
第 3 章

激光雷达数据获取

激光雷达数据获取是数据处理与应用的前提和基础。本章详细介绍不同平台下(星/机/地)激光雷达数据的获取。第 3.1 节介绍机载激光雷达数据获取的各个阶段,包括航飞计划准备、航飞实施和数据预处理;第 3.2 节介绍地基激光雷达数据获取,包括扫描前工作准备、扫描实施和扫描数据整理;第 3.3 节介绍国内外多个星载激光雷达系统的搭载平台、系统参数、数据产品以及下载方式。

3.1 机载激光雷达数据获取

搭载在飞机平台的激光雷达扫描系统统称为机载激光雷达(LiDAR)系统或机载激光扫描系统,是一种集成了多种高新技术的主动式数据获取技术(赖旭东, 2010)。目前,主要飞行平台有轻小型无人机和可长距离数据获取的有人机。机载 LiDAR 数据获取流程通常包括计划准备、航飞实施和数据预处理(张小红, 2007)。计划准备阶段是执行飞行任务前的准备工作,主要包括项目分析、航飞方案设计和飞行准备三个步骤。航飞实施阶段是按计划执行航飞任务,包括设备安装和调试、基站架设及地面配合、飞行操作及数据采集等。数据预处理阶段是通过点云坐标解算、IMU 安置角误差检校、航带平差、辐射校正、质量控制等处理,得到高精度机载激光点云数据。机载 LiDAR 系统数据获取的总体作业流程如图 3.1 所示。

3.1.1 计划准备阶段

机载 LiDAR 数据获取是一项复杂的工作,涉及空域申请、飞机租赁或购买、设备选型与装机等诸多具体问题,因此在计划准备阶段需要提前制定有效方案,主要包括三个步骤:项目分析、航飞方案设计和飞行准备。

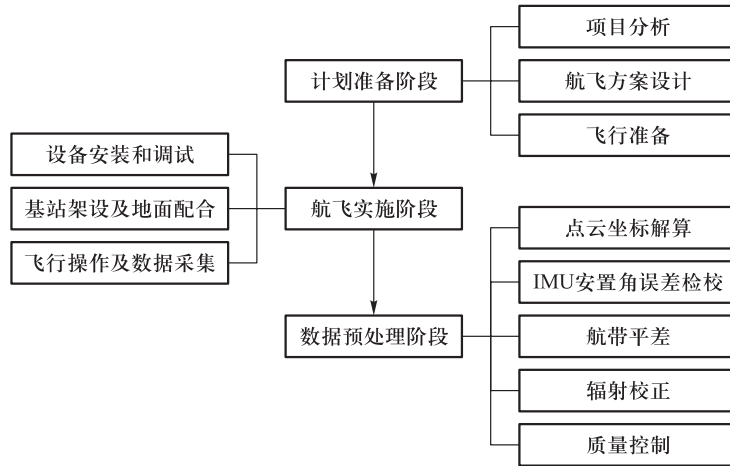


图 3.1 机载 LiDAR 数据获取作业流程

1) 项目分析

首先对测区的地形地貌特征、气候特征、空域特点等进行全面了解,如测区地理位置、经纬度范围、地形地貌、所属气候带、太阳辐射情况、气温、降水,以及测区所属战区、主要地物类型及周边机场的分布情况等。

除了考虑测区状况,还应进行项目任务分析,包括任务内容、目标、范围、工作量及期限,任务的重点、难点,任务各阶段的进度安排等。需要综合考虑测区和任务情况,合理制定项目进度安排。表 3.1 为机载 LiDAR 数据获取项目的进度安排示例。

表 3.1 机载 LiDAR 数据获取项目设计及进度安排

工序	内容	时间计划
准备阶段	资料收集、测区踏勘	×年×月×日—×年×月×日
空域申请	准备申请材料、申请空域	×年×月×日—×年×月×日
第一批数据航测及提交	空域协调、获取数据、数据预处理、数据检查	×年×月×日—×年×月×日
其余数据航测	空域协调、获取数据、数据预处理、数据检查	×年×月×日—×年×月×日
所有成果质量检查	成果检验	×年×月×日—×年×月×日
所有成果提交	成果提交	×年×月×日—×年×月×日

2) 航飞方案设计

航飞方案设计应本着安全、经济、周密、高效的原则,按照项目要求和测区实际情况,结合机载 LiDAR 设备特点选择合适的航测参数,进而开展飞行作业。方案设计包括地面基站布设、测区航线设计、检校场布设与测量、补飞或重飞,具体技术路线如图 3.2 所示。

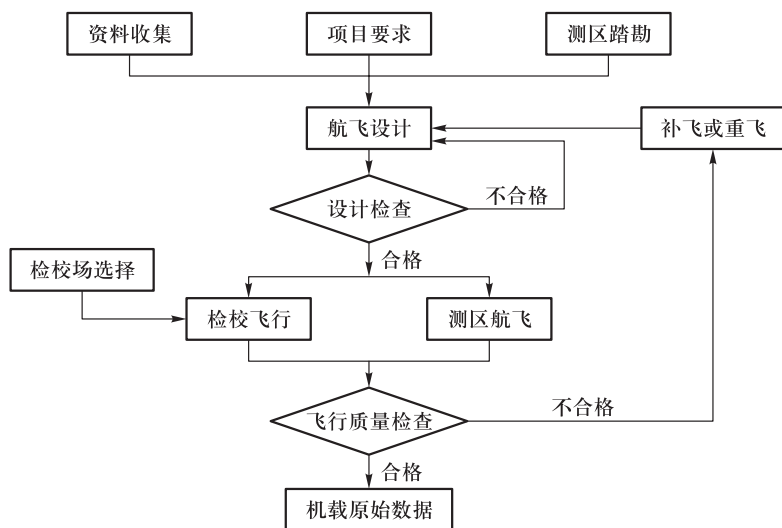


图 3.2 机载 LiDAR 航飞设计技术路线

(1) 地面基站布设。地面基站布设主要考虑基站的架设位置和覆盖范围,一般架设于任务方提供的已知点上,要求位于空旷无遮挡处且远离水域和高压线,还应考虑基站的覆盖范围。近年来,一些位置服务提供商提供了不需要架设基站的云端轨迹解算服务,例如,千寻云迹(FindTrace)服务,用户提供卫星信号接收设备的 GNSS 原始观测数据,即可生成与之匹配的虚拟基站数据,用于轨迹解算。此项服务在无人机 LiDAR 飞行中使用较多,可以不用自架基站。

(2) 测区航线设计。测区航线设计可参考机载 LiDAR 数据获取技术标准与规范,包括《机载激光雷达数据获取技术规范》(CH/T 8024—2011)、《机载激光雷达数据处理技术规范》(CH/T 8023—2011)、《IMU/GPS 辅助航空摄影技术规范》(GB/T 27919—2011)、《全球定位系统(GPS)测量规范》(GB/T 18314—2009)、《1:500、1:1000、1:2000地形图航空摄影测量数字化测图规范》(GB/T 15967—2008),以及经甲方审核批准的项目专业技术设计书和其他相关技术要求。根据相关规范要求,激光雷达航线旁向重叠度应达到 20%,最少为 13%;针对不同比例尺成果,相应的点云密度要求如表 3.2 所示。

表 3.2 机载激光雷达点密度指标

分幅比例尺	数字高程模型成果格网间距/m	点云密度/(个/m ²)*
1:500	0.5	≥16
1:1000	1.0	≥4
1:2000	2.0	≥1
1:5000	2.5	≥1
1:10000	5.0	≥0.25

* 表示按不大于 1/2 数字高程模型成果格网间距计算的点云密度。

测区航线设计包括建立航线设计工程、加载 DEM 数据、导入测区范围、输入技术参数、进行航线设计等,重复上述步骤即可完成所有航线设计(图 3.3)(王蒙等, 2010)。合格的测区航线设计应提交飞行记录表、飞行示意图文件、KML 文件等成果。图 3.4 为测区航线设计示例。

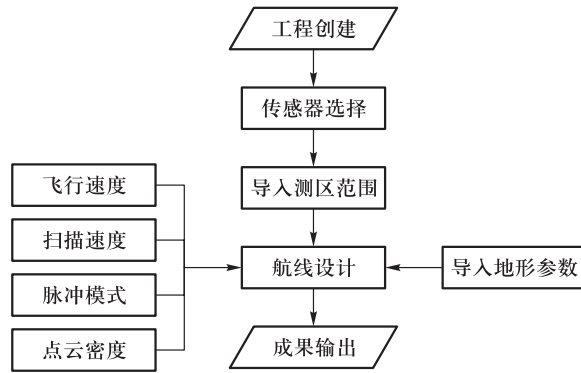


图 3.3 机载 LiDAR 测区航线设计流程

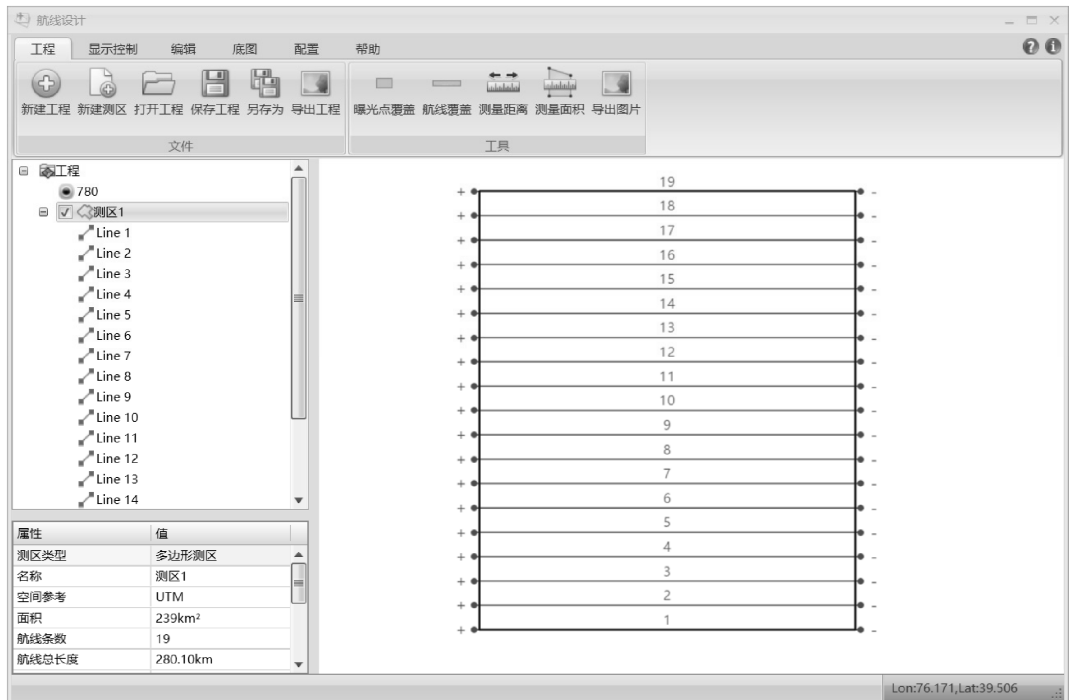


图 3.4 航线设计示例

(3) 检校场布设与测量。机载 LiDAR 系统定姿定位装置和激光扫描仪有相对位置偏移和角度偏差,其中 GNSS 记录存在相对位置偏移误差,一般通过地面静态检校,即通过地面测量和全站仪测量结果对比得出。IMU 记录的角度值和激光点的角度值有一定的系统误差,一般布设检校场通过飞行动态检校来消除该误差。

