

CFOSAT 散射计海面后向散射系数误差及影响*

董 楹¹ 林文明^{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 仪器噪声 (K_{pc}) 和地球物理噪声 (K_{pg}) 是影响星载微波散射计后向散射系数 (σ^0) 测量精度以及海面风场反演精度的关键因素. 针对中法海洋卫星 (CFOSAT) 散射计 (CSCAT), 详细分析了 K_{pc} 和 K_{pg} 随海面风速、入射角、风单元网格分辨率以及离岸距离等因素变化的特征. 结果表明, 低风速条件下海面风场变异性较大, K_{pg} 为 σ^0 测量误差的主导因素, 而且风单元网格越大、海面风场的不均匀性越强, K_{pg} 也就越大, 而在高风速条件下, 海面风场变异性较小, K_{pc} 与 K_{pg} 贡献相当. 此外, σ^0 测量误差总体上随着离岸距离的减小而增大, 表明近海岸区域的 K_{pg} 为散射计观测不可忽略的影响因子. 研究结果揭示了星载微波散射计 σ^0 测量误差的影响因素, 对 CSCAT 近海岸风场反演具有重要的指导意义.

关键词 中法海洋卫星, 微波散射计, 后向散射系数, 仪器噪声, 地球物理噪声

中图分类号 P732

Analysis of Sea Surface Backscatter Coefficient Errors and Its Effects for the CFOSAT Scatterometer

DONG Ying¹ LIN Wenming^{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 Applications, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, Beijing 100081)

Abstract Noise is a key factor that affects the accuracy of spaceborne scatterometer backscatter coefficient (σ^0), as well as the retrieved sea surface wind quality. In general, the scatterometer σ^0 measurement error is attributed to both instrumental noise and geophysical noise, which are expressed in terms of normalized standard deviation (K_p). In this paper, the instrumental noise (K_{pc}) and the geophysical noise (K_{pg}) are analyzed as a function of sea surface wind speed, incidence angle, spatial resolution and offshore distance for the China-France Oceanography Satellite Scatterometer. The result shows that the variability of sea surface wind field is large under low wind conditions, so the geophysical noise dominates the measurement error of radar backscatters. Notably, the larger the grid size of Wind Vector Cell (WVC), the more inhomogeneous the sea surface wind, such that the K_{pg} value increases as the WVC size, but at the same time, the larger the wind cell grid and the larger the number of independent obser-

* 国家重点研发计划项目资助 (2022YFC3104900, 2022YFC3104902)

2023-12-08 收到原稿, 2024-01-10 收到修定稿

©The Author(s) 2024. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

vation samples, the smaller the K_{pc} . While under high wind conditions, the variability of sea surface wind is small, and the contribution of instrument noise and geophysical noise is similar. Regarding the sensitivity of measurement error to the incidence Angle, K_{pc} and K_{pg} show a minimum value at the incidence angle of 40° , which is consistent with the antenna gain pattern. Finally, the relationship between the backscatter measurement error and the offshore distance is studied in order to clarify the feasibility of near shore wind field inversion for the CSCAT. The results show that the observation error generally increases as the offshore distance decreases, indicating that the near-shore geophysical noise is non-negligible for the scatterometer measurements approaching to the coastal line. In summary, the results presented in this paper reveal the influence factors of scatterometer σ^0 measurements, which are relevant for better understanding the wind inversion and quality control of CSCAT, notably near the coastal areas.

Key words China-France Oceanography Satellite (CFOSAT), Microwave scatterometer, Backscatter coefficient, Instrument noise, Geophysical noise

0 引言

海面风场对于海洋环境预报、海洋灾害监测、海气相互作用研究等具有重要意义^[1-4]. 许多海洋、大气相关的科学研究和业务应用都需要实时高精度、高时空分辨率的海面风场数据. 当前, 星载微波散射计是一种用于获取全球海面风场最主要的微波传感器. 散射计观测海面时, 其回波强度与海面上的毛细重力波引起的振幅成正比, 即后向散射系数 (σ^0) 与风速呈正相关. 同时, 后向散射系数也受到风向的调制. 因此, 可以利用散射计从不同方位角测量的一组的 σ^0 同时反演海面风速和风向.

噪声是影响散射计 σ^0 测量精度和海面风场反演精度的关键因素. 一般认为, 后向散射系数的测量误差主要包含仪器噪声 (K_{pc}) 和地球物理噪声 (K_{pg}) 两类, 并且用归一化标准差的形式表示^[5]. 其中, 仪器噪声受散射计系统热噪声和回波信号衰落的影响, 是关于回波信噪比和测量独立样本数的函数; 而地球物理噪声是雷达回波信号受观测面元平均海面风场之外的因素引起的噪声, 通常与观测面元内的降雨、风场不一致性 (即变异性)、海冰或陆地污染有关^[6-8]. 过去数十年, 针对散射计仪器噪声开展了广泛且深入的研究, 但是对地球物理噪声 (特别是海面风场变异性的影响) 的研究不足, 而且缺乏对两种噪声的对比分析. Portabella 和 Stoffelen^[9] 利用蒙特卡罗仿真, 定量研究了海面风场变异性引起的地球物理噪声对欧洲遥感卫星 (European Remote Sensing Satellite, ERS) 搭载的 C 波段散射计 σ^0 的影响, 结果表明地球物理噪声是影响 ERS 散射计 σ^0 测量精度的关键因

素. Grieco 等^[9] 计算了 MetOp 卫星先进散射计 (Advanced Scatterometer, ASCAT) 的条带 σ^0 误差和风单元平均 σ^0 误差, 进而分析了仪器噪声与地球物理噪声之间的关系, 该方法也适用于其他散射计的误差分析. 然而针对 Ku 波段散射计, 通常仅分析总的 σ^0 测量误差的特性, 尚未详细对比分析上述两种噪声对 σ^0 的影响. 例如, Lin 等^[10] 分析了中法海洋卫星散射计的 σ^0 数据, 阐明了整体测量误差随观测几何的变化关系, 结果证明了中法海洋卫星散射计反演质量较好, 能满足海面风场观测需求.

