

基于垂直结构异质模型的 PolInSAR 森林高度反演

程晓璐¹, 陈筠力², 汪长城¹, 刘艳阳², 万杰¹

(1. 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南长沙 410083; 2. 上海航天技术研究院, 上海 201109)

摘要: 森林垂直结构异质性(FVSH)相干散射模型借助层析合成孔径雷达(TomoSAR)获取的层析谱来构建森林垂直结构函数,能更真实地描述森林垂直结构。极化干涉合成孔径雷达(PolInSAR)森林高度反演的精度与相干散射模型紧密相关,利用层析谱优化森林垂直结构函数可提升森林高度反演精度。对比不同垂直结构层析谱构建的异质相干散射模型,并对分析优化后的森林垂直结构函数及相干散射模型的森林高度结果,通过对覆盖法属圭亚那热带雨林的机载P波段全极化合成孔径雷达(SAR)数据集进行试验,发现多重信号分类(MUSIC)算法在优化森林垂直结构函数及基于相干散射模型反演森林高度上,均优于波束成形(Beamforming)和Capon算法。该研究对于国产P波段SAR卫星林业应用具有重要意义。

关键词: 极化干涉合成孔径雷达(PolInSAR); 森林高度反演; 相干散射模型; 层析合成孔径雷达(SAR)

中图分类号: TP 751.1; V 19

文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.2096-8655.2025.03.001

引用格式: 程晓璐,陈筠力,汪长城,等.基于垂直结构异质模型的PolInSAR森林高度反演[J].上海航天(中英文),2025,42(3):1-8.

PolInSAR Forest Height Inversion Based on the Vertical Structural Heterogeneity Model

CHENG Xiaolu¹, CHEN Yunli², WANG Changcheng¹, LIU Yanyang², WAN Jie¹

(1.School of Geosciences and Info-physics, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China;

2.Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China)

Abstract: The forest vertical structure heterogeneity (FVSH) model constructs a forest vertical structure function using tomographic spectra obtained from tomographic synthetic aperture radar (TomoSAR), and can accurately describe the forest vertical structure. The accuracy of polarimetric interferometric synthetic aperture radar (PolInSAR) forest height inversion is closely related to the coherent scattering model. Optimizing the forest vertical structure function with tomographic spectra can improve the inversion accuracy. In this paper, the heterogeneous coherent scattering models constructed from different vertical structure tomography spectra are comparatively analyzed, and the optimized forest vertical structure function and the forest height inversion results of the coherent scattering model are analyzed. Tests on an airborne P-band fully polarized synthetic aperture radar (SAR) dataset covering tropical rainforests in French Guiana are carried out. The results show that the multiple signal classification (MUSIC) algorithm outperforms the Beamforming and Capon algorithms in optimizing forest vertical structure functions and retrieving forest heights based on coherent scattering models. This study is of great significance for the forestry application of domestically produced P-band SAR satellites.

Key words: polarimetric interferometric synthetic aperture radar (PolInSAR); forest height inversion; coherent scattering model; tomographic synthetic aperture radar (SAR)

收稿日期: 2025-01-09; 修回日期: 2025-03-17

基金项目: 国家重点研发计划资助课题(2022YFB3903304, 2023YFF1303904); 国家自然科学基金资助项目(42471422)

作者简介: 程晓璐(2000—), 男, 硕士生, 主要研究方向为层析SAR仿真及数据处理。

通信作者: 汪长城(1980—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为极化干涉SAR理论与应用。

0 引言

森林在陆地生态系统中发挥着重要的碳汇作用。2020年我国提出“碳达峰、碳中和”的目标,彰显对森林的高度重视。森林高度是森林资源调查、蓄积量及生物量估测的基础参数,实现高精度、大范围森林高度监测,对达成“双碳”目标至关重要。合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)技术有全天时、全天候、穿透性较强等优势,可应对复杂多样的森林区域观测条件,适用于区域性乃至全球森林参数监测^[1]。其中,极化干涉 SAR(Polarimetric Interferometric Synthetic Aperture Radar, PolInSAR)技术兼具干涉 SAR(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)对散射体空间分布与高度^[2-3],以及 PolSAR 对散射体方向、形态的敏感性,可区分同一分辨单元不同散射机制的散射体,适用于大范围森林高度监测反演^[4-5]。

准确反演森林高度,需考虑 PolInSAR 观测森林的散射过程,建立极化干涉复相干观测值与森林几何、生物物理参数间严密的函数关系,即森林区域相干散射模型^[6-8]。该模型本质上是对森林场景垂直向上的散射能量变化进行傅里叶变换,这种能量的变化通常以垂直向反射率剖面参数化的形式来表示,即森林垂直结构函数^[9]。因散射能量变化参数化形式不同,研究人员已提出多种森林垂直结构函数来描述森林场景散射体的垂直分布,例如:Fourier-Legendre 级数形式^[10]、常数形式^[11]、指数形式^[12]及高斯分布^[13]等。其中应用最为广泛的是指数形式的森林垂直结构函数,对应的森林区域相干散射模型为随机地体二层模型(Random Volume over Ground, RVoG),其将森林场景概括为简单的包含植被层与地表层^[14]的二层结构。然而,真实森林场景复杂多样,显然,RVoG 模型忽略了垂直结构变化对相干散射建模的影响,无法准确刻画复杂森林场景,导致森林高度反演结果产生偏差。

