

联合 TanDEM-X DEM 与 Sentinel-2 多光谱数据的林下地形提取

刘志卫¹, 赵蓉², 朱建军¹, 付海强¹, 周瑾³, 周亦¹

1. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083;

2. 中南林业科技大学 土木工程学院, 长沙 410004;

3. 中南林业科技大学 理学院, 长沙 410004

摘要: 针对植被覆盖区 TanDEM-X DEM 无法描述精细化林下地形的的问题, 本文提出了一种联合 TanDEM-X DEM 和 Sentinel-2 多光谱数据的林下地形提取方法。首先, 将 TanDEM-X DEM 和 Sentinel-2 的多波段信息作为输入变量、高精度林下地形数据 (LVIS 测高数据) 作为输出变量, 通过随机森林拟合方法构建林下地形预测模型; 之后, 利用得到的训练模型实现无参考数据区域的林下地形提取。为了验证本文提出的方法, 选择位于非洲加蓬的两个典型试验区进行验证。结果表明: 提出的方法能够有效地校正 TanDEM-X DEM 中包含的森林高度偏差, 同时提取更为精细的林下地形信息; 相较于原始 TanDEM-X DEM, 本文方法所提取的地形精度在两个试验区分别提升了 76% 和 63%; 此外, 本文方法生成的林下地形结果保持了较为完整的地形纹理, 可以较好的描述林下地形细节。因此, 本研究为采用 TanDEM-X DEM 获取大范围林下地形, 提供了一种可行的方案。

关键词: 遥感, TanDEM-X, Sentinel-2, 机器学习, 数字高程模型, 林下地形

中图分类号: P237/P2

引用格式: 刘志卫, 赵蓉, 朱建军, 付海强, 周瑾, 周亦. 2024. 联合 TanDEM-X DEM 与 Sentinel-2 多光谱数据的林下地形提取. 遥感学报, 28(10): 2540-2552

Liu Z W, Zhao R, Zhu J J, Fu H Q, Zhou C and Zhou Y. 2024. Sub-canopy topography extraction via TanDEM-X DEM combined with Sentinel-2 multispectral data. National Remote Sensing Bulletin, 28(10): 2540-2552 [DOI: 10.11834/jrs.20232574]

1 引言

数字高程模型 DEM (Digital Elevation Model) 是地表起伏形态的数字化表达, 也是进行地学分析的重要基础数据, 已被广泛应用于灾害监测、水文分析、森林资源管理及军事等多个领域 (Yamazaki 等, 2014; 周玉杉等, 2021; Zhao 等, 2016; 兰进京等, 2020)。随着对地观测技术的不断发展, 获取 DEM 数据的方式越来越多, 如: 激光雷达 LiDAR (Light Detection and Ranging)、光学立体影像、合成孔径雷达干涉测量 InSAR (Synthetic Aperture Radar Interferometry) 技术等; 同时, 可获取的数据空间分辨率和精度也越来越高。现有技

术中, 尽管具备强穿透能力的机载 LiDAR 可以直接穿透森林覆盖层获取林下地形信息 (汪焱等, 2017), 但由于获取信息的成本高、覆盖范围小, 导致其无法满足大范围地形测图的需求。

InSAR 技术集 SAR 技术与干涉测量技术于一体, 兼具大范围、高分辨率、高精度、全天时和全天候数据获取的特点, 已逐渐成为局部及全球尺度地形测绘的重要手段之一 (Rossi 等, 2012; Zebker 和 Goldstein, 1986)。最具有标志性意义的事件是 2000 年美国航天飞机雷达地形测绘任务 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), 其利用航天飞机搭载双天线 SAR 传感器 (C 波段), 仅 11 d 时间便获取了覆盖全球 80% 陆地面积 (56°S—60°N)

收稿日期: 2022-11-01; 预印本: 2023-03-14

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 42104016, 41820104005, 42074016, 42030112); 湖南省研究生创新项目 (编号: CX20210278); 中南大学研究生创新项目 (编号: 2021zzts0260); 国家留学基金委博士联合培养项目 (编号: 202106370125)

第一作者简介: 刘志卫, 研究方向为 InSAR/PollnSAR 数据处理及林下地形提取。E-mail: liuzhiwei@csu.edu.cn

通信作者简介: 赵蓉, 研究方向为 InSAR 数据处理及形变参数反演。E-mail: zhaorong1018@126.com

的 1" 分辨率三维地形信息 (Farr 和 Kobrick, 2000); 2010 年—2015 年, 德国宇航中心 DLR (German Aerospace Center) 利用双星编队分布式 SAR 系统采集了覆盖全球的 TanDEM-X InSAR 数据, 并于 2016 年 9 月生成了 12 m 分辨率的全球 TanDEM-X DEM 产品。然而, 由于短波 SAR 微波信号 (如 C 波段和 X 波段) 的穿透能力较差, 且在穿过森林冠层过程中与森林枝干、叶片的交互作用发生显著的衰减, 导致传统 InSAR 技术在森林区测量的地形高度通常位于森林冠层顶部与地表之间, 获取的 DEM 数据中包含森林高度信号, 无法反映真实的林下地形信息 (Wang 等, 2021)。尽管波长更长的 P 波段雷达具有更强的穿透能力, 但是该波段仍难以直接穿透植被覆盖层探测到林下地形信息 (Fu 等, 2016; 卢文青, 2019)。因此, 传统 InSAR 技术无法满足林下地形测绘的需求, 其根本原因在于传统 InSAR 技术受观测信息不足的限制, 无法区分同一分辨单元内不同散射体的垂直分布 (朱建军等, 2018)。

虽然已有研究验证了极化干涉 SAR 即 PolInSAR (Polarimetric InSAR) 和层析 SAR 即 TomoSAR (Tomographic SAR) 技术在林下地形提取中的可行性 (Fu 等, 2016; Peng 等, 2021; 刘雅佳等, 2020; 卢文青, 2019), 但这两种技术对数据的要求极为严格, 目前在轨运行的星载 SAR 系统尚无法提供可满足林下地形测绘需求的观测数据。因此, 如何准确地从现有 DEM 数据中扣除植被引起的测高偏差对获取大范围、高精度林下地形极为重要。

针对上述问题, 国内外研究提出了不同的算法校正 DEM 数据中包含的植被偏差, 这些方法主要可以归为如下 3 类: (1) 平均高度扣除法。该方法利用地面分类数据或光学遥感影像提取植被覆盖区域, 根据地块边缘对应的高差偏移量, 采用最小二乘法估算植被覆盖地块对应的植被偏差, 并将其从 DEM 数据中扣除得到林下地形 (Gallant 和 Read, 2016)。尽管该方法无需依赖任何外部数据, 但由于其忽略了森林高度在空间上的变化, 因此仅适用于小范围、匀质森林区的林下地形提取。(2) 森林高扣除法。该方法的核心思想为借助外部手段估计森林高度, 并将其从 InSAR DEM 数据中扣除 (Baugh 等, 2013; O'Loughlin 等, 2016; 张晨等, 2021; 陈寒, 2020)。这类方法存在的问题在于其改正效果严重依赖于外部树

高数据的精度和分辨率, 且无法考虑 InSAR 信号穿透深度在空间上的差异性。(3) 机器学习方法。该方法的核心思想是将原始 DEM 和多光谱影像参数或植被参数 (如: NDVI、EVI、AVI 等) 作为网络输入, 高精度地面高程数据作为网络输出进行模型训练, 并将得到的训练模型用于高精度 DEM 提取 (Wendi 等, 2016; Kim 等, 2020; Meadows 和 Wilson, 2021; Prasetyo 等, 2022)。相较于前两类方法, 这类方法的优势在于无需依赖森林的同质性分布假设且无需借助外部森林高度数据。

