

王一同, 胡秀清, 商建, 等. 全球典型热带雨林的微波散射特征建模与验证. 应用气象学报, 2024, 35(3): 350-360.  
DOI: 10.11898/1001-7313.20240308

# 全球典型热带雨林的微波散射特征建模与验证

王一同<sup>1)</sup> 胡秀清<sup>2)3)4)\*</sup> 商建<sup>2)3)4)</sup> 顾玲嘉<sup>5)</sup> 尹红刚<sup>2)3)4)</sup>

<sup>1)</sup>(中国气象科学研究院, 北京 100081)

<sup>2)</sup>(国家卫星气象中心/国家空间天气监测预警中心, 北京 100081)

<sup>3)</sup>(许健民气象卫星创新中心, 北京 100081)

<sup>4)</sup>(中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 北京 100081)

<sup>5)</sup>(吉林大学, 长春 130012)

## 摘要

使用大面积且均匀的自然目标进行微波散射计的定标检验,有助于客观评价微波遥感的观测精度。热带雨林具有相对稳定的植被覆盖条件,可减小地表异质性对仪器测量的影响,是微波仪器定标评价的常用目标。利用 2019 年 1 月 1 日—2021 年 12 月 31 日 MetOp-B(the second meteorological operational satellite)卫星 ASCAT (advanced scatterometer) 散射计的观测数据,提出平均值、标准差与相对标准差联合的雨林目标稳定区优选算法,确定亚马逊雨林、刚果雨林和东南亚雨林的稳定区域,对稳定区内目标的自身特性开展包括季节、入射角和方位角影响建模。建模时综合考虑模型误差和时序变化,将目标特性与仪器波动导致的后向散射系数变化分离。结果表明:亚马逊雨林和刚果雨林稳定区的白天数据具有较低的模型误差和波动较小的变化趋势,适用于多星散射计的定标稳定性检验。基于亚马逊雨林和刚果雨林稳定区的白天数据模型,对 MetOp-C 卫星的 ASCAT 观测数据进行定标稳定性检验和分析,检验结果表明:MetOp-C 卫星 ASCAT 散射计的观测数据略有波动,但变化幅度小于 0.05 dB,定标稳定性较好。

**关键词:** 散射计; 热带雨林; 稳定区优选; 特征建模; 定标检验

## 引言

遥感卫星可获取高精度、高分辨率的地球观测数据,用于监测地表、大气、海洋等环境变化<sup>[1-3]</sup>。此外,遥感卫星还能及时监测自然灾害的发生和发展,为灾害风险评估、应急响应和灾后重建提供可靠的数据支持<sup>[4-7]</sup>。20 世纪末至今国内外先后发射多颗搭载散射计的遥感卫星,为海面风场探测和海冰遥感提供了丰富的主动遥感数据。星载微波散射计是一种主动、非成像的雷达系统,它向海表、陆面发射微波脉冲信号,并通过测量接收到的后向散射回波信号反演观测目标的信息。回波信号的强弱受目标表面粗糙度和介电特性共同影响<sup>[8]</sup>。散射计最初用于测量海面风速、风向,随着研究深入与应用拓展,

散射计观测数据还被用于监测冰盖冻融<sup>[9]</sup>、绘制植被覆盖情况<sup>[10]</sup>、跟踪大型冰山<sup>[11]</sup>、反演土壤湿度和确定土地沙漠化等研究。

定标是确保散射计进行精确测量并实现其遥感数据定量应用的关键。散射计的定标可分成相对定标和绝对定标。相对定标可通过内定标实现<sup>[12]</sup>,内定标方法分为对组成系统的各个部分分别定标和比例定标<sup>[13]</sup>。绝对定标可通过外定标实现<sup>[12]</sup>,在轨外定标包括使用在地面已知位置的有源定标器定标、海洋目标定标及使用已知后向散射特性的自然目标定标 3 种主要方式<sup>[13]</sup>。仪器响应会随着时间的推移发生变化<sup>[14]</sup>,因此仅进行发射前定标和内定标难以确保其在轨寿命期间的精确测量<sup>[15]</sup>。发射后多种手段的定标检验和订正对散射计的定量应用至关重要<sup>[16]</sup>。

2023-12-03 收到, 2024-03-11 收到再改稿。

资助项目: 国家重点研发计划课题(2022YFB3902901)

\* 通信作者, 邮箱: huxq@cma.gov.cn

受目标表面特性的影响,不同的入射角和方位角会导致目标的后向散射特性变化。因此,需要对目标的固有特性进行建模分析,以有效区分目标特性和仪器波动对后向散射系数的影响。自然陆地目标标定法需要使用后向散射特性稳定且确定的自然目标<sup>[13]</sup>。这些目标在定标检验期间具备相对各向同性的雷达响应和较均匀的后向散射特性,以确保散射计进行准确的发射后定标与检验<sup>[17]</sup>。用于散射计定标检验的自然陆地目标包括亚马逊雨林、撒哈拉沙漠、西伯利亚平原、格陵兰冰盖等<sup>[17-20]</sup>。很多基于热带雨林的散射计定标检验研究仅限于对亚马逊雨林地区进行稳定区域的选择<sup>[17-18,21-22]</sup>,或仅采用单一方法对几个热带雨林地区进行稳定区选择<sup>[19]</sup>。在仪器的定标稳定性检验中,若所选场地的面积过小,数据易受环境因素的影响产生波动,从而影响数据的可靠性,无法真实反映仪器实际使用时的性能表现。同时,目标面积过小可能无法覆盖数据的分辨率范围,影响数据的准确性。为确保数据的可靠性和准确性,应选择足够大的稳定场地。因此,本文以世界三大热带雨林地区为研究对象开展散射计的定标稳定性检验研究。

为更好地了解热带雨林对定标稳定性的检验能力,本文在已有研究基础上选择全球范围内较为典型的亚马逊雨林、刚果雨林和东南亚雨林进行研究。使用 2019 年 1 月 1 日—2021 年 12 月 31 日 MetOp-B (the second meteorological Operational satellite) 卫星的 ASCAT (advanced scatterometer) 散射计的连续观测数据,采取 3 种方法联合优选稳定区域,对比分析其特征差异;对稳定区内目标的自身特征建模,提出一种将目标特性与仪器波动导致的后向散射系数变化分离的方法;基于该模型,对搭载于 MetOp-C 卫星上的 ASCAT 散射计自 2019 年 7 月 1 日起发布的数据进行定标稳定性检验。

## 1 ASCAT 数据特点

### 1.1 ASCAT 简介

散射计将获取到的回波信号能量转化成归一化雷达散射截面,也称为后向散射系数,记为  $\sigma_0$ ,用于描述物体本身的散射特性。海面粗糙度、陆地上的植被结构和含水量、地表粗糙度以及土壤湿度等因素均会对后向散射信号的强度产生影响。因此,散射计通过测量后向散射功率,可估计不同情况下的

