



武汉大学学报(信息科学版)

*Geomatics and Information Science of Wuhan University*

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

## 《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: 融合多基线观测信息的 PolInSAR 森林高反演正则化方法  
作者: 林东方, 姚宜斌, 龙四春, 谢建  
DOI: 10.13203/j.whugis20240275  
收稿日期: 2024-10-26  
网络首发日期: 2024-11-05  
引用格式: 林东方, 姚宜斌, 龙四春, 谢建. 融合多基线观测信息的 PolInSAR 森林高反演正则化方法[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版).  
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20240275>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20240275

引用格式：

林东方, 姚宜斌, 龙四春, 等. 融合多基线观测信息的 PolInSAR 森林高反演正则化方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, DOI:10.13203/J.whugis20240275 (LIN Dongfang, YAO Yibin, LONG Sichun, et al. The Regularization Method for Forest Height Inversion by Integrating Multi-Baseline PolInSAR Observation Information[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, DOI:10.13203/J.whugis20240275)

## 融合多基线观测信息的 PolInSAR 森林高反演正则化方法

林东方<sup>1,2</sup>, 姚宜斌<sup>1</sup>, 龙四春<sup>3</sup>, 谢建<sup>3</sup>

1 武汉大学测绘学院, 湖北 武汉, 430079

2 湖南科技大学地理空间信息技术国家地方联合工程实验室, 湖南 湘潭, 411201

3 湖南科技大学地球科学与空间信息工程学院, 湖南 湘潭, 411201

**摘要：** RVoG (Random Volume Over Ground) 模型是 PolInSAR (Polarimetric Interferometric Synthetic Aperture Radar) 森林高参数反演最为常用的散射模型, 受模型复杂结构影响, 利用单基线 PolInSAR 数据反演森林高参数存在严重观测信息不足问题, 借助先验假设信息可实现森林高参数反演, 但严重限制了森林高参数的反演精度。引入多基线观测数据, 可补充观测信息, 但森林高参数反演受到病态问题影响, 难以提高森林高反演精度。鉴于此, 本文基于最小二乘估计方法, 融合多基线观测信息反演森林高参数; 针对参数反演病态问题, 采用正则化方法估计模型参数, 降低模型病态性影响; 并基于森林高参数估值方差与偏差随正则化参数变化规律选择正则化参数, 有效提高森林高参数估计精度与稳定性; 采用 PolInSAR 多基线数据进行森林高反演实验分析, 常规森林高反演最小均方根误差为 9.47 米, 决定系数为 0.72, 多基线正则化法森林高反演均方根误差为 7.36 米, 决定系数为 0.80, 相较之下, 新方法森林高反演均方根误差下降了 22%, 决定系数也相应提高, 有效改善了 PolInSAR 森林高反演精度与稳定性, 是一种可行有效的森林高反演方法。

**关键词：** PolInSAR; 多基线; 病态问题; 正则化; 森林高

### The Regularization Method for Forest Height Inversion by Integrating Multi-Baseline PolInSAR Observation Information

LIN Dongfang<sup>1,2</sup>, YAO Yibin<sup>1</sup>, LONG Sichun<sup>3</sup>, XIE Jian<sup>3</sup>

1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 National-Local Joint Engineering Laboratory of Geo-Spatial Information Technology, Hunan University of

**收稿日期：** 2024-10-26

**基金项目：** 国家自然科学基金(42104025); 湖南省自然科学基金(2024JJ5144); 中国博士后科学基金(2021M702509); 湖南省教育厅优秀青年项目(22B0496)。

**第一作者：** 林东方, 博士, 副教授, 主要从事测量数据处理与 PolInSAR 应用。lindongfang223@163.com

**通讯作者：** 姚宜斌, 博士, 教授。ybyao@whu.edu.cn

Science and Technology, Xiangtan 411201, China

3 School of Earth Sciences and Spatial Information Engineering, Hunan University of Science and Technology,  
Xiangtan 411201, China

**Abstract: Objectives:** The inversion of forest height parameters based on the RVoG (Random Volume Over Ground) model and single baseline PolInSAR (Polarimetric Interferometric Synthetic Aperture Radar) observation data faces significant issues related to a lack of observational information. By incorporating multi-baseline observation data, it is possible to supplement the observational information of model parameters and enhance the accuracy of forest height parameter inversion. However, due to the differences in multi-baseline observation environments, the inversion model can become over-parameterized, leading to ill-posed problems in forest height parameter inversion, which severely restricts the inversion accuracy. Therefore, addressing the ill-posed problem of multi-baseline model parameter inversion is crucial for improving the accuracy and stability of forest height parameter inversion. **Methods:** A multi-baseline inversion model is constructed based on the theory of least squares estimation to achieve the fusion of multi-baseline observational information for forest height parameter inversion. Subsequently, a regularization method is employed to estimate the model parameters, thereby mitigating the effects of ill-posed problem and enhancing the accuracy of forest height parameter estimation. On this basis, a regularization parameter is selected based on the variance and bias of the forest height parameter estimates as they vary with regularization parameters, effectively improving the stability of forest height parameter estimation. **Results:** Experiments on forest height inversion using multi-baseline PolInSAR data indicate that the conventional forest height inversion has a root mean square error (RMSE) of 9.47 meters and a coefficient of determination ( $R^2$ ) of 0.72. In comparison, the RMSE for forest height inversion using the multi-baseline regularization method is 7.36 meters, with an  $R^2$  of 0.80. Thus, the new method demonstrates a 22% reduction in RMSE and a relative improvement in the coefficient of determination, effectively enhancing the accuracy and stability of forest height inversion using PolInSAR. **Conclusions:** The theory of least squares estimation can effectively integrate multi-baseline observational information for forest height parameter inversion; however, the influence of ill-posed problem is significant. By combining this with regularization method, the impact of ill-posedness can be reduced, thereby improving the accuracy and stability of forest height parameter estimation. This constitutes an effective method for PolInSAR multi-baseline integrated forest height inversion.