综上, 对于最新发布的 TanDEM-X 90 m DEM, 由于目前仍缺乏与其同期获取的高精度森林高度数据, 导致基于森林高度扣除的林下地形提取方法难以直接应用于 TanDEM-X DEM; 且现有国内外研究尚未报道如何根据 TanDEM-X DEM 数据提取林下地形。尽管国内外众多研究验证了多源数据融合技术可以一定程度上提升 DEM 的精度 (刘露, 2019; 岳林蔚等, 2021; 郑婷婷等, 2021), 但这些方法本质上是为了解决单一 DEM 数据中存在的空间数据缺失、噪声以及异常值, 无法直接用于林下地形提取。鉴于此, 为了提升森林覆盖区地形数据的分辨率和准确性, 本文提出了一种联合 TanDEM-X DEM 与 Sentinel-2 多光谱数据的林下地形提取方法, 通过公开发布的 TanDEM-X 90 m DEM 产品、Sentinel-2 多光谱数据和 LVIS (Land, Vegetation and Ice Sensor) 采集的高精度地面测高数据提取高分辨率、高精度的林下地形。该方法的整体流程包括: 数据预处理: 包括 Sentinel-2 多光谱数据的预处理及不同数据间的坐标系与分辨率的统一; 随机森林拟合: 将 TanDEM-X DEM 与 Sentinel-2 的多波段信息作为输入变量, LVIS 采集的地面测高数据作为输出变量, 建立基于随机森林拟合的林下地形预测模型; 大范围林下地形提取与精度验证。同时, 为验证本文算法的有效性和可行性, 选择了位于非洲加蓬的两个典型试验区 (包括 Mondah 和 Rabi) 进行验证, 以期利用公开发布的 TanDEM-X DEM 生成林下地形提供方案和依据。

2 研究区与数据

2.1 研究区

考虑到高精度地面参考数据覆盖的有效性,

本文选择了 AfriSAR2016 项目中的两个典型试验区对算法进行验证, 研究区地理位置如图 1 所示。受植被覆盖的影响以及 X 波段微波信号穿透能力的限制, 覆盖这两个研究区的 TanDEM-X DEM 均包含了植被高度引起的严重测高偏差。其中, 第一个研究区位于非洲大陆加蓬境内的 Mondah 国家公园, 距离 Libreville 机场 25 km, 其主要植被类型为海洋红树林、沼泽森林和草原, 最高森林高度可达 60 m。研究区地形较为平坦, 高程变化范围为 0—60 m。在该试验区, 除了多数区域存在高植被外, 还包含了部分受植被覆盖影响较小的低矮植被区, 因此适合用来验证本文算法。在此基础上, 为了进一步验证本文方法在大范围林下地形提取中的潜力, 研究选择了位于加蓬西南部的 Rabi 试验区开展试验验证, 该研究区距离 Libreville 机场 260 km, 其主要植被类型为密集的热带雨林, 森林高度位于 30—60 m。并且这两个研究区均覆盖有大量的机载地面高程测量数据, 可用于模型训练和大范围林下地形结果的验证。

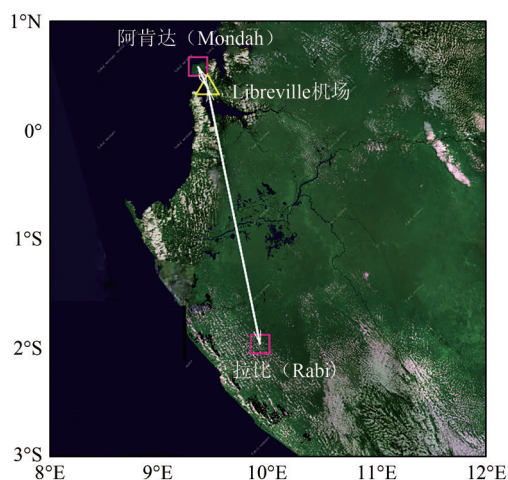


图 1 研究区位置示意图

Fig. 1 Locations of the study areas

2.2 研究数据

2.2.1 TanDEM-X DEM

TanDEM-X (TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurement) 是一个新型的编队飞行雷达系统, 该系统的成功发射和在轨运行开启了星载雷达遥感的新纪元, 其首要目的是获取高质量的全球数字高程模型 (Krieger 等, 2013)。其中, 该系统下的收发分置模式 (即双站干涉测量模式)

实现了主、从影像几乎同时被获取, 从而最大程度降低了时间失相干、大气延迟等因素对高精度地形获取的影响 (Krieger 等, 2007)。自 2010 年 12 月—2015 年 1 月, TSX/TDX 已经完成了环绕地球两次的重复观测, 完成了雷达数据的采集 (Rizzoli 等, 2017); 德国宇航局 DLR (German Aerospace Center) 于 2016 年 9 月完成了全球高程数据的处理, 并发布了覆盖全球范围的 12 m 分辨率的 TanDEM-X DEM 产品 (Zink 等, 2021)。基于上述标准产品, 采用均值重采样的方法又获取了 30 m 及 90 m 分辨率的全球 TanDEM-X DEM 数据, 并将 90 m 分辨率的数据向全球用户免费开放。其中, 对于 12 m 分辨率的 DEM 产品 (30 m 及 90 m 产品未标定), 其标称精度如下: 绝对高程精度为 10 m (LE90, 90% 线性误差); 相对垂直精度分别为 2 m [坡度 < 20%] 和 4 m [坡度 > 20%] (Krieger 等, 2013)。此外, 为了评估 12 m 分辨率 DEM 的实际高程精度, DLR 使用全球近 1.5 万个冰、云和陆地高程卫星 ICESat (Ice, Cloud and land Elevation Satellite) 测高点对其进行评估, 在不考虑地表覆盖物 (冰、森林覆盖等) 的情况下, DEM 的绝对高程精度 (LE90) 远优于其标称精度 (Rizzoli 等, 2017; Wecklich 等, 2017; Tang 等, 2021)。然而, 在森林覆盖区, 由于 X 波段微波信号穿透能力的限制和植被对微波信号的散射, TanDEM-X DEM 所指示的高程并不能反映真实的林下地形信息, 且其绝对高程精度与森林类型、森林冠层高度和森林密度等因素相关 (Wang 等, 2021; 蔡士雪等, 2022; 李文梁等, 2020; Liu 等, 2020)。鉴于此, 本文基于公开发布的 TanDEM-X 90 m DEM 数据进行森林区林下地形提取研究。通过 [https://geoservice.dlr.de/web/dataguide/tdm90/\[2022-11-01\]](https://geoservice.dlr.de/web/dataguide/tdm90/[2022-11-01]) 可免费获取覆盖全球的 TanDEM-X 90 m DEM 数据。

2.2.2 Sentinel-2

Sentinel-2 是欧洲哥白尼计划中承担高分辨率多光谱的子卫星计划 (Guzinski 和 Nieto, 2018)。该卫星计划由 Sentinel-2A (2015 年发射) 和 Sentinel-2B (2017 年发射) 两颗极地轨道卫星组成, 每颗卫星对应的轨道高度为 786 km。此外, 卫星携带了一枚多光谱成像仪 (MSI), 获取从可见光到短红外 13 个波段的信息 (空间分辨率分别为 10 m, 20 m, 60 m), 并采用 Pushbroom 技术实

现了宽视场的数据获取，幅宽达 290 km (Frampton 等, 2013)。

相较于先前的光学卫星 (如: MODIS、Landsat 等), Sentinel-2 具有更高的时空分辨率。在空间分辨率方面, 与植被特征相关波段的空间分辨率为 10 m 或 20 m, 其余波段的空间分辨率为 60 m; 在时间分辨率方面, 当联合使用两颗卫星时, 其时间分辨率可以缩短至 5 d。由于其空间分辨率高、重访周期短、覆盖波长范围广等特点, Sentinel-2 已被广泛应用于高分辨率土地利用分类、植被高度估算及多时相变化监测等领域 (Fakhri 和 Gkanatsios, 2021; 李文梁等, 2020; Roy 等, 2017)。

在本研究中, 为了选取高质量的 Sentinel-2 多光谱影像数据覆盖, 采用基于最小云覆盖的方法。由于本文选择的两个研究区均属于热带雨林区, 植被在时间和空间上的变化相对较小, 因此 Sentinel-2 与 TanDEM-X DEM 获取时间上的差异不会成为限制该方法的主要因素。表 1 展示了覆盖两个研究区的 Sentinel-2 元数据的相关信息, 均为 L1C 级产品且所有的元数据可从 Copernicus Open Access Hub 数据中心免费获取。

表 1 本研究中所用的 Sentinel-2 数据的参数

Table 1 Parameters of Sentinel-2 data utilized in this study

参数	研究区	
	Mondah	Rabi
获取日期	2018-03-28	2020-02-01 2020-03-22
图幅编号	T32NNF	T32MNC/T32MND T32MPC/T32MPD
云覆盖比/%	4.4	5.8
平台	S-2A	S-2B
数据格式	L1C	L1C

