

顾及子视相干集几何分布的时频 InSAR 森林高度反演方法

侯佳丽¹, 沈鹏², 张路¹, 吴传军¹, 谭鹏源¹

1. 武汉大学 测绘遥感信息工程全国重点实验室, 武汉 430079;

2. 武汉大学 遥感信息工程学院, 武汉 430079

摘要: 森林高度是表征森林垂直结构的重要参数, 对于森林资源管理、碳循环及气候变化等研究具有重要意义。传统森林高度反演方法基于时间频率 TF (Time Frequency) 分析的雷达干涉测量 InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) 技术采用子视随机地体散射 RVoG (Random Volume over Ground) 模型, 难以准确提取用于描述子视复相干系数几何分布的特征点, 导致森林高度反演精度低。为此, 本文提出了一种顾及子视相干集几何分布的时频 InSAR 森林高度反演方法。首先通过子孔径分解构建多孔径干涉相干矩阵, 其次提出子视相干集概念并分析其几何轮廓分布特性, 在此基础上利用相干集长轴获取更接近纯体去相干的复数观测和地表相位, 最后采用固定消光系数法实现森林高度产品反演。采用欧洲航天局 2016 年在非洲加蓬共和国通过 AfriSAR 机载任务获取的全极化 P 波段 SAR 数据进行实验, 实验区域覆盖 Maboumie 地区, 验证数据采用全波形激光雷达 LVIS (Land Vegetation and Ice Sensor) 获取的 LiDAR 数据。实验结果表明, 在 40 m×40 m 样地尺度下, 本文单极化 TF 分析方法的森林高度估计精度 (RMSE=8.54 m) 比传统方法 (RMSE=10.22 m) 改善了 34.44%, 可达到与全极化方法相近的森林高度估计精度, 可为大范围、低成本的森林监测应用提供可靠的技术途径。

关键词: 森林高度, 雷达干涉测量 (InSAR), 时频 (TF) 分析, 子孔径分解, 相干集, 随机地体散射模型 (RVoG)

中图分类号: TP701/P2

引用格式: 侯佳丽, 沈鹏, 张路, 吴传军, 谭鹏源. 2026. 顾及子视相干集几何分布的时频 InSAR 森林高度反演方法. 遥感学报, 30(4): 943-956

Hou J L, Shen P, Zhang L, Wu C J and Tan P Y. 2026. Time-frequency InSAR forest height inversion method that considers the geometric distribution of the sub-look coherent set. National Remote Sensing Bulletin, 30(4): 943-956 [DOI:10.11834/jrs.20265347]

1 引言

森林高度是表征森林垂直结构的关键参数, 与森林地上生物量及碳储量密切相关。因此, 获取大范围森林冠层高度模型 CHM (Canopy Height Model) 产品, 对森林资源管理、区域乃至全球尺度碳循环研究及气候变化评估等具有重要意义 (陈尔学等, 2007; 吴传军等, 2025)。与光学遥感和激光雷达 LiDAR (Light Detection and Ranging) 技术相比, 合成孔径雷达 SAR (Synthetic Aperture Radar) 不仅具有全天时全天候、穿云透雾的观测

能力, 而且在一定程度上能够穿透森林冠层到达地表、获取复杂森林内部的散射信息, 因而 SAR 遥感技术在大范围、连续获取森林高度产品方面具有独特的潜力。特别是干涉 SAR (Interferometric SAR, InSAR) 技术, 其干涉相位观测反映了散射体在垂直方向上的几何投影差异, 表现出对森林垂直结构参数敏感的特点。此外, 结合极化测量的 InSAR 技术, 即极化 InSAR 技术 (Polarimetric InSAR, PolInSAR), 能够增强不同散射机制的区分度, 为森林区域相干散射建模与参数解算提供

收稿日期: 2025-09-12; 预印本: 2025-12-20

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 42404029); 中国博士后科学基金 (编号: 2024M752479); 中国博士后创新人才支持计划 (编号: BX20240270); 湖北省博士后项目 (编号: 2024HBBHCXA062); 中国科技部—欧洲空间局“龙”计划 6 期项目 (编号: 95436)

第一作者简介: 侯佳丽, 研究方向为干涉 SAR/极化干涉 SAR 森林参数及林下地形反演。E-mail: houjiali@whu.edu.cn

通信作者简介: 沈鹏, 研究方向为时序极化干涉 SAR 森林参数反演与地表形变监测。E-mail: shen-peng@whu.edu.cn

了强有力的技术支撑,是目前广泛使用 InSAR 技术获取森林高度产品的重要技术手段之一 (Treuhft 等, 1996; Cloude 等, 1998; 朱建军等, 2025)。

现有的 InSAR 森林高度反演研究中通常采用相干散射模型来定义 InSAR 观测值与森林高度之间的关系。其中,广泛使用的随机地体散射 RVoG (Random Volume over Ground) 模型 (Treuhft 等, 1996) 假设森林场景是由均匀植被冠层和不可穿透地表层组成的两层结构体,建立了复相干观测量与森林高度、地表相位、消光系数和地体幅度比之间的函数映射关系,表征着雷达微波信号在植被层中的相干散射过程。RVoG 模型因其物理机制明确,已成为 InSAR 技术反演森林高度的重要理论基础 (Papathanassiou 和 Cloude, 2001; 罗环敏等, 2010; 张庭苇等, 2022)。基于 RVoG 模型的 InSAR 森林高度反演方法存在模型参数较多导致解算秩亏的问题,通常需借助多极化观测数据以增加观测量。然而,多极化数据获取难度大、成本高,另外可用的星载多极化 SAR 卫星数据数量相对有限。相比之下,单极化 SAR 数据易获取、成本低,已存在诸多以单极化观测为主要业务模式的星载 SAR 卫星 (如 TanDEM-X、陆探一号等) 在轨稳定运行,为采用单极化 InSAR 技术实现全球范围森林监测提供可能。因此,开展单极化 InSAR 技术反演森林高度产品研究与目前星载 SAR 单极化数据主流获取方式相符合,有利于满足快速大范围森林监测的需求。

现有基于单极化 SAR 数据获取森林高度产品主要包括基于 SINC 模型和时频分析 TF (Time Frequency) 两类常用方法。在短波单极化 InSAR 观测数据条件下,通过设置地表散射贡献和消光系数为零,将 RVoG 模型简化为复相干系数幅度部分与森林高度之间的 SINC 函数关系,仅利用相干幅度信息便可反演森林高度 (Chen 等, 2016; Olesk 等, 2016; 范亚雄等, 2020)。由于模型过于简化,忽略了地表贡献和消光系数的影响,导致无法准确描述长波雷达信号与森林场景之间的交互过程。考虑湿度和风动等因素引起的随机运动影响,通过积分中值定理将 RVoG 模型简化为由森林高度、 S_{science} (取决于湿度变化引起的介电波动水平) 和 C_{science} (取决于风动引起的随机运动影响) 3 个参数描述的时间失相干 SINC 模型,扩展

了 SINC 模型的适用范围,使用星载 ALOS PALSAR-1 L 波段数据实现了大范围森林高度制图 (Lei 等, 2019; Lei 和 Siqueira, 2015)。然而,基于时间失相干 SINC 模型的森林高度反演方法需要借助外部 LiDAR 数据辅助确定参数 S_{science} 和 C_{science} ,且存在上述两个参数全局不变的假设。

相较于 SINC 模型,时间频率 TF (Time Frequency) 分析法将同一多普勒带宽的单极化 SAR 影像分解为不同频谱观测的子视 SAR 图像,通过改变方位角观测来实现对同一地表目标的不同观测 (Garestier 等, 2008a, 2008b)。由于长波段 SAR 具有强穿透和宽观测角度的特性,不同子视图的 SAR 信号中包含不同大小、排列和密度的森林结构 (树干/冠层/地表),从而包含不同比例的地面和冠层散射贡献 (Ferro-Famil 等, 2003)。Fu 等 (2019) 和 Wang 等 (2023) 将子视复相干系数与森林高度、消光系数、地体幅度比和地表相位相关联,首次提出了子视 RVoG 模型。该 TF 分析方法的主要思想为通过子孔径分解得到多个子视复相干系数,基于子视 RVoG 模型通过相干直线拟合和固定消光系数进行森林高度反演,其优势在于无需外部数据辅助便能实现大范围森林高度反演。然而,上述传统 TF 分析方法仅采用几个离散的子视复相干系数作为观测数据,难以准确获取用于描述子视复相干系数几何分布的特征点,从而限制了森林高度反演精度。

鉴于此,在分析子视空间内复相干系数几何分布特性的基础上,本文提出了一种顾及子视相干集几何分布的时频 InSAR (Time Frequency-based InSAR, TFInSAR) 森林高度反演方法。首先,参考 PolInSAR 相干集理论,构建多孔径干涉相干矩阵,提出子视相干集概念并分析其几何轮廓分布特性。其次,在分析多孔径散射机理差异的基础上,利用相干集轮廓边界提取方法来获取相干集长轴并将其作为地体散射分离最大的两个复相干系数。最后,根据垂直向有效波数确定更接近纯体去相干系数的复数观测和地表相位之后,利用固定消光系数法求解森林高度。实验采用了欧洲航天局 2016 年于非洲加蓬共和国获取的 AfriSAR 机载任务全极化 P 波段 SAR 数据,实验区域覆盖 Mabounie 地区,选取了传统 TF 分析方法、全极化方法作为对比方法。实验结果表明,在 40 m×40 m 样地尺度下,传统 TF 分析法和本文 TF

分析法获取的森林高度产品平均RMSE分别为10.22 m和6.70 m，本文TF分析方法的森林高度产品精度比传统方法改善了34.44%。在单极化SAR数据的条件下，本文TF分析法可达到与全极化方法相近的森林高度产品精度，为大范围、低成本的森林监测提供了可靠的技术途径。

