引文格式:吴传军,沈鹏,TEBALDINI Stefano,等.基于基线优选的InSAR相位直方图技术森林垂直结构反演[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(8):1608-1618.DOI:10.13203/j.whugis20240448

Citation:WU Chuanjun,SHEN Peng,TEBALDINI Stefano,et al.Forest Vertical Structure Inversion Based on Baseline Optimization InSAR Phase Histogram Technique[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(8):1608-1618.DOI:10.13203/j.whugis20240448

基于基线优选的InSAR相位直方图技术森林垂直结构反演

吴传军[1] 沈 鹏[2,3] TEBALDINI Stefano[4] 余扬海[5] 廖明生[1]

1 武汉大学测绘遥感信息工程全国重点实验室,湖北 武汉,430079

2 武汉大学遥感信息工程学院,湖北 武汉,430079

3 智慧地球重点实验室,北京,100029

4 米兰理工大学,意大利 米兰,20133

5 中国科学院国家空间科学中心,北京,100190

摘 要:采用干涉相位直方图(phase histogram,PH)技术,原则上仅需单极化、单基线(或少量干涉图)即可获取低分辨率的森林垂直结构。然而,为了应对由机载轨道不稳定而导致垂直波数剧烈变化的问题,提出基线优选的策略,通过约束模糊高筛选合适的干涉基线,重建全覆盖实验区的相位直方图结果,并基于欧洲空间局TomoSense机载全极化合成孔径雷达(synthetic aperture radar,SAR)数据集,研究验证所提方法在长波机载SAR数据下获取森林3D垂直结构与森林高度的可行性。实验结果表明,PH技术在合适的干涉基线条件下,能够获取低分辨率的可表征主导散射体特征的3D后向散射能量剖面(即森林垂直结构);同时也能够获取一定精度的森林高度产品,以机载激光雷达森林高度为参考,P波段与L波段数据估计的森林高度均方根误差分别为4.60 m和5.21 m。研究表明,PH技术能够通过少量基线数据获取森林垂直结构,具备未来星载高分辨率SAR卫星森林监测任务中广域森林制图的潜力。

关键词:森林高度;垂直结构;相位直方图;TomoSense;基线优选;主导散射体;InSAR

中图分类号:P237 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-12-27

DOI:10.13203/j.whugis20240448 **文章编号**:1671-8860(2025)08-1608-11

Forest Vertical Structure Inversion Based on Baseline Optimization InSAR Phase Histogram Technique

WU Chuanjun[1] *SHEN Peng*[2,3] *TEBALDINI Stefano*[4] *YU Yanghai*[5] *LIAO Mingsheng*[1]

1 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China

3 Key Laboratory of Smart Earth, Beijing 100029, China

4 Politecnico di Milano, Milan 20133, Italy

5 National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract: **Objectives**: The primary tasks include: (1) Proposing multi-baseline optimized phase histogram (PH) technique to explore the 3D imaging capabilities of low-frequency airborne synthetic aperture radar (SAR) data for forested areas and to estimate canopy height model; (2) using a simplified physical model to simulate and explain the principles and limitations of the PH technique. **Methods**: Introducing a novel technique, the PH method, for estimating the 3D vertical structure and canopy height of forested areas. The

基金项目:国家自然科学基金(42404029);中国博士后科学基金(2024M752479);中国博士后创新人才支持计划(BX20240270);湖北省博士后项目(2024HBBHCXA062);智慧地球重点实验室基金(KF2023ZD02-02);中欧科技合作"龙计划"六期项目(ID:95358)。

第一作者:吴传军,博士生,研究方向为干涉SAR技术的森林参数反演。wcj-sar@whu.edu.cn

通信作者:沈鹏,博士,博士后。shen-peng@whu.edu.cn

廖明生,博士,教授。liao@whu.edu.cn

PH technique leverages the phase-to-height relationship derived from interferometric phase and vertical interferometric wavenumber to assign each pixel to a specific horizontal height layer. By accumulating the magnitude of all pixels within a given spatial window at the same height layer, it approximates the 3D backscatter profile of the forest. To address the limitations of single-baseline observations and the significant variation in vertical wavenumber caused by unstable airborne platforms, a full-baseline-based optimized multi-baseline interferometric combination strategy is proposed. This strategy restricts the height ambiguity range to obtain phase histograms that completely cover the experimental area. **Results:** The results indicate that, under appropriate interferometric baseline length, the PH technique can retrieve an approximate coarse-resolution vertical structure of the forests, with the 3D backscatter power profiles characterizing the dominant scatterers. Additionally, the proposed method can provide quite good forest height estimates. Specifically, taking light detection and ranging forest height as the reference value, the average root mean square error of estimated forest height using P-band and L-band data are 4.60 m and 5.21 m, respectively. **Conclusions:** Although the PH technique cannot precisely separate ground and canopy signal, it can still characterize, to some extent, the distribution of scatterer density and scattering energy across horizontal height layers within a spatial window. This relationship holds potential for further exploration in forest height inversion and biomass estimation. Overall, as a novel method for retrieving forest vertical structure with a limited number of interferograms, the PH technique could serve as a viable alternative in future spaceborne SAR satellite missions for forest monitoring.

Key words: forest height; vertical structure; phase histogram; TomoSense; baseline optimization; dominant scatterer; InSAR

森林是服务陆地生态系统的关键因子,为生物多样性保护和减缓气候变化做出了卓越贡献。因此,获取有关世界森林的准确信息是资源管理与环境保护中的当务之急[1]。近年来开展的研究表明,森林的垂直结构信息对于掌握森林扰动、补偿林下地形、衍生冠层高度模型(canopy height model,CHM)以及地上生物量(above ground biomass,AGB)等应用中起着关键性的作用[2-6]。合成孔径雷达(synthetic aperture radar,SAR)遥感技术因不受天气影响、全天时、全天候工作和强穿透性,在森林遥感和监测方面有独特的优势。由于SAR的"侧视"对地观测模式、可携带穿透力强的长波传感器,以及获取多站全极化数据的灵活性,在解决全球森林资源调查研究中引起了科研人员的广泛关注[4-5,7-11]。

