平均海表温度

Fig. 4 $\Delta v'_{CE}$ as a function of Sea Surface Temperature (SST) and mean wind speed. Black line depicts the mean SST at each wind speed bin

海表温度的影响, 水平极化测量的 σ^0 受海表温度的调制明显, 在低温区域要高于 NSCAT-4 仿真值, 在高温区域低于仿真值(见图 5a)。而对于大入射角, 两种极化方式测量的 σ^0 均表现了对海表温度的依赖特性, 但变化趋势完全相反, 随海表温度的增加, 垂直极化测量的后向散射系数增大, 水平极化测量的后向散射系数减小(见图 5b)。需要注意的是, 在与热带地区相对应的暖水区域(海表温度 $> 24^\circ\text{C}$), σ^0 出现了意外的跃变, 然而从海表张力和海水黏度系数物理机制来看, 可以认为海表温度变化并不会引起这种跃变。综合上节风场偏差在某些单元的异变, 基本可以判断这种变化不是海温效应引起的, 而可能是由于与湿对流相关的效应造成的污染, 如风单元异变或降雨。

通过计算 CSCAT 测量和 NSCAT-4 仿真的 σ^0 偏差进一步量化海表温度在不同区间对 CSCAT 后向散射测量的影响。 $\Delta\sigma^0$ 计算方式如下:

$$\Delta\sigma^0 = \sigma_m^0 - \sigma_s^0. \quad (4)$$

因为地球物理模式函数是基于特定参考风速对应的平均后向散射系数生产的, 而参考风速是通过全球采样统计获得的, 因此理论上在全球范围内整体的 $\Delta\sigma^0$ 应为 0 dB。本文对比了匹配数据集 CSCAT 测量的后向散射 σ_m^0 和仿真的后向散射 σ_s^0 , 结果表明垂直极化整体偏差为 -0.18 dB, 水平极化整体偏差为 -0.31 dB。通常期望应该是无偏的, 但实际上 σ_s^0 整体要低于 σ_m^0 , 因此值得注意的是, $\Delta\sigma^0$ 本身可能具有微小偏差。

图 6 描述了不同入射角、风速和极化方式下平均 $\Delta\sigma^0$ 对海表温度的依赖特征, 其振幅大小取决于风速和极化方式。可以看出在大入射角风速 $6 \sim 7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的区间, 垂直极化在低温最大偏差约为 -0.5 dB, 在高温最大偏差约为 0.2 dB。水平极化在低温偏差为 1 dB, 在高温几乎无偏。特定风速下, $\Delta\sigma^0$ 在垂直极化受海表温度的调制随着入射角减小逐渐减弱, 在中低入射角($\theta < 36^\circ$) $\Delta\sigma^0$ 接近为 0 dB, 水平极化 $\Delta\sigma^0$ 振幅则几乎不随入射角变化。除此之外, 两种极化方式的 $\Delta\sigma^0$ 对温度表现出两种完全相反的依赖特征, 这也可能是 CSCAT 因海表温度产生的风速偏差并不大的原因之一。

综上所述可以发现海表温度对 CSCAT 测量的后向散射系数影响明显, 在垂直极化主要表现为低温衰减, 高温增强, 水平极化则反之。另外, 垂直极化中低入射角测量的 σ^0 几乎不受海表温度的影响, 这可以解释为

$$\lambda_B = \frac{\lambda}{2 \sin \theta}. \quad (5)$$

其中, θ 为雷达观测入射角, λ 和 λ_B 分别为微波信号波长和布拉格谐波波长, 即布拉格谐波波长随着入射角减小而增大, 由于长波垂直极化测量几乎不受海表温度的调制, 因此小入射角不受海表温度调制。这样就提供了一种很好的校正思路, 在极端的低温区域可以只使用垂直极化和中低入射角测量的后向散射反演风场。