$\sigma_0$ 。ASCAT 是工作在 C 波段的散射计,其两侧各有 3 根垂直极化(VV 极化)的扇形波束天线,相对于卫星轨道的朝向分别为  $45^\circ$ 、 $90^\circ$  和  $135^\circ$ ,以  $25^\circ \sim 65^\circ$  的入射角观测地球表面。两侧天线形成两个覆盖 550 km 的刈幅,每个刈幅与卫星地面轨道相隔约 360 km<sup>[23]</sup>。

本文使用了欧洲气象业务卫星计划(MetOp)系列卫星上的高级散射计(ASCAT)的观测数据。其中, MetOp-A 卫星于 2006 年 10 月 19 日发射,运行至 2021 年 11 月 30 日, MetOp-B 和 MetOp-C 卫星分别于 2012 年 9 月 17 日和 2018 年 11 月 7 日发射,运行至今。 MetOp-A、MetOp-B 和 MetOp-C 携带相同的 ASCAT 仪器<sup>[24]</sup>,且均已通过定标,为研究人员提供了完整、连续的观测序列<sup>[25]</sup>。

### 1.2 数据简介

为确保检验结果的准确性和可靠性,稳定区的优选和仪器的定标稳定性检验应使用不同的数据集。2019 年 7 月 1 日开始发布 MetOp-C 卫星上搭载的 ASCAT 散射计数据,由于该散射计在轨时间最短,需要全面考察其性能。因此,本文检验 2019 年 7 月 1 日—2023 年 10 月 31 日 MetOp-C 卫星的 ASCAT 散射计数据。稳定场的选择和特征分析是数据采集环境稳定的保证,有助于准确评估仪器性能。本文将 2019 年 1 月 1 日—2021 年 12 月 31 日 MetOp-B 卫星的 ASCAT 散射计数据作为稳定场地的筛选数据,用于目标特征分析和建模。

ASCAT 一级数据处理会产生两种不同分辨率的重采样产品:业务版本的后向散射系数( $\sigma_0$  zero operational, SZO)和科研版本的后向散射系数( $\sigma_0$  zero research, SZR)。沿着刈幅方向以固定的时间间隔生成节点(称为风矢量单元),该间隔大约为 12.5 km 或 25 km。SZO 的后向散射值是在刈幅上的 21 个位置(即风矢量单元)计算得到的,两条刈幅共 42 个节点,节点之间以及连续的节点在行方向的间距约为 25 km。SZR 的刈幅上有 41 个节点,两条刈幅共 82 个节点,节点间距约为 12.5 km<sup>[26]</sup>。自 2019 年许多散射计(例如中法海洋卫星微波散射计)开始提供完整的 25 km 分辨率数据。为了扩展研究方法的适用范围,本文主要研究分辨率为 25 km 的 SZO 实时业务产品。

极轨卫星在升轨和降轨飞行的过程中会观测某地点两次,两次观测时间对应当地的白天和夜间。由于目标自身可能存在日变化,因此白天和夜间观

测会呈现不同的  $\sigma_0$  信号。此外,在不同极化方式(VV 或 HH)下, $\sigma_0$  会表现出不同的响应。因此,根据每个传感器的波束极化以及测量值在白天或夜间将数据分为 4 种类型<sup>[19]</sup>。ASCAT 只有 1 种极化方式,因此按照白天和夜间对数据进行分类,即白天的 VV 极化和夜间的 VV 极化。本文使用  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  等经纬度网格作为成像网格(约为  $25 \text{ km} \times 25 \text{ km}$ ),且使用时仅保留质量标记为“好”的数据。

## 2 研究方法

### 2.1 稳定区掩膜筛选

由于结构和性质等方面的差异,不同目标的后向散射特性不同。因此,在提取稳定区域时需要根据各目标的特点分别使用适当的阈值处理。空间掩膜是用于对数据进行掩盖、筛选或提取的空间数据集,常用于限制数据处理的空间范围或区域。稳定区域的空间掩膜用 3 种方法共同确定:① 平均值法, $\sigma_0$  平均值接近掩膜的整体平均值的稳定点,白天和夜间数据取交集<sup>[21]</sup>;② 标准差法, $\sigma_0$  标准差低

于某个阈值的稳定点,白天和夜间数据取交集;③ 相对标准差法, $\sigma_0$  相对标准差低于某个阈值的稳定点,白天和夜间数据取交集。以上各方法中,白天和夜间数据均采用相同的阈值处理,稳定区域的空间掩膜再由这 3 类稳定点的交集形成,达到优中选优的目的。

对于热带雨林地区,基于 MetOp-B 卫星 3 年的 ASCAT 数据,使用上述空间掩膜确定方法最终选择同时满足表 1 阈值条件的稳定点构建掩膜区域,初步确定热带雨林中相对稳定的场地,如图 1 所示。由图 1 可见,总体上稳定区域的位置、范围与以往研究结果类似。其中,亚马逊雨林的稳定区域覆盖面积较大(大约包含 5200 个网格点),且掩膜较为密集;相比之下,刚果雨林的稳定区域面积较小(大约包含 1900 个网格点),分为两个集中的部分;东南亚

表 1 掩膜确定方法的阈值

Table 1 Thresholds for each mask determination method			
时段	平均值法/dB	相对标准差法/dB	标准差法/dB
白天	$\pm 0.5$	1.0	0.2
夜间	$\pm 0.5$	1.0	0.2

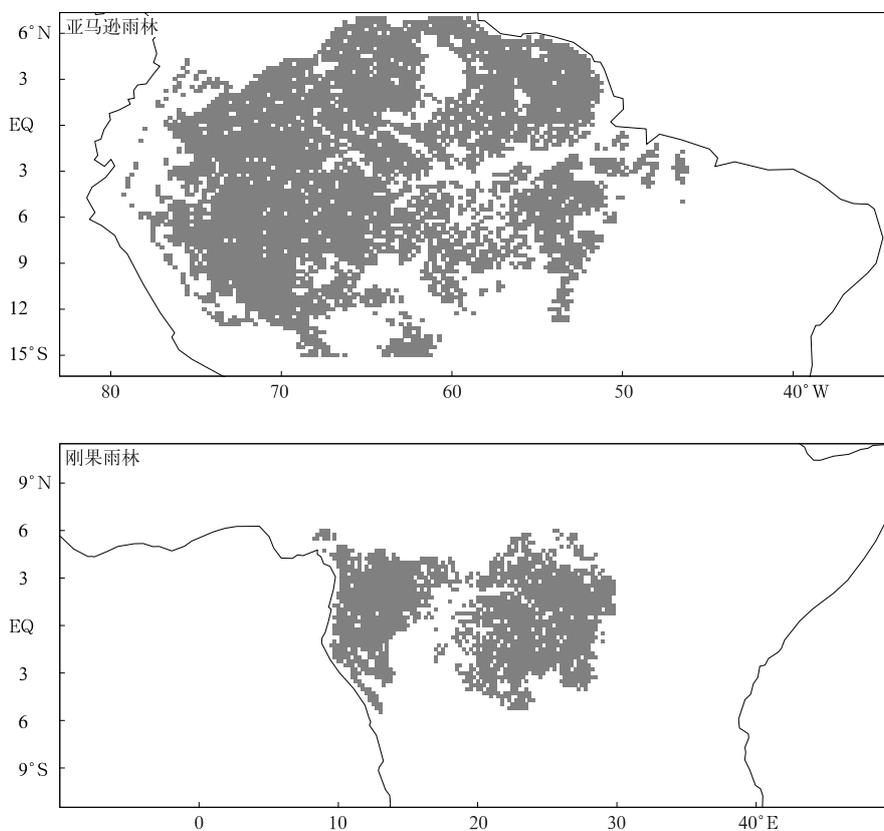
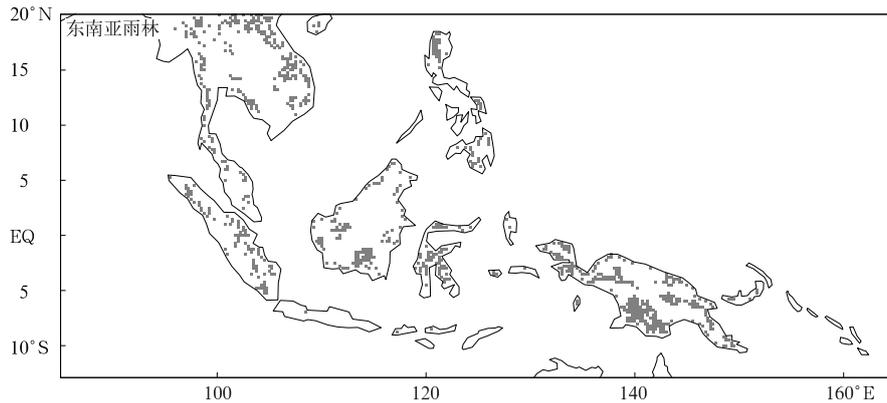