**Keywords:** PolInSAR; multi-baseline; ill-posed problem; regularization; forest height

森林高是森林地区林下地形监测的重要输入参数,同时也是森林地区碳储量、蓄积量以及生物量估算的重要物理参数,在健康林业、气候变化、灾害评估以及生态环境等科学研究中发挥着重要作用<sup>[1-4]</sup>。因此,大范围、高效高精度的获取森林高信息是当前大地测量的重

要任务之一, 研究大范围森林高测量技术与方法也具有重要科学与实际意义。

极化干涉合成孔径雷达(Polarimetric Interferometric Synthetic Aperture Radar, PolInSAR)技术, 融入了 InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) 技术全天时、大范围对地高度测量的能力<sup>[5-7]</sup>, 同时通过增加多极化测量, 丰富了植被体穿透测量信息, 具备区分森林冠层与地表层散射信息的能力, 已被视为大范围森林高测量与反演的重要技术<sup>[8-10]</sup>。相干散射模型有效刻画了 PolInSAR 多极化观测信息的产生机制, 其建立了观测数据与植被高等模型参数的函数关联, 是利用 PolInSAR 观测信息反演森林高参数的关键模型<sup>[11]</sup>。文献[12]提出的随机地体二层散射 (Random Volume Over Ground, RVoG) 模型是目前森林高反演应用最为广泛的散射模型, 该模型将 PolInSAR 视野下的植被覆盖区散射场景描述为雷达信号可穿透的植被层与不可穿透的地表层, 有效建立了 PolInSAR 观测量与模型参数之间的关联<sup>[13]</sup>。基于 RVoG 模型, 文献[14]提出了解算植被高参数的六维非线性迭代方法, 利用三种极化数据有效实现了植被高参数的估计。然而, 利用单基线观测信息反演植被高参数存在严重的观测信息不足问题, 非线性迭代法依赖于参数上下界约束信息, 且容易陷入局部收敛或不收敛<sup>[15]</sup>。鉴于此, 文献[16]提出了植被高反演三阶段算法, 该算法假设体散射占优极化通道地表散射贡献为 0, 进而实现植被高参数的估计<sup>[17][18]</sup>。通过先验假设固定部分模型参数可提高参数估计稳定性, 但不可靠的先验信息往往导致植被参数估值存在较大偏差<sup>[19][20]</sup>。引入多基线数据理论上可补充观测信息, 改善参数反演精度。文献[21]和文献[22]提出利用多基线数据统计特性或外部辅助数据筛选最优基线反演植被高参数, 该方式仅是对多基线的反演结果进行了比较筛选, 实际上仍利用单基线信息进行反演, 未能融合利用多基线的观测信息。文献[23]提出了植被高反演复数最小二乘迭代法, 该方法可扩展到多基线观测情形, 实现植被高参数反演。然而, 基于 RVoG 模型的多基线模型参数反演依然存在观测信息不足问题, 导致参数反演出现病态问题<sup>[24][25]</sup>, 植被高参数的反演精度与稳定性受限于病态问题的影响程度。

鉴于此, 本文拟融合利用多基线 PolInSAR 观测信息, 基于最小二乘估计构建多基线森林高反演方法; 进而利用病态问题解算常用的正则化方法降低病态性影响, 实现模型参数的有效估计; 而后基于均方误差理论分析森林高参数估值方差与偏差变化, 以降低森林高估值均方误差为目标, 实现森林高参数的稳定最优正则化估计, 进而提高森林高参数反演精度。

## 1 PolInSAR 森林高反演模型与方法

### 1.1 RVoG 模型

RVoG 模型是目前 PolInSAR 森林高反演应用最为广泛的相干散射模型, 该模型将森林覆盖区散射场景描述为两层, 即 PolInSAR 信号可穿透的植被层和不可穿透或穿透较小的地表层<sup>[12]</sup>, 有效刻画了极化复相干性的产生机制, 并建立了模型参数与观测信息之间的函数关联。具体表示为:

$$\gamma(\omega) = e^{i\varphi_0} \frac{\gamma_v + \mu(\omega)}{1 + \mu(\omega)} \quad (1)$$

式中， $\omega$ 为极化状态参数，表示某种极化方式； $\gamma(\omega)$ 表示对应于 $\omega$ 的极化复相干系数，为观测值； $\varphi_0$ 表示未知地表相位参数； $\mu(\omega)$ 表示 $\omega$ 极化方式下的地体幅度比参数，为未知模型参数； $\gamma_v$ 则表示纯体相干性，与消光系数、植被高等参数相关联。 $\gamma_v$ 可表示为：

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

式中， $h_v$ 为所需的植被高参数； $\sigma$ 表示消光系数； $\theta$ 为主影像雷达入射角，影响垂直向有效波数； $k_z$ 则表示垂直向有效波数，可计算为：

$$k_z = \frac{4\pi\Delta\theta}{\lambda\sin\theta} \quad (3)$$

其中， $\lambda$ 表示雷达波长； $\Delta\theta$ 表示主影像与副影像的入射角差异。

## 1.2 PolInSAR 森林高多基线融合正则化估计方法

由于 RVoG 模型包含过多的未知模型参数，单基线观测信息中部分模型参数的信息量较少或信息区分度较小，导致模型参数反演存在严重的观测信息不足问题，需借助先验信息或先验假设，实现模型参数反演，极大限制了森林高参数的反演精度与可靠性。融合多基线观测数据，理论上有助于观测信息的补充，提高模型参数反演精度。鉴于此，本文基于最小二乘平差估计算法，构建多基线融合森林高参数估计方法，并针对观测信息不足引起的参数反演病态问题，以改善森林高参数估值均方误差为准则，构建森林高参数正则化估计方法，提高森林高参数估值精度。

