

李增元<sup>1</sup> 赵磊<sup>1</sup> 李堃<sup>2</sup> 陈尔学<sup>1</sup> 万祥星<sup>1</sup> 徐昆鹏<sup>1</sup>

# 合成孔径雷达森林资源监测技术研究综述

## 摘要

合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 技术凭借其全天时、全天候的成像能力以及对森林垂直结构信息敏感的特点,在森林资源监测中具有独特的优势,已成为当前森林资源遥感调查技术的研究热点.本文首先介绍了 SAR 森林资源监测技术的发展背景、发展轨迹和相关知识;然后,重点阐述了极化 SAR、干涉 SAR、极化干涉 SAR 和层析 SAR 在林地覆盖类型分类、变化检测以及森林参数定量化估测应用中的技术方法;最后,就 SAR 在森林资源监测研究和应用中存在的问题与发展趋势进行了总结与展望.

## 关键词

合成孔径雷达;极化 SAR;干涉 SAR;层析 SAR;森林资源监测

中图分类号 S771.8

文献标志码 A

收稿日期 2019-10-20

资助项目 国家重点研发计划(2017YFB05027 00);国家自然科学基金(41801289)

## 作者简介

李增元,男,博士,研究员,主要研究方向为林业遥感.lizengyuan@ifrit.ac.cn

赵磊(通信作者),男,博士,助理研究员,主要研究方向为合成孔径雷达林业应用技术.zhaolei@ifrit.ac.cn

1 中国林业科学研究院 资源信息研究所,北京,100091

2 北京空间飞行器总体设计部,北京,100094

## 0 引言

森林作为陆地生态系统的重要组成部分,覆盖了大约 30% 的地球陆表,在地球生态系统和人类生产生活中扮演着重要的角色.近几十年来,随着人们对全球气候变化、碳循环研究和人类可持续发展问题的普遍关注,森林生态系统受到了世界各国政府和科学家的高度重视,及时掌握森林资源的现状及其变化规律,对于生态系统和人类生活至关重要<sup>[1]</sup>.

对于森林资源的监测,从尺度上可分为国家级的宏观监测和落实到山头地块的精细监测.传统的调查方法是以抽样理论为基础,以地面调查为主要方法进行,例如我国的国家森林资源连续清查(简称一类调查)、森林资源规划设计调查(简称二类调查)等<sup>[2]</sup>.传统调查方法存在的主要问题是,地面测量工作量大、更新周期长,全国难以取得统一时间、时空连续的森林资源调查成果.针对这些问题,遥感技术作为新的工具和技术被引入到森林资源的监测调查体系.不过在早期的森林资源调查中,遥感技术仅仅是起到辅助作用,例如作为底图用于林相图区划.但伴随着遥感森林资源调查技术的持续发展,树种/林地类型、森林高度、蓄积量、生物量等关键的森林资源监测因子已能够采用遥感技术得到.

采用遥感技术进行森林资源调查的方法,从传感器的角度可以分为光学遥感(多光谱、高光谱)、激光雷达和合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)三类.其中,激光雷达的精度最高,但只适用于小区域的森林资源调查,大区域应用的成本较高.光学遥感获取的则主要是森林冠层表面的信息,在林地类型分类、树种识别等方面具有优势,但在森林高度、蓄积量等定量估测方面有其局限性.SAR 具备全天时、全天候的观测能力,且波长相对较长,对于森林等植被叶簇具有一定的穿透能力,因此可获取与森林垂直结构参数更相关的遥观测量.因此,相比于光学遥感和激光雷达技术,SAR 在森林资源定量参数估测和大区域森林类型快速制图方面具有优势.

实际上,我国自“八五”期间就已经开始尝试将 SAR 用于森林资源信息提取方法的研究<sup>[2-3]</sup>.从“八五”期间的基于单波段单极化 SAR 数据的经验模型、专家系统<sup>[4]</sup>,到“十二五”期间的多维度 SAR、极化干涉 SAR、层析技术等<sup>[5-6]</sup>,SAR 森林资源监测技术发展至今已有近 30 年的历史.在这期间,伴随着 SAR 系统各方面技术的快速发展,

SAR 传感器逐渐由单极化、单波段、单基线发展至多极化、多波段、多基线等不同观测模式及其组合,由此诞生了多维度 SAR 的概念<sup>[7]</sup>.SAR 森林资源监测技术也逐步突破了 SAR 几何定位、辐射校正等预处理技术<sup>[8-9]</sup>,提出了干涉 SAR、极化干涉 SAR 等森林垂直结构信息反演模型方法<sup>[10]</sup>,发展了大区域海量 SAR 数据的自动化处理和森林制图技术<sup>[11]</sup>.

综上所述,SAR 是森林资源遥感调查中一项必不可少的技术,经过多年的发展,SAR 森林资源监测技术也取得了众多可喜的进展.本文将结合国内外 SAR 技术发展现状和科研动态,系统总结目前 SAR 森林资源监测技术的研究进展及应用现状,最后就 SAR 森林资源监测技术中存在的主要问题及发展趋势进行讨论分析.

## 1 SAR 森林资源监测技术研究现状

### 1.1 SAR 林地覆盖类型分类

相比于光学遥感,SAR 成像受云雨影响小,可以快速获取大区域、全覆盖的有效影像数据,因此在大区域森林遥感制图方面,SAR 具有独特优势,是光学遥感的有益补充,有时甚至是数据获取的唯一手段<sup>[12]</sup>.但 SAR 影像受斑点噪声和地形方面的影响较严重,对地物类型的识别能力不如光学遥感,通常只能实现森林/非森林的识别.不过随着 SAR 传感器的发展,多波段、多极化、多时相、多角度等多维度 SAR 数据的获取已相对成熟,基于 SAR 影像的林地覆盖类型分类也由单频、单极化 SAR 的森林/非森林分类向多维度 SAR 林地类型精细分类的方向发展.总体而言,近十几年来,SAR 林地覆盖类型分类研究的主要进展体现在更多维度 SAR 特征的利用和分类算法的升级改造两个方面.