2 研究方法

2.1 InSAR观测数据及相干散射模型介绍

2.1.1 PolInSAR观测数据及极化复相干系数模型

PolInSAR技术在InSAR技术基础上引入了极化测量，通过4种典型的电磁波收发组合模式(HH、HV、VH、VV)可获取目标的全极化SAR影像。在满足互易性条件下，采用Pauli基散射矢量 $\mathbf{k}_{\text{Pol}} \in \mathbb{C}^{3 \times 1}$ 来描述地表目标的极化散射信息(Lee和Pottier, 2017):

$$\mathbf{k}_{\text{Pol}} = 1/\sqrt{2} [s_{\text{HH}} + s_{\text{VV}} \quad s_{\text{HH}} - s_{\text{VV}} \quad 2s_{\text{HV}}]^T \quad (1)$$

式中， $s_m (m = \text{HH}, \text{HV}, \text{VV})$ 表示不同线性基极化方式的单视复数数据，上标 T 表示转置操作。当极化雷达以略微不同的视角对目标进行两次全极化观测时，可利用两次获取的Pauli基散射矢量 $\mathbf{k}_{\text{Pol},j} \in \mathbb{C}^{3 \times 1}, j = 1, 2$ 来定义全极化干涉相干矩阵 $\mathbf{T}_{\text{PolIn}} \in \mathbb{C}^{6 \times 6}$:

$$\mathbf{T}_{\text{PolIn}} = \left\langle \begin{bmatrix} \mathbf{k}_{\text{Pol},1} \\ \mathbf{k}_{\text{Pol},2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{k}_{\text{Pol},1}^H & \mathbf{k}_{\text{Pol},2}^H \end{bmatrix} \right\rangle = \begin{bmatrix} \langle \mathbf{T}_{\text{Pol},1} \rangle & \langle \mathbf{\Omega}_{\text{PolIn}} \rangle \\ \langle \mathbf{\Omega}_{\text{PolIn}}^H \rangle & \langle \mathbf{T}_{\text{Pol},2} \rangle \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中， $\mathbf{T}_{\text{Pol},j} \in \mathbb{C}^{3 \times 3}, j = 1, 2$ 表示极化相干矩阵， $\mathbf{\Omega}_{\text{PolIn}} \in \mathbb{C}^{3 \times 3}$ 表示极化干涉互相干矩阵，包含极化和干涉信息，上标 H 表示复数共轭转置操作， $\langle \cdot \rangle$ 表示空间集合平均。

根据复归一化投影矢量 $\mathbf{w}_{\text{Pol}} \in \mathbb{C}^{3 \times 1}$ 对 $\mathbf{T}_{\text{PolIn}}$ 进行投影变换，可计算出不同极化方式的复相干性 $\gamma(\mathbf{w}_{\text{Pol}})$:

$$\gamma_{\text{Pol}}(\mathbf{w}_{\text{Pol}}) = \frac{\mathbf{w}_{\text{Pol}}^H \mathbf{\Omega}_{\text{PolIn}} \mathbf{w}_{\text{Pol}}}{\sqrt{\mathbf{w}_{\text{Pol}}^H \mathbf{T}_{\text{Pol},1} \mathbf{w}_{\text{Pol}}} \sqrt{\mathbf{w}_{\text{Pol}}^H \mathbf{T}_{\text{Pol},2} \mathbf{w}_{\text{Pol}}}} \quad (3)$$

式中，复归一化矢量 \mathbf{w}_{Pol} 可参数化为

$$\mathbf{w}_{\text{Pol}} = \begin{bmatrix} \cos\alpha \\ \sin\alpha \cos\beta e^{i\delta} \\ \sin\alpha \sin\beta e^{i\psi} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中， $\alpha, \beta \in [0, \pi/2]$ 和 $\delta, \psi \in [0, 2\pi)$ 是与散射目标几何和电磁特性相关的实数角度参数， i 为

虚数单位。

极化RVoG模型将植被覆盖区抽象为包含随机分布粒子集合的植被层及微波不可穿透的地表层，建立了不同极化方式复相干系数 $\gamma(\mathbf{w}_{\text{Pol}})$ 与植被高度 h_v 、消光系数 σ 、地体幅度比 m 之间的联系，其表达式为(Papathanassiou和Cloude, 2001)

$$\gamma(\mathbf{w}_{\text{Pol}}) = e^{i\varphi_0} \frac{\gamma_v(h_v, \sigma) + m(\mathbf{w}_{\text{Pol}})}{1 + m(\mathbf{w}_{\text{Pol}})} \quad (5)$$

式中， φ_0 表示地表相位， $m(\mathbf{w}_{\text{Pol}})$ 表示极化方式为 \mathbf{w}_{Pol} 的地体幅度比， γ_v 表示仅包含植被冠层散射贡献的纯体去相干系数，具体表达式如下(Papathanassiou和Cloude, 2001):

$$\gamma_v = \frac{2\sigma(e^{2\sigma h_v \cos\theta} + ik_z h_v - 1)}{(2\sigma + ik_z \cos\theta)(e^{2\sigma h_v \cos\theta} - 1)} \quad (6)$$

式中， k_z 表示垂直向有效波数(Kugler等, 2015):

$$k_z = \frac{4\pi B_{\perp}}{\lambda R \sin\theta} \quad (7)$$

式中， B_{\perp} 为垂直基线长度， λ 为雷达波长， R 为斜距， θ 为雷达入射角。

2.1.2 TFInSAR观测数据及子视复相干系数模型

TFInSAR技术通过快速傅里叶变换FFT(Fast Fourier Transform)，将全分辨率SAR影像分解为多个子视影像，每个子视影像包含全分辨率SAR影像频谱的不同部分，对应着不同范围的方位向斜视角及其变化范围。方位向斜视角 α_{AZ} 可被定义为(Garestier等, 2008a; Garestier等, 2011):

$$\alpha_{AZ} = \arcsin\left(\frac{f_d \lambda}{2\nu_p}\right) \quad (8)$$

式中， f_d 表示多普勒频率， ν_p 表示SAR平台运动速率。方位向斜视角变化范围 $\Delta\alpha_{AZ}$ 可表示为

$$\Delta\alpha_{AZ} = \frac{\lambda}{2\delta_{AZ}}, \delta_{AZ} = F_{AZ} \frac{\nu_p}{B_{AZ}} \quad (9)$$

式中， δ_{AZ} 为方位向分辨率， F_{AZ} 表示权重因子， B_{AZ} 表示多普勒带宽。

TFInSAR技术通过分解多个子视影像来增加方位向观测量，为实现单极化单基线InSAR数据反演森林高度提供了契机。不同子视影像包含不同的方位角范围，使得不同子视影像干涉信息中包含的地表与体散射信息不同。在这一情况下，随着方位向入射角的变化，子视SAR信号包含着不同比例的地表和冠层散射信号，其子视RVoG模型可表达为(Fu等, 2019):

$$\gamma(\alpha_{AZ}, \Delta\alpha_{AZ}) = e^{i\varphi_0} \frac{\gamma_v(h_v, \sigma(\alpha_{AZ}, \Delta\alpha_{AZ})) + m(\alpha_{AZ}, \Delta\alpha_{AZ})}{1 + m(\alpha_{AZ}, \Delta\alpha_{AZ})} \quad (10)$$

因为方位向入射角变化范围 $\Delta\alpha_{AZ}$ 有限, 一般不会引起消光系数 σ 的显著变化 (Garestier 等, 2008b)。因此, 可假设不同子视间的消光路径拥有同样的消光系数 σ , 相应的子视 RVoG 模型可简化为

$$\gamma(\alpha_{AZ}, \Delta\alpha_{AZ}) = e^{i\varphi_0} \frac{\gamma_v(h_v, \sigma) + m(\alpha_{AZ}, \Delta\alpha_{AZ})}{1 + m(\alpha_{AZ}, \Delta\alpha_{AZ})} \quad (11)$$

传统 TF 分析方法 (Fu 等, 2019) 以离散的几个子视复相干系数集合作为观测数据, 利用整体最小二乘直线拟合获取地表相位, 选取离地表相位最远的子视复相干系数作为最接近纯体去相干的复数观测, 采用固定消光系数法反演森林高度和地体幅度比两个参数。

2.2 本文提出的新方法: 顾及子视相干集几何分布的时频 InSAR 森林高度反演方法

针对传统方法仅利用离散子视复相干系数难以代表子视复相干系数整体几何分布特点的问题, 本文提出了顾及子视相干集几何分布的 TFInSAR 森林高度反演方法。首先, 通过子孔径分解构建多孔径干涉相干矩阵, 定义了子视空间内归一化复投影矢量并提出了子视相干集概念及其表达式; 其次, 根据子视相干集几何轮廓分布特性来获取地体散射分离最大的两个复相干系数; 最后, 根据垂直向有效波数确定更接近纯体去相干系数的复数观测和地表相位之后, 采用固定消光系数法求解森林高度。

2.2.1 构建多孔径干涉相干矩阵

根据 Fu 等 (2019) 研究, TF 分析方法的子孔径数选为 5 较为合适。因此, 本文采用子孔径数 5 为例进行新方法介绍。类似于极化 SAR 数据集, 将子孔径分解后 5 个不同方位向斜视角的子视影像进行堆叠, 可构建子视散射矢量, 可表达如下:

$$\mathbf{k}_{TF} = [s_1 \ s_2 \ s_3 \ s_4 \ s_5]^T \quad (12)$$

式中, s_n ($n = 1, 2, 3, 4, 5$) 表示不同子视方向的单视复数数据。

当雷达对地面进行两次单极化观测时, 对两次获取的全分辨率单极化影像进行子孔径分解, 将两个子视散射矢量 $\mathbf{k}_{TF, j} \in \mathbb{C}^{5 \times 1}$, $j = 1, 2$ 进行堆叠并与其自身共轭转置相乘, 可得多孔径干涉相干矩阵 $\mathbf{T}_{TFIn} \in \mathbb{C}^{10 \times 10}$, 可表达如下:

$$\mathbf{T}_{TFIn} = \left\langle \begin{bmatrix} \mathbf{k}_{TF,1} \\ \mathbf{k}_{TF,2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{k}_{TF,1}^H & \mathbf{k}_{TF,2}^H \end{bmatrix} \right\rangle = \begin{bmatrix} \langle \mathbf{T}_{TF,1} \rangle & \langle \boldsymbol{\Omega}_{TFIn} \rangle \\ \langle \boldsymbol{\Omega}_{TFIn}^H \rangle & \langle \mathbf{T}_{TF,2} \rangle \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中, $\mathbf{T}_{TF, j} \in \mathbb{C}^{5 \times 5}$, $j = 1, 2$ 是子视相干矩阵, $\boldsymbol{\Omega}_{TFIn} \in \mathbb{C}^{5 \times 5}$ 是子视干涉互相干矩阵。

