

轻小型机载激光扫描仪设计

李孟麟, 朱精果, 孟 柘, 任建峰, 肖 芳, 张珂殊

(中国科学院光电研究院, 北京 100094)

摘 要: 介绍了作为机载激光雷达关键部件的激光扫描仪模块化设计方法和各模块主要功能。为实现激光扫描仪的小型化、轻量化目标, 设计了四面棱镜作为扫描部件, 分析了工作距离与光学口径的对应关系并基于探测器参数设计通光口径, 采用光纤激光器作为光源有效减小了扫描仪的尺寸和功耗, 并设计了准直系统对出射激光进行整形。在 16 m 距离和 293 m 距离的定点测距地面测试中, 轻小型激光扫描仪精度可达到 5 mm 和 18 mm, 最后介绍了搭载轻小型激光扫描仪进行的飞行实验结果。

关键词: 激光扫描仪; 三维成像; 激光雷达; 轻小型

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)05-1426-06

Design of lightweight and small sized airborne laser scanner

Li Menglin, Zhu Jingguo, Meng Zhe, Ren Jianfeng, Xiao Fang, Zhang Keshu

(Academy of Opto-electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: Laser scanner, an important component of airborne LiDAR system, consists of several functional modules, and these function and module design methods were completely introduced in details. In order to reduce the weight and size of laser scanner, a novel four-size prism was proposed as the scanning component, the relationship of detecting distance and optical aperture was discussed, furthermore, the optical module was designed based on the parameter of detector. As the light source, a fiber laser had been applied to reduce the cubage, power and weight of the scanner, and then a collimator was designed for beam shaping. The results of the performance tests revealed that the scanner accuracy was 5 mm in 16 m range testing, and in 293 m range testing, the accuracy was 18 mm. The laser scanner was used in flight perform experiments as a part of airborne LiDAR system, the results from different flight altitudes were presented at the end.

Key words: laser scanner; 3D imaging; LiDAR; lightweight and small sized

收稿日期: 2014-09-12; 修订日期: 2014-10-11

基金项目: 国家自然科学基金(61205161)

作者简介: 李孟麟(1981-), 男, 博士, 主要从事激光测量方面的研究。Email: liml@aoe.ac.cn

0 引言

三维激光雷达是一种基于激光空间点阵扫描技术、激光测距技术和高精度定位测姿技术发展而产生的一种测量技术^[1],目前已在地形测绘、地理数据采集工程设计、气象和空气监测等领域成功应用^[2]。三维激光扫描仪作为激光雷达的关键部件,可快速获取的物表面大量采样点的三维空间坐标。机载激光扫描仪具有灵活、轻便、成本低、适用范围广、可获得高分辨率和高精度数据等特点,其轻量化和小型化已成为机载激光雷达发展的一个主要趋势^[3]。Leica 公司、Optech 公司、IGI 公司和 RIEGL 公司都分别推出了针对不同飞行高度和飞行平台的激光雷达系统^[4-8],国内,中国科学院光电研究院也已研制开发了拥有自主知识产权的轻小型机载激光雷达扫描仪^[9]。该仪器采用光纤激光器、APD 光电探测器、高速数据采集与时空鉴别系统等技术,应用集成化、模块化设计降低了设备的体积、重量和功耗。

1 系统设计

轻小型机载激光扫描仪设备主机主要包括光学模块、光机扫描模块、光电接收模块、量化与采集模块、数据存储模块和系统控制模块,并与航测相机和位置及姿态测量系统进行数据和信息交互,数据处理软件可将设备采集的激光点云数据显示给用户,其结构如图 1 所示。