2.2.3 LVIS 机载测高数据

为了训练和验证提出的算法, 本文选择了 NASA 于 2016 年 2 月—3 月在 AfSAR 研究区采集的高精度林下地形数据作为参考。该数据采用机载陆地植被与冰传感器 LVIS (Land Vegetation and Ice Sensor) 采集, 飞机飞行高度位于地面上 10—20 km, 并获取了脚点直径为 5—25 m 的全波形数据 (Blair 等, 1999)。为了验证 LVIS 测高数据的精度, NASA 在不同森林类型、不同地形条件下开展了大量飞行实验, 结果表明: LVIS 具备获取分米级精度的林下地形、高精度植被高度和精细垂

直结构的能力 (Hofton 等, 2017)。本研究选择了 Level2 级数据文件, 该数据包含林下地形与植被高度等信息, 可直接用于模型训练和算法的验证。此外, 本文使用的 LVIS 数据可直接从美国国家冰雪数据中心 NSIDC (National Snow and Ice Data Center) 网站下载, 下载链接为 <https://nsidc.org/data/aflvis2> [2022-11-01]。

3 研究方法

3.1 数据预处理

3.1.1 Sentinel-2 数据预处理

欧洲航天局 ESA (European Space Agency) 提供的 Sentinel-2 是 L1C 级原始数据产品, 它是经过正射校正和几何校正的大气上层表现反射率数据 (Gascon 等, 2017)。在使用之前, 需要对其进行辐射定标、大气校正等预处理。为此, 本文的数据预处理首先采用 ESA 提供的 Sen2Cor 工具集对原始的 L1C 级产品进行辐射定标和大气校正, 最终生成能够反映大气底层的 L2A 级反射率数据 (Main-Knorn 等, 2017)。此外, Sen2Cor 作为 L2A 级产品生成和格式化的工具集, 还包含了卷云和地形校正等多个可选功能。因此, 为了确保 Sentinel-2 数据的质量, 采用了 SRTM 30 m DEM (Reuter 等, 2007) 作为地形参考数据, 对 Sentinel-2 进行地形校正处理。在本研究中, 为了改正 TanDEM-X 90 m DEM 中包含的植被高度信号, 剔除了 5 个与植被无关的波段 (B1、B9、B10、B11、B12), 并将其余 8 个波段 (B2、B3、B4、B5、B6、B7、B8、B8A) 作为随机森林拟合模型的输入变量。

3.1.2 坐标转换与分辨率统一

经预处理后的 Sentinel-2 数据采用的是 WGS84 坐标系下的 UTM 投影坐标, 而 TanDEM-X 90 m DEM 和 LVIS 测高数据均采用 WGS84 坐标系下的地理坐标, 因此需要对 Sentinel-2 数据进行反投影转换。本研究以 WGS84 地理坐标系为参考, 利用 snappy 插件内置的投影算法对 Sentinel-2 数据进行投影变换处理。此外, 为了保证不同类型数据间空间分辨率的一致性并充分发挥多光谱数据的高空间分辨率优势, 采用最近邻插值算法对 TanDEM-X 90 m DEM 进行插值处理, 最终得到 10 m 分辨率的 TanDEM-X DEM, 并将其作为后续随机

森林模型拟合的基础输入数据。

3.2 随机森林拟合

随机森林算法属于 Bagging 算法类型的一种，是以决策树为基础而构造的，其本质是机器学习中的集成学习思想 (Breiman, 2001)。该算法通过自动有放回抽样方式对随机向量进行随机选取并生成决策树，最后利用树节点输出轴的平均值作为预测结果，使得整体模型具有较高的精确度和泛化性能。自提出以来，随机森林已经成为一种重要的数据分析工具，并被广泛应用于科学研究的众多领域，如：影像分类 (Ham 等, 2005)、森林高度估算 (刘丽娟, 2022)、变形监测预报 (罗浩 等, 2016) 及洪灾风险评估 (赖成光 等, 2015) 等研究领域。

随机森林回归树方法包含如下 3 个步骤：(1) 对样本数据进行有放回的抽样，得到多个样本集；(2) 对选择的样本集建立未剪枝 (unpruned) 的回归树，并在每个节点从随机抽样变量中选择最优的分割；(3) 对所有回归树的预测结果进行聚合，得到最终的预测结果。本研究通过随机选择 LVIS 测量的地面高程数据作为输出变量，并选择数据预处理提取的 9 个独立变量 (包括：8 个波段的 Sentinel-2 多光谱数据以及 10 m 分辨率的 TanDEM-X

DEM) 作为输入变量，建立基于随机森林拟合的林下地形预测模型。随后，训练得到的模型可用于无参考数据区域的林下地形提取。

需要注意的是，随机森林拟合模型中存在两个敏感参数，分别为决策树的数量以及每个分裂节点上采用的变量个数。这两个参数影响着模型运行速度及其泛化性能。本研究采用了网格搜索法对参数进行优化，通过自适应的方式获得算法的最佳性能。为了实现随机森林拟合算法，研究采用了 python 中包含的 Scikit-learn 库 (Pedregosa 等, 2011)。

3.3 精度验证

由于均方根误差 RMSE (Root Mean Square Error) 对异常值较为敏感，能够较好的反映数据精度，因此本文将作为评价指标对结果进行定量验证。并且该指标也是地学中用于衡量连续变量 (如：DEM) 精度的一个常用指标 (Liu 等, 2020)，其计算公式如下：

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (z_r - z_p)^2} \quad (1)$$

式中， z_r 和 z_p 分别代表第 i 个参考数据及待评价数据集对应点的高程， N 为验证数据的个数。

最终，本文算法的整体处理流程如图 2 所示。

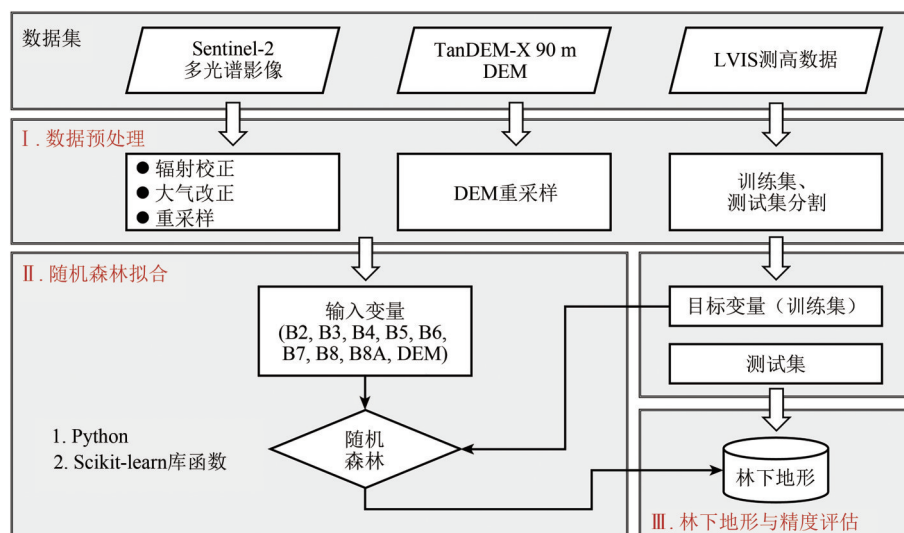


图2 本文所提方法的流程图

Fig. 2 Flowchart of the proposed method in this study

4 结果与分析

4.1 方法验证

为了验证本文算法的可行性，在 Mondah 试验

区随机选择了 20% 的 LVIS 地面高程数据作为参考数据进行模型训练，并通过剩余 80% 的参考数据对预测结果进行独立的精度验证。图 3 展示了该试验区不同地形数据的对比结果：包括 LVIS 数据生成的数字地面模型 (LVIS DTM)、原始 TanDEM-X

DEM 以及本文方法提取的林下地形。首先，选择了两个区域（区域 m 和区域 n）对结果进行定性分析。结果表明：对于区域 m（高植被覆盖区），受植被高度信号的严重影响，原始的 TanDEM-X DEM 包含了显著的测高偏差；而本文提出的方法可以有效校正 TanDEM-X DEM 中包含的植被信号偏差，得到的林下地形结果（图 3（c））与 LVIS DTM（图 3（a））具有较好的一致性。对于区域 n，

由于其地表覆盖类型主要是裸地或低矮植被，对 TanDEM-X 的地形测量影响较小，因此 TanDEM-X DEM 与 LVIS DTM 在该区域具有较好的一致性（Schlund 等，2019）。理论上，经过本文方法得到的林下地形应尽可能的保留 TanDEM-X DEM 的高程信息。通过对比不同地形数据结果在该区域的表现，这一点得到了很好地验证。

