

旋转体制微波散射计性能仿真和 热带气旋观测研究*

董字名^{1,2} 徐星欧^{1,2} 刘璐³

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

3(自然资源部海南基础地理信息中心 海口 570203)

摘要 高风速风场,特别是热带气旋风场的散射计观测长期备受关注.本研究针对我国业务化运行的两种散射计——旋转扇形波束体制散射计和旋转笔形波束体制散射计,通过系统仿真方法分析其不同风速条件下的后向散射系数测量精度和风场反演性能,并评估其对热带气旋的观测能力.参考现有在轨运行散射计参数得到的实验结果表明,旋转扇形波束体制散射计各观测视数能够取得更多独立观测样本数,在 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上高风速风场的后向散射系数测量和风场反演仿真中性能表现更佳.而旋转笔形波束体制散射计各观测视数拥有更大的归一化信噪比,在低于 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的低风速和中等风速风场观测仿真中性能表现更佳.研究揭示了两种散射计体制在不同风速区间的性能特点,对高风速风场反演及热带气旋观测有重要参考意义,同时,结论也为后续不同体制散射计设计和信号处理算法改进研究奠定了基础.

关键词 散射计, 旋转体制, 系统仿真, 后向散射系数, 高风速风场观测

中图分类号 TP732.1

Simulation of Rotating System Microwave Scatterometer Performance and Observation of Tropical Cyclone

DONG Ziming^{1,2} XU Xingou^{1,2} LIU Lu³

1(National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

3(Hainan Geomatics Centre of Ministry of Natural Resources, Haikou 570203)

Abstract The observation of high speed wind fields, especially tropical cyclone wind fields, has long

* 国家重点研发计划项目(2022YFE0204600),海口市科技计划项目(2024-015)和国家重大科技基础设施项目(2024-EL-PT-000689)共同资助

2024-11-17 收到原稿, 2025-03-07 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

been an important research subject in scatterometer remote sensing. In this study, we analyzed the backscattering coefficient measurement accuracies and wind retrieval performances of the two scatterometer systems that have been operational in China: the rotating fan-beam system and the rotating pencil-beam system by simulation methods. Simulations at varying wind speed wind fields and tropical cyclone wind fields observations are conducted for both systems. Simulation results obtained with reference to the parameters of existing operational scatterometers show that the rotating fan-beam system demonstrates superior sampling capacity compared to the rotating pencil-beam system, with the vast majority of its observation views gaining a greater number of independent observation samples than 1000, whereas the rotating pencil-beam system has mainly 100~400 independent observation samples for each observation view only. This sampling advantage enables the rotating fan-beam system to achieve better performance in backscattering coefficient measurement and wind field retrieval in the simulations for wind fields with high wind speeds above $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. At the same time, the normalized SNR of each observation view is higher for the rotating pencil-beam system, which is about 300~600 per observation view, compared to 6~14 for the rotating fan-beam system. This SNR superiority enables the rotating pencil-beam system to maintain a more precise observation for wind fields with low and medium wind speeds below $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ in the simulation. This study reveals the performance characteristics of backscattering coefficient measurement and wind field retrieval of different scatterometer systems under various wind speed conditions, which is of reference significance for high speed wind fields retrieval and tropical cyclone wind fields observation. Meanwhile, the conclusions of this study also lay a foundation for subsequent research on the improvement of scatterometer wind field observation accuracy and optimization of signal processing algorithms for different scatterometer systems.

Key words Scatterometer, Rotating system, System simulation, Backscattering coefficient, High wind speed observation

0 引言

海面风场是影响海气相互作用的主要因素之一,其观测资料对于相关科学研究和业务应用有着重要意义^[1]. 星载微波散射计是目前海面风场观测领域应用最为广泛的遥感仪器,其通过测量受风场调制的面后向散射系数,并结合反演算法来获取海面风场信息^[2]. 不断增长的观测需求对星载微波散射计的后向散射系数测量精度和风场反演性能提出了更高的要求,为此发展出不同观测体制的星载微波散射计. 相比其他卫星遥感仪器,星载微波散射计能够提供高时空分辨率的高精度风速、风向观测资料,在热带气旋等极端事件预报预测中具有重要作用^[3]. 根据政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第六次评估报告,过去四十年来,气候变暖导致海温升高,北大西洋等地区 3~5 级热带气旋的频率有所增加^[4]. 随着气候问题越来越显著,散射计提供的高精度高风速风场测量和反演资料显得愈发重要.

根据波束形状和波束扫描方式的不同,已经投入

业务化运行的星载微波散射计主要划分为固定扇形波束体制散射计、旋转笔形波束体制散射计和旋转扇形波束体制散射计三种观测体制. 目前,中国运行的星载微波散射计主要采用旋转体制,例如海洋二号卫星散射计 (HSCAT) 采用旋转笔形波束体制,中法海洋卫星散射计 (CSCAT) 和风云三号卫星风场测量雷达 (WindRAD) 均选择采用旋转扇形波束体制. 过去几十年间,针对不同体制散射计各自的性能特点已开展了一系列研究: 1997 年, Spencer 等^[5] 针对采用旋转笔形波束体制的 SeaWinds 散射计进行建模并对其后向散射系数测量精度进行评估; 2012 年, Anderson 等^[6] 使用高级散射计 (ASCAT) L1 B 数据来对固定扇形波束体制散射计的性能进行评估,着重分析了后向散射系数测量精度和海面风场之间的关系; 2019 年, Lin 等^[7] 参考 CSCAT 散射计的信号处理和数据处理流程,建立了一种适用于旋转扇形波束体制散射计的端到端仿真模型,利用仿真方法对 CSCAT 散射计进行了发射前评估; 2024 年, Shang 等^[8] 对 WindRAD 散射计的后向散射系数测量精度等性能

指标进行分析, 证明这种采用双频设计的新型旋转扇形波束体制散射计可以进行高精度的后向散射系数测量和风场反演. 此外, 针对尚未投入业务运行的全极化散射计和多普勒散射计也已有一系列研究: Song 等^[9] 和 Yang 等^[10] 先后利用仿真方法对全极化散射计的 σ^0 测量精度和风场反演精度进行评估, Bao 等^[11] 通过仿真方法对多普勒散射计的海流观测能力进行验证, 同时对风场观测性能进行了优化.

随着微波散射计后向散射系数测量和风场反演技术的发展, 近年的研究已确认其对高风速风场的观测能力^[12,13], 但是已有研究尚未针对高风速条件进行系统理想条件下微波散射计测量的仿真分析. 本研究参考中国现有旋转笔形波束体制散射计和旋转扇形波束体制散射计参数设置进行仿真模拟, 在与实测数据比较验证仿真系统搭建有效性后, 分析了 $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下中低风速风场和 $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上高风速风场的不同风速条件下两种不同体制散射计的后向散射系数测量精度和风场反演性能; 在此基础上结合再分析资料^[14], 研究了两种体制散射计对台风海域的观测性能, 得出现有设计微波散射计在理想仿真条件下的观测误差分布, 为进一步发展高风速条件下的反演模型和针对极端风场的研究奠定基础.

1 研究方法

1.1 散射计系统仿真模型

散射计在观测海面风场的过程中需对被观测区域发射观测脉冲, 并测量其回波信号. 为提高距离向分辨率, 散射计通常采用线性调频脉冲压缩技术将信号的回波延时和频率偏移联系起来, 通过对回波信号采样并进行快速傅里叶变换 (FFT), 可在接收频带上按不同频率偏移将信号划分为一系列样本点, 进而确定来自不同距离处的目标回波并对回波能量进行估计, 通过雷达方程可计算单个样本点对应的后向散射系数. 为兼顾后向散射系数测量精度和数据处理成本, 实际的散射计后向散射系数测量过程中一般会利用距离门重组算法将相邻的若干个样本点组合为一个切片, 并对各切片的回波能量进行估计, 再由雷达方程得到各切片对应的后向散射系数^[15]. 雷达方程可表示为如下形式:

$$E_s = \frac{E_t G^2 \lambda^2 A}{(4\pi)^3 r^4 L} \sigma^0. \quad (1)$$

其中, E_s 和 E_t 分别表示该样本点或切片贡献的回波能量和发射能量, G 为天线增益, λ 为观测脉冲波长, A 表示该样本点或切片对应的等效空间尺寸, r 表示斜距, L 表示系统损耗, σ^0 为该样本点或切片对应的后向散射系数.

