

特性,也广泛应用于海杂波、地杂波及气象杂波等研究领域^[16-19]。在海面电磁散射理论建模方面,研究人员主要基于基尔霍夫近似(Kirchhoff approximation, KA)、积分方程法(Integral Equation Method, IEM)、小斜率近似(Small Slope Approximation, SSA)等方法,构建海面微波后向散射的解析方程^[20-25],进而探究海面后向散射系数与海表粗糙结构之间的物理关系。这类模型在海面微波散射机理研究方面具有重要的意义,但通常对海面波谱的计算要求较高,在近实时海杂波估算中有明显的局限性。

均值散射系数模型以海面平均后向散射特性为研究对象,其核心变量为归一化雷达散射截面积(Normalized Radar Cross Section, NRCS),与微波散射计测量学中的后向散射系数(记作 σ^0)一致。该类模型通常将 σ^0 表示为雷达参数和海洋环境变量的函数,即地球物理模式函数。在大量实测数据支撑下,雷达领域的研究人员提出并发展了多种均值散射系数经验模型。1970年,乔治亚理工学院研究人员结合实测数据与散射机理提出了乔治亚理工学院模型(Georgia Institute of Technology, GIT)模型^[26]。随后,研究人员基于Nathanson的实测数据,推导出了美国技术服务公司模型(Technology Service Corporation, TSC)以及混合模型(Hybrid model, HYB)^[27-28]。1978年,Sittrop提出了适用于Ku波段和X波段的SIT模型^[29]。2009年,Vilhelm和Rashmi提出了与Nathanson数据拟合效果更优的美国海军研究实验室模型(Naval Research Laboratory, NRL),并于2012年对该模型进行了进一步修正^[30-31]。随着星载微波散射计的发展,遥感领域的研究人员进一步发展了中等入射角条件下C和Ku波段的海面均值散射系数模型,称作地球物理模式函数(Geophysical Model Function, GMF),即利用星载微波散射计实测数据,构建了 σ^0 与海面风速、风向及雷达参数之间的定量关系。其中,C波段已形成较为成熟的CMOD系列模型,Ku波段则发展了NSCAT系列及Ku-2011等模型^[32-38]。表1总结了上述均值散射系数模型的适用条件及大致的精度指标。需要注意的是,这些模型适用的微波频段、入射角和海况条件不尽相同。

总体而言,均值散射系数模型的输入参数简单、模型应用便捷,适用于大范围海面均值散射系数评估、预报等侧重强度估计的场景。相比传统的以海况等级为输入的均值散射系数模型,微波散射计的GMF更直接反映了海面风场对后向散射系数的调制,在特定的频率和入射角条件下通常可获得更高的

表1 海面均值散射系数模型适用性及精度概述

Table 1 Overview of the applicability and accuracy of mean sea surface backscattering coefficient models

模型名称	频率	入射角	极化方式	海面参数	精度
GIT	1-100 GHz	80°-90°	HH, VV	海况等级	3-5 dB
TSC	0.5-35 GHz	30°-90°	HH, VV	海况等级	2.5-4 dB
HYB	0.5-35 GHz	30°-90°	HH, VV	海况等级	2-3.5 dB
NRL	0.5-35 GHz	30°-90°	HH, VV	海况等级	2.5-4 dB
CMOD系列	C波段	16°-66°	VV	海面风场	<0.5 dB
Ku-2011	Ku波段	46°/54°	HH, VV	海面风场	<0.5 dB
NSCAT系列	Ku波段	16°-66°	HH, VV	海面风场	<0.6 dB

均值散射系数估算精度。因此,本文提出一种多源卫星遥感风场与GMF相结合的全球海面均值散射系数估计模型,旨在实现全球平均海杂波的高精度和近实时估算,为雷达探测海面目标提供可靠的支撑。为叙述方便,后文将均值散射系数(模型)统一称为平均海杂波(模型)。

2 数据与方法

已有研究表明,海面风场是影响微波雷达海面后向散射系数的主导因素^[38]。当前,星载微波散射计、辐射计等遥感载荷已具备全球海面风场(或风速)的近实时监测能力,为全球尺度平均海杂波的近实时估算提供了重要数据支撑与实现可能。另一方面,后向散射系数与雷达参数、海面风场的函数关系--即地球物理模式函数(GMF)的构建方法也较为成熟,尤其是在C、Ku波段以及中等入射角条件下,基于微波散射计观测资料已形成一系列精度可靠、应用广泛的GMF。因此,本文将多源卫星遥感风场与微波散射计地球物理模式函数相结合,提出一种可用于近实时估算全球平均海杂波的框架(如图1所示)。进而以Ku波段及中等入射角为例,利用我国海洋二号(HY-2)卫星和中法海洋卫星(CFOSAT)散射计实测数据对平均海杂波估算结果进行检验,系统分析该模型输出的相对误差时空特性。

国内外研究人员已开展了大量的多源卫星遥感海面风场融合研究。其中,国家卫星海洋应用中心(NSOAS)发布的多源卫星海面风场融合产品,是目前国际上唯一的近实时业务化产品,已连续5年发布全球海面风场融合数据。因此,本文直接使用该数据产品作为全球平均海杂波估算的输入数据。该产品是以我国海洋二号系列(HY-2)卫星、欧洲Metop系

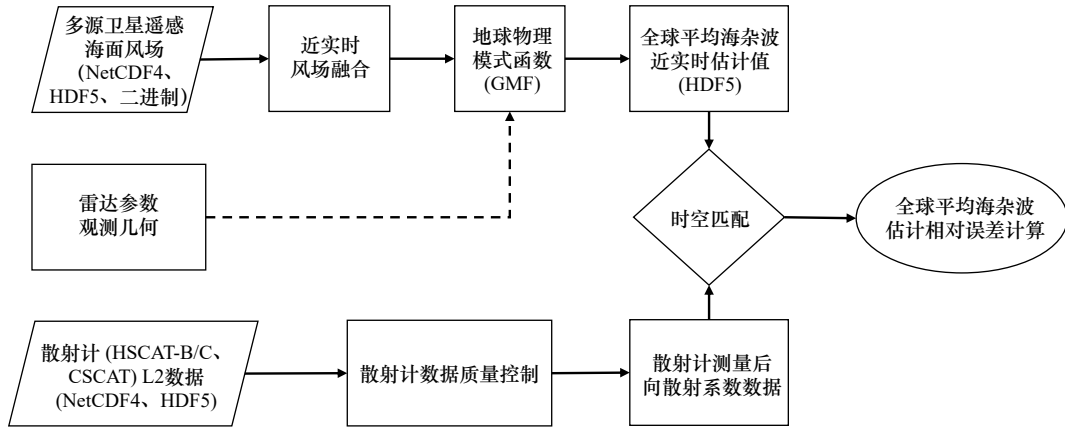


图1 全球平均海杂波近实时估算流程图

Fig. 1 Flowchart of the near-real-time estimation of global mean sea clutter intensity