在多基线观测时间间隔较短时，可认为多基线观测下的森林高与地表高参数保持不变。基于地表相位参数、地表高参数以及垂直向有效波数参数之间的关联性，可利用已知模型参数 $k_z$ 将不同基线的地表相位参数表达为多基线统一的地表高参数，从而减少多基线中的未知模型参数数量。不同基线的地表高参数可表示为：

$$h_g = \varphi_0^j / k_z^j \quad (4)$$

式中， $h_g$ 表示地表高参数； $j$ 表示基线数； $\varphi_0^j$ 为第 $j$ 条基线的地表相位参数； $k_z^j$ 为第 $j$ 条基线的垂直向有效波数。由此可得基于 RVoG 模型的多基线森林高反演函数模型为：

$$\gamma^j(\omega) = f(h_v, h_g, \sigma, \mu(\omega)) \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

由（5）式可见，森林高、地表高、消光系数等模型参数与基线观测条件和极化方式无

关，地体幅度比参数与基线观测条件无关，仅与极化方式有关。因此，同一极化方式下，不同基线函数模型具有相同的未知模型参数，通过融合多基线观测数据，可有效补充模型参数观测信息。

最小二乘估计是包含多余观测信息时进行平差解算的常用参数估计方法，由函数模型依据复数最小二乘估计准则可得：

$$\sum_{j=1}^m \left( \left\| \operatorname{Re}(\hat{\gamma}^j(\omega)) - \operatorname{Re}(\gamma^j(\omega)) \right\| + \left\| \operatorname{Im}(\hat{\gamma}^j(\omega)) - \operatorname{Im}(\gamma^j(\omega)) \right\| \right) = \min \quad (6)$$

式中， $\sum$ 表示连加运算； $\|\cdot\|$ 表示二范数运算； $\hat{\gamma}^j(\omega)$ 表示由模型参数估值重构的复相干系数值。由（6）式可得最小二乘平差估计的观测误差方程为：

$$\begin{cases} V_{\operatorname{Re}}^j = \operatorname{Re}(\hat{\gamma}^j(\omega)) - \operatorname{Re}(\gamma^j(\omega)) \\ V_{\operatorname{Im}}^j = \operatorname{Im}(\hat{\gamma}^j(\omega)) - \operatorname{Im}(\gamma^j(\omega)) \end{cases}$$

式中， $V_{\operatorname{Re}}^j$ 表示复相干系数实部观测残差； $V_{\operatorname{Im}}^j$ 表示复相干系数虚部观测残差； $\operatorname{Re}$ 表示取实部运算； $\operatorname{Im}$ 为取虚部运算。对上式进行泰勒线性化可得：

$$\begin{cases} V_{\operatorname{Re}}^j = \frac{\partial \operatorname{Re}(\gamma^j(\omega))}{\partial h_v} dh_v + \frac{\partial \operatorname{Re}(\gamma^j(\omega))}{\partial h_g} dh_g + \frac{\partial \operatorname{Re}(\gamma^j(\omega))}{\partial \sigma} d\sigma \\ \quad + \frac{\partial \operatorname{Re}(\gamma^j(\omega))}{\partial \mu} d\mu - l_{\operatorname{Re}}^j \\ V_{\operatorname{Im}}^j = \frac{\partial \operatorname{Im}(\gamma^j(\omega))}{\partial h_v} dh_v + \frac{\partial \operatorname{Im}(\gamma^j(\omega))}{\partial h_g} dh_g + \frac{\partial \operatorname{Im}(\gamma^j(\omega))}{\partial \sigma} d\sigma \\ \quad + \frac{\partial \operatorname{Im}(\gamma^j(\omega))}{\partial \mu} d\mu - l_{\operatorname{Im}}^j \end{cases}$$

式中， $d(\cdot)$ 表示模型参数改正数； $\partial(\cdot)$ 表示偏导数运算； $l_{\operatorname{Re}}^j$ 与 $l_{\operatorname{Im}}^j$ 分别表示复相干观测实部与虚部残余项。进而可得复相干观测下的高斯-马尔可夫(Gauss-Markov, G-M)模型为<sup>[26][27]</sup>：

$$\begin{aligned} & \mathbf{V} \\ & = \mathbf{A}\mathbf{X} \\ & - \mathbf{L} \end{aligned} \quad (9)$$

式中， $\mathbf{V}$ 表示观测值残差向量， $\mathbf{A}$ 为误差方程设计矩阵， $\mathbf{X}$ 为森林高、地表高、消光系数、地体幅度比等未知参数改正数向量； $\mathbf{L}$ 表示观测值向量，即复相干系数实部与虚部残余常数。依据复数最小二乘估计准则可得未知参数估值为：

$$\hat{\mathbf{X}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{L} \quad (10)$$

最小二乘算法可有效融合多基线观测信息实现森林高等模型参数的估计，然而，受RVoG模型复杂结构影响，多基线模式下，模型参数反演依然存在观测信息不足问题，导致参数反演出现病态问题，反演可靠性及稳定性较差，严重时甚至无法得到参数的有效估值。病态问

题影响下的最小二乘参数估值方差为:

$$T = \text{Trace}[\sigma_0^2(\mathbf{A}^T\mathbf{A})^{-1}]$$

$$= \sigma_0^2 \left( \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i^2} \right) \quad (11)$$