雷达电磁波能够不同程度地穿透森林,并利用灵活的收发方式和多波段的观测模式获取多极化影像数据,促进了大量利用SAR技术提取森林垂直结构和冠层高度的算法的开发。如广泛使用的基于极化干涉SAR(polarimetric interferometric SAR,PolInSAR)技术的森林参数反演算法,利用多极化和多基线将观测到的干涉复相干系数分解为地面和体积散射贡献,然后基于随机地体散射(random volume over ground,RVoG)模型的算法检索森林高度[12-17];极化相干层析技术结合多极化数据观测,通过求解多阶勒让德多项式系数,重建森林垂直结构函数[18-19]。另一方面,SAR层析(SAR tomography,TomoSAR)成像技术通过对同一观测区域进行多次成像来合成垂直于斜距方向的孔径,从而具备在高程向上高分辨率成像的能力[20-22]。TomoSAR可以直接对森林的3D垂直结构进行成像,捕捉沿高度轴的后向散射剖面,并利用剖面结构直接获取林下地形、森林高度与森林AGB等生物物理参数[5,23-29]。这些技术的不断发展为人们更全面、更准确地了解森林结构和生态环境提供了强有力的工具。

然而基于PolInSAR或TomoSAR技术的森林垂直结构与参数反演依赖于多极化与多基线数据,目前以及未来SAR卫星主流的单极化重轨数据获取方式无法充分满足这两种SAR技术的数据需求。近年来,国内外学者持续关注一种新型的相位直方图(phase histogram,PH)技术在森林遥感中的应用[30-33]。PH技术通过累加给定窗口中处于同一高度层所有像素的振幅值,可近似获取中心像素的垂直向散射能量剖面。PH技术原则上仅利用少量干涉基线长度合适的干涉图,便可获取森林垂直结构与参数,为现在以及未来主流的单极化星载干涉SAR对地观测任务提供了可供替代的解决方案。

本文基于长波机载SAR数据,重点探究PH

技术的森林3D成像能力。为了解决单基线观测信息不足和应对由机载轨道不稳定而导致干涉垂直波数剧烈变化的问题,本文提出多基线干涉组合优选的策略,通过设定相位模糊高的范围,筛选合适的基线来获取能够完整覆盖测区的相位直方图结果。实验采用欧洲空间局于2020年在德国Eifel国家公园开展的TomoSense全极化机载P波段与L波段SAR数据进行算法验证。主要工作包括:(1)采用基于多基线优选的PH技术探究长波机载SAR数据森林3D成像能力与森林高度反演性能;(2)通过简易物理模型模拟,从理论上阐明PH技术的本质与局限性。本文对于PH技术的探究实验与结论,将为未来SAR卫星对地观测的数据采集与产品输出提供参考。

1 PH技术模型与算法实现

1.1 PH技术模型

PH技术原则上可通过分析单个干涉图的干涉相位与干涉垂直波数来获取有关森林垂直结构的信息,算法实现过程如图1所示。

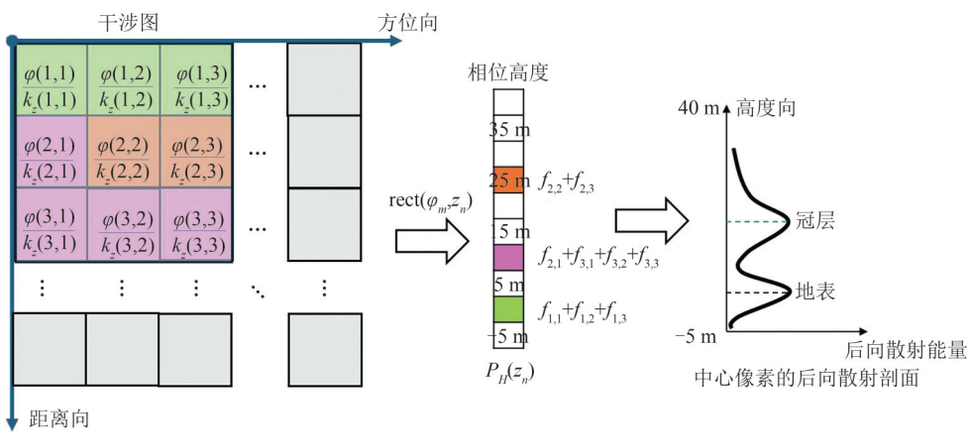


图1 PH技术模型与算法实现示意图

Fig. 1 Schematic Diagram Illustrating the Implementation of PH Technique

根据干涉相位和干涉垂直波数的相高转换关系,将干涉图中给定空间窗口内的每个像素分配到设定的垂直向高度层,进而累加处于相同高度层内所有像素的振幅,来近似拟合森林垂直结构能量剖面。经配准并地形补偿(topographic compensation,TC)后的两幅SAR影像I_1^{TC}和I_2^{TC},在多视窗口尺寸为L视数处理下,通过共轭相乘$\left\langle I_1^{TC}(m)\cdot\mathrm{conj}\left(I_2^{TC}(m)\right)\right\rangle_L$,获取干涉相位与干涉垂直波数。PH技术的基础理论模型如下:

$$P_H(z_n)=\sum_{m=1}^{M} f_m\cdot\mathrm{rect}\left(\varphi_m,z_n\right) \tag{1}$$

式中,$P_H(z_n)$表示高度层z_n处的相位直方图振幅结果;$\varphi_m=\angle\left\langle I_1^{TC}(m)\cdot\mathrm{conj}\left(I_2^{TC}(m)\right)\right\rangle_L$,表示位于$m^{\mathrm{th}}$位置像素的干涉相位;$f_m$表示位于$m^{\mathrm{th}}$位置像素的振幅值,通常情况下,$f_m$可以有多种选择[31],本文设定$f_m$为干涉图的幅度值,即$f_m=\left|\left\langle I_1^{TC}(m)\cdot\mathrm{conj}\left(I_2^{TC}(m)\right)\right\rangle_L\right|$;$\mathrm{rect}\left(\varphi_m,z_n\right)$表示在高度向间隔采样的rectangle函数,用于判断该像元是否属于高度层z_n处的有效值,可表示如下:

$$\mathrm{rect}\left(\varphi_m,z_n\right)=\begin{cases}1, z_n-\dfrac{\Delta z}{2}\leqslant\dfrac{\varphi_m}{k_z(m)}\leqslant z_n+\dfrac{\Delta z}{2}\\ 0, \text{其他}\end{cases} \tag{2}$$

式中,Δz表示设定的高度向采样间隔,本文中设定$\Delta z=1$ m;k_z表示干涉垂直波数,是衡量和判断干涉相位是否缠绕的重要指标,也是本文模糊高设定的主要依据,计算公式如下:

$$k_z=m\cdot\frac{2\pi B_\perp}{\lambda R\sin\theta} \tag{3}$$

式中,λ是雷达波长;R表示传感器与目标的距离;θ表示雷达入射角;$B_\perp$表示干涉垂直基线长度;m为与SAR的观测模式有关的参数,对于单站SAR,$m=2$;对于双站SAR,$m=1$。