列卫星以及美国 DMSP 系列卫星获取的海面风为输入,通过交叉标定、动态误差估计与二维变分方法进行融合,生成空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 、时间分辨率为 6 小时(即 UTC 00:00、06:00、12:00 和 18:00)的全球海面风场产品。利用浮标观测数据及 ERA5 再分析数据对比验证,该产品的风速均方根误差分别优于 1.6 m/s 和 1.2 m/s ,风向均方根误差分别优于 19° 和 11° ,可为全球平均海杂波近实时高精度估计提供可靠的数据保障^[40]。需要注意的是,该融合风场产品是基于融合时刻 $\pm 3 \text{ h}$ 内的多源卫星近实时观测数据(时效性为 1-3 h)研制的。获取融合风场产品后,软件可在 5 分钟内完成全球平均海杂波估算及产品生成。因此,本方法具备全球平均海杂波近实时估算及业务化应用的能力,即从卫星观测到平均海杂波产品生成的时间延迟为 4-6 h。

本文以 Ku 波段平均海杂波估算为例开展研究,使用的 GMF 是目前应用最广泛的 NSCAT-4DS 模型^[41]。相比于早期的 Ku-2011 模型和 NSCAT-4 模型,NSCAT-4DS 整合了多源卫星载荷的长序列校准数据,显著提升了 Ku 波段与 C 波段风场产品的一致性,并在高风速区间及不同入射角下具备更优的精度表现。实际处理中,以多源遥感数据构建的全球海面融合风场作为输入,结合 GMF 以及雷达观测入射角、方位角及极化等参数,即可计算得出观测面元的平均海杂波(即均值散射系数)。该方法计算简便、实时性强,具备较高的工程应用效率。

最后,利用 HY-2 和 CFOSAT 卫星微波散射计的后向散射系数数据对平均海杂波估算结果进行检验。具体而言,参考数据为 NSOAS 公开发布的微波散射计二级数据产品(L2A),空间分辨率为 $25 \text{ km} \times 25 \text{ km}$ 。其中, HY-2C 散射计(HSCAT-C)VV、HH 极化

波束的入射角分别为 48.5° 和 41.5° 。CFOSAT 散射计(CSCAT)VV 和 HH 极化的入射角观测范围均为 28° – 51° 。考虑到 CSCAT 为低信噪比测量系统,后向散射系数测量易受到多种噪声影响,因此其数据仅用于分析不同入射角下的相对误差^[43]。此外, Ku 波段微波散射计易受降雨、海冰等非风场地球物理噪声的影响,须在数据匹配之前依据 L2 产品质量标识符对观测数据进行了严格的质量控制。同时,为尽可能减小时空差异引入的代表性误差,数据匹配的时空窗口分别设置为时间差小于 3 小时、空间距离小于 25 km 。随后,利用相对误差(E_r)评估匹配数据集中平均海杂波的估算结果,即:

$$E_r = \frac{\sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^M (\sigma_{e,i}^0 - \sigma_{m,i}^0)^2}}{\langle \sigma_m^0 \rangle} \quad (1)$$

其中, $\langle \cdot \rangle$ 表示集合平均运算, M 为样本数量, $\sigma_{e,i}^0$ 和 $\sigma_{m,i}^0$ 分别为第 i 个匹配样本的平均海杂波估算值与星载微波散射计实测后向散射系数。相对误差的大小通常以分贝为单位进行量化,转换公式为: $E_r (\text{dB}) = 10 \log_{10} (1 + E_r)$ 。同时,利用皮尔逊相关系数评估待检验数据与参考数据的一致性:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^M (\sigma_{e,i}^0 - \bar{\sigma}_e^0) (\sigma_{m,i}^0 - \bar{\sigma}_m^0)}{\sqrt{\sum_{i=1}^M (\sigma_{e,i}^0 - \bar{\sigma}_e^0)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^M (\sigma_{m,i}^0 - \bar{\sigma}_m^0)^2}} \quad (2)$$

式中符号上方的“ $-$ ”表示数学期望。

需要注意的是, NSOAS 的风场融合产品融合了包括 HY-2 在内的多颗卫星散射计风场数据,而验证部分又使用 HY-2C 和 CFOSAT 散射计实测 σ^0 作为参考,因此首先需要排除“循环验证”风险才能确保精度

评价结果具备参考意义。为此,我们以 HSCAT-C 参考数据为例,随机选取 2023 年 4 个月的风场融合数据,并将其分成三类: Case #1(53.4%)--存在 HSCAT-C 输入风场; Case #2(12.6%)--不存在 HSCAT-C 输入风场、但存在其它微波散射计输入风场;以及 Case #3(34%)--所有散射计输入风场都不存在。然后,分别验证基于这三类数据估算的平均海杂波的相对误差,如表 2 所示。结果表明, HSCAT-C 风场是否参与风场融合对平均海杂波相对误差评价结果的影响仅为 0.1 dB(VV 极化)~ 0.2 dB(HH 极化),不会导致评价结果偏于乐观。因此,后续验证将使用全部的风场融合数据,不再考虑参考数据源的风场是否参与了风场融合。

表 2 不同风场输入条件下平均海杂波相对误差统计结果
Table 2 Statistical scores of the relative errors of mean sea clutter intensity under different wind conditions

