

引文格式:张永鑫,张王菲,姬永杰,等.星载X波段InSAR数据森林高度估测及反演研究[J].武汉大学学报(信息科学版),
2024,49(12):2279-2289.DOI:10.13203/j.whugis20220373



Citation: ZHANG Yongxin, ZHANG Wangfei, JI Yongjie, et al. Forest Height Estimation and Inversion of Satellite-Based X-band InSAR Data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, 49(12): 2279-2289. DOI: 10.13203/j.whugis20220373

星载X波段InSAR数据森林高度估测及反演研究

张永鑫¹ 张王菲¹ 姬永杰² 赵 含¹

¹ 西南林业大学林学院, 云南 昆明, 650224

² 西南林业大学地理与生态旅游学院, 云南 昆明, 650224

摘要: 基于 TerraSAR/TanDEM-X 星载单极化合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)数据, 研究森林高度估测算法选择、相干系数计算方法对估测结果在不同尺度下的影响。采用数字表面模型(digital surface model, DSM)与数字高程模型(digital elevation model, DEM)差分法(DSM-DEM 差分法)和基于 sinc 函数的 sinc 模型法进行森林高度反演, 分析 X 波段穿透性和不同相干性计算方法对估测结果的影响; 通过对比两种高度估测算法在不同尺度下的结果, 分析算法选择与尺度对估测结果的影响。实验结果表明, DSM-DEM 差分法会在一定程度上低估森林高度; 相干性计算方法对 sinc 模型的森林高度估测结果影响显著, 由传统方法计算的相干性得出的估测结果严重高估了森林高度, 而由仅考虑相位方法计算的相干性得出的估测结果与激光雷达获取的冠层高度模型一致性较好; 随着尺度的增大, 两种森林高度估测算法的精度均呈稳步提升。因此, 参数的修正、参数计算方法的选择等均会明显引起森林高度估测结果的不确定性; 两种估测算法均能得到具有一定可靠程度的森林高度, 但是基于相干性的 sinc 模型法不需要实测数据标定, 也不依赖于高精度 DEM, 具有更加广泛的实用价值; 由仅考虑相位方法计算的相干性得出的森林高度估测结果具有更高的精度, 更适用于 sinc 模型的森林高度反演。

关键词: 森林高度反演; 合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR); 相干性; sinc 模型

中图分类号: P237

文献标识码: A

收稿日期: 2023-04-14

DOI: 10.13203/j.whugis20220373

文章编号: 1671-8860(2024)12-2279-11

Forest Height Estimation and Inversion of Satellite-Based X-band InSAR Data

ZHANG Yongxin¹ ZHANG Wangfei¹ JI Yongjie² ZHAO Han¹

¹ College of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China

² School of Geography and Ecotourism, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China

Abstract: **Objectives:** Based on TerraSAR/TanDEM-X spaceborne single-polarization interferometric synthetic aperture radar (InSAR) data, this paper investigates the impacts of algorithm selection and coherence coefficient calculation methods on forest height estimation across different scales using InSAR technology. **Methods:** The DSM (digital surface model) -DEM (digital elevation model) differential algorithm and the sinc model are used for forest height inversion. The effects of X-band penetration on the forest height estimation results are analyzed based on the DSM-DEM differential algorithm, and the effects of the traditional coherence calculation method and the phase-only coherence calculation method on the estimation results are analyzed based on the sinc model. The effects of different scales on the forest height estimation results of the above two estimation algorithms are also clarified. **Results:** The experimental results

基金项目: 国家自然科学基金(32160365, 31860240, 42161059); 兴滇人才计划项目(80201444)。

第一作者: 张永鑫, 硕士, 研究方向为微波遥感在农业和林业中的应用。yongxinzhang2021@163.com

通讯作者: 姬永杰, 博士。jiyongjie@live.cn

show that the DSM-DEM differential algorithm underestimates the forest height, and the coherence calculation method has a significant effect on the forest height estimation results of the sinc model. The estimation results derived from the coherence calculated by the traditional method overestimate the forest height, while the estimation results derived from the coherence calculated by the coherence-only method are in good agreement with the light detection and ranging acquired canopy height model. The two forest height estimation algorithms show a steady improvement in the estimation accuracy with the increasing scales. **Conclusions:** The uncertainty of forest height estimation results can be significantly affected by the adjustment of methods, parameters, and the choice of parameter calculation methods. Both methods achieve reliable forest height estimates, but the coherence-based sinc model has broader practical value because it does not require real data calibration or high-precision DEM. Furthermore, the phase-only coherence calculation yields higher accuracy and is more suitable for forest height inversion in the sinc model.

Key words: forest height estimation; interferometric synthetic aperture radar (InSAR); coherence; sinc model

森林参数是碳储量和陆地生态系统碳循环分析的基础,是生态学和全球变化研究的重要内容之一,森林高度则是森林参数中最为重要的参数之一,快速准确地大面积获取森林高度对及时、动态地掌握森林长势、森林采伐、森林退化及森林死亡率具有重要的意义^[1]。传统的森林高度测量方法主要依靠人工选点、费时费力,且不易有效实施。星载合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)技术不受云雾天气的影响,具有全天时、全天候成像的优势^[2],同时对植被垂直结构敏感,在区域尺度获取森林高度极具潜力^[3-5]。时间失相干是制约 InSAR 技术森林高度估测的主要因素之一,2007 年发射的 X 波段 TerraSAR 卫星与 2010 年发射的 TanDEM 卫星以相隔约 250 m 的距离同步飞行,可以提供几乎无时间失相干的 InSAR 数据,为采用 InSAR 技术进行森林高度估测提供了有力的数据支撑^[6-7]。

采用 InSAR 进行森林高度估测或反演,通常使用两类信息,即相位信息和干涉相干性信息^[8]。常见的数字表面模型(digital surface model, DSM)与数字高程模型(digital elevation model, DEM)差分法(DSM-DEM 差分法)采用相位信息,而 sinc 模型法则采用干涉相干性信息。DSM-DEM 差分法利用 X 波段较弱的穿透性,可以获得包含植被高度的 DSM 数据,与精确的 DEM 数据作差值后可得到植被高度信息。sinc 模型中体散射去相干与森林高度符合 sinc 函数关系,故被称为 sinc 模型,其对随机体地表(random vegetation over ground, RVoG)简化,假设地表散射贡献和森林内部的平均消光系数为 0,仅考虑森林体散射,从而建立干涉相干系数与森林高度

