

条纹原理激光雷达成像仿真及实验

董志伟, 张伟斌, 樊荣伟, 李旭东, 陈德应, 于欣

(哈尔滨工业大学 可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 基于条纹原理的阵列探测体制激光成像雷达由于其独特的技术优势在激光测绘中具有潜在的应用。介绍了“扫帚”扫描结合条纹原理阵列探测体制激光雷达成像仿真的飞行实验研究结果。首先介绍新体制激光雷达成像仿真平台的建立及典型的仿真结果。利用该仿真平台可指导新体制激光雷达成像设计, 并对机载飞行实验参数的设定进行成像效果仿真, 仿真的距离测量精度为 0.5 m。最后开展了新体制激光雷达成像飞行实验, 给出了典型地区的原始条纹图像及经过数据处理后的点云图。新体制激光雷达成像外场实验结果的测距精度优于 1 m, 机载飞行实验测距精度结果与仿真分析结果一致, 验证了该仿真系统的正确性。通过与实际被动光学相机成像图像进行比较, 验证了新体制激光雷达成像在航空测绘等方面的技术可行性。

关键词: 条纹原理; 机载激光雷达; 外场实验; 点云图像

中图分类号: TN958.98 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0730001

Streak tube principle LiDAR imaging simulation and experiment

Dong Zhiwei, Zhang Weibin, Fan Rongwei, Li Xudong, Chen Deying, Yu Xin

(National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser, Harbin 150001, China)

Abstract: LiDAR is a potential technology in mapping field. Especially, the LiDAR systems applying streak tube have attracted great attention recently due to their special properties about detection sensitivity and distance resolution. The simulation of the stripe principle array LiDAR system with "broom" scanning and the results of the flight experiment were described. Firstly, the establishment of the new LiDAR simulation platform and the typical simulation results were introduced. The simulation platform can guide the design of the new LiDAR, and simulate the setting of the airborne flight experiment parameters. The simulation result which was based on experimental design parameters was that the distance measuring accuracy of the new LiDAR is 0.5 meters. Finally, the airborne flight experiment of the new LiDAR was carried out, then original streak images of the typical area and the cloud points of the images were given. The result of the airborne flight experiment is that the distance measuring accuracy of the new LiDAR is better than 1 m. The accuracy of airborne flight experiment is consistent with the result of simulation analysis. It proves that the correctness of the simulation system is verified. Compared with the images of the passive optical camera, the technical feasibility of the new LiDAR in aerial mapping is verified.

Key words: stripe principle; airborne LiDAR; field experiment; cloud points image

收稿日期: 2015-11-15; 修订日期: 2015-12-17

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项资金(2012YQ040164); 国家自然科学基金(11004042);

中央高校基本科研业务费专项资金(HIT.NSRIF.2015043)

作者简介: 董志伟(1980-), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事超快激光加工及激光遥感方面的研究。Email: dong19809@163.com

0 引言

激光雷达技术作为一门新兴的技术,是传统雷达技术与现代激光技术相结合的产物,它是一种主动式成像系统,可以获取目标区域的三维位置数据,最早是为了满足测绘制图以及空间目标测量等的特殊需要,于 20 世纪 60 年代中期提出并于 90 年代逐渐趋向成熟的测绘技术^[1-4]。按照安装平台的不同,激光雷达分为地面、机载和星载激光雷达。其中,机载激光雷达由于其测绘效率及精度高、抗干扰能力强、全天候工作性能好、可实现自动化地形测绘等独特的技术优势,已经受到越来越多的关注。目前,机载激光雷达在欧洲和北美地区以及亚洲的发达地区已在商业测绘、资源监测等领域获得了大量的应用。激光雷达现已成为航空遥感的核心装备之一,在未来的遥感领域具有极大的发展潜力^[5-6]。