极化方式	E_r (dB)		
	Case #1	Case #2	Case #3
VV	1.47	1.59	1.58
HH	2.16	1.97	2.03

3 平均海杂波估算误差时空分布

3.1 季节分布特征

为揭示平均海杂波估算误差在时空维度的变化特征,本文基于 HSCAT-C 实测海面后向散射系数与平均海杂波估计值构成的匹配数据集,按照北半球气象学季节划分标准,分析了不同季节下平均海杂波估计误差的特性。每个季节在不同极化条件得到的匹配数据对数量均约为 4×10^7 。图 2 和图 3 分别展示了在四个季节下 VV 和 HH 极化平均海杂波估算的相对误差(图中左上角图注)。为了更加直观地对比两种数据的一致性,图中红色虚线展示了待检验数据与参考数据线性拟合的结果。可以发现,全球平均海杂波近实时估算误差表现出一定的季节依赖性。以北半球季节定义的冬季(12月至次年2月)误差最大, VV 和 HH 极化的相对误差分别约为 1.8 dB 和 2.4 dB。夏季(6月至8月)误差最小, VV 和 HH 极化的相对误差分别约为 1.55 dB 和 2.18 dB。同时,夏季平均海杂波估计值与实测值之间的相关性最高, VV 和 HH 极化相关系数分别为 0.904 和 0.825。相比之下,春季与秋季的误差水平整体接近。考虑到大部分海域面积主要分布在南半球,误差最大时期对应南半球夏季,

上述现象与该季节海气相互作用增强及海面风场变化变异性增大有关。

进一步分析表明, VV 极化的相对误差整体上小于 HH 极化。这主要是由于散射计 HH 极化的信噪比通常小于 VV 极化,相同海况条件下实测的后向散射系数误差更大,进而导致检验结果的相对误差偏高。此外,两种极化在低值区域对应低风速海况,该条件下风场变异性较强,即输入融合风场的误差较大,进一步增大了平均海杂波估算结果与散射计实测值的偏差。

3.2 空间分布特征

图 4、5 分别展示了 HH 和 VV 极化平均海杂波估算相对误差的空间分布特征。可以看出不同季节及极化的误差分布均呈现出显著的空间异质性。总体而言,低纬度海域普遍存在持续性的高误差或次高误差区域,且这类高误差区具有较强的时空稳定性。尤其在热带辐合带,形成了较为稳定、范围集中的误差高值带。这可能与该区域长期存在的对流活动、降水过程以及风浪-降水耦合等复杂海气相互作用有关。由于 Ku 波段散射计观测易受降雨影响,该区域散射计实测的后向散射系数误差较大,从而增加了平均海杂波检验的相对误差。春季低纬度误差高值分布最为广泛,尤其在印度洋北部,这可能与季风转换期风速变异性增强有关。相比之下,中高纬度海域的误差分布呈现显著的季节调制特征。北半球夏季时,中高纬度误差高值主要集中在北太平洋和北大西洋的近岸海域,这可能是因为北半球夏季台风频发及显著的海陆差异导致海面风场变化剧烈,进而增大了散射计实测后向散射系数的误差。南半球夏季时,中高纬度误差主要集中在南半球西风带的近岸海域,并形成较为连续分布结构。而春秋两季,上述区域的误差整体减弱,高值误差区域明显减少。这表明,中高纬度海域的平均海杂波检验误差更易受到季节性海况变化影响,其空间结构随大尺度海洋气象季节演变而变化。HH 极化与 VV 极化的相对误差空间分布整体相似,但 VV 极化相对误差总体更低,且空间分布更为平滑。这种差异在低风速与复杂海况区域表现尤为突出,反映出不同极化方式在海面电磁散射特性及系统信噪比上存在的固有差异。

