引文格式:朱建军,谢雁洲,付海强,等.星载P波段SAR森林覆盖层穿透测绘——欧洲空间局BIOMASS卫星综述[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(8):1457-1468.DOI:10.13203/j.whugis20240220

Citation:ZHU Jianjun,XIE Yanzhou,FU Haiqiang,et al.Penetration Mapping of Forest Cover Using Spaceborne P-Band SAR:A Review of the European Space Agency's BIOMASS Mission[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(8):1457-1468.DOI:10.13203/j.whugis20240220

星载P波段SAR森林覆盖层穿透测绘——欧洲空间局BIOMASS卫星综述

朱建军[1] 谢雁洲[1] 付海强[1] 汪长城[1]

1 中南大学地球科学与信息物理学院,湖南 长沙,410083

摘 要:森林系统是陆地生物圈最大的碳汇系统,在全球碳循环中发挥重要作用。作为欧洲空间局"地球探索者"项目的第七个卫星计划,BIOMASS卫星将搭载全球首个全极化P波段合成孔径雷达(synthetic aperture radar,SAR)载荷执行以森林测绘为主的对地观测任务,为全球碳循环建模及地表覆盖层"穿透测绘"提供有力的数据支撑。首先介绍了BIOMASS卫星系统设计与数据概况,BIOMASS卫星的三大主要任务、次要任务及其实现原理和方法,随后对BIOMASS任务所面临的潜在挑战进行分析,最后结合中国国情与实际需求对BIOMASS在国内应用进行讨论,并对国产民用P波段SAR卫星的研究进行展望。

关键词:BIOMASS卫星;极化干涉SAR;森林覆盖层;穿透测绘;P波段SAR

中图分类号:P237 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-08-13

DOI:10.13203/j.whugis20240220 **文章编号**:1671-8860(2025)08-1457-12

Penetration Mapping of Forest Cover Using Spaceborne P-Band SAR: A Review of the European Space Agency's BIOMASS Mission

ZHU Jianjun[1] *XIE Yanzhou*[1] *FU Haiqiang*[1] *WANG Changcheng*[1]

1 School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract: Forest systems are the largest carbon sink in the terrestrial biosphere and play an irreplaceable role in achieving the goal of carbon neutrality. Forest BIOMASS is a critical indicator for measuring the carbon sequestration capacity of forest ecosystems and plays a decisive role in terrestrial carbon sink estimation and carbon budgeting. However, the large-scale BIOMASS maps generated by existing techniques, such as optical remote sensing, still exhibit significant uncertainties, particularly in tropical regions. As the 7th mission in the European Space Agency's Earth Explorer program, the BIOMASS will carry the world's first fully polarimetric P-band synthetic aperture radar (SAR) payload to perform primarily global forest mapping and earth observation missions. This will provide robust scientific support for global carbon cycle modeling and "penetration mapping" of surface cover layers. This paper first introduces the system design and data acquisition overview of the BIOMASS mission, which includes the tomographic mode and the polarimetric SAR interferometry mode. The BIOMASS's three primary missions are above-ground BIOMASS mapping, forest height mapping, and forest disturbances detection, while its secondary missions are sub-surface geology surveying, sub-canopy topography mapping and measurement of glacier and ice sheet velocities. The corresponding underlying principles and methodologies are elaborated on following each primary mission. Then, this paper analyzes the potential challenges faced by the BIOMASS mission. These challenges include limitations from the low-bandwidth design, the impact of the space objects tracking

基金项目:国家自然科学基金(42227801);湖南省自然科学基金(2023JJ20061)。

第一作者:朱建军,博士,教授,主要从事误差数据处理及其在InSAR中的应用。zjj@csu.edu.cn

通信作者:谢雁洲,博士生。yanzhou.xie@csu.edu.cn

radar (SOTR), and difficulties in low-vegetation/low-BIOMASS mapping. Finally, this paper discusses the application of BIOMASS within the context of China's national conditions and actual needs. Future research on Chinese civilian P-band SAR satellites is also explored, focusing mainly on improving range resolution within the constraints of limited bandwidth, designing and optimizing lightweight high-efficiency antenna systems, and balancing high vertical resolution with high interferometric coherence (short baseline) in the tomographic mode.

Key words: BIOMASS mission; polarimetric SAR interferometry (PolInSAR); forest cover; penetrative mapping; P-band SAR

气候变化与全球碳平衡及地球表面和大气之间二氧化碳的通量密切相关。为应对全球气候变化,中国在第75届联合国大会上承诺于2030年前实现“碳达峰”、2060年前实现“碳中和”。森林是陆地生物圈最大的碳库,具有最强的碳汇潜力,对于实现“碳中和”目标具有极其重要的作用[1-2]。森林生物量是衡量森林生态系统固碳能力的重要指标,其在陆地碳汇及碳预算估计中发挥着决定性的作用。然而,现有的地面调查数据主要依赖离散稀疏采样,难以实现大范围、高精度的生物量估计。光学遥感手段为大范围生物量估算提供了可能,但受到短波长影响其难以穿透植被冠层获取垂直结构,同时受云、雨、雾等局部气候条件制约,其获取的生物量仍具有一定的不确定性[3-5]。激光雷达(light detection and ranging,LiDAR)测量技术能精确测量单个光斑内植被的垂直结构信息,因此能实现森林高度、生物量的高精度反演,然而目前能够服务于大范围生物量提取的星载LiDAR采用的是离散点状[6]或条带数据[7]获取模式,在不依赖其他数据融合的情况下难以实现高分辨率连续测图。合成孔径雷达(synthetic aperture radar,SAR)信号能够穿透植被冠层,且雷达波长越长(如P波段),穿透能力越强,其与植被内部散射体交互作用获取有效信息,因此成为了提取森林参数的有力手段[8]。同时,其具备连续覆盖能力,不受云、雨、雾等气候干扰,是大范围森林制图中的重要技术手段。

鉴于此,欧洲空间局于2013年提出第七个“地球探索者”任务——BIOMASS卫星项目[2,9-12]。该卫星已于2025年4月发射,它搭载全球首个P波段SAR载荷,以3 d为重访周期对全球进行重复观测,核心任务是利用P波段SAR对森林参数独有的敏感性精确测量全球尺度下的森林生物量、森林高度及森林时序扰动变化,从而大幅消除现有森林生物量产品中的不确定性,以满足国际碳储量估算和全球陆地碳循环监测的需求[9]。为充分利用极化SAR(polarimetric SAR,PolSAR)信号对散射体几何形状、排布规律以及介电属性变化敏感的优势,BIOMASS载荷具备全极化数据获取能力,其与干涉SAR(interferometric SAR,InSAR)技术相结合,能够有效区分森林区地面散射和冠层散射回波信号并探测垂直方向上每个高度层对应的散射能量变化,有效刻画复杂的森林内部结构,从而进一步提高森林生物量的估计精度。此外,得益于P波段的强穿透性及对时间去相干的抵御能力,BIOMASS任务还将服务于森林区、冰雪区和沙漠区相关“穿透测绘”研究,包括森林区林下地形反演、冰川冰盖速度监测、冰雪垂直结构探测、沙漠次地表结构探测等[2,10],有力推动地表覆盖层“穿透测绘”相关理论与应用研究[13]。

