

联合多时相Radarsat-1和Sentinel-1 SAR数据的树高反演

马智峰, 石志成, 王金峰, 孙文凯

内蒙古电力集团有限责任公司乌兰察布电业局, 内蒙古 乌兰察布
Email: 190218159@qq.com, 553234854@qq.com, 18081810285@163.com, 374572130@qq.com

收稿日期: 2021年1月6日; 录用日期: 2021年4月16日; 发布日期: 2021年4月23日

摘要

森林是陆地地表生态圈的重要组成部分, 树高在一定程度上反映了森林生态系统的多样性与稳定性。为了提升广域的树木测高的可靠性与处理效率, 本文提出了一种多源数据的树高反演方法。为验证算法的可行性, 本文选取内蒙古乌兰察布市为典型实验区, 利用2景2017年Sentinel-1影像和2景2004年RaderSAT-1影像开展典型性验证, 根据冠层顶面数字模型(TCDSM)生成的DEM, 选取林区20个采样点, 经试验, sentinel-1的原位和估计高度之间的平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE)分别为1.3和1.34, 结果可靠性强, 具有一定的实践价值, 本文提出的方法及研究结果可为林业调查、基础建设等领域的相关研究及应用提供参考。

关键词

数字高程模型, 合成孔径雷达, 树高, 干涉技术

Combined Multi-Temporal Radarsat-1 and Sentinel-1 SAR Data Inversion Forest Tree Height

Zhifeng Ma, Zhicheng Shi, Jinfeng Wang, Wenkai Sun

Inner Mongolia Electric Power Group Co., Ltd. Wulanchabu Electric Power Bureau, Wulanchabu Inner Mongolia
Email: 190218159@qq.com, 553234854@qq.com, 18081810285@163.com, 374572130@qq.com

Received: Jan. 6th, 2021; accepted: Apr. 16th, 2021; published: Apr. 23rd, 2021

文章引用: 马智峰, 石志成, 王金峰, 孙文凯. 联合多时相 Radarsat-1 和 Sentinel-1 SAR 数据的树高反演[J]. 测绘科学技术, 2021, 9(2): 59-66. DOI: 10.12677/gst.2021.92007

Abstract

Forests are an important part of the terrestrial ecosystem, and tree height reflects the diversity and stability of forest ecosystems to a certain extent. In order to improve the reliability and processing efficiency of wide-area tree height measurement, this paper proposes a tree height inversion method based on multi-source data fusion. In order to verify the feasibility of the algorithm, this paper selects Ulanqab City in Inner Mongolia as a typical experimental area, using 2 scenes of 2017 Sentinel-1 images and 2 scenes of 2004 RaderSAT-1 images to carry out typical verification, according to the digital model of the canopy top The DEM generated by (TCDSM) selected 20 sampling points in the forest area. After testing, the average absolute error (MAE) and root mean square error (RMSE) between the in-situ and estimated height of sentinel-1 were 1.3 and 1.34, respectively. The results are highly reliable and have certain practical value. The methods and research results proposed in this article can provide references for related research and applications in forestry investigation, infrastructure construction and other fields.

Keywords

Digital Elevation Model, Synthetic Aperture Radar, Tree Height, Interference Technology

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

森林作为一种自然资源,在全球碳循环、生物量估计、水文调节和水土流失等方面扮演着重要的角色,满足了人类、动物和环境保护的各种需要。对于森林管理和碳储量评价而言,树高是一个重要的生物物理参数,与森林生物量和碳循环密切相关。传统的树高调查方法通常是在样方上进行抽样统计,不能满足大区域或全球尺度上森林变化和碳循环研究需求。为了解决此类问题,遥感技术成为了森林资源的调查关键工具,并且在大面积森林信息获取上遥感技术已成为大势所趋。

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Rader, SAR)是一种高分辨率微波成像系统,通过多普勒锐化和脉冲压缩,获得观测图像沿传感器运动方向和视线方向上的二维高分辨率斜距图像[1] [2] [3]。利用SAR系统提取树高的技术主要通过计算的数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)差分获得,目前常用的DEM获取方法包括雷达立体测量技术(Synthetic Aperture Rader Radergrametry)、合成孔径雷达干涉测量(Interferometry Synthetic Aperture Rader, InSAR)技术、极化SAR (Polarimetric SAR, PolSAR)技术[4] [5] [6] [7]。已有研究表明,计算的高程精度与所使用的方法和类型有很大的关系,最常用的是InSAR法提取DEM,由于InSAR能够提供全天时、全天候影像的能力,并能快速生成高分辨地形模型[8] [9],因此,本文中使用的InSAR技术反演树高。