4 平均海杂波估算误差影响因子

4.1 海面风速

为进一步明晰平均海杂波估算误差随风速的变化特征,图 6 基于 HSCAT-C 实测后向散射系数与平

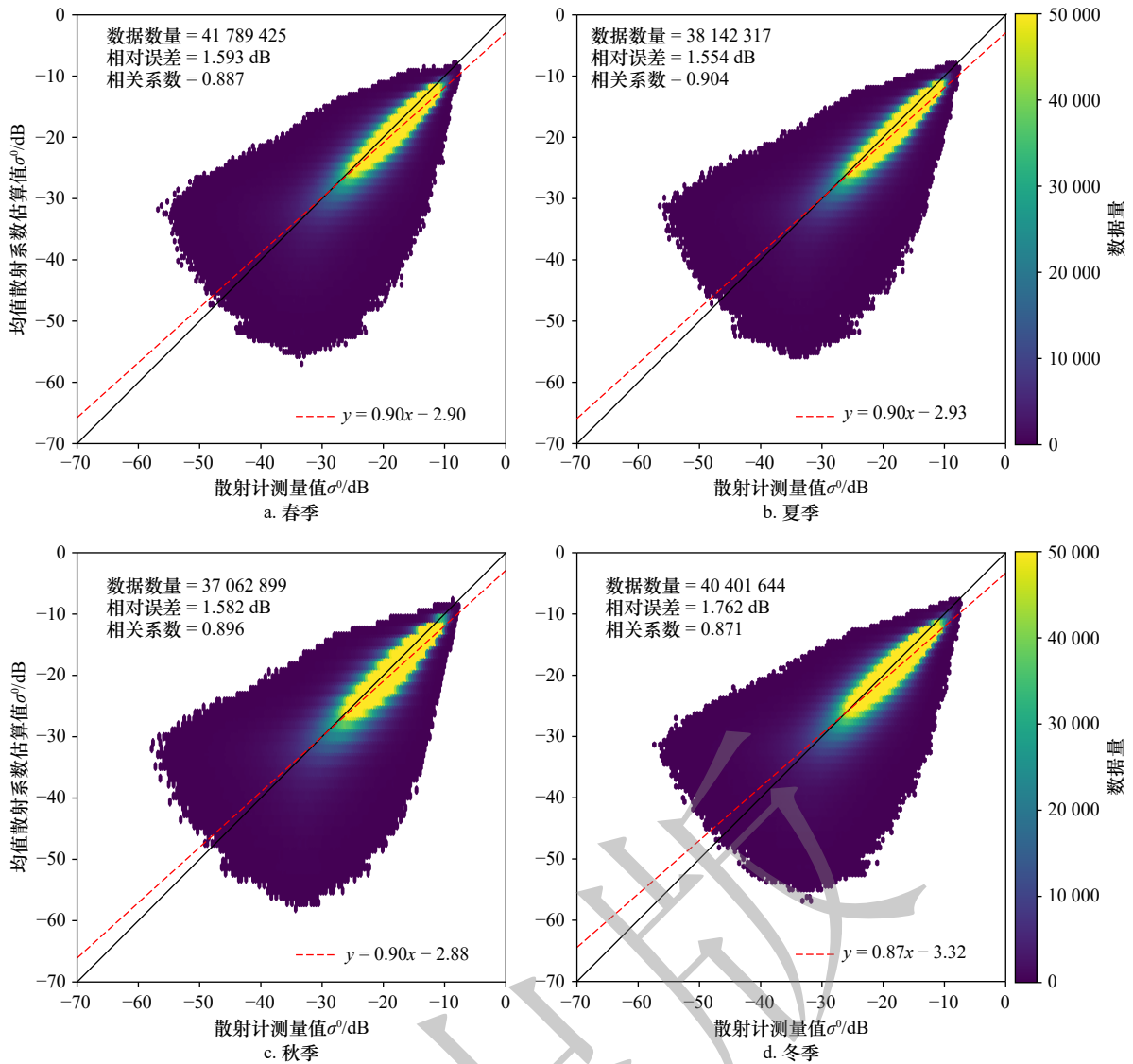


图2 Ku波段VV极化平均海杂波估算季节检验结果

Fig. 2 Seasonal validation results of the Ku-band VV-polarized mean sea clutter intensity

均海杂波估计值构成的匹配数据集,分析了不同极化条件下平均海杂波估算误差对风速的依赖关系。需要说明的是,该图及后续相关图表中的折线阴影部分均表示95%置信区间。结果表明,HH与VV两种极化的平均海杂波估算相对误差均随风速的增大而减小,并呈现出逐渐趋于稳定的变化趋势。在低风速区间($w < 4$ m/s),两种极化的相对误差较大(大于3 dB),且VV与HH极化的误差水平较为接近。这一现象可能与低风速条件下海面风场空间变异性增强^[42]以及HSCAT-C后向散射系数测量误差增大有关^[43],两者共同作用导致该风速区间平均海杂波估算误差较大。具体而言,低风速区间的海面风速变异性最大值约为0.8 m/s、风向变异性从10°迅速增大至40°以上,远大于中等风速条件下的海面风场变异性(约0.5 m/s和5°)^[42]。此外,由于两种极化在该风速区间表现出

相近的误差特征,说明风场输入误差可能是影响平均海杂波估算误差的重要因素之一。

风速大于4 m/s时,平均海杂波估算的相对误差迅速减小(< 2 dB),且在中高风速区间趋于稳定。与上述类似,这是因为HSCAT-C观测的后向散射系数和模型输入的融合风场精度均随风速的增大而提高共同作用的结果。总体而言, VV极化的相对误差小于HH极化,该现象与HSCAT-C两种极化后向散射系数的测量精度一致,表明中高风速条件下散射计后向散射系数的测量误差在平均海杂波检验统计中占主导作用。