首先,是多维度 SAR 特征方面.单一维度 SAR 特征的分类潜力和精度都较低,若要提升分类效果和精度,实现林地覆盖类型的细分,需要采用多时相数据或极化干涉 SAR 数据提取更多维度的 SAR 特征.李增元等<sup>[13]</sup>基于 ERS SAR 串行轨道数据,综合利用 SAR 强度和干涉相干信息生成干涉土地利用影像(ILU),成功实现了我国东北三省的森林制图,精度达到了 82%.王馨爽等<sup>[14-15]</sup>采用 3 个时相的 PALSAR 双极化数据,对比分析了不同地物类型在不同时相、不同极化通道下的强度以及干涉相干的特征,首先通过引入交叉极化的相干系数特征,解决了 SAR 影像中林地与城市建筑用地混分的难题,然

后利用多时相的平均干涉相干性、极化比等时变特征,将林地覆盖类型成功细分为有林地、疏林地以及灌木林地,实现了林地覆盖类型的多级分类.冯琦等<sup>[16]</sup>采用国产机载 C 波段极化干涉 SAR 数据,提取极化、纹理以及相干特征构成多维特征集,采取 SVM 分类器成功实现了森林龄组类型的细分,相关研究结果表明,极化特征可较好区分森林/非森林,纹理特征可大大降低林地与建筑用地的混分,相干特征则可以实现森林龄组的细分,有效地区分了未成林造林地、幼龄林和中龄林.

其次,在分类算法方面,研究热点是结合先进的机器学习和模式识别算法,根据 SAR 影像的统计特征和数据特点发展相应的分类算法.赵磊等<sup>[17-18]</sup>基于均值漂移和谱图分割技术发展了适应极化 SAR 数据特点的分割算法,在此基础上引入一种基于极化 SAR 非高斯模型的纹理因子 RK,实现了有林地、苗圃地和果园的细分.李兰等<sup>[19]</sup>针对极化 SAR 影像的特点,研究了全极化 SAR 数据的非高斯统计建模,对比测试了基于 K-Wishart 分布的分类器与基于 Wishart 分布的经典分类器的性能,研究结果发现,K-Wishart 分类器更适用于异质性高的山地森林的识别.徐丰等<sup>[20]</sup>提出了复数卷积网络算法,该方法可以直接以极化 SAR 散射矩阵作为输入,成功将深度学习算法应用于极化 SAR 分类,可准确地识别林地覆盖类型,得到较高的分类精度.郭宇娟<sup>[21]</sup>采用具有代表性的深度卷积 Highway Unit 神经网络,从 SAR 影像中自动学习多层高级特征表达,能够很好地抵抗噪声的影响,实现基于 GF-3 双极化 SAR 数据的呼伦贝尔市大区域林地覆盖类型制图.

### 1.2 SAR 林地类型变化检测

与 SAR 林地覆盖类型分类相似,SAR 林地类型变化监测的研究首先也是从单极化 SAR 数据开始发展,但随着 SAR 传感器技术的发展,针对多极化/全极化变化检测的方法也在增多,目前的发展趋势一方面是以单极化 SAR 变化检测方法为基础进行不断完善,另一方面是联合多维度 SAR 特征发展新的变化检测方法.总体上,主要的林地覆盖类型变化检测方法包括基于 SAR 特征的直接比较法、联合分类的变化检测方法以及两者结合的方法.

基于 SAR 特征的直接比较法的研究热点在于变化测度的设计及变化阈值的选取方法.刘萌<sup>[22]</sup>提出了一种新的考虑纹理信息的极化 SAR 变化测度,可以更好地度量不同极化分布模型的相似度,在此

基础上发展了基于极不均匀模型的极化 SAR 变化检测方法,具有更高的检测率和更低的虚警率。Guo 等<sup>[23]</sup>则提出了一种基于最小分类误差的阈值提取方法,该方法能够利用广义高斯模型对差异影像数据统计分布进行模拟,实现差异影像阈值的精确提取。

直接比较法一般属于非监督的方法,而联合分类的变化检测法则属于监督变化检测方法,研究的热点在于多时相联合分类以及多维 SAR 特征利用。冯琦等<sup>[24]</sup>采用面向对象分类方法,基于 PALSAR 正射校正合成产品,对婆罗洲地区进行了两期的热带森林制图,结果表明两个时相的分类结果能够清楚地反映森林的变化情况;Zhao 等<sup>[25]</sup>开展了农林交错区多时相全极化 SAR 联合分类的变化检测研究,提出了联合分类变化检测算法框架,并利用相似度测度方法对联合分类检测结果进行约束,取得了较好的变化检测效果。

谷鑫志等综合利用上述两种方法的优点,发展了一种结合“基于分类的变化检测”和“贝叶斯最大期望-马尔可夫随机场(EM-MRF)分类器”的森林覆盖变化检测方法,该方法集成了森林/非森林的阈值分割方法、多极化比值影像 Fisher 变换以及 EM-MRF 算法,可以综合利用多极化 SAR 数据的极化信息和空间上下文信息,减轻斑点噪声对于森林覆盖变化检测的影响,研究结果表明,其检测性能优于直接比较法和分类后比较法<sup>[26-27]</sup>。