相位模糊高(height of ambiguity,HoA)的计算表达如下:

$$H_{\mathrm{HoA}}=\frac{2\pi}{k_z} \tag{4}$$

由干涉成像几何可知,忽略噪声相位与地形残差相位的影响,当HoA的值大于等于单位分辨单元中散射体高度的2倍及以上时,干涉相位不存在缠绕现象。因此,本文可通过设定HoA的范围来优选

符合解缠相位条件的干涉基线参与PH技术的反演。

1.2　基线优选的PH技术算法实现

由于机载轨道不稳定，干涉垂直波数在空间上变化剧烈，导致仅基于单个干涉图的PH技术难以估计出整景SAR影像覆盖的森林监测结果。针对TomoSense数据集中轨道不稳定的问题，本文采用干涉基线优选的策略获取PH技术的后向散射能量剖面。该策略下使得28景P波段SAR数据共获得378个干涉图（30景L波段数据共获取435个干涉图），为选取满足覆盖整个SAR观测场景的HoA提供可能。图2展示了全组合干涉基线策略下PH技术重构垂直剖面的理论过程。在本文中，根据预先给定的HoA，可采用如下筛选准则为每个像素选取最优基线：

$$[i,j]=\underset{i,j\in[1,2,\cdots,N],j>i}{\operatorname{argmin}}\left|k_z^{i,j}(m)-\frac{2\pi}{H_{\mathrm{HoA}}}\right| \tag{5}$$

式中，$[i,j]$表示干涉组合索引；N是SAR影像数量。基于PH技术模型，根据式(1)可逐个像素构建如下森林垂直结构剖面：

$$P_H=\sum_{m=1}^{M}f_m^{i,j}\cdot\mathrm{rect}\left(\varphi_m^{i,j},z_n\right) \tag{6}$$

实现全组合干涉基线优选的PH技术算法流程总结如下：①影像干涉基线全组合，利用式(3)与式(4)计算干涉图的HoA和干涉垂直波数k_z；②对于像素m，设定HoA范围（如$H_{\mathrm{HoA}}=60$ m），根据式(5)从所有干涉组合中选定符合条件的最优干涉图(i,j)，利用式(6)计算该像素的相位直方图结果；③逐像素计算覆盖全图的相位直方图结果。

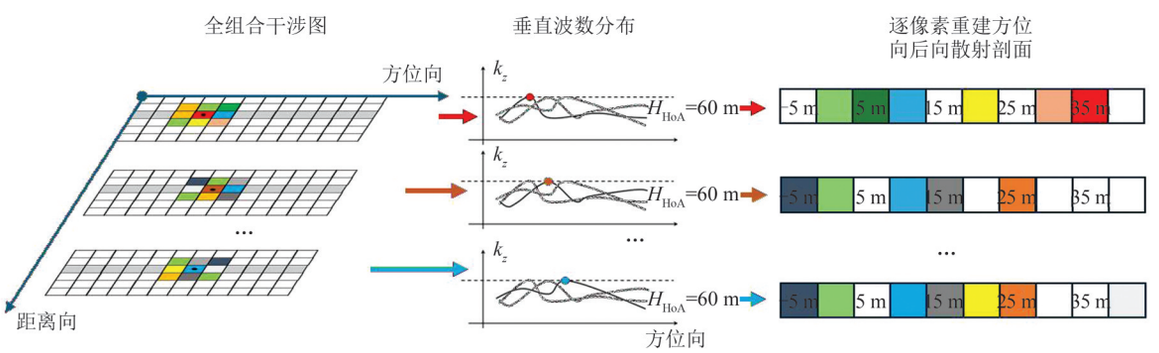


图2　全组合干涉基线优选PH技术示意图

Fig. 2　Schematic Diagram Illustrating the Optimization Using Full Combination of Interferometric Baseline of PH Technique

2　TomoSense数据集

TomoSense实验由欧洲空间局资助，旨在支持利用SAR数据对森林地区进行遥感监测研究，特别关注使用TomoSAR技术来探究利用不同频段SAR数据估计植被垂直结构信息的能力与算法创新发展。TomoSense实验获取包括C、L和P波段全极化SAR数据，旨在为评估L与P波段SAR干涉测量温带森林的可行性提供科学依据，并研究C波段与未来L和P波段SAR卫星对地观测任务之间的协同作用。其中，C和L波段数据具有通过同时飞行的两架飞机收集的双站数据。实地测量数据包括80个地块样地森林普查数据（包括胸径、树高和物种）、地面激光扫描数据以及小型机载激光雷达（light detection and ranging，LiDAR）扫描衍生的林下地形与冠层高度产品[34]。

2.1　实验区域概况

TomoSense实验的测试地点位于德国北莱茵-威斯特法伦州的Eifel国家公园的Kermeter地区，见图3。Kermeter地区地处高地，海拔分布范围在250～550 m。森林高度主要分布在10～30 m，最大可达40 m。该地区占地面积约3 592 hm^2，其中约3 300 hm^{2}是单一森林地区，被最大的连续的落

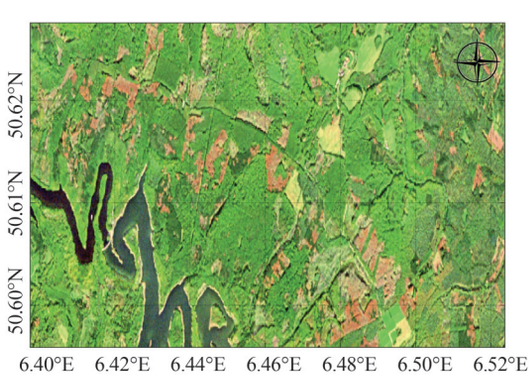


图3　TomoSense实验区：德国Eifel国家公园Kermeter地区

Fig. 3　TomoSense Experimental Area: Eifel National Park Kermeter Area, Germany

叶林所覆盖。该地区有详细的森林普查记录,具有丰富的森林物种,其中山毛榉树林约占24%,主要分布在北部区域,树龄最大超过200年;橡树林约占26%,主要分布在南部地区。

2.2 SAR影像数据集

SAR数据由MetaSensing公司负责采集,经米兰理工大学进行相位校正并重新聚焦成单视复数数据集。聚焦成像主要采用时域后向投影算法,参考地形为MetaSensing公司提供的林下地形。所有SAR数据均在3天内收集完成,因此本文实验忽略时间去相干的影响[34]。SAR数据总共获取了包括28景单站P波段数据,单、双站各30景L波段数据,单、双站各17景C波段数据。所有数据均为全极化,其中每个波段的数据均覆盖了东南(south-east,SE)和西北(north-west,NW)两个航向。收集C波段数据时,因天气原因出现了严重的时间去相干,因此本文主要使用单站P波段与单站L波段数据进行实验,SAR影像的基本参数如表1所示。