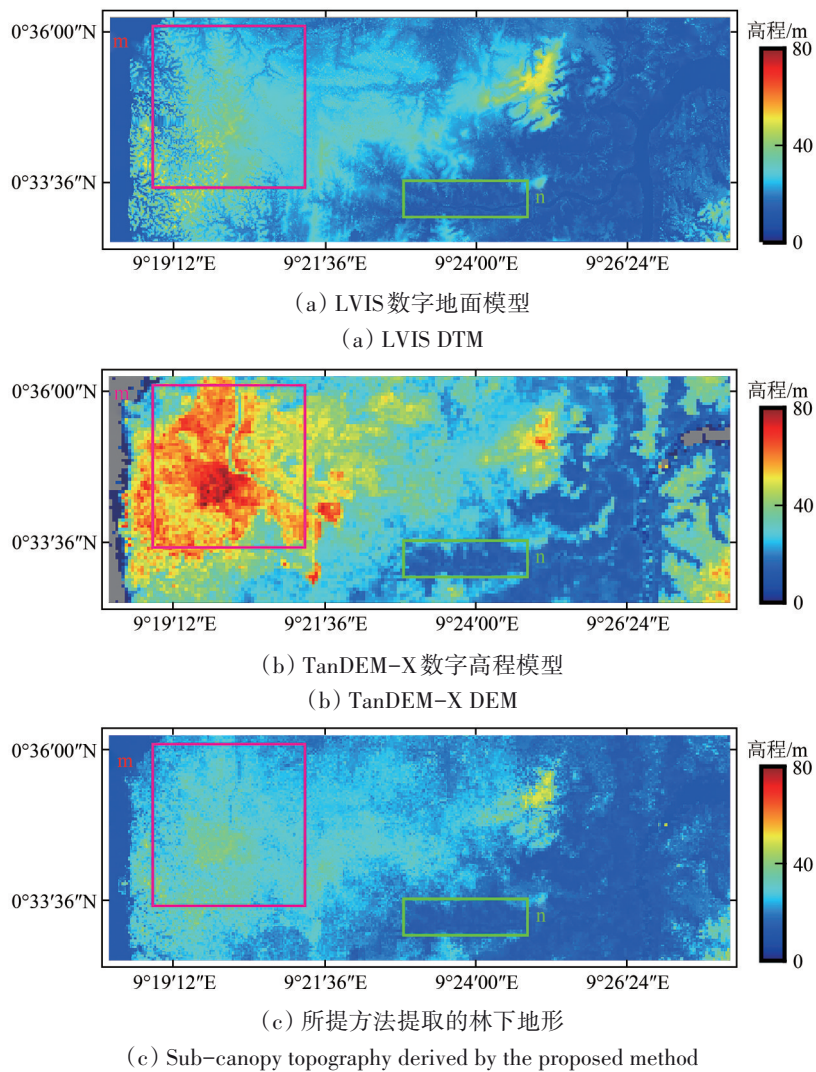


图3 Mondah 试验区 LVIS DTM 与植被高度信号校正前、后 TanDEM-X DEM 对比

Fig. 3 Comparisons between LVIS DTM and the TanDEM-X DEMs before and after vegetation height signal calibration over the Mondah test site

从定性结果可以看出：在植被覆盖区，本文方法可以有效校正 TanDEM-X DEM 中森林高度信号引起的测高偏差；在裸地或低矮植被区，该方法可以较好的保留 TanDEM-X DEM 原始的地形信号。分析其原因是通过不同波段的 Sentinel-2 数据辅助，可有效区分土地利用和地表覆盖类别。在

此基础上，根据 Sentinel-2 多波段训练数据集中包含的信息，利用随机森林拟合方法可得到 TanDEM-X DEM 与目标地面高程（即 LVIS 地形测高数据）间的最佳匹配模型，并利用得到的训练模型成功提取了整个区域的高精度林下地形。

最后，以 LVIS DTM 的地形高程作为参考，对

本文算法生成的林下地形结果进行定量评价。图4对比了原始 TanDEM-X DEM、林下地形与 LVIS DTM 高程间的散点分布图，并且计算获得相应的均方根误差 (RMSE) 和平均偏差 (MEAN)。可见：与原始 TanDEM-X DEM 相比，通过本文算法生成

的林下地形与 LVIS DTM 呈现出较好的一致性 (均位于 $y=x$ 直线附近)；同时，定量验证结果也表明：经过本文算法提取的林下地形产品具有较优的地形精度，相应的 RMSE 从 15.31 m 降低到 3.70 m，精度改善达 76%。

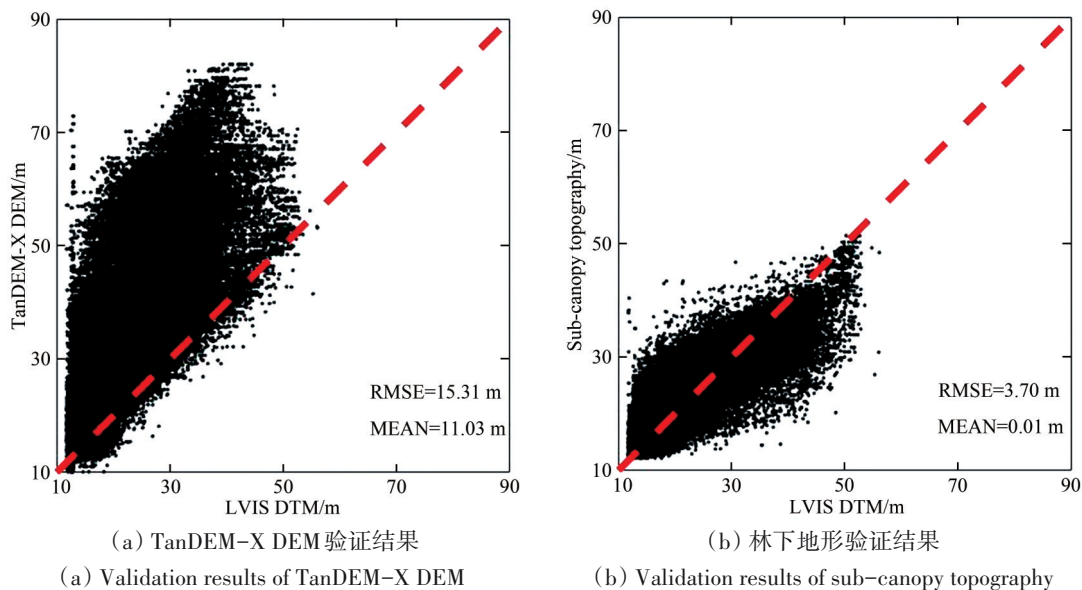


图4 植被高度信号校正前、后 TanDEM-X DEM 验证结果

Fig. 4 Validation results of the TanDEM-X DEMs before and after vegetation height signal calibration

4.2 大范围林下地形提取

为了验证本文方法在大范围林下地形提取方面的可行性，选择了 Rabi 试验区进行验证。该试验区的面积约为 4514 km²。与 4.1 部分相似，同样按照 2 : 8 的比例将高精度 LVIS 地面测高数据划分为训练数据集和验证数据集。图 5 展示了原始

TanDEM-X DEM (图 5 (a)) 以及本文所提方法生成的林下地形 (图 5 (b)) 对比。可见：与原始 TanDEM-X DEM (图 5 (a)) 相比，本文方法可以有效校正原始 TanDEM-X DEM 中包含的森林高度偏差，从而提取了较为准确的林下地形。