图 1 热带雨林的稳定目标区掩膜分布

Fig. 1 Stable area masks for tropical rainforests



续图 1

雨林的稳定区域面积最小(大约包含 900 个网格点),且分散程度较高。经检验发现,如果将东南亚雨林平均值法的阈值扩大至±1.0 dB,其余阈值保持不变,则稳定点的数量增多且分布更加集中。因此,东南亚雨林掩膜的分散性由平均值法引起。这表明与亚马逊雨林和刚果雨林相比,东南亚雨林的均匀性较差。

### 2.2 季节变化特征

数据选择掩膜的目的是创建空间上相对均匀的数据集。计算空间掩膜内所有稳定点的月平均 $\sigma_0$ (图 2)。由图 2 可见,ASCAT 数据较平稳,尤其是亚马逊雨林和刚果雨林的降轨数据,表明 2019—2021 年该仪器未经历较大的调整和异常波动。此外,3 个地区后向散射的时间稳定性以及白天和夜间数据变化趋势的一致性较好,但升轨和降轨(即白天和夜间)的 $\sigma_0$ 存在不同程度差异。这说明热带雨

林尽管在空间上相对均匀,但也可能受昼夜循环影响,这与 Long 等<sup>[21]</sup>的研究结果吻合。因此,在确定稳定区域时应区分这两种数据,并选择更加稳定的场景作为参考。

根据 Prigent 等<sup>[27]</sup>的研究,热带雨林 $\sigma_0$ 呈昼夜循环的系统性变化,这在亚马逊雨林和刚果雨林均得到验证。在较高雷达频率(如 Ku 波段)下,叶片上的露珠是热带雨林 $\sigma_0$ 昼夜变化的主要因素<sup>[28]</sup>。冠层含水量的变化也会导致 $\sigma_0$ 的日差异<sup>[29]</sup>。叶片含水量(介电常数)的变化会导致较低雷达频率(如 C 或 L 波段)下总后向散射的显著变化<sup>[30]</sup>,也有模型验证了 $\sigma_0$ 对冠层含水量的敏感性<sup>[31]</sup>。将数据采集时间转换为雨林地区的地方时,得到升轨段数据大致出现在夜间,降轨段数据大致出现在白天。此外,由图 2 可见,各雨林白天 $\sigma_0$ 数值均略大于夜间,有效验证该昼夜变化。

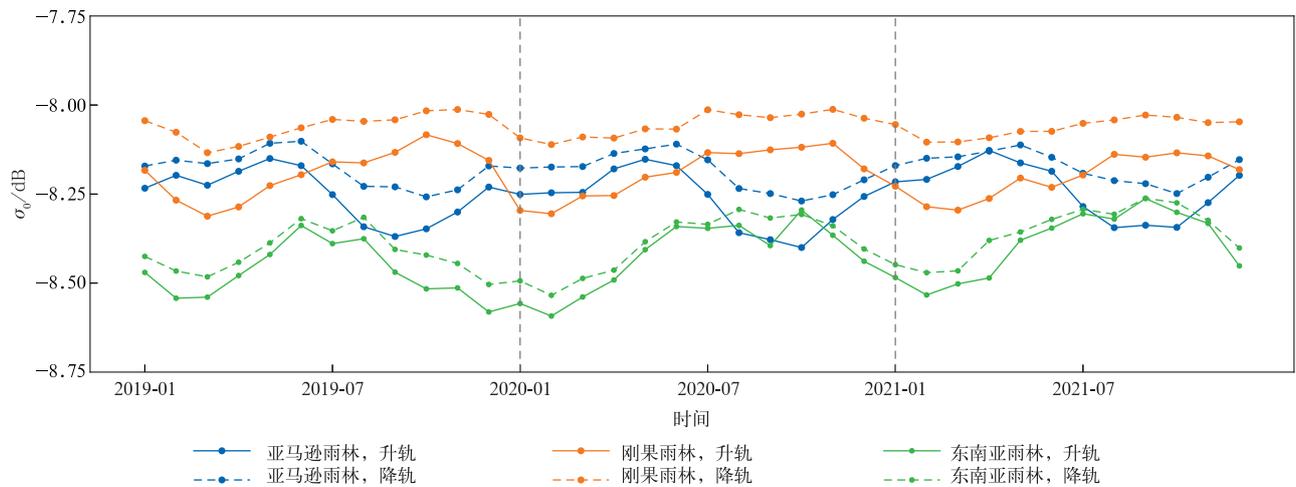


图 2 稳定区域后向散射系数月平均值时序图(升轨为夜间,降轨为白天)  
 Fig. 2 Monthly average time series of backscatter coefficient in stable areas  
 (ascending orbits occur at night, while descending orbits occur in the daytime)

理论上,用于雷达定标状况分析的自然目标  $\sigma_0$  响应应保持恒定。尽管各个稳定区在观测时间范围内季节变化很小,但也不能简单地将后向散射系数的时间变化归因于仪器增益的长期变化。然而,如何准确分离目标响应的季节变化和仪器定标的缓慢变化是个难题。作为独立测量的遥感仪器,散射计不受地球季节性的影响,但仪器部件的温度可能会随太阳位置变化而波动。因此,需要持续监测温度对散射计部件造成的周期性变化。研究结果显示:散射计受温度影响的整体变化幅度相对较小,表现相当稳定<sup>[32-33]</sup>。因此,可通过对雨林地区后向散射系数季节性变化的订正,更准确地反映仪器的变化情况。