由面元匹配算法, 将样本点或切片对应的后向散射系数重采样到均匀划分的风单元 (WVC) 上, 得到该风单元各视数^[16,17] 的后向散射系数. 在风场反演过程中, 反演算法将根据风单元各视数的后向散射系数进行最大似然估计 (MLE), 得到包含多个风场解的反演结果, 该反演算法实际上是在风速风向所有可能取值构成的二维空间中搜索能够使目标函数取得极大值的风速风向点. 受问题自身特点影响, 往往存在多个极大值点, 其中最接近真实风场的点被称为最优解, 其他点则被称为模糊解^[18]. 通过圆中数滤波或二维变分方法 (2D VAR) 可以对反演结果进行去模糊, 确定出最接近真实风场的最优解.

参考上述散射计风场观测过程, 本研究建立的散射计系统仿真模型如图 1 所示. 伪 L1 仿真器和 L1 仿真器可模拟散射计测量后向散射系数和相关辅助数据的过程. 伪 L1 仿真器利用给定的仿真参数 (如卫星轨道参数、脉冲信号参数, 天线参数等) 计算每个观测脉冲中各 FFT 样本点的仿真数据, 包括各样本点对应的目标空间位置 (可由当前卫星位置、波束指向和距离门等中间仿真数据, 结合仿真系统给定的 WGS-84 地球坐标系进行仿真计算)、观测几何角度 (由目标空间位置和卫星位置计算)、归一化信噪比 (信噪比仿真过程中与目标后向散射系数测量值无关的中间项). 完整的数值计算过程较为繁琐, 这里仅对 FFT 样本点和归一化信噪比的计算方法进行简要介

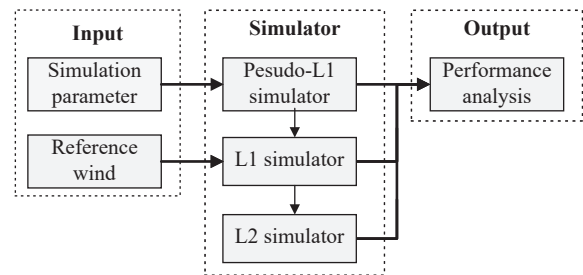


图 1 散射计系统仿真模型

Fig. 1 Simulation model of scatterometer system

绍. 在仿真过程中, 一个观测脉冲能够产生的 FFT 样本点数量为观测脉冲的有效带宽 B_{pulse} 与每个样本点对应的接收窗口时宽 τ_{rec} 之积, 其中, 接收窗口时宽 τ_{rec} 是一个可由给定仿真参数确定的常数, 有效带宽 B_{pulse} 在考虑相对运动带来的多普勒频移后可表示为

$$B_{\text{pulse}} = [(\partial f_k / \partial t) + (\partial f_d / \partial t)] \cdot \tau_{\text{pulse}}. \quad (2)$$

其中, τ_{pulse} 代表观测脉冲时宽, 是一个由给定仿真参数给定的常数; $(\partial f_k / \partial t)$ 项为线性调频斜率, 由仿真参数给定; $(\partial f_d / \partial t)$ 项则是多普勒频移对有效带宽的影响, 在仿真中可以通过接收窗口首尾端对应的多普勒频移和接收窗口时宽进行计算. 在得到观测脉冲产生的 FFT 样本点总数后, 仿真可根据每个 FFT 样本点的不同频率偏移计算对应的回波时延, 进而确定对应的目标距离和位置. 归一化信噪比 SNR' (定义数学符号 $R_{\text{SNR}'}$) 是使用后向散射系数对测量信噪比 SNR (定义数学符号 R_{SNR}) 进行归一化后的结果, 可以结合式 (1) 的雷达方程得到, 即

$$R_{\text{SNR}'} = \frac{S}{\sigma^0 P_n} = \frac{G^2 \lambda^2 A}{(4\pi)^3 r^4 L} \cdot \frac{P_T \tau_{\text{pulse}}}{k_B n_f T_{\text{ref}}}. \quad (3)$$

其中, G , λ , A , r 和 L 项与式 (1) 中的含义相同; S 和 P_n 分别代表信号能量和噪声功率谱密度, P_T 为脉冲发射功率, τ_{pulse} 为观测脉冲时宽, k_B 为玻尔兹曼常数, n_f 为散射计接收机噪声系数, T_{ref} 为散射计系统温度. 上述方法得到的各观测脉冲的 FFT 样本点数据可经面元匹配算法, 将相同极化观测脉冲产生的观测几何角度相近、观测时间相近的样本点数据进行空间加权平均, 得到风单元上各视数对应的独立观测样本数、归一化信噪比和观测几何角度等数据.

L1 仿真器则可根据上述观测视数数据和参考风场, 结合地球物理模型函数 (GMF) 计算后向散射系数. 仿真器中的 GMF 查找表提供了风速、风向、观测几何角度、极化方式和后向散射系数之间的映射关系, 再通过三次样条插值可生成后向散射系数参考值. 后向散射系数测量值可认为服从高斯分布, 仿真使用上文提到的后向散射系数参考值作为其期望, 并计算后向散射系数测量值的归一化标准差, 从而模拟后向散射系数测量值. 这里的归一化标准差的相关计算方法将在下一小节给出.

L2 仿真器将根据上述仿真数据进行风场反演, 并通过去模糊处理得到风场反演结果. 结合不同仿真器的仿真结果, 可实现对散射计后向散射系数测量精

度和风场反演性能的评估. 仿真中使用 MLE 算法进行风场反演, 使用的目标函数为

$$J_{\text{MLE}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(\hat{\sigma}_i^0 - \sigma_i^0)^2}{\text{var}\{\hat{\sigma}_i^0\}}. \quad (4)$$

其中, N 为风单元的观测视数个数, $\hat{\sigma}_i^0$ 表示第 i 个视数对应的后向散射系数测量值, $\text{var}\{\hat{\sigma}_i^0\}$ 表示对应的测量方差, σ_i^0 表示通过 GMF 得到的第 i 个视数对应的后向散射系数模拟值. 反演算法将按照 2.5° 的风向间隔确定出 144 个风向区间上的所有可能解, 再通过去模糊算法得到唯一的最优解作为风场反演的最终结果. 为便于仿真实现, 本文仿真使用的反演算法将首先确定出 144 个可能解, 并按每个可能解对应的目标函数值降序排列, 选用前 4 个可能解进行圆中数滤波, 圆中数滤波可选用目标函数值最大或最接近 NWP 风场的可能解作为初始场, 进而进行去模糊处理得到仿真的风场反演结果.

1.2 后向散射系数测量精度

散射计对后向散射系数的测量过程会受到来自不同因素的噪声影响, 后向散射系数测量误差可以通过归一化标准差 K_p 进行表示, 即^[7,16,19]

$$K_p = \sqrt{K_{\text{pc}}^2 + K_{\text{pr}}^2 + K_{\text{pm}}^2 + K_{\text{pg}}^2}. \quad (5)$$

其中, K_{pc} , K_{pr} , K_{pm} , K_{pg} 分别代表传递误差、定标误差、模型误差和地球物理噪声贡献的误差, 各误差相互独立. K_{pc} 直接反映散射计系统设计对后向散射系数测量精度造成的影响, 因此本研究选择 K_{pc} 作为对后向散射系数测量精度的评价指标和主要研究对象, 在仿真过程中选择将 K_{pr} , K_{pm} , K_{pg} 项数值设置为 0, 此时 K_p 的数值与 K_{pc} 相等. K_{pc} 可以表示为如下形式:

$$K_{\text{pc}} = \sqrt{A + \frac{B}{R_{\text{SNR}}} + \frac{C}{R_{\text{SNR}}^2}}; \quad (6)$$

$$A = \frac{1}{B_s \tau_p}, \quad B = \frac{2}{B_s \tau_g}, \quad C = \frac{1}{B_s \tau_g}. \quad (7)$$

其中, B_s 为测量带宽, τ_p 为脉冲持续时间, τ_g 为接收窗口时宽. 为便于仿真实现和结果分析, 上述形式的 K_{pc} 可被进一步表示为每个视数的独立观测样本数、归一化信噪比和后向散射系数的函数^[20], 有

$$K_{\text{pc}} = \sqrt{\frac{1}{N_{\text{sample}}} \left(1 + \frac{1}{R_{\text{SNR}'}} \cdot \sigma^0 \right)^2 + \frac{1}{N_{\text{noise}}} \left(\frac{1}{R_{\text{SNR}'}} \cdot \sigma^0 \right)^2}. \quad (8)$$

其中, N_{sample} 代表风单元内的独立观测样本数,

N_{noise} 是一个与测量目标无关的常数值, 归一化信噪比 R_{SNR} 与后向散射系数 σ^0 的积即为测量信噪比 R_{SNR} .