的关系,进而采用干涉相干性进行森林高度的反演^[8-12]。

国内外学者针对上述两种方法均进行了探索,已有研究表明,两种方法均受到区域高精度 DEM 获取困难的限制,其中 DSM-DEM 差分法依赖高精度 DEM 来获取地形信息,sinc 模型依赖高精度 DEM 来计算垂直有效波数^[13]。通过对比不同精度的 DEM 对两种方法估测结果的影响发现,DEM 精度对 sinc 模型的反演结果影响较小,在像元尺度较小(<50 m)时,DSM-DEM 差分法的估测结果略优于 sinc 模型反演结果,且由于 X 波段的穿透性,采用差分法估测的森林高度结果会呈现整体上的偏低^[5,13]。文献[14]采用机载 X 波段 HH 极化 InSAR 数据对比两种方法,结果表明,sinc 模型可以取得更优的精度,同时肯定了其对 DEM 数据的低依赖性;文献[15]研究表明,星载 TerraSAR/TanDEM-X InSAR 数据中,单极化 InSAR 数据由于具有相比双极化数据更优的信噪比,因此仅采用单极化 InSAR 数据和 sinc 模型即可取得较好的反演结果;文献[16]使用 DSM-DEM 差分法的估测结果,表明了单极化 InSAR 数据在高精度森林高度估测中的潜力;文献[17]对比了 sinc 模型在北方针叶林和温带雨林中森林高度估测能力的差异,表明该模型在北方针叶林的高度反演中精度较好;文献[18]对比了季节对 sinc 模型的森林高度估测结果的影响,得出落叶树冬季数据估测结果优于夏季数据,而常绿树则受季节影响不明显;文献[19]将 sinc 模型参数化,提出了 C-sinc 模型,使其适应不同季节和林分条件,进而获得更高精度的估测结果。

已有研究表明了现有两种方法在森林高度估测中的可行性,同时也探索了用于地理编码和

垂直有效波数计算的 DEM 精度、获取数据的季节、不同森林类型等对估测结果的影响。此外,也有研究对模型进行优化以期获得更好的估测结果。但是对于 DSM-DEM 差分法中 X 波段穿透性引起的森林高度的低估程度、校正后的效果以及 sinc 模型中相干性系数计算方法对其高度估测结果的影响等并未见相应的研究。此外,采用星载 X 波段 InSAR 数据两种模型估测结果的对比也未见深入研究。鉴于此,本文以中国内蒙古自治区根河生态站的北方针叶林为研究对象,探索估测方法选择、相干系数计算差异等对森林高度估测结果影响程度,同时分析了像元尺度对估测结果的影响。

1 研究区概况与数据

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区根河生态站,区域范围为 $120^{\circ}12'E \sim 122^{\circ}55'E$, $50^{\circ}20'N \sim 52^{\circ}30'N$, 面积约 102 km^2 , 为大兴安岭山地地貌, 海拔 $800 \sim 1\,000 \text{ m}$, 地形起伏相对较小, 平均坡度 8° , 最大坡度 30° (图 1)。根河生态站的森林覆盖率为 75% , 主要树种有兴安落叶松、樟子松、白桦和山杨等, 郁闭度在 $0.38 \sim 0.88$ 之间, 平均树高约为 20 m 。

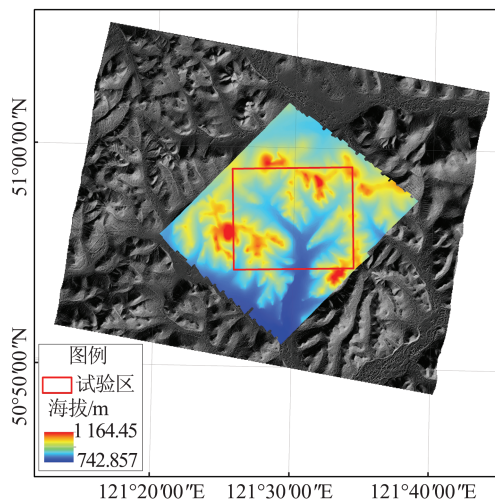


图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of the Study Area

1.2 InSAR 数据及预处理

TerraSAR/TanDEM-X 是德国宇航中心发射的 X 波段 (波长为 3.1 cm) 雷达干涉测量系统, 由 TerraSAR-X 与 TanDEM-X 两颗卫星组成, 两者在轨道中以一定间距同步飞行, 由该系统可获得高精度、无时间失相干的 InSAR 数据。通过德

国宇航中心的科学申请计划 (Proposal ID: XTI_VEGE7124), 本文获取了研究区一景 InSAR 数据, 详细参数见表 1。

获取的 InSAR 数据的主辅影像配准由德国宇航中心完成, 配准精度达到亚像元级。其他预处理流程包括干涉图生成、平地效应去除、干涉相位解缠、相位高程转换和地理编码等, 详细流程见文献[13]。

表 1 InSAR 影像参数

Tab. 1 Parameters of InSAR Image

参数	数值
获取日期	2014-02-28
雷达频率/GHz	9.65
极化方式	HH
空间有效基线/m	138.48
中心入射角/(°)	43.4
模糊高/m	53.9
分辨率/m	3.3×2.6
像元尺度/m	1.8×2.0

1.3 LiDAR 数据及处理

机载激光雷达 (light detection and ranging, LiDAR) 可以成功获取森林高度并取得较高的精度。文献[20]利用机载 LiDAR 数据估算林分平均高, 估测结果与实测树高达到 91% 的显著相关; 文献[21]利用机载 LiDAR 数据反演林分平均高, 树高识别的决定系数为 0.78 ; 文献[22]基于机载 LiDAR 数据估测混交林、阔叶林、针叶林的林分平均高, 精度均在 90% 以上; 文献[23]利用机载 LiDAR 获取的森林冠层高度, 平均精度为 79.5% 。上述研究结果均表明, LiDAR 获取的冠层高度模型 (canopy height model, CHM) 估测精度可以满足区域森林调查与森林经营管理的需要, 因此本文使用基于 LiDAR 获取的 CHM 作为验证数据。

本文的 LiDAR 数据采用中国林业科学研究院资源信息研究所 LiChy 机载激光雷达集成系统, 于 2012 年 8 月—9 月获取。飞机飞行高度为 $2\,700 \text{ m}$, 波长为 $1\,550 \text{ nm}$, 获取的平均点云密度为 $5.6/\text{m}^2$ 。LiDAR 数据处理基于 TerraSolid 软件完成, 具体包括噪声点去除、地面点与非地面点分类、内插生成 DEM 和 DSM 数据。通过将内插生成的 DSM 与 DEM 数据作差值, 得到实验区的 CHM 数据, 三者的空间分辨率均为 5 m 。由于 CHM 代表森林冠层高度, 根据当地林分平均高, 本文中将 CHM 中小于 1 m 和大于 40 m 的异常像