由于中法海洋卫星 (China-France Oceanography Satellite, CFOSAT) 搭载的微波散射计 (CFOSAT Scatterometer, CSCAT) 是国际上第一台 Ku 波段旋转扫描扇形波束散射计^[11], 结合了传统的固定扇形波束散射计和旋转扫描笔形波束散射计的特点, 具有观测几何信息丰富和 σ^0 独立样本数多的特点^[12-15]. 本文以 CSCAT 为例, 探究仪器噪声和地球物理噪声对 Ku 波段散射计后向散射系数测量误差的影响机制. 具体基于 CSCAT 12.5 km 和 25 km 空间分辨率的数据, 详细分析了 K_{pc} 和 K_{pg} 随着海面风速、入射角以及风单元网格分辨率变化的特征. 特别地, 通过研究两种噪声引起的测量误差随离岸距离变化的趋势, 探究近海岸区域 CSCAT 后向散射系数测量误差的空间分布特性, 为开展 CSCAT 近海岸风场反演和数据质量检验提供重要的理论和技术支撑.

1 数据与方法

1.1 数据

基于国家卫星海洋应用中心发布的 CSCAT

L1 B 级数据 (V3.3 版本), 利用 CSCAT 二级数据处理软件将观测入射角和方位角相近的 L1 B 级条带 (slice) σ^0 平均处理, 分别得到 12.5 km 和 25 km 网格分辨率的风矢量单元 (Wind Vector Cell, WVC) σ^0 , 进而开展后续的分析研究. 数据处理需要的辅助数据主要有海冰数据、海陆掩膜数据、欧洲中期天气预报中心 (European Centre for Medium Range Weather Forecasts, ECMWF) 的海面 10 m 高度预报风场数据以及全球高分辨率海岸线数据 (Global Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Geography Database, GSHHG). 其中, 海冰数据是由欧洲气象卫星组织提供的逐日、南北半球的海冰边缘线融合数据, 海陆掩膜使用的是 ECMWF 提供的高分辨率海陆掩膜数据. 需要注意的是, ECMWF 海陆掩膜用于 25 km 网格分辨率的数据处理, GSHHG 则用于 12.5 km 网格分辨率的数据处理.

海陆掩膜和海冰数据用于地面类型识别, 通过判断风矢量单元中心位置对应的地表类型, 将 WVC 标识为海面、陆地或海冰三种类型中的一种. 本文只针对海面的 WVC 数据开展分析. ECMWF 预报风场作为参考风场, 用于分析不同海面状况下的散射计测量误差特性. 本研究使用的 ECMWF 预报风场的时间间隔为 3 h, 空间网格分辨率为 0.125° , 通过空间双线性插值和时间样条插值获取散射计观测位置 and 时间的匹配风场. 为了确保匹配的 ECMWF 预报风场是离散散射计观测时刻最近的风场数据, 进行时间插值时应有两个时刻的 ECMWF 预报风场数据, 一个数据文件在散射计测量时间点之前, 另一个 ECMW 预报风场数据文件在散射计测量点之后. 海岸线数据主要用来判断 CSCAT 风矢量单元的离岸距离, 将每个风矢量单元的经纬度匹配到 GSHHS 给定的查找表即可获取该网格点的离岸距离. 近海岸观测数据特性分析通常针对离岸距离小于 150 km 的数据开展研究.

1.2 K_p 计算方法

风矢量单元某个观测视角平均 σ^0 的测量误差可以根据用于平均处理的 L1 B 条带 σ^0 估算, 用归一化标准差的形式表示, 即

$$K_p = \frac{\sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^M (\sigma_{mi,j}^0 - \sigma_{mi}^0)^2}}{\sigma_{mi}^0}. \quad (1)$$

其中, i 为 WVC σ^0 的序号, M 为第 i 个视角包含的条带总数, $\sigma_{mi,j}^0$ 为第 j 个条带的后向散射系数值.

由式 (1) 计算的 K_p 包含仪器噪声 (K_{pc}) 和地球物理噪声 (K_{pg}) 的贡献, 其中仪器噪声由雷达固有的衰落效应和接收机热噪声引起, 是回波信噪比和测量独立样本数的函数, 有^[16,17]

$$K_{pc} = \sqrt{A + \frac{B}{S} + \frac{C}{S^2}}. \quad (2)$$

式中,

$$A = \frac{1}{B_s \tau_p}, B = \frac{2}{B_s \tau_g}, C = \frac{1}{B_s \tau_g}. \quad (3)$$