传统的扫描激光雷达采用单元探测器加光机扫描的工作方式。目前此种工作方式的激光雷达技术已经相对成熟并商业化,加拿大的 Optech 公司、美国的 Leica 公司以及奥地利的 RiegI 公司均有采用单元探测器的商业化激光雷达产品。但基于此种工作方式的激光雷达存在着成像速度低的问题。阵列探测克服了传统单元探测的缺点,极大地提高了探测的精度及成像速率,近年来成为激光雷达领域的研究热点。尤其是条纹原理的探测器不但具有集成度高、体积小的优势,还具有极高的探测灵敏度,可以达到单光子探测级别。该技术在机载激光雷达测绘方面具有广阔的应用前景^[7-11]。但目前基于条纹原理的阵列探测技术在激光雷达中的应用还较少,大部分还停留在理论和实验室研究阶段,相关的外场机载测绘实验在国内尚未有报道。

文中首先基于条纹的阵列探测体制的原理,提出了“扫帚”扫描结合条纹原理阵列探测工作方式的新体制激光雷达。构建了该新体制激光雷达成像仿真平台,该平台可指导新体制激光雷达的设计,并对机载飞行实验参数的设定进行成像效果仿真,进而确定外场实验的基本参数。最后开展该新体制激光雷达的机载外场测绘成像实验,获得典型目标的激光回波条纹信号并通过数据处理得到了新体制机载激光雷达点云数据。

1 原理及组成

1.1 基于条纹原理的阵列探测体制机载激光雷达的原理

基于条纹原理阵列探测体制的激光雷达其探测器的工作原理是条纹变像原理,即通过在垂直于光电子信号传输的方向上引入斜坡电压使得不同到达时刻的光电子在探测器屏幕的一维进行空间分离,将信号到达的时间信息转化为探测器屏幕上某个维度的空间信息。由于斜坡电压可精确控制,该种探测器具有时间分辨精度高、探测灵敏度高及集成度较高等独特的技术优势。

“扫帚”扫描工作方式如图 1 所示。将激光雷达安放到飞机上,当飞机沿图中所示的方向飞行时,整形成线状光斑的激光光束沿着垂直于飞行方向进行摆动扫描,类似于“扫帚”的工作方式。每次扫描的单元大小为 $N \times 1$ 个阵列。 N 为探测器的空间集成度。

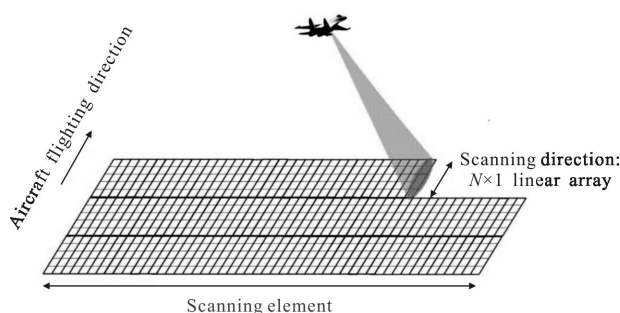


图 1 机载激光雷达示意图

Fig.1 Schematic representation of airborne LiDAR

新体制的激光雷达系统主要包括激光发射系统、条纹阵列探测系统、伺服扫描系统、光学收发系统及高速控制处理系统等部分。激光雷达通过控制单元发送指令使激光发射系统发射激光,经发射光学系统及扫描系统到达目标,由目标反射的回波再经由接收光学系统被条纹阵列探测器接收,得到相应目标回波的条纹图像。结合“扫帚”扫描系统及飞行平台自身的运动即可实现对大面积地面目标的快速测绘。

该种“扫帚”扫描结合条纹原理阵列探测的新体制激光雷达具有测绘效率高、灵敏度高及距离精度高等技术优势,非常适合于大面积的地面目标成像测绘。

1.2 激光雷达仿真平台

通过上述新体制激光雷达的工作原理可构建其激光测绘仿真平台。激光雷达的仿真平台功能示意图如图 2 所示,由成像测绘仿真演示模块、条纹图像提取及数据转化模块、点云数据网格化模块及点云数据显示等模块组成。

