# 无人机 LiDAR 在地形测绘中的精度影响因素研究

薛云庚

中山市水利水电勘测设计咨询有限公司　广东　中山　528400

**摘　要：**无人机 LiDAR 测绘技术凭借高效灵活、受天气制约小、数据密度高等优势，已经成为现阶段地形测绘工作的重要技术手段。本文从硬件检校优化、航飞方案精细化设计、复杂区域采集改进、内业数据处理优化等角度提出成套精度提升对策。研究结论能够有效规范无人机 LiDAR 地形测绘作业流程，减少系统性误差与人为误差，对提升复杂工况下地形测绘成果的准确性与稳定性具备实际工程参考价值。

**关键词：**无人机 LiDAR；地形测绘；精度影响；因素

## 引言

无人机 LiDAR 技术依托激光主动探测特性，能够穿透浅层植被，快速获取高密度、高精度的三维点云数据，在地形测绘、地貌监测、工程勘测等领域得到广泛应用。但在实际现场作业中，无人机 LiDAR 地形测绘的精度并非恒定不变。整套作业流程涵盖设备调试、外业航飞、环境适配、内业处理多个环节，任意环节出现管控缺失，都会造成地形数据出现偏差，影响最终成果质量。

## 1 无人机 LiDAR 地形测绘精度影响因素分析

### 1.1 系统硬件层面影响因素

（1）激光雷达传感器是获取地形点云数据的核心装置，传感器自身的硬件参数会直接决定激光测距的精准程度。传感器的测距精度、测距分辨率以及激光发射频率等核心指标，会直接影响单点数据的采集质量。激光光束存在固有发散特性，光束照射地面时会形成一定范围的照射区域。这种光斑扩散现象会导致地形特征点位置采集出现偏移[1]。传感器长期使用后会出现内部光学器件轻微损耗，器件老化会降低激光发射与接收的匹配度。设备未完成定期检校也会造成测距数值出现持续性偏差，最终让整体点云数据出现整体偏移和局部失真，影响地形起伏、高程点位的真实还原效果。（2）POS 定位定姿系统是无人机 LiDAR 测绘的辅助核心硬件，主要负责实时获取飞行平台的空间坐标和姿态角度数据。整套系统的测量误差会直接叠加在每一个激光采样点上。系统内置的卫星定位模块容易受到空间信号干扰，产生定位偏差。惯性测量单元在长时间飞行过程中会出现数据累积漂移。姿态角度的微小偏差会随着飞行距离增加不断放大，俯仰角、横滚角和航向角的细微偏移，都会改变激光扫描的投射角度。（3）无人机载机平台的运行稳定性同样会对测绘精度产生关键影响。载机的飞行姿态控制精度、机身震动幅度和飞行平稳程度，都会间接干扰激光雷达和 POS 系统的正常工作。飞行过程中产生的高频震动会带动传感器小幅抖动，造成激光采样点位无序偏移。飞行姿态的频繁波动会让扫描角度持续变化，破坏数据采集的均匀性。机身配重失衡和飞控参数适配不佳，也会加剧飞行晃动问题，造成局部区域点云稀疏、点位错乱，无法精准贴合真实地形形态，最终降低整体地形测绘成果的可靠性。

### 1.2 航飞作业设计层面影响因素

（1）飞行高度与飞行速度是航飞方案里面最基础的控制指标，飞行高度会改变激光光斑在地表的覆盖范围。高度提升之后单束激光对应的地面采样区域会随之扩大。单点定位的不确定程度也会同步上升，同时单位面积内获取的点云数量会出现下降。过低的飞行高度虽然能够提升点云密度。但是会压缩无人机的安全作业余量。地形起伏变化容易带来碰撞风险。飞行速度会影响激光点的采样间隔。速度持续加快会造成相邻采样点之间距离变大。地表微小地形特征会出现漏采。速度过低则会延长作业时长。设备长时间持续工作也会增大各类扰动累积的可能性。两项参数需要相互匹配，在保障作业安全的前提下维持稳定的数据采集质量。（2）航线重叠度设置直接影响条带之间点云数据的衔接效果，重叠分为航向重叠和旁向重叠两个部分[2]。合适的重叠量可以实现相邻航带点云的有效拼接。也能够为后续点云配准提供充足的同名特征。如果重叠度设置偏低。相邻航带之间会出现点云空白区域，拼接时缺少足够匹配点，会造成条带之间出现高程错位。过高的重叠度虽然可以

提升拼接稳定性。但是会增加总飞行里程，拉长作业周期。还会产生大量冗余点云，加大后续内业处理的数据压力。（3）扫描角度布设方案会改变激光束入射地表的角度，扫描角度偏离垂直方向越多，激光光束穿过空气的路径就越长。光斑变形的现象会更加明显。大倾斜角度扫描获取的点云更容易受到地表微小起伏的干扰。还会增大高程方向的误差。过小的扫描视场会缩小单次扫描覆盖宽度。增加航带布设数量。合理控制扫描角度范围，可以减少倾斜入射带来的点位偏差。保证大部分采样点接近垂直照射地表。以此提升地形点位高程信息采集的可靠程度。

