

森林碳储量估算的机载激光雷达参数优化

王永琪

北京超图骏科信息技术有限公司 北京

【摘要】森林碳储量估算对量化生态系统碳汇能力至关重要，机载激光雷达凭借高分辨率三维数据采集优势成为关键技术手段。机载激光雷达参数直接影响森林碳储量估算精度与效率，参数设置不当会导致数据冗余或信息缺失。通过系统分析激光雷达点云密度、扫描角度、飞行高度等核心参数与森林碳储量估算指标的关联，构建参数优化模型。优化后的参数组合显著提升估算准确性，为精准评估森林碳储量、制定林业碳汇政策提供技术支撑。

【关键词】森林碳储量；机载激光雷达；参数优化；点云数据；生态评估

【收稿日期】2025 年 5 月 16 日

【出刊日期】2025 年 6 月 20 日

【DOI】10.12208/j.sdr.20250074

Optimization of airborne lidar parameters for forest carbon stock estimation

Yongqi Wang

Beijing Chaotu Junke Information Technology Co., Ltd, Beijing

【Abstract】 Estimating forest carbon stocks is crucial for quantifying the carbon sequestration capacity of ecosystems. Airborne LiDAR (Light Detection and Ranging), with its advantage of high-resolution 3D data acquisition, has become a key technical means. The parameters of airborne LiDAR directly affect the accuracy and efficiency of forest carbon stock estimation. Improper parameter settings can lead to data redundancy or information loss. This study systematically analyzes the relationships between core parameters of LiDAR, such as point cloud density, scanning angle, and flight altitude, and forest carbon stock estimation indicators, and constructs a parameter optimization model. The optimized parameter combinations significantly improve the estimation accuracy, providing technical support for the precise assessment of forest carbon stocks and the formulation of forestry carbon sink policies.

【Keywords】 Forest carbon stock; Airborne LiDAR; Parameter optimization; Point cloud data; Ecological assessment

引言

全球气候变化背景下，森林作为陆地生态系统重要碳库，其碳储量准确估算关乎碳循环研究与碳中和目标实现。机载激光雷达可快速获取森林三维结构信息，是森林碳储量估算的有效工具。但激光雷达参数众多且相互关联，参数选择缺乏统一标准，导致估算结果存在偏差。如何优化机载激光雷达参数，提高森林碳储量估算精度与效率，成为亟待解决的问题。

1 参数影响分析

1.1 点云密度的双重效应

激光雷达点云密度犹如观察森林的“分辨

率”，其对碳储量估算的影响呈现显著的矛盾特性。当点云密度较低时，森林冠层内部复杂的枝叶结构、层间空隙等关键信息极易被忽略。林冠下层的幼树、附生植物等碳汇主体，可能因稀疏的点云数据无法被完整捕捉，导致碳储量估算结果出现系统性偏低。而在高密度点云的情况下，虽然能够近乎完整地记录森林的三维形态，但数据体量的几何级增长会使后续处理面临巨大挑战。不仅需要消耗大量的计算资源进行点云分类、滤波等预处理，存储成本也会随之飙升，极大增加了实际应用的经济门槛。

1.2 扫描角度的视角权衡

扫描角度是影响激光雷达数据质量的另一关键

维度。较大的扫描角度赋予了设备更广的视野，能够在单次飞行中覆盖更辽阔的区域，尤其适用于大面积森林的快速普查。随着入射角的增大，激光束与森林表面的交互方式发生改变，可能导致数据出现形变或缺失^[1]。在陡峭的山坡或密集的树冠层，大角度扫描会造成部分区域被遮挡，形成数据“盲区”。相反，较小的扫描角度虽然能保证激光束垂直或近垂直入射，获取高精度的点云数据，但扫描效率会显著下降，需要更多的飞行架次才能完成同等面积的探测，难以满足大规模作业的时效需求。

1.3 飞行高度的尺度博弈

飞行高度在激光雷达参数体系中扮演着“全局调控者”的角色，它与点云密度、覆盖范围、数据精度形成紧密的制约关系。当飞行高度提升时，激光束在地面的覆盖面积增大，单位时间内能够采集到更广阔区域的数据，但点云密度会相应降低，如同用长焦镜头拍摄森林，虽能纵览全局，却丢失了局部细节^[2]。这种情况下，高大乔木与低矮灌木的形态差异可能被模糊，影响碳储量的精准计算。反之，降低飞行高度可显著提升数据分辨率，连细小的树枝都能被清晰记录，但作业效率会因飞行器需频繁调整高度、避开障碍物而大打折扣，同时安全风险也随之增加，难以在复杂地形环境中持续作业。