其中, B_s 为条带带宽, τ_p 为脉冲持续时间, τ_g 为接收窗口的长度. 由式 (2) 能看出 K_{pc} 随信噪比 (S) 增大而减小. 而地球物理噪声 K_{pg} 则是降雨、风场变异性、陆地或海冰污染等因素共同作用的结果, 表示散射计实测 σ^0 与观测面元平均海面风场对应的后向散射系数数学期望之间的误差. 由于地球物理噪声很难获得解析形式, 并且通常认为 K_{pc} 与 K_{pg} 之间相互独立, 因此 K_p 可表示为^[6]

$$K_p = \sqrt{K_{pc}^2 + K_{pg}^2}. \quad (4)$$

由于真实的平均海面风场是未知的, 式 (1) 使用实测的后向散射系数 σ_{mi}^0 替代海面后向散射系数的数学期望. 在降雨、陆地或海冰污染等条件下, 实测的雷达后向散射系数往往与海面后向散射系数存在系统性偏差, 这种情况下根据式 (1) 和式 (4) 估计的地球物理噪声是不准确的. 幸运的是, Ku 波段散射计受降雨污染的数据一般不超过 5%~6%, 陆地或海冰污染已经通过相应的掩膜剔除. 因此, 本文仅考虑海面风场变异性引起的地球物理噪声. 也就是, 总的观测误差 K_p 可以利用实测数据估算, 而仪器噪声对测量误差的贡献 K_{pc} 可以基于经典的散射测量理论式 (2) 计算, 因此可以利用式 (4) 估计地球物理噪声 (海面风场变异性) 对测量误差的贡献.

2 σ^0 误差分析

分别利用 CSCAT 12.5 km 和 25 km 网格分辨率的数据研究其风矢量单元的后向散射系数误差随海面风速、雷达观测几何、网格大小以及近海岸离岸距离变化的特征. 其中, 仪器噪声对 σ^0 测量误差的贡献需要分两步计算, 即首先估计条带 σ^0 的 K_{pc} , 然后

基于统计独立样本的假设估算风矢量单元 σ^0 的 K_{pc} . 其中条带 σ^0 和风矢量单元 σ^0 的关系为

$$K_{pc}^{wvc} = \frac{1}{\sqrt{M}} K_{pc}^{slice}. \quad (5)$$

其中, M 为条带总数, 为了方便书写, 文中将 K_{pc}^{wvc} 写为 K_{pc} .

由式 (2) 可知, 条带 $\sigma^0(K_{pc}^{slice})$ 的 K_{pc} 主要由信噪比、条带带宽、脉冲持续时间和接收窗口长度决定, 后三个系统参数是已知的. 因此可以通过评估后向散射测量的信噪比估计条带 σ^0 的误差. 海面上观测的信噪比主要由海面 σ^0 (主要依赖海面风场)、系统链路的增益/损耗、天线增益和观测距离等要素决定. 为了便于分析, 将信噪比视为风速和入射角的函数, 因为这两个变量是无雨条件下海面 σ^0 的主导因素, 同时入射角本质上与天线增益、观测距离等要素相对应.

图 1 给出了 CSCAT 信噪比关于风速和入射角

的变化特征. 从图 1 中可以看出, 对于垂直极化, 风速较低时 (风速 $\leq 4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), 所有观测的信噪比均小于 0 dB; 随着风速的增大, 散射计测量的信噪比迅速增大, 当风速大于 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 所有信噪比均大于 0, 并且信噪比在入射角 40° 左右时出现极大值, 与天线峰值增益对应的入射角一致, 由式 (2) 看出此时 K_{pc} 出现极小值. 而对于水平极化, 它的信噪比普遍低于垂直极化, 并且在大入射角时它的信噪比普遍较低. 为了验证信噪比估算是否准确, 图 2 分析了平均 σ^0 随平均 SNR 的变化关系. 根据雷达方程和信噪比的定义可知, 当观测入射角和噪声都保持不变时, 散射计观测的 SNR 与海面 σ^0 呈线性正比例关系, 即平均 σ^0 随平均 SNR 线性增加 ($\text{SNR} \propto \sigma^0$). 因此, 图 2 说明了 SNR 估计的正确性.

