

机载激光雷达外业作业影响因素的分析研究

骆元家* 覃媛媛 于士森 夏琼燕
柳州工学院 广西柳州 541516

摘要: 针对机载激光雷达技术快速在工程测量当中广泛应用, 其外业作业过程中所受到的影响对测距能力、可探测性、可穿透性和点位精度等具体影响因素问题, 提出了一种系统的激光雷达外业受影响因素的原理比较分析法。基于系统原理比较分析进行详细研究表明: 激光的测距能力、可探测性和穿透性受光斑的能量和地物的反射率的影响; 位置精度所受的系统误差和随机误差的影响; 所测点的密度受航高和航带重叠度的影响。进行的研究分析为相似机载激光雷达测绘项目的开展提供了有价值参考依据。

关键词: 激光雷达; 影响因素; 测距能力; 可探测性; 可穿透性

Analysis and Research on Influencing Factors of Airborne Lidar Field Operation

Luo Yuanjia*, Qin Yuanyuan, Yu Shisen, Xia Qiongyan
Liuzhou Institute of Technology, Liuzhou, Guangxi, 541516

Abstract: In view of the rapid application of airborne lidar technology in engineering surveying, the impact of its field operations on specific factors such as ranging ability, detectability, penetrability and point accuracy, the paper proposes A systematic comparative analysis method of the influence factors in the field of lidar is presented. A detailed study based on the comparative analysis of the system principle shows that: the ranging ability, detectability and penetration of the laser are affected by the energy of the light spot and the reflectivity of the ground objects; the position accuracy is affected by the systematic error and random error; The density of measuring points is affected by the flight height and the overlap of the flight zone. The research and analysis conducted provide a valuable reference for the development of similar airborne lidar mapping projects.

Keywords: lidar; influencing factors; ranging capability; detectability; penetrability

引言:

激光雷达其实是测距系统与激光探测的简称, 它集成了GNSS、激光扫描仪、IMU、数码相机等相关设备。

基金项目:

柳州工学院校级一流本科课程建设-数字地形测量学(2021YLKC017);

柳州工学院校级教学改革项目-翻转课堂教学模式在柳州工学院《工程测量》课程中的应用研究(2020JGCY026)

通信作者简介: 骆元家(1975-), 男(汉族), 本科, 高级工程师, 研究方向: 测绘工程, E-mail: 489698750@qq.com。

其中激光扫描仪通过接收返回的脉冲信号, 可获取探测目标精确的距离、坡度、粗糙度和反射率等相关的信息, 而搭载的数字相机可获取探测目标的成像信息, 经过地面的数字信息处理, 可生成逐个地面采样点的空间坐标, 最后经过综合处理, 便能得到所摄状地面区域三维定位信息与成像结果^[1]。激光雷达技术近些年来在测绘领域的迅速发展, 对于其它遥感技术来说, 激光雷达技术是遥感技术领域的又一场革命^[2]。其具有以下特点: 提供的点云数据密集、无需进入测量现场、获取数据迅速、数据的绝对精度在较高、穿透植被的叶冠能力较强、全天候工作、可同时测量地面和非地面层等技术特点。尽管如此, 机载激光雷达技术在外业作业时, 常受激光器本身特性和所处环境的影响, 其测距能力、可探测性、

植被穿透性、位置精度等都会受到影响。为了能充分消除或减弱这些影响的因素，可在外业作业时进行灵活的调整，以达到获取最佳点云数据的目的。下面就各影响因素进行详细的分析研究。

1 测距能力受影响的因素

激光的测距能力主要受光斑的能量和地物的反射率的影响。激光光斑能量，就好比一个普通手电和强光手电相比，强光手电可以照的更远，多数激光光斑的能量是固定的，但对于远距激光，其能量是可以设置的。例如 Riegl VUX-1LR 这款激光雷达，当设置点频 820kHz 时，激光能量为最低，测距能力是最弱的，约 60% 的反射率，其测距只能达到 370m；当设置点频 50kHz 时，激光能量是最强的，其测距能力必然最强，在 60% 的反射率下，其测距可达 1350m。地物的反射率，体现了其反射激光的能力，其所反射的能量越多，可被探测的距离就越远。