根据激光扫描仪检校的要求制定检校场布设方案,用控制场校准 LiDAR 系统的相对和绝对高程,用校准建筑物校准侧滚和俯仰姿态。检校场应当尽量远离水面(如湖、江)等低反射率的地区,基本要求包括:包含平坦、裸露地形,有用于检校的建筑物或明显凸出地物;场内目标应具有较高的反射率,存在明显地物点(如道路拐角点等)。

出现下列问题时需要进行补飞和重飞:POS 系统局部数据记录缺失;根据各设备评价指标检查不满足要求;原始数据质量存在局部缺陷而影响点云的精度和密度。

对于有人机,补飞或重飞航线的两端一般应超出补飞范围外半幅图,超出部分不小于 500 m,且不大于 2000 m,并应满足与原航线的旁向与航向重叠要求。

3) 飞行准备

机载 LiDAR 数据获取涉及飞机平台,若使用有人机平台则需要申请空域与租赁飞机。无人机 LiDAR 系统航飞同样需要申请空域,但无人机价格便宜,可以购买或者租赁。飞行准备主要分为空域协调和航飞准备两部分。

空域协调方面,需要遵守国家相关法律法规。若使用有人机平台,任务开始前应向战区申请空域报备,不能干扰军方任务;拿到批文后可与民航协调,不能影响民航飞机的正常飞行,同时需要服从空中交通规则及飞行管制。无人机合法飞行需要具备的条件包括实名登记、飞行执照、飞行高度和其他飞行要求。实名登记指除微型无人机外,其他所有无人机都需要进行实名登记;飞行执照指操作 7 kg 以上的无人机需要考取驾照;飞行高度指在飞行管制部门、重要目标、政府机关、广场、汽车站等区域,不同机型无人机有相应的飞行高度要求。其他要求指无人机(除微型无人机外)不能在夜间行驶,不得搭载违禁品、危险品等一些未经批准的物品,也不得向地面投掷物品、喷洒液体,禁止在移动车辆或者飞机上操控飞行等。

航飞准备方面,根据任务技术指标要求和测区地形情况,确定合适的 LiDAR 设备和飞行平台。表 3.3 和表 3.4 分别为常用的有人机和无人机型号和基本性能。如果测区面积较大,宜选择有人机飞行平台,常用的包括运 5、运 12 等;如果测区面积较小,则可以选择无人机飞行平台,通常又可分为固定翼无人机和多旋翼无人机。

国内外商业化的 LiDAR 设备很多(详见第 1.2.2 节),每种设备的性能和指标不同,需要根据具体情况选用,多数情况下主要考虑其测距能力。此外,还需要准备 GNSS 接收机和越野车等设备,安排专业人员制定航飞任务、技术人员指导航飞设备操作;质检人员在任务前检查设备故障及错漏情况,在任务完成后检查设备及数据质量等,还需要安排作业人员全程跟机执行航飞任务。

表 3.3 常用有人机型号和基本性能

性能	飞机型号			
	运 5	运 12	奖状	安 30
最高升限/m	4000	8000	13105	7000
最大速度/(km/h)	250	320	746	540
巡航速度/(km/h)	180	250	713	430
最大航程/km	1376	1440	3167	2630
续航时间/h	6	6	4	6
最大爬升率/(m/s)	3	12	15.1	7.7
作业高度区间/m	500~4000	1000~6000	1500~12000	1500~6000

表 3.4 常用无人机型号和基本性能

性能	飞机型号			
	大疆经纬 M300	飞马 D20	大鹏 CW-100	零度智控 ZT-30V
最高升限/m	7000	6000	4500	3500
巡航速度/(km/h)	83	65	100	110
最大航程/km	76	86	800	660
续航时间/h	0.9	1.3	8	6
最大爬升率/(m/s)	7	5	17	15

3.1.2 航飞实施阶段

航飞实施是按计划执行航飞观测任务并获取机载 LiDAR 数据,主要分为设备安装和调试、基站架设及地面配合、飞行操作及数据采集三个步骤。

1) 设备安装和调试

航飞实施涉及多种设备的使用,因此管理好设备并保持其性能稳定,对航飞顺利实施至关重要。设备管理包含设备存储环境要求(存储空间大小、防尘防灰防潮、防热与排热、防腐蚀)、设备日常维护(设备参数的日常测试)、设备运输条件及注意事项(如使用运输车运输是否对设备性能及参数有影响)、设备使用安全(高空作业是否会发生故障等意外情况)等。对于有人机航飞,通常由于设备管理需求、任务机变动等原因,需要将设备从仓库运送到任务机上,进行安装和调试。安装和调试包括设备清点、过渡板准备、设备安装、GNSS 偏心分量测量(设备安装完毕后 GNSS 几何中心到激光扫描仪几何中心的距离)、设备地面通电测试和设备状态评估等。

2) 基站架设及地面配合

地面基站观测时间要覆盖飞行时间,一般采用GNSS静态观测。电池电量及GNSS存储空间至少维持一个满架次的飞行时间,也可同步架设多个基站、多台仪器同时观测。前文提到的千寻云迹服务不需要架设基站,通过生成虚拟基站数据(与用户提供的GNSS原始观测数据和惯导数据匹配)输出高精度轨迹数据。

3) 飞行操作及数据采集

无人机在开始正式获取数据前应该执行“8”字飞行来激活惯导,避免惯导装置的误差积累。每次进入测区前飞机应先平飞3~5分钟,再进行“8”字飞行;当次飞行结束后,飞机应先做“8”字飞行,然后再平飞3~5分钟。无人机可以执行“M”字飞行来激活惯导。

飞行作业还应满足地面静态观测的要求,即飞行前飞机停放位置的四周应视野开阔,视场内障碍物高度角应小于 20° 。飞行过程中转弯坡度一般不超过 15° ,最大不超过 22° ,以免GNSS卫星信号被遮挡;航线上的俯仰角、侧滚角一般不大于 2° ,最大不超过 4° ;航线弯曲度不大于3%;同一航线内的飞机上升、下降速率要求不大于 10 m/s 。

激光雷达数据采集前,先根据任务要求对设备进行参数设置,如激光脉冲频率、扫描方式等。对于无人机,一般有配套的专业飞行管理软件,起飞前导入航线设计文件;飞行过程中,软件会根据飞机位置设计航线,开启或关闭数据记录,同时给飞行员提供领航信息,保证飞机压线飞行。对于无人机,通常由飞控控制其飞行,最简单的方式是全程记录数据或者起飞到一定的相对高度开始记录数据。

3.1.3 数据预处理阶段

数据预处理是对航飞采集的数据进行解算和校准等,是后续点云操作的基础。首先,解算出检校场内点云的坐标,再进行IMU安置角误差检校以消除系统误差,进而解算测区的坐标,提高机载LiDAR对整个测区定位的精度。其次,为减少机载LiDAR系统误差和随机误差造成的航带间三维坐标偏移,需对获取的数据进行航带平差;为使不同条件下获取的数据能够完全反映地物辐射特征,还需对数据进行辐射校正。最后,从点云密度、点云高程精度等方面进行质量控制。机载LiDAR数据预处理流程如图3.5所示。

1) 点云坐标解算

机载LiDAR系统采用直接定位方式计算激光脚点的三维坐标:LiDAR系统通过记录激光器发射和接收脉冲信号的时间间隔,采用航飞获取的机载原始数据和地面基站获取的数据,计算目标到LiDAR系统间的距离。

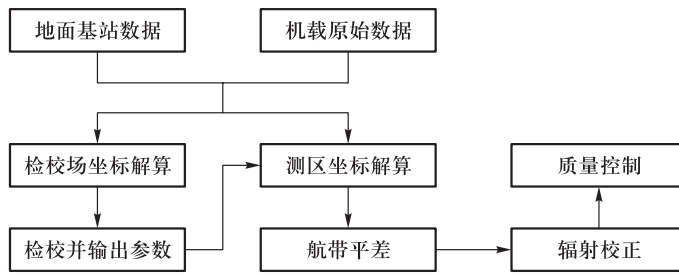


图 3.5 机载 LiDAR 数据预处理流程

全球导航卫星系统(GNSS)和惯性导航系统(INS)测量激光器发射脉冲时刻的位置和姿态,即确定了激光发射位置到目标之间的空间向量 \boldsymbol{P} ,从而可以解算目标点的坐标。激光扫描仪通过不同的扫描方式,如摆镜扫描、旋转多面镜扫描等,进行垂直于航线方向的测量;随着飞行平台移动,获取航线方向的测量并最终得到覆盖整个测区的点云数据。点云坐标精度依赖于各个部件高精度测量值、部件之间精密的时间同步以及各种误差的校正。下面介绍坐标解算方程。

机载 LiDAR 系统利用扫描仪记录距离和扫描角,利用 POS 测量扫描仪位置和姿态,并通过一系列坐标变换,解算得到点云在地理空间参考系的几何坐标。公式(3.1)为激光点云在 WGS84 直角坐标系下三维坐标的计算公式:

$$\boldsymbol{X} = \boldsymbol{R}_w \boldsymbol{R}_c \boldsymbol{R}_n \left[\boldsymbol{R}_m \boldsymbol{R}_l \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \rho \end{bmatrix} + \boldsymbol{P} \right] + \boldsymbol{X}_{\text{GPS}} \quad (3.1)$$

其中, \boldsymbol{X} 为激光脚点在 WGS84 坐标系下的坐标, ρ 为激光发射中心到目标之间的距离, \boldsymbol{R}_l 为瞬时激光坐标系到扫描仪坐标系的旋转矩阵, \boldsymbol{R}_m 为扫描仪坐标系到 IMU 参考坐标系的旋转矩阵。矢量 \boldsymbol{P} 为 GNSS 偏心分量,由扫描仪激光发射中心到 IMU 参考中心的矢量和 IMU 参考中心到 GNSS 天线相位中心的矢量两部分(均在 IMU 参考坐标系下)组成。 \boldsymbol{R}_n 为由 IMU 测量的三个姿态角即侧滚角、俯仰角和航向角所构成的矩阵,它将 IMU 参考坐标系变换到局部导航坐标系。 \boldsymbol{R}_c 进行垂线偏差改正,将局部导航坐标系变换到局部椭圆坐标系。 \boldsymbol{R}_w 为局部椭圆坐标到 WGS84 空间直角坐标系的变换矩阵。 $\boldsymbol{X}_{\text{GPS}}$ 为 GNSS 天线相位中心在空间直角坐标系的坐标矢量。