根据多极化干涉相干矩阵计算不同极化方式复相干系数的方式, 参考极化投影矢量 \mathbf{w}_{Pol} , 同样可定义一个归一化子视复投影矢量 $\mathbf{w}_{TF} \in \mathbb{C}^{5 \times 1}$, 用来描述子视空间内任意复相干系数的分布。因此, 任意子视方向的复相干系数 $\gamma(\mathbf{w}_{TF})$ 可表达为

$$\gamma(\mathbf{w}_{TF}) = \frac{\mathbf{w}_{TF}^H \boldsymbol{\Omega}_{TFIn} \mathbf{w}_{TF}}{\sqrt{\mathbf{w}_{TF}^H \mathbf{T}_{TF,1} \mathbf{w}_{TF}} \sqrt{\mathbf{w}_{TF}^H \mathbf{T}_{TF,2} \mathbf{w}_{TF}}} \quad (14)$$

根据欧拉公式, 参考极化投影矢量 $\mathbf{w}_{Pol} \in \mathbb{C}^{3 \times 1}$ 的定义形式 (式 (4)), 同样可将子视投影矢量 \mathbf{w}_{TF} 定义为由 4 个幅度角 α_n ($n = 1, 2, 3, 4$) $\in [0, \pi/2]$ 和 4 个相位角 δ_n ($n = 1, 2, 3, 4$) $\in [0, 2\pi)$ 描述的归一化复数矢量, 其表达式为

$$\mathbf{w}_{TF} = \begin{bmatrix} \cos\alpha_1 \\ \sin\alpha_1 \cos\alpha_2 e^{i\delta_1} \\ \sin\alpha_1 \sin\alpha_2 \cos\alpha_3 e^{i\delta_2} \\ \sin\alpha_1 \sin\alpha_2 \sin\alpha_3 \cos\alpha_4 e^{i\delta_3} \\ \sin\alpha_1 \sin\alpha_2 \sin\alpha_3 \sin\alpha_4 e^{i\delta_4} \end{bmatrix} \quad (15)$$

在满足等同散射机制 ESM (Equal Scattering Mechanisms) 的情况下, 即 $\mathbf{T}_{TF,1} \approx \mathbf{T}_{TF,2}$, 可得到白化干涉互相干矩阵 $\tilde{\boldsymbol{\Omega}}_{TF}$:

$$\tilde{\boldsymbol{\Omega}}_{TFIn} = \bar{\mathbf{T}}_{TF}^{-1/2} \boldsymbol{\Omega}_{TFIn} \bar{\mathbf{T}}_{TF}^{-1/2}, \bar{\mathbf{T}}_{TF} = \frac{\mathbf{T}_{TF,1} + \mathbf{T}_{TF,2}}{2} \quad (16)$$

同样可定义归一化复矢量 $\mathbf{v}_{TF} = \bar{\mathbf{T}}_{TF}^{1/2} \mathbf{w}_{TF}$, 即 $\mathbf{v}_{TF}^H \mathbf{v}_{TF} = 1$, 基于矩阵 $\tilde{\boldsymbol{\Omega}}_{TFIn}$ 计算子视复相干系数, 可表示为

$$\gamma(\mathbf{v}_{TF}) = \frac{\mathbf{v}_{TF}^H \boldsymbol{\Omega}_{TFIn} \mathbf{v}_{TF}}{\mathbf{v}_{TF}^H \bar{\mathbf{T}}_{TF} \mathbf{v}_{TF}} = \frac{\mathbf{v}_{TF}^H \tilde{\boldsymbol{\Omega}}_{TFIn} \mathbf{v}_{TF}}{\mathbf{v}_{TF}^H \mathbf{v}_{TF}} = \mathbf{v}_{TF}^H \tilde{\boldsymbol{\Omega}}_{TFIn} \mathbf{v}_{TF} \quad (17)$$

式中, 矢量 \mathbf{v}_{TF} 同样可具有类似于矢量 \mathbf{w}_{TF} 的结构定义, 通过设置幅度角 α_n ($n = 1, 2, 3, 4$) $\in [0, \pi/2]$, 搜索间隔为 $\pi/6$, 相位角 δ_n ($n = 1, 2, 3, 4$) $\in [0, 2\pi)$, 搜索间隔为 $\pi/3$, 在子视空间内遍历计算, 得到如图 1 所示的复相干系数散点分布。

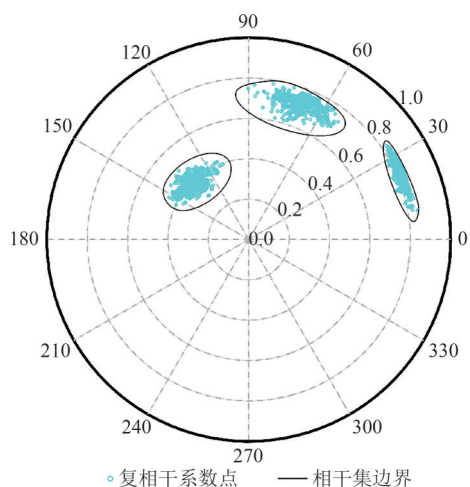


图1 子视复相干系数散点分布及相干集边界图

Fig. 1 The complex coherence coefficient and coherence edge map

2.2.2 基于子视相干集几何轮廓的纯体去相干系数优化方法

在复平面单位圆内，受到斑点噪声的影响，子视复相干系数的集合（即子视相干集）通常被一个类似于椭圆的凸多边形所包络，该多边形区域被称为相干区域。相干区域的扁率（Lee等，2011）反映了不同子视复相干系数的共线化程度；当扁率较高时，相干区域变窄，更加接近椭圆形

$$[\gamma_{\max}, \gamma_{\min}] = \operatorname{argmax}_{\mathbf{v}_{\max}, \mathbf{v}_{\min}} \sqrt{\left(\operatorname{real}(\gamma(\mathbf{v}_{\max})) - \operatorname{real}(\gamma(\mathbf{v}_{\min}))\right)^2 + \left(\operatorname{imag}(\gamma(\mathbf{v}_{\max})) - \operatorname{imag}(\gamma(\mathbf{v}_{\min}))\right)^2} \quad (20)$$

式中， $\operatorname{imag}(\cdot)$ 表示取复数的虚部。利用两个长轴端点确定相干直线，与复数单位圆相交可得到两个交点，与 γ_{\max} 、 γ_{\min} 更靠近的交点分别被表示为 ϕ_{\max} 、 ϕ_{\min} 。本文TF方法将旋转角度搜索间隔被设定为 1° ，以确保高精度的森林高度反演。经实验观测，旋转角度间隔在一个较大取值范围均可保证相干长轴端点提取的稳定性，为了提高计算效率，可以适当放宽旋转角度间隔。

通过垂直向有效波数 k_z 符号，根据以下判断准则可获得地表相位 ϕ_0 和更接近纯体去相干的复数观测 γ_{vol} （Kugler等，2015）：

当 $k_z > 0$ 时

$$\begin{cases} \phi_0 = \phi_{\max}, \gamma_{\text{vol}} = \gamma_{\min} & \arg\left(e^{i\phi_{\max}}(e^{i\phi_{\min}})^*\right) > 0 \\ \phi_0 = \phi_{\min}, \gamma_{\text{vol}} = \gamma_{\max} & \arg\left(e^{i\phi_{\max}}(e^{i\phi_{\min}})^*\right) < 0 \end{cases} \quad (21)$$

当 $k_z < 0$ 时

$$\begin{cases} \phi_0 = \phi_{\min}, \gamma_{\text{vol}} = \gamma_{\max} & \arg\left(e^{i\phi_{\max}}(e^{i\phi_{\min}})^*\right) > 0 \\ \phi_0 = \phi_{\max}, \gamma_{\text{vol}} = \gamma_{\min} & \arg\left(e^{i\phi_{\max}}(e^{i\phi_{\min}})^*\right) < 0 \end{cases} \quad (22)$$

状。因此，如何准确地获取相干区域的椭圆长轴，有利于最大化分离地体散射信号，实现纯体去相干系数优化。本文建议采用相干集边界法（Flynn等，2002）来提取子视相干集长轴两个端点，接下来详细介绍该算法原理。

相干集边界法可通过等间隔旋转相干区域后求解其相干幅度最大最小的复相干系数点对，将这些点对连接起来就是相干集的几何轮廓（Flynn等，2002），其中具有最大距离的一组点对便可认为是相干椭圆长轴的两个端点。具体可通过求解以下旋转后的相干区域极值问题来实现：

$$\operatorname{real}\left(\gamma(\mathbf{v}_{\text{TF}})e^{i\phi_j}\right) = \frac{\mathbf{v}_{\text{TF}}^H \left(e^{i\phi_j} \tilde{\mathbf{Q}}_{\text{TFIn}} + e^{-i\phi_j} \tilde{\mathbf{Q}}_{\text{TFIn}}^* \right) \mathbf{v}_{\text{TF}}}{2} \quad (18)$$