式中,  $\sigma_0^2$ 表示观测单位权方差;  $\lambda_i$ 为矩阵 $\mathbf{A}$ 奇异值分解后的奇异值。模型病态性主要体现在设计矩阵存在较小的接近于零的奇异值, 这些较小奇异值会严重放大观测误差的影响, 导致参数估值方差较大, 常规最小二乘估计已无法获得模型参数的准确估值。鉴于此, 本文考虑引入一种病态问题处理方法-正则化方法进行参数估计, 得到未知参数的正则化估值表示为:

$$\hat{\mathbf{X}}_\alpha = (\mathbf{A}^T\mathbf{A} + \alpha\mathbf{I})^{-1}\mathbf{A}^T\mathbf{L} \quad (12)$$

式中,  $\hat{\mathbf{X}}_\alpha$ 表示未知参数的正则化估值;  $\alpha$ 为正则化调节因子或参数;  $\mathbf{I}$ 表示单位正则化矩阵。不同于常规估计方法的无偏特性, 正则化方法是一种有偏估计方法, 其通过引入少量偏差, 大幅降低方差, 从而实现参数估值均方误差的下降。理论上正则化方法的均方误差应优于无偏估计方法, 才能改善模型参数的估计精度。正则化方法的参数估值均方误差可表示为<sup>[28]</sup>:

$$M_\alpha = E[(\hat{\mathbf{X}}_\alpha - \tilde{\mathbf{X}})^T(\hat{\mathbf{X}}_\alpha - \tilde{\mathbf{X}})]$$

$$= T_\alpha + \mathbf{b}_\alpha^T\mathbf{b}_\alpha \quad (13)$$

式中,  $M_\alpha$ 表示正则化估值均方误差, 包含方差和偏差两个组成部分;  $\tilde{\mathbf{X}}$ 表示未知模型参数的实际真值;  $\mathbf{b}_\alpha$ 表示估值偏差向量;  $T_\alpha$ 表示各参数估值方差和, 可由参数估值协方差矩阵求迹获得<sup>[29]</sup>, 协方差矩阵及其迹可表示为:

$$C_\alpha = \sigma_0^2(\mathbf{A}^T\mathbf{P}\mathbf{A} + \alpha\mathbf{I})^{-1}\mathbf{A}^T\mathbf{P}\mathbf{A}(\mathbf{A}^T\mathbf{P}\mathbf{A} + \alpha\mathbf{I})^{-1} \quad (14)$$

对设计矩阵 $\mathbf{A}$ 进行奇异值分解可得:

$$\mathbf{A} = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{G}^T \quad (15)$$

式中,  $\mathbf{U}$ 表示左奇异向量矩阵;  $\mathbf{S}$ 表示奇异值矩阵;  $\mathbf{G}$ 表示右奇异向量矩阵。

$$T_\alpha = \text{Trace}(C_\alpha)$$

$$= \sigma_0^2 \left( \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i^2}{(\lambda_i^2 + \alpha)^2} \right) \quad (16)$$

式中,  $C_\alpha$ 表示参数估值协方差矩阵; 估值偏差向量  $\mathbf{b}_\alpha$ 可表示为:

$$\mathbf{b}_\alpha = -\alpha(\mathbf{A}^T\mathbf{A} + \alpha\mathbf{I})^{-1}\tilde{\mathbf{X}}$$

$$= -\sum_{i=1}^n \mathbf{g}_i \frac{\alpha}{\lambda_i^2 + \alpha} \mathbf{g}_i^T \tilde{\mathbf{X}} \quad (17)$$

式中， $\mathbf{g}_i$ 为右奇异向量矩阵 $\mathbf{G}$ 中的第*i*列右奇异向量。

正则化方法可有效降低各参数的估值方差，但同时在各参数估值中也不同程度的引入了偏差，因而方差下降量与偏差增加量的大小决定了各参数的估值精度。综合（16）与（17）式可见，各参数估值方差下降量与偏差增加量与正则化参数大小息息相关，方差随着正则化参数的增大而减小，而偏差则随着正则化参数的增大而增加。因此，应合理利用正则化参数调节方差与偏差变化，得到可靠的参数估值。方差的计算可基于误差传播律利用（16）式有效估计，但偏差的计算需要未知模型参数的真值，在实际中森林高等模型参数的真值是无法获得的。鉴于此，本文考虑利用森林高参数的先验值计算偏差，并依据森林高参数估值偏差与方差随正则化参数的变化规律选择正则化参数。正则化参数确定如下：

首先，基于公式（14）和（17）分解出森林高参数估值方差与偏差

$$\begin{aligned}
 &= \begin{bmatrix} c_h & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots \end{bmatrix} \mathbf{b}_\alpha \\
 &= \begin{bmatrix} b_h \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{18}$$

式中， $c_h$ 表示森林高估值方差； $\mathbf{C}_\alpha$ 省略部分为其余模型参数估值方差； $b_h$ 表示森林高估值偏差； $\mathbf{b}_\alpha$ 省略部分为其余模型参数估值偏差。

其次，基于公式（14）和（18）计算森林高参数估值方差；并利用森林高参数经验值，基于公式（17）和（18）计算森林高参数估值近似偏差。

第三，比较分析不同正则化参数下的森林高估值方差与偏差变化，方差随着正则化参数增大不断下降，而偏差则不断增加。由于偏差仅为近似值，以方差下降到合理范围，且偏差引入较小时，确定正则化参数。

$$\begin{aligned}
 &\leq \varepsilon \\
 &\text{确定}\alpha
 \end{aligned} \tag{19}$$

通过先验信息或单基线 PolInSAR 获得的森林高初值误差稳定在 3 米至 10 米的范围内，以该误差范围内森林高参数为初值，分析不同初值误差对多基线正则化法森林高参数反演的影响。不同初值误差影响如图 1 所示。