通过上述坐标变换可将机载 LiDAR 的观测值,包括距离、扫描角、传感器的位置和姿态,转化为激光点在 WGS84 空间直角坐标系下的三维坐标。

2) IMU 安置角误差检校

机载 LiDAR 系统由多个部件(GNSS、INS、激光测距仪、扫描镜等)组成,公式(3.1)解算出的点云坐标未充分消除系统误差。为了提高机载激光点云数据精度,在飞行作业前必须进行检校。在影响机载 LiDAR 几何定位精度的系统误差中,IMU 安置角误差是最大的系统误差源。

IMU 安置角误差如图 3.6 所示,它是由于 IMU 参考坐标系与激光扫描仪坐标系的坐标轴不平行,分别在侧滚、俯仰和航向三个方向坐标轴的夹角,其对地面激光脚点坐标的影响取决于飞行高度和扫描角大小。IMU 安置角误差检校是将带有几何偏差的激光点云数据,通过共点、共面等约束条件纠正到正确位置。目前,IMU 安置角误差检校主要包括手工解算和自动解算两种方法。

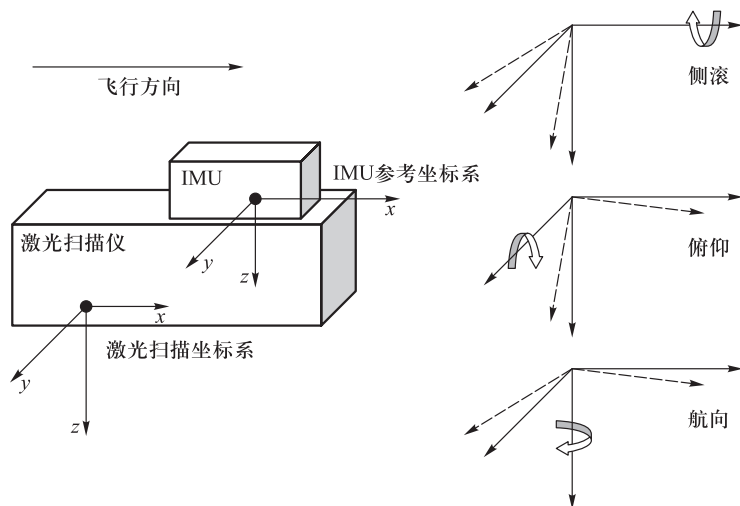


图 3.6 IMU 安置角误差示意图

商用 LiDAR 设备初期通常使用手工解算的方法,如通过特征地物(尖顶房、人工平台、平直马路等),选择不同航线(平行航线和对飞航线),逐步分离侧滚、俯仰和航向方向的 IMU 安置角误差,依据经验公式多次迭代来计算偏差值。IMU 安置角误差自动解算以激光点云坐标计算方程为数学模型,将 IMU 安置角误差作为未知数,通过平差求解系统参数,消除重叠区域的位置误差,可以理解为配准过程,即把带有误差的点云配准到参考位置或真实位置。因此,机载 LiDAR 系统 IMU 安置角误差检校的重点和难点在于:在相邻条带点云中建立合适的“连接”条件。

机载 LiDAR 点云数据很少存在真正意义的同名点,“点-点”关系难以建立,实际中应用较少。一些学者开展“面-面”连接关系的研究,即寻找同名平面的方法。该方法抗噪声干扰能力强,得出的结果最为可靠,其前提是不同航线获取的同一平面地物的点云应满足共面条件。将机载 LiDAR 坐标计算公式代入平面方程,建立条件误差方程来求解 IMU 安置角误差。Li 等(2016)基于机载 LiDAR 数据开展了连接平面自动提取及同名平面自动匹配的算法研究,实现了基于平面约束的 IMU 安置角误差检校,过程如图 3.7 所示。该方法依据机载 LiDAR 点云坐标计算方程,通过约束条件将含有误差偏移的点云坐标,用最小二乘法校正到正确位置,解算得到 IMU 安置角误差参数。假设侧滚、俯仰、航向三个方向的 IMU 安置角分别是 α 、 β 、 γ ,对应方向的误差依次为 $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$ 、 $\Delta\gamma$,由其构成的旋转矩阵 $\Delta\mathbf{B}_M$ 可以直接表示为

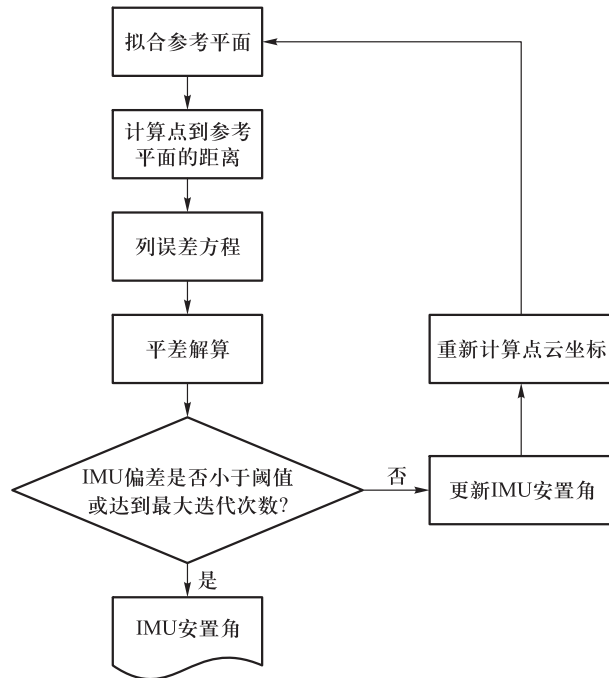


图 3.7 共面约束的 IMU 安置角误差检校流程

$$\Delta \mathbf{B}_M = \begin{bmatrix} 1 & -\Delta\gamma & \Delta\beta \\ \Delta\gamma & 1 & -\Delta\alpha \\ -\Delta\beta & \Delta\alpha & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

加入安置角误差矩阵后,机载 LiDAR 激光脚点坐标由式(3.1)变为式(3.3):

$$\mathbf{X} = \mathbf{R}_W \mathbf{R}_G \mathbf{R}_N \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{R}_M \mathbf{R}_M \mathbf{R}_L \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \rho \end{bmatrix} + \mathbf{P} \end{bmatrix} + \mathbf{X}_{GPS} \quad (3.3)$$

激光脚点到同名平面的距离(d),可以用安置角参数表示为

$$d = d_0 + \frac{\partial d}{\partial \alpha} \Delta\alpha + \frac{\partial d}{\partial \beta} \Delta\beta + \frac{\partial d}{\partial \gamma} \Delta\gamma \quad (3.4)$$

由于安置角误差的影响,激光脚点到平面的距离残差为 \mathbf{V} ,则误差方程为

$$\mathbf{V} = \mathbf{B}\mathbf{X} + \mathbf{L} \quad (3.5)$$

其中, \mathbf{B} 为未知数系数矩阵, \mathbf{L} 为激光点到平面的距离矩阵, \mathbf{X} 为待求的 IMU 安置角误差 $[\Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta\gamma]^T$ 。当 $\mathbf{V}^T \mathbf{P} \mathbf{V}$ 最小时,可以根据式(3.6)求得 IMU 安置角误差:

$$\mathbf{X} = -(\mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{L} \quad (3.6)$$

按式(3.1)解算坐标后,再对检校场进行安置角误差检校并输出参数,代入式(3.3)即可实现整个测区的高精度坐标解算。

3) 航带平差

由于航高和扫描视场角的限制,每条航带只能覆盖地面一定的宽度,要完成较大范围的作业就必须飞行多条航线,而且这些航线必须保持一定的重叠度(>20%)。由于误差通常会导致 LiDAR 数据不同航带的同名特征间存在系统性偏移,严重影响点云数据的相对精度。航带平差的目的在于通过消除或减少不同航带重叠区域之间的差异从而生成无缝产品,为最终的地理空间产品提供质量保证。航带平差通常包含以下两方面:

(1) 点云数据自动配准。航带平差中点云自动配准的目的是确定航带间的系统性偏移,目前常用的方法有基于规则格网的匹配法、基于 TIN 的最小二乘匹配法、最小二乘三维曲面匹配法和迭代最邻近点算法及其改进方法等。

基于规则格网的匹配法是最广泛使用也是最简单的表面匹配技术,其中两个数据集被重采样成等间隔的均匀分布的网格,因此两者之间垂直方向的差异可以很容易计算出来。这种表达方式也经常被称为 2.5 维数据,即任何位置(x, y)坐标对只能有一个高程值,其优点在于可以利用原有的标准图像处理技术直接对其进行处理,但是基本的图像匹配方法通常提供的结果只是一个二维偏移量,而 LiDAR 数据处理需要得到三维方向的差异,因此可以考虑使用强度图像匹配直接获得相应范围数据的三维方向偏移。另外,原始点云格网化后会包含各种误差,而 LiDAR 点密度本身低于完整表面采样所需要的最低空间抽样距离要求。因此,基于规则格网的同名特征点获取需要经过两次内插,匹配精度容易受二次内插所造成误差的影响。

基于 TIN 的最小二乘匹配法采用 TIN 作为数据组织结构,对不同航带重叠区域的数据构建不规则三角网面片,进而实现匹配。这种数据组织方式可以保留任何位置的原始点云三维信息,并提供任何位置的基于邻接三角形定义表面的内插值,避免点云数据的二次内插影响。

迭代最邻近点(iterative closest point, ICP)算法原理是将两个自由表面上距离最近的点作为对应点,然后以其之间的距离平方和最小原则建立目标方程,并根据最小二乘原理迭代求解转换参数。ICP 算法在图像匹配、模式识别中应用较多,不需要专门对点云数据进行点特征提取,同时可针对各种不同特征的数据进行套合,如线特征、曲面特征、角点特征等,但存在运算量大、需要初始值以及易于局部收敛等不足,因此很多学者对此算法进行了改进和优化。最小二乘三维曲面匹配法以三维特征表面为拼接单位,根据预先给出三维表面模板实现三维表面的完整拼接,是最小二乘匹配在三维空间上的衍生,也是一种全局配准方法,变换参数需要比较合理的初始值。

在进行航带平差时应选择表面均匀的区域,如道路、建筑物表面等,同时避开植被区域,因为植被区域可能包含多次回波信号,影响匹配和平差结果。

(2) 航带平差模型的选取与解算。航带平差模型可分为数据驱动模型和传感器检校模型。对于精度要求不高的应用,简单的数据驱动模型可满足要求。相比而言传感器检校模型对原始数据的要求更高,对于带状狭长的测量区域,必须使用传感器检校模型,原