式中， $\operatorname{real}(\cdot)$ 表示取复数的实部， ϕ_j 表示在 $[0, \pi)$ 范围内第 j 次等间隔采样的旋转角度值。通过求解 $e^{i\phi_j} \tilde{\mathbf{Q}}_{\text{TFIn}} + e^{-i\phi_j} \tilde{\mathbf{Q}}_{\text{TFIn}}^*$ 的广义特征值，得到最大最小特征矢量 $\mathbf{v}_{\max, j}$ 和 $\mathbf{v}_{\min, j}$ ，对应的相干集边界点对为

$$\gamma(\mathbf{v}_{\max, j}) = \mathbf{v}_{\max, j}^H \tilde{\mathbf{Q}}_{\text{TFIn}} \mathbf{v}_{\max, j}, \gamma(\mathbf{v}_{\min, j}) = \mathbf{v}_{\min, j}^H \tilde{\mathbf{Q}}_{\text{TFIn}} \mathbf{v}_{\min, j} \quad (19)$$

通过 N 次相干区域旋转，计算 N 个复相干系数点对 $\{\mathbf{v}_{\max, j}, \mathbf{v}_{\min, j} | j = 1, 2, \dots, N\}$ ，根据点对距离最大来确定相干区域椭圆长轴的两个端点（即 γ_{\max} 和 γ_{\min} ），从而实现了地体散射分离最大化，即：

式中， $\arg(\cdot)$ 为取复数的角度，上标*为共轭操作。

2.2.3 森林高度反演新方法流程

本文新方法采用多孔径干涉相干矩阵构建、基于子视相干集几何轮廓的纯体去相干系数优化方法和固定消光系数森林高度反演法3个步骤，完成单基线单极化TFInSAR森林高度反演研究。首先，本文选取单极化SAR干涉对数据，采用孔径数为5、频谱带宽为60%的参数进行子孔径分解，得到5对子视图用于后续时频分析；其次，借鉴多极化干涉分析方法构建主从影像子视散射矢量和相应的多孔径干涉相干矩阵，并对其去平、去地形、多视平均空间滤波等预处理；接着，利用相干集边界法提取相干区域几何轮廓上的复相干系数点对集合，通过距离最大原则选取相干集长轴两个端点，结合垂直向波数符号得到更接近纯体去相干的复相干系数和地表相位；最后，将消光系数固定为0.05 dB，将更接近纯体去相干系数的复数观测作为子视RVoG模型的输入数据，利

用树高与地体幅度比的二维查找表检索得到最终森林高度结果 (Cloude 等, 2003)。本文方法获取森林高度的流程如图2所示。

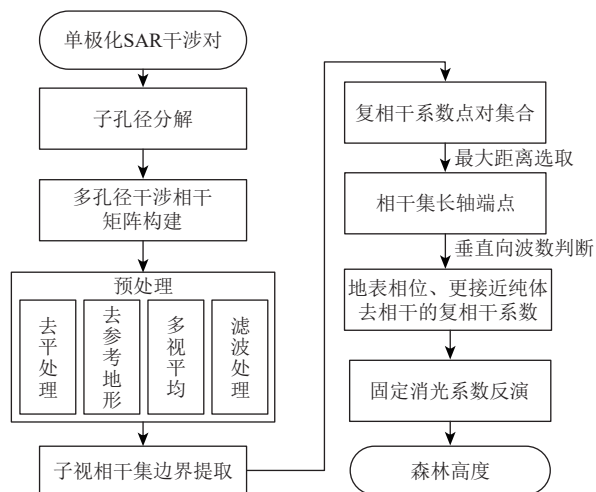


图2 顾及子视相干集几何分布的时频InSAR森林高度反演新方法流程图

Fig. 2 Flowchart of time-frequency InSAR forest height inversion considering the geometric distribution of sub-looks coherent set

3 实验结果与分析

3.1 实验区域及实验数据

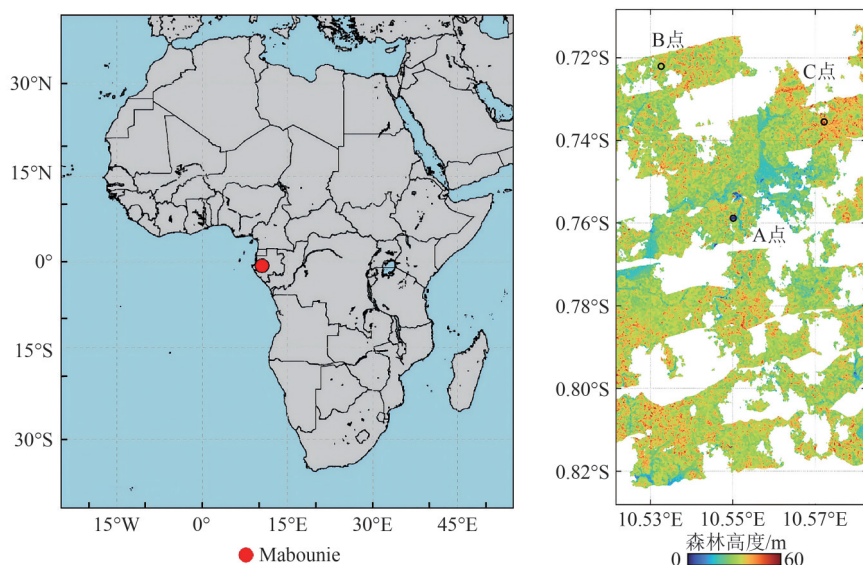
3.1.1 实验区域

如图3所示, 本文选用AfriSAR项目获取的两

景P波段数据开展森林高度的反演实验。研究区域位于非洲中西部加蓬共和国的Mabounie地区 (0.77°S, 10.55°E), 地处赤道附近大西洋海岸, 属于典型的热带低地常绿雨林。该地区林木资源丰富, 植被类型主要包括中高乔木与低矮灌木等, 森林平均高度在30 m左右, 整体树高分布范围在0—65 m。该区域地貌以丘陵为主, 海拔高度10—200 m, 地形起伏较为平缓, 坡度变化范围-30°—30°。

3.1.2 机载SAR数据

AfriSAR项目是欧洲航天局对地观测机载SAR任务中的一项重要内容, 由欧洲航天局、德国宇航局和法国国家空间研究中心等研究机构共同实施开展的机载全极化SAR实验, 其目的在于解决BIOMASS卫星计划发展的需要和促进地球物理产品算法的验证与发展 (Fatoyinbo 等, 2021)。在AfriSAR项目开展期间, 成像、校正和配准等相关SAR数据预处理工作均是由DLR完成处理的, 获取了包含L波段与P波段的全极化SAR数据集。本文采用了覆盖Mabounie区域的P波段全极化SAR数据, 并选取干涉垂直基线长度为30 m的两景HH极化影像进行传统算法与本文算法的验证对比。表1总结了本文选取的P波段全极化SAR数据集的关键参数。



(a) Mabounie地理位置 (b) LiDAR获取的森林高度
(a) Geographic location map of the Mabounie (b) Forest height map by LiDAR

图3 Mabounie实验区域图

Fig. 3 Map of the Mabounie experimental area

表1 覆盖Mabounie区域的P波段机载SAR数据参数描述

Table 1 Parameters description list of P-band airborne SAR data covering the Mabounie area

参数	数值
波段	P波段
波长/cm	69
垂直基线/m	30
分辨率/m	2×3.83(方位向×斜距向)
极化	HH/HV/VH/VV
获取日期	2016年2月11日
影像编号	0708(参考影像); 0704(第二影像)
垂直波数/(rad/m)	[-0.15, -0.05]

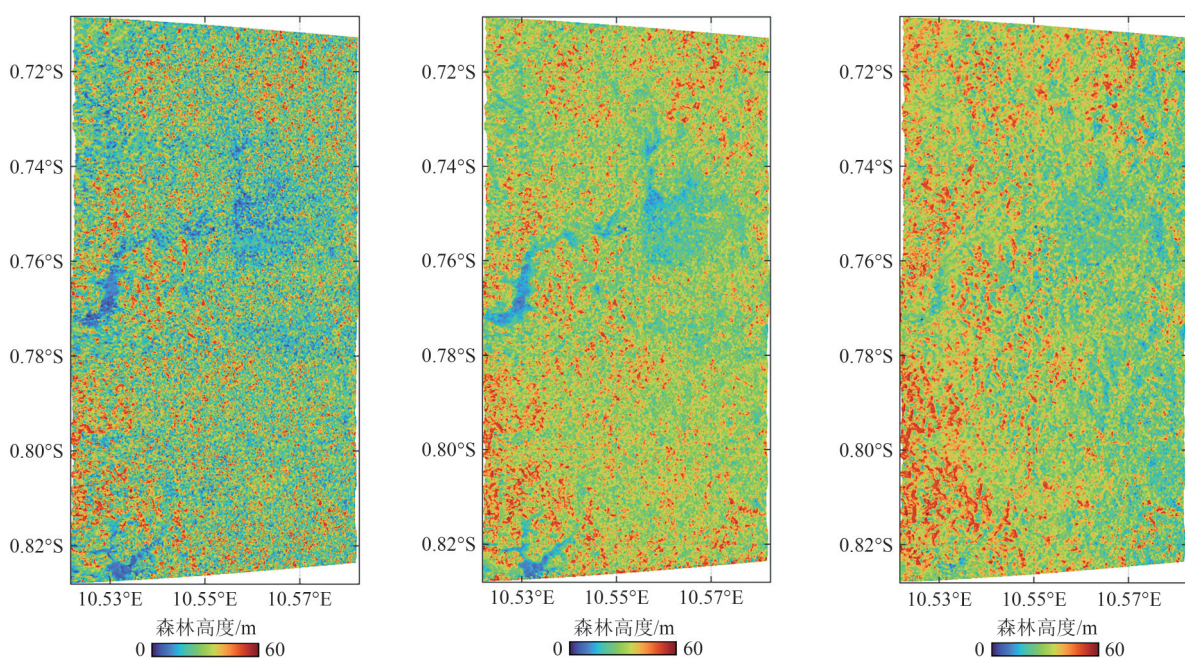
3.1.3 机载LiDAR数据

在AfrisaR机载SAR项目开展期间，欧洲航天局、德国宇航局、法国空间研究中心和美国宇航局等国际机构利用搭载在NASA Langley B200飞机上的LVIS系统获取全波形LiDAR数据，生成空间分辨率为20 m森林高度和林下地形产品(Blair等, 1999)。由于受到云雾遮挡的影响，只有部分SAR覆盖区域获得了LiDAR森林高度，如图3(b)所示。本文采用上述LiDAR森林高度作为参考数据集，对实验方法反演的森林高度产品进行定量精度分析。