SAR 层析技术具备三维成像能力,能够重建出 SAR 视野下的森林垂直结构^[15],因而可借助层析谱提取森林高度。但层析谱获取到的仅是冠层相位中心高度,并非森林顶部高度,因此需标校冠层相位中心。在森林高度标校上,常用功率损失法和样本标定法。功率损失法计算冠层相位中心与 LiDAR 树顶高度间的偏差,确定适宜的功率损失

值,将相应树高确定为森林高度估计值^[16-18]。样本标定法则是将样本处的冠层相位中心与 LiDAR 树顶高度进行最小二乘拟合,获取标校关系式,据此标校冠层相位中心,获取森林高度估计值^[19-20]。然而,这 2 种方法都依赖外部数据来明确冠层相位中心与树顶高度间的关系。

综上,将层析 SAR(Tomographic SAR, TomoSAR)获取的森林垂直结构层析谱应用于森林区域相干散射模型的构建,能有效应对复杂的森林场景,构建出更契合森林垂直结构异质性(Forest Vertical Structure Heterogeneity, FVSH)的相干散射模型^[21-22]。欧州航天局即将发射的 P 波段 SAR 卫星将任务分成 2 个阶段,即 TomoSAR 测量阶段(约 14 个月的观测)和 PolInSAR 测量阶段,其目的是利用 TomoSAR 观测阶段得到的森林结构作为先验模型进行 PolInSAR 森林参数反演^[23]。目前,通过 Capon 算法获取森林垂直结构,并以此构建森林区域相干散射模型,其森林高度反演性能已获验证^[24]。然而,波束成形(Beamforming)、多重信号分类(Multiple Signal Classification, MUSIC)等谱估计算法和 Capon 算法获取的森林垂直结构层析谱间存在差异。FVSH 模型与其他相干散射模型的显著区别在于,其借助层析成像获取的层析谱优化森林垂直结构函数。基于此,拟采用不同谱估计算法获取层析谱,构建不同 FVSH 模型,验证其森林高度反演性能。探讨不同形态层析谱对 PolInSAR 森林高度反演精度的影响具有重要的指导意义。

1 PolInSAR 森林高度反演

1.1 森林垂直结构函数

传统的 RVoG 模型将森林场景描述为二层结构,包含地表层和植被层,相应的垂直结构函数 $F(z)$ 被参数化为地体 2 部分之和,地表散射贡献由狄拉克 δ 函数表示,植被散射贡献由指数函数表示^[25]。

$$F(z) = f_v(z) + f_g(z) = \mu_v(\omega) e^{2\sigma z / \cos \theta} + \mu_g(\omega) \delta(z - z_0) \quad (1)$$

式中: $\mu_v(\omega)$ 、 $\mu_g(\omega)$ 分别为地表与植被散射幅度; σ 为消光系数; 狄拉克函数 δ 在除零点之外的函数值皆为零,并在整个定义域上积分为 1。

对多基线 SAR 观测值进行离散傅里叶变换,即反转多基线 SAR 观测值与反射率函数间的傅里叶

变换关系,可最直接、真实地获取森林后向散射功率的垂直向分布,重建森林垂直结构^[26]:

$$F(z) = P(z) = \sum_n y_n e^{-ik_z(n)z} \quad (2)$$

式中: y_n 为观测值; k_z 为垂直有效波数; z 为高度值。

1.2 森林垂直结构优化相干散射模型

将多基线 SAR 层析获取的 0 参考基准森林垂直结构剖面作为垂直结构函数,经傅里叶变换,构建普适性的森林垂直结构优化相干散射模型^[20,27]:

$$\gamma(\omega_{\text{FVSH}}) = \frac{\int_0^h P(z) e^{ik_z z} dz}{\int_0^h P(z) dz} \quad (3)$$

1.3 PolInSAR 森林高度反演方法

FVSH 模型构建时已去除地表相位,因此利用 FVSH 模型构建的复相干系数为仅包含森林高度的纯体去相干观测值,通过该模型构建的复相干系数与真实复相干系数求解森林高度^[20,27]。

$$\min_h \|\gamma(\omega) - \gamma(\omega_{\text{FVSH}})\| \quad (4)$$

式中: $\gamma(\omega)$ 为观测值计算得到的复相干系数。

为探究不同层析谱对 FVSH 模型森林高度反演效果的影响,分别借助 Capon^[28]、Beamforming^[28]和 MUSIC^[29]算法获取层析谱,继而构建 FVSH 模型开展森林高度反演实验,森林高度反演流程如图 1 所示。