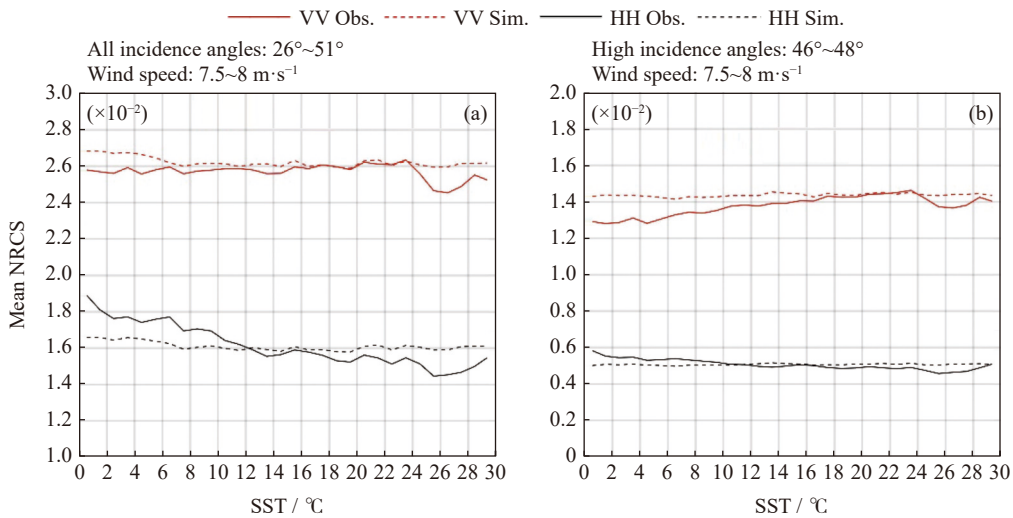


图 5 平均 NRCS 海表温度的变化

Fig. 5 Mean NRCS as a function of Sea Surface Temperature (SST)

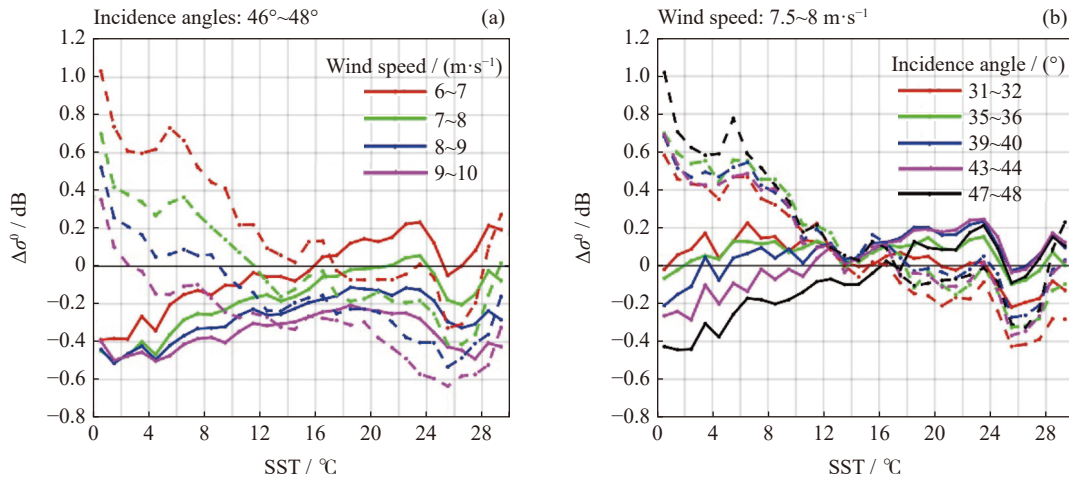


图6 平均 $\Delta\sigma^0$ 随海表温度的变化。实线表示垂直极化，虚线表示水平极化

Fig. 6 Mean $\Delta\sigma^0$ as a function of Sea Surface Temperature (SST). Solid lines indicate vertical-polarization, and the dashed lines indicate horizontal-polarization

4 包含海表温度的地球物理模式函数

海表温度对 CSCAT 测量的影响是明确的, 在风场反演中, 如果能将海表温度作为参数用于地球物理模式函数的校正, 那么便能最大可能地消除海表温度对 CSCAT 风场反演的影响。地球物理模式函数是风场反演的基础, 其是一种经验的地球物理函数, 描述了后向散射和风速、相对方位角、入射角和极化的函数关系, 良好的地球物理模式函数模型对散射计反演精确的风场有着至关重要的作用^[23]。CSCAT 目前使用的是地球物理模式函数 NSCAT-4 (F_{N4})。因此, 可以把海表温度的影响定义为随入射角、风速和极化方式变化的参数 $f(v, t, \theta, p)$, 并使用该参数引入 F_{N4} 以修正海表温度对 CSCAT 的影响, 其具体形式定义如下:

$$F_{N4T} = f(v, t, \theta, p) F_{N4}. \quad (6)$$

其中, F_{N4T} 代表包含海表温度依赖的地球物理模式函数, 称之为 NSCAT-4 T; v 为风速, t 为海表温度, θ 为天线入射角。 $f(v, t, \theta, p)$ 定义如下:

$$f(v, t, \theta, p) = \frac{\sigma_{\text{obs}}^0(v, t, \theta, p)}{\sigma_{\text{sim}}^0(v, t, \theta, p)}. \quad (7)$$