本文首先介绍了BIOMASS的系统设计与数据获取模式,讨论了BIOMASS的各个任务目标与实现方法,然后分析了BIOMASS卫星所面临的潜在挑战,最后结合中国国情和现阶段任务对国产P波段SAR卫星后续研制与发展进行了展望。

1 BIOMASS卫星系统设计与任务分析

1.1 卫星系统设计与数据获取

BIOMASS任务的核心目标是对全球范围内森林地上生物量进行高精度估算,减少陆地生物圈碳储量和碳通量计算中的不确定性,改善对陆地生物圈碳循环的现有评估及对未来的预测,从而为国际性环保协议“减少森林砍伐和退化导致的碳排放”和联合国的可持续发展目标(如气候行动和保护陆地生命等)提供有力的科学支撑[14-15]。作为全球首个专为森林区测绘服务的星载P波段SAR,BIOMASS卫星系统参数和轨道设计着重考虑了极化干涉和层析测量的需求。其主要技术特点为:全极化测量、短重访周期和多基线干涉组合。BIOMASS卫星系统核心参数如表1所示。

BIOMASS卫星发射后,将进行为期3个月

表 1　BIOMASS 卫星系统参数表[9, 16-17]

Table 1　System Parameters of the BIOMASS[9, 16-17]

系统技术指标	参数
轨道类型	太阳同步轨道
轨道高度/km	约 666
轨道倾角/(°)	98
重访周期/d	3
升降交点地方时	6:00 AM/PM ± 15 min
入射角/(°)	23～35
中心频率/MHz	435
带宽/MHz	6
方位向分辨率/m	8
距离向分辨率/m	25
幅宽/km	约 50
天线尺寸(直径)/m	12
脉冲重复频率/Hz	2 000～4 000
极化方式	全极化

的轨道调试。随后在其5年的设计寿命期间内，数据获取任务分为两个阶段：层析SAR测量(tomographic SAR，TomoSAR)和极化干涉SAR测量(polarimetric SAR interferometry，PolInSAR)[2]，如图1所示。首先，进行为期约14个月的TomoSAR模式数据获取，该期间内卫星以3 d的时间间隔对同一场景进行7次成像，相邻两景影像的空间基线约为临界基线的15%，最终获得具有均匀分布基线的数据集。然后，BIOMASS进入PolInSAR模式直至到达使用寿命，在该模式下，其利用同样的原理每隔3 d对同一场景进行成像，从而获得由3景全极化SAR影像组成的子集，形成三基线(一长两短)用于PolInSAR测量，该阶段内每7个月可实现一次全球覆盖(限可观测区域内)[11,18]。采用三基线模式配置是为了充分兼顾不同基线对不同森林高度的测高敏感性，从而利用最少的数据使得基于散射模型的PolInSAR森林高度反演性能达到最优。

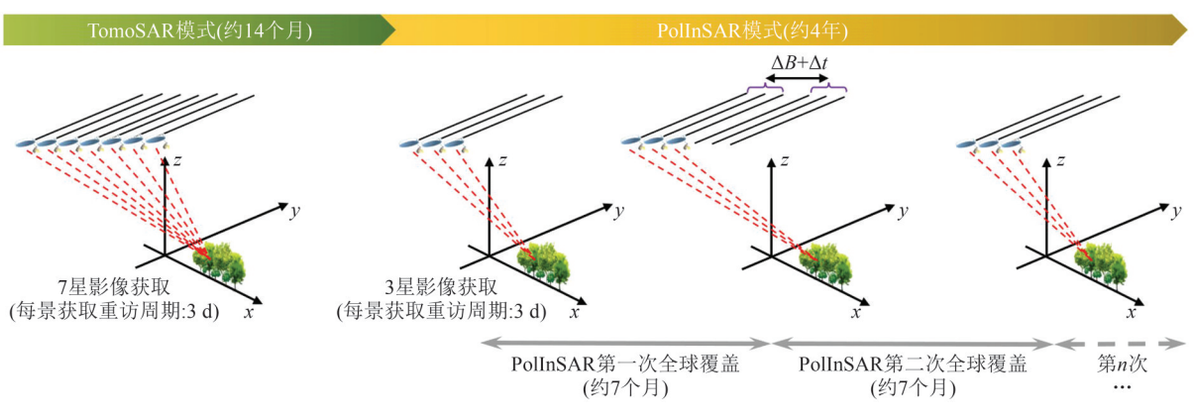


图1　BIOMASS卫星任务数据获取模式

Fig. 1　Data Acquisition Mode of the BIOMASS Mission

通过上述两种测量模式获取的Level-0原始雷达数据经过预处理、距离向压缩、多普勒中心估计、天线模式补偿、方位向压缩与自聚焦、电离层改正等系统标准化数据处理链处理后生成Level 1a产品，即单视复数影像[2]；Level-1产品还包括经过辐射校正、多视、地距转换处理的Level 1b地距多视产品，以及Level 1c堆栈干涉产品，该产品默认为3景(PolInSAR模式数据)或7景(TomoSAR模式数据)Level 1a组成的影像集，并经过配准、残余电离层改正、基线精化改正、SKP(sum of Kronecker products)方法相位定标等精处理[17]。之后，这些Level 1c产品将用于生成BIOMASS任务的Level-2主要产品：森林生物量、森林高度和森林面积扰动图，以及Level-2次要产品：次表层地质图、林下地形图、冰川和冰盖速度场估计[9,19]。Level-3产品主要为对Level-2中的森林生物量、森林高度和森林面积扰动进行后处理后的衍生产品，目前相关算法仍在开发和改进中[17]。下文分别介绍BIOMASS提取Level-2核心的主要产品所采用的主要技术原理与方法。

1.2　任务一：森林生物量估计

上述基于长波SAR技术的森林生物量反演主要基于极化通道后向散射系数(PolSAR方法)、森林高度(PolInSAR方法)和森林垂直结构信息(TomoSAR方法)[20]。尽管基于森林高度和垂直结构的方法提取能够更精确地提取生物量，基于森林高度的生物量反演要求针对不同植被种类精准地选取合适的异速生长方程，基于垂直结构的生物量提取对数据获取要求严苛，因此稳定性和普适性均受到一定程度的制约。相比之下，基于后向散射系数的反演应用最为广泛，其核心原理是极化SAR信号对植被几何特征和物

理属性信息均十分敏感[21],而这些特征与森林生物量密切相关。考虑反演算法的复杂性、训练样本的数量、模型参数的物理意义以及不同森林场景下的可推广性,BIOMASS将采用基于半经验物理模型的生物量反演方法[9-10]。

