

# 合成孔径雷达技术反演森林地上生物量研究综述

张昊楠

西南林业大学林学院

DOI:10.12238/as.v8i3.2825

**[摘要]** 森林是陆地生态系统中极为重要的组成部分,准确估算森林地上生物量(Above-ground Biomass, AGB)有助于降低陆地生态系统碳储量的估算误差,对我国“双碳目标”的实现有积极作用。合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是一种先进的对地观测技术,它不受昼夜限制,主动发射微波信号来成像,为持续监测目标区域提供了有力保障,因而在森林AGB估算方面展现了不凡的潜力。本文概述了SAR卫星的发展现状,重点从SAR数据的后向散射信息、纹理特征、层析SAR技术三个方面介绍了其在森林AGB反演中的应用,并总结了SAR数据进行森林AGB反演的发展趋势。

**[关键词]** 森林地上生物量; 合成孔径雷达技术; 后向散射

中图分类号: S285 文献标识码: A

## Forest aboveground biomass inversion using synthetic aperture radar technology

Haonan Zhang

FORESTRY COLLEGE OF SOUTHWEST FORESTRY UNIVERSITY

**[Abstract]** Forests constitute a critical component of terrestrial ecosystems. Accurate estimation of forest aboveground biomass (AGB) significantly reduces uncertainties in carbon storage assessments within these ecosystems, thereby actively supporting the realization of Chinese "Dual Carbon Goals". Synthetic Aperture Radar (SAR), an advanced Earth observation technology, operates independently of daylight constraints and utilizes active emission of microwave signals for imaging. This capability ensures continuous monitoring of target regions, demonstrating exceptional potential for forest biomass estimation. This paper provides an overview of the current development status of SAR satellites, with a focus on three key aspects of SAR data application in AGB retrieval: backscatter information, textural features, and tomographic SAR techniques. Furthermore, it summarizes future trajectories in leveraging SAR data for forest AGB inversion.

**[Key words]** Forest AGB; SAR Technology; Backscatter

## 引言

森林生态系统作为最大的有机碳贮库,越来越受到世界各国政府和科学家们的重视。作为陆地生态系统的主体,森林植被生物量几乎占到了地球陆地植被生物量的85%<sup>[1]</sup>。传统的森林资源调查方法耗时费力,效率不尽人意,对森林植被也存在一定程度的破坏。但随着遥感技术的发展,已逐渐打破传统森林资源调查的壁垒,既省时省力,调查的精度也得到较大提升。光学数据与合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)数据在森林地上生物量获取中具有较大优势,成为了当前森林资源调查的主要途径。但光学数据易受云雾雨雪等天气因素的影响,且只与森林冠层叶片发生作用,难以获得准确全面的森林地上生物量(Above-ground Biomass, AGB)估算结果。反观SAR遥感技术,它不仅能全天时、全天候进行监测,还能立体性的获取森林冠层面状、垂直结构等特征,其多极化的工作模式能够同时获取不同极

化方式的回波信号,提供丰富的目标信息,已然成为了目前森林AGB反演最具潜力的遥感数据源之一。随着SAR成像技术的不断进步,从最初的单极化、单波段和单射道发展到如今的多极化、多波段和多基线等多种观测方式与组合,极大地提升了植被参数反演研究的手段和效果<sup>[2]</sup>。

## 1 SAR卫星发展现状

合成孔径雷达(SAR)卫星作为遥感领域的关键技术手段,在过去几十年中取得了显著进展。自1978年6月美国国家航空航天局发射海洋(SeaSat)卫星并首次在卫星上装载合成孔径雷达以来, SAR卫星技术不断发展与革新,很多国家都发射了搭载SAR传感器的卫星,中国也在2016年发射了GF-3卫星,它是中国首颗分辨率达到1米的C频段多极化SAR卫星<sup>[3]</sup>。随着遥感技术的不断进步,高分辨率SAR卫星技术不断突破极限。同时,微小型SAR卫星也逐渐引起关注,其体积小、重量轻且能够进行高分辨率成像,

伴随卫星规模化应用兴起,成为了遥感领域的新热点。国内在SAR卫星技术领域同样取得了一定成果,在高分辨率SAR卫星的研发与应用方面不断推进,逐步缩小与国际先进水平的差距,随着技术的发展,其应用领域还在不断拓展。然而,高分辨率SAR卫星技术也面临着诸多挑战,如成像质量、数据处理能力、覆盖范围等,都是目前亟需解决的问题。

