



InSAR 林下地形测绘方法与研究进展

朱建军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:传统光学遥感技术手段在森林覆盖区难以准确获取林下地形,原因在于其只能测量森林冠层顶部高程。微波信号能够穿透森林冠层并记录森林垂直结构信息,为解决林下地形测绘难题带来了契机,如何准确获取林下地形已成为微波遥感领域的研究热点。首先介绍了面向林下地形测绘的合成孔径雷达(synthetic aperture radar,SAR)干涉测高原理及数据获取手段。然后对利用 SAR 进行林下地形测绘的方法进行了分类,主要包括基于合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)、极化合成孔径雷达干涉测量(polarimetric InSAR, PolInSAR)及基于多基线 InSAR/PolInSAR 数据的层析 SAR(tomographic SAR, TomoSAR)技术的林下地形测绘方法,并介绍了上述 3 种方法的应用进展。最后在此基础上,从数据获取、误差改正及散射模型构建 3 个角度分析了林下地形测绘所面临的问题。

关键词:林下地形;微波遥感;干涉 SAR;极化干涉 SAR;层析 SAR

中图分类号:P237

文献标志码:A

高精度数字高程模型(digital elevation model, DEM)是国家重要的战略信息资源,是国家经济建设、社会发展和国防安全必不可少的基础图件。然而,在植被覆盖区,传统航测及光学遥感手段只能获取植被层表面高程信息,无法测绘“裸地”真实形状。真实地形往往需要通过人工实地调绘估计平均植被高,从光学手段获得的地形数据中扣除,这样的测图手段在植被覆盖区精度差、效率低,难以真实表达林下地形信息。因此,如何准确获得森林高度并将其从遥感或航测手段获得的高程中扣除,或直接得到不包含植被高的真实地形高程,对获取大范围高精度 DEM 极为重要。

合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)因其大范围、高分辨率、高精度、全天候监测的特点已被列为局部及全球尺度地形测绘的有效技术途径之一^[1-3]。此外,与传统光学遥感只能进行“表面监测”不同, InSAR 采用微波频段工作模式,在森林覆盖区具备穿透植被层并记录植被垂直结构、物理属性信息的能力,为森林高度反演及林下地形测绘提供了可能^[4]。但是,传统 InSAR 技术在森林区测量的地形高度位于森林冠层顶部与地表之间,获取

的 DEM 产品中包含森林信号,仍未实现真实林下地形测绘。其根本原因在于传统 InSAR 技术受观测信息不足的限制,无法区分同一分辩单元内不同散射体及其垂直分布,无法分离森林覆盖区冠层及地表回波信号^[4]。

为了解决上述难题,研究人员提出通过增加先验信息或观测量信息使得传统 InSAR 技术具备区分植被冠层及地表回波信号的能力。基于以上策略,发展了多种林下地形反演方法,主要可以归为 3 类。①基于 InSAR 技术的反演方法,主要包括基于相干散射模型的反演方法^[5-6]、森林高扣除法^[7-8]、时-频分析方法(time-frequency analysis, TFA)^[9-10];②基于极化 InSAR (polarimetric InSAR, PolInSAR)技术的林下地形反演方法,主要包括基于相干最优理论的相位分离法^[4,11-13]、基于相干散射模型的反演方法^[14-15]、基于相干散射矩阵的散射机理分解方法^[16-17] SAR;③基于多基线 InSAR/PolInSAR 数据的层析 SAR (tomographic SAR, TomoSAR)技术林下地形反演方法^[18]。

本文旨在通过分析上述基于 InSAR 技术的林下地形反演方法及其研究现状,使读者能够对林下地形测绘进行系统性了解。

1 面向林下地形测绘的 InSAR 测高技术与现状

1.1 InSAR 测高原理及发展现状

InSAR 技术集 SAR 技术与干涉测量技术于一体。SAR 是一种主动式微波遥感,单景 SAR 影像记录了 SAR 回波信号的强度信息及相位信息。微波信号为极化波,其散射过程具有对散射目标的几何信息(如形状、大小、空间排布规律)及物理属性信息(如介电常数)敏感的特点,这些信息对散射过程的影响综合表现为 SAR 影像的强

度及相位信息^[15]。当相同 SAR 传感器对同一目标以不同入射角进行观测时,对获取的两景 SAR 影像进行干涉处理即可用于获取地表高程信息,如图 1(a)所示。图 1 中 H 为 SAR 平台高度, R 为 SAR 传感器到地表目标点 P 之间的距离,称为斜距; h 为目标点 P 的高程; B 为基线; θ 为入射角; α 为基线倾角; S 表示获取的 SAR 影像。通过引入干涉测量技术,微波信号具备测高能力,但是受观测信息不足的限制,InSAR 只能测量同一分辨单元内多个散射体的综合高度,无法捕捉不同散射体垂直向分布规律。

为了解决该问题,需引入外部先验信息加以

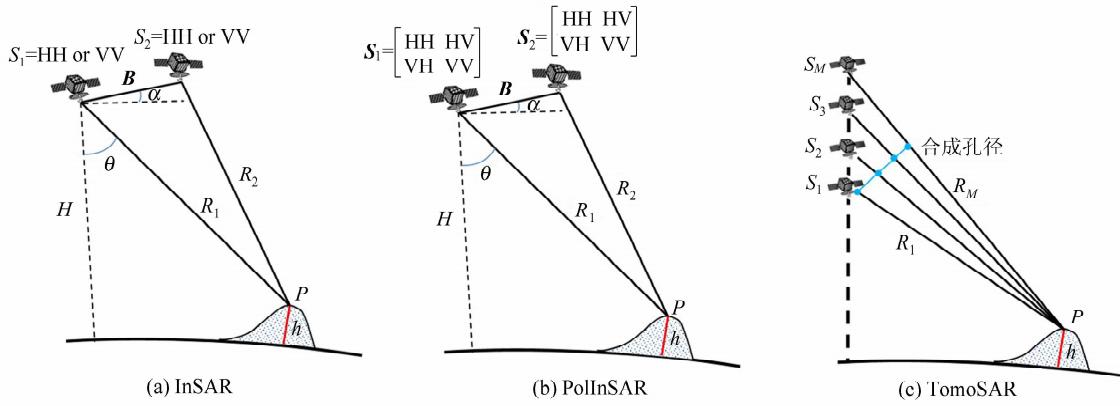


图 1 InSAR 测高原理示意图

Fig. 1 Schematic Representation of InSAR Height Estimation

约束或增加观测信息。鉴于此,学者们提出在 InSAR 测高技术基础之上引入极化测量技术,即 PolInSAR^[4]。从数据获取角度来看(图 1(b)),PolInSAR 将传统单极化 InSAR 工作模式(HH 或 VV)扩展为多极化 InSAR 工作模式(HH, HV, VV, VH),增加了观测信息。此外,不同极化方式的微波信号对散射目标的几何信息及物理属性信息具有不同的敏感程度,具备区分同一分辨单元内不同散射体的能力。以上特点使得 PolInSAR 为区分同一分辨单元内不同散射体及其垂直分布提供了可能。

除了通过变换极化方式使传统 InSAR 技术具有分辨同一分辨单元内不同散射体的能力之外,TomoSAR 技术通过增加基线数量扩充观测空间(图 1(c)),结合 InSAR 测高原理与谱估计技术,实现了 LOS(line of sight)法向合成孔径,将传统二维成像扩展为三维成像,具备测量同一分辨单元内不同散射体的能力^[18]。

1.2 面向林下地形测绘的 SAR 系统发展现状

文献[19]较为全面系统地总结了星载 SAR 系统的发展历史,可知总体上现有星载 SAR 系统

特点为多波段、多极化、高时空分辨率。但是,森林几何形态特征及物理属性具有高时变性,要在森林区开展 InSAR 测量要求星载系统重返周期需足够短,以抵抗时间去相干对干涉质量的影响。对于地形测绘而言,最理想的数据获取模式为“零”时间基线。为此,2000 年,美国实施 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)计划,利用航天飞机搭载双天线 SAR 传感器,获取了覆盖全球 80% 面积的 30 m 及 90 m 分辨率 DEM^[2]。之后,德国分别于 2007 年、2010 年先后发射了 TerraSAR-X 及 TanDEM-X 姐妹星组成立式协同工作模式,获取了全球 12 m 分辨率的 DEM^[3]。尽管上述两种 DEM 产品仍然包含植被高信号,制约了某些应用,但是作为全球地形基础数据,在众多领域发挥了无法替代的作用。

相比于星载系统,机载系统由于研制成本低、调度灵活等优点已被广泛用于星载系统的仿真实验。表 1 为现有主要机载系统及其参数,利用这些机载系统在森林覆盖区开展了广泛研究。通过对植被覆盖区参数反演的研究,研究人员意识到 L、P 波段的 SAR 信号由于强穿透能力,可采集更

为丰富的植被垂直结构信息及林下地形信息,在森林参数反演方面比短波长更具优势。鉴于此,欧空局规划在2020年发射P波段BIOMASS卫星^[20],德国航天局预计在2022年发射L波段Tandem-L卫星^[21]。这两个卫星均将林下地形测绘纳为主要监测任务之一。