由于P波段信号的强穿透性,其后向散射系数与森林生物量的关系不仅与森林特征(植被三维结构、物种、生长阶段、枝叶和木材含水量等)相关,还受到地形环境因素(坡度、地表土壤湿度和地表粗糙度等)的显著影响。显然,完全考虑其中的所有影响参数将导致模型过于复杂而无法求解。BIOMASS项目通过Phase A阶段大量机载飞行实验总结得出,地形条件是影响大范围情况下后向散射系数与生物量稳定关系的最主要因素,同时文献[22]提出的模型具有更强的物理散射意义,其在求解准确的情况下能够发挥较好的效果。项目所采用的生物量反演方案的核心是严格的相位校准、地表散射贡献剔除和增强最优敏感高度层的后向散射信号。相位校准包括大气与电离层校正以及扣除地表高程相位;地表散射贡献去除则采用Ground Notching方法,该方法能够在消除/抑制地表散射信号的同时增强与生物量相关的某一高度层回波信号[23-24]。由于后向散射系数可以建模为$\sigma=\sigma_{\mathrm{surf}}+\sigma_{\mathrm{db}}+\sigma_{\mathrm{vol}}$,其中$\sigma_{\mathrm{surf}}$为地表散射贡献;$\sigma_{\mathrm{db}}$为来自地表-树干作用的二面角散射贡献;$\sigma_{\mathrm{vol}}$为来自植被冠层的体散射贡献。通过Ground Notching去除地表散射贡献方法后,信号主要包含纯净的体散射贡献,其表达式为[9,16]:

$$\sigma_{pq}^{\mathrm{vol}}=C_{pq}W^{\alpha_{pq}}\cos^{n_{pq}}\theta \tag{1}$$

式中,pq为不同极化方式;C_{pq}为尺度因子;W为森林生物量;α_{pq}是由森林结构决定的系数;θ为考虑地形的局部入射角;n_{pq}为顾及分辨单元内体散射的系数。最终通过对以下代价函数进行非线性最小化迭代求解,反演森林生物量和模型参数[16]:

$$\begin{aligned}&J(W^{\mathrm{ROI}},\boldsymbol{p};\boldsymbol{\sigma},W^{\mathrm{CAL}},\theta)=\\&\left\|\lg(f(W^{\mathrm{ROI}},p^{\mathrm{ROI}};\theta^{\mathrm{ROI}}))-\lg(\sigma^{\mathrm{ROI}})\right\|^2+\\&\left\|\lg(f(p^{\mathrm{CAL}};W^{\mathrm{CAL}},\theta^{\mathrm{CAL}}))-\lg(\sigma^{\mathrm{CAL}})\right\|^2\end{aligned} \tag{2}$$

式中,CAL为训练样本点数据;ROI为待估计点数据;$\boldsymbol{p}$为所有点待估计的模型参数向量(C_{pq},α_{pq},n_{pq});$\boldsymbol{\sigma}$为SAR观测值的向量;$f(\cdot)$为式(1)中的模型函数。在大范围应用时,拟采用空间邻域多像素算法、升降轨融合算法等进一步增强解算的稳定性,同时在不包含训练样本点的区域通过相邻影像重叠区域进行训练样本的传递,最终实现大范围生物量测绘。

1.3 任务二:森林高度估计

BIOMASS项目在干涉数据获取阶段主要采用PolInSAR技术提取森林高度,其系统参数和数据获取模式上重点考虑了森林区干涉测高的需求,在星载雷达遥感发展史上尚属首例。通过融合PolSAR和InSAR技术,PolInSAR技术既对散射体的形状、方向和介电属性敏感[25],又对散射体的垂直分布和高度敏感,能够对同一分辨单元内包含的多重散射机制有效解混,并分离对应的不同散射中心,从而具备获取植被冠层高度的能力[26]。

利用PolInSAR技术提取森林冠层高度主要通过反演相干散射模型实现。大量机载飞行项目和可行性论证实验表明,随机地体两层相干散射模型(random volume over ground,RVoG)在不同森林条件下具有较好的稳定性,可适用于大范围森林高度提取[20,27-28]。该模型将地表森林覆盖层抽象为包含随机散射粒子的植被层和不可穿透的地表层,建立了PolInSAR复相干性观测值与森林高度等生物物理参数之间的函数表达,为定量反演森林参数提供了契机[29-31]。然而,采用经典RVoG模型结合BIOMASS数据进行森林高度反演存在三大主要问题:①未考虑时间去相干误差[32];②未考虑地形坡度对参数反演的影响[33-34];③森林介质层为随机匀质体的假设在长波视野下难以成立[35]。为此,BIOMASS项目团队提出引入标量因子对时间去相干进行参数化表达,同时对垂直有效波数(k_z)进行地形坡度校正,并引入TomoSAR阶段获取的森林三维结构信息优化RVoG模型中的垂直结构函数。优化后的散射模型将不同极化方式的相干性表达为[36]:

$$\tilde{\gamma}(\boldsymbol{\omega})=\mathrm{e}^{\mathrm{i}\varphi_0}\frac{\gamma_t\tilde{\gamma}_v+\mu(\omega)}{1+\mu(\omega)} \tag{3}$$

式中,ω为不同极化方式的散射矢量;φ_0为林下地表高程相位,在BIOMASS Level-1数据处理中利用林下数字地形模型(digital terrain model,DTM)补偿后置为零;μ为地体幅度比,表示地表散射和体散射贡献的比值;γ_t为时间去相干因子,建模为实数;$\tilde{\gamma}_v$为纯体去相干,建模为与植被垂直结构参数和数据获取几何参数相关的函数表达式[30-31]:

$$\tilde{\gamma}_v=\int_0^{h_v}f(z)\mathrm{e}^{\mathrm{i}k_z z}\mathrm{d}z\Big/\int_0^{h_v}f(z)\mathrm{d}z \tag{4}$$

式中,$f(z)$为包含森林高度h_v的森林垂直结构函数,通过BIOMASS任务第一阶段采集的TomoSAR数据集反演;k_z为经过局部入射角校正后的垂直有效波数。为充分兼顾不同空间基线对不

同森林高度的最优测高敏感度区间，森林高度提取采用三基线（一长两短）PolInSAR数据组合反演。通过对多基线方程组进行非线性最小二乘求解，得到森林高度和模型参数：

$$\min_{h_v,\mu,\gamma_t^{12},\gamma_t^{13},\gamma_t^{23}}=\left\|\begin{bmatrix}\hat{\gamma}^{12}{}_{\text{obs}}\\ \hat{\gamma}^{13}{}_{\text{obs}}\\ \hat{\gamma}^{23}{}_{\text{obs}}\end{bmatrix}-[M]\begin{bmatrix}h_v\\ \mu\\ \gamma_t^{12}\\ \gamma_t^{13}\\ \gamma_t^{23}\end{bmatrix}\right\|_2^2 \tag{5}$$

式中，上标12、13、23分别为不同的基线干涉对。得到的森林高度h_v通过考虑由于坡度引起的局部参考平面变化关系转化为最终的实际森林高度：$h_{v_\text{correct}}=h_v/\cos\alpha$[37]。

此外，BIOMASS任务第一阶段获取的TomoSAR数据也将用于提取森林高度，作为参考高度用于迭代解算的初值输入。其主要原理是先利用SKP分解方法求取体散射能量占优的多基线协方差矩阵，后用于三维聚焦求得每个像素在垂直高度向上的散射能量分布，进而通过设定冠层信号在垂直方向的功率损失阈值提取冠层顶部高程作为森林高度[38-39]。该方法能够不依赖于物理散射模型提取森林高度，但其对数据要求严苛，仅在BIOMASS任务的第一阶段适用，故森林高度提取与时序更新的任务主要通过第二阶段的PolInSAR模式实现。

1.4　任务三：森林扰动变化监测

该任务目标是检测卫星重访期间内发生的显著森林变化，例如森林砍伐、森林火灾和严重退化等。其原理是通过对极化协方差矩阵时间序列数据进行假设检验，其中，零假设为基于给定的位置和时间内极化数据时间序列中未发生变化，若该假设在给定的显著性水平下不成立，则认为森林发生了变化[9-10]。