2.1 风速对 σ^0 误差的影响

为了进一步阐明 K_p 随风速的变化情况, 图 3 以

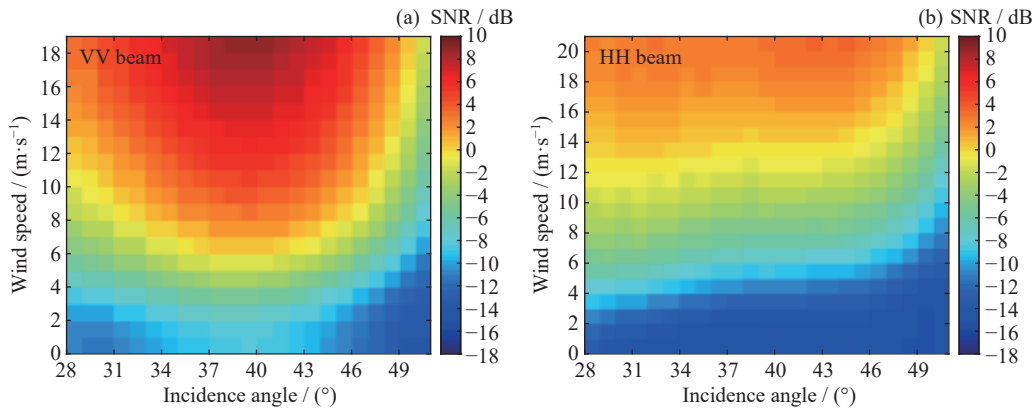


图 1 信噪比随入射角和风速的变化

Fig. 1 Expected SNR as a function of wind speed and incidence angle

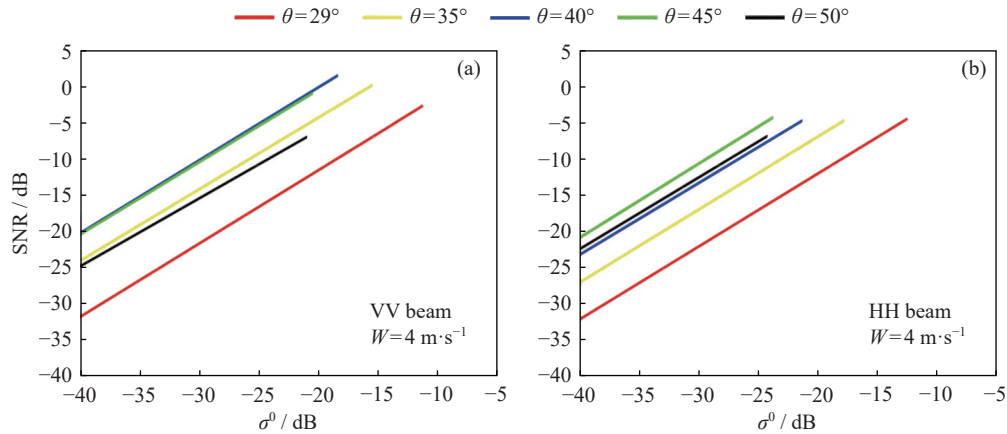


图 2 信噪比随 σ^0 的变化

Fig. 2 Correspondence variation between SNR and CSCAT σ^0

40°入射角为例给出了两种噪声引起的测量误差的自然值的比值随风速变化的关系. 选择 40°入射角的原因是, 该观测几何下散射计回波信噪比具有较大的动态范围 (见图 1), 可以涵盖研究分析的大部分情况, 结果不失一般性. 图 4 给出了 K_{pc} 和 K_{pg} 随风速的变化情况. 这里为了使对比具有普遍性, 仅选取了离岸 20 km 以外的海面观测数据. 从图 4 可以看出, K_{pc}

和 K_{pg} 的都随着风速的增大而减小, 并且 K_{pg} 一直大于 K_{pc} . 低风速时, K_{pg} 和 K_{pc} 的比值较大, 说明地球物理噪声在低风速时占主导地位, 这主要是由于低风速时风场变异性较大; 在中高风速阶段, K_{pg} 和 K_{pc} 的比值降低, K_{pg} 在这个阶段起到的作用减小. 对比水平极化和垂直极化, 可以看出水平极化的 K_{pc} 要大于垂直极化, 这是由于水平极化信噪比小于垂直极