4.2 相对风向

雷达观测相对方位角(即相对风向)是影响平均海杂波强度的另一重要因素。图7基于HSCAT-C实测后向散射系数与平均海杂波估计值构成的匹配数

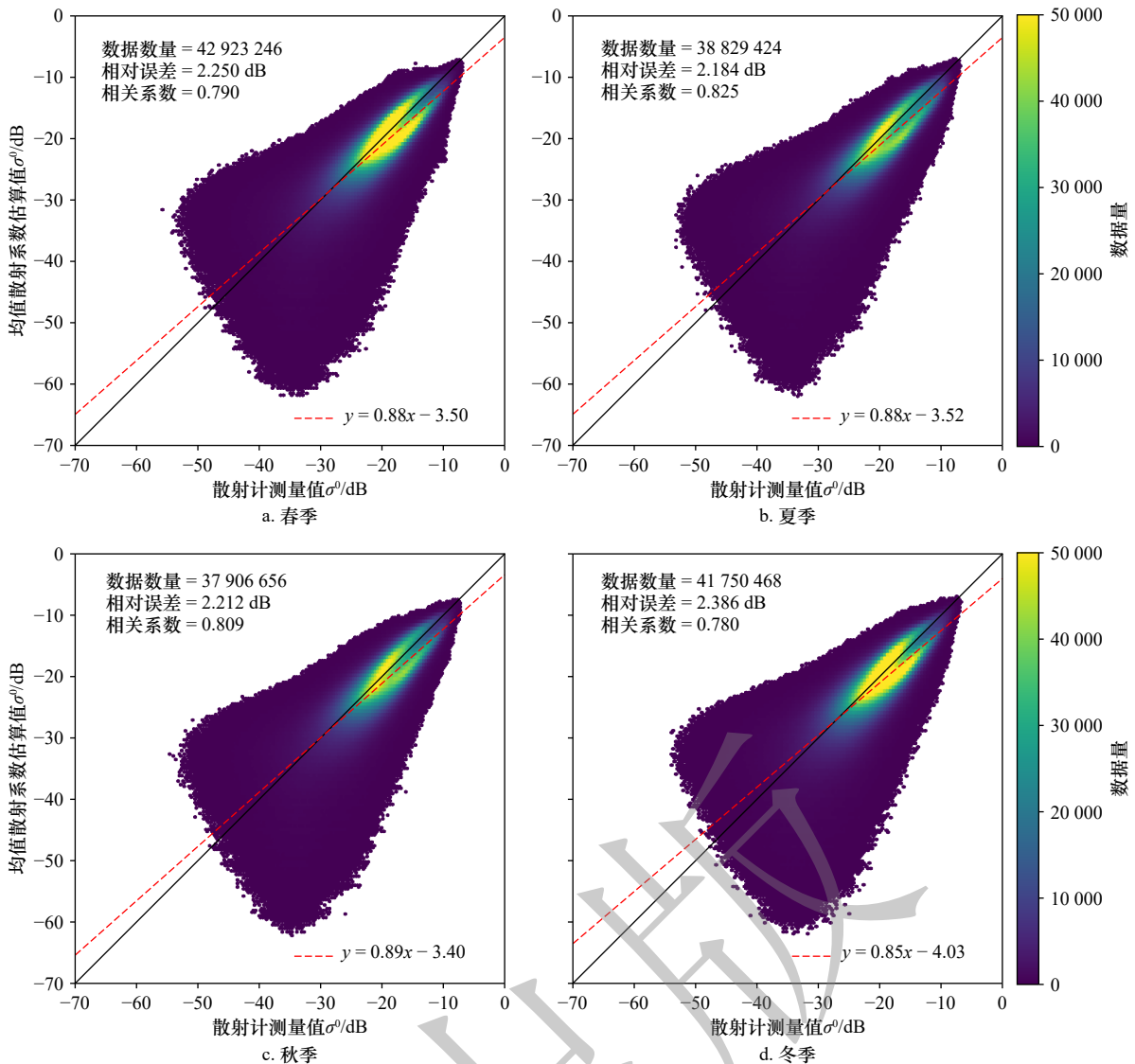


图3 Ku波段HH极化平均海杂波估算季节检验结果

Fig. 3 Seasonal validation results of the Ku-band HH-polarized mean sea clutter intensity

据集,分析了全风速条件下不同极化平均海杂波估算相对误差随相对风向变化的情况。可见,平均海杂波估算的相对误差呈现出明显的方向依赖特征,且HH与VV极化的整体变化趋势一致。顺风条件下(约 180°),平均海杂波估算的相对误差相对较小;而侧风条件(约 90° 和 270°)下,相对误差明显增大。特别地,迎风向和顺风向下HH极化的平均海杂波估算相对误差明显高于VV极化,而侧风向两者基本一致。说明散射计实测数据的误差和模型输入融合风场的误差共同主导了相对误差统计结果。在较低信噪比条件下(侧风向)融合风场误差的影响更加显著,这与4.1节的结论一致。总体而言,本模型的平均海杂波估算精度对海面风向变化具有较强的敏感性。

4.3 观测入射角

观测入射角是影响平均海杂波强度的又一重要

因素。由于HSCAT-C每种极化的观测入射角是固定的,本节基于CSCAT测量后向散射系数和平均海杂波估计值构成的匹配数据集,分析了平均海杂波估算相对误差随入射角变化的情况,如图8所示。与HSCAT-C相比,CSCAT是低信噪比系统,其后向散射系数的测量精度通常低于前者,因此图8中相对误差的统计值明显大于图6、7。此外,图中VV和HH极化相对误差随入射角的变化趋势与CSCAT后向散射系数测量精度的变化趋势基本一致^[44],表明本文模型的平均海杂波估算精度本身不显著依赖于观测入射角。

5 讨论与展望

本文围绕“近实时”和“全球尺度”平均海杂波(均值散射系数)监测需求,将多源卫星遥感海面风场与微波散射计测量学中常用的地球物理模式函数相结

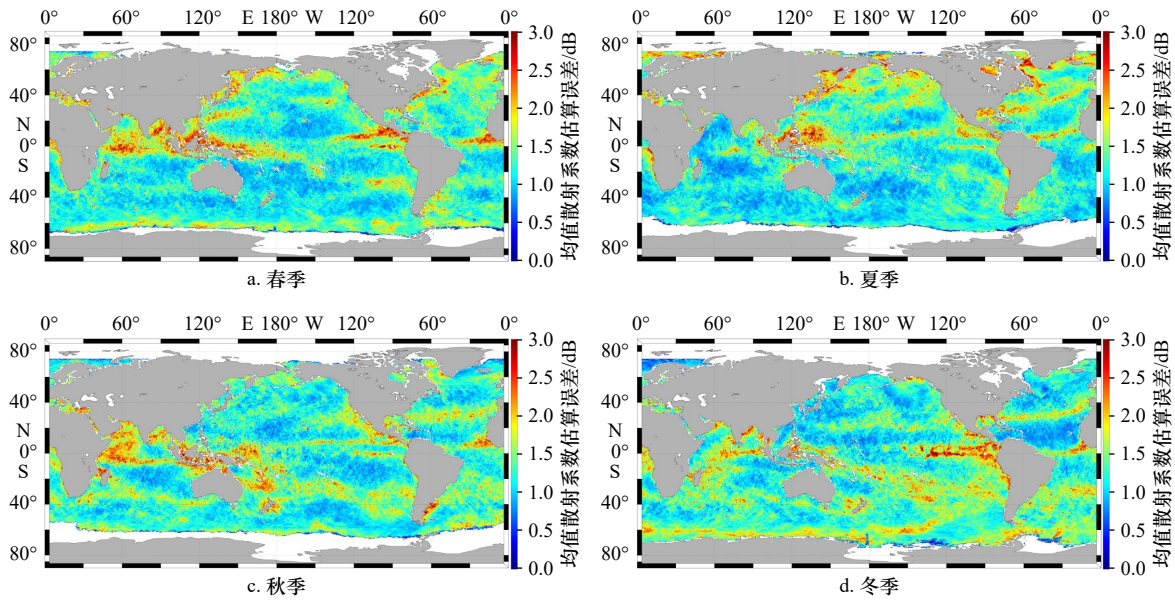


图4 Ku波段VV极化平均海杂波不同季节误差特征全球分布

Fig. 4 Geographical distribution of the seasonal relative errors for the Ku-band VV-polarized mean sea clutter intensity