### 1.3 SAR 森林高度反演

SAR 对森林冠层的穿透能力使其信号中包含着森林垂直方向上一定深度的结构信息,因此 SAR 信号与森林的垂直结构参数具有物理含义的相关关系。极化 SAR 能够反映不同结构散射体的物理特性,对森林垂直方向上散射体的结构类型敏感,干涉 SAR 则能够通过相位信息反映散射体的高程,两者的结合使得 SAR 成为了森林高度反演的重要手段<sup>[28-29]</sup>。目前,基于 SAR 数据进行森林高度反演的方法主要可分为基于干涉 SAR、基于极化干涉 SAR 和基于层析 SAR 这三类。

#### 1.3.1 干涉 SAR 森林高度反演

干涉 SAR 森林高度反演所采用的一般是 1 或 2 个频率的单极化干涉 SAR 数据,具体的反演方法主要分为差分反演法和基于相干性的物理模型法。差分反演法即采用包含森林高度的 DSM 与不包含森林高度的林下地形数据 (DEM) 相减得到森林高

度<sup>[29]</sup>。其中,DSM 通常采用短波长干涉 SAR 获得(例如 X 或 Ku 波段),DEM 则通常采用已有的林下地形数据或采用长波长的干涉 SAR 获得(例如 P 或 L 波段)。庞勇等<sup>[30]</sup>就 SAR 波段选择对差分法森林高度反演的影响展开了详细的讨论。Soja 等<sup>[31]</sup>利用 TanDEM-X 双星干涉 SAR 数据,结合 LiDAR 提取的高精度 DEM 实现了森林高度的精确反演。基于相干性的物理模型法目前应用较多的是 SINC 模型法,该模型简洁有效地刻画了森林高度与体散射失相干的关系。冯琦等<sup>[32]</sup>利用国产机载双天线 SAR 系统获取了 X 波段干涉 SAR 数据,对比分析了 SINC 模型法与差分法的森林高度反演结果,发现 SINC 模型法的反演精度尽管略低于差分法,但该方法不依赖实验区高精度的外部 DEM 数据,在实际中有更好的适用性,具备大区域估测森林高度的潜力。范亚雄<sup>[33]</sup>也详细分析了差分法和 SINC 模型法估测森林高度的优缺点和应用潜力,并且提出了一种基于 SINC 模型和蒙特卡罗模拟实验评价森林高度估测结果可信度的方法,可以获得更精细的反演结果。

#### 1.3.2 极化干涉 SAR 森林高度反演

极化干涉 SAR 技术是在干涉 SAR 的基础上增加了极化信息,使其同时具备了区分不同散射机制和获取不同散射机制高程信息的能力,从而实现了不依赖外部林下地形数据的森林高度反演,已成为一种重要的森林结构参数遥感定量监测关键技术<sup>[34]</sup>。极化干涉 SAR 森林高度反演的方法主要包含两种:相位差分反演法和基于物理模型反演法。

相位差分反演法与干涉 SAR 森林高度反演方法中的差分法的思路类似,关键步骤是获取能够代表森林冠层和地表的散射机制的相位中心,然后通过两个相位中心的差值反演得到森林高度,主要的方法包括相位中心分离算法、数值半径优化方法以及 ESPRIT 算法等<sup>[28-29,35]</sup>。基于物理模型的反演法是极化干涉 SAR 森林高度反演方法的研究热点,其中最为常用的模型是由 Treuhft 等于 1996 年提出的 RVoG 模型<sup>[36]</sup>。基于该模型,Cloude<sup>[37]</sup>提出了经典的三阶段森林高度反演方法,得到了广泛应用。李哲等<sup>[35]</sup>利用干涉优化相干理论和 ESPRIT 方法对三阶段法进行改进,并取得了较好的应用效果。后续基于 RVoG 模型的研究主要是发展新的模型求解方法和进一步提出改进模型。在模型求解方法方面,发展了包括模拟退火算法、神经网络法、复数域最小二乘法、平差法等一系列新方法<sup>[38-40]</sup>。在模型改进方面,

Neumann 等<sup>[41]</sup>在 RVoG 模型的基础上引入冠层填充因子构造三层植被散射模型(冠层、枝干层、地表层),并用 L 波段机载数据验证了该模型的有效性. Lu 等<sup>[42]</sup>提出了一种考虑坡度因子的 S-RVoG,可有效校正由距离向地形引起的估测误差.

### 1.3.3 层析 SAR 森林高度反演

层析 SAR 技术是近年来出现的一种先进的雷达成像技术,在传统的单基线干涉 SAR、极化干涉 SAR 的基础上,通过增加垂直方向的基线数量来实现高度维的合成孔径,从而具有分辨地物垂直结构的能力,在森林参数定量化反演研究中得到广泛应用.其中,在层析 SAR 森林高度估测研究中,根据是否利用全极化信息,可将层析 SAR 森林高度估测分为两类:1)采用单极化数据的干涉层析 SAR 技术;2)采用全极化数据的极化干涉层析 SAR 技术.利用多基线 SAR 数据,通过频谱分析得到森林垂直结构剖面,在此基础上通过分析相位中心位置和反射功率峰值进而可以得到森林高度<sup>[43]</sup>.但是,如果单独依靠相位中心或者功率峰值进行森林高度提取时往往存在一定的偏差.对此,李兰<sup>[44]</sup>提出了基于样地标定的干涉层析 SAR 森林高度提取办法,取得了很好的森林高度反演结果.相比于干涉层析 SAR 技术,利用多极化数据的极化干涉层析 SAR 能够进一步分离地体散射机制,更加准确地描述剖面的功率分布,通过剖面分析能够更加准确地进行森林高度提取<sup>[44-45]</sup>.此外,利用稀疏基理论的层析 SAR 方法也逐渐被应用到森林高度估测研究中,该方法为利用更少的 SAR 数据进行层析成像提供了基础,也是目前层析 SAR 森林高度估测研究的热点之一<sup>[46]</sup>.