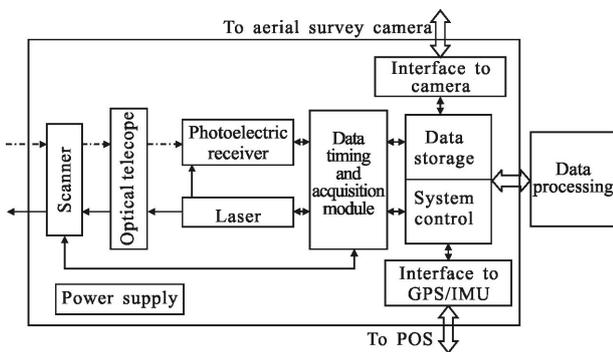


图 1 轻小型激光扫描仪系统结构图

Fig.1 Structure of lightweight and small sized laser scanner

激光扫描仪通过测量激光从发射模块到目标再返回接收模块的往返时间来计算目标距离的。系统以脉冲回波原理工作,测定的飞行时间和距离的关

系如公式(1)所示。

$$R = \frac{ct}{2n} \tag{1}$$

式中: R 为目标距离; c 为真空中的光速; t 为激光往返时间; n 为路径中的介质折射率。激光发射模块发出一个指向目标的激光瞬时窄脉冲,同时启动量化与采集模块的数字计数器,发射的激光束通过大气传播到达目标,经目标反射和散射,其中一小部分返回扫描仪方向,被接收光学望远镜汇聚到光电接收模块探测器光敏面上,通过电路转换产生脉冲信号终止计数器计数。此时的计数值和激光脉冲回波信号的峰值会被数据存储模块记录,同时记录的还有航测相机的影像数据和 POS 系统测量的位置及姿态数据,这些数据在作业完成后可通过数据后处理软件进行解算,最终生成具有目标表面点三维信息的激光点云图像。

1.1 光机扫描模块

在激光扫描仪工作过程中,为了连续获得具有一定带宽的一系列激光脚点的距离信息,通常需要借助扫描装置进行作业。在轻小型激光扫描仪中,光机扫描模块采用电机驱动一块四面棱镜改变激光光束指向,是实现宽视场、高精度扫描的功能单元。激光扫描仪的扫描带宽为:

$$SW = 2H \tan(\theta/2) \tag{2}$$

式中: θ 为系统扫描角,采用四面棱镜的扫描模块为保证扫描脚点的均匀分布可取有效扫描角度为 70° ,则轻小型激光扫描仪的扫描方式为线扫描,扫描带宽只同飞行高度 H 有关。而沿航向方向的激光脚点最大间距 D_{along} 和在同一扫描线上的激光脚点间距 D_{across} 可分别表示为:

$$D_{along} = V/f_{scan} \tag{3}$$

$$D_{across} = SW/N = SW \cdot f_{scan}/F \tag{4}$$

式中: V 为飞行速度; f_{scan} 为扫描频率; N 为激光脚点数,等于激光脉冲频率 F 与 f_{scan} 的比值。依据公式(3)和(4)即可针对激光脚点的分布要求设置激光脉冲频率和系统扫描频率。

1.2 光学模块

激光测距模型反映了各种因素对激光扫描系统探测性能的影响。假设目标位朗伯漫反射体,以一组激光发射和接收模块建立探测模型,考虑到扫描斜边、环境因素和静态测试要求,测距值在设计中设定

为 50~3 000 m。设回波接收功率为 P_r , 则:

$$P_r = \frac{P_s K_s K_r A_s A_r \rho T^2}{\pi^2 R^4 \theta_s^2 \sin^2(\theta_s/4)} F_s F_r \quad (5)$$

式中: P_s 为激光发射功率; θ_s 为激光发散角; K_s 为发射系统透过率; K_r 为接收系统透过率; T 为单程大气透过率; ρ 为目标反射系数; A_s 为目标有效反射面积; A_r 为接收口径面积; θ_r 为反射光发散角; F_s 为发射激光束强度分布函数; F_r 为接收光强度分布函数; R 为目标距离。可见, 所需激光的发射功率 P_s 与有效接收口径 D_r 的平方成反比, 与到目标的距离 R 的平方成正比, 因此距离最远时需要的发射激光能量最大。轻小型激光扫描仪选用 APD 器件作为光电探测器, 其最小可检测光功率为 10^{-9} W, 考虑系统噪声的影响, 根据公式(5)计算了距离目标 1 500 m 时, 所需发射激光的能量随有效接收口径变化的曲线如图 2 所示。

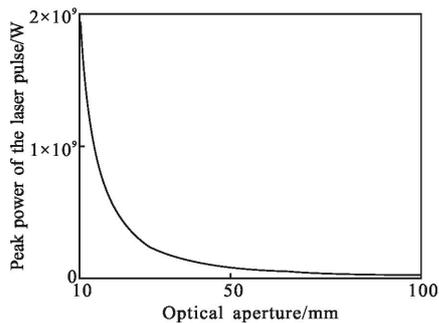


图2 发射激光的能量随有效接收口径变化曲线

Fig.2 Curve of laser power and optical aperture

从图 2 中的曲线关系可以看出, 大光学接收孔径对激光器能量要求较低, 激光器的能耗、尺寸和重量都可以降低, 但光学接收系统的尺寸则要变大; 反之, 随着光学接收孔径的缩小, 激光器的能量、尺寸和重量都要变大。