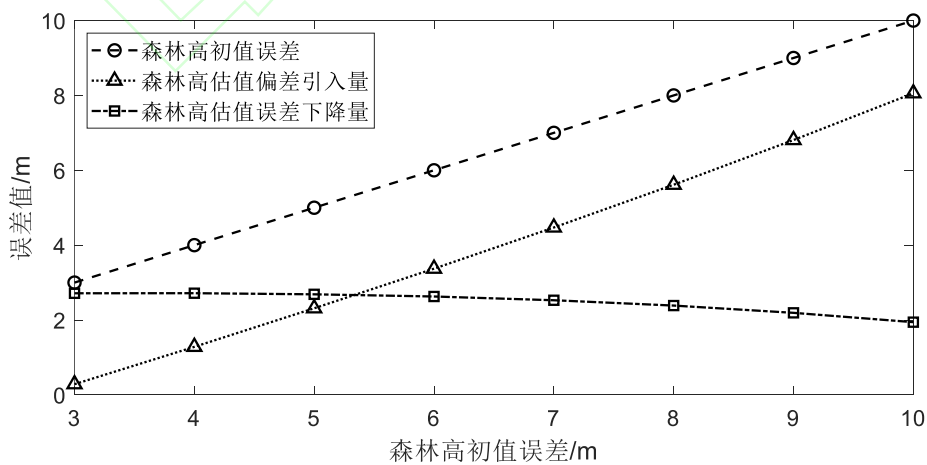


图 1 不同初值误差对多基线正则化法森林高参数反演影响

Fig.1 The impact of varying initial value errors on the parameter inversion of forest height using



multi-baseline regularization methods.

基于公式(19)确定正则化参数后,方差下降量为一稳定量,森林高估值误差主要受偏差影响。由图1可见,随着森林高初值误差的增大,多基线正则化法引入的偏差也不断增大,但偏差引入量均一致小于初值误差,表明在不同初值误差下,多基线正则化法仍可有效改善森林高反演精度。由森林高估值误差下降量可见,随着初值误差的增大,森林高估值误差下降量有所减少,但减少程度较小,整体保持了较好的稳定性。因此,多基线正则化法对森林高参数初值敏感性较低,在不同初值误差下,仍可较稳定的改善森林高参数反演精度。

## 2 PolInSAR 森林高反演实验

为了验证多基线 PolInSAR 森林高反演算法的可行性与有效性,选取了美国国家航空航天局实施的 AfriSAR 项目<sup>[30]</sup>所提供的机载 P 波段多基线 PolInSAR 数据进行森林高反演验证。实验数据采集区域位于非洲加蓬的洛佩地区,具体位置如图2所示,该地区为典型的热带雨林覆盖区,森林高较高,植被结构复杂多样,生物量范围约在 50 至 600 吨/公顷,森林高范围为 3 米至 60 米。为验证长波 PolInSAR 技术实施大范围森林高测量的可行性,AfriSAR 项目利用机载 SAR 系统采集了该实验区 P 波段多基线 PolInSAR 数据,同时获取了实验区高精度 LiDAR (Light Detection And Ranging) 森林高测量数据,可用于对比分析 PolInSAR 森林高反演结果。

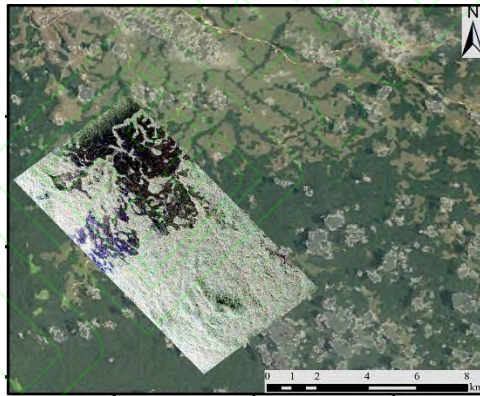


图2 AfriSAR 项目洛佩实验区位置及 PolInSAR 数据 Pauli 基彩色合成图

Fig.2 Location of the Lope test site in the AfriSAR project and the Pauli color composite image of PolInSAR data

本实验选取了三条基线的全极化观测数据进行森林高参数反演,三条基线的观测参数信息如表1所示。为对比分析不同方法的森林高反演精度,分别采用单基线森林高估计方法、多基线最小二乘反演方法以及多基线正则化反演方法进行森林高参数反演。并利用覆盖该实验区的 LiDAR 森林高测量结果作为真值进行精度分析,进而验证本文提出的多基线反演方法的可行性与有效性。各方法的森林高反演结果如图3所示。

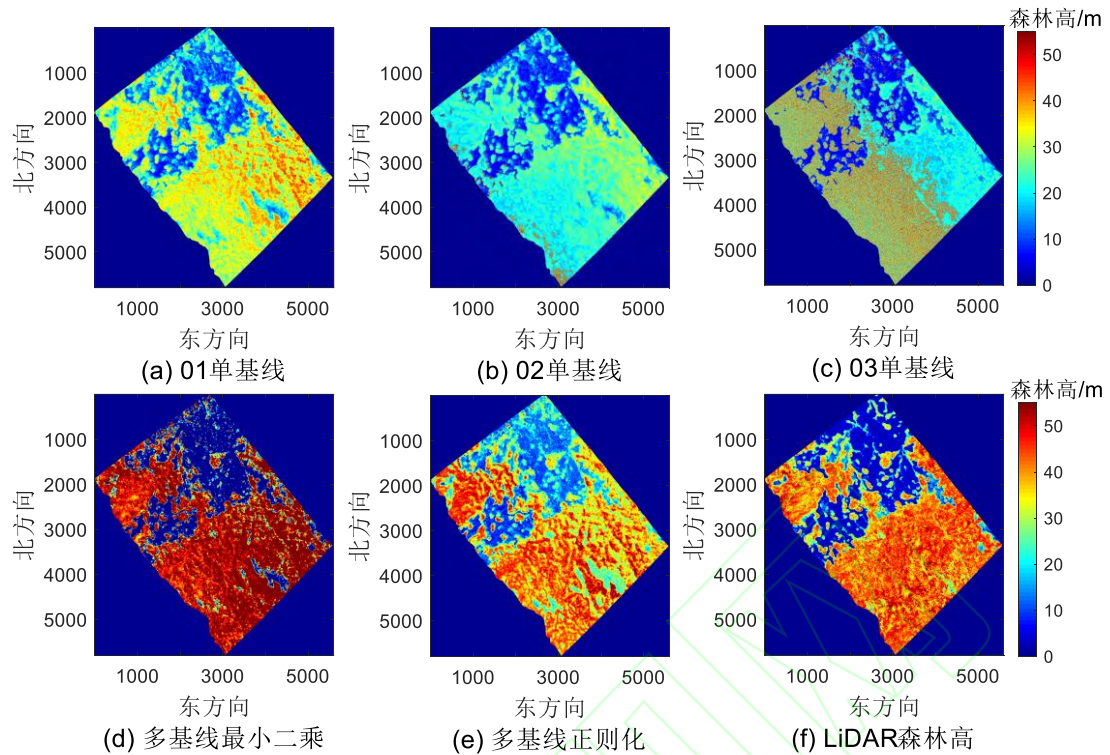


图 3 不同方法森林高反演结果

Fig. 3 Forest height inversion results of different methods

表 1 多基线 PolInSAR 观测数据参数

Tab. 1 Parameters of the multi-baseline PolInSAR observation data

基线号	极化方式	空间基线(米)	垂直向有效波束范围
基线 01	全极化	40	0.065-0.119
基线 02	全极化	60	0.097-0.177
基线 03	全极化	80	0.130-0.229

由图 3 可见，采用单基线数据进行森林高参数反演，基线 01 的森林高反演结果最优，与 LiDAR 森林高结果最为接近；其次是基线 02 反演结果；基线 03 整幅影像出现两种不同的反演结果，这主要由于两半幅影像观测数据质量不同，导致反演结果出现较大差异，反演结果略差于基线 02。融合多基线数据反演森林高，受模型病态性影响，常规最小二乘算法无法有效提高森林高反演精度，反演结果出现严重的高估现象；而采用正则化方法进行解算后，森林高反演结果得到显著改善，相比于最优单基线反演结果，反演质量也有明显提升，森林高估值最接近于 LiDAR 森林高测量值。为了进一步量化分析各方法的森林高反演精度，在图中均匀选取了 20133 块样本，以 LiDAR 森林高测量值作为参数真值，计算各方法的森林高反演均方根误差，误差情况如图 4 所示。

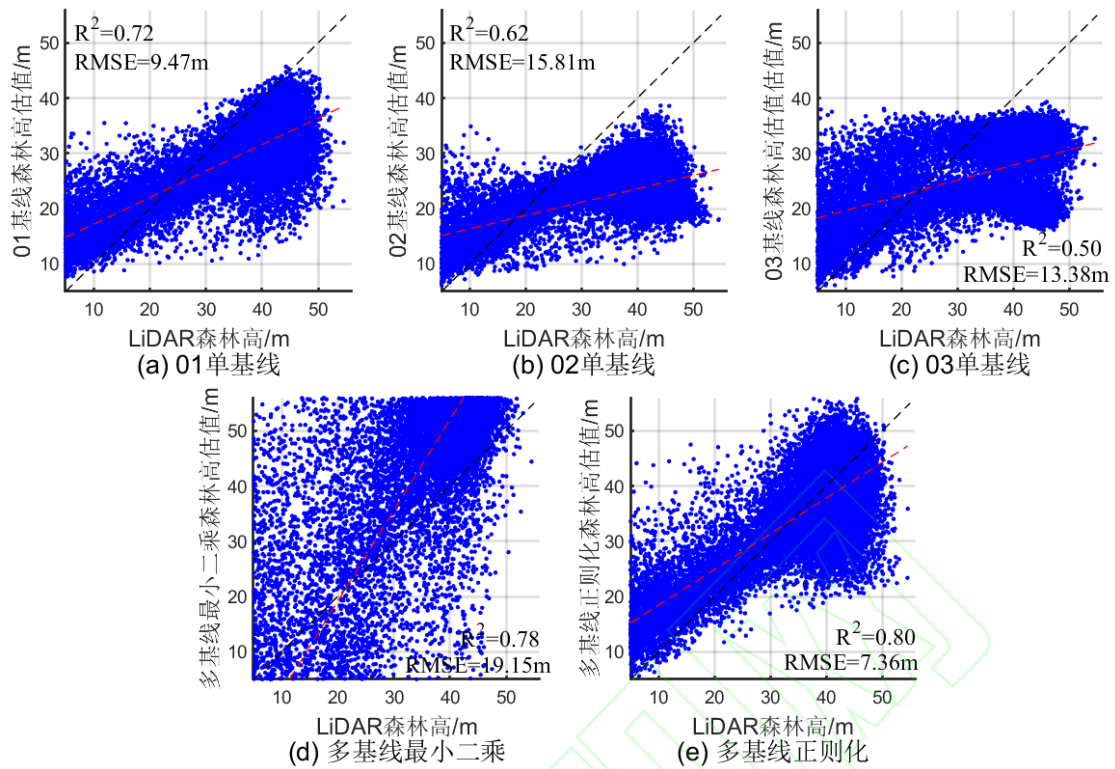


图 4 不同方法森林高反演均方根误差分析

Fig. 4 Root mean square error analysis of the forest height inversion using different methods