## 1.4 SAR 森林蓄积量/生物量估测

森林蓄积量是森林培育、森林经营管理等生产活动中关心的核心参数,该参数以及森林地上生物量(简称森林生物量)都和森林的碳储量密切相关,对于认识全球碳循环至关重要.因此,针对森林蓄积量和生物量的监测受到了各国政府和气候变化科学家的重视,相关技术方法也逐渐成为遥感科学研究的热点.从 SAR 技术利用的角度出发,可将 SAR 森林蓄积量/生物量估测研究分为三类:1)极化 SAR 森林蓄积量/生物量估测;2)干涉、极化干涉 SAR 森林蓄积量/生物量估测;3)层析 SAR 森林蓄积量/生物量估测.

### 1.4.1 极化 SAR 森林蓄积量/生物量估测

基于极化 SAR 数据估测森林蓄积量/生物量,

能够利用的基本信息是雷达的后向散射信息,但能利用的并非仅是单个像元的强度信息,还包含该强度影像在图像空间和极化两个方向的扩展,即纹理和极化分解特征.因此,从信息利用的角度,基于极化 SAR 数据反演森林蓄积量/生物量的研究可以划分为三类:1)利用不同极化通道的后向散射系数信息建立森林参数的估测模型<sup>[47]</sup>;2)利用局部空间上后向散射强度反映的纹理信息建立森林参数的估测模型<sup>[48]</sup>;3)利用极化分解的特征参数建立森林参数估测模型<sup>[49]</sup>.由于森林的生物量或蓄积量与上述特征信息没有直接的物理含义的联系,因此利用上述特征进行估测的反演模型主要为经验模型,最常用的是线性、非线性的统计模型,以及神经网络等机器学习模型.上述方法中,基于后向散射系数的估测模型研究相对居多,这一类估测模型除了数量最多的统计回归模型,还包括基于一定物理含义的半经验模型,例如水云模型及其演变形式<sup>[50]</sup>.另外,还有基于森林场景模拟 SAR 影像的查找表方法的正向物理模型<sup>[51]</sup>,但该方法过于复杂,实际应用的难度较大.需要注意的是,由于森林多分布在高程起伏的复杂地形区域,因此在利用极化 SAR 估测森林参数时,通常需要对 SAR 影像进行地形辐射校正处理<sup>[52]</sup>,或在统计建模时加入与局部成像几何相关的变量<sup>[53]</sup>,以消除地形引起的森林参数估测误差.这是目前极化 SAR 森林参数估测研究的一个热点,也是极化 SAR 估测大区域森林参数的一个难点.

### 1.4.2 干涉、极化干涉 SAR 森林蓄积量/生物量估测

基于干涉、极化干涉 SAR 数据进行森林蓄积量/生物量估测的方法可以分为两类:1)基于干涉 SAR 相干性特征建立经验、半经验模型的方法.该方法与基于极化 SAR 估测森林蓄积量/生物量的方法相似,主要是利用干涉相关性与森林蓄积量/生物量之间存在的负相关关系建立估测模型,经验模型即基于地面样地数据建立干涉相干性与蓄积量/生物量之间的统计回归模型或非参数化的机器学习模型<sup>[54]</sup>.此外,半经验物理模型也被用于干涉 SAR 森林蓄积量/生物量的估测,例如 Askne 等在水云模型的基础上提出的干涉水云模型<sup>[55]</sup>,是目前应用较为广泛的一种半经验森林蓄积量估测模型<sup>[56-57]</sup>.2)基于树高反演的方法.该方法是基于干涉、极化干涉 SAR 反演的森林高度结果,利用森林高度和森林蓄积量/生物量之间的异速生长方程来实现森林蓄积

量/生物量的估测<sup>[58]</sup>.由于森林高度和森林蓄积量/生物量之间存在着直接的生物学联系,因此基于树高反演的方法较一般经验模型的方法更为稳健,饱和点也相对较高.但是,目前在实际应用中也存在一些问题.首先,目前用于描述森林高度和蓄积量/生物量的异速生长关系的模型还相对较少,林业中已有的多是描述胸径和森林蓄积量/生物量的异速生长方程;其次,森林蓄积量/生物量的大小除了与森林高度有关,还与胸径、林分密度等诸多因子有关<sup>[59]</sup>.