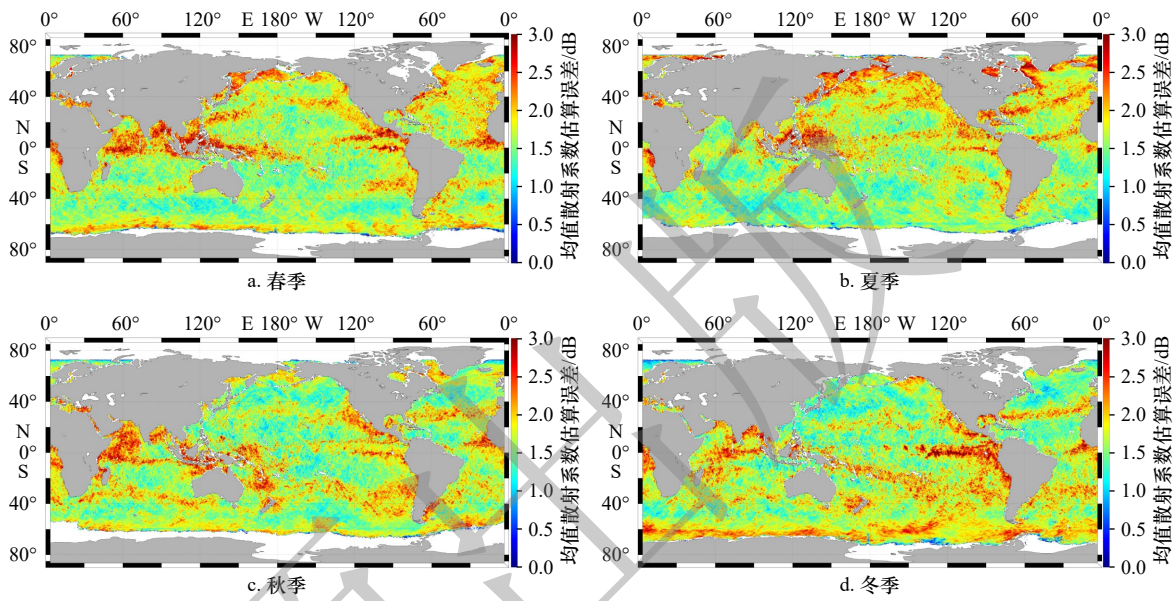


图5 Ku波段HH极化平均海杂波不同季节误差特征全球分布

Fig. 5 Geographical distribution of the seasonal relative errors for the Ku-band HH-polarized mean sea clutter intensity

合,构建了一种计算简便、高效快捷的全球平均海杂波近实时估算系统。并以Ku波段和中等入射角为例,研制了逐6小时、网格分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的全球平均海杂波数据产品。利用HY-2系列卫星和CFOSAT卫星微波散射计实测数据对平均海杂波产品进行检验,结果表明本产品与实测数据具有良好的一致性,VV和HH极化的相对误差分别为1.5~1.8 dB、2.1~2.4 dB。夏季相对误差较小,冬季相对误差偏大;低纬度海域相对误差较大,中高纬度海域相对误差则随季节变化。此外,平均海杂波估算相对误差主要受风速与相对风向是调制。在本研究所涉及的中

等入射角($30^{\circ} \sim 50^{\circ}$)范围,平均海杂波估算的相对误差基本不依赖于入射角,表明所使用的模型在各入射角具有良好的一致性。

需要注意的是,本文提出的平均海杂波估算模型的误差主要来源于输入风场的误差与GMF模型的不确定性。而平均海杂波的相对误差统计值则由上述两种误差源与参考数据源的误差共同决定。其中,参考数据源误差由散射计系统热噪声、信号衰落等因素决定,Ku波段散射计的标称误差通常为0.5 dB。假设参考数据源误差与其它两种误差是相互独立的,将第3、4节所列相对误差值减去参考数据源(散射计

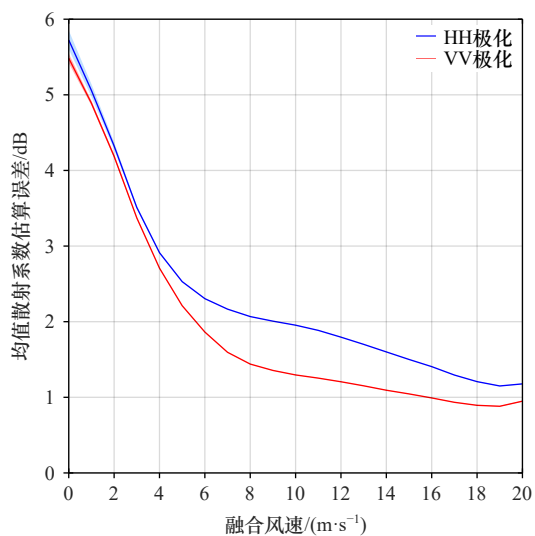


图 6 Ku 波段不同极化平均海杂波估计误差随融合风速的变化

Fig. 6 Relative errors of mean sea clutter intensity as a function of the merged wind speed for different Ku-band polarizations

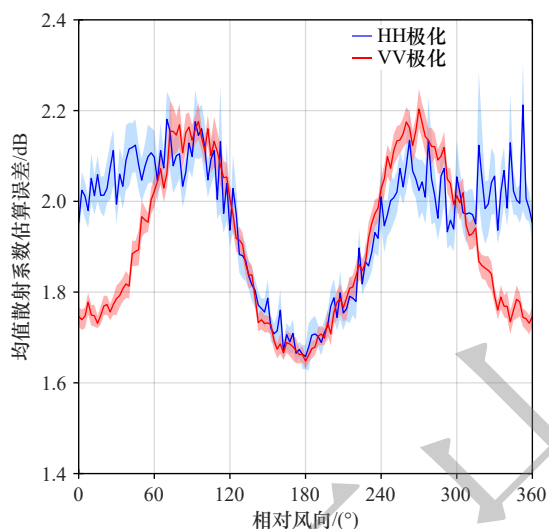


图 7 Ku 波段不同极化平均海杂波估计误差随相对风向的变化

Fig. 7 Relative errors of mean sea clutter intensity as a function of the relative wind direction for different Ku-band polarizations

后向散射系数)的误差,可推测输入的融合风场误差与 GMF 不确定性共同构成的估算模型误差为 1.5 dB~

参考文献:

- [1] 刘宁波,姜星宇,丁昊,等.雷达大擦地角海杂波特性与目标检测研究综述[J].*电子与信息学报*, 2021, 43(10): 2771-2780.
Liu Ningbo, Jiang Xingyu, Ding Hao, et al. Summary of research on characteristics of radar sea clutter and target detection at high grazing angles[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2021, 43(10): 2771-2780.
- [2] 丁昊,董云龙,刘宁波,等.海杂波特性认知研究进展与展望[J].*雷达学报*, 2016, 5(5): 499-516.
Ding Hao, Dong Yunlong, Liu Ningbo, et al. Overview and prospects of research on sea clutter property cognition[J]. *Journal of Radars*, 2016, 5(5): 499-516.