表1 SAR影像基本参数

Table 1 Basic Parameters of SAR Images

波段	飞行模式	飞行航向	影像数量/景	极化方式	带宽/MHz	斜距分辨率/m	方位分辨率/m	垂直分辨率(瑞利分辨率)/m
P	单站	NW、SE	28	全极化	30	5	1	5~10
L			30		50	3	1	<5

图4展示了NW航向P波段与L波段数据的机载轨道位置分布。可以看出,机载轨道位置变化大,将导致单个干涉图下的干涉垂直波数很难满足PH技术的反演需求。因此,本文针对TomoSense数据集,提出基于基线优选的PH技术获取全覆盖SAR区域的能量剖面。多基线优选策略仅对轨道变化大且存在多个干涉图可用,可用来获取连续的相位直方图统计结果;当面对仅单个SAR干涉图满足PH技术反演的HoA范围时,PH技术将不再依赖于多基线数据。

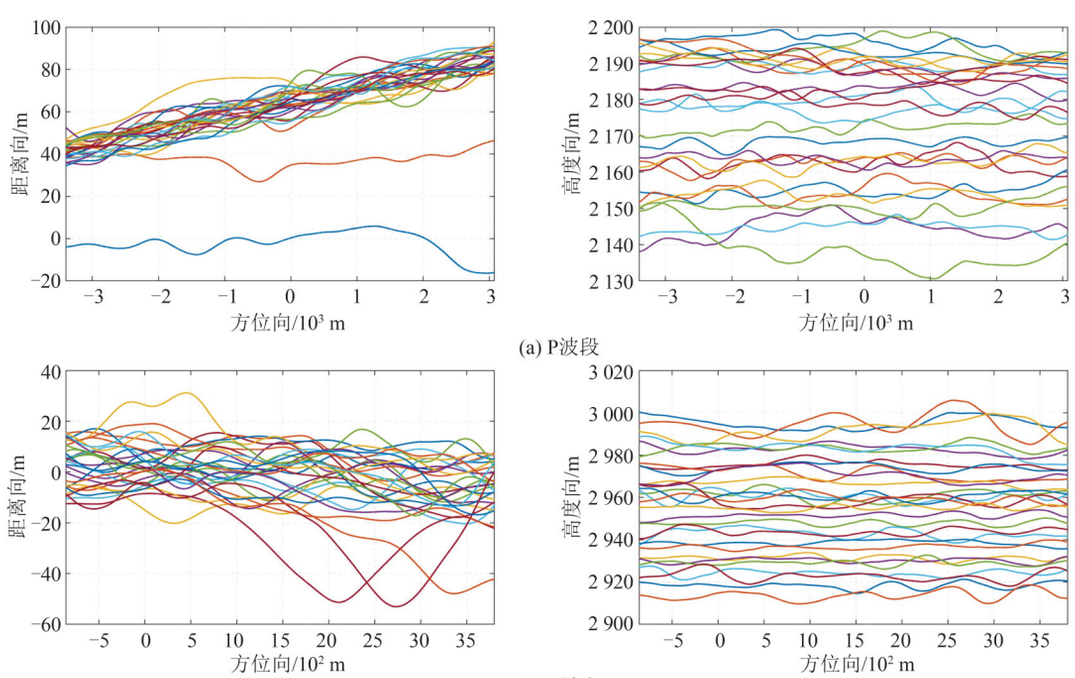


图4 P波段与L波段NW航向轨道位置(距离向-高度向)

Fig. 4 Trajectories of NW Flight in P-Band and L-Band (Range-Elevation)

2.3 LiDAR数据集

TomoSense验证数据集由CzechGlobe科学机构于2018年7月开始收集,搭载了小足迹的小型机载激光扫描设备进行实地测量,为本文验证实验提供充足的地面参考数据。其中,衍生产品包括测试场地的地形,即数字地形模型和森林高度,分辨率为1 m×1 m。为了提供与SAR数据分辨率同等的森林高度反演验证,LiDAR CHM被进一步处理,使其空间分辨率与SAR衍生产品的空间分辨率一致。该处理过程主要通过设定估计窗口内获取75%百分位数高度来生成最终的LiDAR CHM,其结果如图5所示。