1.3 外部环境条件影响因素

（1）地形地貌条件是影响测绘精度的基础环境要素，平缓地貌的地表结构单一，激光光束可以垂直完成有效入射与回波接收，数据采集的整体稳定性更高。起伏较大的复杂地形会改变激光的入射角度。坡面、沟壑以及陡坎位置容易出现激光遮挡和信号反射不均的问题，局部地形落差会造成部分区域采样点缺失，导致地形细节无法完整采集，不规则的地表结构还会让点云分布疏密不均，影响后续地形模型的拟合精度。（2）植被覆盖是干扰 LiDAR 地形测绘的主要环境因素，地表生长的各类植被会遮挡地面真实地形。激光光束穿透植被层的过程中会产生多层回波。大量点云数据会集中生成在植被冠层和枝叶位置，底层地面有效测点数量大幅减少，低矮植被密集覆盖的区域很难剥离植被干扰。地面高程信息容易被整体抬高，造成地形起伏失真，直接降低数字地形成果的精准度。（3）气象环境会在作业全程对激光传输造成扰动，空气湿度、气流扰动和能见度变化，都会影响激光信号的传播稳定性。雾气和浮尘会散射激光光束，削弱回波信号强度，造成点位测距偏差。飞行过程中的气流扰动会造成机身小幅晃动，间接引发扫描点位偏移。不良气象条件会持续降低点云采集的均匀度和准确度，增加原始数据的误差基数。

**2 提升无人机 LiDAR 地形测绘成果精度的对策**

2.1 硬件选型与设备检校优化措施

（1）在硬件选型工作中，需要结合常规地形测绘的作业需求匹配适配设备参数。激光雷达传感器需要优先选择测距稳定性强、光斑控制精度高的型号，设备的激光发射频率和测距分辨率需要满足精细化地形采集要求。可以有效弱化光束发散带来的点位偏移问题，同时需要关注传感器的抗损耗和抗干扰能力，降低长期作业过程中光学器件老化带来的数据偏差。POS 定位定姿设备需要具备高精度姿态解算能力，能够有效抑制飞行过程中的数据漂移问题[3]。保障无人机飞行全程的坐标参数和姿态角度数据真实准确，载机平台需要选用飞行稳定性强、减震性能优良的机型，机身结构的稳定性可以有效削弱飞行震动对传感器采集工作的干扰。（2）设备常态化检校是消除硬件误差的关键手段，所有测绘设备在投入作业前，必须完成全方位的整机性能校验工作。针对激光雷达传感器，需要定期校验测距精度和光束发射状态，及时修正光学器件偏移、信号接收异常等问题。避免长期使用产生的累积误差影响点云采集质量。针对 POS 系统，需要开展姿态参数校准和定位精度核验，修正惯性单元的数据漂移偏差，保证姿态数据与激光扫描数据能够精准匹配对应。（3）设备日常养护与作业前调试同样不可忽视，作业人员需要建立规范化的设备保养流程。及时清理传感器镜头灰尘和附着物，保证激光传输不受遮挡。飞行设备的减震结构、固定配件需要定期检查维护，维持设备最佳工作状态，每次航飞作业前，需要完成设备空载试运行，排查设备运行异常情况。通过规范化选型、常态化检校和精细化养护，能够最大程度消除硬件层面的本源误差，全面提升无人机 LiDAR 地测绘的数据采集精度。

2.2 航测航线方案优化策略

（1）作业开展前需要结合测绘区域整体地形特征，合理设定飞行高度与飞行速度。飞行高度的调整需要兼顾数据采集精度与现场作业安全，在地形起伏平缓的区域，可采用标准作业高度保障采集效率。在地形结构复杂的区域，应适当降低飞行高度。以此缩小激光光斑的地面覆盖范围，提升单点采样精度和整体点云密度，有效捕捉细微的地形变化特征。飞行速度需要保持匀速稳定的状态，避免飞行过程中出现忽快忽慢的情况，稳定的飞行节奏能够保证激光采样间距均匀分布，规避因速度波动产生的局部漏采、点云稀疏等问题。（2）需要根据现场作业条件精细化调整航线重叠度参数。航向重叠与旁向重叠的合理配比，能够保障相邻航带之间的点云数据无缝衔接[4]。充足的重叠区域可以提供丰富的匹配特征，提升点云拼接的贴合度，有效消除航带间的高程偏差和平面错位问题。面对简单地形可采用常规重叠参数保障作业效率，面对沟壑交错、地形破碎的区域，需要适度提升重叠比例。以此弥补复杂地形带来的点位遮挡缺陷，避免出现数据空白区域。（3）规范激光扫描角度的布设方式，同样是优化航线方案的重要内容。作业过程中需要尽量控制激光束垂直贴近地表入射。减少大角度倾斜扫描的作业范围，降低光束斜射产生的测距