#### 1.4.3 层析 SAR 森林蓄积量/生物量估测

层析 SAR 技术估测森林生物量/蓄积量,主要利用的是层析 SAR 获取的森林垂直结构剖面信息.目前获取层析剖面的方法主要有两种:单基线的极化干涉层析法<sup>[60]</sup>和多基线的谱分析法<sup>[61]</sup>.在层析剖面的基础上如何提取参数,进而估测森林蓄积量、生物量等参数,是层析 SAR 森林参数反演技术的研究热点.目前主要有两种方法:第 1 种方法是基于层析剖面提取剖面的几何特征参数.罗环敏等<sup>[5]</sup>将极化相干层析得到的剖面进行了参数化,得到了剖面的峰值,剖面峰的跨度、高度、幅度等多个特征参数,然后通过建立多元逐步回归方程实现了森林生物量的估测.李文梅<sup>[62]</sup>在罗环敏等<sup>[5]</sup>方法的基础上,结合极化干涉 SAR 分割方法实现了更大区域的森林生物量制图.第 2 种方法是基于层析剖面直接提取剖面不同高度上的雷达相对反射率特征,分析不同高度上的相对反射率与森林参数的相关关系,然后建立估测模型.文献<sup>[63]</sup>分析了不同高度处的层析相对反射率与森林地上生物量之间的相关性,研究结果表明利用 30 m 高的层析相对反射率能够实现较好的森林生物量反演结果.李兰等的研究发现,20 m 以下的层析相对反射率与森林生物量呈负相关关系,20 m 以上的层析反射率与森林生物量呈正相关关系,在此基础上,李兰等利用 5 m 和 25 m 高度的相对反射率进行联合估测,进一步提高了森林生物量的估测精度<sup>[64]</sup>.在层析 SAR 森林参数估测的过程中,散射机制的分离与地面散射机制的消除是一个难点,也是目前层析 SAR 森林参数反演的主要研究方向之一<sup>[65]</sup>.

## 2 总结

综上所述,SAR 在大区域遥感数据快速获取和森林参数量化反演方面具有独特优势,使其在森

林资源调查中可以发挥重要的作用.经过近 30 年的发展,SAR 森林资源监测技术已经在林地类型分类及变化检测、森林高度反演和森林蓄积量/生物量估测等方面取得了诸多的进展.然而,目前相关的技术和方法大多仍处在研究阶段,还较少在林业行业实际的森林资源调查工作进行大范围的应用和推广,主要存在以下两方面的问题:

1) 在 SAR 森林资源监测技术方面,虽然目前已发展了一系列技术方法,但还存在一定的局限性,需要进一步改进和发展.对于林地覆盖类型分类及变化检测而言,SAR 数据的斑点噪声和地形影响是大区域应用推广首先要解决的难题;对于森林参数定量反演而言,充分地认识和理解森林植被与 SAR 信号的相互作用机制,是提升模型精度和普适性的关键.因此,需要重视 SAR 森林机理模型的发展,并在此基础上充分挖掘前沿 SAR 技术森林参数反演的潜力.以层析 SAR 技术为例,目前已有的方法尚未充分利用层析 SAR 获取的三维剖面信息.

2) 目前支撑 SAR 森林资源监测技术研究和应用推广的 SAR 数据资源还相对匮乏.首先,在极化干涉 SAR、层析 SAR 技术森林应用研究方面,目前严重依赖国外共享的机载试验数据,这些 SAR 数据和对应的地面调查数据都并非原始观测数据,关键的数据预处理步骤和参数不清晰,不利于深入分析和稳健算法的研究.建议国内 SAR 载荷优势单位,加强机载 SAR 遥感综合实验组织工作,推动实验数据集的全面共享.其次,我国的星载 SAR 数据资源也相对匮乏,目前已有的高分三号 SAR 卫星远不能满足森林资源调查的需求.

总体来说,SAR 技术在森林资源监测研究中已经展现出了极强的生命力,正成为推动森林资源监测精细化、智能化发展的强大动力.近年来,我国也加大了对 SAR 卫星、航空平台、林业遥感信息产品标定与真实性检验场以及林业遥感应应用综合服务平台的投入,这将有效推动 SAR 森林资源监测技术的发展,为我国森林资源的精细化、科学化监测与管理提供有力支撑.

## 参考文献

### References

- [1] 刘茜,杨乐,柳钦火,等.森林地上生物量遥感反演方法综述[J].遥感学报,2015,19(1):62-74  
LIU Qian, YANG Le, LIU Qinhua, et al. Review of forest above ground biomass inversion methods based on remote