1.3 仿真参数

本研究系统仿真模型需要的数据包括散射计系统参数和仿真风场数据. 为对两种旋转体制散射计进行性能评估, 本研究参考 HSCAT 散射计和 CSCAT 散射计设计参数来对仿真中的旋转笔形波束体制散射计和旋转扇形波束体制散射计进行仿真参数配置^[17,21-23]. 主要参数如表 1 所示.

旋转扇形波束体制散射计通常配置能够覆盖较宽俯仰角范围的观测波束, 能够对大片风单元进行同时观测. 这一特点使该体制散射计可在不同入射角上对同一风单元进行观测, 得到观测几何信息更为丰富的不同视数观测数据. 此外, 该特点使其能够采用转速较慢的扫描天线, 可在短时间内对同一风单元进行次数更多的脉冲观测, 使同一视数能够包含更多脉冲观测得到的信息. 但在发射功率不变的条件下, 拥有较宽观测波束的天线的增益往往较低, 导致其测量信噪比相对较低.

旋转笔形波束体制散射计配置的观测波束更窄, 覆盖的俯仰角范围明显小于扇形体制. 为确保观测刈幅连续且无盲区, 该体制散射计需要配置高转速天线, 使其对同一风单元的观测时间较短, 每个视数包含的观测脉冲数更少. 但得益于笔形波束天线能在发

射功率较低的条件实现更高的增益的特点, 该体制散射计的测量信噪比通常较高.

1.4 仿真系统有效性验证

CSCAT 散射计和 HSCAT 散射计设计指标要求散射计能够在 $4\sim 24\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速区间实现优于 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 或 10% 的风速测量精度. 这里使用 1.3 节提到的两组散射计参数进行仿真, 仿真参考风场风速值使用 $4\sim 24\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 区间内生成的高斯分布随机数, 其期望为 $14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 标准差为 $3.33\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 风向值使用 $0^\circ\sim 360^\circ$ 区间内生成的均匀分布随机数. 通过考察仿真结果的风速测量精度是否满足实际设计指标来对仿真系统有效性进行验证. 仿真得到的测量风场的风速测量精度如图 2 所示, 图中亮色区域对应更密集的风速值散点, 可以看出仿真测量风速与参考风速在 $4\sim 24\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 区间内具有较好的一致性. 经统计, 旋转扇形波束体制散射计在该风速区间风速测量偏差分布接近正态分布, 且均值为 $0.12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 标准差为 $0.63\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 旋转笔形波束体制散射计的风速测量偏差分布同样接近正态分布, 其均值为 $0.04\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 标准差为 $0.59\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. 对于风速小于等于 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的中低风速风场, 旋转扇形波束体制散射计取得的风速测量均方根误差 (RMSE) 为 $0.64\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 旋转笔形波束体制散射计则为 $0.58\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 对于风速大于 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的高风速风场, 旋转扇形波束体制散射计取得的风速测量 RMSE 为 $0.63\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 旋转笔形波束体制散射计则为 $0.89\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. 参考 CSCAT 散射计和 HSCAT 散射计参数的仿真结果满足实际设计指标, 可认为该仿真模型较好地模拟了散射计风场观测的工作过程. 后续仿真结果分析过程中的中低风速区间 (风速 $\leq 20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) 和高风速区间 (风速 $> 20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) 概念与这里保持一致.

2 不同体制散射计性能分析

2.1 后向散射系数测量性能分析

利用仿真得到的整轨数据可对旋转扇形波束体制散射计和旋转笔形波束体制散射计在不同风速条件下每个视数的后向散射系数和 K_{pc} 进行计算. 结合式 (5) 可知, 式中仅有 σ^0 项与海面风场有关, 其他项只取决于散射计系统设计. 因此在分析 K_{pc} 之前, 可先对两种体制散射计观测取得的各视数的等效样本数

表 1 散射计系统参数
Table 1 Scatterometer system parameters

参数	旋转扇形波束体制	旋转笔形波束体制
脉冲载频/GHz	13.256	13.256
脉冲时宽/ms	1.3	1.5
脉冲重复频率/Hz	150	185
接收带宽/MHz	0.5	1.0
发射功率/W	120	120
天线峰值增益/dB	32	39
天线转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	3.4	16.7
系统损耗/dB	1.0	1.0
噪声系数/dB	6.0	5.0
VV极化波束观测俯仰角/($^\circ$)	25~44	41
HH极化波束观测俯仰角/($^\circ$)	25~44	35
轨道高度/km	520	970

N_{sample} 和归一化信噪比 SNR' 进行简单考察. 仿真中观测视数 N_{sample} 的值可由 1.1 节提到的伪 L1 仿真器面元匹配算法得到, 反映被划分到同一观测视数的样本点数量, 同一视数样本点归一化信噪比的空间加权平均则作为该观测视数的 SNR' .

图 3 展示了两种不同体制散射计各视数的独立观测样本数和归一化信噪比分布特征. 可以看到, 旋转扇形波束体制散射计在观测过程中倾向于取得更多的独立观测样本和相对较小的归一化信噪比, 而旋转笔形波束体制散射计则倾向于取得更少的独立观测样本和相对较大的归一化信噪比, 其标准差和均

值如表 2 所示. 这一现象与 1.3 节对两种体制散射计的分析相对应: 旋转扇形波束体制散射计同一视数数据往往由更多次脉冲观测得到的数据组合而成, 得到的独立观测样本数更大; 而旋转笔形体制各视数对应的脉冲观测数量较少, 其独立观测样本数较小, 但测量信噪比要明显大于旋转扇形波束体制散射计.

特别地, 从图 3 中可以明显注意到两种体制散射计在观测过程中均会得到一定量的独立观测样本数明显偏小的异常视数, 这些观测视数大多是由波束的足迹边缘观测得到的. 图 3(a) 左下方出现两条归一化信噪比覆盖 2~4 和 6~9 范围、独立观测样本数均

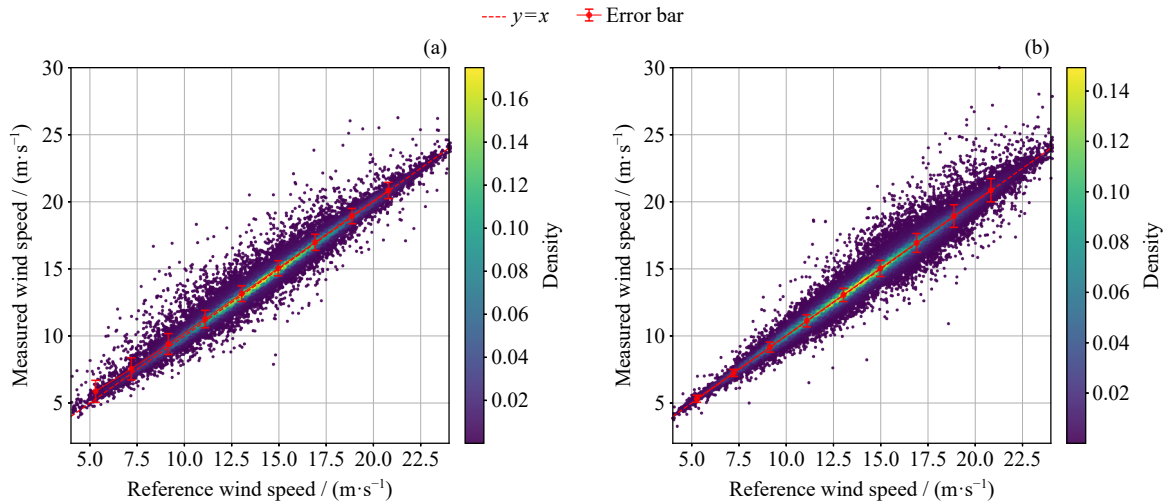


图 2 参考风场风速与仿真测量风场风速分布情况. (a) 旋转扇形波束体制, (b) 旋转笔形波束体制

Fig. 2 Distribution of reference wind speed and the measured wind speed in simulation.

