

# 机载LiDAR在库岸地形测绘中的应用研究

刘 明, 谈 语\*, 彭 炜

长江水利委员会水文局长江上游水文水资源勘测局, 重庆

收稿日期: 2024年12月8日; 录用日期: 2025年1月1日; 发布日期: 2025年1月9日

## 摘要

金沙江下游水库具有地形陡峭、植被茂密等特点。针对库岸传统测量方式作业难度大、风险源多、效率低下; 航空摄影测量受天气影响大、植被覆盖区域无法获取地面信息等难题, 提出应用机载LiDAR获取库岸三维地形信息的方案。机载LiDAR具有非接触性测量、全天候作业、较强的植被穿透性等优点, 可以很好解决以往库岸地形测绘方式的不足。通过检验点定量分析高程较差表明: 总体中误差为 $\pm 0.12$  m, 不同地物属性的中误差平均值为 $\pm 0.12$  m, 点云精度满足相关测量规范要求, 适用于金沙江下游大比例尺库岸地形测绘项目。

## 关键词

地形测绘, 机载LiDAR, 点云, 中误差

# Study on the Application of Airborne LiDAR in Topographic Mapping of Reservoir Bank

Ming Liu, Yu Tan\*, Bin Peng

Upper Changjiang River Bureau of Hydrological and Water Resources Survey, Hydrology Bureau of Changjiang Water Resources Commission, Chongqing

Received: Dec. 8<sup>th</sup>, 2024; accepted: Jan. 1<sup>st</sup>, 2025; published: Jan. 9<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

The reservoir in the lower reaches of Jinsha River is characterized by steep terrain and dense vegetation. The traditional measurement method of reservoir bank is difficult to operate, and has many risk sources and low efficiency. Aerial photogrammetry suffers from weather impacts and inability to acquire ground information in areas with heavy vegetation cover. To address these issues, a proposal has been made to use airborne LiDAR for acquiring three-dimensional terrain information of the

\*通讯作者。

reservoir bank. Airborne LiDAR has the advantages of non-contact measurement, all-weather operation, strong vegetation penetration, etc., which can solve the shortcomings of the previous methods for topographic mapping of reservoir bank. Through the quantitative analysis of the elevation difference of the test points, it is shown that the overall median error is  $\pm 0.12$  m, and the average median error of different ground features is  $\pm 0.12$  m. The accuracy of the point cloud meets the requirements of the relevant measurement standards, and is suitable for the Large-scale topographic mapping project of the reservoir bank in the lower reaches of the Jinsha River.

## Keywords

Topographic Mapping, Airborne LiDAR, Point Cloud, Median Error

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

## 1. 引言

库岸地形作为水电站运营和管理的关键基础资料，其准确性和时效性对于确保水库的安全和效率至关重要。金沙江下游水库属于典型的高山峡谷地貌，传统测量方法往往受限于恶劣的自然环境、交通不便以及植被覆盖茂密等因素，导致作业难度大、风险高且效率低下，给库岸地形测绘带来了极大的挑战。

近年来，遥感技术飞速发展。机载 LiDAR (Light Detection and Ranging)技术因其高精度、非接触测量和全天候作业等显著优点，逐渐在地形测绘领域崭露头角[1]。机载 LiDAR 技术基于激光测距原理，能够有效穿透植被冠层，直接获取地表的高精度三维信息，为复杂地形条件下的地形测绘提供了全新的解决方案。

在环境监测领域，机载 LiDAR 技术已被广泛应用于森林结构参数提取、地表覆盖类型识别以及地形地貌特征分析等方面[2] [3]。其高精度和高效率的特性使得大范围、高精度的环境监测成为可能。在智能城市建设中，机载 LiDAR 技术为城市三维建模、规划设计和城市管理提供了重要的数据支持，推动了城市的数字化和智能化进程[4] [5]。此外，在灾害管理方面，机载 LiDAR 技术也展现出了巨大的潜力。通过快速获取灾区的高精度地形数据，机载 LiDAR 技术为灾害评估、应急救援和灾后重建提供了有力的信息支撑[6]-[8]。

因此，本文针对金沙江下游复杂地形，旨在探讨机载 LiDAR 技术在金沙江下游库岸地形测绘中的适用性，以期为该类复杂地形条件下的三维空间信息快速获取提供方案参考。

## 2. 机载 LiDAR 技术

机载 LiDAR 技术是一种通过飞行器搭载激光雷达设备，快速、精确地获取地表三维数据的主动遥感技术。该技术通过发射和接收激光脉冲，结合全球导航卫星系统(GNSS)和惯性测量单元(IMU)的数据，能够实现高精度的三维地形测绘。