一般情况下，激光雷达测距方程（取目标张角小于激光发散角的情况）为：

$$P_r = \frac{4P_e A_t \rho K_c K_r}{\pi^2 QR^4} e^{-2R\sigma} \quad (1)$$

公式（1）中 P_e 为激光发射功率； A_t 目标反射截面积； A_r 为接收系统的有效面积； ρ 为目标反射系数； K_c 、 K_r 分别为发射和接收光学系统的透过率； R 是目标距离； Q 是激光束散射角； σ 是大气衰减系统； P_r 是探测器接收到的光信号功率，它应该大于等于激光测距仪的最小可探测功率^[2]。最小可探测功率是指满足规定探测概率和预警概率要求的最小接收信号功率^[2]。从公式（1）可知，为了提高激光雷达的测距能力，必然要从激光雷达本身的因素来考虑^[2]。

对上面的公式分析可知：通过提高激光发射机的峰值功率，可以提高其光束的质量，同时增大光束接收的口径，都是可行的技术方案。但要实现上述的方法，需要提高雷达的体积和重量及相应的功耗，这在激光雷达系统中现有应用中受到了较大的限制；减小激光束散角同样可以提高测距，但束散角规定要与系统的精度匹配；光电探测器的灵敏度与器件的工艺水平直接有关，其提高灵敏度是较难实现的^[2]。所以，提高其测距能力，最好的办法，就是提高前端的光机结构的设计和后端的接收信号处理系统能力，通过各种措施降低有用信号的损失，抑制各种噪声的水平，提高系统信噪比，在相同虚警概率的情况下最大限度的提高系统的发现概率，从而最大限度提高测距系统的有效可探测距离^[3]。从试验的

研究分析得出，采用滤波处理、恒虚警、信号处理可以较好地提升系统的信噪比，降低了虚警概率。以上这些措施，仍然存在一定的难度。首先脉冲串激光器和高重频的激光器的相关研制工作仍有一定的难度，其次高速电路的及时大容量采集和传输在目前的条件下仍然存在困难，而且对于快速移动的目标，在算法上还要做相应的改进^[2]。

再有不同地区不同季节，地表反射率与气溶胶光学厚度是不一样的，这也对测距能力产生相应的影响。对于南北两极地区来说，积雪和冰川的消融，增加了地表水量的积存，造成了反射率的降低，所以夏天的地表反射率最低，而相较于其他沙漠地区地表反射率要高很多^[4]。从气溶胶光学厚度的分布区域来看，在撒哈拉沙漠、中国西北、阿拉伯半岛及附近地区，其他地区的气溶胶光学厚度普遍分布在 0.2 以下，海洋略高于陆地，极地地区最低^[4]。从季候上看，中国西北地区在北半球，春天的气溶胶光学厚度最高；撒哈拉沙漠和阿拉伯半岛在北半球，夏天的气溶胶光学厚度最高，而此时中国西北地区依旧处于气溶胶光学厚度的高值区；高原地区和极地冬天的气溶胶光学厚度最低，春秋季节略高，夏天达到最高^[5]。所以不同地区、不同季节的气溶胶光学厚度不同，其对激光的测距能力影响也是不同的，这就要求我们在使用机载激光雷达时认真分析和处理不同的环境因素对测距的影响^[5]。有关地表反射率的计算和气溶胶光学厚度的计算，可参考以下公式（2）、（3）：

$$\rho_{1572 \text{ nm}} = 0.727\rho_{1640 \text{ nm}} + 0.309\rho_{2130 \text{ nm}}, \quad (2)$$

式中： $\rho_{1640 \text{ nm}}$ 和 $\rho_{2130 \text{ nm}}$ 分别为 1640 nm 和 2130 nm 处的地表反射率^[4]。

$$\tau_{\lambda_3} = \tau_{\lambda_2} \cdot (\lambda_3/\lambda_2)^{-\alpha}, \quad (3)$$

式中： τ_{λ_1} 和 τ_{λ_2} 分别为已知的波长 λ_1 和 λ_2 下的气溶胶光学厚度， τ_{λ_3} 为待求的波长 λ_3 下的气溶胶光学厚度^[4]。

2 可探测性的影响因素

激光的可探测性主要受地物表面反射率的影响。当地物反射率很低时，其远距可探测性就很低，例如刚铺好的柏油路、湿润的煤堆等，他们的反射率是很低的；当地物反射性很差或不具备反射性，比如水面体，激光斜射入水面，激光会在水中形成折射和反射而导致没有回波，这是不具备可探测性；但假若激光垂直入射水面的话，激光就会在水面形成镜面反射，就会有激光能量直接返回，就具备了高强的可探测性^[6]。