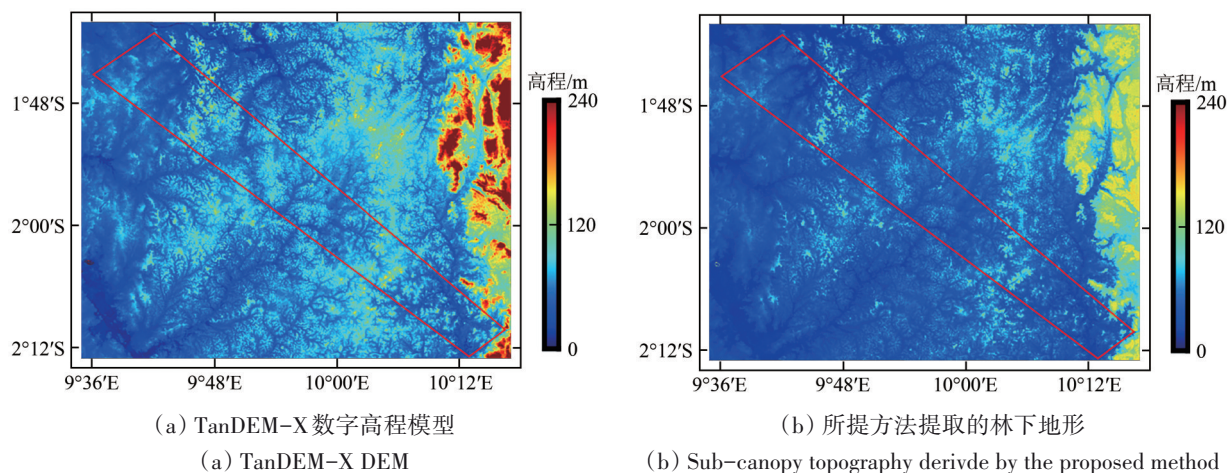


图5 Rabi 试验区植被高度信号校正前、后 TanDEM-X DEM 对比

Fig. 5 Comparisons of the TanDEM-X DEMs before and after vegetation height signal calibration over the Rabi test site

为了进一步验证提取的林下地形结果, 首先对其进行了定性分析。图 6 (a) — (c) 分别表示 LVIS 数据覆盖区域内的原始 TanDEM-X DEM、本文生成的林下地形以及 LVIS DTM。可明显看出: 受植被覆盖的影响, 原始 TanDEM-X DEM (图 6 (d)) 包含了明显的森林高度信号, 导致林下地形完全被植被信号所掩盖, 从而难以描述真实的林下地形信息。而通过本文方法提取的林下地形结果与

LVIS DTM 呈现出较好的一致性。为了进一步展示不同地形数据的结果, 将机载 LVIS 覆盖区域的局部地形 (如图 6 中红色方框所示) 进行放大分析。根据图 6 (d) — (f) 所示的局部放大图可以更加清晰的看出: 本文提出的方法不仅可有效校正森林高度导致的测高偏差, 同时获取的林下地形展示出了较为清晰的地形纹理和细节。

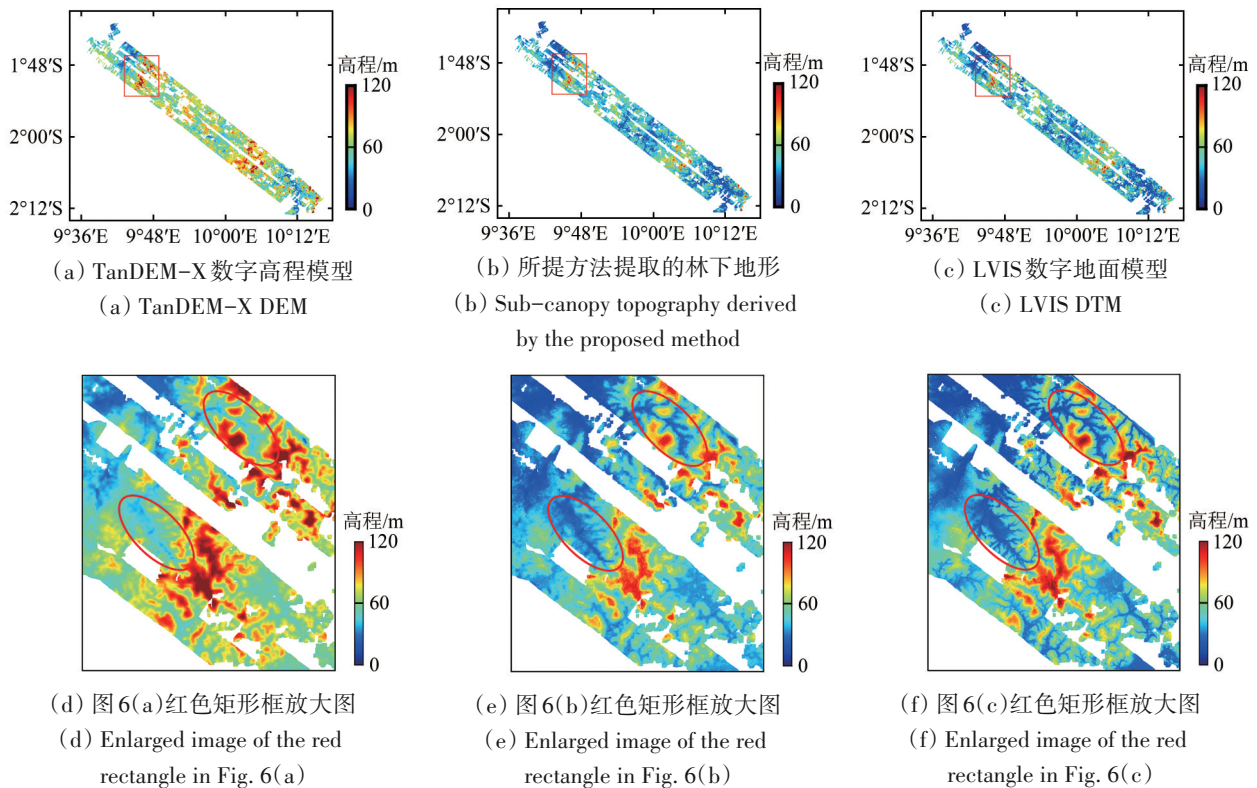


图 6 Rabi 试验区 LVIS DTM 与植被高度校正前、后 TanDEM-X DEM 对比

Fig. 6 Comparisons between LVIS DTM and the TanDEM-X DEMs before and after vegetation height signal calibration over Rabi test site

最后, 同样以 LVIS DTM 作为参考数据对生成的林下地形结果进行了定量评价, 高程散点统计结果如图 7 所示。由图 7 (a) 可见改正前, 相较于 LVIS DTM, 几乎所有的验证点都偏向于 TanDEM-X DEM, 表明原始 DEM 数据中确实包含了显著的森林高度信号; 如图 7 (b) 所示, 经过本文算法提取的林下地形结果和 LVIS DTM 更为接近。同时, 相较于原始 TanDEM-X DEM, RMSE 从 21.13 m 降低至 7.78 m, 精度改善达 63%, 从而进一步验证了本文算法提取大范围林下地形的有效性和可靠性。

需要注意的是, 相较于 LVIS DTM, 无论是原始 TanDEM-X DEM 还是经本文算法提取的林下地

形结果均呈现出部分离群高程测量值, 导致图 7 所示的高程散点统计图中存在两个明显的峰值。分析发现: 这些误差较大的像素主要位于机载 LiDAR 覆盖范围的边缘 (图 5 中的红色矩形框区域)。该现象背后的原因是由于机载 LiDAR 数据格网化过程中, 空间插值产生的误差。

4.3 对本文提出方法的讨论

本文提出的林下地形提取方法可用于校正 TanDEM-X DEM 数据中包含的森林高度信号, 为获取大范围、高精度林下地形提供了一种可行的方案。然而, 为了推广和扩展该方法的应用范围, 如下的限制因素需在未来的研究工作中进一步考虑:

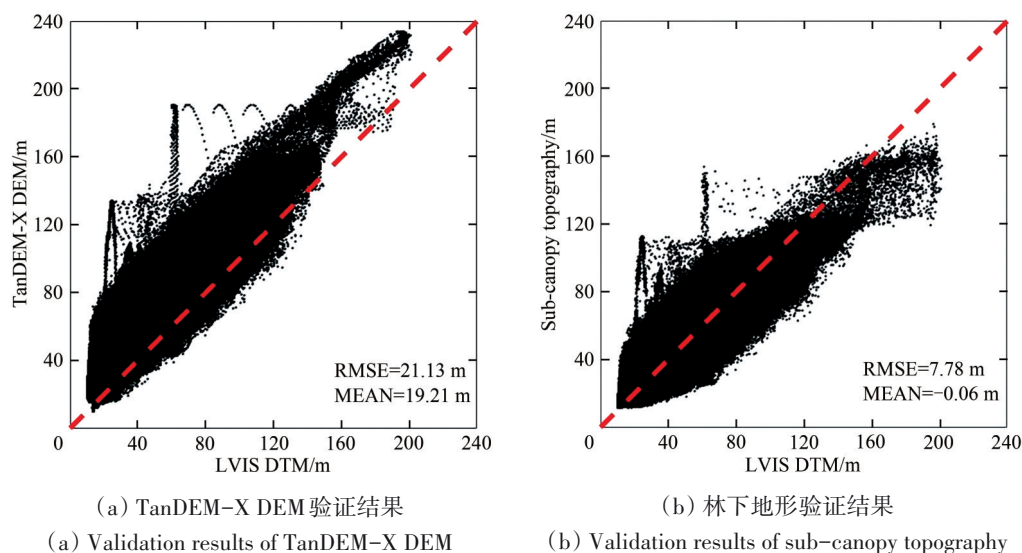


图7 植被高度信号校正前、后 TanDEM-X DEM 验证结果

Fig. 7 Validation results of the TanDEM-X DEMs before and after vegetation height signal calibration