因在于带状区域的重叠面积有限,只有良好的检校系统才可以提供较好的整体数据精度。

数据驱动模型是根据相邻航带同一地物的平面坐标和高程偏差建立相应的数学模型,利用匹配原理将重叠区域联系起来并采用模型进行解算,求出参数以计算激光点坐标,如七参数转换模型,其包括 3 个空间平移参数、3 个空间旋转参数和 1 个尺度因子。空间平移参数 $[\Delta x_{i,i+1} \ \Delta y_{i,i+1} \ \Delta z_{i,i+1}]^T$ 表示相对于 x 、 y 、 z 轴向的相对平移量,空间旋转参数 $[\alpha \ \beta \ \gamma]^T$ 表示相对于轴向的相对旋转量,尺度因子 m 表示相对缩放比例。由此,构建的七参数转换模型为:

$$\begin{bmatrix} x_{H_i} \\ y_{H_i} \\ z_{H_i} \end{bmatrix} = m \times \mathbf{R}_z \times \mathbf{R}_y \times \mathbf{R}_x \times \begin{bmatrix} x_{H_{i+1}} \\ y_{H_{i+1}} \\ z_{H_{i+1}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x_{i,i+1} \\ \Delta y_{i,i+1} \\ \Delta z_{i,i+1} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

其中,

$$\mathbf{R}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix}, \mathbf{R}_y = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix}, \mathbf{R}_z = \begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中, $[x_{H_i} \ y_{H_i} \ z_{H_i}]^T$ 为基准航带点坐标, $[x_{H_{i+1}} \ y_{H_{i+1}} \ z_{H_{i+1}}]^T$ 为邻接带点坐标。这种方法只适用于多个航带间存在的系统性偏移比较一致的情况。

传感器检校模型通过检校参数对传感器进行检校,达到最小化航带间系统性偏移的目的。该模型建立在机载 LiDAR 方程基础上,考虑了机载 LiDAR 几何定位过程,理论严密,但是建立的误差模型存在参数间相关性强的问题,因此在实际应用中为了保证参数解算的精度和可靠性,往往会简化误差方程模型,从而导致平差后还存在未知的残余误差。此外,由于 LiDAR 硬件系统的保密性,通常仅提供给用户三维坐标数据,而不是原始的观测值(如距离、角度等),这也给传感器检校模型应用带来困难。

数据驱动模型不需要原始观测值、简单易行,但理论上并不严密。两种模型的共同点在于对参数平差的准则相同。

航带平差的最后一步是将前面步骤中确定的误差改正值应用于 LiDAR 点云数据。对于数据驱动模型而言,通常采用三维相似变换或更简单的方式将改正值直接应用到原始 LiDAR 点云数据;而传感器检校模型,则需基于传感器检校模型完全重建 LiDAR 点云数据。

4) 辐射校正

机载 LiDAR 记录的强度信息不仅与地物反射率有关,而且与传输距离、大气环境、设备参数等相关,消除这些影响的过程称为相对辐射校正,校正后的强度信息与校正过程中所选用参数密切相关。通过参考地物的强度和辐射参数,如反射率、雷达截面积、后向散射系数等,计算其他地物的辐射参数,称为绝对辐射校正。下面从相对辐射校正考虑的三大因素——观测几何、大气环境和设备参数,以及绝对辐射校正的辐射参数计算方面进行

介绍。

(1) 观测几何。与观测几何相关的物理量包括距离和入射角(图 3.8)。对于光斑落在同一目标内且假定目标符合朗伯体反射,雷达方程可表示为

$$P_r = \frac{P_t D_r^2 \rho}{4R^2} \cos\theta \eta_{\text{sys}} \eta_{\text{atm}} \quad (3.8)$$

其中, P_r 为激光接收功率, P_t 为激光发射功率, D_r 为激光接收器的天线孔径直径, ρ 为散射体的反射率, R 为激光传感器到目标地物间的距离。 θ 为入射角,对于平坦地面,扫描角等于入射角;当地面有一定坡度时,入射角为激光与地面法线的夹角。 η_{sys} 为传感器对信号功率影响系数, η_{atm} 为大气影响系数。

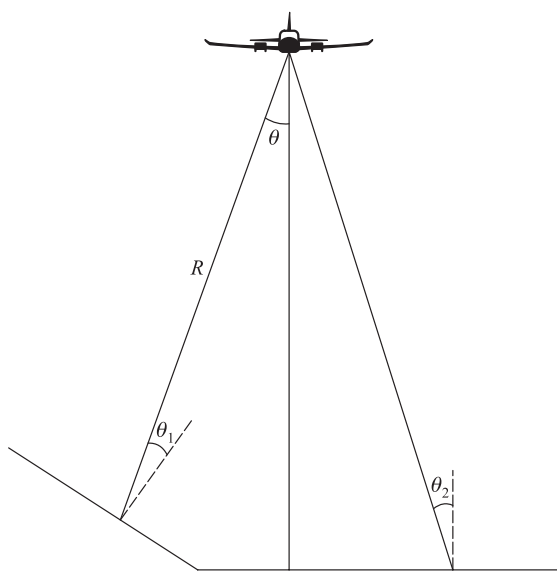


图 3.8 机载 LiDAR 观测几何示意图

可以看出,强度与距离的平方成反比,与入射角的余弦成正比;距离与飞行高度、目标在扫描航带中的位置以及地形起伏有关。一般选择平均相对航高为参考距离,将所有目标的强度归算到参考距离的强度值。当地形平坦时,入射角等于扫描角;当地形起伏时,需要计算法向量与入射激光束的夹角。综合观测几何的影响,校正公式可表示为

$$I_c = I_{\text{raw}} \frac{R_i^2}{R_{\text{ref}}^2} \frac{1}{\cos\theta_i} \quad (3.9)$$

其中, I_{raw} 和 I_c 分别为校正前后的强度值, R_i 为观测距离, R_{ref} 为参考距离, θ_i 为入射角。

(2) 大气环境和设备参数。受大气散射和吸收的影响,激光能量在传输过程中会产生衰减,不同气象条件、视距和波长下其衰减系数不同。影响点云强度的机载 LiDAR 设备参数包括激光发射功率、激光接收器孔径尺寸和激光发散角等。激光接收器孔径尺寸和激光发散角对同一型号机载 LiDAR 传感器是一个常数,只有针对不同传感器的强度数

据进行校正时才需要考虑这些参数差异。大多数情况下,针对同一设备获取的数据主要考虑激光发射功率和信号功率影响系数两个参数。

在同一测区中,设置的激光发射功率基本一样,但在不同测区,特别是飞行高度不同时,激光发射功率有较大差异。在飞行前进行任务规划时,设备对应的航飞软件会根据用户输入的地形、点密度、地面反射率等情况,计算激光脉冲频率和脉冲功率。

某些机载 LiDAR 系统发射脉冲的振幅和波宽存在差异,即不同时刻发射脉冲的功率不同。可以通过波形分解得到每个脉冲的振幅和波宽,假设发射脉冲的振幅只影响回波脉冲的振幅,发射脉冲的波宽只影响回波脉冲的波宽,取一个参考的振幅和波宽,就可以对强度和波宽进行校正。

(3) 绝对辐射校正。经过上述校正消除了观测几何、环境、设备参数影响之后,强度与反射率成正比关系。强度大小与参考距离选择、激光接收器孔径尺寸等因素有关,并不符合人们对地物目标辐射特性的表达习惯。通常用反射率、后向散射系数等表达地物的辐射特征,可以选择某一地物,用光谱仪实测反射率作为参考来解算其他目标的反射率,即绝对辐射校正。绝对辐射校正有两个重要假设:一是假设地物目标为朗伯体反射;二是假设地物目标大于光斑面积,即一个光斑内只有同一种地物。

$$\frac{\rho}{\rho_{\text{ref}}} = \frac{I_c}{I_{\text{ref}}} \quad (3.10)$$

$$I_c = I_{\text{raw}} \frac{R_i^2}{R_{\text{ref}}^2} \frac{1}{\cos\theta} \frac{1}{\eta_{\text{atm}}} \frac{P_{\text{ref}}}{P_t} \quad (3.11)$$

$$\rho = \frac{\rho_{\text{ref}}}{I_{\text{ref}}} I_{\text{raw}} \frac{R_i^2}{R_{\text{ref}}^2} \frac{1}{\cos\theta} \frac{1}{\eta_{\text{atm}}} \frac{P_{\text{ref}}}{P_t} \quad (3.12)$$

其中, ρ 和 ρ_{ref} 分别为目标和参考地物的反射率, I_c 和 I_{ref} 分别是经过校正后的目标地物强度和参考地物强度, P_t 为发射脉冲功率, P_{ref} 为参考地物的接收脉冲功率, η_{atm} 为大气传输效率。

5) 质量控制

质量控制主要包括点云密度检查、航带接边检查和点云高程精度检查。

(1) 点云密度检查。点云密度用来进行整体点云数据质量评价,一般采用平均密度和方差两个指标。一般来说,高密度点云可以反映更多的地表特征和细节。

(2) 航带接边检查。对于相邻航线的重叠区域,通过拉剖面检查相邻航带点云的重叠情况。若不同航带点云重叠处的偏差较大,则需要重新进行系统误差参数检校和航带平差。对于相邻接的测区,也需要进行重叠区域的接边检查。

(3) 点云高程精度检查。通常选用位于平坦区域的数据来评价点云高程精度,采用 GNSS 测量一定数量的特征明显的检查点高程,将其与获取的点云高程值进行对比,计算高程中误差。

3.2 地基激光雷达数据获取

地基激光雷达可分为车载移动激光雷达、背包激光雷达、架站式激光雷达等。本节主要对架站式地基激光雷达的数据获取流程进行介绍,一般分为计划准备、扫描实施和数据整理三个阶段,总体作业流程如图 3.9。

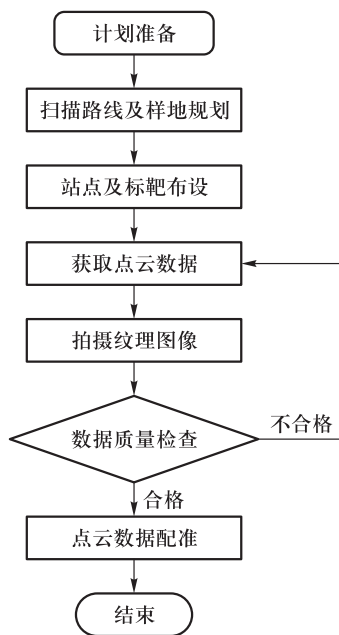


图 3.9 地基激光雷达数据获取总体作业流程

3.2.1 计划准备阶段

结合《地面三维激光扫描作业技术规程》(CH/Z 3017—2015)和已有相关研究(刘春等, 2010),计划准备阶段工作可以分为明确任务要求、扫描路线及样地规划、数据采集方法选择、仪器和软件配置、作业人员配置、保障措施制定以及扫描作业前检查等环节。