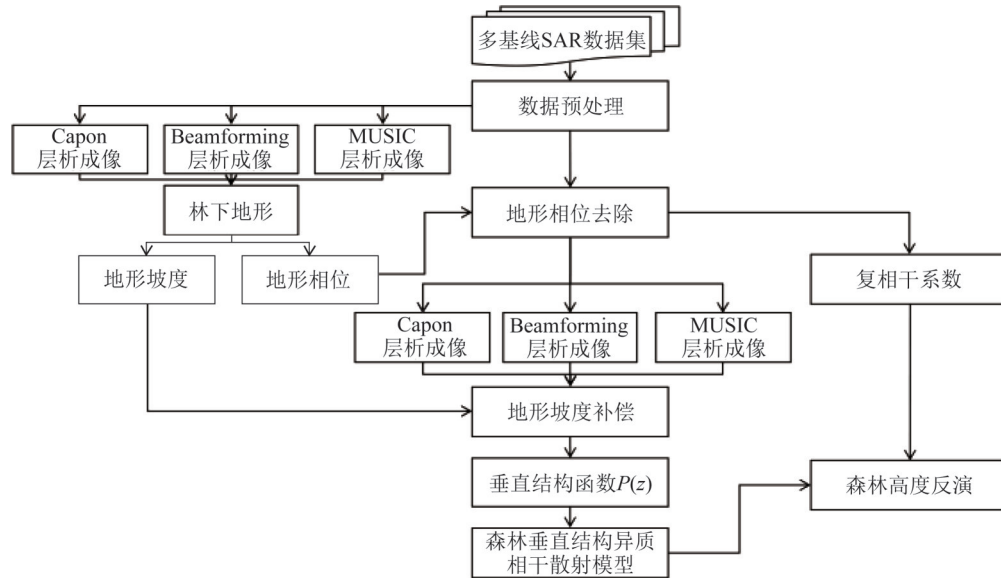


图 1 森林高度反演流程

Fig.1 Process of the forest height inversion

2 实验数据

本文所用的 TropiSAR2009 数据集源于欧洲空间局 (ESA) 2009 年热带雨林机载 SAR 遥感试验,鉴于所有图像均在 2 h 内采集完毕,时间去相干影响可忽略不计。机载数据的详细参数和多基线 SAR 数据的基线信息分别见表 1 和表 2。

表 1 机载 P 波段全极化 SAR 数据

Tab.1 Fully polarized SAR data on the airborne P-band

波长/m	极化方式	中心斜距/m	中心入射角/(°)	斜距向分辨率/m	方位向分辨率/m
0.754 2	HH+HV+VV	4 905.00	35.061 4	1.00	1.25

表 2 多基线 SAR 数据基线信息

Tab.2 Baseline information of the multi-baseline SAR data

获取日期	编号	基线/m
2009-08-24	Tropi0402	0
	Tropi0403	-14.487 9
	Tropi0404	-30.116 3
	Tropi0405	-43.834 3
	Tropi0406	-60.063 2
	Tropi0407	-74.968 3