(1) 受目前高分辨率 TanDEM-X DEM 数据商业发布的限制, 本文仅采用了 90 m 分辨率的全球公开 DEM 数据进行林下地形提取研究。本研究为了实现 TanDEM-X 90 m DEM 与 Sentinel-2 多光谱数据分辨率间的匹配, 采用最近邻插值方法将 TanDEM-X 90 m DEM 插值为 10 m 的空间分辨率, 如 3.1.2 部分所述。尽管通过空间插值方式可在一定程度上提升地形细节信息, 但相较于 LVIS DTM, 所获取的地形细节信息还存在一定的缺失 (图 6 (e) 和 (f) 中的红色椭圆区域)。随着高分辨率全球产品 (如: 分辨率 12 m 的 TanDEM-X DEM) 的公开发布, 这一问题将会得到有效解决。

(2) 本文所提出的林下地形提取方法需要高精度机载 LiDAR 数据作为输出变量来进行模型训练。然而, 目前机载 LiDAR 数据的覆盖还十分有限, 从而制约了大区域乃至全球尺度林下地形产品提取。在未来, 随着新一代 P 波段 BIOMASS SAR 卫星的发射升空 (预计 2025 年), 为全球林下地形获取提供新的可能 (Quegan 等, 2019)。但是受 BIOMASS 卫星有限脉冲带宽的限制 (6 MHz), 该数据可预期的林下地形数据空间分辨率较低 (约为 100 m×100 m), 导致其仍难以满足对精细化林下地形数据的需求。针对这一问题, 可利用本文提出的算法来融合低分辨率的 BIOMASS 林下地形与高分辨率的 TanDEM-X DEM, 进而实现两种数据集的优势互补和高分辨率林下地形提取。这也将极大克服本文算法对高精度机载 LiDAR 地形数

据的依赖, 为全球尺度林下地形生产提供了可能。

(3) 由于目前的研究尚缺乏对算法运算效率的考虑, 因此, 针对海量数据条件下林下地形的提取, 对算法的进一步优化以及运算效率的提升值得进一步研究。

5 结论

针对森林区 TanDEM-X DEM 产品无法准确描述林下地形的问題, 本文提出了一种联合 TanDEM-X DEM 和 Sentinel-2 多光谱数据的林下地形提取方法。分别选取覆盖 AfriSAR2016 项目的两个典型试验区 (包括 Mondah 和 Rabi) 的 TanDEM-X 90 m DEM、Sentinel-2 以及 LVIS 激光测高数据作为试验数据, 开展了方法验证和大范围林下地形提取的试验。主要结论如下: (1) 在森林覆盖区, 受限于 X 波段微波信号有限的穿透能力, TanDEM-X InSAR 的平均测高误差达到十余米, 校正该误差对高精度林下地形获取至关重要; (2) 通过引入 Sentinel-2 多光谱数据来表征森林高度信号对 InSAR 测高的影响, 实现了 TanDEM-X DEM 与 LVIS 地面高程数据间的匹配, 从而实现了高精度的林下地形提取, 且生成的林下地形拥有更为真实的地形细节; (3) 以高精度 LVIS 地面测高数据为参考, 定量评估结果表明, 本文方法在校正原始 TanDEM-X DEM 平均误差的同时, 所生成的林下地形精度提升分别达到 76% 和 63%, 从而验证了方法的有效性。

目前, 本文方法的实施仍依赖高精度 LiDAR

采集的地面高程样本, 且提取的林下地形细节会受到 TanDEM-X DEM 分辨率的限制。未来, 随着高分辨率 TanDEM-X DEM 的公开发布及新一代 P 波段 BIOMASS SAR 卫星的发射升空, 可为本文方法的实施提供更高分辨率、更大覆盖范围的数据源, 也可为提取大尺度、精细化林下地形提供坚实的数据支撑。

志 谢 本文所采用的 TanDEM-X 90 m DEM 由德国宇航局 DLR (German Aerospace Center) 免费提供; Sentinel-2 数据由欧洲航天局 ESA (European Space Agency) 免费提供; LVIS 数据由 NASA Goddard Space Flight Center 提供。文中所有结果图均采用 GMT (Generic Mapping Tool) 软件绘制 (Wessel 等, 2019)。在此表示衷心的感谢!

参考文献 (References)

- Baugh C A, Bates P D, Schumann G and Trigg M A. 2013. SRTM vegetation removal and hydrodynamic modeling accuracy. *Water Resources Research*, 49(9): 5276-5289 [DOI: 10.1002/wrcr.20412]
- Blair J B, Rabine D L and Hofton M A. 1999. The Laser Vegetation Imaging Sensor: a medium-altitude, digitisation-only, airborne laser altimeter for mapping vegetation and topography. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54(2/3): 115-122 [DOI: 10.1016/S0924-2716(99)00002-7]
- Breiman L. 2001. Random Forest. *Machine Learning* 45: 5-32. [DOI: 10.1023/A:1010933404324]
- Cai S X, Yue L W, Yin C and Qiu Z H. 2022. Accuracy evaluation of multi-source DEM data based on the analysis of vegetation-induced penetration rate in the forest area. *National Remote Sensing Bulletin*, 26(11): 2268-2281 (蔡士雪, 岳林蔚, 尹超, 邱中航. 2022. 顾及林区植被穿透率的多源 DEM 数据精度评价. *遥感学报*, 26(11): 2268-2281) [DOI: 10.11834/jrs.20210221]
- Chen H. 2020. Studying on DEM Generated by DSM Vegetation Filtering. Nanjing: Nanjing Normal University (陈寒. 2020. DSM 植被滤波生成 DEM 方法研究. 南京: 南京师范大学) [DOI: 10.27245/d.cnki.gnjsu.2020.000641]
- Fakhri F and Gkanatsios I. 2021. Integration of sentinel-1 and sentinel-2 data for change detection: a case study in a war conflict area of Mosul city. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 22: 100505 [DOI: 10.1016/j.rsase.2021.100505]
- Farr T G and Kobrick M. 2000. Shuttle radar topography mission produces a wealth of data. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 81(48): 583-585 [DOI: 10.1029/EO081i048p00583]
- Frampton W J, Dash J, Watmough G and Milton E J. 2013. Evaluating the capabilities of Sentinel-2 for quantitative estimation of biophysical variables in vegetation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 82: 83-92 [DOI: 10.1016/j.isprsjrs.2013.04.007]
- Fu H Q, Wang C C, Zhu J J, Xie Q H and Zhang B. 2016. Estimation of pine forest height and underlying DEM using multi-baseline P-Band PolInSAR Data. *Remote Sensing*, 8(10): 820 [DOI: 10.3390/rs8100820]
- Gallant J C and Read A M. 2016. A near-global bare-Earth DEM from SRTM. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B4: 137-141 [DOI: 10.5194/isprsarchives-XLI-B4-137-2016]
- Gascon F, Bouzinac C, Thépaut O, Jung M, Francesconi B, Louis J, Lonjou V, Lafrance B, Massera S, Gaudel-Vacaresse A, Languille F, Alhammoud B, Viallefont F, Pflug B, Bieniarz J, Clerc S, Pessiot L, Trémas T, Cadau E, De Bonis R, Isola C, Martimort P and Fernandez V. 2017. Copernicus Sentinel-2A calibration and products validation Status. *Remote Sensing*, 9(6): 584 [DOI: 10.3390/rs9060584]
- Guzinski R., and Nieto H. 2018. Evaluating the Feasibility of Using Sentinel-2 and Sentinel-3 Satellites for High-Resolution Evapotranspiration Estimations. *Remote Sensing of Environment*, 221: 157-172 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.11.019]
- Ham J, Chen Y C, Crawford M M and Ghosh J. 2005. Investigation of the random forest framework for classification of hyperspectral data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(3): 492-501 [DOI: 10.1109/TGRS.2004.842481]
- Hofton M, Blair J, Rabine D, Brooks C and Cornejo H. 2017. Canopy height and structure measurements of Gabon from medium-footprint waveform lidar//Proceedings of 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Fort Worth: IEEE: 4294-4295 [DOI: 10.1109/IGARSS.2017.8127952]
- Kim D E, Liang S Y, Gourbesville P, Andres L and Liu J D. 2020. Simple-yet-effective SRTM DEM improvement scheme for dense urban cities using ANN and remote sensing data: application to flood modeling. *Water*, 12(3): 816 [DOI: 10.3390/w12030816]
- Krieger G, Moreira A, Fiedler H, Hajnsek I, Werner M, Younis M and Zink M. 2007. TanDEM-X: a satellite formation for high-resolution SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(11): 3317-3341 [DOI: 10.1109/TGRS.2007.900693]
- Krieger G, Zink M, Bachmann M, Bräutigam B, Schulze D, Martone M, Rizzoli P, Steinbrecher U, Walter Antony J, De Zan F, Hajnsek I, Papathanassiou K, Kugler F, Rodriguez Cassola M, Younis M, Baumgartner S, López-Dekker P, Prats P and Moreira A. 2013. TanDEM-X: a radar interferometer with two formation-flying satellites. *Acta Astronautica*, 89: 83-98 [DOI: 10.1016/j.actaastro.2013.03.008]
- Lai C G, Chen X H, Zhao S W, Wang Z L and Wu X S. 2015. A flood risk assessment model based on Random Forest and its application. *Journal of Hydraulic Engineering*, 46(1): 58-66 (赖成光, 陈晓宏, 赵仕威, 王兆礼, 吴旭树. 2015. 基于随机森林的洪灾风险评估模型及其应用. *水利学报*, 46(1): 58-66) [DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2015.01.008]
- Lan J J, Yu H Y, Chen L, Ma H H and Zhang H Y. 2020. Scale effect of