- sensing technology[J].Journal of Remote Sensing,2015,19(1):62-74
- [2] 李增元,陈尔学,高志海,等.中国林业遥感技术与应用发展现状及建议[J].中国科学院院刊,2013,28(增刊1):132-144  
LI Zengyuan, CHEN Erxue, GAO Zhihai, et al. Current development status and proposals for national forest remote sensing techniques and applications[J].Bulletin of the Chinese Academy of Sciences,2013,28(sup1):132-144
- [3] 李增元,车学俭,刘闽,等.ERS-1 SAR 影像森林应用研究初探[J].林业科学研究,1994,7(6):692-696  
LI Zengyuan, CHE Xuejian, LIU Min, et al. Preliminary research on the application of ERS-1 SAR in forest[J].Forest Research,1994,7(6):692-696
- [4] 白黎娜,李增元.ERS-1 SAR 图像森林类型分类专家系统研制探讨[J].遥感技术与应用,1995,10(2):69-72  
BAI Lina, LI Zengyuan. Preliminary research of expert system for forest type classification of ERS-1 SAR image[J].Remote Sensing Technology and Application,1995,10(2):69-72
- [5] 罗环敏,陈尔学,李增元,等.森林地上生物量的极化相干层析估计方法[J].遥感学报,2011,15(6):1138-1155  
LUO Huanmin, CHEN Erxue, LI Zengyuan, et al. Forest above ground biomass estimation methodology based on polarization coherence tomography[J].Journal of Remote Sensing,2011,15(6):1138-1155
- [6] Li W M, Chen E X, Li Z Y, et al. Combing polarization coherence tomography and PolInSAR segmentation for forest above ground biomass estimation[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2012:3351-3354
- [7] 吴一戎.多维度合成孔径雷达成像概念[J].雷达学报,2013,2(2):135-142  
WU Yirong. Concept of multidimensional space joint-observation SAR [J]. Journal of Radars, 2013, 2(2):135-142
- [8] 陈尔学,李增元.ENVISAT ASAR 影像地理定位方法[J].中国图象图形学报,2004,9(8):991-996  
CHEN Erxue, LI Zengyuan. Study on ENVISAT ASAR image geolocation method [J]. Journal of Image and Graphics,2004,9(8):991-996
- [9] 陈尔学,李增元.基于斜角坐标系变换的星载 SAR 直接定位算法[J].高技术通讯,2006,16(10):1082-1086  
CHEN Erxue, LI Zengyuan. The algorithm for direct geo location of space borne SAR imagery based on slant angle coordinate transformation [J]. Chinese High Technology Letters,2006,16(10):1082-1086
- [10] 陈尔学,李增元,庞勇,等.基于极化合成孔径雷达干涉测量的平均树高提取技术[J].林业科学,2007,43(4):66-70,145  
CHEN Erxue, LI Zengyuan, PANG Yong, et al. Polarimetric synthetic aperture radar interferometry based mean tree height extraction technique[J].Scientia Silvae Sinicae,2007,43(4):66-70,145
- [11] 凌飞龙,李增元,陈尔学,等.ENVISAT ASAR 的区域森林:非森林制图[J].遥感学报,2012,16(5):1100-1113  
LING Feilong, LI Zengyuan, CHEN Erxue, et al. Regional forest and non-forest mapping using Envisat ASAR data [J]. Journal of Remote Sensing, 2012, 16(5):1100-1113
- [12] 陈尔学.合成孔径雷达森林生物量估测研究进展[J].世界林业研究,1999,12(6):18-23  
CHEN Erxue. Development of forest biomass estimation using SAR data [J]. World Forestry Research, 1999, 12(6):18-23
- [13] 李增元,庞勇,陈尔学.ERS SAR 干涉测量技术用于区域尺度森林制图研究[J].地理与地理信息科学,2003,19(4):66-70  
LI Zengyuan, PANG Yong, CHEN Erxue. Regional forest mapping using ERS SAR interferometric technology [J]. Geography and Geo-Information Science, 2003, 19(4):66-70
- [14] 王馨爽,陈尔学,李增元,等.多时相双极化合成孔径雷达干涉测量土地覆盖分类方法[J].测绘学报,2015,44(5):533-540  
WANG Xinshuang, CHEN Erxue, LI Zengyuan, et al. Multi-temporal and dual-polarization interferometric SAR for land cover type classification [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(5):533-540
- [15] 王馨爽,陈尔学,李增元,等.多时相双极化 SAR 影像林地类型分类方法[J].林业科学,2014,50(3):83-91  
WANG Xinshuang, CHEN Erxue, LI Zengyuan, et al. Multi-temporal and dual-polarization SAR for forest land type classification [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2014, 50(3):83-91
- [16] Feng Q, Zhou L J, Chen E X, et al. The performance of airborne C-band PolInSAR data on forest growth stage types classification [J]. Remote Sensing, 2017, 9(9):955
- [17] 赵磊,陈尔学,李增元,等.基于均值漂移和谱图分割的极化 SAR 影像分割方法及其评价[J].武汉大学学报(信息科学版),2015,40(8):1061-1068  
ZHAO Lei, CHEN Erxue, LI Zengyuan, et al. Segmentation of PolSAR data based on mean-shift and spectral graph partitioning and its evaluation [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015, 40(8):1061-1068
- [18] 赵磊.基于谱图分割的极化 SAR 影像面向对象分类方法研究[D].北京:中国林业科学研究院,2014  
ZHAO Lei. Object-based classification of polarimetric SAR images based on spectral graph partitioning [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2014
- [19] 李兰,陈尔学,李增元,等.极化 SAR K-Wishart 分类器及其性能评价[J].武汉大学学报(信息科学版),2016,41(11):1498-1504  
LI Lan, CHEN Erxue, LI Zengyuan, et al. K-Wishart classifier for PolSAR data and its performance evaluation [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2016, 41(11):1498-1504
- [20] 徐丰,王海鹏,金亚秋.深度学习在 SAR 目标识别与地物分类中的应用[J].雷达学报,2017,6(2):136-148  
XU Feng, WANG Haipeng, JIN Yaqiu. Deep learning as