一个较为简单的判断方式，就是想象自己手拿了一

台强光手电, 如果从眼前照射到地物上可以看得很亮就可探测, 如果很暗或则没有光线返回, 就没有可探测性。如以下一些例子: 手电光斜入水面, 若看到的是黑黑的水面, 说明光斜入水面时是没有回波的或是很弱的; 手电光正射入水面, 则可以见到很强的反光, 说明光正射入水面时是可探测的; 手电光斜照到玻璃, 若能看到玻璃后面的物品, 说明激光是可以穿透玻璃获取部分数据, 照样说明这是有可探测性的; 而大雾中, 手电光照过去什么东西都看不到, 那么大雾和云团激光是无法穿透的, 也说明是没有可探测性的; 但是在雪地上, 手电照过去, 可以很清晰的看到白花花的雪地, 说明雪地也是有可探测性的; 除此之外, 是否可以被探测到, 就决定于激光光斑的能量以及地物的反射率条件了。虽然激光跟可见光光能有差异, 但可以依靠这种方式粗略判断^[7]。

3 穿透性的影响因素

激光的穿透性主要是依靠激光雷达的多回波特性, 如前面内容对多回波的描述, 若激光光斑穿透半透明的地物后, 照射到地面再反射回来, 可以产生多个回波, 即产生穿透; 或激光通过叶子缝隙, 光斑的一半光斑照射在叶子或其他地物, 另一半光斑继续照射下去, 这样也可以产生多个回波, 即产生穿透。

激光光斑发射后能产生回波, 主要与激光的能量有关; 所以影响激光穿透性的因素主要有: 1) 激光发射的能量: 如Riegl VUX-1LR, 50kHz时测距能力为1350m, 820kHz时测距能力为370m, 激光发射出来的能量并不相同。此时相同航高下, 50kHz的穿透能力更强^[2]。2) 植被枝叶厚度: 由于植被的树叶厚度、大小、浓密程度都不一样, 所以其穿透性也不尽相同。虽然激光属于近红外, 比可见光穿透性稍强, 但是可以根据太阳光在植被中的穿透情况, 评估激光的穿透性。如果植被树叶之间存在空隙, 阳光可以部分照到地面, 一般可以具有较好穿透性; 如果树林下面还有灌木, 地面基本处于偏暗状态, 激光基本无法穿透。3) 光斑大小: 假设激光光斑发射出来时能量相同, 光斑如果较大, 单位面积上的激光能力就会更小, 其穿透能力也会更弱。4) 湿度: 激光会被水或水汽吸收, 所以下过雨湿润的植被较难穿透, 云雾无法穿透。5) 距离的远近: 激光发射的能力一定时, 距离越近, 激光能力衰减越少, 能量也就越强, 穿透性也会更好。

海洋区域也选择相关地区进行了研究, 分析研究表明, 海洋上空探测到云层的数量约占72.2%, 其中不透明云层数约占总云层数量的61.4%, 可知能穿透云层并

获得海面回波信息的数据约占总云层数据的38.6%^[6]。另未探测到云层的激光, 一共约有占总数量55.6%的激光数据可对海面信息进行探测。总之, 使用不同版本数据进行分析, 激光的穿透率总体会有约9%的变化^[6]。

4 位置精度及点密度影响因素

激光雷达系统的成果精度受多个方面影响, 包括一些系统性误差、随机性误差和粗差, 系统性误差在数据处理过程中一般可以解决。

1) 激光传感器: 激光传感器的误差有两大类: 系统性误差和随机误差, 比如测距误差还是测角误差, 其具有系统性和随机性。系统性的误差在出厂时都会进行标定处理, 随机性误差主要是激光器自身的性能表现, 用户在作业时一般不干预此类误差^[7]。

2) 组合导航: 组合导航的所产生的误差是成果的主要误差的来源, 包括姿态误差和位置误差^[10]。正常环境作业下, 其误差为组合导航的标称误差, 当GPS受到干扰或飞行姿态发生剧烈变化时, 位置和姿态精度将会受到影响。

3) 飞行高度: 由于组合导航的姿态误差是无法避免的, 所以当飞行高度较高时, 姿态因素导致的误差就会放大, 表现为平面和高程误差大, 因此当飞行较高精度时, 需要尽可能飞行较低高度^[8]。