时间是影响后向散射系数变化的重要因素,不能简单地平滑  $\sigma_0$  的时间波动,应使用周期函数准确

地拟合其变化。任何周期函数均可以表示为正弦和余弦函数级数的形式。对原始月平均测量值进行离散傅里叶变换,转换到频域。在频域,幅值的大小表示每个正弦和余弦函数对原始函数的贡献程度,幅值越大表示该频率成分在原始信号中所占比例越大。选择几个幅值较大的谐波分量,进行离散傅里叶逆变换,将其转回至时域,得到较为圆滑的三角函数曲线。此时时域表达式为最终拟合函数  $f(t)$ ,能够更加准确地描述  $\sigma_0$  的周期变化特征。

根据上述方法完成时间波动的修正,重新绘制各稳定区无时间影响的后向散射系数月平均值曲线(图 3)。由图 3 可见,曲线在数值上的改变较小,但起伏更加平缓。这意味雨林地区后向散射系数的季节性变化得到明显改善。

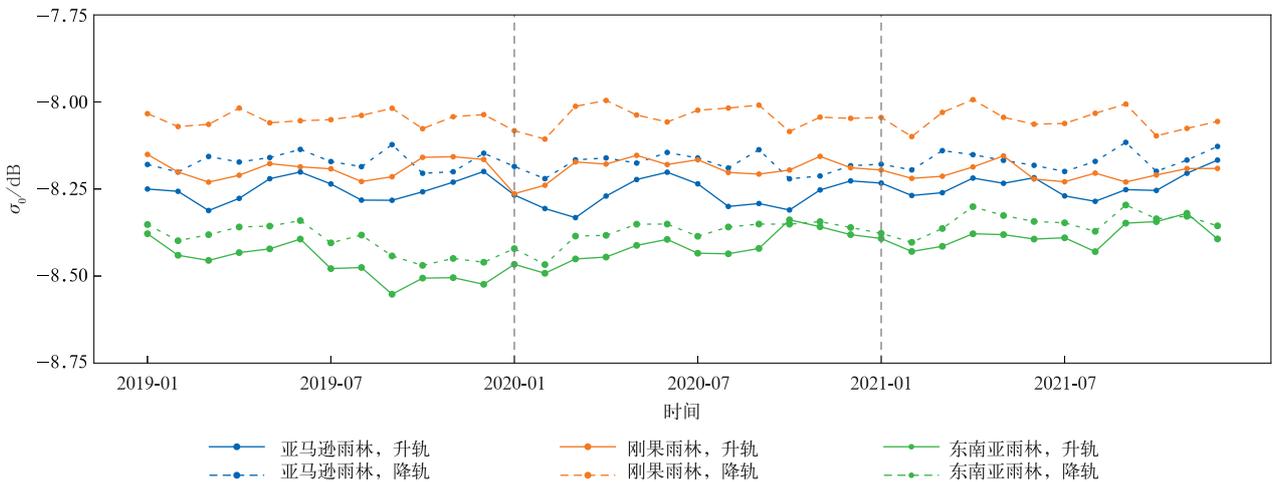


图 3 经时间修正后稳定区域后向散射系数月平均值时序图

Fig. 3 Monthly average time series of backscatter coefficient in stable areas after time correction

## 2.3 目标特性建模

### 2.3.1 目标的入射角响应

通常分布式自然目标的  $\sigma_0$  响应会随着入射角的变化发生变化<sup>[34]</sup>。本文研究不同目标的入射角响应,并根据  $\sigma_0$  与入射角之间的关系完成建模,弱化入射角对  $\sigma_0$  的影响,有助于体现仪器自身造成的数据变化。

使用经过时间波动修正的掩膜区内所有稳定点的后向散射系数和对应的入射角绘制图形曲线(图 4)。由图 4 可见,  $\sigma_0$  对入射角的响应是非线性的,可使用二次函数拟合:

$$p(\theta) = B_1(\theta - 45^\circ) + B_2(\theta - 45^\circ)^2. \quad (1)$$

式(1)中:  $p(\theta)$  是入射角响应的模型函数(单位: dB),

$B_1$  和  $B_2$  是模型系数,  $\theta$  是测量入射角(单位:  $^\circ$ )。为了将去除入射角依赖而引起的误差降至最低,可将数据归一化到中间处的入射角<sup>[35]</sup>。由于 ASCAT 的入射角范围为  $25^\circ \sim 65^\circ$ , 故选择将入射角归一化到  $45^\circ$ 。

分析掩膜内所有稳定点,由图 4 可以看到,不同入射角处散点的数值跨度较大。提取单个稳定点再次绘图,可见每个入射角处  $\sigma_0$  的跨度显著减小。因此,不同入射角处散点在数值上的起伏由稳定点的  $\sigma_0$  在数值上的差异(即目标的非均匀性)引起。为了确保模型的准确性,需要针对每个网格内的所有视数分别建立模型。