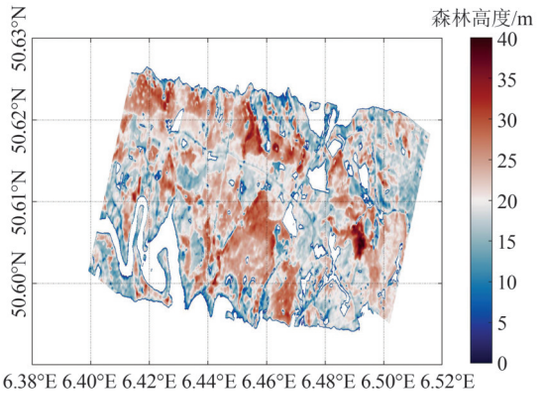


图5　LiDAR衍生的森林高度图

Fig. 5　LiDAR-Derived Forest Height Map

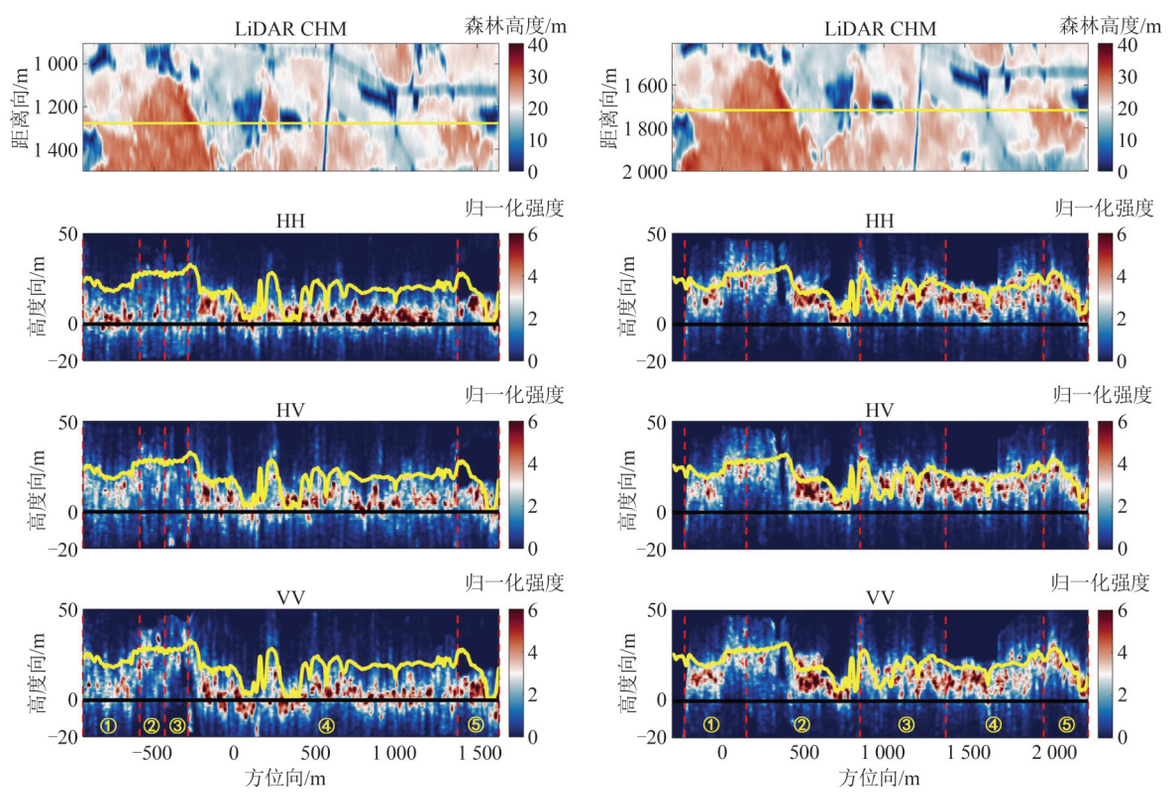
3　实验结果

本文中所有使用的SAR数据均经过良好的相位校正与地形补偿,使得任意一个干涉图的绝对地面高度处于0 m。由于SAR影像聚焦成像时使用的是林下地形作为参考地形,因此地形补偿后的干涉相位主要是与森林高度相关的相位。针对PH模型评估窗口的设定,选用地面范围约35 m × 35 m的窗口进行估计。为了估计PH技术的森林高度,使用5像素的均值滤波器对方位-高度向的PH后向散射剖面进行滤波,以获取平滑的剖面。森林高度的估计,采用功率损失准则[23],并最终采用10个像素的圆形自适应滤波器对森林冠层高度进行滤波处理。

3.1　P波段与L波段3D成像结果

图6展示了使用PH技术获取的P波段与L波段的3D森林成像结果,沿方位向横跨约2.5 km的距离。P波段数据共获取了378个干涉图,L波段共获取了435个干涉图。图6的结果是通过设定60 m＜$|H_{\mathrm{HoA}}|$＜120 m的约束条件,选定像素间最连续的干涉图组建全覆盖的后向散射能量剖面结果,最大干涉图个数设定为5。通过约束干涉图的数量,能够最大限度地保证长距离方位向范围内剖面的结果来自相同干涉图,保障直方图的连续性,并且可以测试HoA数值范围对于PH技术重建垂直结构剖面的影响。下文中所有后向散射能量剖面都经过归一化,使得每列的能量平均值为1。在所有面板中,黄色实线表示LiDAR森林高度,黑色实线表示地面高度。

由于P波段与L波段数据在SAR坐标系下选定的成像坐标起点不一致,导致方位轴的数值出现偏差。经过调整,本文选定了覆盖范围基本



注:黄色实线为森林高度,黑色实线为地面高度,序号①~⑤表示不同的干涉图。

图6　P波段与L波段PH技术获取的全极化垂直结构剖面

Fig. 6　Full-Polarization Vertical Structure Profiles of P-Band and L-Band Obtained by PH Technique

一致的方位向切片。整体上,由于P波段的强穿透性,使得所有极化的PH剖面均表现出较强的地面散射贡献,这在HH极化结果当中尤为明显。相对的,L波段全极化PH技术获取的剖面主要以冠层能量为主,所有极化剖面的能量中心基本包络在黄色实线以下、黑色实线以上,即均低于LiDAR冠层高度。

总体上,不论极化方式,PH技术不能够明确地区分森林冠层与地面能量,能量分布取决于估计窗口中所有像元分布的垂直高度与幅度值。结果显示,由于L波段的穿透性弱于P波段,使得所有极化方式的后向散射能量剖面表现出以冠层散射贡献占据主导,而P波段的能量中心则明显低于L波段结果。可将这种现象归因于不同波段的穿透性以及森林内的散射机制效应。

3.2 森林高度反演结果

由于HV极化被证明敏感于体散射,因此本文主要采用HV极化数据的剖面结果反演森林高度。获取森林高度的方法为功率损失准则,该方法在不同研究结果中均取得了较好的实验结果[23,29]。为了自适应获取全覆盖测试区域的PH技术的后向散射能量剖面反演森林高度,将不再设定最大干涉图数目的约束条件,重建剖面的唯一条件为最小H_{HoA}为60 m,即通过式(5)筛选最佳基线的条件为$H_{\mathrm{HoA}}=60$ m。不同航向数据获取的森林高度经过地理编码的方式,统一到了与LiDAR CHM产品一致的坐标系下。图7展示了PH技术下NW和SE两个航向HV极化数据下的森林高度定量评估的反演结果。总体上,PH技术能够获取相当精度的森林高度,P波段与L波段获取的PH CHM与LiDAR CHM在森林高度空间分布中呈现相同的趋势。定量的均方根误差(root mean square error,RMSE)分布结果显示,与LiDAR CHM相比,P波段与L波段获取的PH CHM平均RMSE分别为4.60 m和5.21 m。

虽然P波段与L波段产生了精度相似的森林高度产品,实际上利用功率损失准则[23]获取森林高度时,P波段的功率损失值为1.5 dB,而L波段的功率损失值为0.5 dB。这在两个波段获取的PH能量剖面中也是可预见性的结果。因为P波段的强穿透性,导致后向散射能量剖面的峰值明显低于L波段。