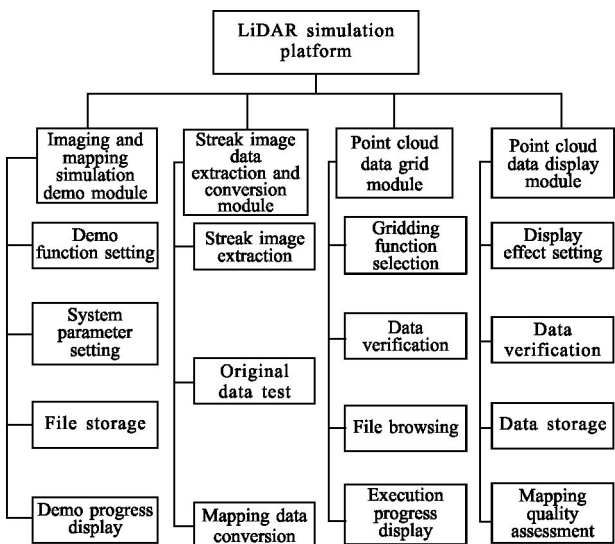


图 2 激光雷达仿真系统

Fig.2 Simulation system of LiDAR

图 3 为该仿真系统的软件界面,通过对飞行参数、POS 工作参数及激光雷达工作参数等实验参数进行设置,即可模拟机载激光雷达测绘的各种情况。一方面可利用该平台指导新体制激光雷达的设计,也可利用该平台获得的仿真测绘结果设计飞行实验参数,提高外场工作效率。

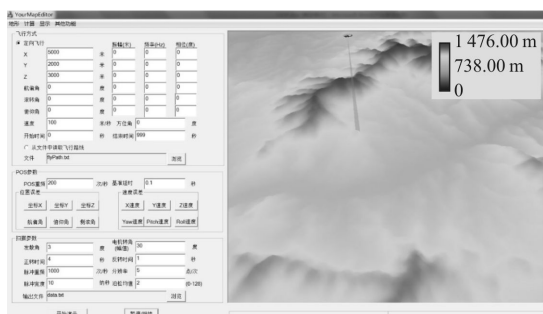


图 3 激光雷达仿真系统界面

Fig.3 Simulation system interface of LiDAR

仿真系统需要设定的主要参数包括:飞行平台飞行方向、姿态、速度及高度;定位定姿系统刷新率

及测量误差;激光发射脉冲重复频率及脉冲宽度;发射激光光束发散角及对应探测器分辨率;扫描电机扫描范围及扫描速度;系统安置误差等。

如图 4 所示为仿真平台获得的条纹图像仿真结果,通过数据处理模块对其进行处理,即可获得仿真的测绘结果。

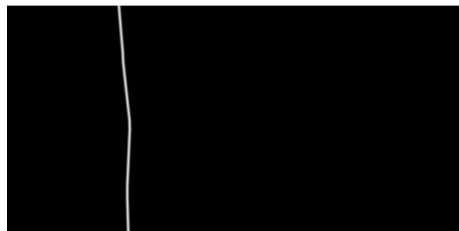


图 4 仿真条纹图像

Fig.4 Simulation of streak images

通过调整激光雷达系统的各项参数,观察仿真测绘结果。可指导激光雷达硬件的设计,并可实现机载激光雷达工作参数的优化。最终优化后的主要参数为:激光重频 1 000 Hz,扫描角度范围+30°,飞行高度 3 km,定位测姿系统工作频率 200 Hz,激光发散角 3°。

图 5 为进行仿真研究所使用的原始地形,图 6 为仿真测绘结果。由于仿真设定的扫描点密度较低,可以通过对比看出,仿真测绘结果分辨率与原始地形图相比有所降低,尤其在左下角的山峰区域较为明显。原始地形地面特征点密度优于 1000 点/km²,仿真结果

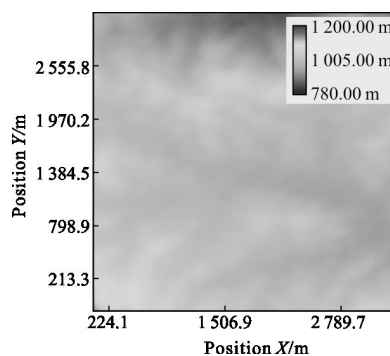


图 5 用于仿真的原始地形图

Fig.5 Original topographic map for simulation

地面扫描点密度 750 点/km²。仿真结果中可看出较明显的航带拼接痕迹,对同一目标的测绘结果与原始地图位置坐标存在约 60 m 的平面误差。但仿真测绘结果地形起伏特征与原始地形一致,且该位置偏移对于