3.2 实验结果

本文采用传统TF分析法(通过整体最小二乘

直线拟合多个子视复相干观测值，结合垂直向有效波数符号判断地表相位与更接近纯体去相干的子视复相干观测值，通过固定消光法反演森林高度)、本文TF分析法(结合垂直向有效波数符号，从子视相干集长轴两个端点中确定更接近纯体去相干的复数观测值，通过固定消光法反演森林高度)和全极化分析法(结合垂直向有效波数符号，从极化相干集长轴两个端点中确定更接近纯体去相干的复数观测值，通过固定消光法反演森林高度)3种方法反演森林高度，并与LiDAR森林高度进行逐像素统计对比与精度评定，实验结果如图4所示。图4(a)–(c)的结果显示，与LiDAR森林高度相比，传统TF分析法获取的森林高度存在明显的低估趋势；本文TF分析法和全极化分析法获取的森林高度与LiDAR森林高度分布具有较好的一致性。3种方法估计的森林高度与LiDAR森林高度的差值进行逐像素统计，其误差直方图如图4(d)–(f)。传统TF分析法、本文TF分析法和全极化分析法获取的森林高度估计误差均值分别为-5.24、-0.77和0.37 m，RMSE分别为14.78、9.23与10.59 m。传统TF分析法反演结果误差存在显著的系统误差，整体表现为低估；本文TF分析法与全极化分析法表现出较高的稳定性，估计误差均值接近于零，且本文TF分析法的RMSE更低，误差分布更集中，反演精度甚至略优于全极化分析方法。



(a) 传统TF分析法森林高度
(a) Forest height map derived from traditional TF-based analysis method

(b) 本文TF分析法森林高度
(b) Forest height map derived from the proposed TF-based analysis method

(c) 全极化分析法森林高度
(c) Forest height map derived from full polarimetric data-based analysis method

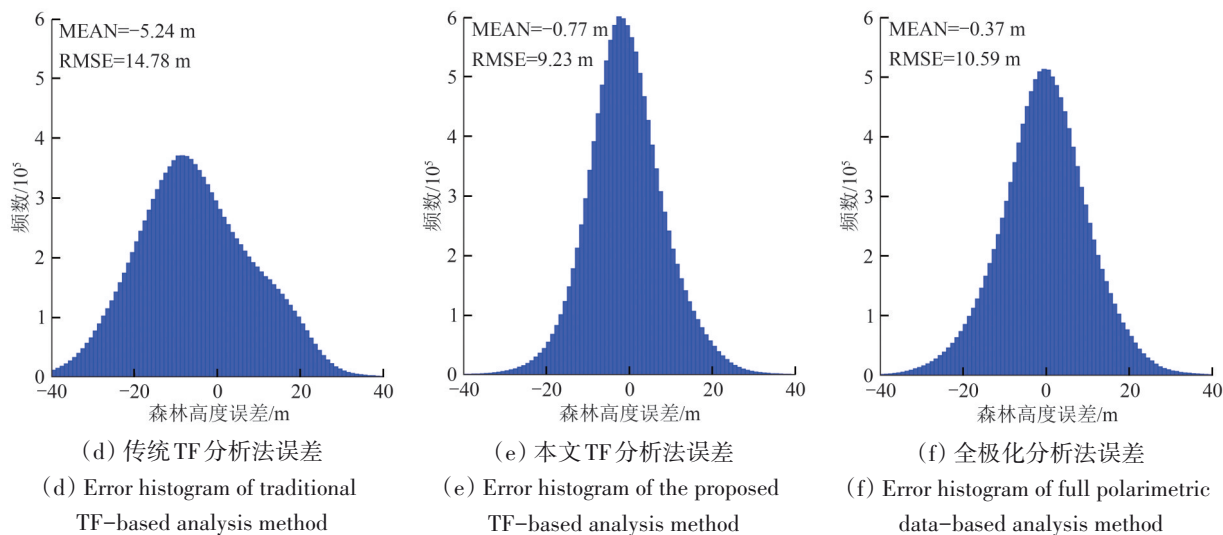


图4 Mabounie 实验区3种方法反演森林高度及误差对比
Fig. 4 Forest height and error histogram of three methods in the Mabounie experimental area

为了减少 InSAR 与 LiDAR 森林高度产品间地理坐标匹配误差带来的影响, 本文以机载 LiDAR 森林高度为验证, 在实验区域内均匀布设 40 m×40 m 大小采样窗口, 计算窗口内具有相同索引像素的森林高度均值作为统计样本值, 分别与传统 TF 分析法、本文 TF 分析法和全极化分析法获取的森林高度均值进行对比, 其散点密度结果如图 5 所示。可见与 LiDAR 森林高度相比, 传统 TF 分析法获取的森林高度 RMSE 为 10.22 m, 相对误差为 24.30%,

反演精度较低且存在明显的低估趋势; 本文 TF 分析法获取的森林高度 RMSE 为 6.70 m, 相对误差 σ 为 15.43%, 相较于传统 TF 分析法, 其 RMSE 降低 3.52 m, 估计精度改善了 34.44%; 全极化分析法获取的森林高度 RMSE 为 8.54 m, 相对精度为 19.75%, 表明本文 TF 分析法与全极化分析法均具有较高的反演精度。整体而言, 传统 TF 分析法存在着系统性低估的现象, 本文 TF 分析法能够达到与全极化分析法相近的森林高度反演效果。

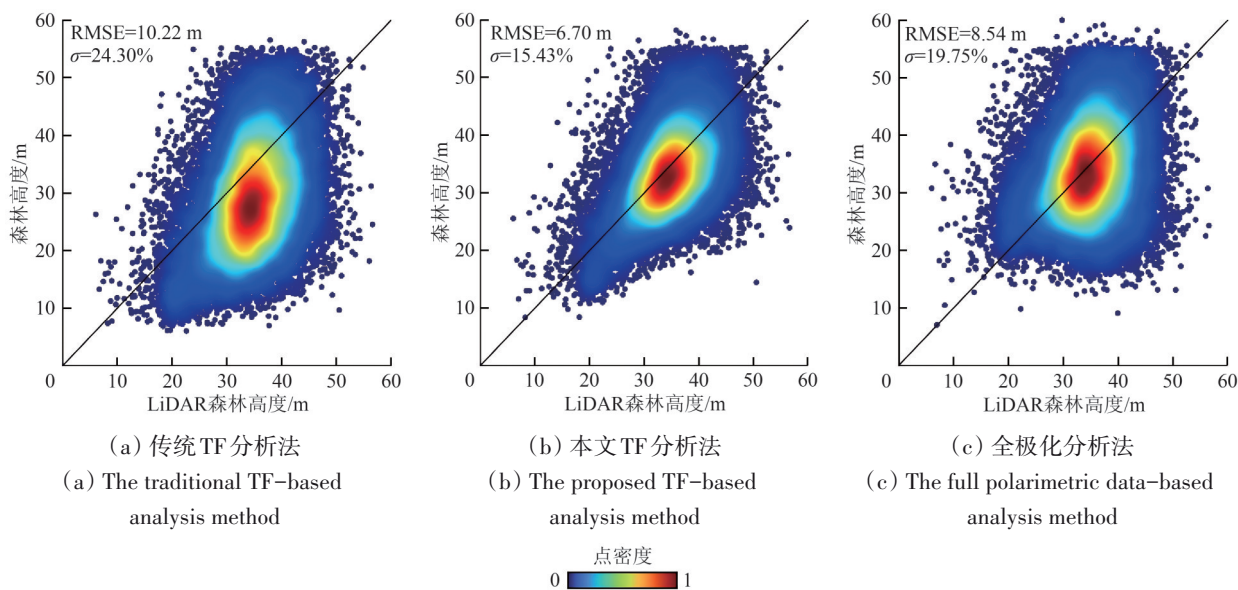


图5 3种方法估计的森林高度结果与LiDAR森林高度的散点对比图
Fig. 5 Scatterplot comparison of forest height results from three methods and LiDAR-derived forest height

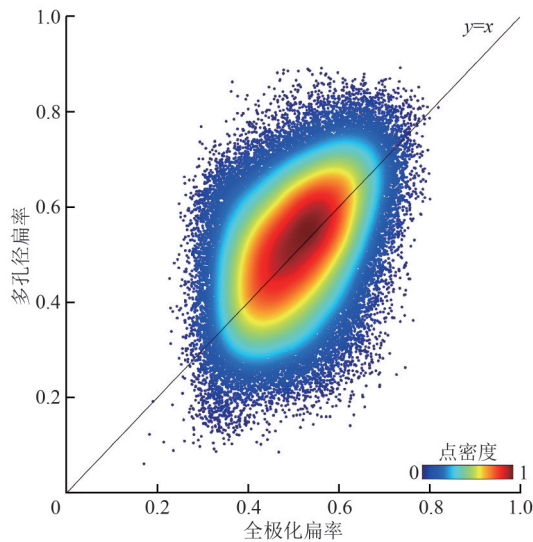
3.3 讨论

3.3.1 相干集几何分布对森林高度反演精度的影响分析

在忽略噪声等影响的理想状态下, RVoG模型在复单位圆平面上呈现出线性模型, 因而多孔径影像干涉复相干系数分布在复平面单位圆中一条可见相干线段上。这种状态下, 相干线段的两个端点分别代表尽可能包含地面或者冠层散射贡献的复相干系数观测值, 可达到地体散射观测信号的最大化分离。然而, 在实际获取SAR数据过程中, 受到相干斑噪声的影响, 在森林场景复杂度(如层间非匀质性、疏密变化等)以及雷达系统参数(如与穿透能力相关的电磁波波长、影像空间分辨率)等多种因素的共同作用下, 复相干系数观测值通常分布于一个相干椭圆区域内。当椭圆扁率越趋近于1时, 相干椭圆形态越扁长, 线性特征越强, 则可认为此时观测数据更加符合RVoG模型