元值进行了剔除^[22]。

2 研究方法

2.1 DSM-DEM 差分法

DSM-DEM 差分法中,DSM 的获取基于干涉测高原理^[24]。本文利用 X 波段 InSAR 获取的研究区 DSM 与 LiDAR 获取的高精度 DEM 相减,获得植被冠层高度,计算式为:

$$h_{\text{phase}} = \text{DSM}_{\text{InSAR}} - \text{DEM}_{\text{LiDAR}} \quad (1)$$

式中, h_{phase} 是散射中心相位差对应的森林高度; $\text{DSM}_{\text{InSAR}}$ 和 $\text{DEM}_{\text{LiDAR}}$ 分别为 InSAR 获取的 DSM 和 LiDAR 获取的 DEM。因为 X 波段在森林中具有一定的穿透性,所以 h_{phase} 会低于实际的森林高度 h_v ,需要对估测的结果进行高度补偿,计算式为:

$$h_v = b + a \times h_{\text{phase}} \quad (2)$$

式中, a 、 b 为回归方程的系数,其值采用训练样本通过最小二乘法拟合得到,本文中 $a=1.1445$, $b=2.1608$ 。

2.2 sinc 模型估测法

2.2.1 sinc 模型原理

因为大面积森林高度通过直接观测获取困难,而模型是定量遥感反演的基础,是连接遥感观测参数和地物散射过程的桥梁^[8],因此,结合相干散射模型实现极化复相干系数与森林参数间的前向建模,并进一步实现森林高度的后向反演,也是目前常用的森林高度估测方法^[25]。本文进行森林高度反演所采用的 sinc 模型是由 RVoG 模型简化而来,推导过程见文献^[26],具体近似式为:

$$h_v \approx \frac{2\pi}{k_z} \left(1 - \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \left(\left(\text{Re}(\gamma_v \cdot e^{i\varphi_0}) \right)^{0.8} \right) \right) \quad (3)$$

式中, k_z 为垂直有效波数; γ_v 为纯体散射失相干; φ_0 为地表相位; Re 为取 i 为实部、 j 为虚部、 e 为自然指数的函数。由式(3)可知,森林高度可以通过复相干系数中的纯体散射相干系数获得,因此复相干系数的计算直接影响 sinc 模型的森林高度估测结果。本文采用两种相干性计算方法,分析相干性计算方法对森林高度估测结果的影响。

2.2.2 相干性计算

相干性反映的是 InSAR 系统中主影像和辅影像之间的相关度^[6],一个干涉像对的主辅影像之间的相干性是评价干涉质量的重要参数。主辅影像之间相干性 γ 的计算式为:

$$\gamma = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M s_1(i_{n,m}, j_{n,m}) s_2(i_{n,m}, -j_{n,m})}{\sqrt{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M |s_1(i_{n,m}, j_{n,m})|^2 \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M |s_2(i_{n,m}, j_{n,m})|^2}} \quad (4)$$

式中, N 和 M 分别表示距离向和方位向的多视视数; n 和 m 分别表示窗口内像元的行号和列号; i 表示实部, j 表示虚部; $s_1(i_{n,m}, j_{n,m})$ 和 $s_2(i_{n,m}, j_{n,m})$ 分别表示主、辅影像在 (n, m) 处的像元值。

在实际应用中,干涉相干性的计算有两种方法,一种是传统方法,即采用多视后的强度图像计算相干性,另一种是仅考虑相位方法,即采用干涉相干图像计算相干性。已有研究表明,两种方式计算的相干性结果略有差异,因此会对采用相干性估测森林高度的 sinc 模型的估测结果造成影响。

假设主、辅影像的强度图像中振幅分别为 a_1 和 a_2 , ϕ 表示干涉相关图像中的干涉相位, k 表示第 k 个像元, K 表示估计窗口内的像元总数,则两种方法计算相干性 γ 的计算式分别为:

$$\gamma = \left| \sum_{i=1}^N \sqrt{a_{1,i} \cdot a_{2,i}} \right| \cdot e^{i\phi_i} / \sqrt{\sum_{i=1}^N a_{1,i} \cdot \sum_{i=1}^N a_{2,i}} \quad (5)$$

$$\gamma = \sum_{i=1}^N e^{i\phi_i} \quad (6)$$

由式(5)、式(6)计算得到的相干性是总的失相干,不能直接用来反演森林高度。由于总的失相干中除森林高度变化引起失相干 r_v 外,还包含了信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)失相干 γ_{SNR} 、基线失相干 γ_s 、处理过程造成的失相干 γ_{proc} 和时间失相干 γ_t ,即 $\gamma = \gamma_{\text{SNR}} \gamma_s \gamma_{\text{proc}} \gamma_t \gamma_v$ 。森林高度反演应用中需要剔除其他失相干因素的影响,然后代入式(3)进行森林高度的估测。由于 TanDEM-X 系统无时间基线,且获得的单视复数数据已经过亚像元级的配准和距离向、方位向的频谱滤波处理,因此可将 γ_s 、 γ_{proc} 和 γ_t 忽略(均假设为 1),数据中的失相干因素只剩下 γ_{SNR} ,经校正后可得到 γ_v ,计算式为:

$$\gamma_{\text{SNR}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \text{SNR}_{\text{TDX}}^{-1}} \sqrt{1 + \text{SNR}_{\text{TSX}}^{-1}}} \quad (7)$$

$$\gamma_v = \frac{\gamma}{\gamma_{\text{SNR}}} \quad (8)$$

式中, SNR_{TDX} 和 SNR_{TSX} 分别表示 TanDEM-X 与 TerraSAR-X 两颗卫星的信噪比水平。

2.3 森林高度的界定

森林高度的界定直接影响 InSAR 数据森林

高度估测结果评价的有效性,而已有文献中对于森林高度具有不同的释义,为了合理地评价森林高度的估测结果,本文结合差分法和 sinc 模型进行森林高度估测的物理基础,对两种方法估测结果验证的森林高度进行了界定及选取。DSM-DEM 差分法采用干涉测量原理,获得的森林高度为散射像元中主要散射体平均相位对应的高度,考虑到由 LiDAR 数据生成的 CHM 为林分的平均高,故选择 LiDAR 数据获得的 CHM 数据