TerraSAR-X和Tandem-X传感器X波段极化SAR数据已广泛应用于PolSAR技术估算落叶林生物量和树高[10]。Persson和Fransson对比分析了利用InSAR和机载激光雷达点云数据估算森林参数的方法。Balzter等研究了InSAR结合激光雷达点云数据估算冠层高度的方法。

利用InSAR技术反演森林树高是一个新的且具有挑战性的领域,重复通道合成孔径雷达的主要不确定因素是森林地面和植被层的时间变化和体散射效应。森林区域InSAR的相干性随时间减小,树高的干

涉度越高, 植被的相干性越高, 反之, 树高的干涉度越低, 地面的相干性越高。然而, 相干性还取决于其他各种因素(时间基线、几何基线、两次获取的植被冠层变化、降雨引起的地表湿度和大气效应)。本文利用多时相 Radarsat-1 和 Sentinel-1SAR 干涉数据对乌兰察布地区进行树高估计和验证。通过多时相 SAR 数据减去相对意义上的地面高度, 得到冠层顶部数字地表模型, 从而得到树高。

2. 原理与方法

2.1. 干涉模型

针对获取的 SAR SLC 影像运用 ERDAS 进行干涉处理, 首先根据主、副影像进行配准, 从两幅 SAR 影像中识别出少量的同名点, 基于同名点间的像素坐标偏移量, 通过影像平移使得主、副影像基本对应地面同一分辨单元。为了保证相位的相关性和干涉测量的精度, 配准精度要求达到子像素级, 实现主、副影像同名像点精确对应于地面同一分辨单元。

经上述处理后, 将主、副影像对应像元的相位值进行差分, 得到一个相位差图, 通常称为干涉相位图, 干涉相位是参考椭球、大气延迟、地形起伏和地表形变贡献和的体现, 干涉相位可以表示为:

$$\psi = \varphi_{ref} + \varphi_{top} + \varphi_{def} + \varphi_{am} + \varphi_{noi} \quad (1)$$

其中, ψ 为干涉相位, φ_{ref} 为参考椭球面相位, φ_{top} 为地形相位, φ_{def} 为形变相位, φ_{am} 为大气相位, φ_{noi} 为噪声相位。

参考椭球面相位是参考椭球面本身引起的干涉相位, 在 InSAR 干涉相位图中, 参考椭球面相位占主要分量, 表示为:

$$\varphi_{ref} = -\frac{4\pi}{\lambda}(r_1 - r_2) \quad (2)$$

其中, λ 为波长, r_1, r_2 为主、副影像的斜距。

由于 SAR 观测的实际不在参考椭球面上, 而在具有一定大地高 h 的地面点, 此时干涉相位应包含大地目标高引起的地形相位, 可表示为:

$$\varphi_{top} = -\frac{4\pi B_{\perp} h}{\lambda R_1 \sin \theta} \quad (3)$$

上式中, B_{\perp} 表示为垂直于视线方向的基线分量, R_1 表示为卫星雷达在主影像位置到目标点观测成像时的斜距, θ 表示为雷达侧视角。

卫星在两次成像时, 如果地表发生了形变, 将会造成地形形变相位。

$$\varphi_{def} = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r \quad (4)$$

其中 Δr 表示观测目标位移造成的沿雷达视线方向的斜距变化量。

随后, 依据相位模型去除参考椭球面相位, 得到对应地形信息的干涉相位, 经相位滤波和解缠处理便可获得直接反映地形起伏的地形相位, 最终得到干涉测量的 DEM。成像目标的地形高程 h 可表示为:

$$h = -\frac{\lambda}{4\pi} \frac{R_1 \sin \theta_0}{B \cos(\theta_0 - \alpha)} \cdot \varphi_{top} \quad (5)$$

式中, φ_{top} 表示地形干涉相位, h 表示观测目标高程, λ 表示雷达波长, α 为基线 B 与水平方向的夹角, R_1 为对应于此目标的主影像斜距, θ_0 表示对应于此目标的主影像雷达侧视角。图 1 为 InSAR 三维重建流程图。