- airborne LiDAR DEM in watershed hydrological analysis and simulation. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (4): 40-46 (兰进京, 于海洋, 陈琳, 马慧慧, 张慧勇. 2020. 机载LiDAR DEM在流域水文分析与模拟中的尺度效应. *测绘通报*, (4): 40-46) [DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2020.0109]
- Li W, Niu Z, Shang R, Qin Y C, Wang L and Chen H Y. 2020. High-resolution mapping of forest canopy height using machine learning by coupling ICESat-2 LiDAR with Sentinel-1, Sentinel-2 and Landsat-8 data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 92: 102163 [DOI: 10.1016/j.jag.2020.102163]
- Li W L, Wang C S and Zhu W. 2020. Error spatial distribution characteristics of TanDEM-X 90 m DEM over China. *Journal of Geo-Information Science*, 22(12): 2277-2288 (李文梁, 汪驰升, 朱武. 2020. 中国大陆地区 TanDEM-X 90 m DEM 误差空间分布特征. *地球信息科学学报*, 22(12): 2277-2288) [DOI: 10.12082/dqxxkx.2020.190739]
- Liu L. 2019. The 30-m Seamless DEM Reconstruction Based on Multi-Source Data Fusion. Wuhan: Wuhan University (刘露. 2019. 基于多源数据融合的30米无缝DEM产品重建. 武汉: 武汉大学) [DOI: 10.27379/d.cnki.gwhdu.2019.000424]
- Liu L J. 2022. Inversion of Forest Canopy Height in Yunnan Province Based on Spaceborne Lidar Data and Optical Remote Sensing Data. Kunming: Yunnan Normal University (刘丽娟. 2022. 基于星载激光雷达数据和光学遥感数据的云南省森林冠层高度反演研究. 昆明: 云南师范大学) [DOI: 10.27459/d.cnki.gynfc.2022.000334]
- Liu Y J, Zhu J J and Fu H Q. 2020. Underlying topography estimation over forest using dual-polarized interferometric SAR data. *Engineering of Surveying and Mapping*, 29(5): 20-26 (刘雅佳, 朱建军, 付海强. 2020. 双极化干涉SAR林下地形反演. *测绘工程*, 29(5): 20-26) [DOI: 10.19349/j.cnki.issn1006-7949.2020.05.004]
- Liu Z W, Zhu J J, Fu H Q, Zhou C and Zuo T Y. 2020. Evaluation of the vertical accuracy of open global DEMs over steep terrain regions using ICESat data: a case study over Hunan Province, China. *Sensors*, 20(17): 4865 [DOI: 10.3390/s20174865]
- Lu W Q. 2019. The Method of Underlying Topography Estimation over Forest Areas Based on Polarimetric SAR Interferometry. Qingdao: Shandong University of Science and Technology (卢文青. 2019. 极化干涉SAR林下地形估计方法. 青岛: 山东科技大学)
- Luo H, Guo S Y and Bao W M. 2016. Random forest model and application of arch dam's deformation monitoring and prediction. *South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology*, 14(6): 116-121, 158 (罗浩, 郭盛勇, 包为民. 2016. 拱坝变形监测预报的随机森林模型及应用. *南水北调与水利科技*, 14(6): 116-121, 158) [DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkk.2016.06.020]
- Main-Knorn M, Pflug B, Louis J, Debaecker V, Müller-Wilm U and Gascon F. 2017. Sen2Cor for Sentinel-2//Proceedings of SPIE 10427, Image and Signal Processing for Remote Sensing XXIII. Warsaw: SPIE: 1042704. [DOI: 10.1117/12.2278218]
- Meadows M and Wilson M. 2021. A comparison of machine learning approaches to improve free topography data for flood modelling. *Remote Sensing*, 13(2): 275 [DOI: 10.3390/rs13020275]
- O'Loughlin F E, Paiva R C D, Durand M, Alsdorf D E and Bates P D. 2016. A multi-sensor approach towards a global vegetation corrected SRTM DEM product. *Remote Sensing of Environment*, 182: 49-59 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.04.018]
- Pedregosa F, Varoquaux G, Gramfort A, Michel V, Thirion B, Grisel O, Blondel M, Prettenhofer P, Weiss R, Dubourg V, Vanderplas J, Passos A, Cournapeau D, Brucher M, Perrot M and Duchesnay É. 2011. Scikit-learn: machine learning in Python. *The Journal of Machine Learning Research*, 12: 2825-2830
- Peng X, Wang Y J, Long S L, Pan X, Xie Q H, Du Y N, Fu H Q, Zhu J J and Li X W. 2021. Underlying topography inversion using TomoSAR based on non-Local means for an L-Band airborne dataset. *Remote Sensing*, 13(15): 2926 [DOI: 10.3390/rs13152926]
- Prasetyo S Y J, Sulisty W, Basuki P N, Hartomo K D and Hasiholan B. 2022. Computer model of Tsunami vulnerability using machine learning and multispectral satellite imagery. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 11(2): 986-997 [DOI: 10.11591/eei.v11i2.3372]
- Quegan S, Le Toan T, Chave J, Dall J, Exbrayat J F, Minh D H T, Lomas M, D'Alessandro M M, Paillou P, Papanthassiou K, Rocca F, Saatchi S, Scipal K, Shugart H, Smallman T L, Soja M J, Tebaldini S, Ulander L, Villard L and Williams M. 2019. The European Space Agency BIOMASS mission: measuring forest above-ground biomass from space. *Remote Sensing of Environment*, 227: 44-60 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.03.032]
- Reuter H I, Nelson A and Jarvis A. 2007. An evaluation of void-filling interpolation methods for SRTM data. *International Journal of Geographical Information Science*, 21(9): 983-1008 [DOI: 10.1080/13658810601169899]
- Rizzoli P, Martone M, Gonzalez C, Wecklich C, Borla Tridon D, Bräutigam B, Bachmann M, Schulze D, Fritz T, Huber M, Wessel B, Krieger G, Zink M and Moreira A. 2017. Generation and performance assessment of the global TanDEM-X digital elevation model. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 132: 119-139 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2017.08.008]
- Rossi C, Rodriguez Gonzalez F, Fritz T, Yague-Martinez N and Eineder M. 2012. TanDEM-X calibrated raw DEM generation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 73: 12-20 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2012.05.014]
- Roy D P, Li J, Zhang H K, Yan L, Huang H Y and Li Z B. 2017. Examination of Sentinel-2A multi-spectral instrument (MSI) reflectance anisotropy and the suitability of a general method to normalize MSI reflectance to nadir BRDF adjusted reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 199: 25-38 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.019]
- Schlund M, Baron D, Magdon P and Erasmis S. 2019. Canopy penetration depth estimation with TanDEM-X and its compensation in temperate forests. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 147: 232-241 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2018.11.021]
- Tang X M, Li S J, Li T, Gao Y D, Zhang S B, Chen Q F and Zhang X. 2021. Review on global digital elevation products. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(1): 167-181 (唐新明, 李世金, 李涛, 高延东, 张书毕, 陈乾福, 张祥. 2021. 全球数字高程产品概述. 遥