激光扫描仪是机载 LiDAR 的核心部件，它通过发射脉冲激光并接收反射信号来测量目标距离。激光脉冲从飞行器发射，经过大气传输到达地面，地表反射激光脉冲后返回接收器。通过测量激光脉冲的往返时间，可以计算出飞行器到地表的距离。具体计算公式为：

$$d = \frac{c \cdot t}{2} \quad (1)$$

式中， $d$  是距离， $c$  是光速， $t$  是激光脉冲的往返时间。

为了确保测距结果的高精度, 机载 LiDAR 还集成了 GNSS 和 IMU。GNSS 接收器接收来自多个卫星的信号, 确定飞行器的精确位置。IMU 测量飞行器的线性加速度和角速度, 获取飞行器的姿态信息(如俯仰、滚转和偏航)。这些数据通过数学模型融合, 可以精确计算出每个激光脉冲所对应地表点的三维坐标。

### 3. 点云滤波

机载 LiDAR 点云滤波是处理 LiDAR 数据的重要步骤之一[9]，其目的是从原始点云数据中提取出地面点，过滤掉植被、建筑物等非地面目标。滤波后的地面点可以用于生成高精度的数字高程模型(DEM)，以及进行地形分析和建模。

渐进三角网滤波算法(Progressive TIN Densification Filter)是用于从 LiDAR 点云数据中提取地面点的一种经典方法[10]。该算法基本原理是将点云区域划分成  $n_{Row}$  行,  $n_{Column}$  列, 如下式:

$$n_{Row} = \text{ceil}\left(\frac{h}{m}\right) \text{ and } n_{Column} = \text{ceil}\left(\frac{w}{m}\right) \quad (2)$$

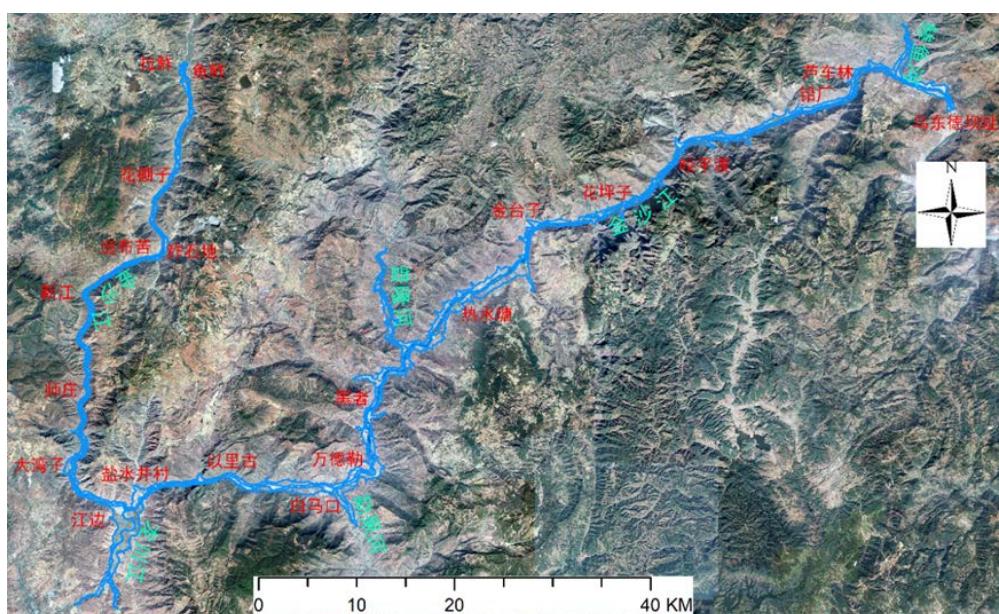
式中,  $m$  为最大建筑尺寸,  $h$  和  $w$  是点云区域的长度和宽度。