(a) Rotating fan-beam system, (b) rotating pencil-beam system

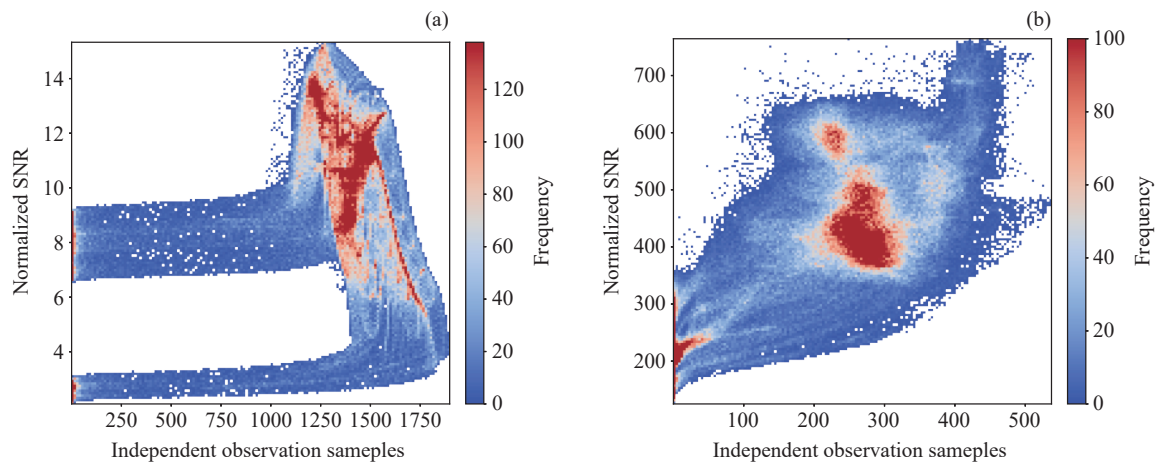


图 3 独立观测样本数和归一化信噪比分布情况. (a) 旋转扇形波束体制, (b) 旋转笔形波束体制

Fig. 3 Independent observation samples and normalized SNR distribution. (a) Rotating

fan-beam system, (b) rotating pencil-beam system

表 2 独立观测样本数和归一化信噪比统计特性

Table 2 Independent observation samples (N_{sample}) and normalized SNR ($R_{\text{SNR}'}$) statistics

散射计体制	N_{sample} 均值	N_{sample} 标准差	$R_{\text{SNR}'}$ 均值	$R_{\text{SNR}'}$ 标准差
旋转扇形波束体制	1292.7	401.2	9.4	2.9
旋转笔形波束体制	232.7	110.6	429.4	121.1

匀分布在 0~1000 的区域. 经分析, 这一区域归一化信噪比为 6~10 的数据主要由扇形波束足迹的最远端边缘观测得到, 归一化信噪比小于 4 的数据主要由足迹的最近端边缘观测得到; 图 3(b) 左下角也存在一定数量的异常点, 表明笔形波束也存在类似现象. 上述分布区域的视数在 K_{pc} 计算过程中往往会得到较大值, 表明波束边缘的后向散射系数测量精度较差.

仿真得到的观测视数数据可以在结合给定参考风场后计算对应的后向散射系数和 K_{pc} . 分别使用 4, 18, 30 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 三种风速下的风向随机风场对两种不同体制散射计的 K_{pc} 进行考察. 图 4 展示了三种风速下观测取得的 K_{pc} 分布范围随风单元位置变化的特征. 图 4 中风速等于 4 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的低风速条件下, 旋转扇形波束体制散射计的 K_{pc} 普遍高于旋转笔形波束体制散射计的 K_{pc} ; 随着风速提高, 两种不同体制散射计的 K_{pc} 均随之降低, 但旋转扇形波束体制散射计的下降趋势相比旋转笔形波束体制散射计要更明显, 在图 4 中风速等于 18 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的中等风速条件下, 两种不同体制的散射计的 K_{pc} 分布范围较为接近; 随着风速进一步提高, 在图 4 中风速等于 30 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的高风速条件下, 旋转扇形波束体制散射计的 K_{pc} 则要普遍小于旋转笔形波束体制散射计, 表明其拥有更高的后向散射系数测量精度. 除受到风速的调制以外, K_{pc} 也会受到风单元位置带来的调制, 其原因是不同位置风单元对应的观测几何角度不同, 取得的归一化信噪比和独立观测样本数随之不同.

对 K_{pc} 的上述变化特点可结合式 (5) 进行分析. 在观测几何角度和风向固定的情况下, 海面风场的后向散射系数 σ^0 随风速增加整体呈增大趋势, 当 σ^0 充分小时, 有

$$K_{\text{pc}} \approx \sqrt{\left(\frac{1}{N_{\text{sample}}} + \frac{1}{N_{\text{noise}}}\right)} \cdot \left(\frac{1}{R_{\text{SNR}'}} \cdot \sigma^0\right). \quad (9)$$

当风速较低, 后向散射系数相对较小时, 归一化

信噪比 SNR' 对后向散射系数测量误差起到主导作用. 而当 σ^0 充分大时, 则有

$$K_{\text{pc}} \approx \sqrt{\frac{1}{N_{\text{sample}}}}. \quad (10)$$

对应当风速逐渐增加时, 后向散射系数随之增加, 独立观测样本数 N_{sample} 决定了后向散射系数测量误差的下界. 可以根据表 2 参数进行仿真得到的观测几何, 利用 GMF 来模拟每个观测视数的后向散射系数. 基于整轨仿真结果数据模拟得到的后向散射系数数据表明, 风速为 4 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 旋转扇形波束体制散射计在其观测入射角范围内得到的 VV 极化后向散射系数主要分布于 -29.59~-13.29 dB, HH 极化后向散射系数主要分布于 -33.98~-13.35 dB, 旋转笔形波束体制散射计在其观测入射角范围得到的 VV 极化后向散射系数主要分布于 -30.97~-26.78 dB, HH 极化后向散射系数主要分布于 -33.98~-27.45 dB; 风速为 30 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 旋转扇形波束体制散射计 VV 极化后向散射系数主要分布于 -10.36~-0.41 dB, 而 HH 极化后向散射系数主要分布于 -11.60~-0.48 dB, 旋转笔形波束体制散射计 VV 极化后向散射系数主要分布于 -11.73~-8.74 dB, HH 极化后向散射系数主要分布于 -11.26~-7.55 dB. 使用表 2 中两种不同体制散射计参数进行仿真得到的归一化标准差和等效样本数均值作为参数设置, 对 K_{pc} 在后向散射系数为 -34.00~-4.00 dB 范围内的变化情况进行大致考察, 结果如图 5 所示. 注意到归一化信噪比更大时, K_{pc} 曲线在后向散射系数较小的区域拥有更大的斜率, 使 K_{pc} 值能随后向散射系数增加快速降低, 使得散射计在中低风速条件下也能保持较高的测量精度; 而独立观测样本数更大时, K_{pc} 曲线可拥有更低的下界, 确保散射计在后向散射系数较大的高风速条件下能够拥有较高的测量精度.

2.2 风场反演性能分析

散射计风场反演是一个非线性优化过程, 影响反演性能的因素众多, 其中包括后向散射系数测量精

度、观测视数数量、观测几何丰富程度等因素. 在上文对后向散射系数测量精度分析的基础上, 对旋转扇形波束体制散射计和旋转笔形波束体制散射计的风场反演性能开展分析.

使用一系列 $4 \sim 30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速范围内的随机风向风场对两种不同体制散射计的风场反演性能进行评估. 需要注意的是, 随机风向风场各风矢量之间不存

在风向相关性, 无法对反演结果进行去模糊处理. 因此, 将从两方面对风场反演性能进行评估: 一是从一系列可能风场解中提取出最接近参考风场的最优解作为反演结果, 分析风速风向反演精度; 二是考察上述反演结果之中各可能风场解被确定为最优解的概率, 分析风场模糊程度.