由图 4 误差分析情况可见，各方法的均方根误差分析结果与森林高估值图分析结果基本一致。单基线森林高反演结果中，01 基线的森林高反演均方根误差最小，为 9.47 米；其次是 03 基线，但 03 基线的误差分布出现明显的分区，这主要由于 03 基线左右两半幅数据观测质量差异较大，导致两半幅数据的反演结果差异也较大；最后是 02 基线，其森林高反演均方根误差最大。采用多基线数据进行森林高反演后，常规最小二乘算法受病态性影响严重，森林高估值均方根误差达到了 19.15 米，高于单基线森林高反演均方根误差；利用正则化方法解算后，有效缓解了病态问题影响，森林高估值均方根误差下降到 7.36 米，相比于最优单基线结果，均方根误差下降了 22%。在决定系数方面，多基线正则化算法依然表现最优，决定系数为 0.80，其次是多基线最小二乘算法，随后是 01 单基线，最后是 03 单基线。由此表明，新方法可一定程度上提高 PolInSAR 森林高反演精度，是一种可行且有效的森林高估计方法。

### 3 结语

基于 RVoG 模型的 PolInSAR 森林高参数反演常存在观测信息不足问题，在单基线模式下，需借助先验假设信息，实现模型参数反演，从而限制了参数反演精度。融合多基线观测，有助于补充观测信息，提高参数反演精度，但多基线模式下，模型参数反演存在病态问题，严重影响了模型参数反演精度。鉴于此，本文利用最小二乘估计方法，融合多基线观测信息反演森林高参数；针对参数反演病态问题，采用正则化方法降低病态性影响，并基于森林高

参数估值方差与偏差变化, 优化正则化参数选择, 提高森林高参数反演精度与稳定性。通过研究发现:

(1) 引入多基线观测, 可有效补充观测信息, 改善模型参数反演观测信息不足问题, 但模型参数反演存在病态问题。

(2) 最小二乘方法可融合多基线信息反演森林高参数, 但受病态性影响严重, 采用正则化方法解算, 可降低病态性影响, 改善森林高参数估计精度。

(3) PolInSAR 森林高反演实验表明, 多基线正则化反演方法可有效提高单基线森林高反演精度, 精度改善了 22%左右, 是一种行之有效的森林高反演方法。

## 参考文献

- [1] Simard M, Fatoyinbo L, Smetanka C, et al. Mangrove Canopy Height Globally Related to Precipitation Temperature and Cyclone Frequency[J]. *Nature Geoscience*, 2019,12(1):40-45.
- [2] Moreira A, Krieger G, Hainsek I, et al. Tandem-L: A Highly Innovative Bistatic SAR Mission for Global Observation of Dynamic Processes on The Earth's Surface[J]. *IEEE GeoScience and Remote Sensing magazine*, 2015. 3(2):8-23.
- [3] Pan Yude, Birdsey R A, Fang Jingyun, et al. A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests[J]. *Science*,2011,333(6045):988-993.
- [4] Letoan T, Quegam 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.
- [5] Cloude, S R, Papathanassion, K P. Polarimetric SAR Interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*.1998,36(5):1551-1565.
- [6] Yang Chengsheng, Li Xiaoyang, Zhang Qin, et al. Monitoring and Analysis of Post-Earthquake Landslide in Sindhu-palchowk District, Nepal Based on InSAR Technology[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*,2023,48(10):1684-1696. (杨成生,李晓阳,张勤,等. 基于 InSAR 技术的尼泊尔辛杜帕尔乔克区震后滑坡监测与分析[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2023, 48 (10): 1684-1696.)
- [7] Xu Wenbin, Luo Xingjun, Zhu Jianjun, et al. Review of Volcano Deformation Monitoring and Modeling with InSAR[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023,48(10):1632-1642. (许文斌,罗兴军,朱建军,等. InSAR 火山形变监测与参数反演研究进展 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2023, 48 (10):1632-1642.)
- [8] Guo Huadong, Li Xinwu, Wang Changlin, et al. The Mechanism and Role of Polarimetric SAR Interferometry[J]. *Journal of Remote Sensing*. 2002(06):401-405. (郭华东,李新武,王长林等. 极化干涉雷达遥感机制及作用[J].*遥感学报*,2002(06):401-405.)
- [9] Li Yongsheng, Li Qiang, Jiao Qisong, et al. Application of Lutan -1 SAR Satellite Constellation to Earthquake Industry and Its Prospect[I]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49 (10):1741-1752. (李永生,李强,焦其松,等. 陆地探测一号 SAR 卫星星座在地震行业的应用与展望[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2024, 49 (10): 1741-1752.)
- [10] Zhu Jianjun, Xie Yanzhou, Fu Haiqiang, et al. Penetration Mapping of Forest Cover Using Spaceborne P-band SAR: A Review of the European Space Agency's BIOMASS Mission[I]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, DOI:10.13203/J.whugis

20240220. (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[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024,DOI:10.13203/J.whugis 20240220.)