整个测量区域是均匀的,因此可断定该平面偏移是由于激光雷达整机安置误差导致的系统误差。通过消除系统偏差后,对原始地形及测绘结果中地面相同特征目标的位置信息进行统计可获得新体制激光雷达的距离测量精度为 0.5 m。通过该仿真测绘实验,获得了外场飞行实验的主要工作参数。

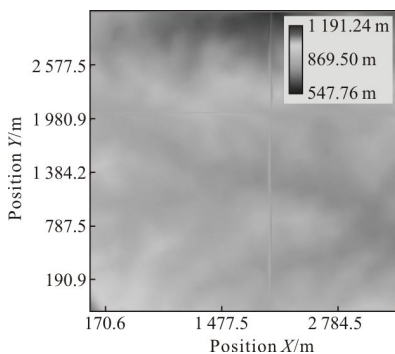


图 6 仿真得到的测绘结果

Fig.6 Simulation results of mapping

2 外场实验

通过仿真平台所得的相应工作参数,进行了外场机载飞行实验。外场实验按工作内容可分为任务规划、试验场建设、航空测绘外业、激光回波信号数据处理、系统误差检校及数据精度分析等六个实验流程。任务规划需要对测区进行分析,之后进行航线的规划。试验场建设需要对实验场进行设计的同时完成特征标靶的布设。最后选择天气状况良好,能见度较高的飞行窗口进行航空测绘。新体制激光雷达采集到的原始信号即条纹图如图 7 所示。

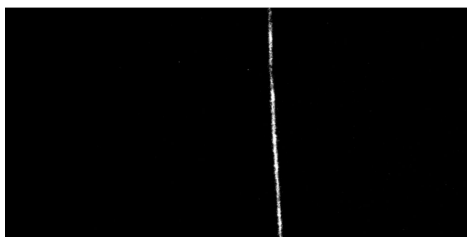


图 7 外场实验获得的条纹图

Fig.7 Streak images of field experiment

在获得条纹图像后,通过数据处理模块结合扫描信息、飞行平台位置及姿态信息、定标信息等进行激光回波信号的快速处理即可获得激光测绘点云数据。新体制激光雷达测绘获得的典型目标高程图如图 8 所示。

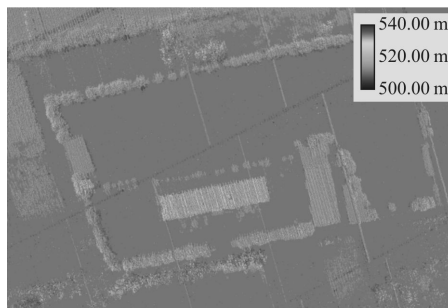


图 8 外场实验获得的高程图

Fig.8 Height map of field experiment

图 9 为对应目标的被动光学相机拍摄照片。通过对比可以看出,高程图中激光地面脚点分布密集且较为均匀。外场实验所得的高程图中可以清晰地看到建筑物以及周围的田地和树木等细节信息。高程图中还包含影像照片中无法得出的高程信息,这非常有利于目标的识别及相关的测量。



图 9 外场实验对应区域被动光学相机成像图像

Fig.9 Passive optical camera image of field experiment

通过统计理想平面目标如平顶楼房房顶及平地目标高程离散的方法,反推获得新体制激光雷达外场实验结果的测距精度优于 1 m,能够满足高效率、高精度机载三维测绘的需要。机载飞行实验测距精度结果与仿真分析结果一致,也验证了该仿真系统的正确性。

外场实验的结果证明了“扫帚”扫描结合条纹原理阵列探测的新体制激光雷达工作可行性。该种新体制的激光雷达在机载测绘、资源监测等领域具有广阔的应用前景。

3 结论

提出了“扫帚”扫描结合条纹原理阵列探测的新体制激光雷达,根据其工作原理建立了新体制激光雷达的仿真平台。利用仿真平台对该激光雷达开展了测绘仿真实验,仿真的距离测量精度为 0.5 m。利

用仿真结果获得了外场实验的相关工作参数,开展了新体制激光雷达的机载测绘成像实验,并获得了典型目标的激光点云数据及高程图。新体制激光雷达外场实验结果的测距精度优于1 m,高程图中激光地面脚点分布密集且较为均匀,可以清晰分辨建筑物等细节信息,能够满足高效率、高精度机载三维测绘的需要,证明了“扫帚”扫描结合条纹原理阵列探测的新体制激光雷达工作可行性。所得到的研究结果也表明新体制激光雷达在航空测绘、资源监测等方面具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] Zhao Yongyan, Zhang Jinliang. Primary detection of airborne laser radar mapping technology [J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 2011, 31(4): 125-126. (in Chinese)
赵永艳, 张金良. 机载激光雷达测绘技术初探 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2011, 31(4): 125-126.
- [2] Zhang Qingyuan, Li Li, Li Quanxi, et al. Comprehensive information processing system of helicopter anticollision laser radar [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(2): 80-87. (in Chinese)
张清源, 李丽, 李全熙, 等. 直升机防撞激光雷达综合信息处理系统[J]. 中国光学, 2013, 6(2): 80-87.
- [3] Yan Jie, Ruan Youtian, Xue Peiyao. Active and passive optical image fusion technology [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(3): 378-385. (in Chinese)
严洁, 阮友田, 薛佩瑶. 主被动光学图像融合技术研究[J]. 中国光学, 2015, 8(3): 378-385.
- [4] He Weiji, Sima Boyu, Miao Zhuang, et al. Correction of reversal errors in photon counting 3D imaging lidar [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(10): 2488-2494. (in Chinese)
何伟基, 司马博羽, 苗壮, 等. 光子计数三维成像激光雷达反转误差的校正[J]. 光学精密工程, 2013, 21(10): 2488-2494.
- [5] Guo Yulan, Wan Jianwei, Lu Min, et al. Three dimensional orientation estimation for lidar target [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(4): 843-850. (in Chinese)
郭裕兰, 万建伟, 鲁敏, 等. 激光雷达目标三维姿态估计[J]. 光学精密工程, 2012, 20(4): 843-850.
- [6] Wu Huayi, Song Aihong, Li Xinke. Review on Post-processing of A irborne Lidar Data[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2006, 29(3): 58-63. (in Chinese)
吴华意, 宋爱红, 李新科. 机载激光雷达系统的应用与数据后处理[J]. 测绘与空间地理信息, 2006, 29(3): 58-63.
- [7] Wu Lijuan, Li Li, Ren Ximing. 3D imaging simulation of APD arrays laser radar system based on Geiger mode [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(11): 2180-2186. (in Chinese)
吴丽娟, 李丽, 任熙明. 盖革模式 APD 阵列激光雷达的三维成像仿真[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(11): 2180-2186.
- [8] Li Fan, Wu Shuangyang, Yang Hongguo, et al. Multi-element array detecting technology of lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(4): 295-299. (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(4): 295-299.
- [9] Yang Chenhua, Zhang Yong, Zhao Yuan. Enhancement of heterodyne efficiency of heterodyne LADAR system with APD array detector based on array lighting [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(10): 3269-3275. (in Chinese)
杨成华, 张勇, 赵远. 基于点阵照明的 APD 阵列外差激光雷达外差效率的提高 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(10): 3269-3275.
- [10] Ge Mingda, Sun Jianfeng, Wang Tianjiao, et al. Denoising methods for streak tube imaging lidar range image based on contrast -modulation method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(6): 1448-1452. (in Chinese)
葛明达, 孙剑峰, 王天娇, 等. 基于对比度调制法对条纹管激光雷达距离像的去噪方法 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(6): 1448-1452.
- [11] Zhang Yong, Cao Xibin, Wu Long, et al. Experimental research on small scale risley prism scanning imaging laser radar system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(8): 0814001. (in Chinese)
张勇, 曹喜滨, 吴龙, 等. 小面阵块扫描激光成像系统实验研究[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0814001.