该产品目标分辨率为50 m，主要考虑采用较小的视数（方位向6视和距离向单视）以避免原始像素回波信号失真，更有利于逐像素探测森林场景变化。假设复数协方差矩阵数据符合Wishart分布，通过似然比检验来评估时间序列中的协方差矩阵是否属于同一分布，从而判断新的协方差矩阵是否与先前的矩阵有显著差异，以此不断迭代更新全球森林扰动变化图，直至卫星寿命结束[16,40]。值得注意的是，目前该方法无法指定检测概率，原因是难以准确地刻画复杂森林变化以何种方式作用于极化协方差矩阵，进而无法明确和变化森林相关的多变量概率分布函数表达。此外，土壤湿度变化等环境影响引起的协方差矩阵的变化在一定程度上会增加误检率，目前仍在不断研究和优化有效区分环境因素和森林自身变化引起协方差矩阵变化的相关方法。尽管如此，该假设检验方法仍能够帮助人们在一定的置信度下判别森林是否发生变化，对优化土地利用管理、监测全球森林变化和碳排放量化具有重要意义。

1.5　次要任务

为充分利用P波段信号强穿透特性及时序散射特性的稳定性，发挥长波SAR系统对地观测优势，BIOMASS在森林区、冰雪区和沙漠区三类主要地表覆盖层分别设计了次要任务，包括林下地形反演、冰川冰盖速度监测、冰雪内部结构探测和干旱区次地表结构探测。

对于森林覆盖层，BIOMASS拟采用极化层析SAR（polarimetric TomoSAR，Pol-TomoSAR）的相关算法利用第一阶段的7景层析数据影像分离较为纯净的地表散射贡献信号，提取林下地表高程相位，从而反演茂密植被层的林下地形高程，得到描绘“裸地球”高程的DTM产品，分辨率约为100 m×100 m，能够满足地球重力场改正、洪水掩膜预测及水文学相关方面的重要研究[16,41-42]。同时，该林下地形产品也将作为先验信息输入辅助提升PolSAR和PolInSAR阶段的森林高度与生物量提取精度。

对于沙漠覆盖层及干旱地区，P波段信号的穿透深度远高于L波段及其他高频SAR信号，更有利于次地表地质结构的测绘。已有研究表明，L波段SAR数据能够探测沙漠覆盖层下的古河道系统、隐藏断层及层下基底岩石[43-44]，P波段信号在干旱介质的穿透深度可达L波段的3倍以上，且P波段信号对覆盖沙层表面变化的敏感性较低，因此可以更好地揭示沙层下的地下特征。结合PolInSAR和TomoSAR测量手段，BIOMASS将成为干旱沙漠覆盖层次地表地质和水文特征的有效测绘工具，为揭示沙漠隐藏的未知历史、古环境与古气候研究、地下水资源勘探以及矿产资源勘查提供了前所未有的机会[45]。

对于冰雪覆盖层，冰川和冰盖的速度场通过差分SAR干涉测量[46]和偏移量追踪[47-48]两种技术测量。BIOMASS卫星的优势在于其P波段信号对冰雪层的穿透深度更深，且能够确保对降雪、雪层表面融化和风成过程的敏感性更低，削弱时间去相干影响，从而具有更高相干性和更长

的相干时间,能够比高频InSAR监测更长时间序列内的冰川位移。特别是南极内部区域极低的冰速要求更长的时间基线,BIOMASS甚至能够在最长单次观测周期(228 d)的基线下,仍提供足够高质量的高相干性观测[9-10]。针对冰雪内部垂直结构和厚度探测,可采用Pol-TomoSAR技术或三基线极化相干层析技术对垂直结构参数进行反演,其对于理解冰雪的热力学行为和响应机制、预测海平面变化和水资源变化极为重要,同时可用于校准和验证全球气候模型,提高其预测未来气候变化的准确性。

2 BIOMASS任务面临的挑战

2.1 低带宽SAR数据

在常规信号体制下,SAR系统距离向分辨率和信号带宽成反比,因此增大带宽是实现高分辨率的有效途径之一。然而,根据国际电信联盟(international telecommunication union,ITU)相关规定,BIOMASS雷达最终仅能采用435 MHz的工作频率和6 MHz的信号带宽[2,49]。窄设计带宽使得BIOMASS数据距离向分辨率受到限制,在入射角为25°的单视条件下,对应的地距分辨率约为59 m,对空间上精细化森林高度测图和稀疏森林区森林高度与垂直结构提取提出了挑战。受到低分辨率的影响,极化干涉性能也将在一定程度上受到制约。由于单个分辨单元内混淆的不同散射体更多散射机制趋于复杂,在有限的基线数量条件下分离不同散射机制的能力下降,已有研究表明,对于给定的森林场景,当像素空间分辨率从3 m降低为15 m时,该像素对应的极化相干椭圆的最大相位分离度将缩小20%以上[50],进而影响森林高度和林下地形的估计精度。

对于数据预处理方面,受分辨率影响且考虑森林产品分辨率要求,协方差矩阵估计最大多视数只能达到100(25(方位向视数)×4(距离向视数)),提升对噪声的抑制能力并保证干涉相位的高质量是相干性估计算法中需要考虑的主要因素,基于多基线相干最优的联合估计方法[51]能够在一定程度上改善该问题。另外,考虑地形坡度的距离向频谱滤波变得尤为重要,在窄带条件下,未充分补偿频谱偏移所导致的空间几何失相干将大幅降低干涉相干性,造成基于模型的森林参数反演偏差。图2所示为机载高分辨率PolInSAR数据(125 MHz)和BIOMASS星载模拟数据(6 MHz)基于多基线相干最优方法和三基线PolInSAR算法反演法属圭亚那Paracou热带雨林森林高度的结果对比。在星载数据配置下,空间分辨率大幅降低,且由于干涉相干性的显著下降,该部分非体去相干将被误解译为体去相干,导致星载数据的直接反演结果呈现一定的高估。经过系统校正后的森林高度反演结果在空间分布上与LiDAR参考数据相似,证明BIOMASS PolInSAR对森林高度空间变化仍具有一定的敏感性,能够满足大尺度制图应用的需求。

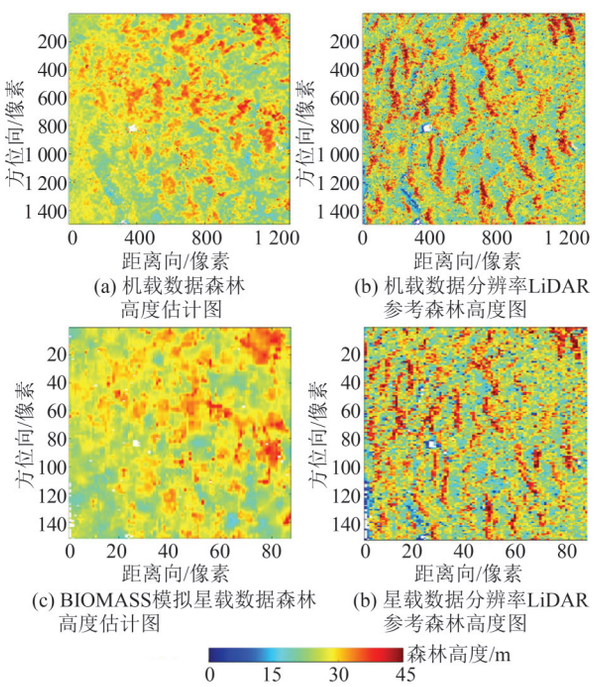


图2 机载和星载三基线PolInSAR反演森林高度图与LiDAR森林高度图[52]