图 6 对风速 RMSE 进行考察, 比较两种不同体

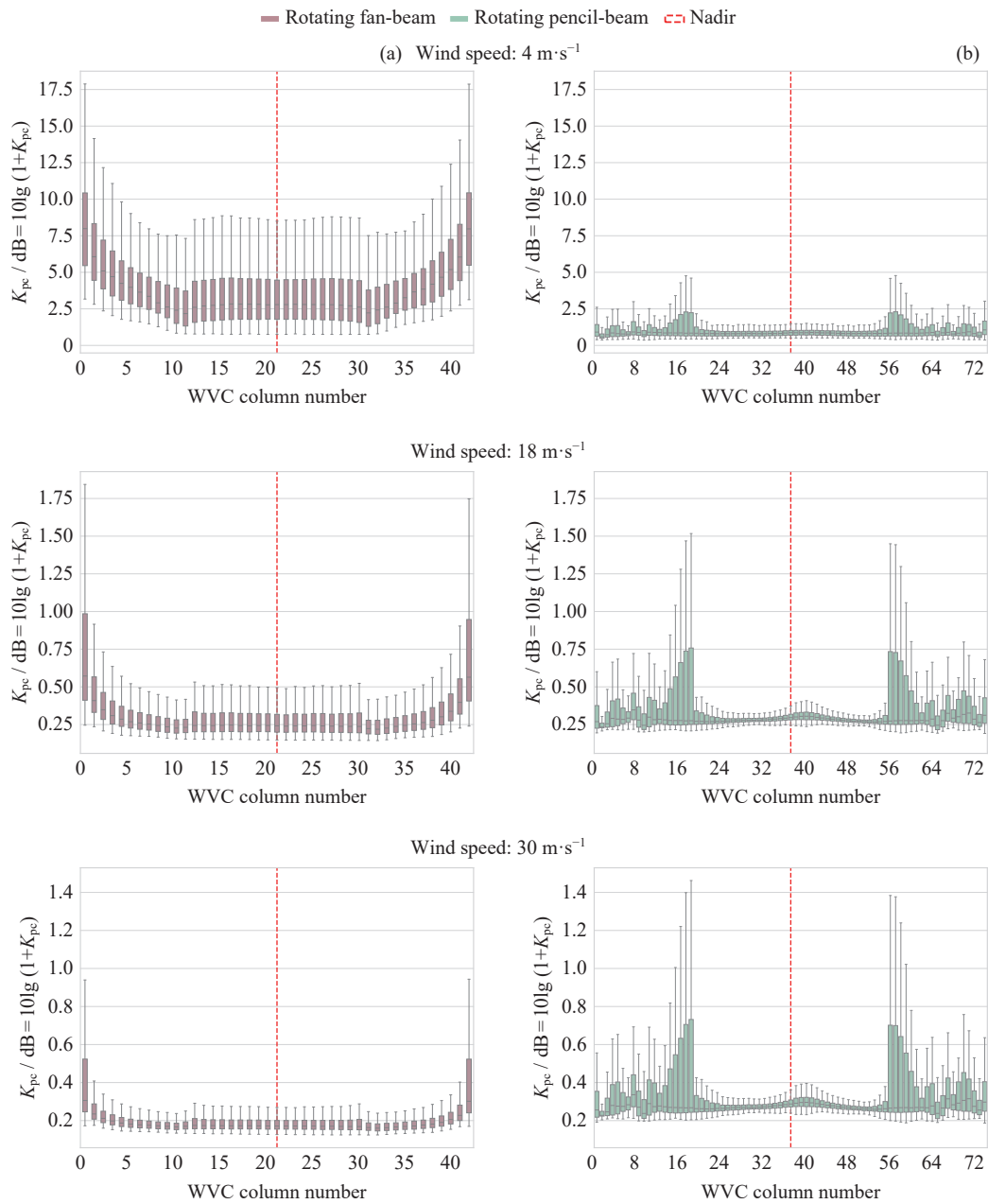


图 4 风速分别为 $4, 18, 30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时不同位置风单元的 K_{pc} 分布情况.

(a) 旋转扇形波束体制, (b) 旋转笔形波束体制

Fig. 4 K_{pc} distribution of WVCs at different locations for wind speeds of $4, 18$, and $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

(a) Rotating fan-beam system, (b) rotating pencil-beam system

制散射计在 $4 \sim 30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速范围内的风场反演性能. 在 $4 \sim 8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的较低风速区间内, 旋转笔形波束体制散射计的风速 RMSE 可整体控制在 $1.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以内, 而旋转扇形波束体制散射计只能在风速等于 $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时将风速 RMSE 整体控制在 $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 内; 在 $8 \sim 18 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的中等风速区间上, 旋转扇形波束体制散射计的风速 RMSE 整体控制在 $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以内, 且风速 RMSE 曲线形状较为接近, 表明其在该风速区间的反演性能受风速影响较小, 而旋转笔形波束体制散射计的风速 RMSE 在此区间内随风速增加而增加; 在 $26 \sim 30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的较高风速区间, 旋转扇形波束体制

散射计也开始出现反演性能随风速增加而下降的趋势, 其星下点区域的风速 RMSE 由约 $1.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增加至约 $1.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 但相较旋转笔形波束体制散射计仍能保持较好的观测效果.

图 7 则对风向 RMSE 进行考察. $4 \sim 8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的较低风速区间内, 旋转笔形波束体制散射计的风向 RMSE 控制在大约 30° 以内, 反映出旋转笔形波束体制散射计对低风速观测存在一定优势. 随着风速不断提高, 旋转扇形波束体制散射计的观测优势逐渐体现出来, 在 $14 \sim 30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的中高风速区间上的风向 RMSE 整体控制在 10° 以内. 此外, 两种散射计的风

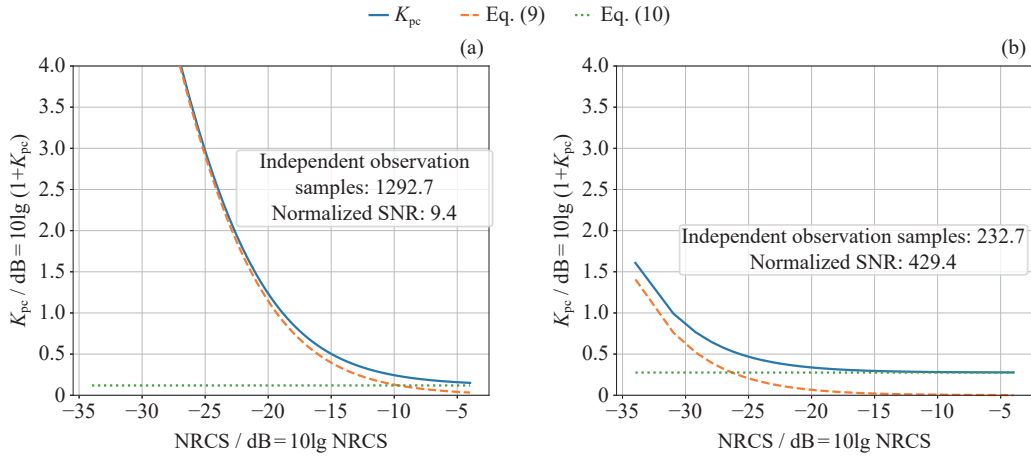


图 5 K_{pc} 随后向散射系数 σ^0 的变化情况. (a) 旋转扇形波束体制, (b) 旋转笔形波束体制
Fig. 5 Variation of K_{pc} value with backscattering coefficient. (a) Rotating fan-beam system, (b) rotating pencil-beam system