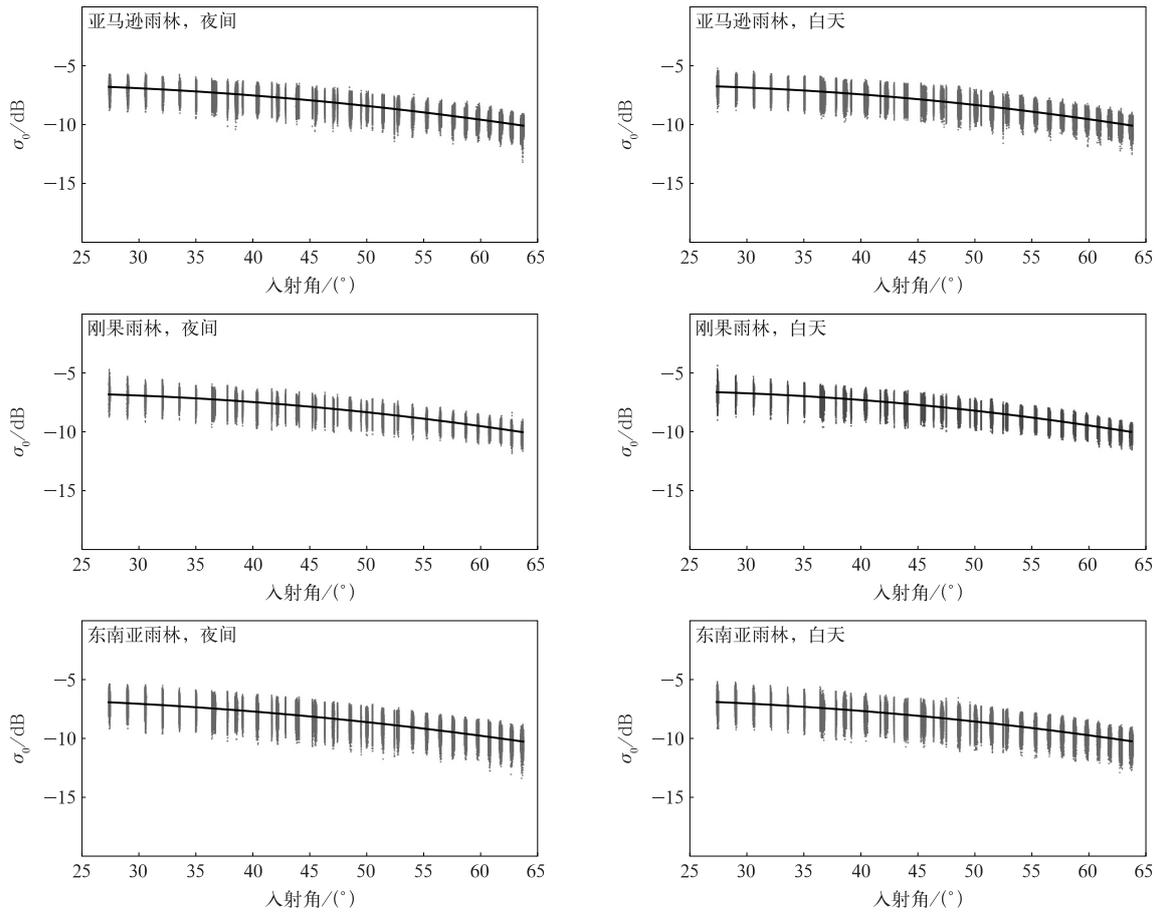


图 4 稳定区域后向散射系数随入射角变化(黑色实线为拟合线)

Fig. 4 Backscatter coefficient varying with incident angle for stable areas (the black solid line denotes fitting curve)

2.3.2 目标的方位角响应

观测方位角也是影响目标  $\sigma_0$  响应的关键参数。确定  $\sigma_0$  与入射角及时间的关系后,应进一步分析后向散射系数的方位角响应。图 5 为稳定区域后向散射系数随方位角变化的散点图,其中纵坐标表示去

除时间和入射角影响后的后向散射系数。热带雨林由浓密的冠层组成,主要表现为体散射,因此在方位角上应呈现出各向同性。由图 5 可见, $\sigma_0$  的分布基本不随方位角改变,对方位角依赖很小。但在同一方位角下, $\sigma_0$  仍存在较大数值差异,呈现较大跨度。

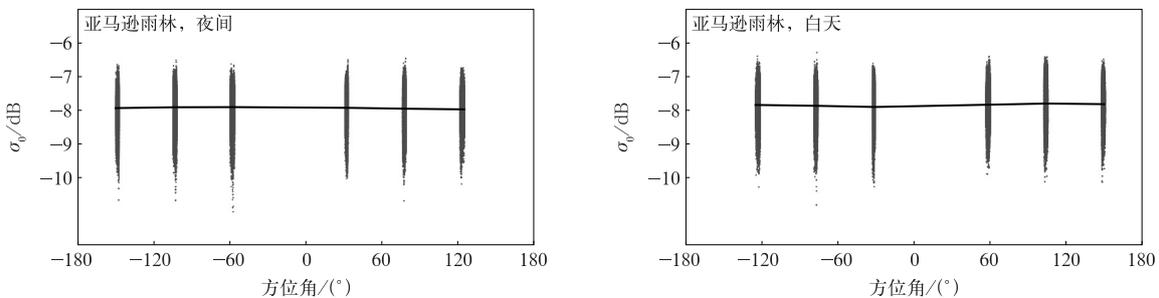
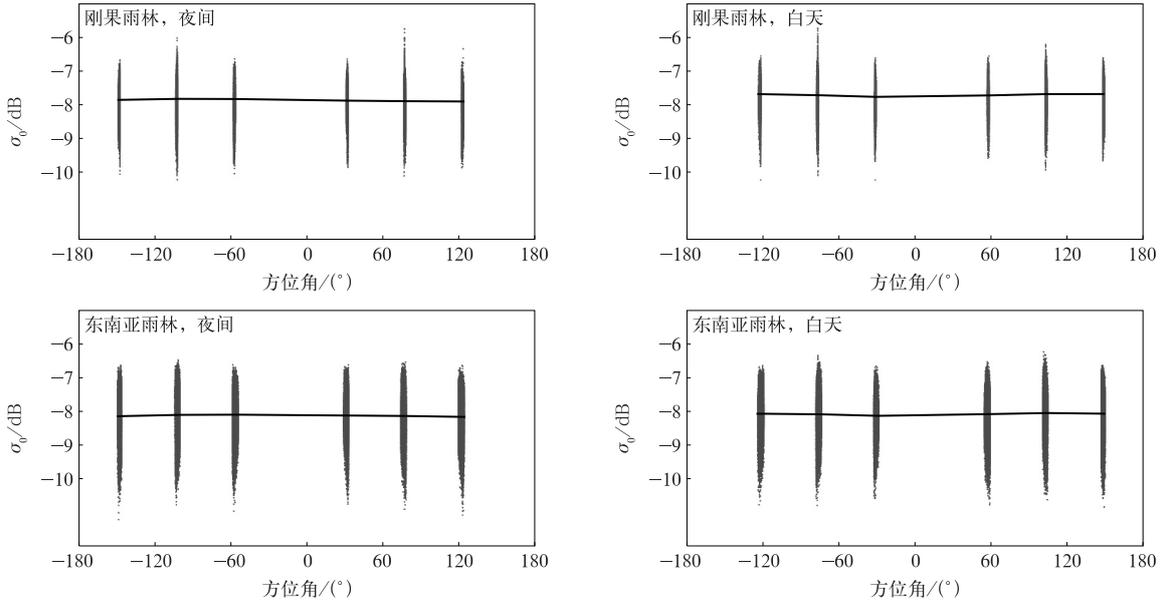


图 5 稳定区域后向散射系数随方位角变化(黑色实线为拟合线)

Fig. 5 Backscatter coefficient varying with azimuth angle for stable areas (the black solid line denotes fitting curve)



续图 5

提取单个稳定点可见,  $\sigma_0$  的跨度显著减小, 这表明较大跨度是不同稳定点的后向散射系数在数值上的差异造成的。然而, 由单个稳定点的图像可见方位角的轻微变化。

雨林地区尚未有完善的方位角调制模型。由图 5 可见, 可以使用二阶傅里叶级数模型进行合理拟合<sup>[36-37]</sup>。其中, 二阶傅里叶级数的系数随入射角呈线性变化<sup>[36]</sup>。

$$q(\Phi) = M_1 \cos(\Phi - \Phi_1) + M_2 \cos(2\Phi - \Phi_2), \quad (2)$$

$$M_i = C_i + D_i(\theta - 45^\circ). \quad (3)$$

式(2)和式(3)中:  $q(\Phi)$  是方位角响应的模型函数(单位: dB),  $M_1, M_2, \Phi_1, \Phi_2, C_i, D_i$  是模型系数,  $\Phi$  是测量方位角(单位:  $^\circ$ ),  $\theta$  是测量入射角(单位:  $^\circ$ )。拟合曲线如图 5 黑色曲线所示。