1.3 激光发射模块

激光扫描仪选用的激光器要具有高功率和高光束质量的特点, 激光器发射的激光束具有一定的发散角, 探测远距离目标时激光束的光斑直径会很大, 降低了单位面积上的能量密度, 使得进入光学系统中的返回光信号减弱。衡量激光器光束质量的一个重要指标为瞬时视场角 (IFOV), 它由发射激光光束的发散角 γ 定义。

为了减小系统尺寸、重量和功耗, 轻小型机载激

光扫描仪在设计中采用了高度集成化的光纤激光器, 出射激光波长为 1 064 nm, 峰值能量为 40 μ J。在激光出射端, 设计了准直镜, 将激光光束的瞬时视场角压缩在 0.3 mrad, 使出射激光能量更集中。准直镜光路如图 3 所示。

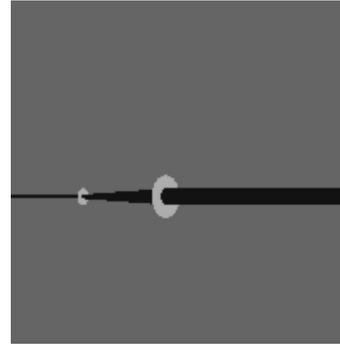


图3 激光准直光路模拟

Fig.3 Simulation of laser collimator

对于脉冲计数形式的激光扫描仪, 脉冲信号间的混叠决定了其最大测距范围受两个因素限制: (1) 脉冲计数器的最大计数间隔; (2) 激光发射频率。为避免在计数间隔中引入混叠, 往往要求激光脉冲在前一个脉冲的回波信号被探测器接收到之后再发射。同时, 由于激光扫描仪工作高度会随着任务规划的不同而改变, 而同一物的激光回波信号强度与工作高度成反比。因此为保证激光扫描仪的测距精度, 激光发射模块发射的激光脉冲频率和脉冲能量都可以根据作业任务的不同而变化。

1.4 光电接收模块

当光斑尺寸大于目标反射面时, 激光信号的衰减与探测距离 4 次方成正比, 为达到激光雷达在测距方面的性能指标, 保证接收模块有足够的探测灵敏度和动态范围, 在背景变化、目标反射率变化、距离变化等条件下保证系统的高探测率和低虚警率, 轻小型激光扫描仪采用了激光回波信号直接探测方案, 量化激光发出脉冲和目标表面反射回波脉冲的时间间隔。

如图 4 所示光电接收单元包括雪崩二极管 (APD)、信号放大模块、信号转换模块、光强信号输出模块和时间信号输出模块。光电转换器件选择高灵敏度、稳定性好的 APD 探测器, 使最小探测功率为 1×10^{-9} W, 满足有效测距的要求。后续电路通过一定的采样处理得出激光的飞行时间和激光返回强度。

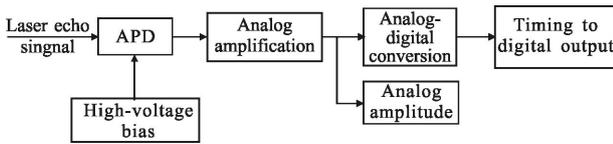


图 4 回波信号光电接收单元工作流程图

Fig.4 Diagram of echo signal receiver module

1.5 数据量化与采集模块

数据量化与采集模块的功能包括激光扫描控制, 激光回波信号接收逻辑控制, 相机曝光同步, GPS 信号同步, 上位机通信等。具体功能包括: 控制电机根据给定的位置摆动并读取电机的实际位置; 读取数据上升和下降沿的时间、记录激光回波的峰值; 记录相机闪光同步信号上升沿及相机快门信号上升沿到达的时刻; 记录 GPS 接收机 PPS 信号上升沿到来的时刻并通过串口获取 GPS 传来的时间信息; 与上位机通信, 从上位机获取命令及参数并将所采集到的数据传送给上位机, 同时监测上位机传发的控制命令。

数据量化与采集模块采用 CPCI 紧凑型背板结构, 将各个功能板在结构上进行划分后独立连接, 以提高系统稳定性与集成性, 同时较大地降低了模块的尺寸和体积。数据量化与采集模块的结构布局框图如图 5 所示。