(图 2(a))来验证 DSM-DEM 差分法估测精度。sinc 模型假设森林散射场景中消光系数为 0,采用相干性来计算森林高度,该高度受优势木影响较为明显,采用优势木高度 H100^[27-28]来进行该方法估测结果的验证。H100 是采用一定数量的较高单木的平均高度,在应用中其数量通常定为 100 株/hm²。本文将高分辨率 LiDAR CHM 经过 10 m×10 m 的最大值滤波,得到 LiDAR CHM H100 验证数据^[29](图 2(b))。

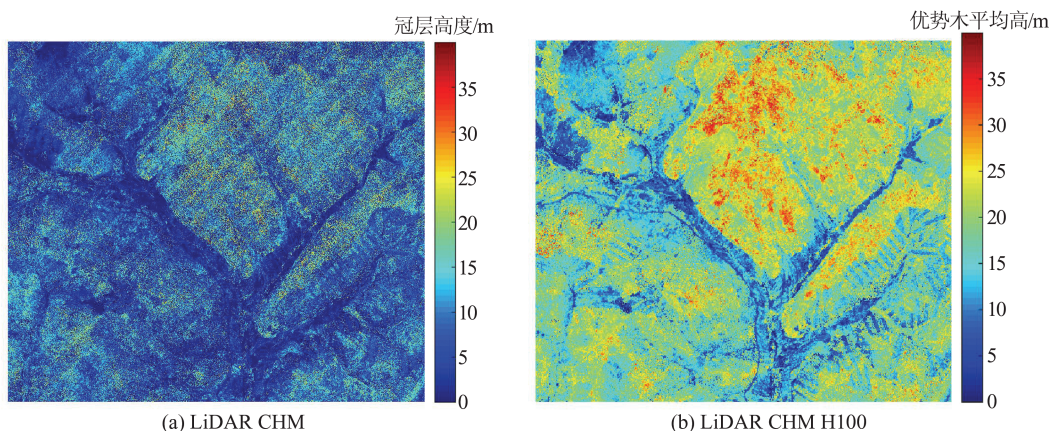


图 2 LiDAR 生成的树高

Fig. 2 Forest Height Generated by LiDAR

2.4 精度评价方法

本文以 LiDAR 获取的 CHM 数据及 CHM H100 数据对两种森林高度估测方法的估测结果进行验证。在研究区均匀选取了 357 个样本,其中 182 个作为训练样本,对 DSM-DEM 差分法结果进行校正,175 个作为验证样本,对校正后的 DSM-DEM 差分法结果进行验证,验证样本及训练样本的分布如图 3 所示。在 sinc 模型的验证中,357 个样本全部用于模型估测结果的验证。两种估测方法估测精度的验证采用决定系数 R^2 、均方根误差(root mean square error, RMSE)和精度 P 进行量化,3 种指标的计算式分别为:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (9)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (10)$$

$$P = \left(1 - \frac{\text{RMSE}}{\bar{y}}\right) \times 100\% \quad (11)$$

式中, \bar{y} 、 \hat{y} 分别为高度的平均值和估测值; y_i 为样本 i 高度。

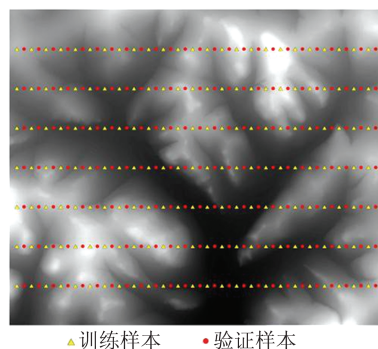


图 3 训练样本及验证样本位置

Fig. 3 Location of Samples for Training and Validating

3 实验与结果

本文采用§2.1和§2.2介绍的两种方法进行了森林高度的估测及反演研究。首先,针对 DSM-DEM 差分法反演结果会存在偏低的现象,采用线性模型对估测结果进行了补偿,并对比了补偿前后估测结果的精度变化;然后,对比了两种常用相干性计算方法,对由计算方法引起的相干性计算结果差异进行了分析,并在此基础上对比了两种相干性计算方法对 sinc 模型进行森林高度反演结果的影响;最后,对比了 DSM-DEM 差分法的估测结果及 sinc 模型的反演结果。由于已有研

究表明,像元尺度的选择对估测结果影响明显,且像元尺度在50 m左右变化时影响效果具有明显差异,因此本文中森林高度估测和反演结果的分析均采用30 m和60 m两种像元尺度。

3.1 DSM-DEM差分法估测结果

DSM-DEM差分法估测结果的精度依赖于InSAR获取的DSM和可获得的DEM精度,在给定DEM精度的条件下,DSM精度受到InSAR数据成像参数和森林结构特征的影响^[6]。本文中仅采用一景InSAR干涉对影像,研究区森林类型为北方针叶林,因此研究中森林高度的估测结果主要是受到X波段穿透性的影响。图4展示了标定补偿前和标定补偿后DSM-DEM差分法森林高度的估测结果。为了直观对比两者之间的差异,本文采用剖面线法对比了图4(a)、图4(b)中红色示意线位置估测结果与LiDAR CHM数据对应位置的森林高度(图4(c))。

LiDAR在研究区获取的CHM栅格数据中最大值、最小值、平均值分别为39.95 m、0 m、7.39 m;图4(a)中这3个值分别为29.9 m、0 m和4.33 m;

图4(b)中这3个值分别为29.98 m、0 m和6.77 m。对比上述数据的统计值可知,标定前的数据严重低估了森林高度,均值仅约为LiDAR CHM数据均值的一半;而标定后的数据均值则接近LiDAR CHM,差值仅为0.62 m。文献[7]也表明了X波段在温带、热带和北方森林中的穿透性,其中在北方森林中的最低,约为8 m左右,该地区森林的平均高度约为18 m,生物量平均值约为90 t/hm²。对比图4(a)和图4(b)可以发现,林地覆盖区域的像元值明显高于道路区域,但图4(a)中林地覆盖区的值多集中在4~10 m,而图4(b)中该区域的值则多集中在8~12 m。文献[30]采用C波段的研究结果,也表明了未标定的差分法的严重低估现象。文献[13]通过对差分法估测结果进行标定,使得研究区森林高度的估测正确率最高达到了85%。图4(c)中标定前、标定后及LiDAR CHM的剖面图比较也表明标定后的估测结果更接近LiDAR CHM的值,因此,在具体应用中,采用DSM-DEM差分方法进行森林高度估测时需要对于波段穿透性引起的低估现象进行补偿。