Fig. 2 Airborne and Spaceborne Three-Baseline PolInSAR-Estimated Forest Height Map and LiDAR Foreste Height Map [52]

对于层析SAR应用方面,窄带宽设计主要影响TomoSAR的垂直向高度分辨率,从而限制了其在垂直方向分辨不同散射层的能力[53]。结合BIOMASS卫星设计参数和TomoSAR阶段数据获取模式(详见§1.1),在25°入射角条件下,其对应的垂直向高度分辨率约为20 m。因此,在成熟的热带雨林区域,BIOMASS数据仍能支持将森林场景沿垂直方向分为三层,然而对于森林密度较为稀疏且高度更低的北部针叶林等区域,其森林高度和林下地形提取精度将受到不可避免的影响。图3所示为机载高分辨率TomoSAR数据(125 MHz)和BIOMASS模拟星载数据(6 MHz)基于6景SAR影像提取Paracou热带雨林的森林垂直散射剖面的结果对比。可见125 MHz的机

载高分辨率数据在垂直方向能够刻画更多森林结构的细节信息,更有利于森林高度、生物量及林下地形的提取,6 MHz的BIOMASS模拟数据在空间上更趋于平滑,空间结构和垂直结构细节存在一定丢失,尤其是在高低植被过渡区域和森林/非森林分界处影响最为显著。

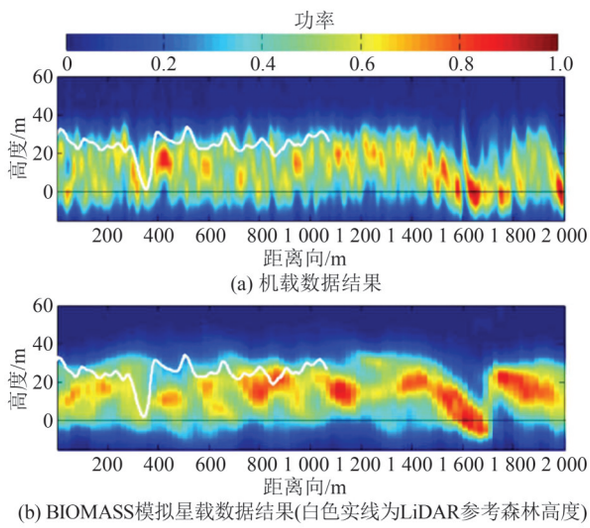


图3　6景机载SAR影像和星载SAR影像利用TomoSAR提取的森林垂直散射剖面图[54]

Fig. 3　Tomographic Profiles Generated from Six Airborne SAR Images and Spaceborne SAR Images[54]

2.2　空间目标跟踪雷达(space object tracking radar,SORT)观测区域限制

SOTR系统是由美国国防部控制用于追踪空间物体的一系列地面雷达站网络,其站点主要分布在北美和欧洲。根据ITU的相关规定,考虑到信号频段接近造成的干扰,BIOMASS卫星禁止在SOTR雷达站点视线范围内开机获取数据。因此,相比于BIOMASS卫星理想条件下“全球森林覆盖”的数据获取目标,SOTR禁区限制使其在温带森林、寒带森林、亚热带森林和热带森林区的数据获取范围分别减少约68.7%、43.2%、35.2%和4%(具体参见文献[55]中的图1)。

结合已有全球森林普查数据和碳循环/气候模型分析,目前SOTR禁令对BIOMASS任务的影响仍处于可控程度,并在一定程度上能够通过外部手段削弱。具体地,从理论层面,SOTR限制主要影响对北美和欧洲的温带和北方森林区观测数据获取,在温带、寒带和亚热带森林区损失的碳储量覆盖率分别为72.0%、36.7%和28.6%。然而这三类地区占全球森林生物量碳储量的比重相对较小,分别为12%、15%和7%[55];相比之下,对于占全球生物量碳储量高达66%的热带森林而言,SOTR限制对其数据完整度影响较小,损失的碳储量覆盖率仅约为3%。同时,温带和寒带生物群落中森林碳储量和碳储量变化的不确定性远低于热带地区,已有数据显示,在寒带和温带森林,碳储量的误差分别占总碳储量的约8%和5%,在热带地区该误差约为20%[5]。此外,结合全球气候变化和碳循环模型的研究,热带森林的数据对气候影响更为关键,已有研究[55]使用柯尔莫哥洛夫-斯米尔诺夫检验结合气候-生物量模型,证明去除受SOTR影响的数据前后各个气候分层的生物量统计分布不存在显著差异。以上研究和分析表明,尽管SOTR导致部分地区存在数据损失,但BIOMASS对全球森林生物量的观测数据总体上仍具有较强的代表性。

从方法层面,通过融合其他在轨运行或计划发射的SAR卫星多源数据能够有效估计低生物量森林区的生物量空间分布。例如,国产陆地探测一号[56-57]、ALOS-2 PALSAR-2,SAOCOM 1A/1B的L波段全极化数据以及NISAR[58]的L/S双频全极化数据等,均有助于填补BIOMASS任务的覆盖空白。此外,大部分受SOTR限制的区域位于拥有完备森林清查体系的工业化发达国家,这些地区已有大量关于森林生物量的详细信息和其他遥感数据源,因此,即使BIOMASS数据获取无法直接覆盖这些区域,也可通过其他数据源补充全球碳循环建模的所需信息。

2.3　低矮植被参数不敏感

受6 MHz窄带宽限制和低分辨率影响,低矮植被和稀疏森林参数测量将成为BIOMASS任务的另一大挑战。相比于高分辨率的机载SAR系统,星载P波段SAR的信噪比更低,引起的信噪比失相干更为显著;同时,由于带宽的大幅减小,采用相同的频谱滤波技术条件下引起的残余几何失相干更为严重,导致观测的相干性更低[52]。另外,使用Ground Notching方法[23-24]在包含强地表散射贡献的低矮植被区域难以完全彻底去除地表散射能量。因此,在窄带条件下未完全补偿几何(频谱)去相干、P波段强穿透性引起的显著地表散射贡献以及较低的高度向分辨率,是BIOMASS低矮森林参数反演的主要潜在误差源。在不基于物理模型的TomoSAR森林参数估计框架下,较低的高度向分辨率导致无法有效分离低矮植被相位中心及林下地形相位中心高度,在垂直剖面的散射能量谱上表现为信号混叠[53]。在基于RVoG模型的PolInSAR森林高度

反演框架下(见§1.3),所有非体去相干(几何去相干、信噪比去相干、时间去相干等)均在模型反演时被误解译为体去相干,从而引起森林高度的高估。在受相同程度的非体去相干影响下,对于低矮植被而言,由于其非体去相干与体去相干的比率更大,因此低矮植被反演的高度相对误差也更大[59-60]。图4所示为机载高分辨率PolInSAR数据(94 MHz)和BIOMASS星载模拟数据(6 MHz)基于PolInSAR算法反演瑞典Remingstorp地区针叶林森林高度的结果对比。可见星载数据反演结果中高低植被交界的轮廓变得模糊难以分辨,低矮植被区森林/非森林边界无法有效甄别和提取。森林高度整体均存在一定高估,而低矮植被的高估现象显著高于高植被区域。