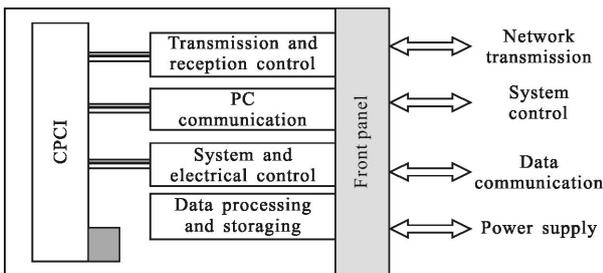


图 5 数据量化与采集模块硬件布局

Fig.5 Structure of data timing and acquisition module

2 性能测试

利用轻小型机载激光扫描仪设备分别进行了近距离、中距离的定点测距试验, 在 16 m 和 293 m 距离分别采集多组数据, 各组数据解算后结果如表 1 所示。

从前三组测试为 16 m 的近距离定点测试结果, 激光功率设置为 50%, 测距标准差最大为 5 mm, 改

变扫描频率对测距值无影响。后三组测试结果为 293 m 的中距离定点测试结果, 最大测距标准差为 18.5 mm, 随着激光发射光功率的增加, 测距标准差有显著改善趋势。取第 5 组数据分析其完整性, 其采样距离窗口设置为 0~1 000 m, 激光器能量设置为 90%, 扫描频率设置为 100 k, 目标距离约为 300 m, 数据回波上升沿分布和采样点峰值分布如图 6 和图 7 所示。

表 1 定点测试数据一致性分析

Tab.1 Analysis of points ranging consistency

Scanner No.	Scanner frequency/kHz	Luminous power	Mean of the range/m	Std of the range /mm	Maximum range/m	Minimum range/m
1	100	50%	16.516	4.6	16.539	16.494
2	100	50%	16.521	5.0	16.545	16.497
3	200	50%	16.519	5.0	16.544	16.496
4	100	80%	293.349	18.5	293.48	293.24
5	100	90%	293.355	16.7	293.46	293.25
6	100	100%	293.359	15.5	293.46	293.28

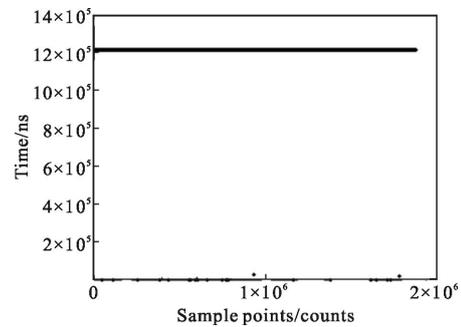


图 6 回波上升沿分布

Fig.6 Layout of echo signal rising edge

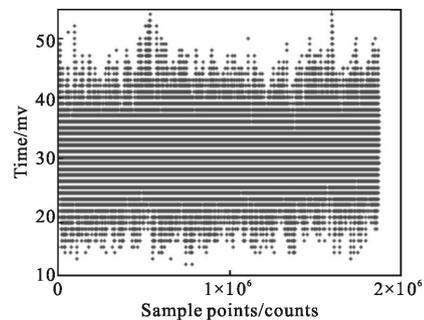


图 7 采样峰值分布

Fig.7 Layout of sampling peak value

从图中可知, 该组数据采样点共计 1 875 773 个,

采样点上升沿下限为 1 100 000, 上限为 1 300 000, 第一回波峰值平均值为 30.631。实际测距平均值为 293.355 m, 测距标准差为 16.7 mm。测距最小值为 293.257 m, 测距最大值为 293.461 m。定点采集数据无丢点及激光发射时刻跳跃现象。

3 实验数据

轻小型激光扫描仪与 POS 系统、数字相机、主控计算机组成激光雷达系统, 该系统进行了 6 个架次, 30 多个小时的飞行实验, 飞行高度包括 80 m、400 m、800 m、1 000 m, 采集了不同地形特征区域的激光点云数据。通过多次飞行作业, 获取了大量激光扫描仪数据、POS 数据、以及影像数据。实验飞行区域包括山地和平原, 扫描地貌有人工建筑、工业目标, 也有农田、沙漠特征地形, 并在较低飞行高度下对某区域电力线分布情况进行了扫描。

如图 8 所示为从 800 m 高度扫描获得的某小区激光点云数据, 从中可见小区建筑物特征明显, 易于分辨, 对该数据中的一栋建筑物进行放大, 并依据激光点云数据进行三维建模, 结果如图 9 所示。