## 2 SAR技术在森林AGB反演中的应用

### 2.1 基于SAR后向散射信息的森林AGB反演

在合成孔径雷达遥感中,目标地物的微波散射能力通过后向散射系数( $\sigma^\circ$ )量化,该参数以单位面积为基准,综合反映了地物几何结构与电磁特性对雷达波束的反射效率。在森林生物量遥感监测领域,前人研究已系统探讨了多波段、多极化SAR数据后向散射强度与森林蓄积量间的动态响应机制,并基于多源传感器协同分析验证了其定量关联性。Toan等<sup>[4]</sup>在1992年验证了P波段、L波段以及C波段后向散射系数与森林生物量之间的相关关系,并得出了波长与估算效果之间的正相关影响,交叉极化优于同极化的结果。在森林生物量遥感反演研究中,现有成果已深入解析多频段、多极化合成孔径雷达(SAR)系统散射特性与森林蓄积参数间的时空异质性关联,并通过多源遥感数据融合方法系统揭示了二者间的非线性统计规律与物理驱动机制。

### 2.2 基于纹理特征估算森林AGB反演

SAR图像的纹理特征提取是分析其复杂空间模式的关键步骤,提取SAR图像的纹理特征一般有以下几种方法:

基于灰度共生矩阵(GLCM)提取方法:该方法是一种通过量化像素空间分布规律来表征地表结构异质性的技术<sup>[5]</sup>。基于构建的共生矩阵,可计算四类核心统计量:对比度(Contrast),反映纹理清晰度与边缘锐利程度,适用于区分森林与农田等异质地物;同质性(Homogeneity),表征局部灰度相似性,对城市建筑群等规则结构敏感;熵(Entropy),衡量纹理复杂度,常对应于自然植被的随机散射特性;相关性(Correlation),描述灰度线性依赖关系,可用于识别冰川、水域等均质区域。为提升特征稳健性,通常对四个方向的计算结果取均值或最大值,并结合多尺度窗口分析以适配不同地物尺寸。该方法需特别注意SAR斑点噪声的影响,建议在纹理提取前采用Refined Lee滤波等去噪处理,或通过增大窗口尺寸削弱噪声干扰<sup>[5]</sup>。

小波变换与多尺度分析提取方法:小波变换与多尺度分析是提取SAR图像纹理特征的重要方法,通过分解信号在不同尺度和方向上的分布,有效刻画了地表目标的散射异质性与空间结构特性。小波多尺度分析的优势在于能分离不同地物在特定尺度上的散射响应差异,例如森林冠层的高频纹理与裸露地表的中低频散射特征<sup>[6]</sup>。同时,该方法通过抑制相干斑噪声对高频分量的干扰,提升特征鲁棒性,其生成的尺度-能量谱还可用于构建多尺度分类模型,显著提升SAR图像的地物识别精度。研究表明,结合小波能量比与方向异性参数的组合特征,可有效区分植被覆盖、城市建筑及水体等典型的地物类型,为森林生物量反演、土地利用分类等应用提供高分辨度的特征<sup>[7]</sup>。

深度学习与卷积神经网络提取方法:通过提取SAR纹理特征主要是通过多层级非线性变换自动挖掘雷达影像中隐含的几何结构与散射特性差异,为地表参数反演提供高分度的表征<sup>[8]</sup>。该方法首先对SAR数据进行预处理,将相关系数(如VV/VH极化数据)转换为具有物理意义的输入矩阵<sup>[9]</sup>。构建的CNN模型通常采用多尺度卷积核并行结构(如Inception模块),通过 $3\times 3$ 、 $5\times 5$ 等不同感受野的卷积层捕捉纹理的局部细节与全局关联性,并利用批归一化(Batch Normalization)和ReLU激活函数加速收敛、增强非线性表达能力,针对SAR数据相干斑噪声,引入空洞卷积扩大特征捕获范围,同时采用随机遮挡和噪声注入策略提升模型对噪声干扰的鲁棒性。在森林生物量估算、冰川运动监测等应用中已展现出优于传统灰度共生矩阵(GLCM)等手工特征的性能,端到端的学习范式也有效避免了人工设计特征的主观性与信息损失<sup>[10]</sup>。