该实验区域位于法属圭亚那热带雨林的巴拉库研究基地。该研究区域大部分地形相对平坦,森林的垂直结构复杂,如图 2(a)所示。此外,法国农

业研究中心(CIRAD)和 Guyafor 项目提供了激光雷达数字地形模型(Digital Territory Model,DTM)和

森林冠层高度模型(Canopy Height Model,CHM),如图 2(b)和图 2(c)所示。

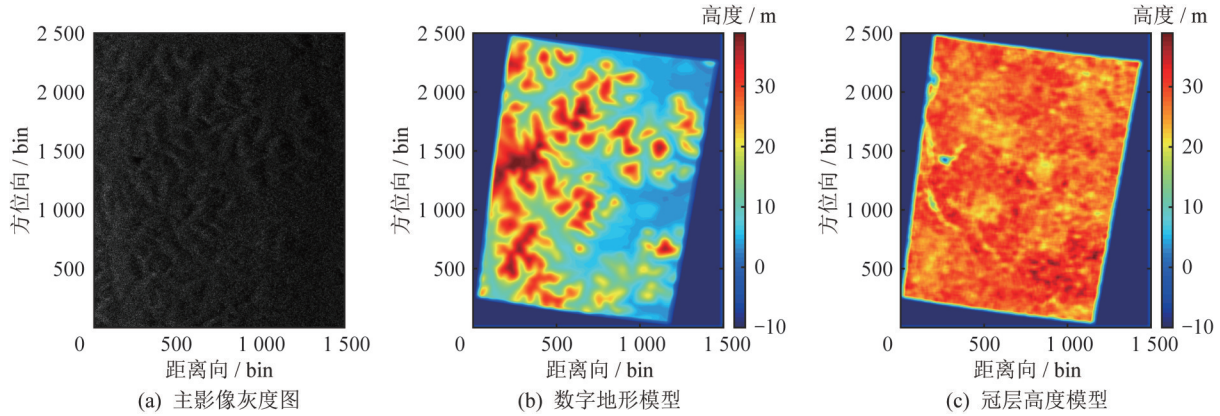


图 2 实验数据及验证数据

Fig.2 Experimental data and validation data

3 实验结果与讨论

3.1 森林垂直结构层析谱

森林区域相干散射模型的构建,其核心是由森林垂直结构函数来确定。选取 Capon、Beamforming 和 MUSIC 层析谱来构建森林垂直结构函数,对比分析不同层析谱对森林垂直结构的表达能力。使用 HH 极化 SAR 数据获取林下地形,并选取方位向剖面获取层析谱展开分析。白色实线为选取的方位向剖面如图 3 所示;Capon、Beamforming 和 MUSIC 这 3 种方法所得的层析谱如图 4 所示。图 4 中白色实线为 TomoSAR 获取的林下地形,白色虚线为 LiDAR 森林冠层高度。为更清晰直观地展示散射功率,本实验中所有层析谱皆进行垂直向后向散射功率归一化。

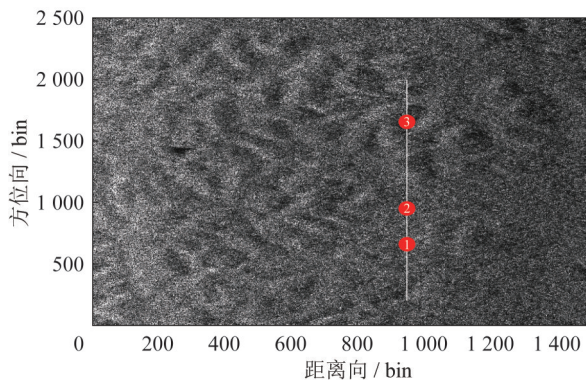


图 3 方位向 SAR 数据剖面

Fig.3 SAR data profile in the azimuthal direction

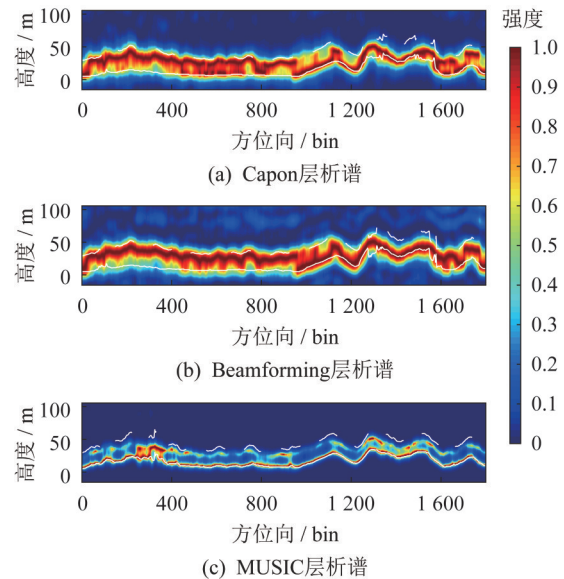


图 4 方位向剖面层析谱

Fig.4 Tomographic spectra of the profile in the azimuthal direction

由图 4 可知,MUSIC 层析谱连续,后向散射功率聚焦于林下地表,提取地表散射相位中心位置即可获得林下地形^[34-35]。Capon 和 Beamforming 层析谱中后向散射功率大部分聚焦于林下地表,但仍有小部分聚焦于植被冠层。如图 5 所示,3 种层析谱提取的林下地形整体上与 LiDAR 数据相近,但均存在高估。经定量评定,林下地形反演精度分别可达 5.58、6.85、5.30 m,可用于消除地形相位及地形坡度对森林垂直结构反演产生的影响。