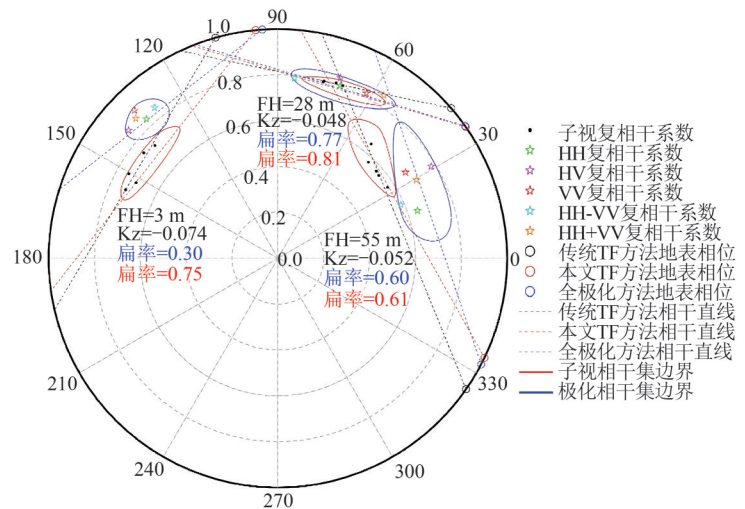
假设, 能够通过模型参数反演得到可靠的森林高度结果。

图6(a)对比分析了全极化分析法和本文TF分析法获取的相干集扁率分布情况, 以PolInSAR相干集扁率为横轴, 以TFInSAR相干集扁率为纵轴, 采用 $10\text{ m}\times 10\text{ m}$ 采样窗口进行散点采样分析。极化相干集扁率变化范围主要集中在0.25—0.70, 而子视相干集扁率变化范围主要分布在0.20—0.85。大部分散点分布在 $y=x$ 轴上部, 说明本文TF分析法的子视相干集扁率整体上比全极化分析法更高, 其子视复相干系数的共线性程度更高。在方位向结构敏感性高于极化敏感性的森林场景中(例如方位向森林树木间的间隙较大的场景, 或者地形起伏受方位向坡度变化较大的场景), 相比与极化方式的变化, 雷达方位向斜视角的变化能够更加显著地改变分辨单元内地体幅度比的变化。此时, 本文TF分析法的子视空间相较于极化方法呈现更加扁平状态, 本文TF获取的观测数据会更贴合RVoG模型。



(a) 本文TF分析法与全极化分析法相干集扁率的散点密度

(a) Scatterplot for coherent set flattening of the proposed TF-based method and the full polarimetric data-based method



(b) 3种方法复相干系数、相干集及地表相位分布

(b) Complex coherence coefficients, coherence sets and surface phase distribution maps of three methods

图6 相干集几何分布特征分析

Fig.6 Analysis of geometric distribution characteristics of coherent sets

图6(b)展示了3种方法在不同树高下的相干性及相干集几何分布, FH表示森林高度, K_z 表示垂直波束。全极化分析法的相干幅度值通常高于传统TF分析法, 主要是由于子视SAR影像频带宽减小导致分辨率降低, 致使子视相干幅度均小于极化HH通道的相干幅度值”需要修改为“全分

辨干涉的相干幅度值通常高于子孔径干涉方法, 主要是由于子视SAR影像多普勒带宽减小导致分辨率降低、信噪比下降, 致使子视相干幅度均小于极化HH方式的相干幅度值。无论是LiDAR树高3 m、28 m还是55 m情况下, 本文TF分析法的子视相干集扁率比全极化分析法更高, 复相干系数

集合的线性程度更高。特别是在低树高 (LiDAR 树高 3 m) 情况下, 全极化分析法的扁率为 0.30, 极化复相干系数分布较为集中、可见相干线段较短、极化相干集轮廓近似于圆形; 本文 TF 分析法的扁率为 0.75, 子视复相干系数分布离散度更大、子视相干集轮廓更加接近扁长椭圆形。而在较高树高 (树高 28 m) 情况下, 几个离散的子视复相干系数分布较为集中、难以代表子视相干集的整体几何分布特性, 导致整体最小二乘直线拟合的不确定性增大, 很难获取较为准确的纯体去相干系数; 虽然本文 TF 分析方法的相干线段长度比全极化分析方法更短一些, 但是其子视相干集扁率仍然更高 (本文 TF 分析方法和全极化分析法的相干集扁率分别为 0.81 和 0.77), 意味着具有更强的抗噪性能。

为了进一步分析地表相位估计与纯体去相干提取对于本文 TF 方法的影响机制, 本节将本文 TF

方法得到的地表相位和更接近纯体去相干的长轴端点分别替换到传统 TF 方法中进行固定消光系数法反演森林高度, 从而得到如下两种方法结果进行以 LiDAR 数据为参考的精度评定: (1) 传统方法纯体去相干+本文方法 TF 地表相位; (2) 本文方法纯体去相干+传统方法地表相位。结果如图 7 所示。相比于图 4 (d) 传统方法结果, 图 7 (a) 使用了本文方法估计的地表相位后, 误差分布形状发生改变, 结果分布更加集中, 估计 RMSE 从 14.78 m 减小到 11.19 m, 但是估计偏差变化不大; 而图 7 (b) 使用了本文方法估计的纯体相干系数, 其误差分布形状与传统 TF 方法结果类似, 但是在系统偏差有了较大幅度的减小, 误差均值从 -5.24 m 减小到 -1.88 m。综合来说, 本文 TF 方法能够通过地表相位准确估计和纯体去相干系数精化两方面来有效提升森林高度反演效果。

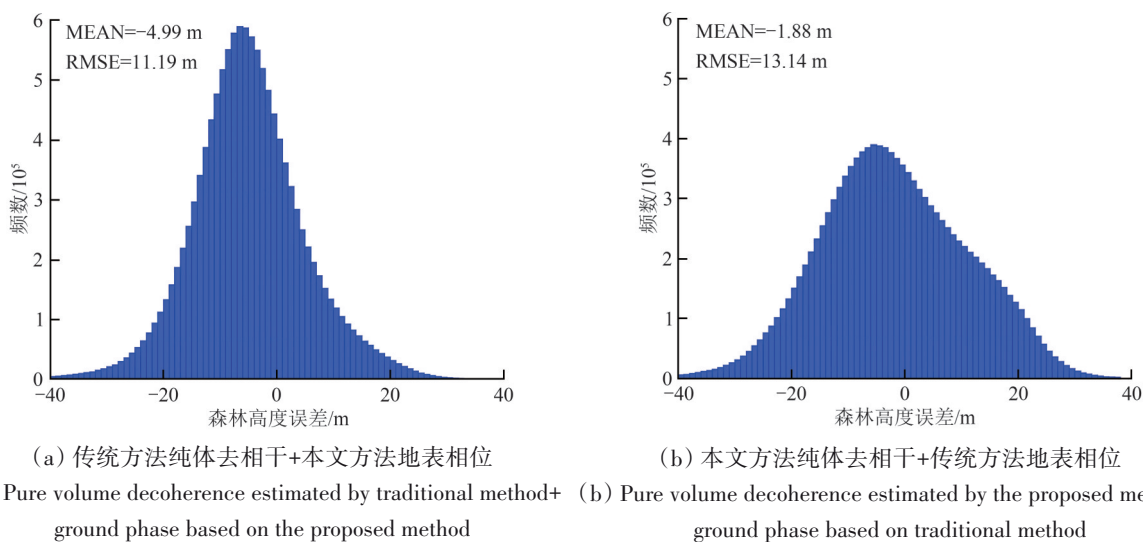


图 7 模型参数替换的两种森林高度反演方法的误差直方图

Fig. 7 Error distribution comparison of two forest height retrieval methods with model parameter substitution

3.3.2 不同树高情况下估计误差分布分析

图 8 展示了不同 LiDAR 树高区间下, 3 种方法反演森林树高的误差分布。可见传统 TF 分析法在树高区间 0—30 m 箱体较窄、表现比较稳定, 而在 40—60 m 的树高区间, 箱体明显变长, 估计误差波动显著增大 (图 8 (a)); 不同树高区间内, 本文 TF 分析法箱体均较窄且波动很小, 表明新方法的估计性能稳定性较高 (图 8 (b)); 全极化分析法在 0—5 m 低树高区间出现明显高

估, 该现象与极化复相干系数较为集中以及极化相干集扁率较小有关 (可对应参见图 6 (b) 的全极化相干集及复相干系数分布情况, FH=3 m, 扁率=0.30) (图 8 (c))。从整体变化趋势来看, 随着森林高度由 0—5 m 段增大至 55—60 m 段, 3 种方法误差均呈现出由高估逐渐转向低估的现象, 表明反演误差与树高之间有着比较强的负相关性, 该现象与微波信号穿透能力或者森林茂密程度有关。