- applied in SAR target recognition and terrain classification[J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(2):136-148
- [21] 郭宇娟.深度卷积 Highway Unit 神经网络极化 SAR 地物类型分类[D].西安:西安科技大学,2018  
GUO Yujuan. Deep convolutional highway unit network for land cover type classification with GF-3 SAR imagery [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2018
- [22] 刘萌.极化 SAR 图像变化检测技术研究[D].北京:中国科学院大学,2013  
LIU Meng. Research on polarization SAR image change detection technology [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013
- [23] Guo Y J, Chen E X, Guo Y, et al. Deep highway unit network for land cover type classification with GF-3 SAR imagery [C] // *SAR in Big Data Era: Models, Methods and Applications (BIGSAR DATA)*, 2017:1-7
- [24] 冯琦,陈尔学,李文梅,等.基于 ALOS PALSAR 数据的热带森林制图技术研究[J]. *遥感技术与应用*, 2012, 27(3):436-442  
FENG Qi, CHEN Erxue, LI Wenmei, et al. Tropical forest mapping technology study using ALOS PALSAR data [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2012, 27(3):436-442
- [25] Zhao L L, Yang J, Li P X, et al. Detection of the lodged area of wheat by the use of radarsat-2 polarimetric sar imagery [C] // *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2017:4336-4369
- [26] 谷鑫志,陈尔学,李增元,等.多极化星载 SAR 森林覆盖变化检测方法[J]. *林业科学*, 2019, 55(5):74-84  
GU Xinzhi, CHEN Erxue, LI Zengyuan, et al. Forest cover change detection method using multi-polarization spaceborne SAR [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2019, 55(5):74-84
- [27] 谷鑫志.多极化星载 SAR 森林覆盖变化检测方法研究[D].北京:中国林业科学研究院,2017  
GU Xinzhi. Study of forest cover change detection methods using multi-polarization space-borne SAR [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2017
- [28] 李兰,陈尔学,李增元,等.合成孔径雷达森林树高和地上生物量估测研究进展[J]. *遥感技术与应用*, 2016, 31(4):625-633  
LI Lan, CHEN Erxue, LI Zengyuan, et al. A review on forest height and above-ground biomass estimation based on synthetic aperture radar [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2016, 31(4):625-633
- [29] 张王菲,陈尔学,李增元,等.干涉、极化干涉 SAR 技术森林高度估测算法研究进展[J]. *遥感技术与应用*, 2017, 32(6):983-997  
ZHANG Wangfei CHEN Erxue, LI Zengyuan, et al. Development of forest height estimation using InSAR/PolInSAR technology [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2017, 32(6):983-997
- [30] 庞勇,李增元,陈尔学,等.干涉雷达技术用于林分高估测[J]. *遥感学报*, 2003, 7(1):8-13  
PANG Yong, LI Zengyuan, CHEN Erxue, et al. InSAR technology and its application to estimate stand average height [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2003, 7(1):8-13
- [31] Soja M J, Ulander L M H. Digital canopy model estimation from TanDEM-X interferometry using high-resolution lidar DEM [C] // *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium-IGARSS*, 2013:165-168
- [32] 冯琦,陈尔学,李增元,等.机载 X-波段双天线 InSAR 数据森林树高估测方法. *遥感技术与应用*, 2016, 31(3):551-557  
FENG Qi, CHEN Erxue, LI Zengyuan, et al. Forest height estimation from airborne X-band single-pass InSAR data [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2016, 31(3):551-557
- [33] 范亚雄.星载 X-波段干涉 SAR 森林高度估测方法研究[D].北京:中国林业科学研究院,2019  
FAN Yaxiong. Research on Forest height estimation method for spaceborne X-band interferometric SAR [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2019
- [34] 吴一戎,洪文,王彦平.极化干涉 SAR 的研究现状与启示[J]. *电子与信息学报*, 2007, 29(5):1258-1262  
WU Yirong, HONG Wen, WANG Yanping. The current status and implications of polarimetric SAR interferometry [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(5):1258-1262
- [35] 李哲,陈尔学,王建.几种极化干涉 SAR 森林平均高反演算法的比较评价[J]. *遥感技术与应用*, 2009, 24(5):611-616  
LI Zhe, CHEN Erxue, WANG Jian. Forest height retrieval methods by polarimetric SAR interferometry and their validation against ground truth [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2009, 24(5):611-616
- [36] 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
- [37] Cloude S. *Polarisation: applications in remote sensing* [M]. Oxford: Oxford University Press, 2010
- [38] 李新武,郭华东,廖静娟,等.航天飞机极化干涉雷达数据反演地表植被参数[J]. *遥感学报*, 2002, 6(6):424-429  
LI Xinwu, GUO Huadong, LIAO Jingjuan, et al. Inversion of vegetation parameters using spaceborne polarimetric SAR interferometry [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2002, 6(6):424-429
- [39] Angiuli E, del Frate F, Della Vecchia A, et al. Inversion algorithms comparison using L-band simulated polarimetric interferometric data for forest parameters estimation [C] // *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2007:2477-2480
- [40] 朱建军,解清华,左廷英,等.复数域最小二乘平差及其在 PolInSAR 植被高反演中的应用[J]. *测绘学报*, 2014, 43(1):45-51, 59  
ZHU Jianjun, XIE Qinghua, ZUO Tingying, et al. Criterion of complex least squares adjustment and its application in tree height inversion with PolInSAR data [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014, 43(1):45-51, 59
- [41] Neumann M, Ferro-Famil L, Reigber A. Estimation of forest structure, ground, and canopy layer characteristics from multibaseline polarimetric interferometric SAR data