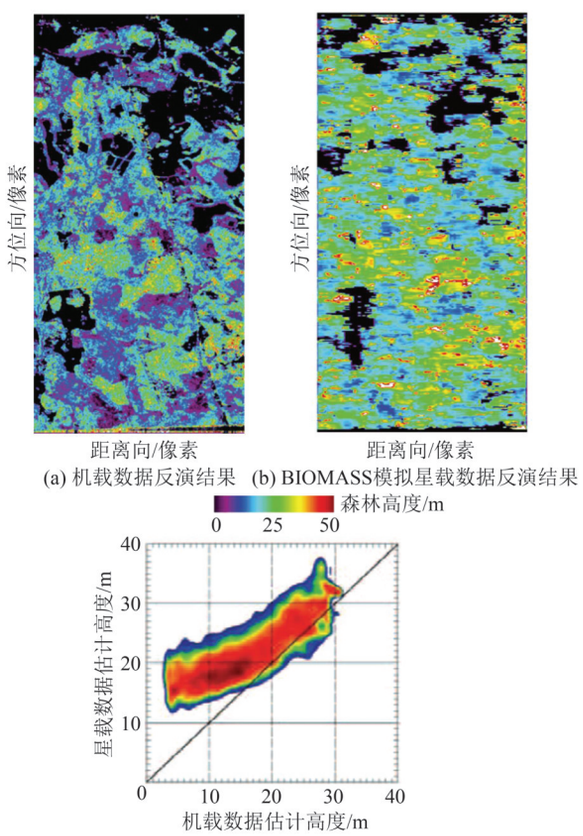


图4 机载与星载PolInSAR数据反演北方针叶林森林高度结果图[59]

Fig. 4 Boreal Forest Height Maps Estimated by Airborne and Spaceborne PolInSAR Data[59]

鉴于此,引入同期在轨运行的其他对地观测卫星数据融合和填补低矮植被区森林测绘的空洞是可行的解决方案之一。中国陆地探测一号L波段民用全极化SAR卫星星座将与BIOMASS卫星同期运行,能够提供高时空分辨率的L波段全极化SAR影像;NISAR卫星计划于2024年下半年发射,届时能够提供全极化L波段和S波段数据,对于低矮和稀疏森林的高度和生物量具有更高的敏感性。此外,GEDI[6,61]和ICESat-2[7,62]等星载激光雷达卫星能够提供高精度地形及森林参数的点/条带状数据,可用于与上述SAR数据融合有效提升低矮和稀疏森林测绘能力。

3 BIOMASS卫星与国产P波段SAR研究展望

鉴于中国目前仍未发射国产P波段SAR卫星系统,考虑中国现阶段国情和应对国际气候变化的挑战,BIOMASS卫星能够在多个层面上发挥积极的作用。首先,“碳达峰”“碳中和”这一宏伟目标的实现依赖于对国家碳排放和碳汇的精确监测与管理。在该背景下,BIOMASS卫星不仅是一项技术工具,更是实现“双碳”目标的关键支持。尽管中国已有少量光学卫星(资源三号、高分七号等)可服务于大尺度生物量测绘,P波段BIOMASS卫星的加入能够提供关于中国森林覆盖率、生物量和碳储量的精确数据,通过监测森林生长、退化和再生的动态,更有效地管理森林资源,对科学评估和改善中国现有碳吸收能力尤为重要。现阶段中国林草部门有大量核心业务对于星载P波段SAR数据的需求极为迫切,包括森林资源宏观调查监测、森林资源规划设计调查、森林资源年度更新、森林资源管理一张图、天然林保护规划、国家森林生态安全评价等。其次,BIOMASS数据能够辅助提高中国碳交易市场的透明度和公信力,促进碳交易公平有效进行,对于激励企业和地区减少碳排放至关重要。同时,中国利用这些数据能够在国际碳交易市场中发挥更积极的角色,为推动全球碳减排做出努力和贡献。在社会经济和可持续发展方面,BIOMASS数据有利于帮助农林业部门优化林业精细化管理,提高木材和非木林产品的生产效率及生态效益,有助于中国实现联合国可持续发展目标中关于气候行动、生态系统保护和负责任的消费与生产相关的子目标。此外,通过监测森林健康状况和生态变化,能够帮助相关部门在森林火灾和病虫害等自然灾害的预防和管理方面做出更快速和有效的反应。

尽管如此,BIOMASS卫星仍面临窄带宽、低分辨率和测绘宽幅等限制。中国已于近5年陆续开展了国产民用P波段SAR卫星系统的一系列验证和预研工作。前期的研究主要集中在机载P

波段SAR系统及其应用上，国防科技大学、中国科学院空天信息创新研究院、中国电子科技集团公司第十四研究所、第三十八研究所等单位已开展P波段机载SAR的载荷研制和飞行试验，最高分辨率优于1 m，并通过极化SAR干涉、SAR层析等技术手段成功反演森林高度及生物量等森林参数[63]。同时，对于卫星系统参数设计也进行了仿真实验和研究。国产P波段SAR卫星的系统参数设计应当从中国实际应用需求出发，考虑各参数之间的矛盾和制约关系进行折中，使得系统总体性能达到最佳。其中，最重要的关键参数包括分辨率、测绘带宽、系统带宽、天线尺寸、脉冲重复频率、波束数和发射功率等[64]。根据BIOMASS卫星研制经验，窄信号带宽带来的一系列问题将成为制约星载P波段SAR系统性能的最主要因素。考虑到ITU的相关要求，国产P波段SAR卫星目前只能采用较窄的设计带宽，如何进一步提升其斜距分辨率仍是目前努力的目标之一。其次，需考虑轻质P波段SAR天线系统设计问题。星载P波段SAR天线系统体积和重量相比其他短波SAR大幅增加，BIOMASS卫星采用一个直径约12 m的可部署（展开）圆形天线系统实现，因此需要针对P波段SAR参数特点进一步研究轻质高效率天线系统的设计及优化问题。此外，由于国产P波段SAR系统分辨率更高，因此相比于BIOMASS数据成像处理难度更大，大气层传播效应影响更加显著，则需研究相配套的数据处理理论和方法。另一方面，BIOMASS层析数据理论垂直分辨率仅为约20 m，针对中国北方森林及大部分中等高度森林区域的特性，该垂直分辨率仍不能满足森林精细化调查、森林生态修复和保护以及森林质量精准提升工程等要求。如需将设计垂直分辨率提升至10 m，结合其他系统参数设计和仿真分析[63]，则对应的最长基线跨度需达到约12 km，此时需兼顾考虑高植被森林区的严重体去相干及长达20天左右的时间去相干等共同引起的严重失相干问题，如何结合中国森林特点精确平衡高垂直分辨率和高干涉质量（低去相干影响）亟须进一步深入研究。最后，受到SOTR区域影响，国产P波段SAR卫星同样面临在禁区内无法开机观测的限制，因此，结合P波段SAR设计参数和理论测绘精度，考虑该限制下其所获得的全球森林测图产品对碳循环估计、气候模型建模等关键科学问题研究的影响仍需进一步定量分析。

4　结　语

欧洲空间局BIOMASS卫星通过搭载全极化P波段SAR载荷，对全球森林高度、森林生物量及森林时序扰动变化进行时序监测，从而实现对全球陆地生态系统碳循环的建模与分析，同时能够实现林下地形测绘、冰雪垂直结构探测、沙漠次地表结构探测等地表覆盖层“穿透测绘”关键目标，推动星载SAR遥感理论和技术的发展。中国亟须研制国产高分辨率星载P波段SAR系统，以满足现阶段实现“双碳”目标、高精度高分辨率林下地形测绘、气候变化应对及可持续发展目标的需求，抢占全球长波极化雷达遥感的高地。

参　考　文　献

[1] ZHU Z L, WALLER E. Global Forest Cover Mapping for the United Nations Food and Agriculture Organization Forest Resources Assessment 2000 Program[J]. *Forest Science*, 2003, 49(3): 369-380.