其中, $\sigma_{\text{obs}}^0(v, t, \theta, p)$ 表示观测的后向散射, $\sigma_{\text{sim}}^0(v, t, \theta, p)$ 代表用 NSCAT-4 仿真的后向散射。图 5 表明由于 σ_{obs}^0 和 σ_{sim}^0 的之间并不是无偏的, 且在不同统计区间

的变化尺度也不相同, 因此将 $f(v, t, \theta, p)$ 进行归一化以更好地描述校正参数的变化特征。其定义如下:

$$g(v, t, \theta, p) = \frac{f(v, t, \theta, p)}{f(v, t_0, \theta, p)}. \quad (8)$$

参考海表温度 $t_0=14.5^\circ\text{C}$ 。

图 7 给出了 $g(v, t, \theta, p)$ 在特定风速和特定入射角下随海表温度的变化特征。图中直线是 $g(v, t, \theta, p)$ 经过线性拟合后的结果, 星线代表原始的 $g(v, t, \theta, p)$ 。可见在低温区间, 对 F_{HH} 是正向的校正, 即测量的后向散射要高于仿真的后向散射; 对 F_{VV} 是反向的校正, 即测量的后向散射要低于仿真的后向散射。在高温区间则正好相反。随着风速的增加, 两种极化方式需要的校正都会减小。随着入射角的增大, 垂直极化的后向散射的校正系数逐渐增大, 但水平极化并没有表现出对入射角的依赖性。NSCAT-4 T 考虑了海表温度对 CSCAT 后向散射系数测量的影响, 可以在一定程度上消除海表温度对 CSCAT 风场反演的影响, 但该地球物理模式函数仅适用于 CSCAT 风场反演, 且由于无法完全与其他地球物理噪声解耦(例如 24°C 附近的跃变), 该模型仍待进一步完善和验证。