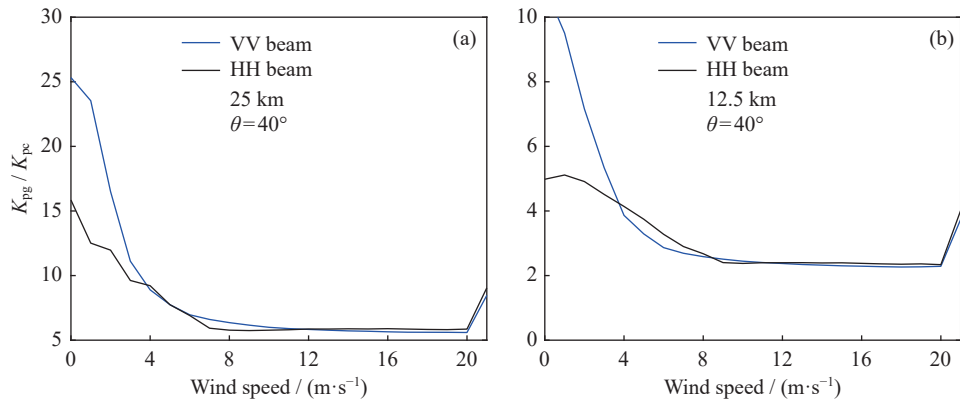


图 3 K_{pg} 与 K_{pc} 比值随风速的变化

Fig. 3 Ratio of K_{pg} to K_{pc} varies with wind speed

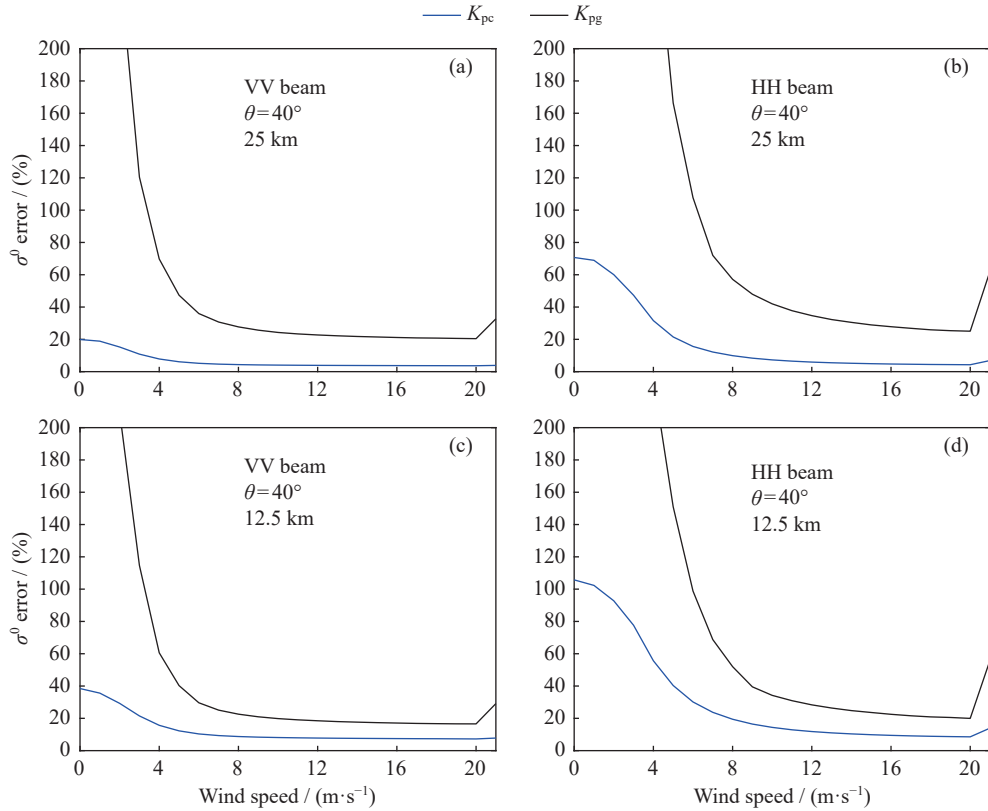


图 4 CSCAT 不同空间分辨率 K_{pc} 和 K_{pg} 随风速的变化

Fig. 4 K_{pc} and K_{pg} vary with wind speed at CSCAT different spatial resolutions

化, 而信噪比和 K_{pc} 成反比.

2.2 观测几何对 σ^0 误差的影响

不同入射角观测的后向散射系数测量误差不同. 图 5 分析了两种极化, 不同风速情况下 K_{pc} 和 K_{pg} 随入射角的变化趋势. 低风速 (风速 $<4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) 情况下, K_{pc} 的分布范围为 $10\%\sim 80\%$, 而 K_{pg} 的分布范围为 $50\%\sim 200\%$. 中风速 (风速 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右) 情况下, K_{pc} 的值主要分布在 $10\%\sim 50\%$, K_{pg} 的值主要分布在 $10\%\sim 140\%$. 在高速风 (风速 $>15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) 情况下, K_{pc} 主要集中在 $20\%\sim 40\%$, K_{pg} 主要集中在 $30\%\sim 160\%$. 对于水平极化, K_{pc} 和 K_{pg} 都随着入射角的增大而增大, 在低风速时, K_{pc} 大于 20% , K_{pg} 大于 100% , 并且随入射角变化剧烈, 中高风速 (风速 $>8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) 时, K_{pc} 和 K_{pg} 在大入射角时较大. 总体而言, 两种测量误差 K_{pc} 和 K_{pg} 均随着风速的减小而迅速增大, 地球物理噪声比仪器噪声对测量误差的贡献大.

给定风速条件下, K_{pc} 在大部分入射角范围内基本趋于平稳, 这是因为方位向的独立样本数随着入射

角的增大而减小, 而俯仰向的独立样本数随着入射角大的增大而增多, 两者与信噪比变化趋势对 K_{pc} 的影响相互抵消. 波束远端 (大入射角)、近端 (较小入射角) 以及 HH 极化低风速情况下, K_{pc} 主要受信噪比主导, 其变化趋势与信噪比的变化趋势一致. 由于 K_{pg} 一般大于 K_{pc} , 其随入射角的变化趋势与总的 σ^0 测量误差的变化趋势更加一致. 与 K_{pc} 类似, K_{pg} 也呈现出信噪比依赖性, 即低信噪比对应“更高”的地球物理噪声. 这需从以下三个方面进行阐释: 首先, 信噪比与海面风速相关, 风速越小信噪比越低. 但要注意的是, 风速越小海面风场的变异性越大^[8], 后者会增强条带 σ^0 的不一致性, 进而使得 K_{pg} 值变大. 其次, 信噪比与天线增益相关, 天线增益越小 (波束远端、近端) 信噪比越低. 而天线增益主要由观测入射角决定, 后者是海面布拉格散射的关键因子. 然而, 风场变异性如何影响海面布拉格散射目前尚不明确. 最后, 低信噪比往往对应较大的 σ^0 偏差^[15], 如 2.2 节所述, 这时式 (1) 应该使用海面“真实”的 σ^0 , 而不是实测的 σ^0 . 总之, 信噪比与风场变异性引起的