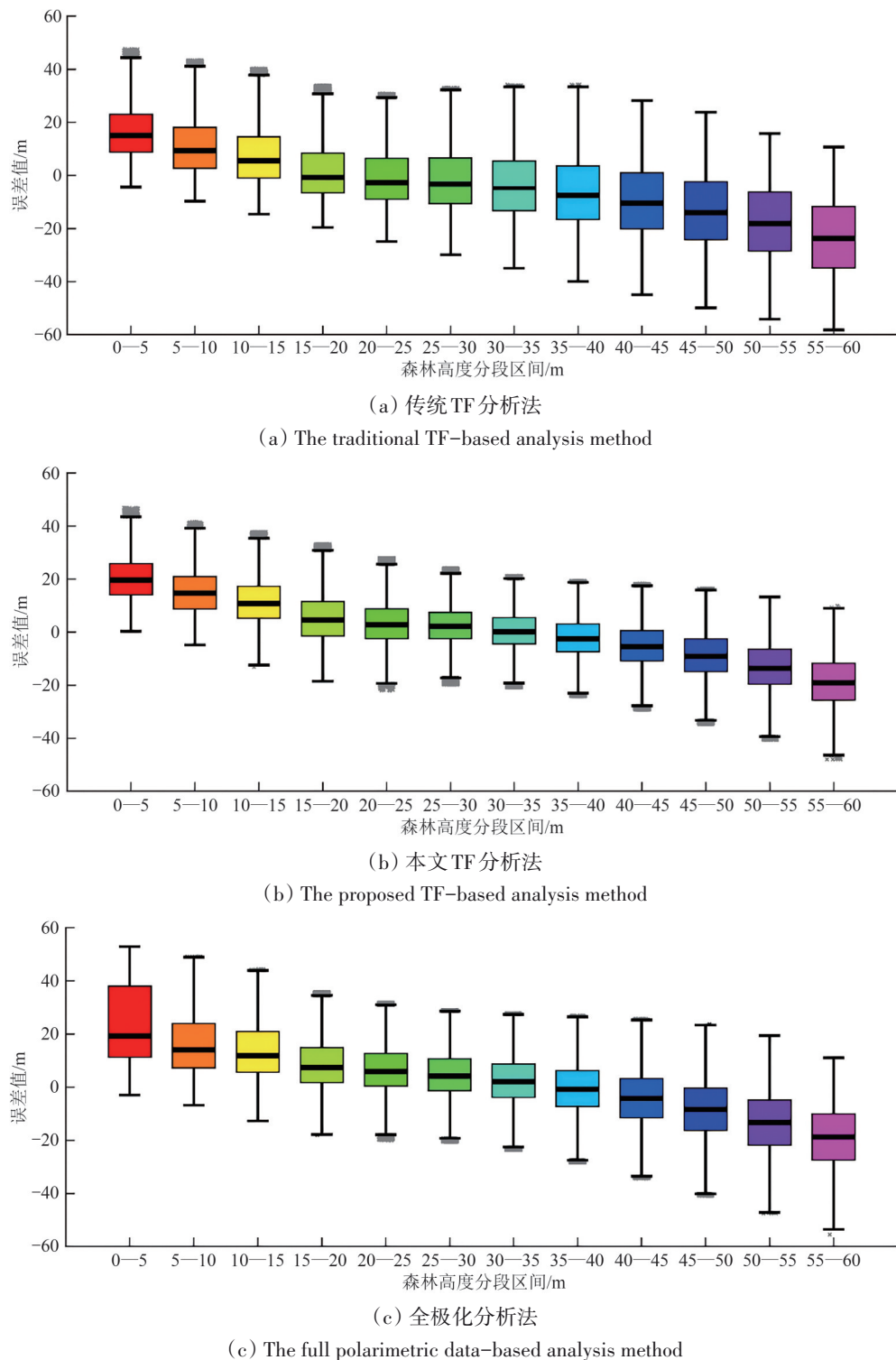


图8 不同LiDAR森林高度区间3种方法的树高估计误差分布箱型图

Fig. 8 Boxplot of tree height estimation error distribution under three methods in case of different forest height range

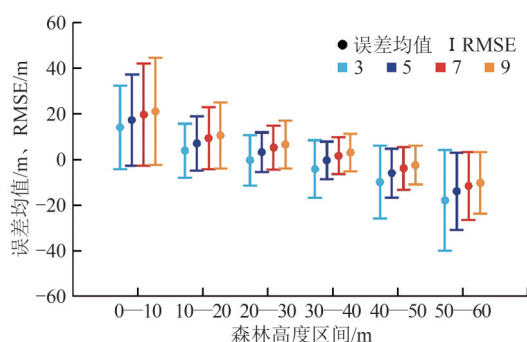
3.3.3 不同带宽、子孔径数对树高反演精度的影响

多普勒带宽和子孔径数是本文TF分析方法的两个重要输入参数。带宽直接影响SAR影像分辨率,带宽越大通常抗噪能力越强;而子孔径数则决定观测数据的冗余程度,孔径数越多则可用观

测数据越丰富。图9为不同带宽/子孔径数情况下LiDAR树高区间内本文TF分析方法树高估计误差箱型图,树高区间以0—10 m、10—20 m、20—30 m、30—40 m、40—50 m、50—60 m为分段,圆点表示树高估计的误差均值位置,而误差条是

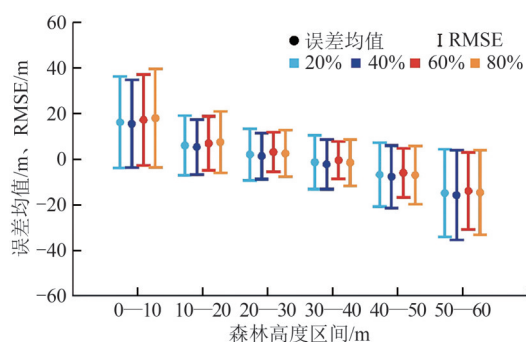
以误差均值为中心、RMSE为半径进行绘制。图9 (a) 展示了在固定带宽为60%和不同子孔径数(3、5、7、9)情况下本文TF分析方法的估计误差均值及RMSE。在LiDAR树高0—10 m、10—20 m的低树高区间,子孔径数为3时RMSE均最小;在40—50 m、50—60 m的高树高区间,子孔径数为9时精度最高。结果表明,在不同子孔径数时树高估计的误差均值和RMSE波动比较大,说明子孔径数大小是本文TF分析方法中的1个重要参数。本文TF分析法最终选择子孔径数为5,其在20—40 m树高区间(属于研究区域大部分树高分布范围)内时

RMSE最小,且在其余树高区间也表现出相对较小的误差水平。图9 (b) 展示了在固定孔径数为5和不同带宽(20%、40%、60%、80%)情况下本文TF分析方法的误差估计均值及RMSE。实验结果表明,带宽20%—80%变化对森林树高估计精度的影响并不明显。即使在20%较低带宽下,由于子孔径数设置为5,仍能实现频谱的充分覆盖,表明本文TF分析法对于带宽参数不敏感、具有较强的鲁棒性。本文推荐使用60%带宽,其在20—60 m树高区间估计精度均能达到最高,总体表现较为均衡。



(a) 固定同一带宽60%和不同子孔径数情况

(a) Fixed doppler bandwidth at 60% and different number of sub-apertures



(b) 固定同一孔径数5和不同多普勒带宽情况

(b) Fixed number of sub-apertures at 5 and different doppler bandwidth

图9 不同多普勒带宽/子孔径数情况下LiDAR树高区间内本文TF分析方法树高估计误差均值与RMSE

Fig. 9 The error Mean and RMSE of tree height estimation error of the proposed TF analysis method under different doppler bandwidths and different numbers of sub-apertures

4 结论

为了改善传统TFInSAR森林高度反演法因仅用离散子视复数相干系数、难以准确描述其几何分布特征而导致森林高度估计不准的问题。本文提出了一种顾及相干集几何分布的TFInSAR森林高度反演方法,通过类似多极化方法构建了多孔径相干散射矩阵,在提出子视相干集概念并分析其几何分布特性的基础上,采用相干集边界提取方法确定相干集长轴两个端点,提取了更接近纯体去相干的复数观测和地表相位,最后结合固定消光系数法反演森林高度。主要结论如下:(1)本文TF分析法已达到全极化反演森林高度的效果,其树高估计RMSE为6.70 m,相对精度达到了15.43%,比传统TF分析法精度提高了34.44%;(2)在相干集几何特性分析方面,本文TF分析法的子视相干集扁率整体上比全极化分析法的极化

相干集扁率更高,展现出雷达方位向斜视角变化更加敏感于森林场景地体散射能量变化的潜力;(3)本文TF分析法在不同LiDAR树高统计区间范围内误差波动范围较小,树高反演性能表现最为稳定,反而全极化分析法在0—5 m低树高区间误差波动较大;(4)与多普勒带宽参数相比,子孔径数量是一个更为显著影响本文TF分析法森林高度反演性能的关键参数。

因此,本文TF分析法无需外部数据辅助的情况可达到与全极化数据森林高度反演相当的能力,为全球尺度森林资源监测提供一种可行的低成本技术方案。然而,该方法仍存在改进空间,例如:(1)反演误差与树高之间仍然存在着负相关关系,可能是强行假设全景影像固定一个消光系数常数或许可缓解秩亏问题,从而引入系统偏差;未来研究可考虑引入自适应消光系数估计策略,以进一步提升反演精度和模型适用性。(2)本文方法

在短波段应用受到较大限制, X/C波段对森林冠层的穿透能力较弱, 这将严重限制地体散射分离的可能性, 使得RVoG模型反演精度可能下降; 其次, 本文方法依赖于方位向子孔径分解, 由于X/C波段系统通常的斜视角变化比L/P波段系统更小, 不同子视通道间地体散射幅度比的差异较小, 影响着子视复相干系数的几何分布, 导致后续参数反演结果不可靠。

志 谢 感谢欧洲航天局提供AfriSAR长波SAR数据和LVIS全波形LiDAR数据。

参考文献(References)