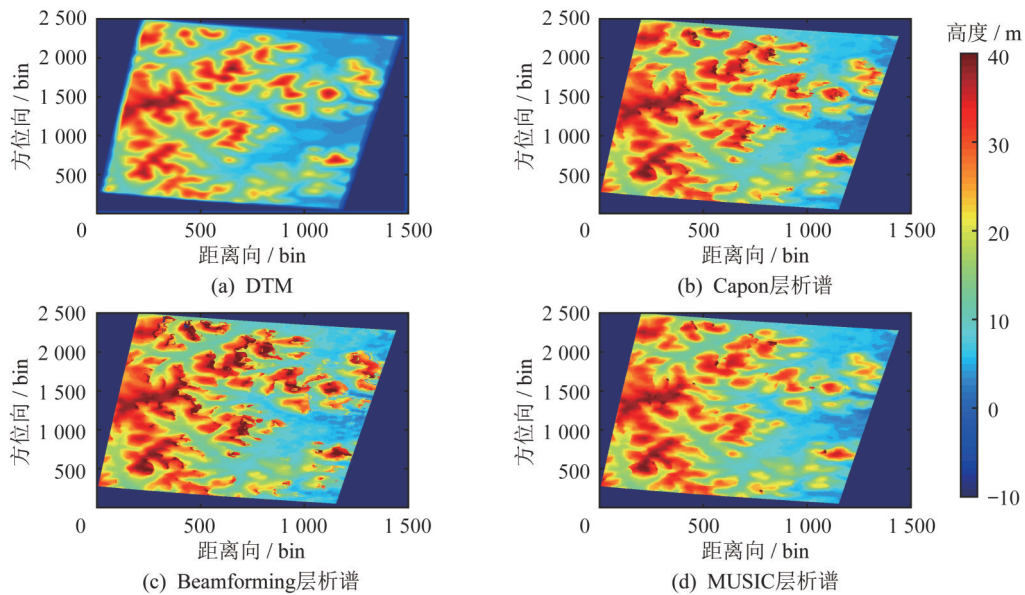


图 5 林下地形

Fig.5 Forest understory terrain

为评估不同层析谱对森林垂直结构的重建效果,选出最适配 FVSH 模型的成像谱,以图 3 中的方位向剖面为例,不同层析谱所对应的森林垂直结构如图 6 所示。同时,将冠层高度(白色虚线)叠加于层析谱中,白色虚线代表高度 0 的参考基准面位置。

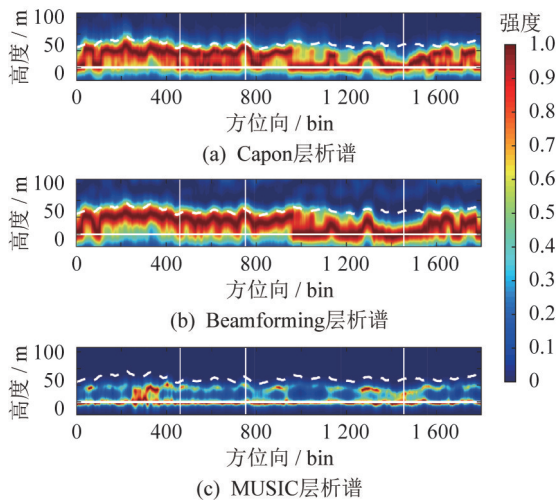


图 6 不同成像算法获取的森林垂直结构层析谱

Fig.6 Forest vertical structure chromatograms obtained by different imaging algorithms

如图 6 所示,不同 TomoSAR 成像算法获取的层析谱均可表达森林垂直结构,可优化森林垂直结构函数,辅助构建 FVSH 模型。Capon、Beamforming 和 MUSIC 森林垂直结构层析谱峰值位置大致相同,但

各层析谱间仍存在差异。Beamforming 垂直结构层析谱旁瓣效应高于 Capon 和 MUSIC,分辨率低于 Capon 和 MUSIC,而 MUSIC 层析谱分辨率比 Capon 和 Beamforming 更高。

为直观展示森林垂直结构形态特征,进一步比较分析不同 TomoSAR 成像算法的森林垂直结构重建效果,在方位向剖面上选取了 3 个位置重建森林垂直结构剖面,如图 7 所示。为确保实验结果具有代表性,分别选取后向散射功率在林面和冠层均有分布的位置 1 以及主要集中于冠层的位置 2 和显著聚焦于地面的位置 3 进行实验分析。

森林场景垂直结构复杂,且表现出典型异质性。图 7 中,图 7(a)、图 7(d)、图 7(g)是位置 1 的垂直结构剖面,3 种层析成像算法的垂直结构剖面的峰值位置相近;图 7(b)、图 7(e)、图 7(h)是位置 2 的垂直结构剖面,3 种算法的剖面峰值均在冠层附近,且 MUSIC 剖面明显不同于 Capon 和 Beamforming,表现出冠层和地面散射情况;图 7(c)、图 7(f)、图 7(i)为位置 3 的垂直结构剖面,3 种算法的剖面间存在差异,Capon 和 Beamforming 层析谱显示散射能量主要集中在地面,MUSIC 层析谱可展示冠层和地面散射体的情况。综上,3 种层析谱间存在差异,其中 MUSIC 层析谱可有效识别冠层和地面散射情况,更符合实际森林场景垂直结构异质性的特点,能更好建立 PolInSAR 观测与森林散射过程间的联系。