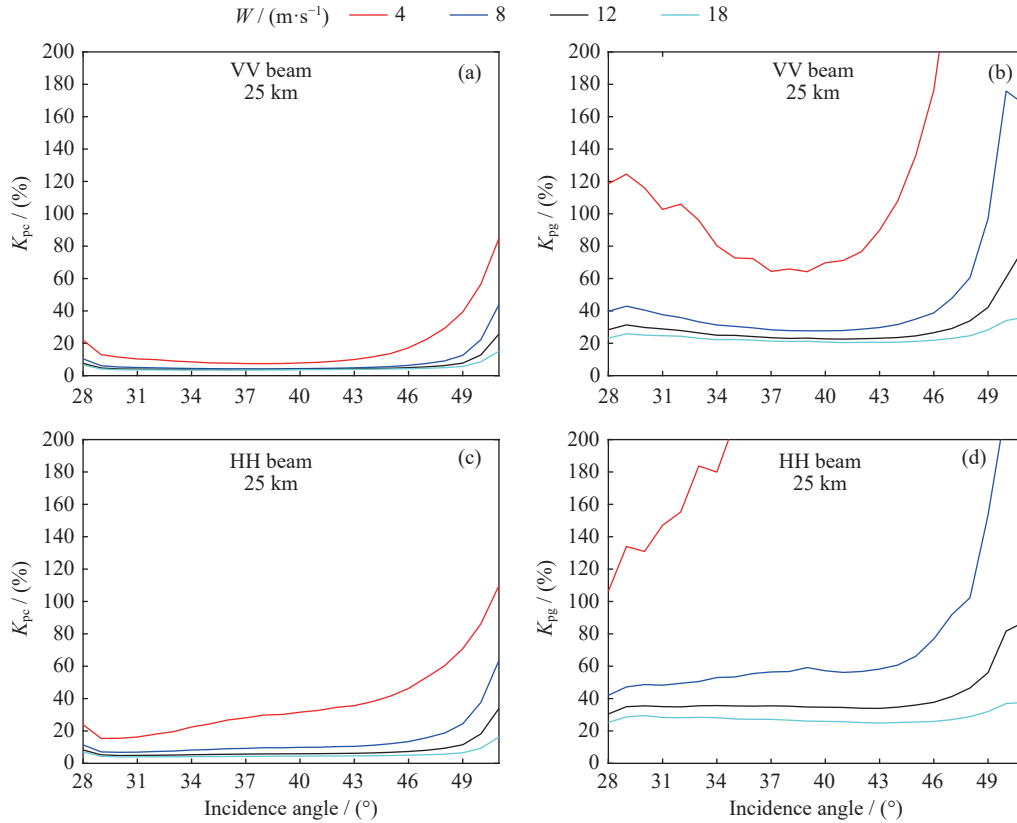


图 5 CSCAT 25 km 分辨率 WVC σ^0 测量误差随入射角和风速的变化

Fig. 5 WVC σ^0 measurement error varies with incidence angle and wind speed at CSCAT 25 km resolution

地球物理噪声有较强的相关性,但两者的因果关系十分复杂,有待进一步深入的研究.

2.3 网格分辨率对 σ^0 误差的影响

为了阐明 K_p 随空间分辨率的变化情况,图6以 40° 入射角为例,对比分析了不同网格分辨率条件下两种噪声引起的测量误差.同样地,这里仅使用离岸20 km以外的海面观测数据.从图6可以看出,两种极化方式下,25 km网格空间分辨率的 K_{pc} 要小于12.5 km网格空间分辨率的 K_{pc} .这是因为此时当信噪比一致时,25 km的WVC比12.5 km的WVC拥有更多的独立观测样本数,因此 K_{pc} 要小;而25 km网格空间分辨率的 K_{pg} 要大于12.5 km网格空间分辨率的 K_{pg} ,这可能是因为网格单元越大,风场的不均匀性越强, K_{pg} 越大.

2.4 离岸距离对 σ^0 误差的影响

近海岸风场遥感是近岸海洋动力环境监测的热

点和难点.为了探究近海岸区域风场反演的可行性,有必要研究 σ^0 误差随离岸距离的变化特征.本节主要分析离岸150 km以内 σ^0 误差的特性.在近海岸区域,受陆地影响风场变化剧烈,此时地球物理噪声起主导作用,图7给出的是中法海洋卫星散射计地球物理噪声随离岸距离的变化情况.整体而言, K_{pg} 随着离岸距离的减小而增大,因为离岸越近,风场变化越剧烈;但是当离岸距离小于40 km时, K_{pg} 普遍较大.从图8也可以看出,近海岸风场的风速的偏差和标准差都是随着离岸距离的减小而增大,风速较低时,标准差较大,并且风速偏差都是负数,这可能是由于低风速时,后向散射系数偏差较大.

图9分别给出了25 km分辨率和12.5 km分辨率的近海岸海面风场.从图9可以看出,12.5 km分辨率的风场数据明显更加贴合海岸线,更能体现近海岸风场分布特征.