表1 现有机载SAR系统及参数

Tab.1 The Airborne SAR Systems and Their Parameters

SAR传感器	国家	开始年限	波段	极化方式
AIRsar	美国	1988	P/L/C	多极化
EMISAR	丹麦	1995	X/L	多极化
CCRS-SAR	加拿大	1995	C	全极化
E-SAR	德国	1996	X/C/L/P	多极化
PI-SAR	日本	1996	X/L	多极化
GEO-SAR	美国	1999	X/P	多极化
RAMSES-SAR	法国	2004	W-P8种波段	多极化
F-SAR	德国	2007	X/C/L/P	多极化
UAV-SAR	美国	2007	L	全极化
PI-SAR2	日本	2008	X	全极化
CASM-SAR	中国	2009	X/P	多极化
CET38-SAR	中国	2009	X/P	多极化
SETHI-SAR	法国	2009	X/C/L/P	多极化

2 InSAR林下地形测绘方法与进展

2.1 基于InSAR技术的林下地形测绘方法

1)森林高扣除法。该方法核心思想为借助外部手段估计森林高度,并将其从InSAR反演的DEM中扣除^[7-8]。该方法存在的主要问题为:
①如何快速、大范围、高精度获取森林高度;
②由于InSAR DEM采用微波信号获取,在植被覆盖区具有一定的穿透深度,该穿透深度在空间上受森林密度、含水量及地形等方面的影响呈现显著差异,增加了树高扣除法的不确定性。

2)TFA方法。TFA方法主要原理为通过子孔径分解技术,获取具有不同方位向入射角的子视图像^[9-10]。微波信号对散射目标的大小、形状及空间排布规律等几何信息敏感。由于森林目标的密度分布呈现各向异性,当SAR传感器从不同角度观测同一森林场景时,由于密度的差异导致不同视角条件下的后向散射信息存在差异,从而导致不同子视图像具有不同的相位中心。甄选含有最强地表散射贡献的子视回波信号,并认为其相位中心位于地表,进而实现林下地形估计。该方法无需借助任何外部数据、先验信息及散射模型即可实现林下地形反演。但是该方法精度受限于微波信号在森林区的穿透深度,只适用于P波段数据且稀疏森林覆盖条件下的林下地形反演。

3)基于相干散射模型反演的方法。该方法的主要思路为建立InSAR观测量、微波散射过程及森林生物物理参数之间的关联。为此,将森林覆盖场景抽象概括为植被层及地表层两层,其中植被层由各向同性随机分布的散射粒子构成,该模型被称为随机地体二层散射模型(random volume over ground, RVoG)^[5-6]。但是,由于InSAR数据无法提供足够的观测量用于该模型求解,需通过其他手段获取部分模型参数作为已知量。实际应用中,高分辨率、高精度先验信息的难以获取极大限制了该方法的适用范围。

2.2 基于PolInSAR技术的林下地形测绘方法

1)基于相干最优理论的相位分离法。不同极化方式的微波信号对散射目标的几何信息及物理属性信息具有不同的敏感程度,如HV极化微波信号对植被冠层散射敏感,而HH极化微波信号对地表散射回波信号敏感。根本原因在于不同极化方式的微波信号对应不同的散射机理。基于此,在极化域内,可以甄选对地表散射(表面散射、二面角散射等)最为敏感的极化方式,认为其相位中心位于地表,实现林下地形估计^[4, 11-13]。该方法没有考虑森林生物物理参数与PolInSAR观测量之间的关联,可靠性受限于微波信号的穿透深度。当微波具有较小穿透深度时,该方法无法探测到真实地表散射信息。

2)基于极化相干散射模型反演方法。在单极化InSAR模式下,由于观测信息不足,无法对RVoG模型进行直接解算。在PolInSAR测量模式建立之后,文献[14]首次将RVoG模型引入PolInSAR测量,建立了森林生物物理参数与PolInSAR观测量之间的关联,无需借助任何外部数据,实现了林下地形、森林高度等参数的反演。至此,基于PolInSAR数据的森林参数反演得到国内外研究者的广泛关注与研究。

然而,随着研究的深入,研究人员意识到该反演方法的关键在于RVoG模型能否准确表达微波信号与森林场景的相互作用过程。为此,提出一系列改进模型。如RVoG+VTD(volume temporal decorrelation)用于考虑介电常数变化、风动引起时间去相干对植被冠层干涉信号的影响^[22-23];RMoG(random motion over ground)模型用于考虑风动对植被冠层、地表层干涉信号的影响^[24-25];S-RVoG(slope-RVoG)用于考虑地形坡度对微波信号在植被层穿透深度的影响^[26-28];三层RVoG模型^[17]、高斯后向散射模型^[29-30]及可