5 结论

海表温度作为影响散射计后向散射测量的二阶效应, 对 Ku 波段散射计影响较为明显, 会降低 CSCAT 反演风场精度。基于 CSCAT 二级数据,

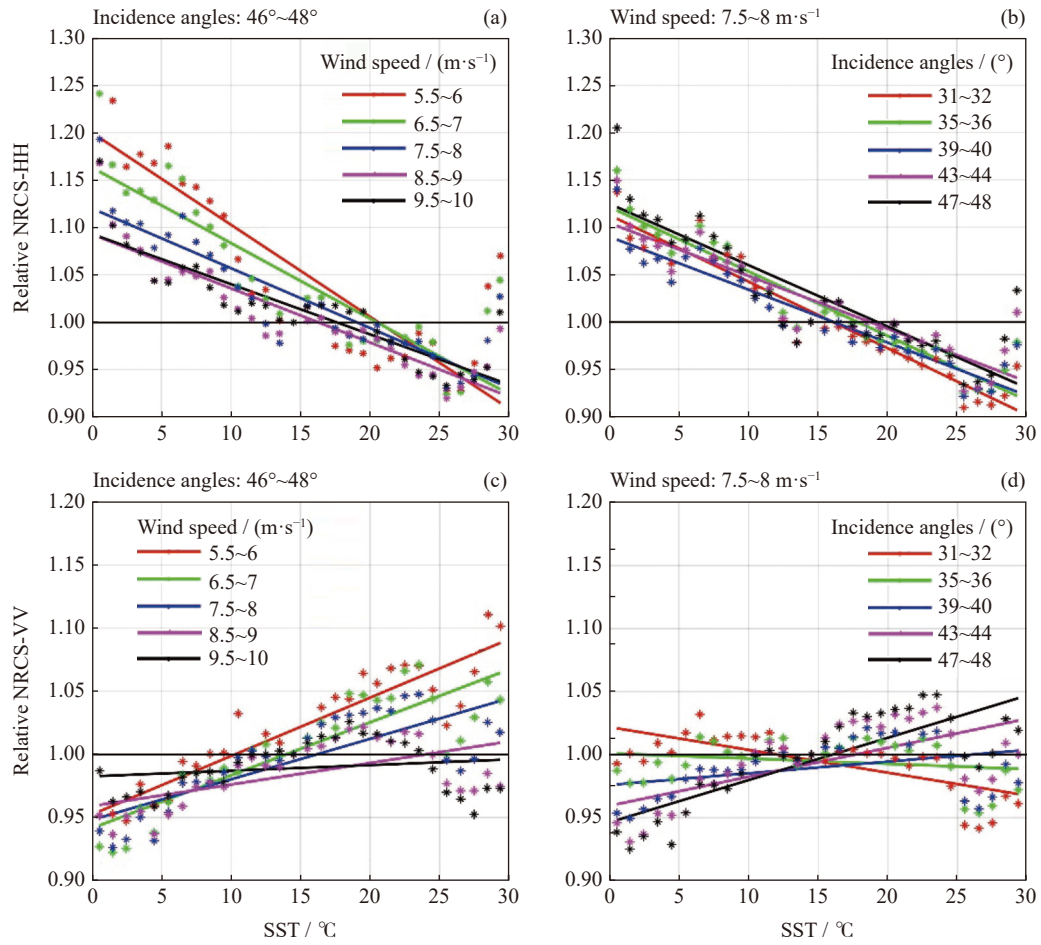


图 7 $g(v, t, \theta, p)_{HH}$ 和 $g(v, t, \theta, p)_{VV}$ 在不同入射角和风速区间随海表温度的变化 (星线表示探测结果, 实线表示拟合后结果)

Fig. 7 $g(v, t, \theta, p)_{HH}$ and $g(v, t, \theta, p)_{VV}$ as a function of Sea Surface Temperature (SST) in different incidence angle and wind speed ranges (The star line is measured result and the fitting result shown with the solid line)

ECMWF 风和海表温度的匹配数据集分析了海表温度对 CSCAT 风测量和后向散射的影响机制, 给出了针对 CSCAT 的包含海表温度的地球物理模式函数, 称之为 NSCAT-4 T。

研究表明在中低风速 ($< 14 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) CSCAT 反演风速会受到海表温度的影响产生偏差, 主要在低温区域表现为负偏差, 在高温区域则表现为正偏差。刘幅远端 ($\theta > 43^\circ$) 反演的风速对海表温度的依赖性要更强烈, 低温区域偏差高达 $-0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 而刘幅中间位置 (θ 为 $28^\circ \sim 51^\circ$) 测量的风速偏差则相对较小。CSCAT 两种极化测量的 σ^0 都会受到海表温度的影响, 水平极化更为明显。其中, 水平极化测量的后向散射系数在低温表现为增强, $\Delta\sigma^0$ 可达 1 dB, 在高温表现为衰减, $\Delta\sigma^0$ 可达 -0.6 dB 。垂直极化测量的后

向散射系数在低温表现为衰减, $\Delta\sigma^0$ 可达 -0.5 dB , 在高温表现为增强, $\Delta\sigma^0$ 可达 0.2 dB。垂直极化在中低入射角 ($\theta < 36^\circ$) 测量的后向散射系数几乎不受海表温度的影响, 水平极化对入射角没有明显的依赖性。海表温度对 CSCAT 测量的影响主要在中低风速, 随着风速的增大海表温度的影响逐渐减弱, 当风速高于 $14 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 海表温度的影响几乎消失。

基于以上研究结果, 以海表温度作为参数引入现有的 NSCAT-4 模型得到包含海表温度的地球物理模式函数 NSCAT-4 T, 基于该地球物理模式函数反演风场可以校正海表温度的影响。由于 CSCAT 散射计在垂直极化小入射角测量的后向散射系数几乎不受海表温度的影响, 未来可以考虑在低温区域采用垂直极化和小入射角的测量反演风场。此外, 由于在热