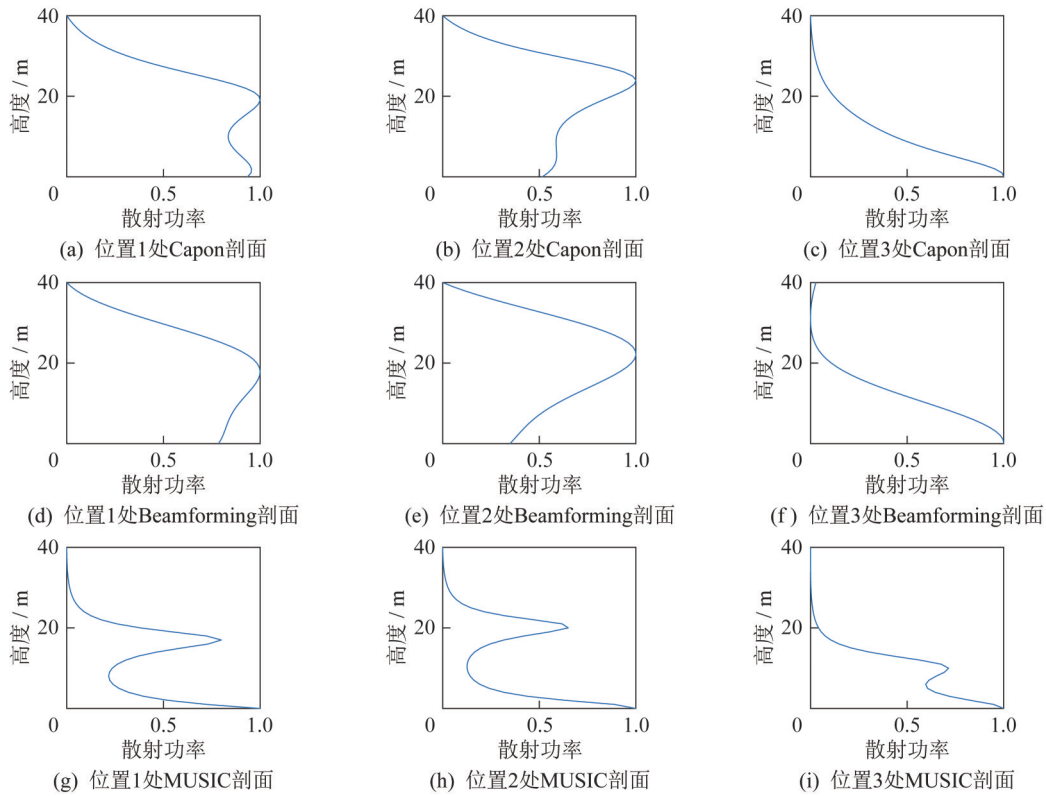


图 7 TomoSAR垂直结构剖面

Fig.7 Vertical structure profiles obtained by the tomographic SAR

3.2 基于不同垂直结构层析谱的 FVSH 模型的森林高度反演

不同层析算法获取的层析谱存在差异,为探究不同层析剖面对森林高度反演的影响,利用选取的 3 个位置的垂直结构剖面求解森林高度,结果见表 3。

表 3 不同位置处森林高度反演结果

Tab.3 Forest height inversion results at different positions

参数	位置 1	位置 2	位置 3
$FVSH_{Capon}/m$	23.20	28.60	22.60
$FVSH_{Beamforming}/m$	23.10	29.00	21.40
$FVSH_{MUSIC}/m$	23.20	28.70	24.90
激光雷达冠层高度/m	24.63	29.69	27.59

结合图 7 和表 3 可知,当散射能量集中或较多分布在冠层时,3 种层析成像算法的垂直结构对于森林高度反演能力基本相当,然而当能量集中在地面时,Capon 和 Beamforming 层析谱反演森林高度能力不如 MUSIC 垂直结构层析谱。因此,MUSIC 算法的森林垂直结构重建能力优于 Capon 和 Beamforming。

为进一步对比不同算法的森林垂直结构重建能力,利用森林垂直结构异质相干模型开展 PolInSAR 森林高度反演对比实验。通过评估模型在单基线 PolInSAR 观测配置下的反演效果,利用 HV 极化 SAR 数据获取 Capon、Beamforming 和 MUSIC 层析谱构建 FVSH 模型,进而实现单基线 PolInSAR 森林高度反演。

基于不同层析谱构建 FVSH 模型的 PolInSAR 森林高度反演间差异较小,难以比较不同结果间差异,如图 8 所示。基于 RVoG 模型的 PolInSAR 森林高度反演结果大部分区域存在低估,如图 9 所示。为更准确评估不同森林高度反演结果的差异,统计各结果的反演精度。

Capon、Beamforming 和 MUSIC 层析谱所构建 FVSH 模型的森林高度反演精度相近,且均优于基于 RVoG 模型的反演精度见表 4。其中,Capon 反演精度略高于 Beamforming 和 MUSIC,MUSIC 的精度略高于 Beamforming。综合剖面和场景的森林高度反演结果,MUSIC 层析谱所构建的 FVSH 模型反演森林高度精度与 Capon 和 Beamforming 相差不大,但明显优于基于 RVoG 模型的森林高度反演。