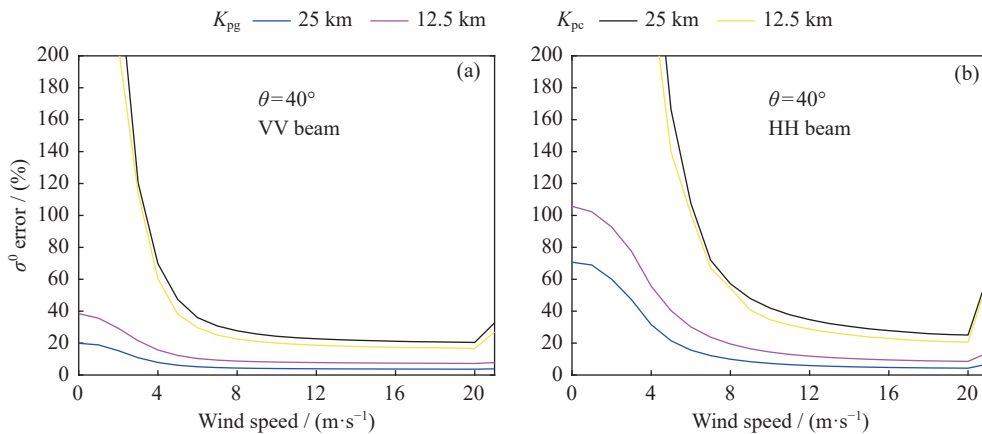


图6 CSCAT σ^0 测量误差随网格分辨率的变化

Fig. 6 CSCAT σ^0 measurement error varies with grid resolution

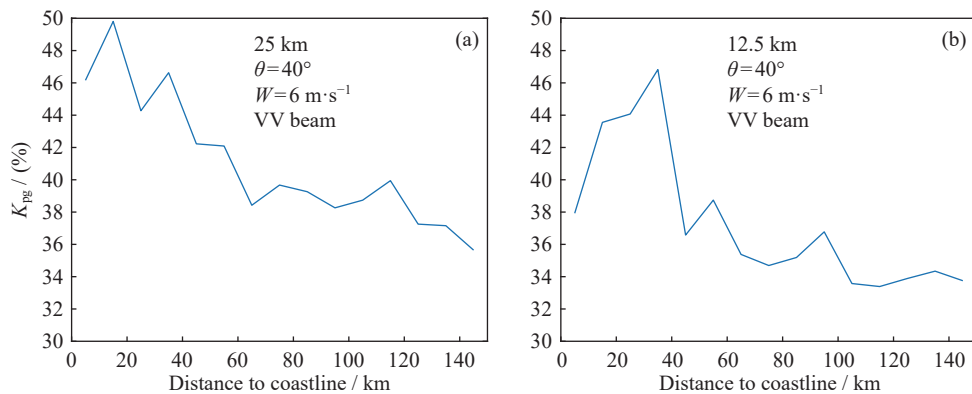


图7 K_{pg} 随离岸距离的变化

Fig. 7 K_{pg} varies with different offshore distances

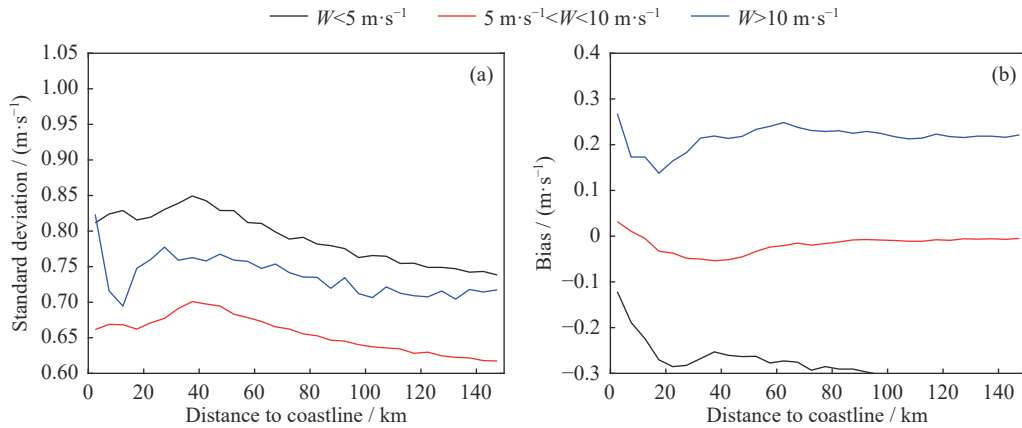


图 8 CSCAT 12.5 km 分辨率风场数据与 ECMWF 背景风场数据的标准差 (a) 和偏差 (b) 随离岸距离的变化

Fig. 8 Variation of standard deviation (a) and bias (b) between CSCAT 12.5 km resolution wind field data and ECMWF background wind field data with offshore distance

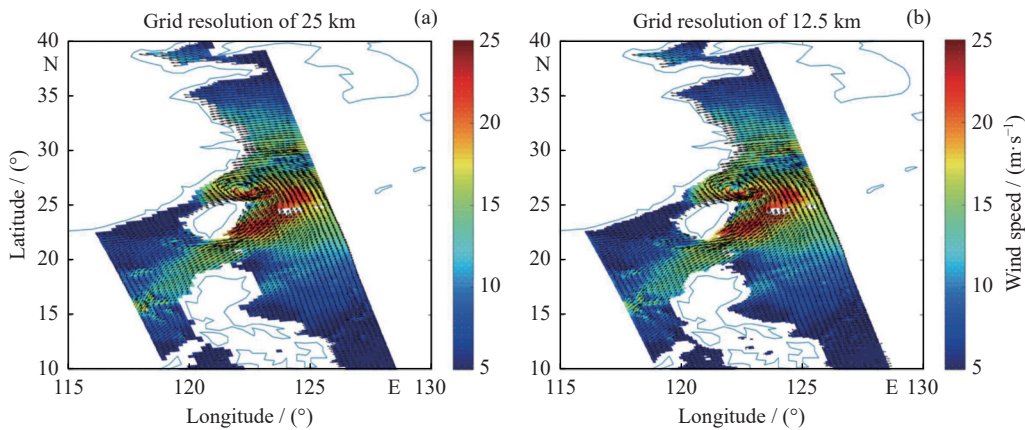


图 9 CSCAT 于 2021 年 9 月 12 日 10:20 UTC 观测的台风灿都及近海岸海面风场

Fig. 9 Typhoon Zandu and near-shore sea surface wind field observed by CSCAT at 10:20 UTC on 12 September 2021

3 结论

中法海洋卫星散射计是一种新型的旋转扇形波束微波散射计, 其结合了传统的旋转笔形波束散射计和固定扇形波束散射计的特点, 可以在不同的入射角和方位角对同一个风单元进行更多次、独立的后向散射测量, 这为高质量的海面风场监测提供了新的可能。