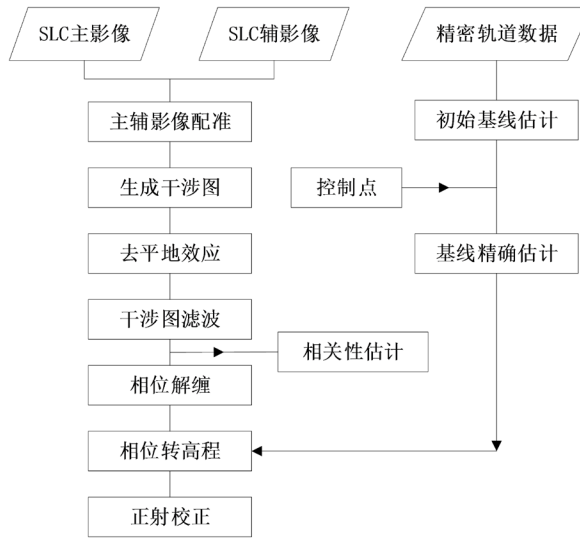


Figure 1. Flow chart of 3D InSAR reconstruction
图 1. InSAR 三维重建流程图

2.2. 树高估计

假设干涉测量方法估计的冠层顶部数字地表模型基本覆盖了冠层顶部，在此假设下，从推导的冠层顶部数字地表模型中减去真实地面高度以实现树木测高。

$$h_{tree} = H_{TCDSM} - H_{DEM} \quad (6)$$

其中， h_{tree} 表示树木高度， H_{TCDSM} 表示 InSAR 技术推导计算的冠层顶部高程， H_{DEM} 表示真实的地形高度。

为了保证估算的准确性，利用高度计和全球定位系统接收机分别测量树的高度和位置。高度计测量物体的高度、仰角和坡度。采用三种统计指标：平均绝对误差(MAE)、均方根误差(RMSE)和相关性指数(R)对干涉测量树高和地面实测树高进行比较。这些指标的定义为：

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i - s_i| \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - S_i)^2} \quad (8)$$

$$R = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - S_i)^2}{\sum_i (|X_i - \mu_s| + |S_i - \mu_s|)^2} \right] \quad (9)$$

$$\mu_s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i \quad (10)$$

其中 X_i ， S_i ， μ_s 分别为干涉结果值，地面测量树高和地面测量树高的均值。一致性指标 d 的变化范围从 0 到 1，无量纲，MAE 和 RMSE 越小，R 越高，结果精度越高。

3. 实验与结果分析

3.1. 研究区域

实验区域选择内蒙古乌兰察布市，如图 2 所示，该地区坐标为北纬 39.9°~43.0°，东经 111.9°~115.0°，

平均高程 1344 米,地势起伏南高北低,多低山丘陵,实验区树种主要为白桦。实验数据选用 Radarsat-1 2004 年 2、3 月两景升轨数据, Sentinel-1 2017 年 12 月两景降轨数据, 如表 1 所示。

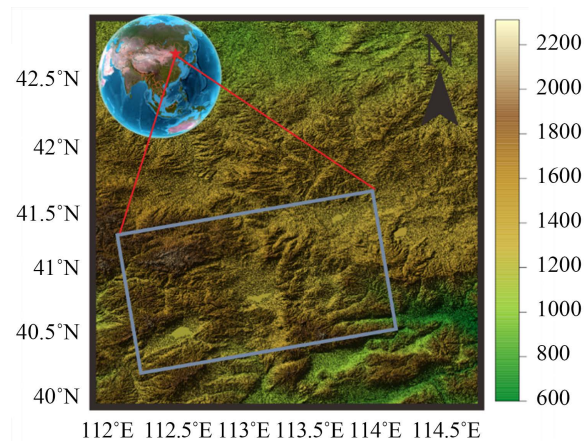


Figure 2. Study area diagram

图 2. 研究区域图

Table 1. Attribute information of satellite SAR image data

表 1. 卫星 SAR 影像数据属性信息

Sensor	日期 1_日期_2 (日~月~年)	升降轨	极化方式	⊥基线
Radarsat-1	07~03~2004 12~02~2004	升轨	HH	491 m
Sentinel-1	09~12~2017 21~12~2017	降轨	VV	90 m

3.2. 结果与结论

图 3 为 sentinel-1 干涉图与相干系数图, 由图中可以看出, 相干性与树高呈负相关关系, 树高越高, 相干性越低。图 4 为 InSAR 技术生成的 DEM 图, 表 2 为两种数据反演的树高和实测对比数据。计算可得, Radarsat-1 数据反演的树高 MAE 和 RMSE 分别为 1.48 m 和 1.53 米, Sentinel-1 数据反演的树高 MAE 和 RMSE 分别为 1.3 m 和 1.34 m。