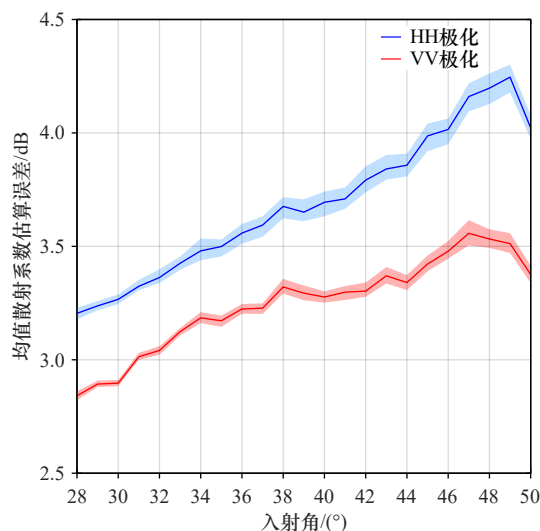


图 8 Ku 波段不同极化平均海杂波估计误差随入射角的变化

Fig. 8 Relative errors of mean sea clutter intensity as a function of the incidence angle for different Ku-band polarizations

2.3 dB。此外,利用 NSCAT-4DS 模型计算 σ^0 随风速变化的敏感性(记作 $d\sigma^0/dw$),典型值约为 $1.2 \text{ dB/m}\cdot\text{s}^{-1}$;进而结合融合风场误差($\sigma_w=1.2 \text{ m/s}\sim 1.6 \text{ m/s}$)估计输入风场误差主导的平均海杂波估算误差($d\sigma^0/dw \times \sigma_w$),其大小约为 1.5 dB~ 2.0 dB。然而,由于真实风场和真实 σ^0 是未知的,现有 GMF 相关的研究主要还是关注 σ^0 数学期望值的建模,并未对其不确定性(由拟合残差和降雨、海面温度、复杂海况等非海面风场因素引起)进行定量研究。因此,本文研究结果在误差溯源及量化方面仍存在一定的局限性。

总体而言,以海面风场为输入的平均海杂波估算模型,相较于传统以海况为输入的经验模型(误差~ 3 dB)具有更高的估算精度。当前近实时、业务化运行的多源卫星遥感海面风场产品,可为全球尺度平均海杂波的高精度、近实时估算提供可靠的数据保障。同时,本文构建的全球近实时平均海杂波估计框架具有良好的可拓展性。若要将该方法推广至其他微波频段与观测入射角,仅需基于理论模型或实测数据构建对应的地球物理模式函数,替换原有 GMF 模块即可实现,具有较强的工程实用性与应用潜力。

- [3] 关键. 雷达海上目标特性综述[J]. *雷达学报*, 2020, 9(4): 674–683.
Guan Jian. Summary of marine radar target characteristics[J]. *Journal of Radars*, 2020, 9(4): 674–683.
- [4] 凌飞. 海杂波环境下目标智能检测方法[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
Ling Fei. Research on intelligent target detection method in sea clutter environment[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.
- [5] 苏欣欣. 雷达海杂波半经验统计建模和目标检测性能预测[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
Su Xinxin. Radar sea clutter semi-empirical statistical modeling and target detection performance prediction[D]. Xi'an: Xidian University, 2011.
- [6] 雷赫. 基于 CPU+GPU 架构的机载多通道雷达海杂波建模仿真方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
Lei He. Study on modeling and simulation method of airborne multi-channel radar sea clutter under CPU+GPU architecture[D]. Xi'an: Xidian University, 2020.
- [7] 李鹏. X 波段雷达海杂波特性分析与仿真建模[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
Li Peng. Analysis and simulation modeling of sea clutter characteristics of X-band radar[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [8] 周围, 朱勇, 杜玉晗, 等. Gamma 分布在海面目标检测中的应用[J]. *雷达科学与技术*, 2021, 19(3): 310–321.
Zhou Wei, Zhu Yong, Du Yuhang, et al. Applications of gamma distribution in sea clutter modelling and maritime target detection[J]. *Radar Science and Technology*, 2021, 19(3): 310–321.
- [9] 朱人杰, 陈红卫. 基于遗传算法的海杂波 K 分布参数估计[J]. *舰船科学技术*, 2014, 36(10): 115–118, 123.
Zhu Renjie, Chen Hongwei. Parameter estimation of sea clutter compound K distribution model by GA[J]. *Ship Science and Technology*, 2014, 36(10): 115–118, 123.
- [10] 朱象胜. 基于高分辨率雷达的海杂波建模及弱目标检测[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2021.
Zhu Xiangsheng. Sea clutter modeling and weak target detection based on high resolution radar[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2021.
- [11] Davidson G. Simulation of coherent sea clutter[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2010, 4(2): 168–177.
- [12] Jakeman E, Pusey P. A model for non-Rayleigh sea echo[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1976, 24(6): 806–814.
- [13] Watts S. A new method for the simulation of coherent sea clutter[C]//Proceedings of the 2011 IEEE RadarCon (RADAR). Kansas City: IEEE, 2011.
- [14] Watts S. Modeling and simulation of coherent sea clutter[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2012, 48(4): 3303–3317.
- [15] Hu Yanhui, Luo Feng, Zhang Baobao, et al. Simulation of coherent correlation K -distribution sea clutter based on SIRP[C]//Proceedings of the 2006 CIE International Conference on Radar. Shanghai: IEEE, 2006.
- [16] 任博. 基于实测数据的地海杂波特性研究及仿真应用[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
Ren Bo. Research on characteristic and application in simulation of radar ground and sea Clutter which based on real Measured data[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011.
- [17] Jakubiak A. Classification of weather clutter models using neural networks[C]//Proceedings of the International Conference Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science, 2004. Lviv-Slavsko: IEEE, 2004.
- [18] Sayama S, Sekine H. Weibull, log-Weibull and K -distributed ground clutter modeling analyzed by AIC[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2001, 37(3): 1108–1113.
- [19] Vicen-Bueno R, Rosa-Zurera M, Jarabo-Amores M P, et al. Automatic target detection in simulated ground clutter (Weibull distributed) by multilayer perceptrons in a low-resolution coherent radar[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2010, 4(2): 315–328.
- [20] Holliday D. Resolution of a controversy surrounding the Kirchhoff approach and the small perturbation method in rough surface scattering theory[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1987, 35(1): 120–122.
- [21] Ishimaru A, Chen J S. Scattering from very rough metallic and dielectric surfaces: a theory based on the modified Kirchhoff approximation[J]. *Waves in Random Media*, 1991, 1(1): 21–34.
- [22] Toporkov J V, Brown G S. Numerical study of the extended Kirchhoff approach and the lowest order small slope approximation for scattering from ocean-like surfaces: Doppler analysis[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2002, 50(4): 417–425.
- [23] Voronovich A. Small-slope approximation for electromagnetic wave scattering at a rough interface of two dielectric half-spaces[J]. *Waves in Random Media*, 1994, 4(3): 337–367.
- [24] Fung A K. *Microwave Scattering and Emission Models and Their Applications*[M]. Norwood: Artech House Publishers, 1994.
- [25] Chen K S, Fung A K, Weissman D A. A backscattering model for ocean surface[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(4): 811–817.
- [26] Horst M M, Dyer F B, Tuley M T. Radar sea clutter model[C]//International Conference on Antennas and Propagation. London: Institution of Electrical Engineers, 1978: 6–10.
- [27] Nathanson F E, Reilly J P, Cohen M N. Radar design principles-Signal processing and the Environment[J]. NASA STI/Recon Technical Report A, 1991, 91: 46747. (查阅网上资料, 未找到本条文献信息, 请确认)