4) 检校报告: 出厂的检校报告, 是对激光系统系统性误差的一次标定, 如果使用报告错误时, 将会导致较大误差。

5) 航带平差: 航带平差算法目的是基于采集到的地面数据, 对组合导航位置和姿态数据进行改正, 实现数据的优化, 其算法自动化程度和效果直接影响作业效率和数据精度。

在规划航线时, 注意航高直接影响数据成果的精度, 就像影像的GSD影响成果精度一样。正常作业时, 注意测区附近的干扰源, GPS干扰是最为常见的影响数据成果精度的原因。选用正确的激光载荷型号, 也是保障数据成果精度的前提, 请根据项目精度需要选择设备。点云的密度、飞行速度、重叠率, 一般不影响成果精度^[9]。

在无人机LiDAR监测研究中, 相关结论表明: 在多次重复形变监测中, 无人机LiDAR点云扫描技术对地表H方向上形变量的最高识别能力可达30mm。基于本研究成果, 无人机激光雷达扫描技术可广泛应用于传统地形测绘、山体滑坡、矿区地表形变监测、地质运动以及自然灾害跟踪等多领域, 为同等及以上地表沉降监测方案与实施提供了有力参考^[10]。

激光器在设置好后,每秒钟发射的点云数据是恒定的,所以激光器在固定时间内飞行的面积越小,点云密度越高,即增大重叠率、降低飞行速度、降低航高、交叉飞行都可以提高激光的点云密度。

航线设计软件界面中计算的点云密度为理论密度,由于部分激光会被地物吸收,部分激光会在植被中产生多次回波,所以实际密度和理论密度会有少许出入。

5 结语

随着激光雷达科学技术的发展,机载激光雷达测绘技术的应用越来越广泛,不仅其外业的作业效率提高了,而且人员的安全性更有了保障,最主要的是降低了的测绘费用。所以机载激光雷达测绘技术还会有更好应用前景。但是,其在外业作业时受很多因素的影响,若不能很好的处理这些影响因子,也会造成技术应用的一个瓶颈。

参考文献:

[1]孙涛,王毅,张蓓.基于激光雷达技术在城市三维建筑模型中的分析应用[J].黑龙江科技信息,2015(35):182-183.

[2]李番,吴淦华,韩春生,谢亚峰.提高激光雷达测距能力的方法[J].红外与激光工程,2008,37(S3):112-114.

[3]胡炜.激光雷达回波信号处理与检测方法研究[D].成都:电子科技大学,2003:110-112.

[4]杨巨鑫,朱亚丹,王勤,卜令兵,刘继桥,陈卫标.地表反射率及气溶胶光学厚度对星载路径积分差分吸收激光雷达性能的影响[J].中国激光,2019,46(09):

266-274.

[5]杨巨鑫.机载CO₂测量激光雷达仿真及实验研究[D].南京:南京信息工程大学,2019:117-119.

[6]吴东,贾佳.CALIPSO星载激光在全球海洋上空的穿透性统计[J].大气与环境光学学报,2011,6(04):252-259.

[7]孟现彪,刘盛庆,史雅茹,谢文军.无人机激光雷达高程测量精度评定分析[J/OL].桂林理工大学学报:1-6[2021-06-25].http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1375.N.20210401.1648.002.html.

[8]高桃峰.高速公路扩容项目激光雷达测量技术应用[J].中国新技术新产品,2021(02):109-111.

[9]林志东.机载激光雷达在公路勘测设计中的应用[J].福建交通科技,2020(05):81-83.

[10]刘长瑞.车载激光雷达测量技术在铁路既有复测中的应用[J].工程建设与设计,2020(14):244-246.

[11]骆生亮.机载激光雷达技术在林业资源调查中的应用[J].经纬天地,2020(02):28-31.

[12]司大刚.航空LiDAR技术在道路勘测设计中的应用[D].兰州:兰州交通大学,2018:37-40.

[13]李红.机载激光雷达技术在昌景黄铁路纵横断面测量中的应用[J].建材与装饰,2018(20):218-219.

[14]陈小歌.机载激光雷达技术在高速公路勘测设计中的应用[D].成都:成都理工大学,2014:37-39.

[15]付宓.机载激光LIDAR测图与人工测图的对比分析[D].重庆:重庆交通大学,2013:57-60.