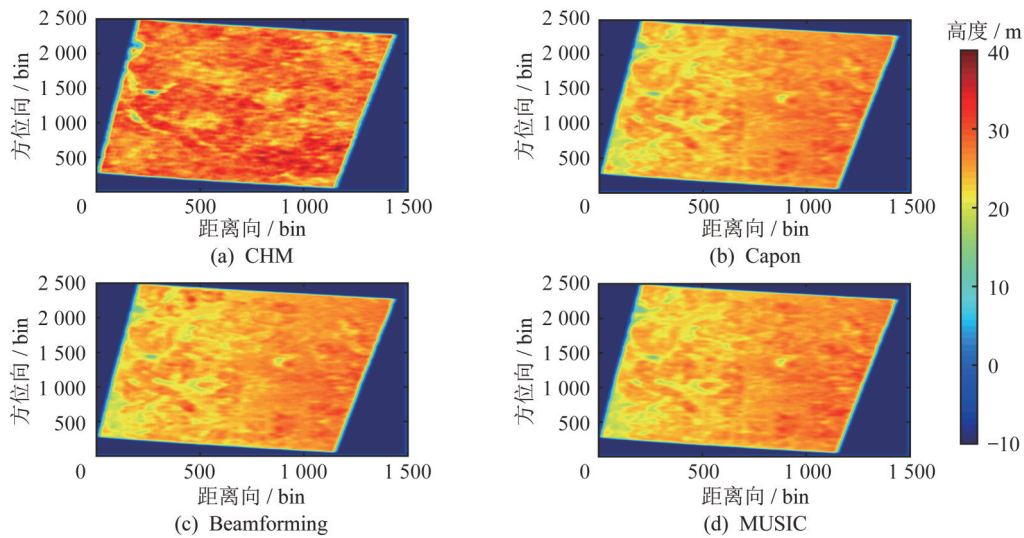


图 8 基于 FVSH 的 PolInSAR 森林高度反演结果

Fig.8 Results of the PolInSAR forest height inversion based on the FVSH

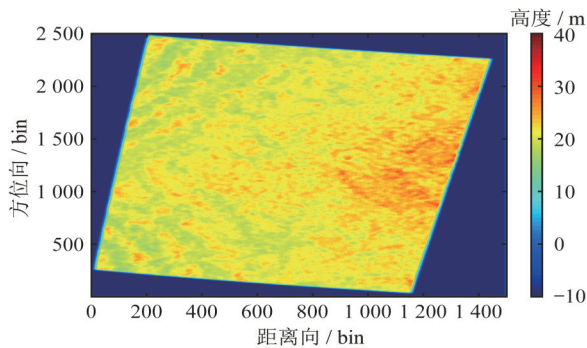


图 9 基于 RVoG 的 PolInSAR 森林高度反演结果

Fig.9 Results of the PolInSAR forest height inversion based on the RVoG

表 4 不同方法森林高度反演精度

Tab.4 Accuracy of the forest height inversion using different methods

方法	FVSH _{Capon}	FVSH _{Beamforming}	FVSH _{MUSIC}	RVoG
反演精度/m	3.75	3.91	3.86	7.45

4 结束语

运用多基线 SAR 层析技术获取森林垂直结构函数,辅助构建 PolInSAR 相干散射模型,可准确表达 SAR 信号穿透森林场景时的散射过程,提升 PolInSAR 森林高度反演性能。为探究不同成像算法层析谱对森林垂直结构的重建能力,首先,深入剖析 Capon、Beamforming 和 MUSIC 层析谱,发现不同层析谱间存在差异,其中 MUSIC 层析谱在森林垂直结构重建方面表现突出。其次,运用不同层析谱优化垂直结构函数,构建相干散射模型,实现 PolInSAR 森

林高度反演。不同相干散射模型得到的整体区域的森林高度精度较为接近,但当散射能量集中在地面时,基于 MUSIC 层析谱构建的散射模型的反演结果精度优于 Capon 和 Beamforming。综上,MUSIC 层析谱在森林垂直结构函数优化方面具有显著优势,能更高效地实现 PolInSAR 森林高度反演。

参考文献

[1] 范军,陈筠力,李相东,等.基于永久散射体合成孔径雷达干涉测量技术的地面沉降监测[J].上海航天(中英文),2023,40(2):118-125.

[2] 陈亮,李健昊,何成,等.多域特征引导的无监督 SAR 图像舰船检测方法[J].上海航天(中英文),2024,41(3):121-129.

[3] 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(3):85-90.

[4] 李洋,梁潇,贾海萨.基于知识蒸馏的 SAR 图像舰船目标检测[J].现代防御技术,2023,51(4):78-85.

[5] LEE S K, KUGLER F, PAPATHANASSIOU K, et al. Multibaseline polarimetric SAR interferometry forest height inversion approaches [C]// ESA POLInSAR Workshop. Frascati, Italy: DLR, 2011.