变消光系数模型^[29,31]用于考虑植被垂直结构不均匀造成的影响;双站干涉模式下的 RVoG 模型用于考虑表面散射与二面角散射相位中心不一致的问题^[32]。通过上述改进模型,显著提升了经典 RVoG 模型应对复杂森林场景的能力。

在解算方法方面,文献[14]将 RVoG 模型参数解算概括为六维非线性方程求解问题;之后,文献[33]针对非线性求解中初值难以确定,容易陷入局部最优等问题提出了三阶段反演方法,该方法直观、简单、稳健,提出后得到广泛关注。尽管三阶段算法大大降低了 RVoG 模型的解算难度,但是该方法只适用于单基线 PolInSAR 数据,无法扩展到多基线数据进行联合解算,即便存在多基线数据时,也只是对每条基线数据反演结果进行简单加权平均^[34-37]。针对该问题,文献[38-39]分别提出了多基线非线性迭代算法及复数平差法。这些方法不仅通过不同几何条件下观测数据的约束关系提升了参数求解的稳健性,而且能够充分利用多余观测信息考虑更为复杂、更能表征森林散射特征的散射模型。

综上所述,基于极化相干散射模型的反演方法已成为研究人员研究林下地形及森林高度提取的关注焦点。但仍存在一些问题需要考虑。首先,同频率 SAR 信号视野下,散射体几何属性存在显著差异,如 X 波段视野下散射体主要为小枝叶,而 P 波段视野下散射体为大型枝干。这种条件下,散射体空间排布规律存在显著差异,RVoG 模型与森林场景散射过程匹配程度发生变化,导致反演结果存在较大偏差、甚至失败。其次,森林几何形态特征、物理属性具有显著的时变性,现有时间去相干模型尚不能准确刻画外界因子对微波散射过程的影响,时间去相干仍是森林参数反演的主要误差源之一。

3) 基于极化相干散射矩阵的散射机理分解方法。该方法思想来源于 Freeman 三分量分解,假定微波信号与森林场景作用过程中主要发生表面散射(地表)、二面角散射(树干-地表)及体散射(冠层)^[16]3 种散射机制。在此基础之上,建立 3 种散射机理的数学表达模型,求取不同散射机理的相位中心。之后,文献[17]以类似思想构建了基于 Neumann 极化分解模型的反演框架,与前一种分解方法相比,该方法通过有效结合极化散射分解与相干散射模型,建立了极化相干矩阵与生物物理参数之间的关联。该方法提出后,由于模型解算复杂程度高,并没有得到广泛应用。但是,该反演框架为全面考虑森林场景异质性,建立

更为精准的散射模型提供了思路,该问题还有待深入研究。

2.3 基于 TomoSAR 技术的林下地形测绘方法

文献[18]首次用机载 L 波段数据对森林区进行了三维成像。但是由于采用传统的 FFT (fast Fourier transformation) 成像方法,垂直向分辨率较低。因此,后续大量研究工作主要关注层析谱估计方法,一系列超分辨率算法相继提出,主要归为非参数化频谱估计法(包括 Beamforming、Capon、SVD(singular value decomposition) 等)、参数化频谱估计方法(包括 MUSIC(multiple signal classification algorithm)、WSF(weighed subspace fitting)、NLS (non-linear least squares) 等) 及压缩感知成像方法^[40-43] 3 类。这些研究工作重点关注如何提升高度向分辨率,尚未对 TomoSAR 林下地形反演性能进行综合评价。此外,这些方法通常假定散射体为点目标,但在森林区,散射目标为分布式目标,导致这些方法估计的层析谱不够理想。为了解决该问题,文献[44]提出基于 COMET(covariance matching estimation technique) 的 TomoSAR 方法,该方法可适用于多基线 InSAR/PolInSAR 数据,对散射体空间几何特性及散射噪声水平均有良好的容忍度。之后,研究人员发现,单纯估计不同高度位置的后向散射强度信息不足以支撑深入分析不同高度位置的散射机理与回波信号之间的关联。针对该问题,文献[45-46]提出采用 SKP(sum of Kronecker product) 分解技术对多基线 PolInSAR 数据的极化矩阵及结构矩阵进行分离,并通过代数合成方法提取体散射及地面散射信息。通过结合极化信息,使得传统 TomoSAR 不仅能反映不同高度的后向散射强度信息,而且能提供散射机理信息,为精细化分析植被垂直结构与微波信号作用过程提供重要技术支撑。