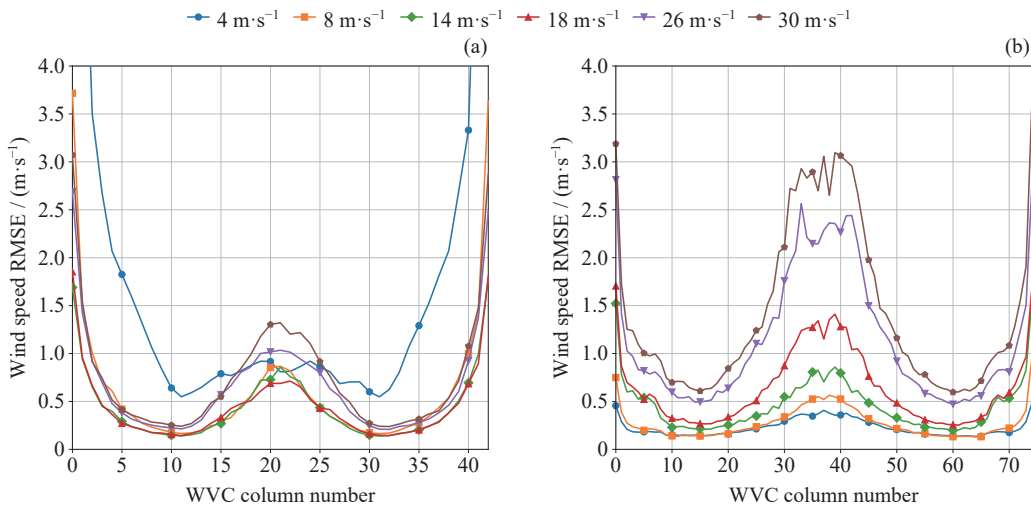


图 6 不同风速条件下风速 RMSE 随风单元位置的变化. (a) 旋转扇形波束体制, (b) 旋转笔形波束体制
Fig. 6 Variation of wind speed RMSE with WVC position under different wind speed conditions. (a) Rotating fan-beam system, (b) rotating pencil-beam system

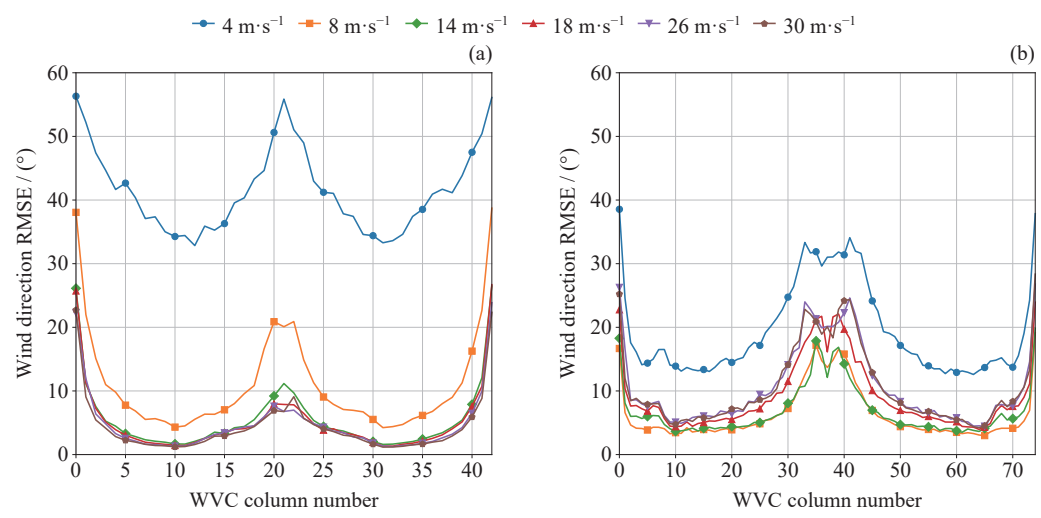


图 7 不同风速条件下风向 RMSE 随风单元位置的变化. (a) 旋转扇形波束体制, (b) 旋转笔形波束体制
Fig. 7 Variation of wind direction RMSE with WVC position under different wind speed conditions.
(a) Rotating fan-beam system, (b) rotating pencil-beam system

向 RMSE 曲线随风速增加趋于收敛, 该现象在 $18\sim 30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 区间内较为明显. 整体而言, 在不考虑风场模糊程度的情况下, 两种不同体制散射计测量的风速 RMSE 和风速 RMSE 随风速变化的特征与 K_{pc} 随风速变化的特征相关程度较大. 低风速情况下旋转笔形波束体制散射计能够对后向散射系数进行更高精度的测量, 带来更好的反演表现; 而旋转扇形波束体制散射计的性能优势则随着风速的提高逐渐体现出来.

两种体制散射计反演结果之中第 K 风场解被选为最优解的占比情况如表 3 所示. 在风场反演过程中, 各可能风场解会按照各自对应的目标函数值的大小进行排序, K 越小对应的目标函数值越大. 注意到在 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 低风速条件下, 旋转扇形波束体制散射计得到的反演结果中, 第 1 风场解的占比仅为 47.8%, 表明其对低风速风场反演结果的风场模糊程度较高, 反演效果较差; 而同风速条件下旋转笔形波束体制散射计反演结果中的第 1 风场解的占比为 60.5%, 反演效果更优. 在 $18\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速条件下, 旋转扇形波束体制散射计反演结果中的第 1 风场解的占比分别为 89.9% 和 92.3%, 风场模糊程度更低, 反映出旋转扇形波束体制散射计对高风速风场反演存在较为明显的性能优势; 而旋转笔形波束体制散射计反演结果中第 1 风场解的占比分别为 62.5% 和 52.0%, 对中高风速反演效果相对较差. 此外, 表 3 结果还反

表 3 不同散射计体制下第 K 风场解被选为最优解的占比统计

Table 3 Percentage distribution of the K -th ranked wind solution selected as optimal under different scatterometer systems

散射计体制	K	$4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	$18\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	$30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
旋转扇形波束体制	1	47.8	89.9	92.3
	2	31.2	9.2	6.3
	3	16.4	0.6	0.9
	4	4.4	0.1	0.3
旋转笔形波束体制	1	60.5	62.5	52.0
	2	25.9	28.3	31.0
	3	10.1	6.2	11.3
	4	3.4	2.9	5.5

注 最优解为最接近真实风场的解.

映出散射计风场反演性能受观测视数数量和观测几何丰富程度的影响, 结合图 3(b) 可知, 在 $18\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的中等风速条件下旋转扇形波束体制散射计和旋转笔形波束体制散射计有着相接近的后向散射系数测量精度, 但旋转扇形波束体制散射计的反演结果中第 1 风场解的占比明显要高于旋转笔形波束体制散射计. 这主要是由于旋转扇形波束体制散射计能够对同一风单元提供更多的观测几何观测组合, 有利于提高风向测量精度和去模糊效果^[22].

2.3 热带气旋观测效果评估

热带气旋的遥感观测一直是海洋遥感领域的热点及难点. 在对两种不同体制散射计的后向散射系数测量精度和风场反演性能进行分析的基础上, 本小节将以 2023 年 6 号台风“卡努”为具体案例, 使用 2023 年 7 月 30 日 20:00 UTC 的 ECMWF ERA5 再分析资料作为仿真参考风场, 并利用同一时段的 ECMWF HRES 数值天气预报资料配置仿真中的圆中数滤波去模糊算法, 得到旋转扇形波束体制散射计和旋转笔形波束体制散射计对热带气旋的观测仿真结果, 从而初步评估不同散射计体制对热带气旋的观测效果. 需要注意的是, 由于星下点附近区域和观测刈幅最外侧区域取得的低质量观测结果占比较多, 本小节选择使用位于观测刈幅两侧被称为“甜带”的观测区域进行仿真结果分析, 散射计对这一区域观测取得的观测视数数量较多, 有利于后续的风场反演和去模糊处理.

图 8 是两种不同体制的散射计观测台风“卡努”的仿真结果, 图 9 反映散射计对台风“卡努”不同区域反演结果的风矢量误差. 从图 7 可以看出, 旋转扇形波束体制散射计对位于 $133^{\circ}\text{E}-134^{\circ}\text{E}$, $21^{\circ}\text{N}-22.5^{\circ}\text{N}$ 的眼墙东部高风速结构的风向反演效果优于旋转笔形波束体制散射计, 风矢量间具有较好的连续

性, 更接近真实台风结构特征; 但在眼区低风速结构的反演结果中, 旋转扇形波束体制散射计对该区域存在一块风向反演效果较差的风单元, 而旋转笔形波束体制散射计对此区域风向的反演效果较好. 结合图 8 对风矢量误差进行考察: 可以注意到旋转扇形波束体制散射计对上文提到的高风速结构反演结果的风矢量误差较小, 整体控制在 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 范围以内; 旋转笔形波束体制散射计反演结果中的高误差区域则主要分布在眼墙周边大风区域, 这些区域的风矢量误差普遍高于 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 此外, 在对眼区低风速结构的反演上, 旋转扇形波束体制散射计反演的风矢量误差普遍接近 $2\sim 5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 而旋转笔形波束体制散射计则可控制在 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 范围之内. 此外, 图 8(a)(b) 两图的东两侧区域的风矢量误差在相对偏大, 因为这些区域靠近接近散射计观测刈幅的最外侧区域和星下点附近区域, 观测效果相对较差.