[2] ESA. Report for Mission Selection: BIOMASS, ESA SP -1324/1 [R]. European Space Agency, Noordwijk, The Netherlands, 2012.

[3] 曹海翊, 邱心怡, 贺涛. 森林生物量遥感卫星发展综述[J]. 光学学报, 2022, 42(17): 402-409.
CAO Haiyi, QIU Xinyi, HE Tao. Review on Development of Forest Biomass Remote Sensing Satellites [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42 (17): 402-409.

[4] 李德仁, 王长委, 胡月明, 等. 遥感技术估算森林生物量的研究进展[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2012, 37(6): 631-635.
LI Deren, WANG Changwei, HU Yueming, et al. General Review on Remote Sensing-Based Biomass Estimation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(6): 631-635.

[5] PAN Y D, BIRDSEY R A, FANG J Y, et al. A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests[J]. *Science*, 2011, 333(6045): 988-993.

[6] DUBAYAH R, BLAIR J B, GOETZ S, et al. The Global Ecosystem Dynamics Investigation: High-Resolution Laser Ranging of the Earth's Forests and Topography [J]. *Science of Remote Sensing*, 2020, 1: 100002.

[7] MARKUS T, NEUMANN T, MARTINO A, et al. The Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite-2 (ICESat-2): Science Requirements, Concept, and Implementation [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 190: 260-273.

[8] TEBALDINI S, D'ALESSANDRO M M, DINH H T M, et al. P Band Penetration in Tropical and Boreal Forests: Tomographical Results[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Vancouver, BC, Canada, 2011.

[9] QUEGAN S, LE TOAN T, CHAVE J, et al. The European Space Agency BIOMASS Mission: Measuring Forest Above-Ground Biomass from Space[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 227: 44-60.

[10] LE TOAN T, QUEGAN S, DAVIDSON M W J, et al. The BIOMASS Mission: Mapping Global Forest Biomass to Better Understand the Terrestrial Carbon Cycle[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(11): 2850-2860.

[11] LEANZA A, CARBONE A, IMBEMBO E, et al. Earth Explorer Biomass P-Band SAR Mission: Status and Calibration Concept[C]//The 14th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Leipzig, Germany, 2022.

[12] LE TOAN T, CHAVE J, DALL J, et al. The BIOMASS Mission: Objectives and Requirements [C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Valencia, Spain, 2018.

[13] 朱建军, 付海强, 汪长城. 极化干涉SAR地表覆盖层"穿透测绘"技术进展[J]. 测绘学报, 2022, 51(6): 983-995.
ZHU Jianjun, FU Haiqiang, WANG Changcheng. Research Progress of "Penetration Mapping" of Earth Surface by PolInSAR[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(6): 983-995.

[14] GIBBS H K, BROWN S, NILES J O, et al. Monitoring and Estimating Tropical Forest Carbon Stocks: Making REDD a Reality[J]. *Environmental Research Letters*, 2007, 4(4): 045023.

[15] FAO, UNDP, UNEP. UN Collaborative Programme on Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation in Developing Countries (UN-REDD)[OL]. https://www.un-redd.org/sites/default/files/2021-10/UN-REDD_FrameworkDocument.pdf,2008.

[16] BANDA F, GIUDICI D, LE TOAN T, et al. The BIOMASS Level 2 Prototype Processor: Design and Experimental Results of Above-Ground Biomass Estimation [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(6): 985.

[17] PINHEIRO M, NOVELLI A. The BIOMASS Processing Suite (BPS): An Overview of BIOMASS Operational Processor and Products [C]//The 11th International Workshop on Science and Application of SAR Polarimetry and Polarmetric Interferometry and BIOMASS Workshop, Toulouse, France, 2023.

[18] CARBONE A, COSTA G, FEHRINGER M, et al. The BIOMASS System — Overview and Development Status[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS, Brussels, Belgium, 2021.

[19] BANDA F, GIUDICI D, QUEGAN S, et al. BIOMASS L2 Prototype Processor: Current Status [C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Yokohama, Japan, 2019.

[20] 廖展芒. 森林地上生物量极化干涉SAR反演方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
LIAO Zhanmang. Forest Above-Ground Biomass Estimation Using PolInSAR Data[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.

[21] 付海强, 汪长城, 朱建军, 等. Neumann分解理论在极化SAR植被分类中的应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(5): 607-611.
FU Haiqiang, WANG Changcheng, ZHU Jianjun, et al. A Polarimetric Classification Method Based on Neumann Decomposition[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(5): 607-611.

[22] TRUONG-LOÏ M L, SAATCHI S, JARUWATANADILOK S. Soil Moisture Estimation Under Tropical Forests Using UHF Radar Polarimetry [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(4): 1718-1727.

[23] D'ALESSANDRO M M, TEBALDINI S, QUEGAN S, et al. Interferometric Ground Cancellation for Above Ground Biomass Estimation [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 58(9): 6410-6419.

[24] SOJA M J, QUEGAN S, D'ALESSANDRO M M, et al. Mapping Above-Ground Biomass in Tropical Forests with Ground-Cancelled P-Band SAR and Limited Reference Data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 253: 112153.

[25] 韩文涛, 周璀, 朱建军, 等. 极化SAR分解研究进展与展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20230388.
HAN Wentao, ZHOU Cui, ZHU Jianjun, et al. Research Progress and Prospect of Polarization SAR Decomposition[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20230388.

[26] CLOUDE S R, PAPATHANASSIOU K P. Polarimetric SAR Interferometry [J]. *IEEE Transac-*

tions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(5): 1551-1565.

[27] TREUHAFT R N, MADSEN S N, MOGHADDAM M, et al. Vegetation Characteristics and Underlying Topography from Interferometric Radar[J]. *Radio Science*, 1996, 31(6): 1449-1485.

[28] TREUHAFT R N, SIQUEIRA P R. Vertical Structure of Vegetated Land Surfaces from Interferometric and Polarimetric Radar[J]. *Radio Science*, 2000, 35(1): 141-177.

[29] CLOUDE S. Polarisation: Applications in Remote Sensing[M]. Oxford: Oxford University Press, 2009.

[30] PAPATHANASSIOU K P, CLOUDE S R. Single-Baseline Polarimetric SAR Interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(11): 2352-2363.