1) 明确任务要求

接到扫描任务后,应全面、细致地了解任务来源/背景、任务内容/目标、工作范围、工作量和完成期限等,这是制定扫描计划的主要依据。

2) 扫描路线及样地规划

扫描路线及样地规划是整个计划准备阶段中最重要的步骤。需要根据测区范围、自然地理概况(地形、地貌、交通、气候等)、扫描对象的形态和空间分布以及测量精度要求等,在兼顾代表性与可操作性前提下选取样地并规划合理的采集路线,以提高外业数据采集工作效率,避免盲目测量,造成不必要的人力和物力浪费。

为保证扫描路线及样地规划的合理性,在工作范围、距离允许的情况下,应尽可能到现场踏勘,制定切实可行的工作计划。若测区地形条件复杂或距离太远,现场实地踏勘有困难,则可以根据测区现有资料在图纸上进行工作方案初步设计,实地作业时再结合扫描对象及周边环境灵活调整(谢宏全等, 2014)。

3) 数据采集方法选择

数据采集方法直接影响点云拼接方式以及扫描实施阶段的实地作业,因此需根据样地位置、扫描对象结构特征、周围环境以及扫描成果具体应用等来选择合适的数据采集方法,将多测站数据拼接产生的累积误差降到最小。地面激光扫描仪的数据采集方法主要有三种:基于“测站点+后视点”的数据采集方法、基于标靶的数据采集方法和基于点云自动拼接的数据采集方法(欧斌, 2014)。

(1) 基于“测站点+后视点”的数据采集方法。该方法类似于传统测量,需要将扫描仪和标靶架设在已知控制点上,依次完成设站、定向、扫描等操作。首先,提前布设控制网,借助全站仪、GNSS 等仪器测量各控制点的坐标。由于经过前期的控制测量,理论上各测站点和后视点(标靶点)的坐标已经统一在同一空间参考系下,因此后期的点云配准过程实质上只是完成不同测站的点云拼接,无须再考虑坐标转换问题,拼接精度高。该方法不需要相邻测站之间有重叠区域,一般适用于带状测量或测区范围较大的复杂工程。

(2) 基于标靶的数据采集方法。测站和标靶应该布设在测区范围内通视条件较好、视野开阔的位置,后期通过公共标靶实现各测站点云数据的配准,一般情况下要求相邻测站间至少有 3 个不共线的标靶。该方法简单、快速,精度高,通常适用于扫描小型独立对象。

(3) 基于点云自动拼接的数据采集方法。与基于标靶的数据采集方法类似,区别在于该方法不需要标靶进行辅助,只需保证相邻测站间至少 30% 的重叠区域,因此需要人工选择重叠区域且具有明显特征的同名点,扫描结果与实施者的经验有很大关系。该方法在数据拼接精度方面低于前两种方法,适用于精度要求不高且测区有明显特征的工程。

4) 仪器和软件配置

确定满足扫描工作需要的激光扫描仪、GNSS、标靶、数码相机、便携式电脑、存储介质以及数据处理软件,还应配置遮阳伞等防护设备。特殊作业环境时,所选仪器设备应满足

安全要求。

(1) 地面三维激光扫描仪的选择。地面三维激光扫描仪的型号较多,主要生产厂家有 Leica(瑞士)、Riegl(奥地利)、Trimble(美国)、FARO(美国)、Basis(美国)、Optech(加拿大)、Topcon(日本)、I-Site(澳大利亚)、Z+F(德国)、中海达(中国)、北科天绘(中国)、思拓力(中国)等。各厂家产品在激光波长、激光器类型、射程、扫描速度、测距精度、视场范围等方面存在差异(部分设备参数可参阅第 1.2 节表 1.4 和表 1.5)。选择仪器时应首先考虑任务技术要求、测区环境等因素,再结合仪器主要技术参数来选择。一般情况下,一台地面三维激光扫描仪就能够满足作业要求,特殊情况下(如任务量大、工期短或扫描对象有特殊要求)需要多台仪器共同作业,甚至可能使用不同品牌型号的仪器(谢宏全等,2014)。

(2) 标靶的选择。标靶是数据整理过程中进行点云拼接的重要标志,直接关系到点云拼接质量。常用的标靶分为球形标靶和平面标靶(图 3.10)。球形标靶从任意方向上都能得到球心坐标,能够实现建筑物内、外部以及转角处的扫描,主要用于多视角点云模型的拼接。平面标靶与球形标靶相似,配准精度高,也可以和全站仪等配合使用,主要用于条带、面状目标的配准和坐标转换。

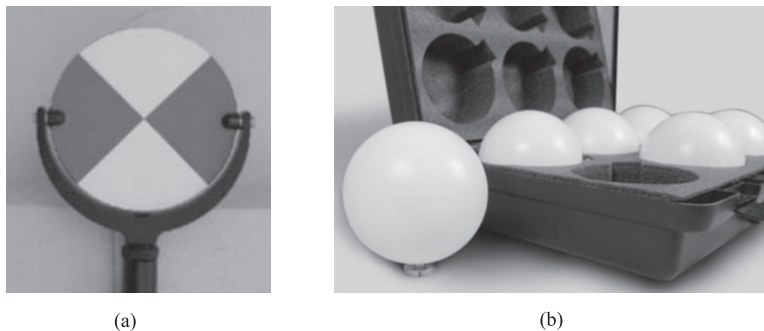


图 3.10 常用标靶:(a)平面标靶;(b)球形标靶

5) 作业人员配置

根据作业内容配置作业人员数量,一般由 4~5 人组成。作业人员应经过一定的培训,熟悉全部技术流程,培训合格后方能参与作业。

6) 保障措施制定

主要包括安全保障和进度计划两部分。扫描作业应考虑仪器工作温度要求,如果长时间暴露于太阳强光照射环境中,应为仪器遮阳。此外,激光会对人眼造成一定程度伤害,应避免人眼直视激光发射头。高空作业应保证足够的操作空间和架站区域,并检查平台稳定性以确保仪器和人员安全。根据任务期限合理制定整个内业处理与外业调查任务的进度计划。

7) 扫描作业前检查

首先,检查扫描设备各部件及配件是否齐全、匹配,设备各部件是否连接紧密且稳定。具有激光对中、双轴补偿功能的设备还应进行功能检查。其次,检查扫描仪通电后是否能正常使用,电源容量和内存容量是否满足作业时间需求,避免由于中途电量不足而中断扫描。再次,对内置同轴相机进行照片与点云匹配检查,排除照片与点云之间的误差;外置相机应进行相机主距、像主点、畸变参数、安装姿态等参数的标定和校准。最后,准备车辆、供电设备、数码相机等辅助设施,清点人员是否到位。

3.2.2 扫描实施阶段

在扫描实施阶段,应要求扫描人员尽可能地规范操作,并选择良好天气进行作业,以获取高质量点云。本节结合《地面三维激光扫描作业技术规程》详述基于标靶的数据采集方法,包括站点布设、标靶布设、架设扫描仪、扫描实施、纹理图像数据获取等步骤。

1) 站点布设

站点布设需要综合考虑扫描数据的完整性、数据精度、重叠度、数据冗余度和扫描仪的安全,具体要求如下:

(1) 选择合适的站点。为保证扫描数据完整性,站点选择应遵循所有待测目标均可被扫描的原则,同时需考虑树枝、树叶对目标的遮挡,确保能够获取完整的待测目标三维点云。

(2) 选取适当的扫描距离。三维激光扫描仪获取的数据精度与扫描距离成反比,因此扫描仪与待测目标之间的距离不应过长,且尽量确保待测目标位于扫描仪 45° 入射角内,例如,将站点布设在目标物密集区域的正前方,则可以较小入射角获取更高精度的数据。

(3) 设置合理的重叠度。为保证后续数据拼接的精度,相邻两站之间的重叠度应不低于30%。

(4) 减少数据的冗余度。在保证数据完整的前提下,应以尽量少的测站数量、合适的扫描模式完成数据采集,同时在作业过程中尽量避免对无关目标的扫描。

(5) 确保扫描仪的安全。扫描仪应架设在视野开阔、地形平坦的区域。

2) 标靶布设

在激光点云数据中标靶非常容易被识别和量测,可用于点云数据质量检查和点云配准,因此标靶布设是三维激光扫描作业的关键之一。标靶布设应遵循四个原则:①保证标靶可被至少两个站点的扫描仪完整地扫描;②标靶作为多站数据配准时同名的点,应保证

两个相邻测站至少存在三个同名点;③应在扫描范围内均匀布置且避免将其布设为狭长形状,例如,可在测区以近似正三角形的方式布置3个标靶;④与扫描仪的距离应合适,距离过小会导致较大的坐标变换误差,距离过大则会造成本靶中心位置的识别精度降低。图3.11为测站和标靶的分布示意图。

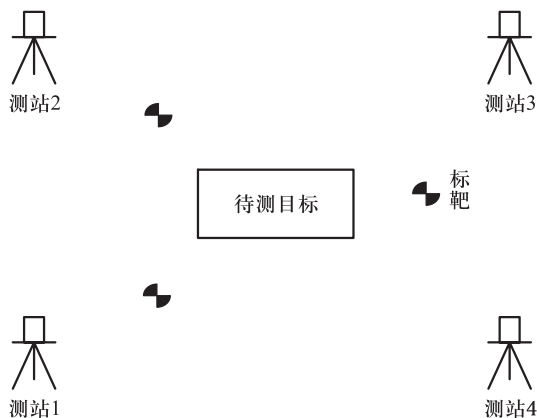


图 3.11 测站和标靶的分布示意图

3) 架设扫描仪

使用三脚架将扫描仪架设在选定的站点处,架设时应保持激光扫描仪水平,高度适中,再将仪器对中、整平、开机。

由于激光扫描仪适合的工作温度为 $0 \sim 40^{\circ}\text{C}$,且其内部(或外部)安装有高清数码相机和其他感光器件,所以安装仪器时应避免太阳直射。如果在高温环境下进行扫描,需要将扫描仪架设至阴凉处,或使用太阳伞遮蔽以免因仪器高温造成观测误差。

4) 扫描实施

布设完成后便可打开扫描仪电源并设置主界面参数,如扫描参数和采样分辨率等,此外扫描时应尽量避免待观测目标出现反光。扫描实施具体过程如下:

(1) 粗略扫描:使用低分辨率模式粗略扫描待测物体,获取待测目标大致范围与方位,以保证精确扫描时可准确地获取待测目标的点云数据,同时减少数据冗余;

(2) 精细扫描:根据粗略扫描结果使用较高分辨率模式扫描本站待测目标;

(3) 标靶扫描:对标靶进行精细扫描,为标靶设置唯一标记并确定标靶中心点,然后用全站仪或实时动态差分(real-time kinematic, RTK)系统获得标靶和扫描站点的大地坐标,为后续多站数据配准及坐标转换做准备;

(4) 当前站点扫描完成后移至下一站点,重复上述步骤(1)~(3),直至所有待测目标被扫描完成。

扫描过程中应注意:①避免三脚架晃动,以保证测量精度;②避免扫描范围内出现人

员或者悬浮物,尽量减少噪声点;③扫描仪如出现死机、断电、位置变动等突发情况,应检查仪器,确认其完好后重新扫描;④扫描过程中尽量让待测目标保持静止状态,以避免被测目标产生分层、偏移等现象。