3 InSAR 林下地形测绘应用与进展

3.1 基于 InSAR 技术的林下地形测绘

文献[5]首次利用 C 波段机载 InSAR 数据结合相干散射模型实现了林下地形提取,反演精度为 6.5 m。文献[8]利用 ICESat (ice, cloud and land elevation satellite)/MODIS(moderate-resolution imaging spectroradiometer) 联合估计的全球植被高(空间分辨率 1 km)剔除 C 波段 SRTM DEM(空间分辨率 90 m) 中包含的森林高信号,修正后的森林区 SRTM DEM 精度由 14.0 m 提

高到 6.0 m。文献[10]利用 P 波段机载 InSAR 数据采用 TFA 法提取了稀疏针叶林覆盖区林下地形,林下地形精度为 2.0 m。

3.2 基于 PolInSAR 技术的林下地形测绘

尽管 PolInSAR 技术提出后已广泛用于森林高度提取,但是林下地表干涉相位只作为中间过程参数并没有深入展开应用研究。文献[4]利用 SIR-C/X-SAR L 波段 PolInSAR 数据,采用相干最优相位分离法进行森林区 DEM 反演,与传统 InSAR DEM 相比,精度由 12.9 m 提高到 7.8 m。文献[47]利用 L 波段 PolInSAR 数据结合相干散射模型进行针叶林区林下地形反演,反演结果与 LiDAR 结果相比偏差均值为 2~3 m,并发现夏季与冬季反演的林下地形精度有差异,冬季结果精度更高。文献[35]利用 L、P 波段机载多基线 PolInSAR 针叶林区数据结合相干散射模型进行林下地形反演,结果表明,与 LiDAR DEM 相比,L 波段误差主要分布在 -10~10 m,P 波段误差主要分布在 -7~7 m,由于 P 波段具有强穿透性,更利于林下地形反演。文献[39]利用 L、P 波段机载多基线 PolInSAR 复数平差法对针叶林区进行林下地形反演,结果表明,与 LiDAR DEM 相比,L 波段 DEM 误差为 3.5 m,P 波段 DEM 误差为 3.2 m。基于极化相干散射矩阵的散射机理分解方法虽具备提取林下地形的能力,尚未见相关文献对其在林下地形反演做定量评价。

3.3 基于 TomoSAR 技术的林下地形测绘

文献[44]采用 9 景机载 P 波段数据结合 COMET 成像方法对针叶林覆盖区(平地)进行林下地形提取,与 LiDAR DEM 相比,反演精度为 0.9 m。文献[43]采用 11 景 P 波段、16 景 L 波段机载数据结合 TDBP(time-domain back-projection)成像方法对针叶林覆盖区(平地)进行林下地形提取,与 LiDAR 相比,L 波段 DEM 反演精度为 1.37 m,P 波段 DEM 精度为 0.83 m。文献[48]采用 6 景机载 L 波段数据结合 M-RELAX 成像方法对针叶林覆盖区(丘陵)进行林下地形提取,与 LiDAR 相比,反演的 DEM 精度为 2.0 m。文献[40]采用 6 景机载 P 波段数据结合 SKP 成像方法对热带雨林区(丘陵)进行林下地形提取,与 LiDAR 相比,反演精度为 2.41 m。

3.4 综合分析

总体上,目前林下地形反演还处于方法测试阶段。实验主要采用在相对平坦地形条件下获取的机载数据。从已有研究成果可以看出,3 种技术反演的林下地形精度与地形条件、森林属性及

数据属性有关。此外,在林下地形反演精度方面,TomoSAR 技术最优,InSAR 技术最差,PolInSAR 技术折中。但是,TomoSAR 技术要求在短时间内获取同一地区的大量影像,且对影像基线空间分布要求严格,致使该技术难以应对大范围的林下地形测绘,但可用于局部区域精细化监测。基于树高扣除法的 InSAR 技术反演林下地形方法只需要少量 SAR 数据,适用于大范围林下地形测绘,但是该方法受制于树高产品的精度。从现有遥感技术来看,微波遥感是获取大范围、高精度树高产品的最优候选技术之一,但是树高与林下地形对于微波遥感来说是同源问题。基于相干散射模型的 InSAR 技术反演林下地形受观测信息不足的限制,已被基于相干散射模型的 PolInSAR 技术取代。尽管同等分辨率条件下,SAR 传感器需要牺牲一半的覆盖幅宽来采集全极化数据,但是 PolInSAR 无需先验信息、无需大量数据的特点已被德国宇航局 Tandem-L 计划选为绘制全球林下地形的基本方法。然而,基于 PolInSAR 技术的林下地形反演精度还有很大提升空间。