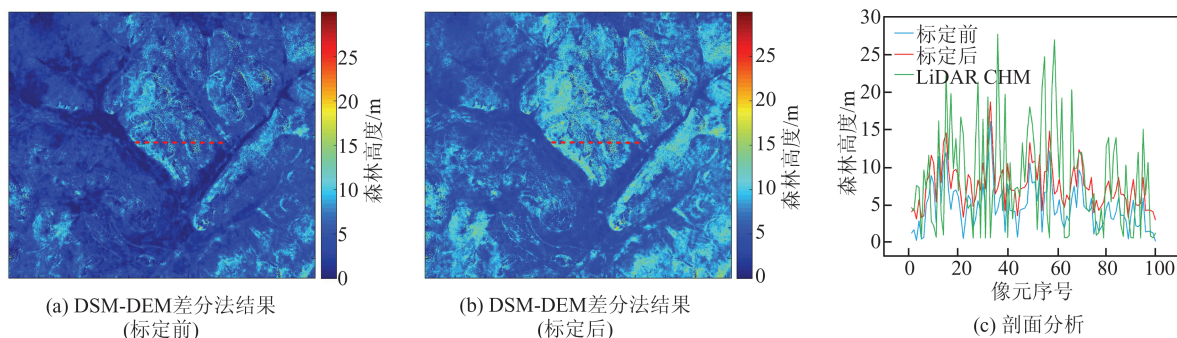


图4 森林高度反演结果

Fig. 4 Forest Height Inversion Results

为了进一步定量分析X波段穿透性对差分法森林高度估测结果的影响,本文采用175个验证样点对标定前、标定后数据与LiDAR CHM对应数据的散点图进行了分析(图5)。文献[5,13]的研究表明,当像元尺度小于50 m时,估测结果受到DEM、估测方法等影响加大,而当像元尺度大于50 m时,两者的影响则不太明显,因此本文中选取了30 m和60 m两种尺度进行估测结果的对比。由图5可知,大像元尺度的估测结果略优于小像元尺度的估测结果,这与文献[5,13]的研究结果基本一致。此外,标定前较标定后的估测精度有明显提高,在30 m像元尺度,精度增加了55.62%;而在60 m像元尺度,精度增加了54.16%,这表明尺度对增量的影响并不明显。由

于标定前后仅对估测值进行了统一的线性变化,因此,标定前后两种尺度下 R^2 值并未变化,且标定前后 R^2 的值均相对较高,分别为0.59和0.64,从侧面反映了差分法估测结果与LiDAR CHM的值有强相关性,文献[14,28,31]采用DSM-DEM差分法进行森林高度估测也肯定了这一点。

3.2 sinc模型反演结果

3.2.1 相干性计算结果

在星载TerraSAR/TanDEM-X InSAR提供的无时间失相干的单轨干涉相干性信息中,由于对高度变化敏感的体散射失相干占优,因此在森林高度估测中极具潜力^[15],现有一些研究发展了不同的模型采用相干性来反演森林高度。然而,

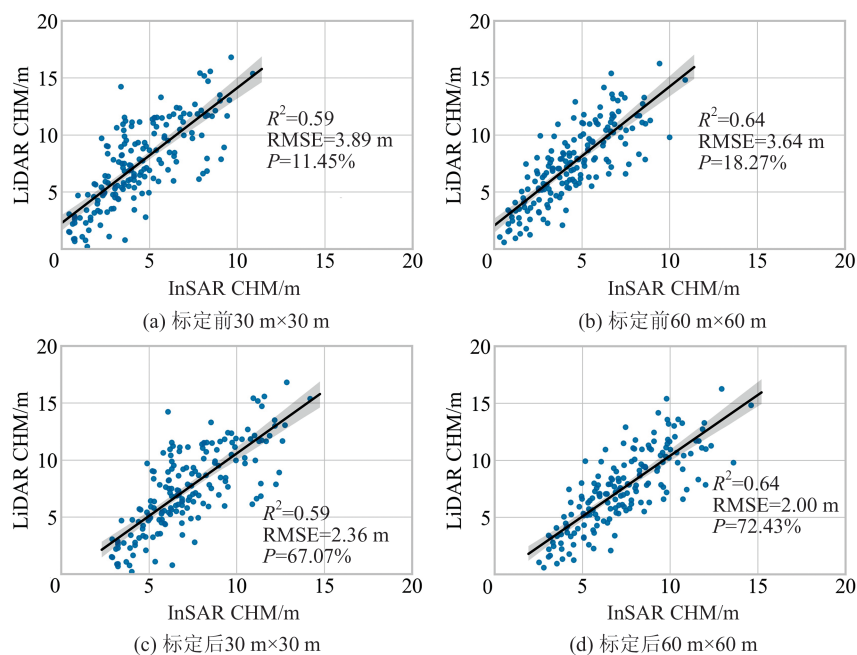


图 5 DSM-DEM 差分法反演森林高度

Fig. 5 Forest Height Inversion Results Using DSM-DEM Method

在具体的应用中,相干性的计算方法对采用相干性进行森林高度估测的结果有明显影响^[29]。为了分析计算方式对相干性计算结果的影响,本文定量和定性地对两种方法计算的相干性,结果如图 6 所示,其中图 6(a)和图 6(b)中的蓝色矩形框内为研究区。对比图 6(a)和图 6(b)可知,在研究区内外,仅相位方法计算的相干性均明显高于传统方法;在研究区内,传统方法计算的相干性集中在 0.6~0.7,而仅相位方法计算的相干性值则多集中在 0.7~0.8。图 6(c)和图 6(d)采用直方图的形式定量表征两种方法计算的相干性结果的分布情况,由图 6(c)和 6(d)可知,仅相位方法计算的相干性相比传统方法呈现出向高相干聚集的趋势。这可能是由于传统方法考虑了强度信息,而强度信息中又引入了额外的失相干因素。

3.2.2 森林高度反演结果

采用两种相干性计算方法用于 sinc 模型反演的森林高度,结果如图 7 所示。对比图 7(a)和图 7(b)可知,采用传统方法计算干涉相干性后反演的森林高度偏高,在非森林区域也呈现出高估的趋势;而采用仅相位方法计算干涉相干性后反演的森林高度,尽管与图 2(b)相比略有高估的现象,但相比图 7(a)的结果,该反演结果更接近 LiDAR CHM 提取 H100 的高度。从图 7(c)的剖面图中可以看出,仅相位方法的估测结果明显低于传统方法,且更接近 LiDAR CHM 的精度。这是由于对于 sinc 模型而言,在保持其他变量不变的