### 2.3.3 模型构建及准确性评估

为参数化雨林的向后散射特性建立经验模型:

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_0 = & A + B_1(\theta - 45^\circ) + B_2(\theta - 45^\circ)^2 + \\ & [C_1 + D_1(\theta - 45^\circ)] \cos(\Phi - \Phi_1) + \\ & [C_2 + D_2(\theta - 45^\circ)] \cos(2\Phi - \Phi_2) + \\ & T(t - t_0) + f(t) \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)中:  $\hat{\sigma}_0$  是后向散射系数的拟合值(单位: dB),  $A, B_1, B_2, C_1, D_1, \Phi_1, C_2, D_2, \Phi_2$  和  $T$  是模型系数,  $\theta$  是测量入射角(单位:  $^\circ$ ),  $\Phi$  是测量方位角(单位:  $^\circ$ ),  $t$  是观测时间,  $t_0$  是观测数据集的中心时间,  $f(t)$  是时间拟合函数。

建模后, 需要评估其准确性。本文使用均方根误差、决定系数和平均绝对误差 3 个指标评估模型的性能, 针对每个稳定点单独计算模型参数, 所有稳定点的平均值用于整体衡量模型效果。

利用完整模型对 2019—2021 年各稳定区的 MetOp-B 卫星 ASCAT 数据拟合, 得到评价指标如表 2 所示。由表 2 可见, 亚马逊雨林和刚果雨林稳定区的 3 项评价指标基本一致, 模型误差较小、精度

表 2 不同稳定区域的评价指标

Table 2 Evaluation indices in different stable areas

地区	时段	均方根误差/dB	平均绝对误差/dB	决定系数
亚马逊雨林	夜间	0.182	0.145	0.960
	白天	0.157	0.120	0.971
刚果雨林	夜间	0.175	0.138	0.961
	白天	0.159	0.122	0.970
东南亚雨林	夜间	0.317	0.254	0.893
	白天	0.280	0.222	0.913

较高,白天指标优于夜间指标,表明该模型能有效描述上述稳定区内目标的后向散射特性。东南亚雨林的评价指标相对较差,可能因为该区域包含了较多非森林区域,导致均匀性较差。因此,模型对该雨林后向散射系数的拟合效果不理想,该地区也不适合进行散射计的定标稳定性检验。

鉴于后向散射系数在方位角上的波动较小,为确保正确选择模型参数,基于完整模型分别考虑不同入射角响应和方位角响应的情况。通过计算不同情况下模型的评价指标,验证模型误差定位的准确性,结果如表 3 所示。由表 3 可见,入射角响应的建模至关重要。在无入射角调制的情况下,亚马逊雨

林和刚果雨林的所有模型评价指标均显著恶化。当仅包含线性入射角调制项时,评价指标显著提升,但仍不及完整模型。这表明完整模型对入射角模型的建立较为准确。在无方位角调制的情况下,亚马逊雨林和刚果雨林的所有模型评价指标均变差,但幅度远小于无入射角调制的情况。当仅包含一阶方位角调制时,模型指标略有改善,非常接近完整模型,但仍略逊于完整模型。这表明雨林均匀性较好时,方位角调制能小幅度提升模型的准确性。总体上,入射角和方位角的建模均相对准确,可以基于该模型进行散射计稳定性检验。

表 3 不同入射角和方位角响应下的评价指标

**Table 3 Results of each evaluation index under different incident angle and azimuth angle responses**

地区	模型参数项	时段	均方根误差/dB	平均绝对误差/dB	决定系数	
亚马逊雨林	无入射角调制	夜间	0.717	0.554	0.410	
		白天	0.711	0.540	0.431	
	仅含线性入射角调制	夜间	0.203	0.162	0.951	
		白天	0.191	0.151	0.958	
	无方位角调制	夜间	0.191	0.152	0.955	
		白天	0.167	0.130	0.966	
	仅含一阶方位角调制	夜间	0.183	0.146	0.959	
		白天	0.160	0.123	0.969	
	刚果雨林	无入射角调制	夜间	0.717	0.551	0.390
			白天	0.739	0.562	0.409
仅含线性入射角调制		夜间	0.200	0.159	0.951	
		白天	0.195	0.155	0.957	
无方位角调制		夜间	0.181	0.143	0.959	
		白天	0.166	0.129	0.968	
仅含一阶方位角调制		夜间	0.176	0.139	0.961	
		白天	0.161	0.124	0.970	

### 3 ASCAT 定标稳定性检验

$\sigma_0$  包括考虑观测时间、入射角响应和方位角响应的  $\hat{\sigma}_0$  和模型误差及仪器变化造成的  $\Delta\sigma_0$ , 即

$$\sigma_0 = \hat{\sigma}_0 + \Delta\sigma_0. \quad (5)$$

亚马逊雨林和刚果雨林的稳定区的白天数据表现出更高的稳定性(图 2), 表明亚马逊雨林和刚果雨林的白天数据受到其他因素的影响(如叶片含水量的变化)较小。此外, 由表 2 可知, 该数据的模型误差也很低, 表明目标的后向散射系数估计值在更接近仪器测量值。因此, 选择两个稳定区内的白天数据计算  $\Delta\sigma_0$ , 可更准确地评估仪器的稳定性。综上所述,

根据第 2 章优选的稳定区和后向散射系数模型, 本文采用亚马逊雨林和刚果雨林稳定区的白天数据对 2019 年 7 月 1 日—2023 年 10 月 31 日 MetOp-C 卫星 ASCAT 散射计的连续观测数据进行检验。

利用 2019 年 1 月 1 日—2021 年 12 月 31 日 MetOp-B 卫星 ASCAT 散射计数据得到的拟合系数, 结合式(4), 拟合每个网格的视数, 使用二倍标准差法剔除异常值, 得到 MetOp-C 卫星上搭载的 ASCAT 散射计在两个掩膜区域上整体残差( $\Delta\sigma_0$ )的日平均结果(图 6)。由图 6 可见, 除了个别异常的噪声外, 该仪器的整体波动幅度约为 0.05 dB, 相对稳定, 且同时存在较为规律的波动。