- 感学报, 25(1): 167-181 [DOI: 10.11834/jrs.20210210]
- Wang H Q, Fu H Q, Zhu J J, Liu Z W, Zhang B, Wang C C, Li Z W, Hu J and Yu Y N. 2021. Estimation of subcanopy topography based on single-baseline TanDEM-X InSAR data. *Journal of Geodesy*, 95(7): 1-19 [DOI: 10.1007/s00190-021-01519-3]
- Wang Y, Zhang Z Y, Ni W J, Liu J L and Zhang D F. 2017. Comparison of filter algorithms and combination analysis for DEM extracting based on airborne laser scanning point clouds. *Journal of Beijing Forestry University*, 39(12): 25-35 (汪焱, 张志玉, 倪文俭, 刘见礼, 张大凤. 2017. 基于机载 LiDAR 数据的林下地形提取算法比较与组合分析. *北京林业大学学报*, 39(12): 25-35) [DOI: 10.13332/j.1000-1522.20170300]
- Wecklich C, Gonzalez C and Rizzoli P. 2017. TanDEM-X height performance and data coverage//Proceedings of 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Fort Worth: IEEE: 4088-4091 [DOI: 10.1109/IGARSS.2017.8127898]
- Wendi D, Liong S Y, Sun Y B and Doan C D. 2016. An innovative approach to improve SRTM DEM using multispectral imagery and artificial neural network. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 8(2): 691-702 [DOI: 10.1002/2015MS000536]
- Wessel P, Luis J F, Uieda L, Scharroo R, Wobbe F, Smith W H F and Tian D. 2019. The generic mapping tools version 6. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20(11): 5556-5564 [DOI: 10.1029/2019GC008515]
- Yamazaki D, Sato T, Kanae S, Hirabayashi Y and Bates P D. 2014. Regional flood dynamics in a bifurcating mega delta simulated in a global river model. *Geophysical Research Letters*, 41(9): 3127-3135 [DOI: 10.1002/2014GL059744]
- Yue L W, Shen H F, Yuan Q Q and Liu X G. 2021. A multi-source DEM Point-Surface fusion model Based on deep belief network. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 46(7): 1090-1097 (岳林蔚, 沈焕锋, 袁强强, 刘修国. 2021. 基于深度置信网络的多源 DEM 点面融合模型. *武汉大学学报(信息科学版)*, 46(7): 1090-1097) [DOI: 10.13203/j.whugis20190238]
- Zebker H A and Goldstein R M. 1986. Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 91(B5): 4993-4999 [DOI: 10.1029/JB091iB05p04993]
- Zhang C, Zhu J J and Fu H Q. 2021. Sub-canopy topography inversion based on ICESat-2 and TanDEM-X DEM. *Engineering of Surveying and Mapping*, 30(1): 60-65 (张晨, 朱建军, 付海强. 2021. 基于 ICESat-2 数据及 TanDEM-X DEM 的林下地形反演. *测绘工程*, 30(1): 60-65) [DOI: 10.19349/j.cnki.issn1006-7949.2021.01.010]
- Zhao R, Li Z W, Feng G C, Wang Q J and Hu J. 2016. Monitoring surface deformation over permafrost with an improved SBAS-InSAR algorithm: with emphasis on climatic factors modeling. *Remote Sensing of Environment*, 184: 276-287 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.07.019]
- Zheng T T, Chen C F and Zhang Z J. 2021. A weighted fusion method of SRTM and ASTER based on machine learning. *Remote Sensing Information*, 36(5): 148-154 (郑婷婷, 陈传法, 张照杰. 2021. SRTM 与 ASTER 加权融合的机器学习方法. *遥感信息*, 36(5): 148-154) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3177.2021.05.020]
- Zhou Y S, Li X, Zheng D H, Li Z W, An B S, Wang Y Z, Jiang D C, Su J B and Cao B. 2021. The joint driving effects of climate and weather changes caused the Chamoli glacier-rock avalanche in the high altitudes of the India Himalaya. *Science China Earth Sciences*, 64(11): 1909-1921 (周玉杉, 李新, 郑东海, 李志伟, 安宝晟, 汪赢政, 姜德才, 苏建宾, 曹斌. 2021. 气候变化和异常天气共同导致印度杰莫利冰-岩崩塌. *中国科学: 地球科学*, 51(12): 2112-2125) [DOI: 10.1007/s11430-021-9844-0]
- Zhu J J, Fu H Q and Wang C C. 2018. Methods and research progress of underlying topography estimation over forest areas by InSAR. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 43(12): 2030-2038 (朱建军, 付海强, 汪长城. 2018. InSAR 林下地形测绘方法与研究进展. *武汉大学学报(信息科学版)*, 43(12): 2030-2038) [DOI: 10.13203/j.whugis20180266]
- Zink M, Moreira A, Hajnsek I, Rizzoli P, Bachmann M, Kahle R, Fritz T, Huber M, Krieger G, Lachaise M, Martone M, Maurer E, and Wessel B. 2021. TanDEM-X: 10 years of formation flying bistatic SAR interferometry. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14: 3546-3565 [DOI: 10.1109/JSTARS.2021.3062286]

Sub-canopy topography extraction via TanDEM-X DEM combined with Sentinel-2 multispectral data

LIU Zhiwei¹, ZHAO Rong², ZHU Jianjun¹, FU Haiqiang¹, ZHOU Cui³, ZHOU Yi¹

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

2. School of Civil Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China;

3. College of Science, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

Abstract: The Digital Elevation Model (DEM) is one of the most important data sources for various scientific studies and applications. Currently, one important data source for large-scale DEM generation originates from the TerraSAR-X add-on for digital elevation measurement (TanDEM-X) mission, which provides bistatic interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) data with high spatial

resolution (12 m) at the global scale. However, in forest areas, the retrieval of the subcanopy topography using TanDEM-X InSAR data still faces notable challenges because of the effects of the forest scattering process on InSAR height measurements and the limited penetration capability of X-band's signals, causing the measured elevation to be between the ground surface and the top of the tree canopy. Although SAR signals with long wavelength has strong penetrability in the forest layer, subcanopy topography still cannot be measured due to the volume scattering effect from tree canopies or trunks. In addition, the missing space-borne PolInSAR or TomoSAR data pose another limitation for subcanopy topography estimation. In this study, a new method to extract subcanopy topography over forested areas is proposed. The method uses a combination of TanDEM-X DEM and Sentinel-2 multispectral data. TanDEM-X DEM and the multiband data of Sentinel-2 are regarded as the input variables, while the high-precision ground elevation data was considered as the target variable. Subsequently, the random forest fitting method is used to construct the subcanopy topography estimation predictive model. According to the obtained model, we can extract a large-scale subcanopy topography over the areas without reference data. Results show that the subcanopy topography derived via the proposed method has an RMSE of 3.7 and 7.78 m for the two forest sites, representing an improvement of approximately 76% and 63%, respectively, in comparison with the original TanDEM-X DEM. The experimental results also show that the resultant subcanopy topography can maintain more detailed topographic information. All these findings indicate that based on publicly available data, the proposed method has great potential for extracting large-scale subcanopy topography at high spatial resolutions.

Key words: remote sensing, TanDEM-X, Sentinel-2, machine learning, Digital Elevation Model (DEM), sub-canopy topography

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 42104016, 41820104005, 42074016, 42030112); Hunan Postgraduate Innovation Project (No. CX20210278); Fundamental Research Funds for the Central South University (No. 2021zzts0260); China Scholarship Council Foundation to the Joint Ph.D. Studies at the University of Alicante (No. 202106370125)