- 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]
- Chen E X, Li Z Y, Pang Y and Tian X. 2007. Polarimetric synthetic aperture radar interferometry based mean tree height extraction technique. *Scientia Silvae Sinicae*, 43(4): 66-70 (陈尔学, 李增元, 庞勇, 田昕. 2007. 基于极化合成孔径雷达干涉测量的平均树高提取技术. *林业科学*, 43(4): 66-70) [DOI: 10.3321/j.issn:1001-7488.2007.04.011]
- Chen H, Cloude S R and Goodenough D G. 2016. Forest canopy height estimation using Tandem-X coherence data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(7): 3177-3188 [DOI: 10.1109/JSTARS.2016.2582722]
- Cloude S R and Papathanassiou K P. 1998. Polarimetric SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(5): 1551-1565 [DOI: 10.1109/36.718859]
- Cloude S R and Papathanassiou K P. 2003. Three-stage inversion process for polarimetric SAR interferometry. *IEEE Proceedings - Radar, Sonar and Navigation*, 150(3): 125-134 [DOI: 10.1049/ip-rsn:20030449]
- Fan Y X, Chen E X, Li Z Y, Zhao L, Zhang W F, Jin Y D and Cai L J. 2020. Forest height estimation method using TanDEM-X interferometric coherence data. *Scientia Silvae Sinicae*, 56(6): 35-46 (范亚雄, 陈尔学, 李增元, 赵磊, 张王菲, 金玉栋, 蔡丽杰. 2020. 基于TanDEM-X相干系数的森林高度估测方法. *林业科学*, 56(6): 35-46) [DOI: 10.11707/j.1001-7488.20200604]
- Fatoyinbo T, Armston J, Simard M, Saatchi S, Denbina M, Lavalle M, Hofton M, Tang H, Marselis S, Pinto N, Hancock S, Hawkins B, Duncanson L, Blair B, Hansen C, Lou Y L, Dubayah R, Hensley S, Silva C, Poulsen J R, Labrière N, Barbier N, Jeffery K, Kenfack D, Herve M, Bissengou P, Alonso A, Moussavou G, White L T J, Lewis S and Hibbard K. 2021. The NASA AfriSAR campaign: airborne SAR and lidar measurements of tropical forest structure and biomass in support of current and future space mis-
- sions. *Remote Sensing of Environment*, 264: 112533 [DOI: 10.1016/j.rse.2021.112533]
- Ferro-Famil L, Reigber A, Pottier E and Boerner W M. 2003. Scene characterization using subaperture polarimetric SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(10): 2264-2276 [DOI: 10.1109/TGRS.2003.817188]
- Flynn T, Tabb M and Carande R. 2002. Coherence region shape extraction for vegetation parameter estimation in polarimetric SAR interferometry//*Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Toronto: IEEE: 2596-2598 [DOI: 10.1109/IGARSS.2002.1026712]
- Fu H Q, Zhu J J, Wang C C, Zhao R and Xie Q H. 2019. Underlying topography estimation over forest areas using single-baseline InSAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(5): 2876-2888 [DOI: 10.1109/TGRS.2018.2878357]
- Garestier F, Dubois-Fernandez P C and Champion I. 2008a. Forest height inversion using high-resolution P-Band Pol-InSAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(11): 3544-3559 [DOI: 10.1109/TGRS.2008.922032]
- Garestier F, Dubois-Fernandez P C and Papathanassiou K P. 2008b. Pine forest height inversion using single-Pass X-band PolInSAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(1): 59-68 [DOI: 10.1109/TGRS.2007.907602]
- Garestier F, Dubois-Fernandez P, Champion I and Le Toan T. 2011. Pine forest investigation using high resolution P-band Pol-InSAR data. *Remote Sensing of Environment*, 115(11): 2897-2905 [DOI: 10.1016/j.rse.2010.08.028]
- Kugler F, Lee S K, Hajnsek I and Papathanassiou K P. 2015. Forest height estimation by means of Pol-InSAR data Inversion: the role of the vertical wavenumber. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(10): 5294-5311 [DOI: 10.1109/TGRS.2015.2420996]
- Lee J S and Pottier E. 2017. *Polarimetric Radar Imaging: from Basics to Applications*. Boca Raton: CRC Press [DOI: 10.1201/9781420054989]
- Lee S K, Kugler F, Papathanassiou K and Hajnsek I. 2011. Multibaseline polarimetric SAR interferometry forest height inversion approaches//*Proceedings of ESA POLInSAR Workshop*
- Lei Y and Siqueira P. 2015. An Automatic Mosaicking algorithm for the generation of a large-scale forest height map using spaceborne repeat-pass InSAR correlation magnitude. *Remote Sensing*, 7(5): 5639-5659 [DOI: 10.3390/rs70505639]
- Lei Y, Siqueira P, Torbick N, Ducey M, Chowdhury D and Salas W. 2019. Generation of large-scale moderate-resolution forest height mosaic with spaceborne repeat-pass SAR interferometry and Lidar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(2): 770-787 [DOI: 10.1109/TGRS.2018.2860590]
- Luo H M, Chen E X, Cheng J and Li X W. 2010. Forest height estimation methods using polarimetric SAR interferometry. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 14(4): 806-821 (罗环敏, 陈尔学, 程建, 李小文. 2010. 极化干涉SAR森林高度反演方法研究. *遥感学报*, 14(4): 806-821) [DOI: 10.11834/jrs.20100414]

- Olesk A, Praks J, Antropov O, Zalite K, Arumäe T and Voormansik K. 2016. Interferometric SAR coherence models for characterization of hemiboreal forests using TanDEM-X data. *Remote Sensing*, 8(9): 700 [DOI: 10.3390/rs8090700]
- Papathanassiou K P and Cloude S R. 2001. Single-baseline polarimetric SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(11): 2352-2363 [DOI: 10.1109/36.964971]
- Treuhaft R N, Madsen S N, Moghaddam M and Van Zyl J J. 1996. Vegetation characteristics and underlying topography from interferometric radar. *Radio Science*, 31(6): 1449-1485 [DOI: 10.1029/96RS01763]
- Wang L, Zhou Y S, Shen G Y, Xiong J N and Shi H T. 2023. Forest height inversion based on Time-Frequency RVoG model using single-baseline L-band sublook-InSAR data. *Remote Sensing*, 15(1): 166 [DOI: 10.3390/rs15010166]
- Wu C J, Shen P, Tebaldini S, Yu Y H and Liao M S. 2025. Forest vertical structure inversion based on baseline optimization InSAR phase histogram technique. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 50(8): 1608-1618 (吴传军, 沈鹏, Tebaldini S, 余扬海, 廖明生. 2025. 基于基线优选的InSAR相位直方图技术森林垂直结构反演. *武汉大学学报(信息科学版)*, 50(8): 1608-1618) [DOI: 10.13203/j.whugis20240448]
- Zhang T W, Ji Y J and Zhang W F. 2022. The analysis on uncertainty resulting from method and wavelength selecting in forest height inversion using simulated polarimetric interferometric SAR data. *National Remote Sensing Bulletin*, 26(10): 1963-1975 (张庭苇, 姬永杰, 张王菲. 2022. PolInSAR森林高度反演中方法及波段选择引起的不确定性分析. *遥感学报*, 26(10): 1963-1975) [DOI: 10.11834/jrs.20210144]
- Zhu J J, Xie Y Z, Fu H Q and Wang C C. 2025. Penetration mapping of forest cover using spaceborne P-band SAR: a review of the European Space Agency's BIOMASS Mission. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 50(8): 1457-1468 (朱建军, 谢雁洲, 付海强, 汪长城. 2025. 星载P波段SAR森林覆盖层穿透测绘——欧洲空间局BIOMASS卫星综述. *武汉大学学报(信息科学版)*, 50(8): 1457-1468) [DOI: 10.13203/j.whugis20240220]

Time-frequency InSAR forest height inversion method that considers the geometric distribution of the sub-look coherent set

HOU Jiali¹, SHEN Peng², ZHANG Lu¹, WU Chuanjun¹, TAN Pengyuan¹

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

Abstract: Forest height is a crucial parameter of the forest vertical structure and plays a notable role in forest resource management, carbon cycle research, and climate change studies. Traditional Time-Frequency (TF) analysis-based Interferometric Synthetic Aperture Radar (TF-InSAR) techniques employ the random volume over ground model with a limited number of discrete sub-look complex coherence observations. However, given the reliance on limited observations, these methods often struggle to acquire the characteristic points used to describe the geometric distribution of sub-look complex coherence coefficients, resulting in low accuracy in forest height inversion. To address this issue, this study proposes a TF-InSAR forest height inversion method that incorporates the geometric distribution of the sub-look coherence set. First, a multi-aperture interferometric coherence matrix is constructed through sub-aperture decomposition. Second, the concept of a sub-look coherence set is introduced, and its geometric characteristics are analyzed. On this basis, the major axis of the coherence set is utilized to obtain complex observations and a surface phase that are close to pure-volume decorrelation. Finally, the forest height product is generated using a fixed extinction coefficient inversion approach. The experimental data are acquired from the airborne fully polarimetric P-band SAR data obtained during the AfriSAR campaign conducted by the European Space Agency in Gabon, Africa, in 2016, covering the Mabounie test site. Validation is performed using full-waveform LiDAR data from the Land Vegetation and Ice Sensor. Experimental results indicate that at the 40 m×40 m plot scale, the forest height estimation accuracy achieved by the proposed single-polarization TF analysis method (root mean square error RMSE=6.70 m) shows a 34.44% improvement over the conventional method (RMSE=10.22 m). Conclusion Using only single-polarization SAR data, the proposed TF-based analysis method can achieve a forest height estimation accuracy comparable to that of full polarimetric data-based methods (RMSE=8.54 m), providing a reliable and cost-effective technical solution for large-scale forest monitoring.

Key words: forest height, Interferometric SAR (InSAR), Time-Frequency (TF) analysis, sub-aperture decomposition, coherence set, Random Volume over Ground (RVoG)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 42404029); China Postdoctoral Science Foundation (No. 2024M752479); China National Postdoctoral Program for Innovative Talents (No. BX20240270); Postdoctor Project of Hubei Province (No. 2024HBBHCXA062); Sino-EU Dragon Project (No. 95436)