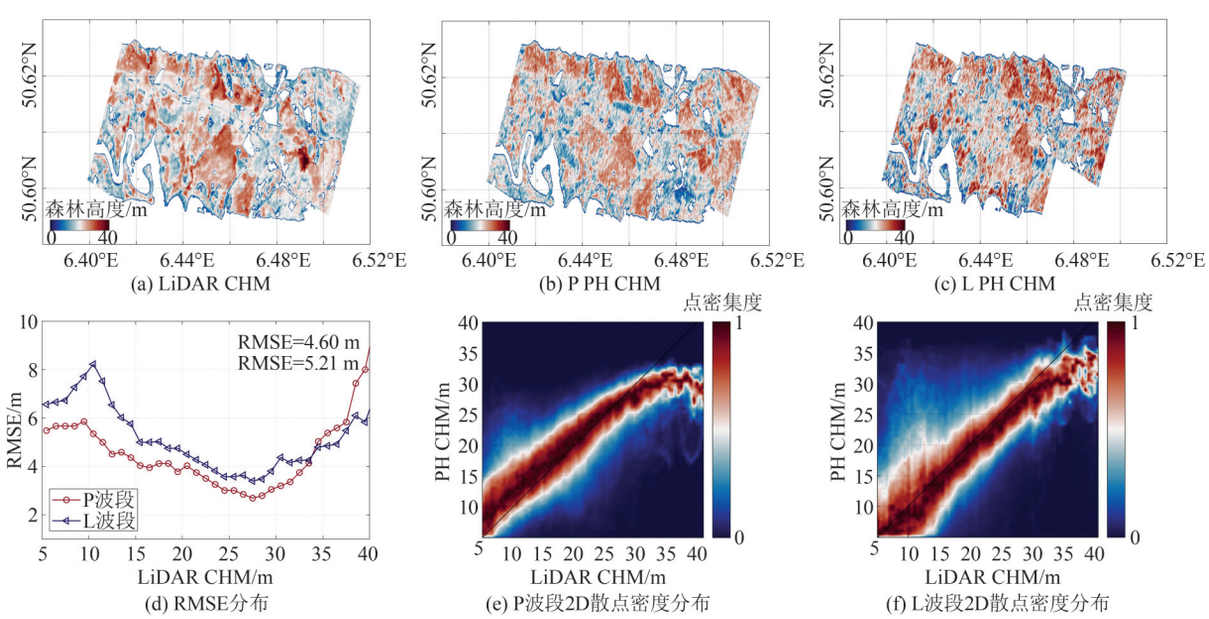


图7 PH技术下获取的森林高度与精度

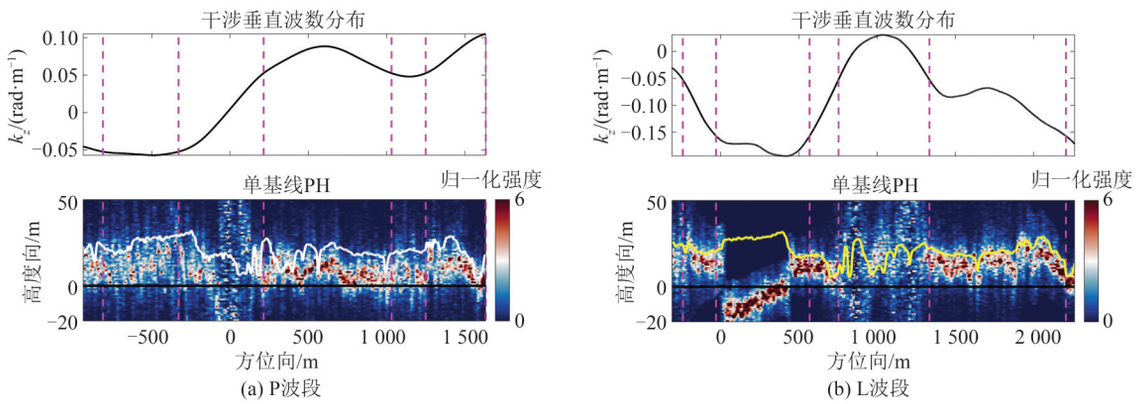
Fig. 7 Precision in Estimation of Forest Height Derived by PH Technique

4 分析与讨论

4.1 干涉垂直波数的影响

通过PH技术的模型和算法实现可知,PH技术仅使用单个干涉图与干涉垂直波数即可近似获得森林3D垂直结构,然后通过功率损失方法估算森林高度。然而,由于机载轨道的不稳定以及单基线观测信息不足,无法获取测区全覆盖的可靠结果,特别是对于像Kermeter这样覆盖面积较大的森林。图8为使用单基线PH技术获取的P波段与L波段的垂直结构剖面结果。每个子图的第一个面板表示沿方位向切片的

干涉垂直波数分布，洋红色虚线表示满足$|k_z|\in[0.05,0.15]$的阈值分割线。从结果可以看出，当H_{HoA}满足设定的模糊高范围时，能够得到较好的垂直剖面结果，当模糊高范围超出设定条件阈值时，结果出现极大的偏差，如图 8 中展示的散焦、缠绕现象。这与使用基于 RVoG 模型反演森林高度的 PolInSAR 技术条件一致，即文献[35]中提及的反演森林的垂直波数范围为 0.05～0.15 rad/m，对应模糊高范围为 40～120 m。实际上这也是要求使用 PH 技术需保证相位是解缠的必需条件，即需要确保模糊高是森林高度的 2 倍以上。



注：第一行面板中洋红色虚线表示满足$|k_z|\in[0.05, 0.15]$的阈值分割线，黑色实线表示沿方位向的k_z分布；第二行面板中黄色实线为森林高度，黑色实线为地面高度。

图 8　单基线 PH 技术获取的垂直结构剖面

Fig. 8　Vertical Structure Profiles Obtained by Single-Baseline PH Technique

利用干涉基线优选的 PH 技术获取后向散射剖面有两种实现方式：方式一为本文使用的方法（见式(5)和式(6)），根据中心像素干涉几何确定最佳干涉图，再开窗口计算出每个像素的高度和幅度值，通过 PH 技术获取森林后向散射剖面；方式二为窗口内逐像元筛选出符合条件的最佳干涉图复数值和干涉垂直波数，将它们组建成新的干涉图和k_z图，再利用 PH 技术获取整个场景的森林后向散射剖面。当利用方式二得到的新干涉图施行 PH 技术时，滑动窗口内的每个像素可能来自不同的干涉图，具有不同的观测几何，这是不合理的，无法解释同一观测几何空间下基于地块水平的森林垂直结构。换言之，更合理的是本文方法，能够确保滑动窗口中的所有元素都来自同一张干涉图，然后获取中心像素或基于林分大小的平均后向散射剖面结果。

4.2　分辨单元内散射体个数的影响

PH 技术是一种利用相位到高度的转换因子来计算滑动窗口中有多少像素落在预先设定的多个水平高度层中，并通过累加同一水平高度层内像素的振幅值，沿高度轴近似拟合出中心像素的后向散射剖面。直观地讲，PH 技术建立了一定空间范围内所有像素的后向散射观测值与不同水平高度层之间的关系，表征着主导散射体的数量与能量分布。