将每个格网内的低点作为已知的地面点开始，逐步构建一个三角网，并根据一定的规则将新点纳入三角网中，同时判断这些点是否属于地面点。

#### 4. 实验与分析

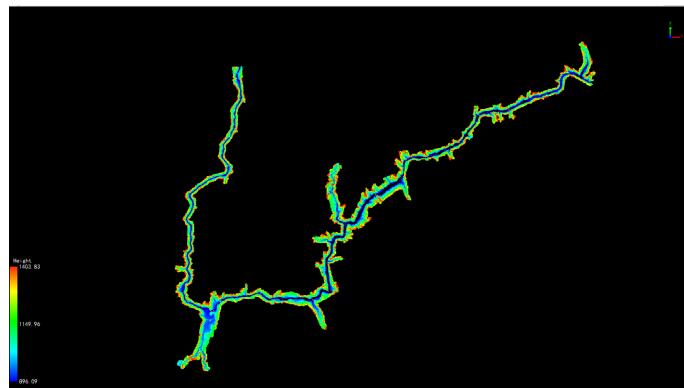
#### 4.1. 实验区概况

本文于昆明市乌东德镇开展机载 LiDAR 库岸地形测绘应用研究。该实验区属于典型的高山峡谷水库, 库岸地形复杂破碎, 传统测量方式作业难度大、风险源多。测区内包含居民区、植被林地、河滩、石地等地貌类型, 能有效验证机载 LiDAR 技术在复杂环境下的适用性。飞行范围如图 1 所示: 乌东德~拉鲊干流河段长 163.9 km, 主要支流龙川江 13.6 km, 勐果河 2.8 km, 普隆河 12.4 km, 鲣鱼河 6.0 km。施测河段全长约 193.7 km, 共采集陆上地形约 72 km<sup>2</sup>。机载 LiDAR 点云如图 2 所示。



**Figure 1.** Study areas of airborne LiDAR

Figure 1. Study areas of all



**Figure 2.** Point clouds of airborne LiDAR  
**图 2.** 机载 LiDAR 点云

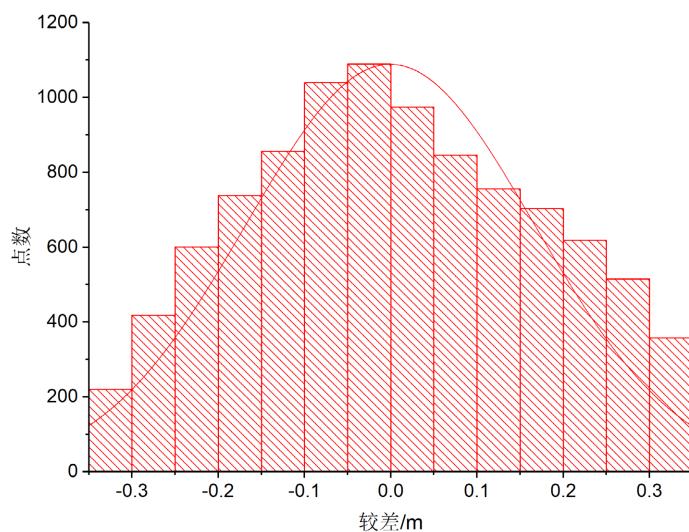
#### 4.2. 精度分析

为了验证机载 LiDAR 点云的精度, 本文使用全站仪、RTK 在实验区内采集了树林地、草地、建筑区、石地等多种地物作为检验点, 通过提取检验点中心的最近邻点云进行高程中误差分析, 如下式:

$$H_{RMS} = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_i - \hat{H}_i)^2}{2n}} \quad (3)$$

式中,  $H_{RMS}$  为中误差;  $\hat{H}_i$  为检验点高程;  $H_i$  为点云高程;  $n$  检验点总数。

误差分析如图 3 所示, 检验点与点云的高程较差呈高斯分布, 且主要集中在-0.3 m~0.3 m 之间。分析结果表明: 测量值与检验值的较差对称分布, 均值  $\mu$  趋近 0, 正负误差基本相互抵消, 系统误差较小, 测量结果具有较高的准确性。精度统计如表 1 所示, 总体高程较差中误差为  $\pm 0.12$  m, 此外, 不同地表类型(如草地、耕地、建筑区、裸露地表、树林地)的中误差均值为  $\pm 0.12$  m, 说明 LiDAR 技术在不同地表类型下的测量精度具有较好的一致性和较强的鲁棒性。满足《水利水电工程测量规范(SL197-2013)》中 1:500 比例尺地形图, 规定高程注记点中误差小于  $\pm 0.33$  m 的要求。



**Figure 3.** Distribution of elevation difference between test points and adjacent point clouds  
**图 3.** 检验点与邻近点云高程较差分布图