带区域难以将降雨等地球物理噪声和海表温度解耦,高温对 CSCAT 后向散射测量的影响有待进一步研究。

致谢 使用的 CFOSAT 散射计二级数据从国家卫星海洋应用中心(NSOAS)获取,网址为 <http://www.nsoas.org.cn/>。海表温度数据由哥白尼海洋环境监测服务中心(CMEMS)提供,该数据可通过 <https://marine.copernicus.eu/access-data/>网站获取。ASCAT 风场数据由欧洲气象卫星组织(EUMETSAT)海洋与海冰卫星应用设施(OSI SAF)提供,该数据可通过 <https://podaac-tools.jpl.nasa.gov/drive/>网站获取。

参考文献

- [1] STOFFELEN A, KUMAR R, ZOU J H, *et al.* Ocean surface vector wind observations[M]//BARALE V, GADE M. Remote Sensing of the Asian Seas. Cham: Springer, 2019: 429-447
- [2] 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
- [3] 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
- [4] 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
- [5] LIN W M, DONG X L, PORTABELLA M, *et al.* A perspective on the performance of the CFOSAT rotating fan-beam scatterometer[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, **57**(2): 627-639
- [6] LIU W T. The effects of the variations in sea surface temperature and atmospheric stability in the estimation of average wind speed by SEASAT-SASS[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1984, **14**(2): 392-401
- [7] GRODSKY S A, KUDRYAVTSEV V N, BENTAMY A, *et al.* Does direct impact of SST on short wind waves matter for scatterometry?[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, **39**(12): L12602
- [8] KUDRYAVTSEV V. On radar imaging of current features: 1. Model and comparison with observations[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, **110**(C7): C07016
- [9] BENTAMY A, GRODSKY S A, CARTON J A, *et al.* Matching ASCAT and QuikSCAT winds[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2012, **117**(C2): C02011
- [10] WANG Z X, STOFFELEN A, ZHAO C F, *et al.* An SST-dependent Ku-band geophysical model function for Rapid-Scat[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2017, **122**(4): 3461-3480
- [11] WANG Z X, STOFFELEN A, FOIS F, *et al.* SST dependence of Ku- and C-band backscatter measurements[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, **10**(5): 2135-2146
- [12] CHEN Kehai, XIE Xuetong, ZHANG Jinlan, *et al.* An SST dependent geophysical model function for HY-2 A scatterometer[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2022, **41**(2): 90-102 (陈克海, 解学通, 张金兰, 等. 一种温度相关的 HY-2 A 散射计地球物理模型函数[J]. *热带海洋学报*, 2022, **41**(2): 90-102)
- [13] XIE Xuetong, CHEN Kehai, GUO Liqing, *et al.* Research on modeling of ocean water geophysical model function including ocean surface temperature[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2007, **26**(6): 14-20 (解学通, 陈克海, 郭丽青, 等. 包含温度因子的海水地球物理模型函数建模研究[J]. *热带海洋学报*, 2007, **26**(6): 14-20)
- [14] SHARQAWY M H, LIENHARD V J H, ZUBAIR S M. Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlations and data[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2010, **16**(1/2/3): 354-380
- [15] NAYAR K G, PANCHANATHAN D, MCKINLEY G H, *et al.* Surface tension of seawater[J]. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 2014, **43**(4): 043103
- [16] KLEIN L, SWIFT C. An improved model for the dielectric constant of sea water at microwave frequencies[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1977, **25**(1): 104-111
- [17] DE KLOE J, STOFFELEN A, VERHOEF A. Improved use of scatterometer measurements by using stress-equivalent reference winds[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, **10**(5): 2340-2347
- [18] DONLON C J, MARTIN M, STARK J, *et al.* The operational sea surface temperature and sea ice analysis (OS-TIA) system[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, **116**: 140-158
- [19] WANG Z X, ZOU J H, STOFFELEN A, *et al.* Scatterometer sea surface wind product validation for HY-2 C[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, **14**: 6156-6164
- [20] LIN W M, PORTABELLA M, STOFFELEN A, *et al.* ASCAT wind quality under high subcell wind variability conditions[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2015, **120**(8): 5804-5819
- [21] LIN W M, PORTABELLA M. Toward an improved wind quality control for RapidScat[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, **55**(7): 3922-3930
- [22] STILES B W, YUEH S H. Impact of rain on spaceborne Ku-band wind scatterometer data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, **40**(9): 1973-1983
- [23] PORTABELLA M. Wind Field Retrieval from Satellite Radar Systems[D]. Barcelona: University of Barcelona, 2002