情况下,低相干性会得到较高树高,高相干性则得到较低树高。

图 8 则定量分析了两种尺度下采用两种方法计算的相干性及 sinc 模型的反演结果。由图 8 可知,两种方法计算相干性后 sinc 模型反演的森林高度结果相差不大,在 30 m 尺度 R^2 的差值为 0.03,在 60 m 尺度 R^2 的差值为 0.04,这也表明了 sinc 模型在森林高度反演中的有效性。然而,相干性计算方式不同引起的反演结果的 RMSE 值则相差较大,前者在 30 m 尺度为 8.69 m,在 60 m 尺度为 8.42 m;而后者在 30 m 尺度为 4.06 m,在 60 m 尺度降为 3.09 m。从 RMSE 值的对比分析可知,尺度对采用传统方法计算的相干性反演结果影响不明显,但是对仅相位方法计算的相干性反演结果则有明显影响。在采用仅相位方法的森林高度反演中,30 m 尺度的反演精度仅为 75.81%,而 60 m 尺度则提高为 81.66%。该结果略高于文献[13]在相同研究区相近尺度的反演精度(50 m×50 m, $R^2=0.48$; $P=71.38\%$),这一方面是由于本文使用的验证数据是 H100,而同样使用 H100 作为验证数据的文献[6]也取得了良好的反演精度;另一方面是由于文献[13]的研究采用的相干性计算方法为传统方法。此外,当 RVoG 模型的体散射失相干在推导至 sinc 模型时,考虑消光系数为 0,此时体散射失相干表达式中只有相位项在仅使用相位进行相干性计算时,将幅度项考虑为常数,该形式与体散射

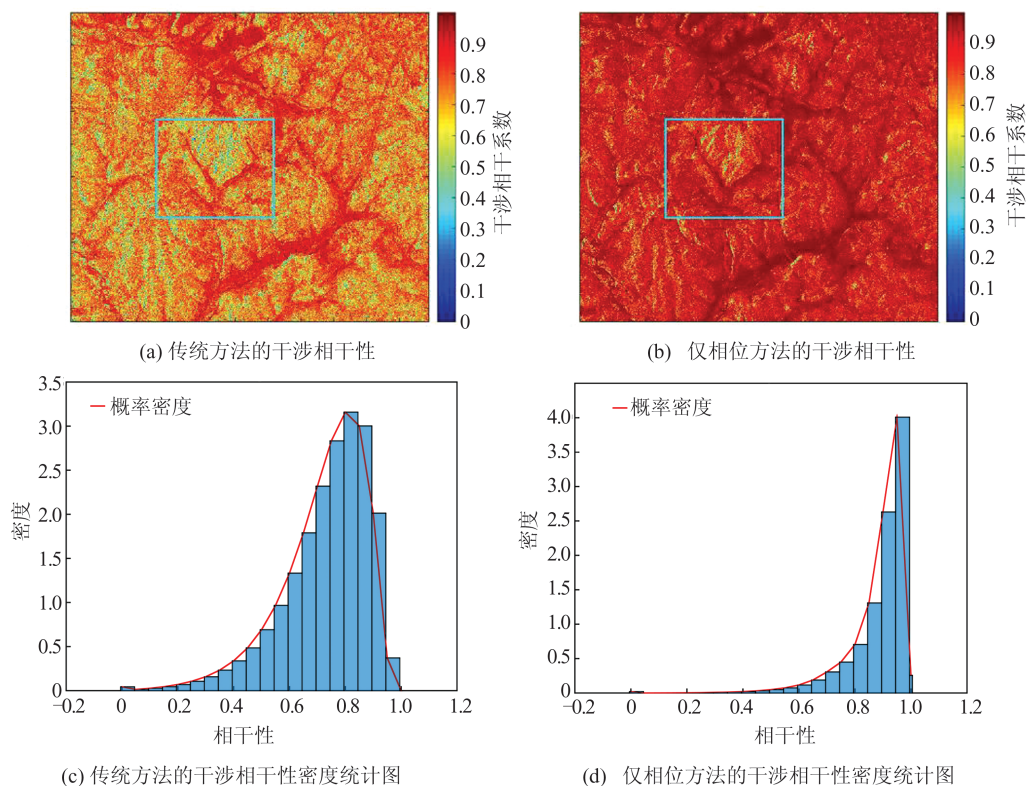


图6 两种方法计算的干涉相干性系数

Fig. 6 Interference Coherence Coefficients Calculated by Two Methods

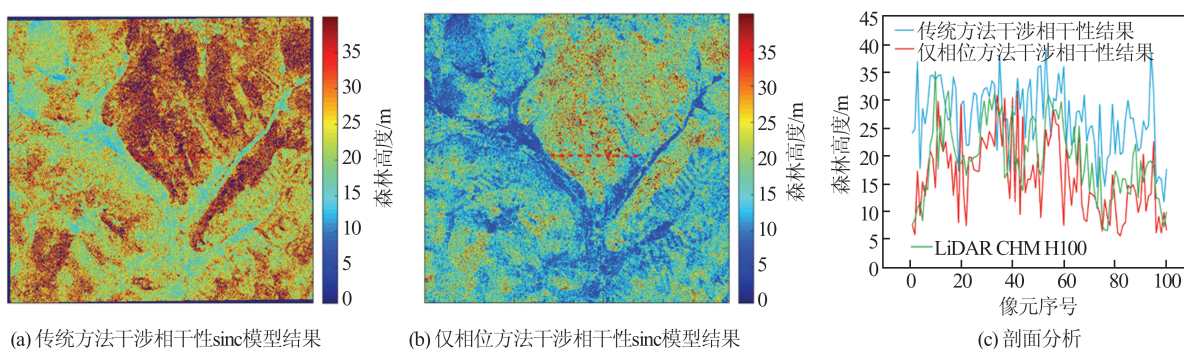


图7 两种相干性计算方法用于 sinc 模型反演森林高度

Fig. 7 Forest Height Inversion Results of sinc Model Using Two Coherence Calculation Methods

失相干表达式接近,故而仅考虑相位的相干性计算方法得到的相干性,代入 sinc 模型中,计算得到的森林高度的精度相比于考虑相位和幅度的传统方法要更好。可见,基于仅考虑相位的相干性计算方法的精度均高于传统的相干性计算方法的 sinc 模型结果,更加适合于 sinc 模型的森林高度反演。

3.3 森林高度估测反演结果对比分析

已有研究表明,采用 InSAR 数据进行森林高度估测时,估测方法的选择对估测结果的精度影响明显^[5,14],因此,本文也对差分法和 sinc 模型估测结果的差异进行了对比。对比标定后的 DSM-DEM 差分法估测结果(图 5)与两种方法计算相