**Table 1.** Statistical table of mean square error of elevation difference between test points and adjacent point clouds  
**表 1. 检验点与邻近点云高程较差中误差统计表**

类型	点数	中误差/m
草地	3077	$\pm 0.12$
耕地	1908	$\pm 0.11$
建筑区	259	$\pm 0.12$
裸露地表	1865	$\pm 0.11$
树林地	2623	$\pm 0.12$
平均		$\pm 0.12$
总体		$\pm 0.12$

## 5. 结论

本文针对金沙江下游水库地形破碎复杂、植被茂密、交通不便等问题，基于机载 LiDAR 技术开展了机载 LiDAR 库岸地形测绘应用研究，得到结论如下：

(1) 本文通过实验验证，机载 LiDAR 点云在不同地表类型下的高程较差中误差达到了  $\pm 0.12$  m，符合《水利水电工程测量规范(SL197-2013)》中 1:500 比例尺地形图高程注记点中误差小于  $\pm 0.33$  m 的要求。机载 LiDAR 技术在复杂地形下的测量精度和鲁棒性均能满足实际应用需求。

(2) 机载 LiDAR 技术具有高度自动化和全天候作业的特点。本文仅用时 5 天就完成了约  $72 \text{ km}^2$  陆上地形数据的采集。与传统测量方法相比，其显著提高了作业效率，大幅降低了作业成本。

(3) 机载 LiDAR 技术属于非接触主动遥感技术，能够在不接触地面的情况下获取地表信息，有效降低了野外作业的风险。特别是在金沙江下游地形复杂、植被茂密、通视条件差的高山峡谷水库中，表现出良好的安全性。

(4) 机载 LiDAR 点云数据具有全覆盖、高密度和三维可视化表达的特点，能够为数字高程模型(DEM)、数字线划图(DLG)、地形断面图等的制作提供丰富的数据支持。这些数据在数字孪生流域建设中具有重要作用，能够为水库的健康运营和管理提供科学依据。

机载 LiDAR 技术在复杂地形和环境条件下的陆上地形测绘中表现出色，不仅提高了作业效率和精度，还增强了作业安全性，并且能产生丰富的数字产品，为库岸地形测绘提供了有效的解决方案。未来，随着技术的进一步发展和应用领域的拓展，机载 LiDAR 技术将在更多领域展现出更大的价值。

## 基金项目

长江水利委员会水文局科研项目(SWJ-24CJX18)。

## 参考文献

- [1] 张永军, 熊小东, 沈翔. 城区机载 LiDAR 数据与航空影像的自动配准[J]. 遥感学报, 2012, 16(3): 579-595.
- [2] 于彩霞, 王家耀, 许军, 等. 海岸线提取技术研究进展[J]. 测绘科学技术学报, 2014(3): 305-309.
- [3] 周建红, 马耀昌, 刘世振, 等. 水陆地形三维一体化测量系统关键技术研究[J]. 人民长江, 2017, 48(24): 61-65.
- [4] 王丽英, 吴际, 有泽, 等. 多维 GMM 与邻域约束的多光谱机载 LiDAR 数据城市地物分类[J]. 测绘学报, 2023, 52(3): 419-431.
- [5] 蒋晶珏, 张祖勋, 明英. 复杂城市环境的机载 Lidar 点云滤波[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2008, 32(5): 402-405.
- [6] 武继峰, 武晴晴, 张凯南. 低空摄影测量与机载 LiDAR 技术融合的交通干线地质灾害快速应急研究[J]. 测绘通

- 报, 2015(S1): 202-205.
- [7] 贾虎军, 王立娟, 范冬丽. 无人机载 LiDAR 和倾斜摄影技术在地质灾害隐患早期识别中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 32(2): 60-65.
  - [8] 杨帆, 任闯, 曲丹, 等. 机载 LiDAR 技术在矿区地表沉陷灾害监测中的应用[J]. 测绘工程, 2023, 32(4): 59-68.
  - [9] Masaharu, H. and Ohtsubo, K. (2002) A Filtering Method of Airborne Laser Scanner Data for Complex Terrain. *ISPRS Technical Commission III Symposium 2002*, Australia, 3-13 September 2002.
  - [10] Axelsson, P. (2000) DEM Generation from Laser Scanner Data Using Adaptive TIN Models. *International Archives of Photogrammetry & Remote Sensing*, 33, 111-118.