图 10 是上述反演结果风速测量值和真实值分布示意图. 对于风速小于 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的中低风速区域, 旋转扇形波束体制散射计反演得到的风速偏差相对较大, 最大偏差接近 $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 风速 RMSE 约为 $0.71\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 而旋转笔形波束体制散射计得到的风速偏差整体小于 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 风速测量 RMSE 约为 $0.58\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 图中更多的风速点集中在对角线附近; 在

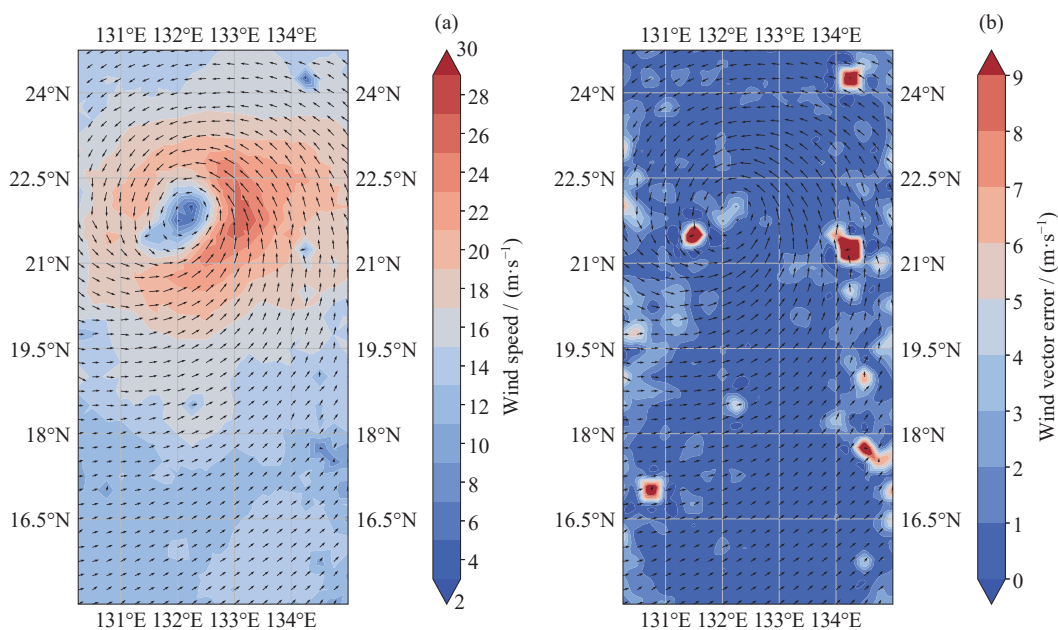


图 8 散射计观测台风“卡努”的仿真结果. (a) 旋转扇形波束体制, (b) 旋转笔形波束体制

Fig. 8 Simulation results of Typhoon Khanun by two system. (a) Rotating fan-beam system, (b) rotating pencil-beam system

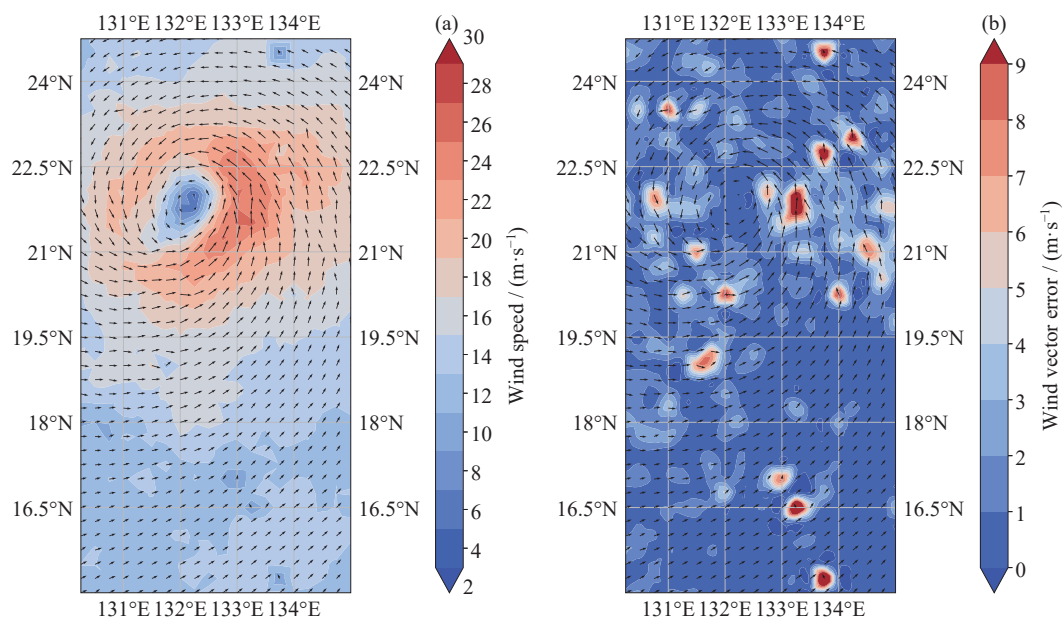


图9 台风“卡努”观测仿真结果的误差分布情况. (a) 旋转扇形波束体制, (b) 旋转笔形波束体制

Fig. 9 Error distribution of the simulation results of Typhoon Khanun by two system.

(a) Rotating fan-beam system, (b) rotating pencil-beam system

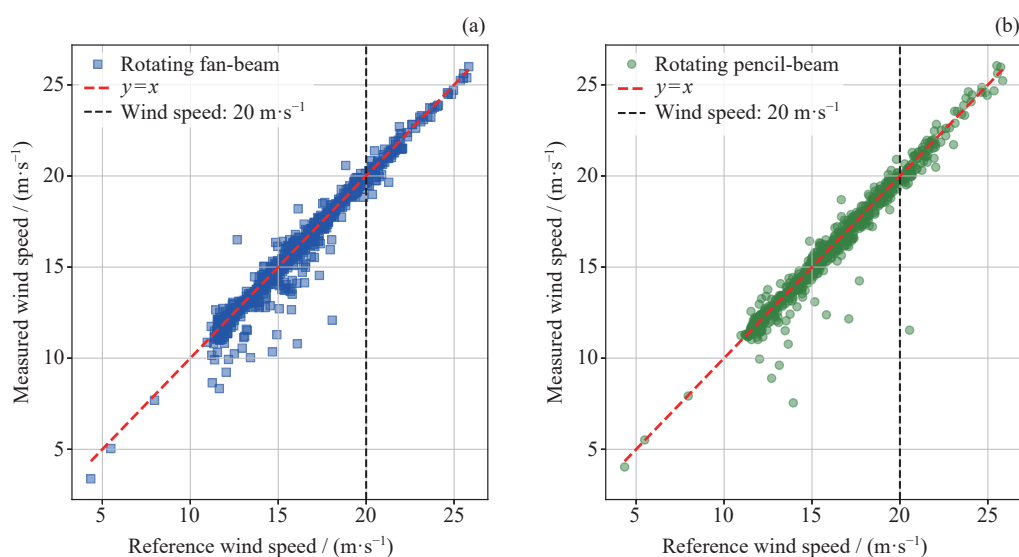


图10 两种不同体制散射计风速观测情况

Fig. 10 Wind speed observations for two different scatterometer systems

风速大于 $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的中高风速区域, 旋转扇形波束体制散射计反演得到的风速点与对角线的贴合程度较好, 此区间风速测量 RMSE 约为 $0.41 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 而旋转笔形波束体制散射计得到的风速点与对角线的贴合程度则较为松散, 区间内风速测量 RMSE 约为 $1.05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 表明该体制在这一风速范围的风速测量偏差相对较大. 此外, 尽管图 10 中的风速测量结果表

明旋转笔形波束体制散射计在 $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下的中低风速区间能够实现相比旋转扇形波束体制散射计更精确的风速测量, 但其在图 9 中的中低风速结构的观测结果却有着相较旋转扇形波束体制散射计更大的风矢量误差, 这一结果也进一步反映出旋转笔形波束体制散射计相对较少的观测视数不利于风向反演精度的提高.