- [28] Reilly J P, Dockery G D. Influence of evaporation ducts on radar sea return[J]. *IEE Proceedings F (Radar and Signal Processing)*, 1990, 137(2): 80–88.
- [29] Sittrop H. Sea-clutter dependency on windspeed[J]. In its *On Microwave Meas*, 1978. (查阅网上资料, 未找到本条文献信息, 请确认)
- [30] Gregers-Hansen V, Mital R. An empirical sea clutter model for low grazing angles[C]//*Proceedings of the 2009 IEEE Radar Conference*. Pasadena: IEEE, 2009.
- [31] Gregers-Hansen V, Mital R. An improved empirical model for radar sea clutter reflectivity[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2012, 48(4): 3512–3524.
- [32] Stoffelen A, Anderson D. Scatterometer data interpretation: estimation and validation of the transfer function CMOD4[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1997, 102(C3): 5767–5780.
- [33] Hersbach H, Stoffelen A, De Haan S. An improved C-band scatterometer ocean geophysical model function: CMOD5[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2007, 112(C3): C03006.
- [34] Hersbach H. Comparison of C-band scatterometer CMOD5. N equivalent neutral winds with ECMWF[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2010, 27(4): 721–736.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] Wang Zhixiong, Stoffelen A, Zhao Chaofang, et al. An SST-dependent Ku-band geophysical model function for RapidScat[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2017, 122(4): 3461–3480.
- [39] Li Xiuzhong, Lin Wenming, Liu Baochang, et al. Sea surface wind retrieval using the combined scatterometer and altimeter backscatter measurements of the HY-2B satellite[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 5101312.
- [40] 邹巨洪, 林文明, 吕思睿, 等. 一种多源卫星遥感海面风场融合准实时数据产品[J]. *海洋学报*, 2025, 47(4): 76–85.
Zou Juhong, Lin Wenming, Lü Sirui, et al. A near-real-time blended sea surface wind data product from multiple satellites[J]. *Haiyang Xuebao*, 2025, 47(4): 76–85.
- [41] KNMI Scatterometer Team. NSCAT-4DS geophysical model function[EB/OL]. https://scatterometer.knmi.nl/nscat_gmf/, 2025-01-12
- [42] Lin Wenming, Portabella M. Characterizing global sea surface local wind variability from ASCAT data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 4212210.
- [43] Wang Zhixiong, Zou Juhong, Zhang Youguang, et al. Intercalibration of backscatter measurements among Ku-band scatterometers on-board the Chinese HY-2 satellite constellation[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(23): 4783.
- [44] 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.
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.

aaa aaaa aaaa aaaa aaaa aaaa aaa a aaaaaaa aaa aaaa aaaa aaaaa aaaaa

aaaa aaaaa aaaaaaa aaaaaaaa

CAI Qingwu¹, MOU Xiaoheng², GONG Zaize³, DU Wenming^{2,4}

(1. aaaa aaaaa aaaaa aaaaaaaa a aaa a a aaaaaaaa 230601; 2. aaaaa aaaaa aaaaaaaa aaaaaaaa aaaaa aaaaa aaaaaaaa aaaaaaaa 210044; 3. aaaaa; 4. aaaa)

Abstract: Sea clutter is a major interference for radar in detecting ocean surface targets, and its intensity and statistical characteristics are jointly constrained by sea state and radar parameters. Focusing on sea clutter intensity (i.e., mean sea surface backscattering coefficient), this paper proposes a near real-time framework for the estimation of global mean sea clutter, which combines multi-source satellite remote sensing sea surface winds with the commonly used geophysical model functions of microwave scatterometry, to achieve higher-precision sea clutter intensity estimation in near real-time and at global scale. Taking the Ku-band and moderate incidence angles as examples, the estimation results are verified using spaceborne scatterometer data from the HY-2 series satellites and the

CFOSAT satellite. Consequently, the spatial-temporal distribution and the influencing factors of the relative error in sea clutter estimation are analyzed. The results show that the sea clutter estimations for both VV and HH polarizations are in good agreement with the scatterometer measured data, with relative errors of 1.5~1.8 dB and 2.1~2.4 dB, respectively. The relative error is smaller in summer than in winter, and it is persistently high in low-latitude areas, but varies with seasons in middle and high latitudes. In addition, wind speed and relative wind direction are the main factors modulating the relative error of sea clutter estimation. The model proposed in this paper can be extended to other microwave bands and incidence angles, providing a reliable practical reference for the near real-time estimation of global mean sea clutter.

Key words: Scatterometer; Sea clutter Intensity; Sea surface winds; Backscattering coefficient; Near real-time estimation