2 优化问题提出

2.1 经验驱动模式的局限性

当前，激光雷达参数选择大多依赖技术人员的实践经验或反复试错，这种“经验主义”模式在科学性与通用性上存在先天缺陷。不同技术人员基于自身操作习惯和有限的实践案例，往往会选择差异显著的参数组合，导致数据采集的标准化程度低^[3]。而试错法虽能在特定场景下找到较优解，但面对多样化的森林生态系统，其效率与成本难以承受。在某次实验中，技术人员为寻找最佳参数组合，耗费了数十次飞行试验，不仅消耗大量人力物力，还因环境变化导致数据不可比，无法形成可推广的优化策略。

2.2 环境异质性带来的挑战

森林生态系统的复杂性远超预期，不同类型森林（如热带雨林、温带阔叶林、寒带针叶林）在垂直结构、物种组成和生物量分布上存在显著差异，同一组激光雷达参数难以适配所有场景^[4]。地形因素

进一步加剧了参数选择的难度：在山地林区，固定飞行高度可能导致山谷被遮挡、山脊过采，形成数据分布不均；而在异质性极高的次生林或人工混交林中，单一的点云密度和扫描角度无法同时满足高大乔木与低矮灌木的探测需求，致使部分区域的碳储量信息被低估或高估，严重影响估算结果的可信度。

2.3 精度与效率的矛盾困境

随着碳交易市场的兴起与生态保护需求的升级，对森林碳储量估算的精度与效率提出了双重要求。传统参数选择方法往往顾此失彼：若追求高精度，需采用高密度点云、小扫描角度和低空飞行，这会大幅降低作业效率；若强调效率优先，则可能牺牲数据质量，导致估算误差超出可接受范围。

3 优化方法构建

3.1 多因素耦合模型的建立

构建参数优化模型的核心在于深度整合森林生态系统的多元特征。在广袤的森林世界里，不同类型的森林（如四季常青的常绿林、随季节变换叶色的落叶林）有着独特的生态特性；地形地貌更是复杂多变，从陡峭的坡度、高低错落的海拔，到参差不齐的地表粗糙度，这些因素共同塑造了森林的外在形态。植被生理指标如叶面积指数、冠层高度模型，从微观层面揭示着森林的生命活动与结构特征。将这些要素纳入基础参数库，如同搭建起一个多维数据空间的框架，为后续分析提供丰富的信息维度。为了让模型更贴合实际场景，引入动态权重机制。在不同的森林环境中，各个环境因子对碳储量估算的影响程度并不相同。在地形起伏剧烈的区域，坡度和海拔的变化对森林结构与碳分布影响深远，此时赋予它们更高权重，使模型能够敏锐捕捉环境差异，自适应不同场景的需求。

3.2 机器学习算法的深度赋能

机器学习在挖掘参数与碳储量估算精度的非线性关系中扮演着不可或缺的关键角色。森林环境复杂多样，参数之间的关系并非简单的线性关联，而机器学习正是解开这一复杂谜题的钥匙。研究人员通过广泛收集海量的激光雷达数据与对应地面实测碳储量数据，精心构建训练数据集。在这个数据宝库中，隐藏着无数关于森林结构与碳储量的秘密。利用随机森林、支持向量机等强大的算法对数据进

行深入的特征提取与模式识别。这些算法仿佛拥有智慧的双眼，能够自动学习不同参数组合下点云数据与碳储量之间的潜在联系^[5]。在特定林分密度下，它们可以精准识别出某一扫描角度与飞行高度的组合最能真实反映森林结构，就像找到打开森林碳储量奥秘之门的钥匙。经过反复训练与交叉验证，模型变得更加智能、高效，能够针对任意输入的森林环境参数，快速输出最优激光雷达参数建议，极大地提升了参数优化的效率，让碳储量估算更加准确、快捷。