4 InSAR 林下地形测绘面临的挑战

4.1 传感器平台时空基线设计

目前,在轨运行卫星除了 TerraSAR-X/Tandem-X 星座在全球局部区域开展了森林参数反演飞行计划外,其他卫星受时空基线、波段的限制,尚不具备开展林下地形测绘的功能^[49]。尽管规划卫星 Tandem-L 及 BIOMASS 卫星在抗时间去相干、强穿透能力方面填补了现有卫星无法应对林下地形测绘的缺陷,但是,时空基线的优化仍是获取高精度林下地形产品关键技术之一。森林形态特征、生物物理属性在时间上呈现显著动态性,倘若卫星平台时间基线不能很好考虑森林的动态性,其引起的干涉失相关误差将成为林下地形反演的重要误差源。此外,文献[50]系统讨论了空间基线对森林高度反演的影响及优化方案,其优化原则为权衡干涉信号对冠层体散射的敏感度及高相干性,干涉基线可变范围有限。但是,对于林下地形反演而言,长基线干涉系统对地形起伏具有更高敏感度,利于高精度地形测绘。因此,如何优化面向林下地形测绘的基线几何值得探索。

4.2 轨道误差与大气延迟改正

轨道误差、大气延迟是制约高精度地形测绘

的重要因素。尽管 Tandem-L 采用双站模式获取的干涉对不受大气延迟的影响,但是,当需要选择多基线模式增强测高能力时,还是要处理不同时刻获取的 SAR 影像,此时,仍需考虑大气延迟误差。文献[19]已详细论述了解决这两类误差策略及所面临的挑战。此外,地形测绘中处理对象往往为小数据集,传统相位定标技术及时空滤波分析难以适用^[51-52]。鉴于此,如何利用不同极化方式干涉图之间的自洽关系实现轨道误差与大气延迟改正值得深入研究。

4.3 散射机理解译及建模

目前,森林生物物理参数与微波信号散射机理之间的关联尚未清晰。散射机理解译的精细化程度及准确建模是基于相干散射模型反演策略的基础,同时也是建立层析谱与生物物理参数之间关联的重要理论支撑。因此,如何揭示生物物理参数与散射机理之间的关系,是保证复杂森林覆盖及地形条件下准确获取林下地形的关键。

5 结语

传统遥感技术获取的包含树高信号的 DEM 已不能满足众多研究领域对林下地形的迫切需求。鉴于此,研究人员根据微波信号在植被区具备穿透监测的特点并结合干涉测高原理,发展了基于 InSAR、PolInSAR 及 TomoSAR 技术的林下地形测高理论与方法。但受外部先验信息不可靠、散射机理理论体系不完备、传感器平台参数不合理、误差控制体系不完善等因素限制,致使林下地形测绘还处于理论与方法研究探索阶段。随着传感器平台的不断升级及相应数据处理理论的不断提升,林下地形提取未来将成为地形测绘领域的重点研究方向之一。

参 考 文 献

- [1] Zebker H A, Goldestein R M. Topographic Mapping from Interferometric Synthetic Aperture Radar Observations [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1986, 91(B5):4 996-4 999
- [2] Rabus B, Eineder M, Roth A, et al. The Shuttle Radar Topography Mission: A New Class of Digital Elevation Models Acquired by Spaceborne Radar [J]. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2003, 57(4):241-262
- [3] Rossi C, Gonzalez F R, Fritz T, et al. TanDEM-X Calibrated Raw DEM Generation [J]. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2012, 73(9):12-20
- [4] Cloude S R, Papathanassiou K P. Polarimetric SAR Interferometry [J]. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 1998, 36(5):1 551-1 565
- [5] Treuhaft R N, Madsen S N, Moghaddam M, et al. Vegetation Characteristics and Underlying Topography from Interferometric Radar[J]. *Radio Science*, 1996, 31(6):1 449-1 485
- [6] Treuhaft R N, Siqueira P. Vertical Structure of Vegetated Land Surfaces from Interferometric and Polarimetric Radar [J]. *Radio Science*, 2000, 35(1):141-178
- [7] Baugh C A, Bates P D, Schumann G, et al. SRTM Vegetation Removal and Hydrodynamic Modeling Accuracy [J]. *Water Resources Research*, 2013, 49:5 276-5 289
- [8] O'Loughlin F E, Paiva P C D, Durand M, et al. A Multi-sensor Approach Towards a Global Vegetation Corrected SRTM DEM Product [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 182:49-59
- [9] Garestier F, Dubois-Fernandez P, Champion I. Forest Height Inversion Using High-Resolution P-Band PolInSAR Data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(11):3 544-3 559
- [10] Fu H Q, Zhu J J, Wang C C, et al. Underlying Topography Estimation over Forest Areas Using High-Resolution P-Band Single-Baseline PolInSAR Data [J]. *Remote Sensing*, 2017 363(9):1-17
- [11] Li X W, Guo H D, Wang C L, et al. DEM Generation in the Densely Vegetated Area of Hotan, North-west China Using SIR-C Repeat Pass Polarimetric SAR Interferometry [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(14):2 997-3 003
- [12] Hua Fenfen, Zhao Zheng, Wang Mengmeng, et al. A Global Optimal Coherence Method for Multi-baseline InSAR Elevation Inversion [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(11):1 263-1 270 (花奋斗, 赵争, 王萌萌, 等. 面向多基线干涉 SAR 高程反演的全局最优相干方法 [J]. 测绘学报, 2015, 44(11):1 263-1 270)
- [13] Lopez-Martinez C, Papathanassiou K. Cancellation of Scattering Mechanisms in PolInSAR: Application to Underlying Topography Estimation [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*,

- 2013, 51(2): 953-965
- [14] Papathanassiou K P, Cloude S R. Single-Baseline Polarimetric SAR Interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(11): 2352-2363
- [15] Cloude S R. Polarisation: Applications in Remote Sensing[M]. London: Oxford University Press, 2009
- [16] Ballester-Berman J, Lopez-Sanchez J. Applying the Freeman-Durden Decomposition Concept to Polarimetric SAR Interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(1): 466-479
- [17] Neumann M, Ferro-Famil L, Reigber A. Estimation of Forest Structure, Ground and Canopy Layer Characteristics from Multi-baseline Polarimetric Interferometric SAR Data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(3): 1086-1104
- [18] Reigber A, Moreira A. First Demonstration of Airborne SAR Tomography Using Multibaseline L-Band Data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(5): 2142-2152
- [19] Zhu Jianjun, Li Zhiwei, Hu Jun. Research Progress and Methods of InSAR for Deformation Monitoring [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1717-1733(朱建军, 李志伟, 胡俊. InSAR 变形监测方法与进展[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1717-1733)
- [20] Toan T L, 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
- [21] DLR. Tandem-L: Satellite Mission Proposal for Monitoring Dynamic Processes on the Earth's Surface[OL]. http://www.dlr.de/hr/en/Portaldata/32/Resources/dokumente/broschueren/Tandem-L_web_Broschuere2014_en.pdf, 2014
- [22] Papathanassiou K P, Cloude S R. The Effect of Temporal Decorrelation on the Inversion of Forest Parameters from PolInSAR Data [C]. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Monterey, USA, 2003
- [23] 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
- [24] Lavalle M, Simard M, Hensley S. A Temporal Decorrelation Model for Polarimetric Radar Interferometers[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(7): 2880-2888
- [25] Lavalle M, Hensley S. Extraction of Structural and Dynamic Properties of Forests from Polarimetric-Interferometric SAR Data Affected by Temporal Decorrelation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(9): 4752-4767
- [26] Lu Hongxi, Suo Zhiyong, Guo Rui, et al. S-RVOG Model for Forest Parameters Inversion over Underlying Topography[J]. *Electronics Letters*, 2013, 49(9): 618-620
- [27] Xie Qinghua, Wang Changcheng, Zhu Jianjun, et al. Forest Height Inversion by Combining S-RVOG Model with Terrain Factor and PD Coherence Optimization [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(6): 686-693(解清华, 汪长城, 朱建军, 等. 顾及地形坡度的 S-RVOG 模型和 PD 相干最优算法联合反演森林高度[J]. 测绘学报, 2015, 44(6): 686-693)
- [28] Xie Q H, Zhu J J, Wang C C, et al. A Modified Dual-Baseline PolInSAR Method for Forest Height Estimation[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9: 819
- [29] 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
- [30] Fu H Q, Wang C C, Zhu J J, et al. Estimation of Pine Forest Height and Underlying DEM Using Multi-baseline P-Band PolInSAR Data[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(10): 820
- [31] Fu W, Guo H D, Song P, et al. Combination of PolInSAR and LiDAR Techniques for Forest Height Estimation[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017, 14(8): 1418-1422
- [32] Ballester-Berman J D, Lopez-Sanchez J M. Combination of Direct and Double-Bounce Ground Responses in the Homogeneous Oriented Volume over Ground Model [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2010, 8(1): 54-58
- [33] Cloude S R, Papathanassiou K P. Three-Stage Inversion Process for Polarimetric SAR Interferometry [J]. *IEEE Proceedings—Radar, Sonar and Navigation*, 2003, 150(3): 125-134
- [34] Lee S K, Kugler F, Papathanassiou K P, et al.