5) 纹理图像数据获取

利用三维激光扫描仪内置(或外置)相机可获取目标的纹理图像,以作为建模后的纹理贴图或为多站拼接提供参考。获取纹理图像时应保证相邻两幅图像的重叠度不低于30%,并且应避免逆光或光线较暗造成的图像质量损失。作业结束后,关闭激光扫描仪和相机并及时将获取的数据导入计算机,检查目标点云或图像数据是否完整、质量是否满足要求、标靶是否完整可用,若存在数据缺失或异常,则应及时补测。

3.2.3 数据整理阶段

完成整个测区的数据采集后即可将采集的数据进行初步处理与整理,主要包括点云配准和质量检查。在多站点架设扫描中,每站的数据都处于独立的局部坐标系下,因此在采集完成后需要对同一测区的多站数据进行拼接,这一过程称为点云配准。此外,由于仪器本身或周围环境等因素影响,还需要在第一时间进行点云质量检查,如点密度、完整性和重叠度等,以此判断是否需要目标进行及时补测或重测。最后将数据集整理并保存。

1) 点云配准

对于地基激光扫描点云,点云配准是将各自独立坐标系的站点数据统一到同一个相对坐标系或真实地理坐标系下,从而得到目标对象的完整点云数据(Li *et al.*, 2016)。点云配准是三维空间的刚体变换,不会发生形变,通常分为粗配准和精配准两个步骤。粗配准一般通过人工选择特征点实现,配准精度最高可达毫米级;精配准则自动选取特征元素进行匹配,其精度可达亚毫米级。

粗配准一般是在相邻站点重叠区域选择若干同名点,解算转换矩阵参数(张祖勋和张剑清, 1997)。转换矩阵参数有7个,包括3个旋转角参数(ω 、 φ 、 κ)、3个平移参数(Δx 、 Δy 、 Δz)以及1个尺度系数(λ)。而激光扫描数据是原比例尺实测数据,其尺度系数固定为1,因此实际上只有6个未知参数。转换矩阵参数求解方程为

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \mathbf{R}_\varphi \mathbf{R}_\omega \mathbf{R}_\kappa \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

其中, $[X \ Y \ Z]^T$ 为基准测站中点的坐标值, $[X_m \ Y_m \ Z_m]^T$ 为待配准测站中对应同名点的坐标值, $[\Delta x \ \Delta y \ \Delta z]^T$ 为平移量, \mathbf{R} 为旋转角矩阵:

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_\varphi \mathbf{R}_\omega \mathbf{R}_\kappa = \begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 & -\sin\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\varphi & 0 & \cos\varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\omega & -\sin\omega \\ 0 & \sin\omega & \cos\omega \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\kappa & -\sin\kappa & 0 \\ \sin\kappa & \cos\kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

其中, \mathbf{R}_φ 、 \mathbf{R}_ω 、 \mathbf{R}_κ 分别为 3 个旋转角参数 ω 、 φ 、 κ 的旋转矩阵, 计算方法为

$$\begin{cases} a_1 = \cos\varphi \cos\kappa - \sin\varphi \sin\omega \sin\kappa \\ a_2 = -\cos\varphi \sin\kappa - \sin\varphi \sin\omega \cos\kappa \\ a_3 = -\sin\varphi \cos\omega \\ b_1 = \cos\omega \sin\kappa \\ b_2 = \cos\omega \cos\kappa \\ b_3 = -\sin\omega \\ c_1 = \sin\varphi \cos\kappa + \cos\varphi \sin\omega \sin\kappa \\ c_2 = -\sin\varphi \sin\kappa + \cos\varphi \sin\omega \cos\kappa \\ c_3 = \cos\varphi \cos\omega \end{cases} \quad (3.15)$$

3 个旋转角参数 ω 、 φ 、 κ 分别指原坐标系围绕 x 轴、 y 轴、 z 轴逆时针旋转的角度:

$$\begin{cases} \varphi = -\arctan\left(\frac{a_3}{c_3}\right) \\ \omega = -\arcsin(b_3) \\ \kappa = -\arctan\left(\frac{b_1}{b_2}\right) \end{cases} \quad (3.16)$$

公式(3.13)包含 6 个未知参数, 理论上至少需要 3 组同名点才能确定 6 个参数的唯一值。为提高转换矩阵参数的计算精度, 通常选择 4 组及以上同名点并基于最小二乘法进行解算得到高精度转换矩阵。

粗配准可分为基于控制点配准、基于标靶配准和基于重叠区同名点配准。其中基于标靶配准的精度最高(万怡平等, 2014), 需在扫描过程中布设标靶, 选取标靶中心点作为配准参考点进行转换矩阵的参数解算, 精度可达 3 mm。基于同名点配准, 即在相邻站点扫描重叠区内选择特征点作为参考点计算转换矩阵参数(葛晓天等, 2010)。基于控制点配准方法即在扫描过程中同步测量各测站中心点经纬度及北方向, 点云数据以绝对坐标系为基准坐标系直接实现配准, 其配准精度与定位和定向精度有关。

点云精配准的算法很多, 如迭代最近点(iterative closest point, ICP)算法、正态分布变换(normal distribution transform, NDT)算法、随机抽样一致性(random sample consensus, RANSAC)算法等, 其中应用最广泛的是 ICP 算法及其各种改进算法(Besl and McKay, 1992)。ICP 算法是在基准点云集与目标点云集中匹配距离最近点对并建立点对映射关系, 以所有点对距离差平方和最小作为约束条件计算最优坐标转换函数。传统 ICP 算法流程如下:

设 $P = \{p_i | p_i \in R^3, i = 1, 2, \dots, N_p\}$ 和 $X = \{x_i | x_i \in R^3, i = 1, 2, \dots, N_x\}$ 分别是三维空间 R^3 中的待配准的基准点云集和目标点云集。

①输入参考点云集 P (含 N_p 个点) 和目标点云集 X (含 N_x 个点), $N_p \leq N_x$ 。

②对同名点集和变换矩阵参数初始化:

$$P_0 = P, \mathbf{q}_0 = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T, k = 0。$$

③由点集 P 中的点, 在点集 X 上计算相应最邻近点集 C 。

④求解配准参数向量 $\mathbf{q}_{k+1} : \mathbf{q}_{k+1} = (P_0, C)$; 得到参数向量 \mathbf{q}_{k+1} 后计算距离平方和值为

$$f_{k+1} : f(\mathbf{q}) = \sum_{i=1}^{N_p} \|d_i\|^2 = \sum_{i=1}^{N_p} (\mathbf{d}_i^T \mathbf{d}_i)。$$

⑤基于配准参数变换 $P_0 : P_{k+1} = \mathbf{q}_{k+1}(P_0)$ 。

⑥判断运算是否收敛, 当距离平方和的变化 $(f_{k+1} - f_k)$ 小于预设阈值时, 判断为收敛, 完成 ICP 精确配准; 否则, 返回步骤③, 继续进行迭代运算。

⑦完成 ICP 精确配准, 对源点云进行坐标变换: $P' = \mathbf{q}_k(P)$ 。

可以看出, 迭代计算限制了大面积高密度点云的配准效率, 且初始值选取质量决定迭代是否正确收敛。改进的 ICP 算法在传统 ICP 算法基础上拓展了特征元素的选择对象, 包括曲面特征点法向量或面到面的距离。曲面的每一个凸点或凹点都是特征点, 用所有特征点对法向量的偏移量代替点对距离误差作为最小二乘解算控制因子进行迭代计算, 得到最佳转换矩阵, 基于面到面之间距离的改进 ICP 算法原理与之类似。相较于传统 ICP 算法, 改进算法自动选择特征明显的特征元素参与解算, 在不影响配准精度条件下极大地提高了计算效率, 但相同之处在于初值选择, 且对粗配准有一定要求。

针对多站点云数据的粗配准和精配准, 目前大部分激光雷达数据处理软件如 CloudCompare、Riscan Pro、Meshlab、PCM、LiDAR360 等都内置点云配准功能。以 PCM v2.0 为例, 在精配准前利用各站数据生成特征平面, 然后采用基于特征平面的 ICP 改进算法, 将面与面距离差平方和最小作为限制条件, 并设置搜索半径等参数进行迭代, 减少计算量和映射错误率。例如, 以某大楼为实验场景, 利用 Riegl VZ-1000 扫描仪获取大楼的多个测站扫描数据, 并利用 PCM v2.0 软件逐站点进行相邻测站点云数据的两两配准。然而该方法存在传递误差, 过大的累积误差会使迭代无法正确收敛甚至不收敛, 从而造成较大的配准误差或配准失败。为了避免由点云的两两配准导致的误差传递和累积, 可采用分块联合配准的方法, 即将所有站点数据分成若干区块, 先进行各区块内部的多个站点数据的联合配准, 在保证区块内配准误差较小的情况下再进行区块合并, 直至完成所有站点的整体联合配准。图 3.12 为大楼多站点配准后的点云数据, 不同颜色表示不同测站的扫描数据。

2) 点云质量检查

地面激光扫描时易受遮挡物影响, 导致数据出现空洞、不完整等, 因此二次扫描计划需要在数据检查结果基础上制定, 及时进行质量检查, 确认需要补测或重测的范围。质量检查要点包括:

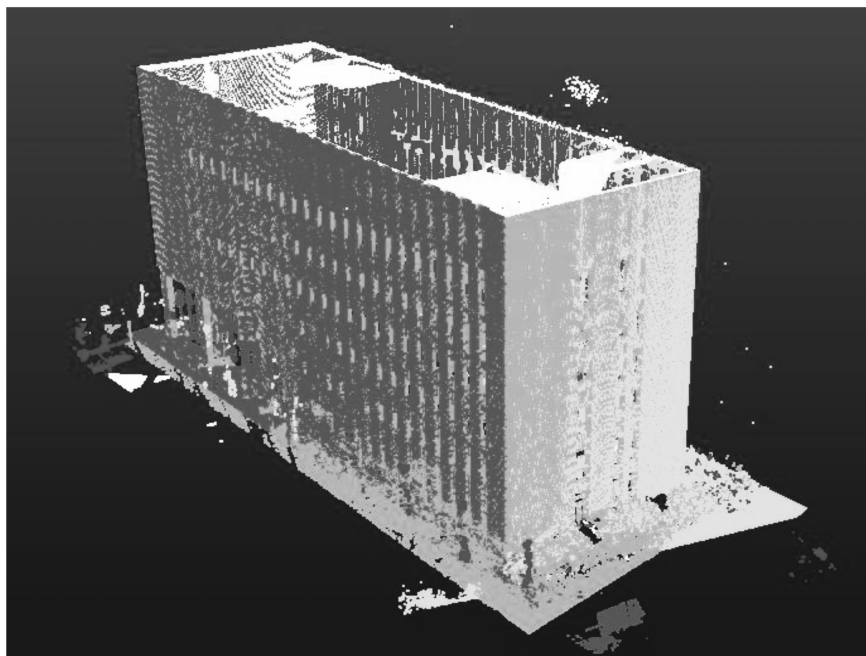


图 3.12 配准后大楼点云数据(参见书末彩插)