误差和光斑变形问题。通过限制有效扫描视场，规避边缘扫描点位精度偏低的情况。同时统一全域扫描角度标准，保证整体点云数据精度统一。整体航测方案需要做到因地制宜动态调整，摒弃固定化参数模式，通过全方位的航线优化手段，系统性提升外业点云采集的规整度与精准度。

2.3 复杂地形植被区数据采集改进方法

（1）针对复杂地形区域，需要摒弃统一固定的飞行采集模式，采用动态适配的差异化作业方式开展数据采集工作。面对地形起伏幅度较大的区域，需要采用仿地飞行的作业模式，让无人机可以根据地表高低变化实时调整飞行高度。始终保持设备与地面的相对距离稳定均匀。这种方式可以有效规避固定高度飞行造成的局部点云稀疏问题，也能减少陡坡、沟壑等位置的激光遮挡死角，保证各类微地形结构都可以获取充足有效的采样点位。（2）针对植被覆盖区域的采集优化，需要充分利用激光的穿透性优势优化采集参数。适度提升激光发射频率，增加单位面积内的点云采样数量。高密度点云数据可以提升穿透植被层的概率，能够在枝叶间隙获取更多真实地面回波点位，弥补植被遮挡造成的地面数据缺失问题。同时适当提升航线重叠比例，通过多视角、多航带的重复采集，减少植被遮挡产生的数据盲区。多层扫描获取的点云数据，能够更加清晰区分植被表层点位与地面底层点位，为后续点云分类处理提供可靠的数据基础。（3）在整体采集流程中，需要强化特殊区域的作业管控力度。作业人员需要提前识别全域植被分布和地形复杂区域，对重点难点区域单独制定采集方案，杜绝统一参数作业带来的数据缺陷。通过地形适配飞行模式优化和植被区高密度采样改进，可以从源头改善复杂区域原始点云质量。最大程度降低地形遮挡和植被覆盖带来的测绘误差，实现复杂工况下地形测绘精度的稳步提升。

2.4 点云处理与地面点提取优化手段

（1）原始点云需要先开展系统性去噪处理，噪声点主要来自空中杂散回波和设备采集扰动。作业人员要区分不同类型噪点，选用适配的滤波方式剔除异常高点与孤立低点。去噪过程不能采用固定参数批量处理，过度滤波会误删地形突变位置的有效点位，造成地形细节丢失。保留合理的边界点位，是维持地形结构完整性的基础。（2）地面点提取是整套内业处理流程的核心步骤，不同算法对植被覆盖区域和破碎地形的适配能力存在明显差异。单一算法很难兼顾各类地形场景，可以结合多种分类方法完成地面点筛选。依靠算法初步分类之后，再辅以人工交互检查修正[5]。重点核查陡坡、沟壑等地形变化剧烈的区域，剔除残留的植被点，保留真实地面采样点。（3）地面点提取完成后，需要规范数字地形模型构建流程。根据点云密度合理设置网格生成参数，网格尺寸过大，会平滑掉微小地形起伏；网格尺寸过小，容易放大残余噪声带来的波动。生成成果之后，选取校验点位开展精度核验。对比提取高程与实际观测数值，评估成果偏差情况。针对偏差超标的区域，重新返回点云数据复核分类结果。

**结束语**

综上所述，无人机 LiDAR 地形测绘精度的控制需要依托全流程精细化管理。设备硬件决定数据采集的基础精度，航飞设计直接决定点云分布质量，环境条件是不可忽视的误差诱因，内业处理则决定最终地形成果的还原度。只有多环节协同优化，才能最大限度降低系统误差与偶然误差。

**参考文献**

[1] 吴扬扬. 基于无人机地形测绘精度多因素影响研究 [J]. 防灾减灾学报,2026,42(2):27-33.

[2] 钟小菁, 陈沈良, 李鹏, 等. 无人机载 LiDAR 及摄影测量技术在沙滩地形监测中的应用研究 [J]. 海洋工程,2026,44(1):209-222.

[3] 王洪娟. 无人机航测技术在地形测绘中的精度控制研究 [J]. 中文科技期刊数据库（引文版）工程技术,2026,(4):054-057.

[4] 倪又隆. 无人机载 LiDAR 系统在城乡规划测绘中的应用及精度分析 [J]. 科技创新与应用,2026,16(17):176-178+182.

[5] 高维寅. 无人机倾斜摄影技术在复杂地形测绘中的精度优化方法探索 [J]. 智能建筑与智慧城市,2026,(6):43-45.