3 结论

本研究采用仿真方法,参考我国现有散射计参数设计,针对旋转扇形波束体制散射计和旋转笔形波束散射计进行了详细的性能评估,分析了它们在不同风速条件下的后向散射系数测量精度和风场反演性能。在此基础上,利用再分析风场资料,进一步探讨了两种体制散射计对热带气旋的观测性能。

研究表明,旋转扇形波束体制散射计较大的俯仰向波束宽度和较低的天线转速,使得其观测结果能够取得比旋转笔形波束体制散射计更多的独立观测样本数;而旋转笔形波束体制散射计较高的天线增益令其观测结果拥有相对更大的归一化信噪比。对于反映后向散射系数测量误差的 K_{pc} ,其值在低风速情况下受归一化信噪比影响较大,而在高风速情况下受独立观测样本数主导。已有在轨运行散射计参数设置的仿真结果表明,旋转扇形波束体制散射计在大于 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的中高风速段拥有相对更高的后向散射系数测量精度,而旋转笔形波束体制散射计则在小于 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的中低风速段中后向散射系数测量精度相对更高。在 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右的低风速条件下,旋转笔形波束体制散射计反演精度相对更高;而在 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上的中高风速区间,旋转笔形波束体制散射计反演精度相对更高。此外对于风场解模糊程度,中高风速条件下旋转扇形波束散射计反演结果的最优解等于第1风场解的概率更大,在 $18\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 条件下分别为89.9%和92.3%,而旋转扇形波束散射计则为62.5%和52.0%,这一仿真结果表明旋转扇形波束体制散射计对中高风速条件下的反演结果更有利于去模糊处理。参考现有在轨运行散射计参数得到的仿真结果也表明,热带气旋观测中,旋转笔形波束体制散射计对眼区低风速结构的观测效果更佳,但对眼墙周边高风速结构的风场观测效果较差,且高风速段风场解模糊程度较高,对去模糊算法提出了更高的性能要求。旋转扇形波束体制散射计则在上述高风速结构和外围大风区域中表现出更出色,其反演结果误差基本控制在 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以内。以上研究对我国散射计设计和热带气旋观测具有参考意义,结论也为后续不同体制散射计系统设置和信号处理进行观测精度提升的研究奠定了基础。后续仿真还将考虑降水对后向散射系数带来的影响,并进行包括固定扇形波束体制散射计

和新型旋转扇形波束体制散射计的仿真研究,实现不同体制散射计热带气旋观测进行更完善的研究。

参考文献

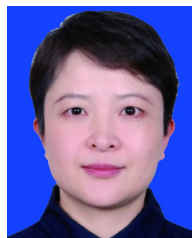
- [1] HAUSER D, ABDALLA S, ARDHUIN F, *et al.* Satellite remote sensing of surface winds, waves, and currents: where are we now?[J]. *Surveys in Geophysics*, 2023, **44**(5): 1357-1446
- [2] BOURASSA M A, MEISSNER T, CEROVECKI I, *et al.* Remotely sensed winds and wind stresses for marine forecasting and ocean modeling[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2019, **6**: 443
- [3] LANG Shuyan, SUN Congrong, LU Yunfei, *et al.* Application of Chinese-French oceanography satellite scatterometer coastal product in typhoon remote sensing monitoring[J]. *Journal of Marine Meteorology*, 2022, **42**(2): 74-80 (郎姝燕, 孙从容, 鲁云飞, 等. 中法海洋卫星微波散射计近海岸产品在台风遥感监测中的应用 [J]. 海洋气象学报, 2022, **42**(2): 74-80)
- [4] IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2021
- [5] SPENCER M W, WU C, LONG D G. Tradeoffs in the design of a spaceborne scanning pencil beam scatterometer: application to SeaWinds[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, **35**(1): 115-126
- [6] ANDERSON C, BONEKAMP H, DUFF C, *et al.* Analysis of ASCAT ocean backscatter measurement noise[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, **50**(7): 2449-2457
- [7] 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
- [8] SHANG J, WANG Z X, DOU F L, *et al.* Preliminary performance of the WindRAD scatterometer onboard the FY-3E meteorological satellite[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2024, **62**: 5100813
- [9] SONG Zhongguo, DONG Xiaolong, LIN Wenming, *et al.* Spaceborne polarimetric microwave scatterometer system simulation and performance analysis[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2013, **41**(12): 2382-2390 (宋忠国, 董晓龙, 林文明, 等. 星载全极化微波散射计系统仿真与性能分析 [J]. 电子学报, 2013, **41**(12): 2382-2390)
- [10] YANG Sheng, ZOU Juhong, LIN Mingsen. Spaceborne fully polarized microwave scatterometer simulation and ocean surface wind retrieval[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2018, **37**(2): 179-184 (杨晟, 邹巨洪, 林明森. 星载全极化微波散射计仿真与海面风场反演研究 [J]. 应用海洋学报, 2018, **37**(2): 179-184)

- [11] BAO Q L, DONG X L, ZHU D, *et al.* The feasibility of ocean surface current measurement using pencil-beam rotating scatterometer[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, 8(7): 3441-3451
- [12] 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
- [13] XU X G, STOFFELEN A, NI W C, *et al.* Extreme winds from Ku-band and C-band wind scatterometers[C]//IGARSS 2023-2023 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Pasadena: IEEE, 2023: 4064-4067
- [14] C3S. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present[DS/OL]. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). 2018[2024-11-10]. <https://cds.climate.copernicus.eu/doi/10.24381/cds.adbb2d47>
- [15] ZHANG Y, LIN M S, XIE X T, *et al.* The improvement of HY-2 Satellite's microwave scatterometer instrument and NRCS calculation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2024, 62: 5112109
- [16] YU Miaomiao, ZHU Di, DONG Xiaolong, *et al.* Analysis of backscattering measurement error of CSCAT[J]. *Journal of Marine Meteorology*, 2024, 44(4): 46-53 (于淼淼, 朱迪, 董晓龙, 等. 中法海洋卫星微波散射计后向散射测量误差分析[J]. 海洋气象学报, 2024, 44(4): 46-53)
- [17] LIN Wenming. Study on Spaceborne Rotating, Range-Gated, Fanbeam Scatterometer System[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 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)
- [18] LIN Mingsen, ZOU Juhong, XIE Xuetong, *et al.* HY-2A microwave scatterometer wind retrieval algorithm[J]. *Strategic Study of CAE*, 2013, 15(7): 68-74 (林明森, 邹巨洪, 解学通, 等. HY-2A 微波散射计风场反演算法[J]. 中国工程科学, 2013, 15(7): 68-74)
- [19] DONG Ying, LIN Wenming. analysis of sea surface backscatter coefficient errors and its effects for the CFOSAT scatterometer[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2024, 44(2): 326-334 (董楹, 林文明. CFOSAT 散射计海面后向散射系数误差及影响[J]. 空间科学学报, 2024, 44(2): 326-334)
- [20] LIN C C, STOFFELEN A, DE KLOE J, *et al.* Wind retrieval capability of rotating range-gated fanbeam spaceborne scatterometer[C]//Proceedings of SPIE 4881, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites VI. Crete, Greece: SPIE, 2003: 268
- [21] LANG Shuyan. Simulation and Optimization of Spaceborne Microwave Scatterometer[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2008 (郎姝燕. 星载微波散射计系统仿真、性能评估与优化[D]. 中国科学院研究生院, 2008)
- [22] 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)
- [23] ZHANG Y, MU B, LIN M S, *et al.* An evaluation of the Chinese HY-2B Satellite's microwave scatterometer instrument[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, 59(6): 4513-4521

作者简介



董字名 男, 2002 年生于河北省廊坊市, 现为中国科学院国家空间科学中心硕士研究生。主要研究方向为星载微波散射计系统仿真。
E-mail: dongziming24@mailsucas.ac.cn



徐星欧 (通信作者) 女, 副研究员, 硕士生导师, IEEE 高级会员 (Senior Member)。2010 年毕业于武汉大学遥感信息工程学院, 摄影测量与遥感专业, 获工学博士学位。2008—2009 年在英国爱丁堡大学地球科学学院, 2018—2019 年在荷兰皇家气象局进行访问研究。2011 年至今, 在中国科学院国家空间科学中心微波室工作, 从事微波散射计海面风场观测研究和应用十余年, 现致力于降水和高风速条件下高精度风场的观测机理、反演模型研究及应用。
E-mail: xuxingou@nssc.ac.cn