(1) 点云完整性和重叠度。地面激光扫描过程中,由于复杂场景下目标物之间的相互遮挡,激光束无法通过一次扫描直达目标物的所有部位,需要进行多站扫描测量。而多测站数据配准精度与点云重叠度直接相关,在可视范围内,站与站之间点云重叠率应在20%~30%,才能满足不同测站点之间拼接的要求。部分较为复杂的建筑物存在更多遮挡,需要进行更多测站扫描,以保证点云数据完整性。

(2) 点云密度。根据测量项目成果的精度要求来确定,可以按照项目设计要求在软件中读取点云数据,计算激光点云覆盖范围、面积并统计点数量,从而计算测量范围内的点密度,对不符合要求的地区进行补测。

(3) 噪声点。在扫描过程中受云雾、仪器、地形等因素影响产生的明显不属于测区内的点,会对点云后续处理、分析与应用造成干扰,因此需对噪声点的分布、数量以及形成原因进行检查分析。对于明显影响点云质量的噪声点区域,需要进行数据的删除及补测;对于明显远离实际目标点云的噪声点,可通过点云去噪方法进行去除(参见第4.1节)。

3.3 星载激光雷达数据获取

搭载在卫星平台或者国际空间站上的激光雷达传感器统称为星载激光雷达。本节重点介绍国内外几个主要的星载激光雷达系统,包括每个系统的搭载平台、系统参数、数据产品以及下载方式等。

3.3.1 ICESat/GLAS

ICESat(Ice, Cloud and Land Elevation Satellite)即冰、云和陆地高程卫星,是全球首个对地观测激光测高卫星,于2003年1月13日发射升空,主要有效载荷为地球科学激光测高系统(Geoscience Laser Altimeter System, GLAS)。ICESat/GLAS的主要科学目标为测量两极冰盖高程和海冰的变化,测量冰盖物质质量平衡、云和气溶胶高度,以及获取地形和植被特征参数(Schutz *et al.*, 2005)。

ICESat沿着近圆的近极地轨道飞行,高度约600 km,轨道倾角 94° ,重复周期约183天,可覆盖 $86^\circ\text{N}\sim 86^\circ\text{S}$ 的全球大部分地区。GLAS系统采用Nd:YAG激光器,激光在地面上的光斑直径为60~70 m,同一条带内相邻光斑中心的间距约170 m,相邻条带间的距离随纬度不同而有所差异:赤道附近轨道间距为15 km,纬度 80° 处的间距为2.5 km。GLAS系统以40 Hz的频率发射红外(1064 nm)和绿光(532 nm)激光脉冲,前者用于地面和海平面测高,后者用于大气后向散射测量,其测量沿轨方向云和气溶胶高度分布的空间分辨率可达75~200 m,对厚云层测量的水平方向分辨率为150 m。GLAS系统的主要参数见表3.5。

表 3.5 ICESat/GLAS 系统主要参数

参数	指标	参数	指标
发射时间	2003年1月	光斑直径/m	60~70
平台	卫星	脉冲能量/mJ	72/36
平台高度/km	600	光斑间距	
波长/nm	1064/532	航向/m	170
接收口径/ m^2	0.709	旁向/km	15 km (最大); 2.5 km (最小)
接收视场角/ μrad	450/150	重复周期	183 d
激光发散角/ μrad	110	精度指标	
脉冲重复频率/Hz	40	设计寿命	3年(实际在轨6年, 2009年11月失效)
脉冲宽度/ns	5	1064 nm 测距精度/cm	13.8(冰、陆地)
脉冲形态	高斯波	1064 nm 水平精度/m	4.5(冰、陆地)
信号采样频率/GHz	1	532 nm 垂直分辨率/m	75 ~ 200(云)
垂直分辨率/cm	15	532 nm 水平分辨率/m	150(云)

GLAS数据产品分为3个级别(Level 0、1、2)、15种标准数据产品和辅助数据(表3.6)。Level 0是原始的遥测数据,Level 1A记录仪器参数,Level 1B为初级产品数据,

表 3.6 GLAS 数据产品概述

产品 等级	描述	说明
GLA01 L1A	Global altimetry data	全球测高数据
GLA02 L1A	Global atmosphere data	全球大气数据
GLA03 L1A	Global engineering data	全球工程数据
GLA04 L1A	Global laser pointing data	全球激光定点数据
GLA05 L1B	Global waveform-based range corrections data	全球波形测高修正数据
GLA06 L1B	Global elevation data	全球高度数据
GLA07 L1B	Global backscatter data	全球后向散射数据
GLA08 L2	Global planetary boundary layer and elevated aerosol layer height	全球行星边界与气溶胶高度数据
GLA09 L2	Global cloud heights for multi-layer clouds	全球厚云层高度数据
GLA10 L2	Global aerosol vertical structure data	全球气溶胶垂直结构数据
GLA11 L2	Global thin-cloud/aerosol optical depths data	全球薄云/气溶胶光学厚度数据
GLA12 L2	Antarctica and Greenland ice-sheet altimetry data	南极洲/格陵兰冰层测高数据
GLA13 L2	Sea-ice altimetry data	海冰测高数据
GLA14 L2	Global land-surface altimeter data	全球陆地表面测高数据
GLA15 L2	Ocean altimetry data	海洋测高数据

Level 2 包括冰、海洋、地球物理学和大气的应⽤数据。

ICESat/GLAS 数据由美国冰雪数据中心 (National Snow and Ice Data Center, NSIDC) 公开发布, 可免费下载。下载前需要注册账号, 然后根据提示输入时间、地理坐标范围进行查询检索, 下载特定时间段固定范围内的数据产品。NSIDC 官网提供了三种数据下载方法, 分别为 Python Script、Order Files 和 Large/Custom Order。

(1) Python Script 方法要求提前安装 Python2 或 Python3 版本的软件, 通过下载的 Python 源码自动下载 GLAS 数据到指定目录。

(2) Order Files 提供了数据的 Zip 压缩文件, 以及单个文件下载链接列表。

(3) Large/Custom Order 是当下载数据超过 2000 个时使用, 可以获取单个文件下载链接列表, 也可以通过命令行直接下载。

3.3.2 ICESat-2/ATLAS

ICESat 于 2009 年失效后, NASA 于 2018 年 9 月 15 日发射了 ICESat-2 卫星, 搭载的光子计数激光测高仪 ATLAS (Advanced Topographic Laser Altimeter System) 采用了微脉冲多波束光子计数激光雷达技术, 这是该技术首次应用于星载平台 (Markus *et al.*, 2017)。它采用更加灵敏的单光子探测器, 具有更高的脉冲重复频率, 可以获取光斑更小、密度更

高的光子点云数据,进而实现精细的地表三维测量。它的主要科学目标包括:①定量评估极地冰盖对当前和近期海平面变化的贡献;②量化冰盖变化的区域特征,以评估其变化驱动机制,并改进冰盖预测模型;③估算海冰厚度,研究海冰/海洋/大气之间的能量、物质和水分交换;④测量植被高度,揭示大区域植被生物量现状及其变化规律。

ICESat-2 轨道高度约 500 km,轨道倾角 92° ,观测覆盖范围 $88^\circ\text{S} \sim 88^\circ\text{N}$,重复周期 91 天,每个周期有 1387 个轨道。ATLAS 系统有两个激光器,通常仅有一个处于工作状态,以 10 kHz 重复频率发射 532 nm 绿光波段的激光脉冲,脉冲宽度 1.5 ns,可以获取沿轨间隔约 0.7 m、直径约 17 m 的重叠光斑。ATLAS 共发射 6 束激光束,在沿轨方向分 3 组平行排列(图 3.13),每组分别包含一个强信号和一个弱信号,两者能量比为 4 : 1;每组之间跨轨距离约 3.3 km,组内跨轨距离约 90 m。表 3.7 列出了 ICESat-2/ATLAS 平台及传感器的主要参数。

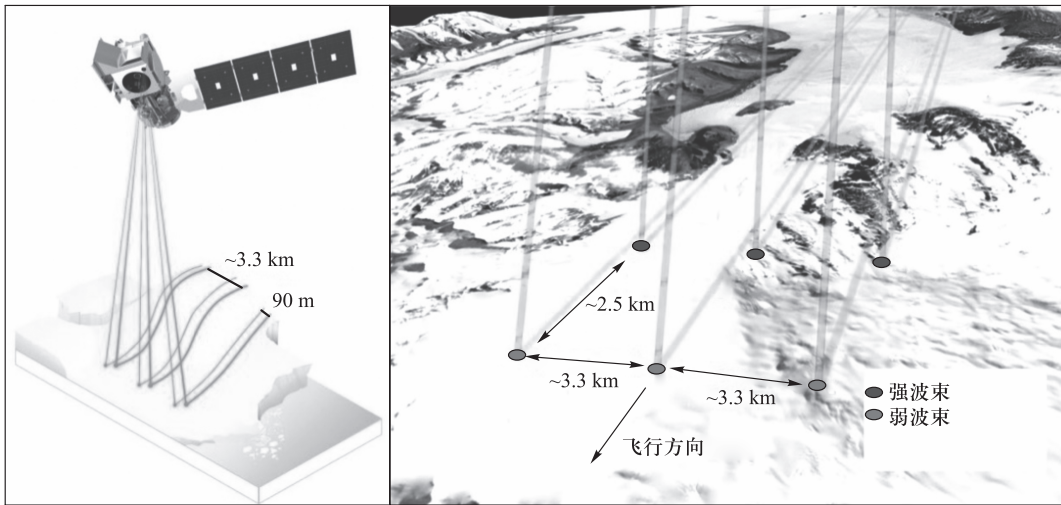


图 3.13 ICESat-2/ATLAS 波束分布示意图(据 Neuenschwander and Pitts, 2019)

表 3.7 ICESat-2/ATLAS 系统主要参数(Markus *et al.*, 2017)

参数	指标	参数	指标
运行高度/km	500	脉冲宽度/ns	1.5
轨道倾角/ $^\circ$	92	波束数	6(分 3 组排列)
覆盖范围	$88^\circ\text{S}—88^\circ\text{N}$	波束能量比(强 : 弱)	4 : 1
重复周期/d	91	波束组内间距/m	约 90
发射频率/kHz	10	波束组间间距/km	约 3.3
激光波长/nm	532	波束能量(强)/ μJ	175 ± 17
光斑直径/m	约 17	波束能量(弱)/ μJ	45 ± 5
光斑沿轨间距/m	约 0.7	接收器口径/m	0.8