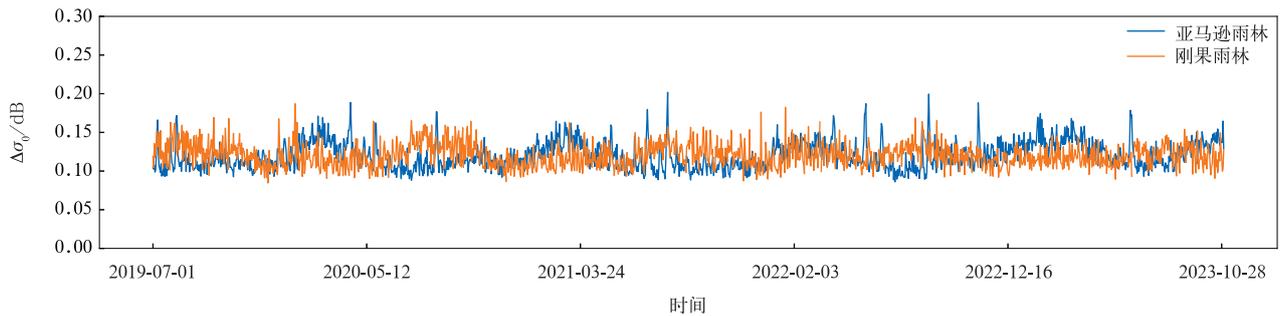


图6 MetOp-C卫星ASCAT散射计定标检验曲线

Fig. 6 Validation curve of ASCAT scatterometer onboard MetOp-C satellite

## 4 结论

本文利用2019年1月1日—2021年12月31日MetOp-B卫星ASCAT散射计的观测数据,采用多种方法优选出用于定标稳定性检验的掩膜区域,并提出一种能准确描述目标固有特性的建模方法,基于后向散射系数 $\sigma_0$ 估计模型,完成MetOp-C卫星ASCAT观测数据的定标稳定性检验和分析。得到以下结论:

1) 亚马逊雨林的稳定区域覆盖范围大于刚果雨林和东南亚雨林,其后向散射空间均匀性较好。相比之下,东南亚雨林的稳定区域空间分布较为离散,其 $\sigma_0$ 的波动幅度也较大。同时,亚马逊雨林和刚果雨林稳定区的数据存在较小波动,且模型误差很小,因此更适合用于跟踪仪器定标的变化情况。

2) 尽管亚马逊雨林是地球表面最大的均匀区域之一,具备相对均匀且稳定的后向散射特性,但其后向散射也受季节等因素的影响,可根据卫星数据的时空分布特点建模表征。

3) MetOp-C卫星ASCAT观测数据在亚马逊雨林和刚果雨林的稳定性较好,数据的整体浮动范围在0.05 dB以内。这表明该散射计可为后续应用提供较为可靠的长时间序列数据基础,但也应注意数据存在轻微的规律性波动。

对于稳定目标而言,其后向散射特性在多年内保持相对稳定,可尝试运用本文的方法对其他体制的散射计进行定标跟踪,例如中法海洋卫星上搭载的CSCAT散射计和我国风云三号E星上搭载的WindRAD风场测量雷达。在今后工作中需进一步考察模型中系数的稳定性。

## 参考文献

[1] 崔鹏,王素娟,陆风,等. FY-4A/AGRI 海表温度产品和质量

检验. 应用气象学报, 2023, 34(3): 257-269.

Cui P, Wang S J, Lu F, et al. FY-4A/AGRI sea surface temperature product and quality validation. *J Appl Meteor Sci*, 2023, 34(3): 257-269.

[2] 周雪松,郭启云,夏元彩,等. 基于往返式平漂探空的FY-3D卫星反演温度检验. 应用气象学报, 2023, 34(1): 52-64.

Zhou X S, Guo Q Y, Xia Y C, et al. Inspection of FY-3D satellite temperature data based on horizontal drift round-trip sounding data. *J Appl Meteor Sci*, 2023, 34(1): 52-64.

[3] 王羽飞,齐彦斌,李倩,等. 一次长白山夏季雾的宏微观特征. 应用气象学报, 2022, 33(4): 442-453.

Wang Y F, Qi Y B, Li Q, et al. Macro and micro characteristics of a fog process in Changbai Mountain in summer. *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(4): 442-453.

[4] 高洋,蔡森,曹治强,等. “21·7”河南暴雨环境场及云的宏微观特征. 应用气象学报, 2022, 33(6): 682-695.

Gao Y, Cai M, Cao Z Q, et al. Environmental conditions and cloud macro and micro features of “21·7” extreme heavy rainfall in Henan Province. *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(6): 682-695.

[5] 齐道日娜,何立富,王秀明,等. “7·20”河南极端暴雨精细观测及热动力成因. 应用气象学报, 2022, 33(1): 1-15.

Chyi D, He L F, Wang X M, et al. Fine observation characteristics and thermodynamic mechanisms of extreme heavy rainfall in Henan on 20 July 2021. *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(1): 1-15.

[6] 张春桂,蔡义勇,张加春. MODIS 遥感数据在我国台湾海峡海雾监测中的应用. 应用气象学报, 2009, 20(1): 8-16.

Zhang C G, Cai Y Y, Zhang J C. The application of monitoring sea fog in Taiwan strait using MODIS remote sensing data. *J Appl Meteor Sci*, 2009, 20(1): 8-16.

[7] 杨磊,韩丽娟,宋金玲,等. 基于遥感数据的夏玉米高温热害监测评估. 应用气象学报, 2020, 31(6): 749-758.

Yang L, Han L J, Song J L, et al. Monitoring and evaluation of high temperature and heat damage of summer maize based on remote sensing data. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(6): 749-758.

[8] 张毅,蒋兴伟,林明森,等. 星载微波散射计的研究现状及发展趋势. 遥感信息, 2009, 24(6): 87-94.