- Multibaseline Polarimetric SAR Interferometry Forest Height Inversion Approaches [C]. PolInSAR Workshop, Frascati, Italy, 2000
- [35] Iribi K, Lopez-Martinez C, Papathanassiou K P, et al. Estimation of Ground Topography in Forested Terrain by Means of PolInSAR[C]. IGARSS, Boston, USA, 2008
- [36] Hajnsek I, Kugler F, Lee S K, et al. Tropical Forest Parameter Estimation by Means of Pol-InSAR: The INDREX-II Campaign[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(2): 481-493
- [37] Shi Lei. Vegetation Height and Underlying Ground Altitude Estimation Based on Multi-baseline PolInSAR Data[D]. Wuhan: Wuhan University, 2013 (史磊. 多基线植被高与植被下地形估计[D]. 武汉: 武汉大学, 2013)
- [38] Lavalle M, Khun K. Three-Baseline InSAR Estimation of Forest Height[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(10): 1737-1741
- [39] Fu H Q, Zhu J J, Wang C C, et al. Underlying Topography Extraction over Forest Areas from Multi-baseline PolInSAR Data[J]. *Journal of Geodesy*, 2017(9): 1-15
- [40] Li Lan. Forest Vertical Information Extraction Based on P-Band SAR Tomography[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2016 (李兰. 森林垂直结构信息 P-波段 SAR 层析提取方法[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2016)
- [41] Li Wenmei. Forest Vertical Structure Parameters Estimation Using Polarimetric Interferometric Tomography SAR[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2013 (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)
- [42] Li X, Liang L, Guo H D, et al. Compressive Sensing for Multibaseline Polarimetric SAR Tomography of Forested Areas[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 54(1): 153-166
- [43] Frey O, Meier E. Analyzing Tomographic SAR Data of a Forest with Respect to Frequency, Polarization, and Focusing Technique [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(10): 3648-3659
- [44] Tebaldini S. Multi-baseline SAR Imaging: Models and Algorithms[D]. Milano: Politecnico Di Milano, 2009
- [45] Tebaldini S. Algebraic Synthesis of Forest Scenarios from Multibaseline PolInSAR Data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(12): 4132-4142
- [46] Tebaldini S. Single and Multipolarimetric SAR Tomography of Forested Areas: A Parametric Approach[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(5): 2375-2387
- [47] Mercer B, Zhang Q, Schwaebisch M, et al. Forest Height and Ground Topography at L-Band from an Experimental Single-Pass Airborne Pol-InSAR System[C]. PolInSAR Workshop, Frascati, Italy, 2009
- [48] Pardini M, Papathanassiou K. Sub-canopy Topography Estimation: Experiments with Multibaseline SAR Data at L-Band[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Munich, Germany, 2012
- [49] Kugler F, Schulze D, Hajnsek I, et al. TanDEM-X Pol InSAR Performance for Forest Height Estimation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(10): 4040-4046
- [50] 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): 294-295
- [51] Fu H Q, Zhu J J, Wong C C, et al. A Wavelet Decomposition and Polynomial Fitting-Based Method for the Estimation of Time-Varying Residual Motion Error in Airborne Interferometric SAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(1): 49-59
- [52] Fu H Q, Zhu J J, Wang C C, et al. Atmospheric Effect Correction for InSAR with Wavelet Decomposition-Based Correlation Analysis Between Multipolarization Interferograms[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(10): 614-625

Methods and Research Progress of Underlying Topography Estimation over Forest Areas by InSAR

ZHU Jianjun¹ FU Haiqiang¹ WANG Changcheng¹

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

Abstract: It is difficult for traditional optical remote sensing technique to extract underlying topography over forest areas because that it can only measure the height of top of canopy. Since the microwave can penetrate into forest and record its vertical information, the microwave remote sensing technique provides the possibility for the underlying topography estimation, which has been a research hotspot. In this paper, the principle of digital elevation model (DEM) extraction by synthetic aperture radar interferometry (InSAR) and the corresponding SAR systems to acquire the InSAR data over forest areas have been introduced firstly. The second part of this paper describes different methods used to extract DEM based on InSAR, polarimetric InSAR (PolInSAR) and tomographic SAR (TomoSAR) technologies. After this, based on the above three SAR technologies, the application and research progress of underlying topography estimation are introduced. Finally, the discussions about the data acquisition, error correction and scattering model reconstruction for underlying topography extraction are introduced.

Key words: underlying topography; microwave remote sensing; InSAR; PolInSAR; TomoSAR

First author: ZHU Jianjun, PhD, professor, specializes in error data processing and its application in InSAR. E-mail: zjj@csu.edu.cn

Corresponding author: FU Haiqiang, PhD candidate. E-mail: haiqiangfu@csu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 41531068.