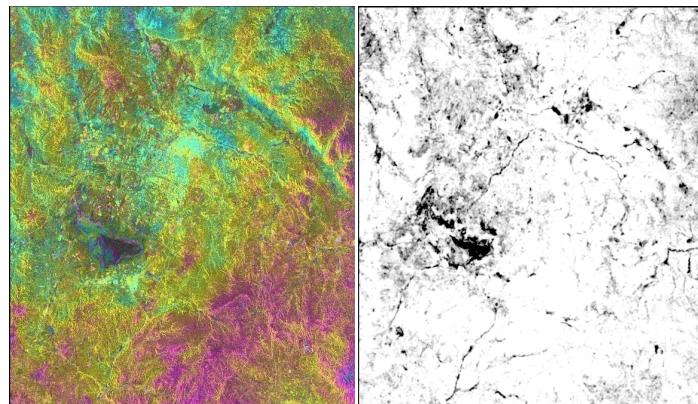


Figure 3. Sentinel interferogram and coherence coefficient graph

图 3. Sentinel 干涉图与相干系数图

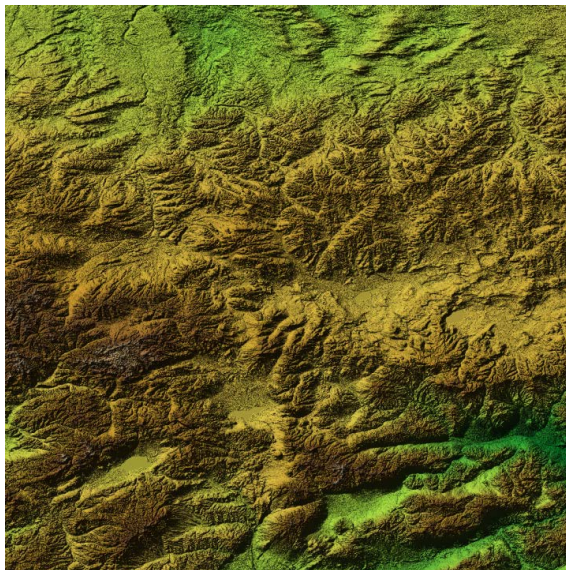


Figure 4. Sentinel DEM
图 4. Sentinel DEM 图

Table 2. InSAR tree height inversion results
表 2. InSAR 反演树高结果

序号	March 7, 2004		Dec 21, 2017	
	真实树高(m)	RS-1 所测树高(m)	真实树高(m)	S-1 所测树高(m)
1	6.5	7.6	10.12	11.19
2	21	22	21	23.03
3	12	10.5	12	13.56
4	16.85	15	18.85	19.64
5	16.9	18	16.9	18.67
6	17	15	9.5	10.62
7	12.5	14.6	21	19.76
8	11	12.7	20	18.86
9	9.6	10.65	17	15.83
10	8.5	6.76	16.5	15.47
11	7.5	8.64	13.5	12.09
均值	12.66818	12.85909	16.03364	16.24692

由表 2 和图 5 可知：由于 2004 年和 2017 年树木高度的变化，利用 Sentinel-1 和 Radarsat-1 估计的树木高度相关性有 0.486，这主要由于十多年来树木高度变化造成的，在 2004 年到 2017 年间，树木高度的变化超过 50%。

本文利用三个指标(MAE、RMSE、R)评估了冠层顶部数字地表模型反演树高的精度。值得注意的是 2004 年 Radarsat-1 数据反演的树高 MAE、RMSE、R 分别为 1.48 m、1.53 m 和 0.8862，但是在 2017 年 MAE 和 RMSE 分别减小到 1.3 m 和 1.34 m。结果表明，树木高度对 InSAR 计算的 DEM 有显著的影响，因此，使用重复通道合成孔径雷达可以提高丘陵地形上树高反演的精度。