Zhang Y, Jiang X W, Lin M S, et al. The present research sta-

- tus and development trend of spaceborne microwave scatterometer. *Remote Sens Inf*, 2009, 24(6): 87-94.
- [9] Kunz L B, Long D G. Melt detection in Antarctic ice shelves using scatterometers and microwave radiometers. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2006, 44(9): 2461-2469.
- [10] Jarlan L, Mazzega P, Mougin E, et al. Mapping of Sahelian vegetation parameters from ERS scatterometer data with an evolution strategies algorithm. *Remote Sens Environ*, 2003, 87(1): 72-84.
- [11] Stuart K M, Long D G. Tracking large tabular icebergs using the SeaWinds Ku-band microwave scatterometer. *Deep Sea Res Part II Top Stud Oceanogr*, 2011, 58(11/12): 1285-1300.
- [12] 张立新, 张廷新, 王岗. 星载微波散射计定标技术研究. *空间电子技术*, 1996(4): 32-36.  
Zhang L X, Zhang T X, Wang G. Research on calibration technology of spaceborne microwave scatterometer. *Space Electron Technol*, 1996(4): 32-36.
- [13] 穆博, 刘建强, 宋清涛, 等. 星载微波散射计的在轨定标技术现状及展望. *遥感信息*, 2013, 28(3): 112-118.  
Mu B, Liu J Q, Song Q T, et al. A review of in-orbit calibration techniques for spaceborne microwave scatterometers. *Remote Sens Inf*, 2013, 28(3): 112-118.
- [14] 何杰颖, 张升伟. FY-3B/MWHS 性能参数在轨实时监测. *应用气象学报*, 2016, 27(6): 709-715.  
He J Y, Zhang S W. In-orbit performance analysis on monitoring typhoon with FY-3B/MWHS. *J Appl Meteor Sci*, 2016, 27(6): 709-715.
- [15] Kumar R, Bhowmick S A, Babu K N, et al. Relative calibration using natural terrestrial targets: A preparation towards Oceansat-2 scatterometer. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2011, 49(6): 2268-2273.
- [16] Tsai W Y, Graf J E, Winn C, et al. Postlaunch sensor verification and calibration of the NASA Scatterometer. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1999, 37(3): 1517-1542.
- [17] Zec J, Long D G, Jones W L. NSCAT normalized radar backscattering coefficient biases using homogenous land targets. *J Geophys Res*, 1999, 104(C5): 11557-11568.
- [18] Kunz L B, Long D G. Calibrating SeaWinds and QuikSCAT scatterometers using natural land targets. *IEEE Geosci Remote Sens Lett*, 2005, 2(2): 182-186.
- [19] Madsen N M, Long D G. Calibration and validation of the RapidScat scatterometer using tropical rainforests. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2016, 54(5): 2846-2854.
- [20] Manise N, Neyt X, Acheroy M. Calibration Strategy for ERS Scatterometer Data Reprocessing. Conference on Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, and Large Water Regions, 2005.
- [21] Long D G, Skouson G B. Calibration of spaceborne scatterometers using tropical rain forests. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 1996, 34(2): 413-424.
- [22] Shimada M. Long-term stability of L-band normalized radar cross section of Amazon rainforest using the JERS-1 SAR. *Can J Remote Sens*, 2005, 31(1): 132-137.
- [23] Figa-Saldaña J, Wilson J J W, Attema E, et al. The advanced scatterometer (ASCAT) on the meteorological operational (MetOp) platform: A follow on for European wind scatterometers. *Can J Remote Sens*, 2002, 28(3): 404-412.
- [24] Ricciardulli L, Manaster A. Intercalibration of ASCAT scatterometer winds from MetOp-A, -B, and -C, for a stable climate data record. *Remote Sens*, 2021, 13(18). DOI: 10.3390/rs13183678.
- [25] 谢小萍, 魏建苏, 黄亮. ASBAT 近岸风场产品与近岸浮标观测风场对比. *应用气象学报*, 2014, 25(4): 445-453.  
Xie X P, Wei J S, Huang L. Evaluation of ASBAT boastal wind product using nearshore buoy data. *J Appl Meteor Sci*, 2014, 25(4): 445-453.
- [26] Anderson C, Figa J, Bonekamp H, et al. Validation of backscatter measurements from the advanced scatterometer on MetOp-A. *J Atmos Ocean Technol*, 2011, 29(1): 77-88.
- [27] Prigent C, Jimenez C, Dinh L A, et al. Diurnal and seasonal variations of passive and active microwave satellite observations over tropical forests. *J Geophys Res Biogeosciences*, 2022, 127(2). DOI: 10.1029/2021JG006677.
- [28] Satake M, Hanado H. Diurnal change of Amazon rain forest  $\sigma^0$  observed by Ku-band spaceborne radar. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2004, 42(6): 1127-1134.
- [29] Frolking S, Milliman T, Palace M, et al. Tropical forest backscatter anomaly evident in SeaWinds scatterometer morning overpass data during 2005 drought in Amazonia. *Remote Sens Environ*, 2011, 115(3): 897-907.
- [30] Steele-Dunne S C, Friesen J, van de Giesen N. Using diurnal variation in backscatter to detect vegetation water stress. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2012, 50(7): 2618-2629.
- [31] van Emmerik T, Steele-Dunne S C, Judge J, et al. Impact of diurnal variation in vegetation water content on radar backscatter from maize during water stress. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2015, 53(7): 3855-3869.
- [32] ASCAT-B Level 1 Calibration and Validation Report. EUMETSAT, Darmstadt, Germany, 2012.
- [33] Shang J, Wang Z X, Dou F L, et al. Preliminary performance of the WindRAD scatterometer onboard the FY-3E meteorological satellite. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2024, 62. DOI: 10.1109/TGRS.2023.3337098.
- [34] Ulaby F T, Long D G, Blackwell W J, et al. Microwave Radar and Radiometric Remote Sensing. Ann Arbor: The University of Michigan Press, 2014.
- [35] Early D S, Long D G. Azimuthal modulation of C-band scatterometer  $\sigma^0$  over Southern Ocean Sea ice. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1997, 35(5): 1201-1209.
- [36] Long D G, Drinkwater M R. Azimuth variation in microwave scatterometer and radiometer data over Antarctica. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2000, 38(4): 1857-1870.
- [37] Ashcraft I S, Long D G. Observation and characterization of radar backscatter over Greenland. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2005, 43(2): 225-237.

## Modeling and Verification of Microwave Scattering Characteristics of Typical Global Tropical Rainforests

Wang Yitong<sup>1)</sup> Hu Xiuqing<sup>2)3)4)</sup> Shang Jian<sup>2)3)4)</sup> Gu Lingjia<sup>5)</sup> Yin Honggang<sup>2)3)4)</sup>

<sup>1)</sup> (Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

<sup>2)</sup> (National Satellite Meteorological Center/National Center for Space Weather, Beijing 100081)

<sup>3)</sup> (Innovation Center for Fengyun Meteorological Satellite, Beijing 100081)

<sup>4)</sup> (Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, CMA, Beijing 100081)

<sup>5)</sup> (Jilin University, Changchun 130012)

### Abstract

To ensure the microwave scatterometer is accurately calibrated, natural targets with stability, homogeneity, and isotropy are selected as references. The broad and continuous spatial distribution of the tropical rainforest, along with its relatively consistent vegetation cover, makes it an ideal choice.

A tropical rainforest optimal stable area selection algorithm, combining mean, standard deviation, and relative standard deviation, is proposed using measurements from the advanced scatterometer (ASCAT) onboard the second Meteorological Operational satellite (MetOp-B) from 2019 to 2021. It is used to identify stable areas within the Amazon, Congo, and Southeast Asian rainforests. Results show that the Amazon rainforest has a larger stable area compared to the Congo and Southeast Asian rainforests, indicating more consistent backscatter across space. However, the Southeast Asian rainforest exhibits scattered stable areas and unstable backscatter properties.

To accurately model the intrinsic characteristics of targets within stable areas, influences of seasonal variations, incidence angles and azimuth angles are comprehensively considered. The scatterometer, as an independently measured remote sensing instrument, is not affected by seasonal variations on the earth and experiences minimal temperature-related fluctuations. Therefore, seasonal characteristics of backscatter coefficients in rainforests can be modeled to reduce their impact. Different incidence and azimuth angles can cause variations in the backscatter coefficient. To address this issue, responses to these aspects are also modeled. It is observed that daytime data, with lower model errors, shows greater stability in the stable areas of the Amazon and Congo rainforests. Therefore, daytime data from these areas should be selected to assess instrument stability.

A stability verification of ASCAT measurements from the stable areas of the Amazon and Congo rainforest on MetOp-C, covering the period from 1 July 2019 to 31 October 2023, is carried out based on model coefficients derived from the continuous three-year data of ASCAT on MetOp-B. The calibration stability verification quantifies the magnitude of variations in ASCAT measurements over different periods. Through analysis, it's found that measurements from the ASCAT on MetOp-C shows regular fluctuations of about 0.05 dB, indicating relatively stable characteristics.

**Key words:** scatterometer; tropical rainforest; optimal stable area selection; feature modeling; verification