- [J].IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2010,48(3):1086-1104
- [42] Lu H X,Bao Z,Guo R,et al.S-RVoG model for forest parameters inversion over underlying topography[J].Electronics Letters,2013,49(9):618-620
- [43] Liang L,Guo H D,Li X W.Three-dimensional structural parameter inversion of buildings by distributed compressive sensing-based polarimetric SAR tomography using a small number of baselines[J].IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing,2014,7(10):4218-4230
- [44] 李兰.森林垂直信息 P-波段 SAR 层析提取方法[D].北京:中国林业科学研究院,2016  
LI Lan.Forest vertical information extraction based on P-band SAR tomography[D].Beijing:Chinese Academy of Forestry,2016
- [45] Tebaldini S,Rocca F.Multibaseline polarimetric SAR tomography of a boreal forest at P-and L-bands[J].IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2012,50(1):232-246
- [46] 梁雷.基于压缩感知的极化层析 SAR 建筑物与树林三维结构参数反演研究[D].北京:中国科学院大学,2015  
LIANG Lei.Inversion of Three-dimensional structural parameters of buildings and forests based on compressed sensing SAR[D].Beijing:University of Chinese Academy of Sciences,2015
- [47] Le Toan T,Beaudoin A,Riom J,et al.Relating forest biomass to SAR data[J].IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,1992,30(2):403-411
- [48] Amini J,Sumantyo J T S.Employing a method on SAR and optical images for forest biomass estimation[J].IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2009,47(12):4020-4026
- [49] Zhang Z Y,Wang Y,Sun G Q,et al.Biomass retrieval based on polarimetric target decomposition[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium,2011:1942-1945
- [50] 梁志锋,凌飞龙,汪小钦.L 波段 SAR 与中国东北森林蓄积量的相关性分析[J].遥感技术与应用,2013,28(5):871-878  
LIANG Zhifeng,LING Feilong,WANG Xiaoqin.Correlation analysis between L-band SAR and forest stem volume in Northeast China[J].Remote Sensing Technology and Application,2013,28(5):871-878
- [51] Ni W J,Sun G Q,Guo Z F,et al.Retrieval of forest biomass from ALOS PALSAR data using a lookup table method[J].IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing,2013,6(2):875-886
- [52] 赵磊.多维度 SAR 数据地形校正及森林地上生物量估测研究[D].北京:中国林业科学研究院,2017  
ZHAO Lei.Terrain correction methods for multi-dimensional SAR data applied to forest above ground biomass estimation[D].Beijing:Chinese Academy of Forestry,2017
- [53] 冯琦,陈尔学,李增元,等.基于机载 P-波段全极化 SAR 数据的复杂地形森林地上生物量估测方法[J].林业科学,2016,52(3):10-22  
FENG Qi,CHEN Erxue,LI Zengyuan,et al.Forest above-ground biomass estimation method for rugged terrain based on airborne P-band PolSAR data[J].Scientia Silvae Sinicae,2016,52(3):10-22
- [54] Fransson J E S,Smith G,Askne J,et al.Stem volume estimation in boreal forests using ERS-1/2 coherence and SPOT XS optical data[J].International Journal of Remote Sensing,2001,22(14):2777-2791
- [55] Askne J I H,Dammert P B G,Ulander L M H,et al.C-band repeat-pass interferometric SAR observations of the forest[J].IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,1997,35(1):25-35
- [56] Cartus O,Santoro M,Schmullius C,et al.Large area forest stem volume mapping in the boreal zone using synergy of ERS-1/2 tandem coherence and MODIS vegetation continuous fields[J].Remote Sensing of Environment,2011,115(3):931-943
- [57] 戴玉芳,凌飞龙.水云模型于 L 波段 SAR 和中国北方森林的适用性分析[J].遥感信息,2013,28(4):44-49  
DAI Yufang,LING Feilong.Suitability analysis of water cloud model for L band synthetic aperture radar to forest in northeast China[J].Remote Sensing Information,2013,28(4):44-49
- [58] Balzer H,Rowland C,Saich P.Forest canopy height and carbon estimation at Monks Wood National Nature Reserve,UK,using dual-wavelength SAR interferometry[J].Remote Sensing of Environment,2007,108(3):224-239
- [59] 李春萍,李刚,肖春旺.异速生长关系在陆地生态系统生物量估测中的应用[J].世界科技研究与发展,2007,29(2):51-57  
LI Chunping,LI Gang,XIAO Chunwang.The application of allometric relationships in biomass estimation in terrestrial ecosystems[J].World Sci-Tech R & D,2007,29(2):51-57
- [60] Cloude S R.Dual-baseline coherence tomography[J].IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters,2007,4(1):127-131
- [61] 李文梅,陈尔学,李增元,等.频谱分析技术在层析 SAR 森林垂直结构信息提取中的应用性能分析[J].电子学报,2015,43(4):694-699  
LI Wenmei,CHEN Erxue,LI Zengyuan,et al.Application performance analysis of spectral analysis techniques in forest vertical structure information extraction using tomographic SAR[J].Acta Electronica Sinica,2015,43(4):694-699
- [62] 李文梅.极化干涉 SAR 层析估测森林垂直结构参数方法研究[D].北京:中国林业科学研究院,2013  
LI Wenmei.Forest vertical structure parameters estimation using polarimetric interferometric tomographic SAR[D].Beijing:Chinese Academy of Forestry,2013
- [63] Ho Tong Minh D,Toan T L,Rocca F,et al.Relating P-band synthetic aperture radar tomography to tropical forest biomass[J].IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2014,52(2):967-979
- [64] 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



LI Lan, CHEN Erxue, LI Zengyuan, et al. Forest above-ground biomass estimation based on multi-baseline InSAR tomography [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2017, 53 (11): 85-93

[65] D'Alessandro M M, Tebaldini S, Quegan S, et al. Interfero-

metric ground notching of SAR images for estimating forest above ground biomass [C] // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2018: 8797-8800

## A survey of developments on forest resources monitoring technology of synthetic aperture radar

LI Zengyuan<sup>1</sup> ZHAO Lei<sup>1</sup> LI Kun<sup>2</sup> CHEN Erxue<sup>1</sup> WAN Xiangxing<sup>1</sup> XU Kunpeng<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Forest Resources Information Technique, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091

<sup>2</sup> Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094

**Abstract** Synthetic Aperture Radar (SAR) technology has unique advantages in forest resource monitoring due to its all-day, all-weather imaging capability and sensitivity to vertical forest structure information. Therefore, SAR has become a research focus of current forest resources remote sensing survey technology. Firstly, the development background, development trajectory and related knowledge of SAR forest resources monitoring technology are introduced. Then, the technological developments of polarimetric SAR, interferometric SAR, polarimetric SAR interferometry and tomographic SAR in research of forest land cover type classification, change detection and forest parameter quantification estimation are emphasized. Finally, the existing problems and development trends for forest resource monitoring research and application of SAR are summarized and analyzed.

**Key words** synthetic aperture radar (SAR); polarimetric SAR; interferometric SAR; tomographic SAR; forest resources monitoring