图 8 小区点云数据

Fig.8 Points data from uptown

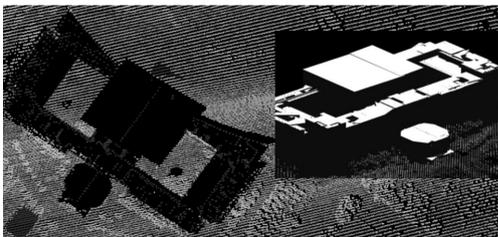


图 9 小区建筑物点云及其模型

Fig.9 Points data and model of building

在部分测区对所采集点云数据进行分析 and 矢量化后, 能较好的表达偏远区域电力线的状况, 设备具备勘察电力线的功能。如图 10 所示为平顶山飞行实

验过程中 100 m 飞行高度下采集的电力线勘察点云数据, 如图 11 所示为电力线周边的地貌特征, 轻小型激光扫描仪采集的多回波点云数据可清晰反映电线、电力线塔、地表植被和地面的真实情况。

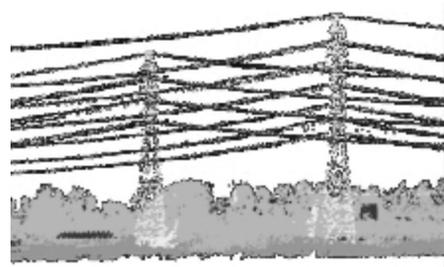


图 10 电力线勘察激光点云数据

Fig.10 Points data from power line surveying

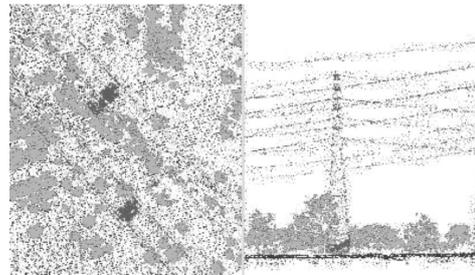


图 11 电力线及周边地貌

Fig.11 Physiognomy around the power line

4 结 论

文中介绍了一套轻小型激光扫描仪的系统和模块设计, 该设备由光学模块、激光发射模块、光电接收模块、数据量化与采集模块等部分构成。在保证系统精度的前提下实现设备轻量化、小型化的目标, 设计采取了多项针对性措施, 压缩了系统光学口径, 减小了系统功耗, 设备重量小于 18kg。该扫描仪在地面定点测试和多架次飞行试验中获取了大量有效数据, 测试精度达到设计指标, 设备具有飞行作业能力。

参考文献:

- [1] Zheng Yongchao, Zhao Mingjun, Zhang Wenping, et al. Trend of laser radar technology development [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(S): 240–246. (in Chinese) 郑永超, 赵铭军, 张文平, 等. 激光雷达技术及其发展动向 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35(S): 240–246.
- [2] Pang Yong, Li Zengyuan, Chen Erxue, et al. LiDAR remote sensing technology and its application in forestry [J]. *Scientia*

- Silvae Sinicae*, 2004, 41(3): 129–136. (in Chinese)
- 庞勇, 李增元, 陈尔学, 等. 激光雷达技术及其在林业上的应用[J]. 林业科学, 2004, 41(3): 129–136.
- [3] Ni Shuxin, Li Yifei. Trend of laser radar for military [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, 32(2): 111–114. (in Chinese)
- 倪树新, 李一飞. 军用激光雷达的发展趋势 [J]. 红外与激光工程, 2003, 32(2): 111–114.
- [4] Baltsavias E P. Airborne laser scanning: basic relations and formulas[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1999, 54(2/3): 199–214.
- [5] Baltsavias E P. Airborne laser scanning: existing systems and firms and other resources [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1999, 54 (2/3): 164–198.
- [6] Li Fan, Wu Shuangyang, Yang Hongguo, et al. Multi-element array detecting technology of ladar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(2): 295–297. (in Chinese)
- 李番, 邬双阳, 杨红果, 等. 激光雷达多元阵列探测技术[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(2): 295–297.
- [7] Sun Z H, Deng J H, Yan X W. Progress and current state of the development of laser imaging detection system and its key techniques [J]. *Science & Technology Review*, 2008, 26 (3): 74–79.
- [8] Amann M C, Bosch T, Lescure M, et al. Laser ranging: a critical review of usual techniques for distance measurement [J]. *Opt Eng*, 2001, 40: 10–19.
- [9] Li Menglin, Zuo Jianzhang, Zhu Jingguo, et al. Research on dual-channel 3D imaging LiDAR technology [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2013, 38(3): 49–51. (in Chinese)
- 李孟麟, 左建章, 朱精果, 等. 双通道三维成像激光雷达技术研究[J]. 测绘科学, 2013, 38(3): 49–51.