针对中法海洋卫星散射计, 详细分析了仪器噪声和地球物理噪声随着海面风速、入射角、空间分辨率以及近海岸离岸距离变化和分布的特征: 在后向散射系数测量误差随海面风速变化方面, K_{pc} 和 K_{pg} 整体上都随着风速的增大而减小, 但在低风速 (风速小于

$4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) 区域, 由于风场变异性较大, 此时 K_{pg} 起主导作用, 在中高速 (风速大于 $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) 区域, K_{pg} 的影响减小。整体而言 K_{pg} 要大于 K_{pc} 。在后向散射系数测量误差随入射角变化方面, 由于入射角与观测的独立样本数、天线增益以及信噪比等紧密联系, 给定风速条件下大部分入射角范围内独立样本数与信噪比的影响相互抵消, 因此 K_{pc} 和 K_{pg} 随入射角的变化趋势不明显。而在低信噪比 (特别是天线近端、远端) 条件下, K_{pc} 随入射角的变化趋势与信噪比的变化趋势基本一致; K_{pg} 与信噪比有一定的相关性, 但两者之间的因果关系仍有待进一步深入研究。在后向散射系数测量误差随网格分辨率变化方面, 在两种极化方式下 25 km 网格空间分辨率的 K_{pc} 要小于 12.5 km

网格空间分辨率的 K_{pc} , 而 25 km 网格空间分辨率的 K_{pg} 要大于 12.5 km 网格空间分辨率的 K_{pg} . 在近海岸区域, 受到陆地 (海陆风) 影响, 风场变化剧烈. 因此, 此时地球物理噪声占主导地位, 总体来说, K_{pg} 随着离岸距离的减小而增大, 后面的风场误差分析也证明, 风速的偏差和标准差都随着离岸距离的减小而增大.

下一步将在本文分析结果的基础上, 提出一种后向散射系数质量控制方法, 减小异常观测数据对风场反演的影响, 以期得到更精确的反演风场数据. 另一方面, 考虑风场变异性引起的地球物理噪声是散射计 σ^0 误差的主要来源, 有望通过 CSCAT 数据定量研究中等尺度海面的风场变率.

参考文献

- [1] SONG Q T, CHELTON D B, ESBENSEN S K, *et al.* Coupling between sea surface temperature and low-level winds in mesoscale numerical models[J]. *Journal of Climate*, 2009, **22**(1): 146-164
- [2] MCGREGOR S, RAMESH N, SPENCE P, *et al.* Meridional movement of wind anomalies during Enso events and their role in event termination[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, **40**(4): 749-754
- [3] LENTZ S J. The surface boundary layer in coastal upwelling regions[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1992, **22**(12): 1517-1539
- [4] BARALE V, GADE M. Remote Sensing of the Asian Seas[M]. Cham: Springer, 2019: 73075
- [5] FISCHER R E. Standard deviation of scatterometer measurements from space[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, 1972, **10**(2): 106-113
- [6] LONG D G, SKOUSAON G B. Calibration of spaceborne scatterometers using tropical rain forests[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, **34**(2): 413-424
- [7] JOHNSON P E, LONG D G, OLIPHANT T E. Geophysical modeling error in wind scatterometry[C]//IGARSS '96. 1996 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Lincoln: IEEE, 1996: 1721-1723
- [8] PORTABELLA M, STOFFELEN A. Scatterometer backscatter uncertainty due to wind variability[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, **44**(11): 3356-3362
- [9] GRIECO G, STOFFELEN A, VERHOEF A, *et al.* Analysis of data-derived SeaWinds normalized radar cross-section noise[J]. *Remote Sensing*, 2022, **14**(21): 5444
- [10] 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
- [11] 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
- [12] HUANG Yaohui, ZHAO Xiaolei, YAN Chen, *et al.* Typical application of China-France oceanography satellite[J]. *Satellite Application*, 2020(5): 32-37 (黄耀辉, 赵晓磊, 阎诚, 等. 中法海洋卫星及典型应用 [J]. *卫星应用*, 2020(5): 32-37)
- [13] DONG Xiaolong, ZHU Di, LIN Wenming, *et al.* Orbit performances validation for CFOSAT scatterometer[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2020, **40**(3): 425-431 (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)
- [14] LIN W M, DONG X L. Design and optimization of a Ku-band rotating, range-gated fanbeam scatterometer[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, **32**(8): 2151-2171
- [15] LIN Wenming. Study on space borne rotating, range-gated, fan beam scatterometer system[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Science, 2011 (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, 2011)
- [16] SPENCER M W. A methodology for the design of spaceborne Pencil-Beam scatterometer Systems[D]. Prove: Brigham Young University, 2001
- [17] LONG D G, CHI C Y, LI F. The design of an onboard digital doppler processor for a spaceborne scatterometer[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1988, **26**(6): 869-878

作者简介



董 楹 女, 1999 年 3 月出生于江苏省南通市. 现为南京信息工程大学海洋科学学院研究生, 主要研究方向为海洋微波遥感.

E-mail: 20211237012@nuist.edu.cn



林文明 (通信作者) 男, 1984 年出生于福建省仙游县. 现为南京信息工程大学海洋科学学院教授, 博士生导师, 研究方向为海洋微波遥感、先进数据处理方法、雷达定标技术以及海面风场遥感及应用.

E-mail: wenminglin@nuist.edu.cn