[31] CLOUDE S R, PAPATHANASSIOU K P. Polarimetric SAR Interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(5): 1551-1565.

[32] SIMARD M, DENBINA M. An Assessment of Temporal Decorrelation Compensation Methods for Forest Canopy Height Estimation Using Airborne L-Band Same-Day Repeat-Pass Polarimetric SAR Interferometry[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, 11(1): 95-111.

[33] DENBINA M, SIMARD M. The Effects of Temporal Decorrelation and Topographic Slope on Forest Height Retrieval Using Airborne Repeat-Pass L-Band Polarimetric SAR Interferometry[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Beijing, China, 2016.

[34] 吴传军，汪长城，沈鹏，等. 线性变化消光S-RVoG模型的多基线PolInSAR森林高度反演[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(1): 149-156.
WU Chuanjun, WANG Changcheng, SHEN Peng, et al. A Multi-Baseline PolInSAR Forest Height Inversion Method Based on S-RVoG Model with Linearly Varying Extinction[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(1): 149-156.

[35] GARESTIER F, LE TOAN T. Forest Modeling for Height Inversion Using Single-Baseline InSAR/Pol-InSAR Data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(3): 1528-1539.

[36] LEE S K, KUGLER F, PAPATHANASSIOU K P, et al. Quantification of Temporal Decorrelation Effects at L-Band for Polarimetric SAR Interferometry Applications[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2013, 6(3): 1351-1367.

[37] KUGLER F, LEE S K, HAJNSEK I, et al. Forest Height Estimation by Means of Pol-InSAR Data Inversion: The Role of the Vertical Wavenumber[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(10): 5294-5311.

[38] TEBALDINI S. Algebraic Synthesis of Forest Scenarios from Multibaseline PolInSAR Data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(12): 4132-4142.

[39] AGHABABAEI H, FERRAIOLI G, FERROFAMIL L, et al. Forest SAR Tomography: Principles and Applications[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2020, 8(2): 30-45.

[40] CONRADSEN K, NIELSEN A A, SKRIVER H. Determining the Points of Change in Time Series of Polarimetric SAR Data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(5): 3007-3024.

[41] PINHEIRO M, MANCON S, D'ALESSANDRO M M, et al. The BIOMASS DEM Prototype Processor: Overview and First Results[C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Brussels, Belgium, 2021.

[42] 朱建军，付海强，汪长城. InSAR林下地形测绘方法与研究进展[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(12): 2030-2038.
ZHU Jianjun, FU Haiqiang, WANG Changcheng. Methods and Research Progress of Underlying Topography Estimation over Forest Areas by InSAR[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 2030-2038.

[43] PAILLOU P, SCHUSTER M, TOOTH S, et al. Mapping of a Major Paleodrainage System in Eastern Libya Using Orbital Imaging Radar: The Kufrah River[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 277(3/4): 327-333.

[44] PAILLOU P, LOPEZ S, FARR T, et al. Mapping Subsurface Geology in Sahara Using L-Band SAR: First Results from the ALOS/PALSAR Imaging Radar[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2010, 3(4): 632-636.

[45] PAILLOU P, TOOTH S, LOPEZ S. The Kufrah Paleodrainage System in Libya: A Past Connection to the Mediterranean Sea?[J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 2012, 344(8): 406-414.

[46] MASSONNET D, ROSSI M, CARMONA C, et

al. The Displacement Field of the Landers Earthquake Mapped by Radar Interferometry[J]. *Nature*, 1993, 364: 138-142.

[47] MICHEL R, RIGNOT E. Flow of Glaciar Moreno, Argentina, from Repeat-Pass Shuttle Imaging Radar Images: Comparison of the Phase Correlation Method with Radar Interferometry[J]. *Journal of Glaciology*, 1999, 45(149): 93-100.

[48] 王群, 张蕴灵, 范景辉, 等. 利用高分三号影像监测依嘎冰川表面运动[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(3): 460-466.
WANG Qun, ZHANG Yunling, FAN Jinghui, et al. Monitoring the Motion of the Yiga Glacier Using GF-3 Images[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(3): 460-466.

[49] FÜGEN T, SPERLICH E, HEER C, et al. The Biomass SAR Instrument: Development Status and Performance Overview [C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Valencia, Spain, 2018.

[50] GARESTIER F, DUBOIS-FERNANDEZ P C, CHAMPION I. Forest Height Inversion Using High-Resolution P-Band Pol-InSAR Data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(11): 3544-3559.

[51] FERRO-FAMIL L, NEUMANN M, HUANG Y. Multi-Baseline Pol-InSAR Statistical Techniques for the Characterization of Distributed Media[C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Cape Town, South Africa, 2009.

[52] XIE Y Z, FERRO-FAMIL L, HUANG Y, et al. Capabilities of BIOMASS Three-Baseline PolInSAR Mode for the Characterization of Tropical Forests [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2024, 18: 398-412.

[53] HO TONG MINH D, TEBALDINI S, ROCCA F, et al. Capabilities of BIOMASS Tomography for Investigating Tropical Forests[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(2): 965-975.

[54] HO TONG MINH D, TEBALDINI S, ROCCA F, et al. The Impact of Temporal Decorrelation on BIOMASS Tomography of Tropical Forests[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12(6): 1297-1301.

[55] CARREIRAS J M B, QUEGAN S, LE TOAN T, et al. Coverage of High Biomass Forests by the ESA BIOMASS Mission Under Defense Restrictions[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 196: 154-162.

[56] LIU K Y, WANG R, ZHANG H, et al. LuTan-1: An Innovative L-Band Spaceborne SAR Mission[C]// The 14th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Leipzig, Germany, 2022.

[57] LI T, TANG X M, ZHOU X Q, et al. LuTan-1 SAR Main Applications and Products[C]//EUSAR 2022—The 14th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Leipzig, Germany, 2022.

[58] KELLOGG K, HOFFMAN P, STANDLEY S, et al. NASA-ISRO Synthetic Aperture Radar (NISAR) Mission[C]//IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, 2020.

[59] LEE S K, KUGLER F, PAPATHANASSIOU K, et al. Polarimetric SAR Interferometry for Forest Application at P-Band: Potentials and Challenges[C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Cape Town, South Africa, 2009.

[60] SCHEIBER R, LEE S K, PAPATHANASSIOU K P, et al. Extrapolation of Airborne Polarimetric and Interferometric SAR Data for Validation of Bio-Geo-Retrieval Algorithms for Future Spaceborne SAR Missions[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Cape Town, South Africa, 2009.

[61] QI W L, LEE S K, HANCOCK S, et al. Improved Forest Height Estimation by Fusion of Simulated GEDI LiDAR Data and TanDEM-X InSAR Data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 221: 621-634.

[62] NEUMANN T A, MARTINO A J, MARKUS T, et al. The Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite - 2 Mission: A Global Geolocated Photon Product Derived from the Advanced Topographic Laser Altimeter System [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 233: 111325.

[63] 陈筠力, 陈杰, 汪长城, 等. 民用P波段SAR卫星原理及应用[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2023.
CHEN Junli, CHEN Jie, WANG Changcheng, et al. Principle and Application of Civil P-Band SAR Satellite[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2023.

[64] 杨淋. 星载P波段SAR信号处理与系统设计研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016.
YANG Lin. Research on Signal Processing and System Design of Spaceborne P-band SAR[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016.