- [11] Xie Qinghua, Zhu Jianjun, Wang Changcheng, et al. A S-RVoG Model-based PolInSAR Nonlinear Complex Least Squares Method for Forest Height Inversion[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2020,49(10):1303-1310. (解清华,朱建军,汪长城等.基于 S-RVoG 模型的 PolInSAR 森林高度非线性复数最小二乘反演算法[J].测绘学报,2020,49(10):1303-1310.)
- [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. Vertical Structure of Vegetated Land Surfaces from Interferometric and Polarimetric radar[J]. *Radio science*,2000,35(1):141-177. DOI: 10.1029/1999RS900108.
- [14] Papathanassion K P, Cloude S R. Single-baseline Polarimetric SAR Interferometry [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001,39(11):2352-2363.
- [15] Li Xinwu, Guo Huadong, Liao Jingjuan, et al. Inversion of Vegetation Parameters Using Spaceborne Polarimetric SAR Interferometry[J]. *Journal of Remote Sensing*. 2002, 6(6):424-429. (李新武,郭华东,廖静娟等. 航天飞机极化干涉雷达数据反演地表植被参数[J].遥感学报,2002, 6(6):424-429.)
- [16] Cloude, S R, Papathanassion K P. Three-stage Inversion Process for Polarimetric SAR Interferometry[C]. *IEE Proceedings Radar, Sonar and Navigation*, 2003, 150 (3):125-134.
- [17] Kugler F, Lee S K, Hajnsek I, et al. Forest Height Estimation by Means of Pol-InSAR Data Inversion: The Role of the Vertical Wave Number[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 2015,458(10):5294-5311.
- [18] Fu W X Guo H D, Li X W, et al. Extended Three-stage Polarimetric SAR Interferometry Algorithm by Dual-polarization Data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(5):2792-2802.
- [19] Wang C C, Wang L, Fu H Q, et al. The Impact of Forest Density on Forest Height Inversion Modeling from Polarimetric InSAR Data[I]. *Remote Sensing*, 2016,8(4):291.
- [20] Managhebi T, Maghsoudi Y, Valadanoej M J. A Volume Optimization Method to Improve the Three-stage Inversion Algorithm for Forest Height Estimation Using PolInSAR Data[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing letters*,2018,15(8):1214-1218.
- [21] Lee S K, Fatoyinbo T E, Lagomasino D, et al. Multibaseline TanDEM-X Mangrove Height Estimation: The Selection of the Vertical Wavenumber[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018,11(10):3434-3442.
- [22] Xie Y, Fu H, Zhu J, et al. A LiDAR-Aided Multi-baseline PolInSAR Method for Forest Height Estimation: With Emphasis on Dual-Baseline Selection[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2019,17(10): 1807-1811.
- [23] Zhu J J, Xie Q H, Zuo T Y, et al. Complex Least Squares Adjustment to Improve Tree Height Inversion Problem in PolInSAR[J]. *Journal of Geodesy and Geoinformation Science*, 2019, 2(1):1-8.
- [24] Fu H Q, Zhu J J, Wang C C, et al. Underlying Topography Extraction Over Forest Areas from

- Multi-baseline PolInSAR Data[J]. Journal of Geodesy,2018,92(7):727-741.
- [25] Lin Dongfang, Yao Yibin, Zheng Dunyong, et al. Regularization Parameter Determination Method Based on MSE relative Variation Rule and Its Application in PolInSAR Surveying Inversion[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2023,52(09):1480-1491. (林东方,姚宜斌,郑敦勇,等.利用均方误差相对变化规律确定正则化参数及其在 PolInSAR 测量反演中的应用[J].测绘学报,2023,52(09):1480-1491.)
- [26] Xu Tianhe, Yang Yuanxi. Condition of Regularization Solution Superior to LS Solution Based on MSE Principle[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2004, 29(3): 223-226. (徐天河,杨元喜. 均方误差意义下正则化解优于最小二乘解的条件[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2004,29(3);223-226.)
- [27] Lin Dongfang, Yao Yibin, Zheng Dunyong, et al. Determination of Truncation Parameter Based on the Differences of TSVD Parameter Estimates for Ill-posed Problems in Geodesy [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022,51(08):1787-1796. (林东方,姚宜斌,郑敦勇等.利用 TSVD 参数估值变化特性确定算法截断参数[J].测绘学报,2022,51(08):1787-1796.)
- [28] Shen Y Z, Xu P L, Li B F. Bias-corrected Regularized Solution to Inverse Ill-posed Models[J]. J Geod, 2012, 86(8):597-608.
- [29] Lin Dongfang, Zhu Jianjun, Fu Haiqiang, et al. Optimization of Regularization Parameter Based on Minimum MSE[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020,49(04):443-451. (林东方,朱建军,付海强等.均方误差意义下的正则化参数二次优化方法[J].测绘学报,2020,49(04):443-451.)
- [30] Zhang B, Fu H Q, ZHU J J. et al. Forest Height Estimation Using MultiBaseline Low-Frequency PolInSAR Data Affected by Temporal Decorrelation[J]. IEEE Geosci. Remote Sens. Lett., 2022, 19, 1-5.

#### 网络首发:

标题: 融合多基线观测信息的 PolInSAR 森林高反演正则化方法

作者: 林东方, 姚宜斌, 龙四春, 谢建

收稿日期: 2024-10-26

DOI:10.13203/j.whugis20240275

#### 引用格式:

林东方, 姚宜斌, 龙四春, 等. 融合多基线观测信息的 PolInSAR 森林高反演正则化方法[J].武汉大学学报(信息科学版), 2024, DOI:10.13203/J.whugis20240275 (LIN Dongfang, YAO Yibin, LONG Sichun, et al. The Regularization Method for Forest Height Inversion by Integrating Multi-Baseline PolInSAR Observation Information[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, DOI:10.13203/J.whugis20240275)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别, 请以正式出版文件为准!

#### 您感兴趣的其他相关论文:

基于 BDS-3 的陆地探测一号星间基线高精度解算方法

张宇, 赵齐乐, 蒋科材, 郭向, 李敏

武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(10): 1763-1769.

<http://ch.whu.edu.cn/article/doi/10.13203/j.whugis20240198>

**多系统单频紧组合 GNSS-R 测高方法**

邓晔, 周佩元, 杜兰, 蔡巍

武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(1): 146-155.

<http://ch.whu.edu.cn/article/doi/10.13203/j.whugis20220785>

**线性变化消光 S-RVoG 模型的多基线 PolInSAR 森林高度反演**

吴传军, 汪长城, 沈鹏, 朱建军, 付海强

武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(1): 149-156.

<http://ch.whu.edu.cn/article/doi/10.13203/j.whugis20190336>