ICESat-2/ATLAS 提供 21 种标准数据产品,分为 Level 0、Level 1、Level 2、Level 3 四级(表 3.8)。ATL00 为 Level 0 级产品,提供原始遥测数据;ATL01 和 ATL02 为 Level 1 级产品,是经过格式转换和仪器误差校正后的遥测数据;ATL03 和 ATL04 是 Level 2 级产品,其中 ATL03 结合了光子往返时间、激光器位置和姿态角数据,确定了 ATLAS 接收光子数据的大地测量位置(即纬度、经度和高度);ATL06~ATL21 是 Level 3 级产品,提供冰川/冰盖高度、海冰高度、植被冠层高度和内陆水体高程等信息。

表 3.8 ICESat-2/ATLAS 数据产品概述

等级	产品	名称	描述
Level 0	ATL00	遥测数据	原始遥测数据
Level 1	ATL01	格式化后遥测数据	按接收日期(天)分割的 HDF5 格式遥测数据
	ATL02	单位转换后遥测数据	经仪器误差校正后光子往返时间,包括时间数据、姿态角数据、激光器位置、管理数据、工程数据和原始大气剖面数据
Level 2	ATL03	全球定位光子数据	按轨道方向排列的每个单光子位置信息(经度、纬度和高度等)。所有光子被标记为信号或噪声光子,并被标记地表类型(陆冰、海冰、陆地、海洋),同时所有光子已进行地球物理修正(如地球潮汐、大气延迟等)
	ATL04	未校准的后向散射配置文件	沿轨大气后向散射数据,包括极地区的校准系数
Level 3	ATL06	陆冰高程	沿轨距离每 40 m 对应的陆冰表面高程和每对波束沿轨、跨轨坡度信息
	ATL07	北极/南极海冰高程	海冰和开放水域高程,沿轨方向步长由每波束对应的光子返回率决定
	ATL08	陆地植被高度	地面高程信息,在数据允许情况下,包括冠层高度、冠层覆盖度、地表坡度和粗糙度、表观反射率
	ATL09	校准的后向散射和云特性	沿轨方向云和其他重要大气层高度,吹雪、综合后向散射和光学深度
	ATL10	北极/南极海冰干舷	利用所有可用的海面高度测量值估算特定空间尺度上的海冰干舷,包含海面和海冰高度的统计信息
	ATL11	南极洲/格陵兰岛区域时间序列冰盖高度	根据重复轨迹和/或交叉数据获取的冰盖各点对应的长时间序列高度信息
	ATL12	海洋高程	特定长度的海洋表面高程,在数据允许的情况下,包括海洋高度分布、粗糙度、表面坡度和表观反射率估计值
	ATL13	内陆水位	沿轨方向内陆及近海岸水位分布,在数据允许情况下,包括粗糙度、坡度和坡向

续表

等级	产品	名称	描述
		格网化的南极洲/格陵兰岛区域时间序列冰盖高度	根据所有的冰盖高度数据制作的每年冰盖高度分布图
	ATL14	格网化的南极洲/格陵兰岛区域冰盖高度变化	每个冰盖的高度变化图, 每年冰盖高度变化图, 以及整体冰盖高度变化图
	ATL15	每周 ATLAS 大气	极地云量、吹雪频率、地面探测频率
Level 3	ATL16	每月 ATLAS 大气	极地云量、吹雪频率、地面探测频率
	ATL17	格网化地面高程/植被冠层	格网化的地面高度、冠层高度和冠层覆盖度分布图
	ATL18	平均海洋高度	格网化的海洋高度分布图
	ATL19	格网化北极/南极海冰干舷	格网化的北极/南极海冰干舷分布图
	ATL20	海冰覆盖区域格网化的海洋高度	海冰覆盖范围内, 格网化的每月海洋高度分布图
	ATL21		

ICESat-2/ATLAS 数据于 2019 年 5 月开始由 NSIDC 公开发布, 可免费下载。与 GLAS 一样, NSIDC 官网为 ATLAS 数据下载提供了三种相同方式。

下载的数据产品 HDF5 文件命名遵循统一规范: 除了 ATL07 和 ATL10, 其他所有产品命名为 ATL_{xx}_yyyymmddhhmmss_tttccss_vvv_rr. h5, 其中 ATL07、ATL10 增加了 1 个参数, 命名为 ATL_{xx}-HH_yyyymmddhhmmss_tttccss_vvv_rr. h5, 其文件命名规则详见表 3.9 所示。

表 3.9 ICESat-2/ATLAS 标准文件命名关键字

关键字	含义
xx	产品号(02-21)
HH	半球标识, 北半球=01, 南半球=02
yyyymmdd	数据获取时间: 年月日
hhmmss	数据获取时间: 时分秒(UTC)
tttt	参考轨道编号, ICESat-2 任务有 1387 个轨道, 编号从 0001 到 1387
cc	重复轨道周期数
ss	轨道分段号, ATL02/ATL03/ATL06/ATL08 轨道号范围为 01-14, ATL04/ATL07/ATL09/ATL10/ATL12/ATL13/ATL16/ATL17 为 01
vvv_rr	版本及修订号

3.3.3 GEDI

2018年11月,美国将全波形LiDAR传感器GEDI(Global Ecosystem Dynamics Investigation)搭载于国际空间站,设计寿命两年。该系统共有三个激光器,可同时获取8束全波形数据,在轨期间将产生约100亿次无云地面观测(Dubayah *et al.*, 2020)。其主要科学目标包括:①对地球的三维结构进行高分辨率激光测量;②精确测量森林冠层高度、冠层垂直结构和地表高程;③研究碳/水循环过程、生物多样性和栖息地特征等。

GEDI的三台激光器工作波长均为1064 nm,其中一台激光器被分成两束能量较弱的光束,因此三台激光器共产生4束光,通过光学抖动产生8条地面轨道,相邻轨道间距约600 m,扫描幅宽4.2 km,在地面形成的光斑直径约25 m,光斑沿轨间距约60 m。GEDI记录全波形激光雷达回波值,垂直精度为2~3 cm,覆盖范围为51.6°S—51.6°N,包括几乎所有热带雨林和温带森林。表3.10列出了GEDI系统的主要参数。

表 3.10 GEDI 系统主要参数

参数	指标	参数	指标
运行高度/km	419	轨道间距离/m	600
覆盖范围	51.6°S ~ 51.6°N	扫描幅宽/km	4.2
发射频率/Hz	242	脉冲宽度/ns	14
激光波长/nm	1064	脉冲强度/mJ	10
光斑直径/m	25	地面轨道数/个	8
光斑沿轨间距/m	60	运行时间/a	2

GEDI数据产品分为L1、L2、L3、L4四级:L1产品为经过地理定位的波形数据;L2产品为光斑尺度冠层高度和剖面,通过对波形进行处理得到的冠层高度和剖面指标,如地形高程、冠层高度、相对冠层高度指标和叶面积指数(leaf area index, LAI);L3产品为网格化的冠层高度、覆盖度和LAI等,通过对冠层覆盖度、冠层高度、LAI、垂直叶型及其不确定性的L2级光斑尺度参数进行空间插值,得到对应的L3级产品;L4产品是光斑尺度和网格化的地上碳估算,也是GEDI产品的最高级别,通过将L2产品中得出的光斑尺度指标转换为光斑尺度地上生物量,然后利用统计理论估算出1 km格网的平均生物量及其不确定度。表3.11介绍了GEDI四级产品及特点。

GEDI数据产品GEDI01_B、GEDI02_A和GEDI02_B于2020年1月公开发布,可免费下载,具体包括三种数据下载方式,分别为数据池(Data Pool)、Earthdata Search和GEDI Finder。

(1) Data Pool直接提供了整个GEDI数据获取时间目录列表,以使用户浏览特定时间的GEDI数据,但是这种方法无法筛选特定区域的数据。

表 3.11 GEDI 数据产品概述

等级	产品	描述	分辨率
L1	GED101_A-RX	原始 GEDI 波形	25 m
	GED101_B	经过地理定位的 GEDI 波形	25 m
L2	GED102_A	光斑尺度地面高程、冠层高度、相对冠层高度指标	25 m
	GED102_B	光斑尺度冠层覆盖度、叶面积指数、垂直叶型	25 m
L3	GED103	格网化冠层覆盖度、叶面积指数、垂直叶型	1 km
L4	GED104_A	光斑尺度地上生物量	25 m
	GED104_B	格网化地上生物量	1 km

(2) Earthdata Search 需要注册账号,但是目前无法通过时间、地理坐标范围进行检索查询。

(3) GEDI Finder 用于筛选指定特定区域的 GEDI 数据。

3.3.4 我国激光卫星计划

近年来,国产激光雷达卫星发展迅速,已陆续发射了多颗搭载激光雷达系统的卫星。2016年,资源三号卫星02星(ZY3-02)搭载了试验性激光测高载荷,为后续激光测高载荷的研发、业务化运行与应用奠定了基础;2019年11月,高分七号(GF-7)卫星同时搭载了激光测高仪、双线阵立体相机等有效载荷,可用于高分辨率立体测绘图像数据获取、高分辨率立体测图、城乡建设高精度卫星遥感和遥感统计调查等领域(Xie *et al.*, 2020)。目前该卫星已经成功进行了在轨几何检校,在轨测试表明,高分七号激光测高载荷运行稳定、质量良好、精度达到预期目标,可以用于制作高精度高程控制点数据库。此外,我国还将在2022年发射陆地生态系统碳监测卫星(Terrestrial Ecosystem Carbon Inventory Satellite, TECIS)(简称陆地碳卫星)。该卫星同样搭载全波形激光雷达载荷,可用于全球森林系统碳储量估算与监测(Du *et al.*, 2020)。

表3.12列出了三种国产激光雷达卫星搭载的激光器的部分系统参数,其中,高分七号和陆地碳卫星的设计与ICESat/GLAS非常类似,均是线性体制探测方式,且都搭载了具有全波形记录功能的激光测高仪,部分指标也与ICESat接近。

表 3.12 国产激光雷达卫星传感器关键参数

卫星名称	发射时间	探测方式	数据记录方式	波束	发射脉冲宽度/ns	足印直径/m	沿轨间隔/m	覆盖范围
ZY3-02	2016	线性	—	1	7	75	3500	83°N~83°S
高分七号	2019	线性	全波形	2	7	17	2500	83°N~83°S
陆地碳卫星	2022	线性	全波形	5	7	30	200	—

3.4 小 结

本章详细介绍了机载、地基、星载激光雷达的数据获取,其中针对机载和地基激光雷达,主要包括数据获取前的准备工作、激光扫描任务、数据预处理等内容;针对星载激光雷达,特别介绍了国内外多个激光雷达卫星的系统参数、产品和数据获取方式等。

习 题

- (1) 简述机载激光雷达数据获取的工作流程。
- (2) 简述地面三维激光扫描仪的数据采集方法及其优缺点。
- (3) 机载和地基雷达点云质量检查分别包含哪些内容?
- (4) 国内外典型星载激光雷达系统有哪些?简述它们在搭载平台、系统、数据等方面的异同。
- (5) 简要说明 ICESat/GLAS、ICESat-2/ATLAS、GEDI 和高分七号的主要科学任务。