[6] 张兵,朱建军,付海强,等.多基线极化干涉 SAR 植被高度反演方法[J].测绘工程,2017(26):23-27, 31.

[7] BABUA, KUMARS. Tree canopy height estimation using multi baseline RVoG inversion technique [J]. Int Arch Photogramm Remote Sens Spatial Inf Sci, 2018, XLII-5: 605-611.

[8] 李文梅,李增元,陈尔学,等.层析 SAR 反演森林垂直结构参数现状及发展趋势[J].遥感学报,2014,18(4):

- 741-751.
- [9] CLOUDE S R. Dual-baseline coherence tomography[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2007, 4(1): 127-131.
- [10] CHEN H, CLOUDE S R, WHITE J C. Using GEDI waveforms for improved TanDEM-X forest height mapping: a combined SINC+Legendre approach [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(15): 2882.
- [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] GARESTIER F, LE TOAN T. Forest modeling for height inversion using single-baseline InSAR/Pol-InSAR data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2010, 48(3): 1528-1539.
- [13] 解清华, 汪长城, 朱建军, 等. 顾及地形因素的 S-RVOG 模型和 PD 相干最优算法联合反演植被高度[J]. *测绘学报*, 2015, 44(6): 686-693.
- [14] 万杰, 汪长城, 朱建军, 等. 层析 SAR 三维成像方法与森林参数反演研究进展[J]. *遥感学报*, 2024, 28(3): 576-590.
- [15] MOUSSAWI E I, TONG M D, BAGHDADI N, et al. L-Band UAVSAR tomographic imaging in dense forests: Gabon forests [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(5): 475.
- [16] HUANG Y, ZHANG Q P, FERRO-FAMIL L. Forest height estimation using a single pass airborne L-Band polarimetric and interferometric SAR system and tomographic techniques [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(3): 487.
- [17] LI XW, LIANG L, GUO H. Compressive sensing for multibaseline polarimetric sar tomography of forested areas [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(1): 153-166.
- [18] PENG X, LI X, WANG C, et al. A maximum likelihood based nonparametric iterative adaptive method of synthetic aperture radar tomography and its application for estimating underlying topography and forest height [J]. *Sensors*, 2018, 18(8): 2459.
- [19] 李兰. 森林垂直信息 P-波段 SAR 层析提取方法[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2016.
- [20] 宋天祯. 顾及垂直结构异质性的多基线 PolInSAR 森林高度反演研究[D]. 长沙: 中南大学, 2022.
- [21] CLOUDE S R. Polarization coherence tomography [J]. *Radio Science*, 2006, 41(4): 1-27.
- [22] 朱建军, 谢雁洲, 付海强, 等. 星载 P 波段 SAR 森林覆盖层穿透测绘——欧空局 BIOMASS 卫星综述 [EB/OL]. (2024-07-26) [2025-01-09]. <https://doi.org/10.13203/j.whugis20240220>.
- [23] 陈筠力, 陈杰, 汪长城. 民用 P 波段 SAR 卫星原理及应用[D]. 北京: 中国宇航出版社, 2023.
- [24] REIGBER A, MOREIRA A. First demonstration of airborne SAR tomography using multibaseline L-band data [J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(5): 2142-2152.
- [25] 宋桂萍, 汪长城, 付海强, 等. 植被高度的极化干涉互协方差矩阵分解反演法[J]. *测绘学报*, 2014, 43(6): 613-619, 636.
- [26] BALLESTER-BERMAN J D. Reviewing the role of the extinction coefficient in radar remote sensing [EB/OL]. (2020-12-04) [2025-01-09]. <https://arxiv.org/abs/2012.02609>.
- [27] REIGBER A, MOREIRA A. First demonstration of airborne SAR tomography using multibaseline L-band data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(5): 2142-2152.
- [28] CLOUDE S R, PAPANASSIOU K P. Three-stage inversion process for polarimetric SAR interferometry [J]. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 2003, 150(3): 125-134.
- [29] DUBOIS-FERNANDEZ P C, SOUYRIS J C, ANGELLIAUME S, et al. The compact polarimetry alternative for spaceborne SAR at low frequency [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(10): 3208-3222.
- [30] GARESTIER F, DUBOIS-FERNANDEZ P C, CHAMPION I. Forest height inversion using high-resolution P-band Pol-InSAR data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(11): 3544-3559.
- [31] ZHU X X. Very high resolution tomographic SAR inversion for urban infrastructure monitoring—a sparse and nonlinear tour [D]. München: TUM, 2011.
- [32] LOMBARDINI F, REIGBER A. Adaptive spectral estimation for multibaseline SAR tomography with airborne L-band data [C] // *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Toulouse, France, IEEE, 2003: 2014-2016.
- [33] 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.
- [34] D'ALESSANDRO M M, TEBALDINI S. Digital terrain model retrieval in tropical forests through P-band SAR tomography [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(9): 6774-6781.