### 2.3 基于层析成像(TomoSAR)技术的森林AGB反演

该方法通过多基线干涉SAR数据获取植被垂直结构的三维散射特征,突破了传统二维SAR对垂直信息表征能力的局限<sup>[11]</sup>。通过阵列式平台采集不同视角的SAR观测数据,利用干涉相干性构建散射强度分布函数,解析森林冠层内的体散射相位分布,进而重建植被垂直结构参数。结合极化层析(PolTomoSAR)技术,可进一步分离不同极化通道下的散射机制(如地表散射、树干散射和冠层散射),提高垂直分辨率至米级,并通过半经验模型或机器学习算法建立散射特征与生物量的非线性映射关系<sup>[12]</sup>。例如,利用X波段TomoSAR反演热带雨林生物量时,树干主导的HH极化散射能量与生物量呈显著正相关( $R^2=0.78$ )<sup>[13]</sup>。Dinh等<sup>[14]</sup>验证了TomoSAR技术对热带雨林地区进行森林生物量估测的有效性,该研究利用TomoSAR技术对SAR后向散射系数在垂直方向上进行分解,得到了不同高度的散射贡献。当前研究的挑战在于解决时序去相干、大气延迟误差对层析精度的影响,以及发展多频段融合(如L波段穿透能力与P波段结构敏感性互补)的联合反演框架<sup>[13]</sup>。总体而言,TomoSAR技术仍处于起步阶段,对数据要求较高,真正用来反演森林生物量的实例也不多,存在诸多亟需解决的问题。

## 3 结语

综上所述,SAR在森林垂直结构估测中展现了巨大潜力,尽管已有多种方法应用于森林AGB估算,但每种方法都有其局限性。现有SAR数据中,后向散射数据分析最为全面,研究成果也最丰富,但是SAR后向散射信息无法区分森林结构变化与森林AGB变化引起的后向散射系数变化,现有的机制模型虽已建立,但仍不能很好地解决这一问题。而且目前极化SAR技术所能提供的能够反映森林结构变化的体散射模式还比较单一,因此,深入了解极化SAR技术对森林结构的影响机理,是提高利用极化SAR数据进行森林AGB反演有效性的前提和关键。此外,现有的偏振信息主要应用在森林类型的分类上,而对森林参数的量化反演还有待深入研究。总体而言,SAR所具备的一系列优势,为推动精确估测森林AGB的研究贡献了巨大作用。

**[参考文献]**

- [1]方精云.北半球中高纬度的森林碳库可能远小于目前的估算[J].植物生态学报,2000,(05):635-638.
- [2]姬永杰,张王菲.森林地上生物量合成孔径雷达技术反演研究综述[J].世界林业研究,2022,(03):32-39.
- [3]张青松,王金鑫,赫晓慧.协同Sentinel-2和GF-3多特征优选的农作物识别[J].农业工程学报,2025:1-12.
- [4]Toan TL,Beaudoin A,Riom J,等. Relating forest biomass to SAR data[J].1992.
- [5]刘光宇,黄懿,曹禹,等.基于灰度共生矩阵的图像纹理特征提取研究[J].科技风,2021,(12):61-64.
- [6]侯艳丽.基于改进的小波变换的纹理特征提取算法[J].科技信息(科学教研),2007,(17):578-579.
- [7]刘胜昔,程春玲.改进的Gabor小波变换特征提取算法[J].计算机应用研究,2020,(02):606-610.
- [8]彭阳,姚慎,李奥强,等.基于卷积神经网络算法的微生物识别及生物量预测[J].新能源进展,2024,12(04):417-424.
- [9]李树青,闫莉莉,彭勃.免训练的卷积神经网络图像处理研究[J].工业控制计算机,2021,34(10):114-115.
- [10]鲁转侠,华彩成,冯健,等.基于深度卷积神经网络的频高图特征提取研究[J].地球物理学报,2024,67(09):3290-3300.
- [11]万杰,汪长城,朱建军,等.层析SAR三维成像方法与森林参数反演研究进展[J].遥感学报,2024,28(03):576-590.
- [12]李兰,陈尔学,李增元,等.森林地上生物量的多基线InSAR层析估测方法[J].林业科学,2017,53(11):85-93.
- [13]廖展芒.森林地上生物量极化干涉SAR反演方法研究[D].电子科技大学,2019.
- [14]Dinh, Ho, Tong. Relating P-Band Synthetic Aperture Radar Tomography to Tropical Forest Biomass[J],2013.

**作者简介:**

张昊楠(1997--),男,云南曲靖人,西南林业大学林学院硕士研究生,研究方向:林业遥感。