3.3 遗传算法的智能寻优策略

遗传算法巧妙模拟生物进化中的自然选择与基因重组过程，为激光雷达参数寻优提供了寻找全局最优解的有效途径。在参数优化过程中，将激光雷达的关键参数（如点云密度、扫描角度、飞行高度等）编码为“基因”，通过交叉、变异等操作，如同自然界中基因的传承与突变，生成多组不同的参数组合。每组组合都可看作一个“个体”，其适应度由估算精度、采集效率和成本构成的综合指标进行评估。在这场参数优化的“进化之旅”中，算法不断淘汰适应度低的个体，保留并强化优势参数组合。就像自然界中适者生存，经过多代进化，算法在复杂的参数空间中不断探索，最终在满足精度要求的前提下，找到效率与成本的最佳平衡点^[6]。这种动态寻优机制赋予参数优化强大的适应性，使它能够从容应对不断变化的森林环境，实现从依赖“静态经验”到基于“智能决策”的重大跨越，为森林碳储量估算带来全新的突破。

4 效果验证评估

4.1 多场景对比验证设计

为全面评估优化参数的有效性，设计覆盖不同生态区的对比实验。在实验中，选取热带雨林、温带山地森林、亚热带人工林等典型森林类型，以及平原、丘陵、高原等多样地形作为测试场景。每个场景分别采用优化后的参数组合与传统经验参数进行激光雷达数据采集，确保两种方案在相同时间、天气条件下执行，消除外部干扰因素。通过对比不同参数组合下的点云数据质量、碳储量估算结果，量化分析优化方案对数据采集与反演精度的提升效果。

4.2 地面实测数据的精度校验

地面实测数据是验证碳储量估算准确性的

“金标准”。在实验区域内，采用样地调查法，通过胸径测量、生物量方程计算等传统手段获取真实碳储量数据。将激光雷达估算结果与实测值进行逐点对比，计算均方根误差（RMSE）、平均绝对误差（MAE）等指标，评估优化参数对降低估算偏差的作用^[7]。在某温带森林实验中，优化参数下的估算结果与实测值的 RMSE 降低，表明优化后的参数能够更准确地捕捉森林碳储量的空间分布特征。

4.3 长期稳定性与泛化能力评估

除短期精度验证外，还需考察优化参数的长期稳定性与泛化能力。通过跟踪同一区域不同季节、年份的激光雷达数据，分析参数优化方案在植被物候变化、气象条件波动下的表现^[8]。将优化模型应用于未参与训练的新区域，检验其在不同森林生态系统中的适应性。结果显示，优化后的参数组合在不同时空尺度下均能保持较低的估算误差，证明该方法具备良好的稳定性与泛化能力，可作为森林碳储量精准估算的可靠技术支撑。

5 结语

机载激光雷达参数优化为森林碳储量精准估算提供了新途径。通过分析参数影响、构建优化方法并验证效果，显著提升了估算精度与效率。未来，随着传感器技术与算法的发展，将进一步探索多源数据融合下的参数优化策略，结合人工智能技术实现参数自适应调整，推动森林碳储量估算向智能化、高精度方向发展，为林业资源管理与全球碳循环研究提供更可靠的技术保障。

参考文献

- [1] 陈利斌.无人机载激光雷达测量技术在天星水库测图中的应用[J].经纬天地,2025,(01):72-75.
- [2] 郭江波.基于激光雷达扫描技术的余吾煤业开采沉陷参数反演[J].山西能源学院学报,2025,38(01):40-42.
- [3] 齐智宇,王健,赵艺龙,等.基于改进空间密度聚类的电力线自动提取[J].应用激光,2025,45(02):141-147.
- [4] 杨光能,党毅,周华,等.基于机载与手持激光雷达融合的马尾松参数提取及碳储量研究[J].西部林业科学,2024,53(06):132-139.
- [5] 邹文涛,曾伟生,孙乡楠.基于机载激光雷达数据估计主要森林参数联立模型[J].中南林业调查规划,2024,43(04):

- 32-38.
- [6] 王汝珏,张乾,邱凤.激光雷达反演森林冠层参数研究进展[J].环境科学研究,2025,38(01):181-189.
- [7] 张燕妮,张学霞,张建军,等.不同林分密度时激光雷达点云数据单木分割及参数提取[J].东北林业大学学报,2024,52(07):36-43.

- [8] 唐佳俊,汪刚,柴宗政.基于机载激光雷达点云数据的马尾松单木材积估测[J].林草资源研究,2023,(06):105-112.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS