

# 基于 L 波段 SAR 数据的林区遥感相位直方图技术评估：理论建模与实验结果

Chuanjun Wu<sup>1,2</sup>, Stefano Tebaldini<sup>2</sup>, Marco Manzoni<sup>2</sup>, Benjamin Brede<sup>3</sup>, Yanghai Yu<sup>4</sup>, Mingsheng Liao<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Wuhan university, Wuhan, Hubei, China

<sup>2</sup> Politecnico di Milano, Italy

<sup>3</sup> GFZ German Research Centre for Geosciences, Germany

<sup>4</sup> Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China

**摘要：**本文利用理论模型和合成孔径雷达（SAR）数据实验评估了最近提出的用于估计森林高度和垂直结构的相位直方图（PH）技术，并与众所周知的 SAR 层析成像（TomoSAR）技术进行比较。TomoSAR 使用多幅 SAR 图像，可以对植被层的三维电磁结构进行直接成像，从中可以提取森林高度和林下地形等生物物理参数[1], [2]。PH 技术根据干涉相位值将 SAR 干涉图中的每个像素分配给特定的高度层，允许通过累加落在给定空间窗口内的像素振幅值来局部估计森林散射的垂直剖面[3]–[5]。

本文的主要目标是了解 PH 技术的局限性以及本文的主要贡献是：

1) 利用 TomoSense 机载实验中单站多极化 L-Band 数据分析 PH 技术重建森林垂直结构的性能；

2) 引入物理模型，定量表征相位直方图技术的高度色散作为任意 SAR 影像像素内散射体数量的函数。

为此，我们首先通过 ESA 机载活动 TomoSense 的 L 波段层析扫描数据分析和对比 PH 技术与 TomoSAR 技术的重建森林垂直结构的性能。该数据于 2020 年获取，实验区覆盖在德国西北部 Eifel 国家公园的 Kermeter 地区，具有沿两个相反飞行航向采集的 30+30 个重轨影像，并在整个感兴趣区域上提供始终优于 5 m 的垂直分辨率[6]。

本文的分析考虑了森林散射垂直剖面的评估和森林高度反演。在森林垂直剖面评估中，我们利用 TomoSense 数据保证了精细的垂直分辨率，以 TomoSAR 结果作为评估 PH 技术的辅助验证。并将地面激光扫描（TLS）、无人飞行器激光雷达（UAV-LS）和机载激光扫描（ALS）的叶面积密度（LAD）产品的某些感兴趣区域作为地面验证数据[7]–[9]。针对于森林高度的估计，TomoSAR 和 PH 技术均根据 ALS 生成的冠层高度模型（CHM）进行精度评定。观察到的结果根据简单的物理模型进行解释，根据 SAR 影像分辨率单元内的散射体数量来模拟验证相位直方图重构森林垂直剖面的能力，在此基础上，推导出解析表达式来预测相位直方图中的高度色散。

实验和理论结果表明，相位直方图无法正确重构森林结构，除非 SAR 影像分辨率单元内的散射体分布具有单一主导散射体的特征。然而，PH 技术可用于对森林高度进行相当好的估计。根据实验结果，TomoSAR 和 PH 技术在西北飞行航向数据中产生的平均 RMSE 分别为 2.8 m 和 4.45 m，在东南飞行航向数据中产生的平均 RMSE 分别为 1.84 m 和 5.46 m。总体而言，本文的分析从理论和实验上都表明，当面对分辨率为几米的低频数据时，PH 技术无法实现与多基线 TomoSAR 技术相同的性能。然而，我们也指出 PH 技术本质上最适合分析高分辨率或超高分辨率数据，这表明它可用于当影像数据有限且较高频率的 SAR 星载卫星探地任务（例如：Tandem-X）。

[1] S. Tebaldini, D. Ho Tong Minh, M. Mariotti d’Alessandro, L. Villard, T. Le Toan, and J. Chave, “The status of technologies to measure forest biomass and structural properties: State of the art

- in SAR tomography of tropical forests,” *Surv. Geophys.*, vol. 40, no. 4, pp. 779–801, 2019.
- [2] M. M. D’Alessandro and S. Tebaldini, “Digital Terrain Model Retrieval in Tropical Forests Through P-Band SAR Tomography,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 57, no. 9, pp. 6774–6781, 2019.
- [3] R. N. Treuhaft *et al.*, “Vegetation profiles in tropical forests from multibaseline interferometric synthetic aperture radar, field, and lidar measurements,” *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 114, no. D23, 2009.
- [4] G. H. X. Shiroma and M. Lavallo, “Digital terrain, surface, and canopy height models from InSAR backscatter-height histograms,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 58, no. 6, pp. 3754–3777, 2020.
- [5] Y. Lei, R. Treuhaft, and F. Gonçalves, “Automated estimation of forest height and underlying topography over a Brazilian tropical forest with single-baseline single-polarization TanDEM-X SAR interferometry,” *Remote Sens. Environ.*, vol. 252, p. 112132, 2021.
- [6] S. Tebaldini *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,” *Remote Sens. Environ.*, vol. 290, p. 113532, 2023.
- [7] F. Pimont, D. Allard, M. Soma, and J.-L. Dupuy, “Estimators and confidence intervals for plant area density at voxel scale with T-LiDAR,” *Remote Sens. Environ.*, vol. 215, pp. 343–370, 2018.
- [8] B. Brede, H. M. Bartholomeus, N. Barbier, F. Pimont, G. Vincent, and M. Herold, “Peering through the thicket: Effects of UAV LiDAR scanner settings and flight planning on canopy volume discovery,” *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, vol. 114, p. 103056, 2022.
- [9] D. L. B. Jupp, D. S. Culvenor, J. L. Lovell, G. J. Newnham, A. H. Strahler, and C. E. Woodcock, “Estimating forest LAI profiles and structural parameters using a ground-based laser called ‘Echidna®,’” *Tree Physiol.*, vol. 29, no. 2, pp. 171–181, 2009.