根据 InSAR 理论，经过聚焦和配准后，参考影像I_1^{TC}和待处理影像I_2^{TC}可以表示如下：

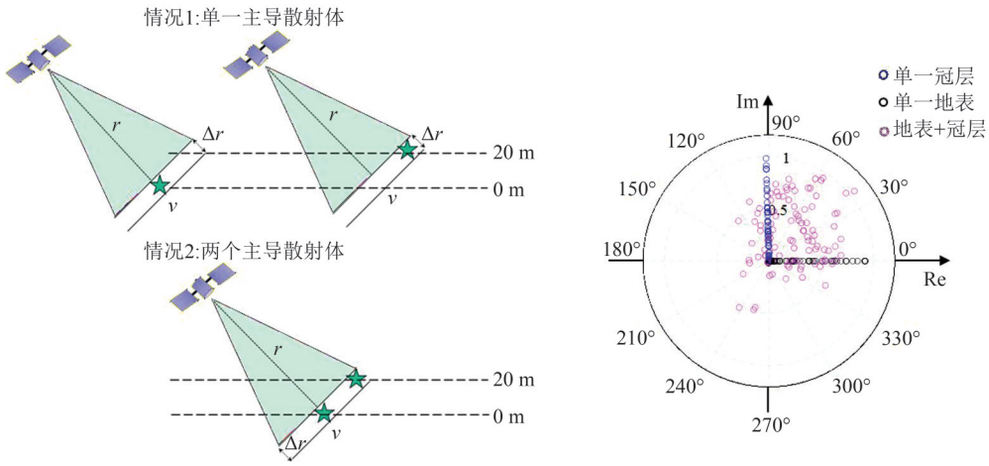
$$I_1^{\mathrm{TC}}=\sum_{n=1}^{N}A_n\exp\left(\mathrm{j}\varphi_n\right) \tag{7}$$

$$I_2^{\mathrm{TC}}=\sum_{n=1}^{N}A_n\exp\left(\mathrm{j}\varphi_n\right)\cdot\exp\left(\mathrm{j}k_z\cdot z_n\right) \tag{8}$$

式中，A与φ分别表示振幅与相位。可以看出，SAR 影像中单个像元内的振幅和相位是N个散射体总和的贡献。在只有一个主导散射体的情况下，$N=1$。

本文利用上述模型模拟不同散射体个数分布同一分辨单元的情况（见图 9(a)，其中Δr表示高程向单一分辨单元），包括单一主导散射体和两个主导散射体。振幅A设置为 0～1 之间的随机数，相位φ设置为$[-\pi,\pi]$之间的随机值。模拟单一主导散射体的场景，设置包含 100 个像元的向量，其中冠层散射高度为 20 m，地面设置为 0 m，森林和地面间隔一个像元单位，逐次出现。图 9(a)中情况 2 在所有元素中包括两个主导散射体，位于 0 m 和 20 m 处，其他参数与情况 1 相同。

将上述两种散射体分布情况的干涉图模拟结果绘制在同一极坐标系下，展示干涉相位与振幅的分布，说明多散射体对 PH 技术的影响，结果如图 9(b)所示。可以明显看到，如果一个分辨率



(a) 模拟场景示意图 (b) 干涉图在极坐标下的结果

图9 不同散射体分布同一分辨单元模拟结果

Fig. 9 Simulation Results for the Same Resolution Cell with Different Scatterer Counts Are Shown

单元内只有地面或冠层散射贡献,干涉相位可以准确表征地面或冠层高度,对应图中黑色和蓝色圆圈。当一个分辨率单元内包含两个(或多个)主导散射体的贡献时,干涉相位的分布变得随机,取决于两个散射体的综合贡献,对应极坐标系中的洋红色圆圈。

对于单一主导散射体情况,通过干涉理论,可以得到干涉相位:

$$\varphi_{\text{interf}}=\angle\left\langle I_2^{\text{TC}}\cdot\text{conj}\left(I_1^{\text{TC}}\right)\right\rangle_L=\angle\left(|A|^2\exp\left(\text{j}k_z\cdot z\right)\right)=k_z\cdot z \tag{9}$$

显然,可以利用相位高度因子来准确获得单一主导散射体的高度。针对两个主导散射体情况:

$$I_1^{\text{TC}}=A_g\exp\left(\text{j}\varphi_g\right)+A_c\exp\left(\text{j}\varphi_c\right) \tag{10}$$

$$I_2^{\text{TC}}=A_g\exp\left(\text{j}\varphi_g\right)\exp\left(\text{j}k_z\cdot z_g\right)+A_c\exp\left(\text{j}\varphi_c\right)\exp\left(\text{j}k_z\cdot z_c\right) \tag{11}$$

式中,下标g和c分别表示地表和冠层。因此,最终得到干涉相位为:

$$\varphi_{\text{interf}}=\angle\left\langle I_2^{\text{TC}}\cdot\text{conj}\left(I_1^{\text{TC}}\right)\right\rangle_L=\angle\Big(|A_g|^2\exp\left(\text{j}k_z\cdot z_g\right)+|A_c|^2\exp\left(\text{j}k_z\cdot z_c\right)+A_gA_c\exp\left(\text{j}\left(\varphi_g-\varphi_c\right)\right)\exp\left(\text{j}k_z\cdot z_c\right)+A_gA_c\exp\left(\text{j}\left(\varphi_c-\varphi_g\right)\right)\exp\left(\text{j}k_z\cdot z_g\right)\Big) \tag{12}$$

式(12)表明,两个主导散射体得到的干涉相位是冠层和地面综合贡献的结果。因此,相高转换得到的高度是随机分布的,取决于地面和冠层的功率比。根据成像理论,在SAR聚焦过程中,所有高度方向的散射体信息都被压缩到一个2D(方位-距离坐标)分辨率单元中,干涉相位实际上表示的是单个像素中主导散射体的高度信息或多个散射体的混合信息。需要注意的是,相位到高度的转换关系只对单一主导散射体有效,这种约束条件是影响PH技术能否准确获取后向散射能量分布的关键。

5 结 语

本文对基于基线优选的PH技术获取森林垂直结构的能力进行了深入研究,并进一步对比分析了不同波段数据PH技术估算森林高度的精度。实验结果表明,与单基线PH技术的结果相比,本文提出的优选策略能够取得良好的效果。不同波段数据的PH方法结果对比分析后发现,由于不同波段的穿透性以及森林内的散射机制效应,强穿透P波段雷达所有极化方式获取的PH后向散射能量剖面均以地面散射贡献为主,L波段的后向散射能量剖面则以冠层散射贡献为主。本文实验获取的森林高度结果显示,与LiDAR CHM相比,P波段与L波段估计的PH CHM平均RMSE分别为4.60 m与5.21 m。从实验结果可以看出,针对覆盖北方温带森林的TomoSense数据集,L波段比P波段更适合森林冠层高度反演。

尽管目前PH技术不能够准确分离地面与冠层信息,但是仍能在一定程度上表征空间窗口内散射体数量与散射能量在不同水平高度层的分布,这种关系在森林高度反演以及生物量估计中仍存在较大的待开发潜力。总之,作为一种通过少量干涉图获取森林垂直结构的新方法,PH技术具备成为未来星载SAR卫星森林监测任务中主流解决方案的巨大潜力,将为广域监测森林制图提供新的技术途径。

致谢:感谢欧洲空间局提供的 TomoSense 数据。

参 考 文 献

[1] GCOS. The Global Observing System for Climate: Implementation Needs[M]. Geneva: World Meteorological Organization Publications, 2016.