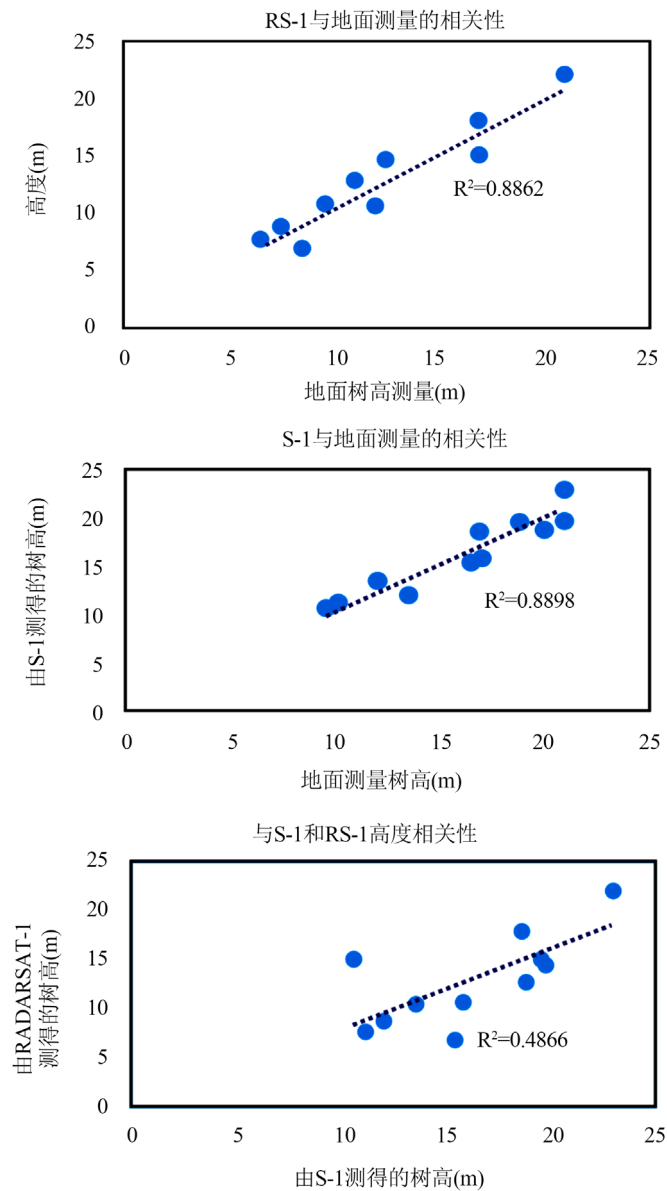


Figure 5. Correlation evaluation

图 5. 相关性评价

本文选取 Randarsat-1 和 Sentinel-1 数据联合反演树木高度，成功提取了实验区域的树木测高结果，对比验证实测数据表明反演精度较高，将 InSAR 技术与多源影像相结合，进一步减小了高精度树高估计的不确定性，为广域树木测高、林业调查、基础建设等领域的相关研究及应用提供了参考。

参考文献

- [1] 毛学刚, 姚瑶, 范文义. 基于 Landsat 长时间序列的森林扰动参数提取与树高估算[J]. 林业科学, 2019, 55(3): 79-87.
- [2] 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.
- [3] 周广益, 熊涛, 张卫杰, 杨健. 基于极化干涉 SAR 数据的树高反演方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2009,

- 49(4): 510-513.
- [4] 温若橙, 苏军明, 伍雅晴. 全极化干涉 SAR 反演树高的几种算法研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2017, 40(2): 212-214.
 - [5] 岳彩荣, 肖虹雁, 曹霸. 基于 PolInSAR 森林高度反演研究[J]. 西南林业大学学报, 2016, 36(3): 137-143.
 - [6] 李帆, 尚玉双, 杨兆臣. 极化干涉 SAR 森林树高提取算法的对比分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2016, 39(1): 94-96.
 - [7] 苏宝峰, 李锦伟, 靳标, 郭交. 非邻域相干系数估计的 PolInSAR 树高反演算法[J]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 268-273.
 - [8] Fu, W.X., Guo, H.D., Xie, C., Lu, Y.C. and Li, X.W. (2014) Forest Height Inversion Using Dual-pol Polarimetric SAR Interferometry. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **17**, Article ID: 012072. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/17/1/012072>.
 - [9] Xie, Q.H., Wang, C.C., Zhu, J.J., Fu, H.Q., Lopez-Sanchez, J.M. and Ballester-Berman, J.D. (2017) A Modified Dual-Baseline PolInSAR Method for Forest Height Estimation. *Remote Sensing*, **9**, 819. <https://doi.org/10.3390/rs9080819>
 - [10] Xie, Q.H., Wang, C.C., Zhu, J.J. and Fu, H.Q. (2015) Forest Height Inversion by Combining S-RVOG Model with Terrain Factor and PD Coherence Optimization. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, **44**, 686-693.