

机载 LiDAR 面状摄区航带设计问题探讨

王宏宇 梁珂 李敏

自然资源部第一大地测量队 陕西 西安 710054

【摘要】：机载 LiDAR 是现在国际主流遥感技术之一，其可大面积高分辨率地快速获取被摄对象表面的三维点云数据，目前已广泛应用于基础测绘、城市三维建模和林业应用、铁路、电力等。机载 LiDAR 航带设计的科学性和合理性直接影响航飞数据的质量和作业效率，因此如何进行合理的航带分区和参数设计至关重要，本文重点探讨了面状区域航带设计的分区和参数设计问题。

【关键词】：机载 LiDAR；航带设计

1 概述

机载 LiDAR (Airborne Light Detection And Ranging) 是一种集激光测距、差分 GPS 系统、惯性导航系统 (INS) 和数字航空摄影等多种尖端技术于一身的主动式遥感空间测量系统。其通过高速激光扫描测量的方法，大面积高分辨率地快速获取被测对象表面的三维点云数据，可以快速、精确、大量的采集地表三维数据信息。与传统的测量方法相比，机载 LiDAR 技术具有高效、高精度、自动化、低成本、信息丰富的特点，因而它已成为各种测量应用中深受欢迎的一项高新技术。

在机载 LiDAR 点云数据获取阶段，飞行一般受到天气、空域等诸多条件限制，在飞行前期设计阶段，航带设计的科学性和合理性直接影响航飞数据的质量和作业效率，甚至在复杂摄区进行航飞设计时，由于参数设置不当，导致 LiDAR 硬件无法正常获取数据，例如激光能量达不到导致无回波现象，或数据质量出现点间距过大、点密度不足、点云精度超限等问题。国内航摄公司技术人员在做航飞设计时，往往基于系统软件加载的 DTM 数据进行自动生成航线，缺乏对摄区地形的综合研判，摄区内是否涉及军事禁区，摄区最高点高程是否满足安全航高，航带重叠度是否满足航摄要求保证无点云漏洞，脉冲模式、激光扫描角、扫描频率以及扫描方式是否选择正确，基站布设方案是否满足要求且可执行，单条航线是否过长导致 IMU 误差累计。如果这些因素不能统筹考虑往往会给航摄带来诸多安全隐患，无法正常获取数据或数据质量不合格的情况在国内航摄项目中不乏少数。除此之外，国内航摄公司在做飞行设计的时候分区和参数设计不够科学合理，往往设计出很多冗余航线，大大增加了飞行成本，因此，合理的航带分区和航线设计至关重要。

国内航摄项目鳞次栉比，相关研究往往基于航摄规范进行综合性论述，针对航飞设计的系统性研究和归纳总结相对较少，航飞设计需要综合摄区形状、高差、有无军事禁飞区、设备性能、参数设置、检校场设计、基站布设等因素进行综

合研判，在航摄作业中，通常条带状摄区的航飞设计相对较为容易，航线方向在满足重叠度、点密度等条件后依条带摄区方向敷设即可，绝大多数摄区均为面状摄区。本文重点对面状高差起伏较大摄区的航带设计方案进行了对比分析，并对航飞设计相关问题进行探讨。

2 激光器参数设置

航线设计阶段一般首先要考虑是否需要分区，在小区域地形高差起伏不大的区域可以考虑直接进行航线设计。在大区域或地形高差起伏较大区域需进行分区设计，具体分析摄区面积、形状、地形高差等基本情况，同时考虑摄区基准面高程、最低点高程、最高点高程、激光点云重叠度、点云密度、航高、基站布设等诸多因素。

2.1 基准面高程

基准面高程 $H_{基}$ 主要用于航摄分区和航线设计参考，一般由摄区最低点平均值 $\bar{H}_{低}$ 和最高点平均值 $\bar{H}_{高}$ 计算，即

$$H_{基} = (\bar{H}_{低} + \bar{H}_{高}) / 2$$

2.2 扫描带宽

扫描带宽是三维激光扫描系统根据脉冲频率、激光扫描角设置和航高设定等参数设计后点云数据的航带宽度，假设 θ 为扫描角， H 为航高，则扫描带宽由下式计算

$$S_w = 2H \tan(\theta / 2)$$

2.3 点云密度

航带扫描点云密度 L_N 由脉冲发射频率 F 和扫描频率 f 决定，即

$$L_N = \frac{F}{f}$$

2.4 航向点云间距

航向点云间距 D_d 指扫描点云航带沿航摄仪前进方向的点云间距，该参数与飞行速度、扫描频率和扫描方式有关。

2.5 旁向点云间距

航向点云间距 D_c 指扫描点云航带垂直航摄影前进方向的点云间距, 旁向点云间距和扫描角、飞行高度、扫描频率、扫描方式以及脉冲发射频率有关。

在航带设计时需综合考虑合理设置参数, 在满足点密度的前提下, 避免点云数据不均匀。

3 面状摄区实例分析

面状摄区选择位于中国浙江省沿海中部, 陆地面积 9411 平方千米, 此试验区比较典型为中间有几处海拔较高的山峰, 局部区域高差较大, 如选择较高的相对航高, 则在平地区域的点密度较稀疏, 影像分辨率较低, 选择较低的航高, 山区部分需要另外分区, 因此需要划分最合适的分区和布设最经济的航线。摄区范围如图 1 所示, 红色范围线内区域为航摄有效范围:



图 1 台州市航摄范围图

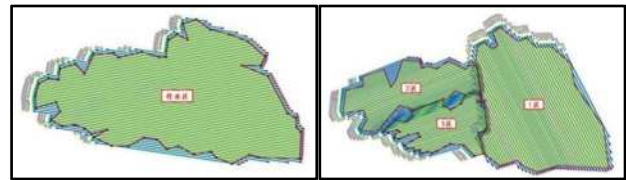
航线涉及采用与 DEM 相结合的方式, 保证点云无漏洞; 航线旁向点云重叠度原则上要求不小于 30%, 遇到高差特别大的区域, 最小不小于 18%; 航摄范围内要求平均点密度达每平方米 5-6 个点; 影像地面分辨率优于 15cm。

针对该区域设计四种不同的飞行方案, 在飞行航速一定的情况下, 各方案均考虑具体分区情况, 并根据点云密度、影像分辨率以及地形高程起伏设计航高、激光扫描角, 并选择脉冲模式。其中方案一按照整个区域进行航线设计, 其他三个方案分区进行航线设计, 其详细飞行设计参数详见表 1, 各方案航线分布见图 2:

表 1 四种飞行方案设计参数对比表

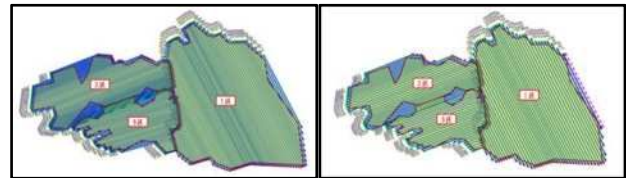
| 方案编号 | 是否分区 | 设计航高 (m) | 航速 (Km/h) | 激光扫描角 (°) | 脉冲类型 |
|------|------|----------------|-----------|-----------|------|
| a | 否 | 1600 | 220 | 35 | 多脉冲 |
| b | 是 | 1600、1600、1500 | 220 | 35、35、35 | 多脉冲 |
| c | 是 | 1050、1150、1100 | 220 | 40、35、36 | 单脉冲 |

| | | | | | |
|---|---|----------------|-----|----------|-----|
| d | 是 | 1520、1500、1500 | 220 | 40、40、40 | 多脉冲 |
|---|---|----------------|-----|----------|-----|



a

b



c

d

图 2 各方案摄区航线分布图

四种方案航线均采用最优设计, 即航线方向根据摄区形状及地形起伏等因素进行设计, 以期达到总航线数最少的目的, 减少转弯调头从而节约时间。根据四种设计方案, 其实际飞行参数及数据成果参数详见表 2:

表 2 各方案数据成果参数

| 方案编号 | 影像地面分辨率 (cm) | 平均点密度 (s/m ²) | 航线数 (条) | 航线总长度 (km) |
|------|--------------|---------------------------|---------|------------|
| 一 | 18 | 5.5 | 71 | 2804.7 |
| 二 | 13~18 | 5.5 | 110 | 2674.0 |
| 三 | 6~13 | 5.4、5.3、5.6 | 168 | 3936.6 |
| 四 | 6~13 | 5.4、5.3、5.6 | 101 | 2387.8 |

从表 2 中可以明显看出, 方案一的航线数最少, 但其影像地面分辨率低于 15cm, 不满足要求; 方案三的航线数最多, 航程最长, 虽然能满足要求技术要求, 而使用单脉冲获取的数据精度也最好的, 但是没有发挥仪器的多脉冲优势, 加大了数据获取的成本费用; 方案四的航线总长度最短, 方案二次之。综上所述, 方案四在与方案二在基本相同的航高下, 加大 5° 扫描角度可以减少工作量, 达到较优的飞行方案。

4 结束语

制定飞行方案时, 在满足成果需求的同时, 设计航线时尽量减少航线数, 减少飞机转弯调头的次数, 从而节省飞行时间。但在实际的航摄飞行过程中, 随着单条航线飞行时间的增长, IMU 容易受累计误差的影响 (其短时精度较高, 长时间精度会衰减), 通常要求单条航线飞行时间尽量不要超过 30 分钟。同时考虑基站 GNSS 信号差分, 公共卫星较少也会

影响点云精度,因此,地面基站距航线最远端一般不得超过50km。在实际航空摄影过程中往往受到航空管制等因素制约,因此合理分区灵活作业也是飞行方案制作过程中一个重要考量的因素。

本文通过对激光雷达航带设计中不同的参数设置进行了对比分析,通过对实际航摄项目面状区域航线设计的不

方案进行对比,对如何优化航带设计进行了全面系统的阐述,对实际航摄作业具有一定的参考价值。实际航摄作业中,在满足航摄要求的前提下,应考虑摄区形状、面积、高差、基站布设等因素进行分区,同时综合考虑飞行航高、航速、激光扫描角、激光扫描频率、脉冲模式等因素,优化设计使飞行成本最低、点云精度最高。

参考文献:

- [1] 赖旭东. 机载激光雷达基础原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- [2] GB19294-2003 航空摄影技术设计规范[S].
- [3] 王东亮, 万幼川. 基于 DEM 的机载 LiDAR 航线设计[J]. 测绘科学, 2011, 36(1): 117-118.
- [4] 王丽英. 机载 LiDAR 数据误差理论与方法[M]. 北京: 测绘出版社, 2013: 7-12.
- [5] 缪志修, 黄华平. 机载 LiDAR 航带设计问题探讨[J]. 铁道勘察, 2012.

作者简介: 王宏宇, 工程师, 大地测量学与测量工程专业硕士研究生, 主要从事机载 LiDAR 和 InSAR 地表形变监测的科研和生产工作。