干性 sinc 模型的反演结果(图 8)可知,标定后的差分法估测结果略优于采用传统方法计算相干性的 sinc 模型估测结果,采用机载 X 波段 InSAR 在伊根地区的森林高度估测中也得到了相近的结果^[14]。然后,采用仅相位方法计算相干性的 sinc 模型的估测结果则略优于差分法的估测结果。笔者团队的前期研究也表明,采用仅相位方法进行相干性计算会有效提高森林高度反演的精度^[29]。为了直观对比两种方法的估测结果,本文中选取差分法中用于验证的 175 个样本,分别提取两种方法的反演结果,使用散点图进行相关性分析(图 9),其中 sinc 模型的反演结果为采用仅相位方法计算相干性的 sinc 模型反演结果。从

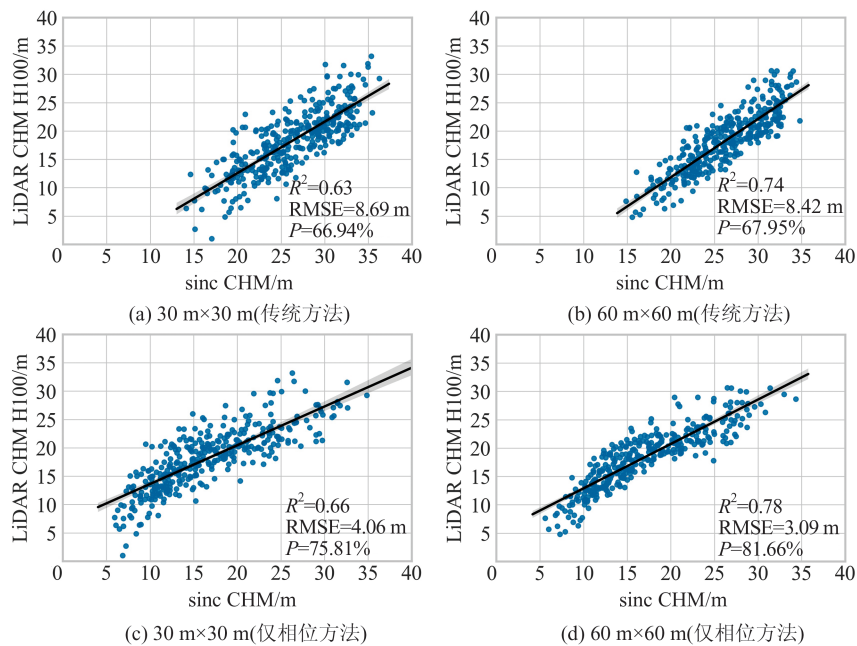


图 8 sinc 模型反演森林高度结果

Fig. 8 Forest Height Inversion Results Using sinc Model

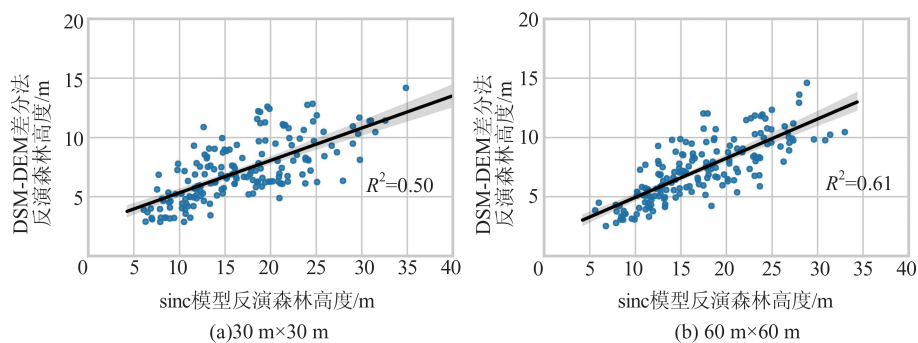


图 9 两种方法结果对比

Fig. 9 Comparison of the Results of Two Methods

图 9 可知,两种估测方法获得的森林高度之间的相关性较高,在 30 m 尺度时,两者之间的 R^2 为 0.50,随着尺度增大,两者之间的相关性会进一步提高,在 60 m 尺度时,两者之间的 R^2 达到 0.61。文献 [5] 也表明两种方法估测结果之间的关系呈此规律。此外,DSM-DEM 差分法会低估森林高度,sinc 模型法会高估森林高度,而 DSM-DEM 差分法经过标定后,低估程度会明显降低,估测精度会显著提高;sinc 模型法采用仅考虑相位因子的方法进行相干性计算时,高估现象会明显降低,并且反演结果会略优于 DSM-DEM 差分法。

4 结 语

本文以 TanDEM-X 单极化干涉数据为基础,基于 DSM-DEM 差分法和 sinc 模型法估测了森林高度,分析了 DSM-DEM 差分法和基于不同相

干性计算方法的 sinc 模型法的森林高度反演结果在不同样本尺度下的影响。结果表明:

1) DSM-DEM 差分法虽然可以获得良好精度的森林高度估测结果,但是依赖于高精度的 DEM,且由于 X 波段仍然具有一定的穿透性,会造成一定程度的低估,所以需要一定量的实测数据利用简单线性模型对估测结果进行校正才能获得较好的估测结果。但是使用线性模型校正通常会产生校正不足或过校正现象,所以校正模型的选择仍值得商榷。sinc 模型估测森林高度的优势在于不需要用到高精度 DEM,从长远角度考虑,不需要高精度 DEM 支持且能得到具有一定可靠性的森林高度结果的 sinc 模型估测法相较于 DSM-DEM 差分法更容易扩展到更大的区域。同时,将不同样本尺度的结果与验证数据的比较发现,随着样本尺度的扩大,DSM-DEM 差分法

及 sinc 模型法的森林高度的估测结果会逐渐接近真实值。

2)对于 sinc 模型法而言,基于传统相干性计算方法得到的 sinc 模型结果会造成森林高度的严重高估,精度验证结果表明仅考虑相位的相干性计算方法更适合于 sinc 模型反演,证实了仅考虑相位的相干性计算方法能有效提高 sinc 模型森林高度反演的精度,但是对该模型在不同森林类型中的适用范围和条件还有待进一步研究。

3)针对不同反演方法的原理,选择不同森林高度的界定方法作为真值数据进行训练与验证模型,对于获得良好的森林高度估测精度是很有必要的。

本文对森林高度反演的算法选择、定义不同形式森林高度对估测结果的影响进行了分析,并对不同相干性计算方法对 sinc 模型法的估测结果进行对比,得到了具有一定可信度的森林高度反演结果。但是影响森林高度估测精度的因素众多,如空间基线、森林密度、地形等环境因子均会对反演结果产生显著的影响,未来可对以上因素对森林高度估测结果的影响展开研究。