[2] 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.
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.

[3] LEI Y, TREUHAFT R, KELLER M, et al. Quantification of Selective Logging in Tropical Forest with Spaceborne SAR Interferometry [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 211: 167-183.

[4] PARDINI M, ARMSTON J, QI W L, et al. Early Lessons on Combining LiDAR and Multi-Baseline SAR Measurements for Forest Structure Characterization [J]. *Surveys in Geophysics*, 2019, 40 (4): 803-837.

[5] TEBALDINI S, HO TONG MINH D, d'ALESSANDRO M M, et al. The Status of Technologies to Measure Forest Biomass and Structural Properties: State of the Art in SAR Tomography of Tropical Forests [J]. *Surveys in Geophysics*, 2019, 40 (4): 779-801.

[6] 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.
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.

[7] 郭华东. 雷达对地观测理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
GUO Huadong. Radar for Earth Observation [M]. Beijing: Science Press, 2000.

[8] HANSSEN R F. Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis: Vol. 2[M]. Amsterdam :Kluwer Academic Publishers,2001.

[9] CLOUDE S R. Polarisation: Applications in Remote Sensing[M]. Oxford :Oxford University Press, 2009.

[10] LE TOAN T, 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.

[11] MANZONI M, PETRUSHEVSKY N, WU C J, et al. SAR Sensing of the Atmosphere: Stack-Based Processing for Tropospheric and Ionospheric Phase Retrieval[J]. *Geo-spatial Information Science*, 2024, 27(3): 624-637.

[12] 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.

[13] 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.

[14] CLOUDE S R, PAPATHANASSIOU K P. Three-Stage Inversion Process for Polarimetric SAR Interferometry [J]. *IEE Proceedings—Radar, Sonar and Navigation*, 2003, 150(3): 125-134.

[15] WU C J, WANG C C, SHEN P, et al. Forest Height Estimation Using PolInSAR Optimal Normal Matrix Constraint and Cross-Iteration Method [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2019, 16(8): 1245-1249.

[16] LU H X, SUO Z Y, GUO R, et al. S-RVoG Model for Forest Parameters Inversion over Underlying Topography [J]. *Electronics Letters*, 2013, 49 (9): 618-620.

[17] 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.

[18] CLOUDE S R. Polarization Coherence Tomography [J]. *Radio Science*, 2006, 41(4): RS4017.

[19] GULIAEV R, KIM J S, PARDINI M, et al. On the Use of Tomographically Derived Reflectivity Profiles for Pol-InSAR Forest Height Inversion in the Context of the BIOMASS Mission [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2024, 62: 5228712.

[20] REIGBER A, MOREIRA A, PAPATHANASSIOU K P. First Demonstration of Airborne SAR Tomography Using Multibaseline L-Band Data[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium,Hamburg, Germany, 1999.

[21] YU Y H, D'ALESSANDRO M M, TEBALDINI S, et al. Signal Processing Options for High Resolu-

tion SAR Tomography of Natural Scenarios[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(10): 1638.

[22] AGHABABAEI H, FERRAIOLI G, FERRO-FAMIL L, et al. Forest SAR Tomography: Principles and Applications[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2020, 8(2): 30-45.

[23] 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.

[24] LI X W, 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*, 2016, 54(1): 153-166.

[25] MINH D H T, TOAN T L, ROCCA F, et al. SAR Tomography for the Retrieval of Forest Biomass and Height: Cross-Validation at Two Tropical Forest Sites in French Guiana[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 175: 138-147.

[26] YANG X W, TEBALDINI S, D'ALESSANDRO M M, et al. Tropical Forest Height Retrieval Based on P-Band Multibaseline SAR Data[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2020, 17(3): 451-455.

[27] d'ALESSANDRO M M, TEBALDINI S, QUEGAN S, et al. Interferometric Ground Cancellation for Above Ground Biomass Estimation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 58(9): 6410-6419.

[28] WAN J, WANG C C, SHEN P, et al. Forest Height and Underlying Topography Inversion Using Polarimetric SAR Tomography Based on SKP Decomposition and Maximum Likelihood Estimation [J]. *Forests*, 2021, 12(4): 444.

[29] WU C J, YANG X W, YU Y H, et al. Assessment of Underlying Topography and Forest Height Inversion Based on TomoSAR Methods[J]. *Geospatial Information Science*, 2024, 27(2): 311-326.

[30] TREUHAFT R N, CHAPMAN B D, DOS SANTOS J R, et al. Vegetation Profiles in Tropical Forests from Multibaseline Interferometric Synthetic Aperture Radar, Field, and LiDAR Measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, 114(D23): D23110.

[31] SHIROMA G H X, LAVALLE M. Digital Terrain, Surface, and Canopy Height Models from InSAR Backscatter-Height Histograms [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 58(6): 3754-3777.

[32] LEI Y, TREUHAFT R, GONÇALVES F. Automated Estimation of Forest Height and Underlying Topography over a Brazilian Tropical Forest with Single-Baseline Single-Polarization TanDEM-X SAR Interferometry[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 252: 112132.

[33] WU C J, TEBALDINI S, MANZONI M, et al. Evaluating Phase Histograms for Remote Sensing of Forested Areas Using L-Band SAR: Theoretical Modeling and Experimental Results [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2024, 62: 4410317.

[34] TEBALDINI S, D' ALESSANDRO M M, ULANDER L M H, et al. TomoSense: A Unique 3D Dataset over Temperate Forest Combining Multi-Frequency Mono- and Bi-Static Tomographic SAR with Terrestrial, UAV and Airborne LiDAR, and In-Situ Forest Census[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2023, 290: 113532.

[35] 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): 5294-5311.