参 考 文 献

- [1] Li Tingwei, Liang Diannong, Zhu Jubo. A Review of Inversion of the Forest Height by Polarimetric Interferometric SAR [J]. *Remote Sensing Information*, 2009, 24(3): 85-91. (李廷伟, 梁甸农, 朱炬波. 极化干涉 SAR 森林高度反演综述[J]. 遥感信息, 2009, 24(3): 85-91.)
- [2] Zhu Jianjun, Fu Haiqiang, Wang Changcheng. Methods and Research Progress of Underlying Topography Estimation over Forest Areas by InSAR [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 2030-2038. (朱建军, 付海强, 汪长城. InSAR 林下地形测绘方法与研究进展[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(12): 2030-2038.)
- [3] Wu Chuanjun, Wang Changcheng, Shen Peng, et al. A Multi-baseline PolInSAR Forest Height Inversion Method Based on S-RVoG Model with Linearly Varying Extinction [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(1): 149-156. (吴传军, 汪长城, 沈鹏, 等. 线性变化消光 S-RVoG 模型的多基线 PolInSAR 森林高度反演[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(1): 149-156.)
- [4] Luo Hongbin, Zhu Bodong, Yue Cairong, et al. Forest Canopy Height Inversion Based on Airborne Multi-baseline PolInSAR [J]. *Journal of Geomatics*, 2024, 49(2): 74-80. (罗洪斌, 朱泊东, 岳彩荣, 等. 基于机载多基线 PolInSAR 的森林冠层高度反演[J]. 测绘地理信息, 2024, 49(2): 74-80.)
- [5] Fan Yaxiong. Study on Forest Height Estimation Method of Spaceborne X-band Interferometric SAR [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2019. (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.)
- [6] Zhao L, Chen E X, Li Z Y, et al. A New Approach for Forest Height Inversion Using X-band Single-Pass InSAR Coherence Data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 5206018.
- [7] Krieger G, Fiedler H, Zink M, et al. TanDEM-X: A Satellite Formation for High-Resolution SAR Interferometry [C]//International Conference on Radar Systems, Edinburgh, UK, 2007.
- [8] 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. (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.)
- [9] 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): 6404-6422.
- [10] Praks J, Kugler F, Papathanassiou K P, et al. Height Estimation of Boreal Forest: Interferometric Model-Based Inversion at L- and X-band Versus HUTSCAT Profiling Scatterometer [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2007, 4(3): 466-470.
- [11] 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.
- [12] Treuhaft R N, Siqueira P R. Vertical Structure of Vegetated Land Surfaces from Interferometric and Polarimetric Radar [J]. *Radio Science*, 2000, 35(1): 141-177.
- [13] Fan Yaxiong, Chen Erxue, Li Zengyuan, et al. Forest Height Estimation Method Using TanDEM-X Interferometric Coherence Data [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2020, 56(6): 35-46. (范亚雄, 陈尔学, 李增元, 等. 基于 TanDEM-X 相干系数的森林高度估测方法[J]. 林业科学, 2020, 56(6): 35-46.)
- [14] 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. (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[J]. 遥感技术与应用, 2016, 31(3): 551-557.)
- [15] Chen H, Cloude S R, Goodenough D G. Forest Canopy Height Estimation Using TanDEM-X Coherence Data[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, 9(7): 3177-3188.
- [16] Sadeghi Y, St-Onge B, Leblon B, et al. Canopy Height Model (CHM) Derived from a TanDEM-X InSAR DSM and an Airborne LiDAR DTM in Boreal Forest[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, 9(1): 381-397.
- [17] Cloude S R, Chen H, Goodenough D G. Forest Height Estimation and Validation Using Tandem-X PolInSAR[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Melbourne, Australia, 2013.
- [18] Olesk A, Praks J, Antropov O, et al. Interferometric SAR Coherence Models for Characterization of Hemiboreal Forests Using TanDEM-X Data[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(9): 700.
- [19] Olesk A, Voormansik K, Vain A, et al. Seasonal Differences in Forest Height Estimation from Interferometric TanDEM-X Coherence Data[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, 8(12): 5565-5572.
- [20] Næsset E. Determination of Mean Tree Height of Forest Stands Using Airborne Laser Scanner Data[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1997, 52(2): 49-56.
- [21] He Qisheng, Chen Erxue, Cao Chunxiang, et al. A Study of Forest Parameters Mapping Technique Using Airborne LiDAR Data[J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(7): 748-755. (何祺胜, 陈尔学, 曹春香, 等. 基于LiDAR数据的森林参数反演方法研究[J]. 地球科学进展, 2009, 24(7): 748-755.)
- [22] Mu Xiyun, Zhang Qiuliang, Liu Qingwang, et al. Inversion of Forest Height and Canopy Closure Using Airborne LiDAR Data[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2015, 43(9): 84-89. (穆喜云, 张秋良, 刘清旺, 等. 基于机载LiDAR数据的林分平均高及郁闭度反演[J]. 东北林业大学学报, 2015, 43(9): 84-89.)
- [23] Hu Kailong, Liu Qingwang, Cui Ximin, et al. Regional Forest Canopy Height Estimation Using Multi-source Remote Sensing Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(2): 289-296. (胡凯龙, 刘清旺, 崔希民, 等. 多源遥感数据支持下的区域性森林冠层高度估测[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(2): 289-296.)
- [24] Simard M, Zhang K Q, Rivera-Monroy V H, et al. Mapping Height and Biomass of Mangrove Forests in Everglades National Park with SRTM Elevation Data[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2006, 72(3): 299-311.
- [25] Liao Zhanmang. Forest Aboveground Biomass Estimation Using PolInSAR Data[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019. (廖展芒. 森林地上生物量极化干涉SAR反演方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.)
- [26] Cloude S. Polarisation: Applications in Remote Sensing[M]. Oxford: Oxford University Press, 2009.
- [27] Balzter H, Rowland C S, 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.
- [28] Balzter H, Luckman A, Skinner L, et al. Observations of Forest Stand Top Height and Mean Height from Interferometric SAR and LiDAR over a Conifer Plantation at Thetford Forest, UK[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2007, 28(6): 1173-1197.
- [29] Wen Z, Zhao L, Zhang W, et al. The Effects of Coherence Calculation on Forest Height Estimation Using SINC Model[J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2020, 13: 637-642.
- [30] 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. (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.)
- [31] Kelldorfer J, Walker W, Pierce L, et al. Vegetation Height Estimation from Shuttle Radar Topography Mission and National Elevation Datasets[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 93(3): 339-358.