

# 条纹管激光雷达回波噪声特性研究

董志伟 张瑞环 张伟斌 陈默然 李旭东 樊荣伟 闫仁鹏 陈德应 于欣 王正国

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** 波形采样机载激光雷达具备多层目标探测及高精度三维测绘能力,是今后激光雷达技术的发展趋势。基于条纹原理的阵列探测体制激光成像雷达由于具备全波形回波数据采样能力及高集成度等特点,在激光测绘及探测中具有广阔的应用前景。介绍了一种基于条纹原理的全波形采样面阵探测体制的新型激光雷达系统,提取了新型激光雷达机载飞行实验回波信号中的噪声,获得了新型激光雷达回波噪声统计规律,通过与目标总体回波信号统计特性的对比,提出了新型波形采样激光雷达回波信号去噪方法。

**关键词** 遥感; 波形采样; 条纹原理; 机载激光雷达; 噪声特性

**中图分类号** TN958.98 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.0928001

## Noise Features in Streak Tube Lidar Echo Signal

Dong Zhiwei Zhang Ruihuan Zhang Weibin Chen Moran Li Xudong

Fan Rongwei Yan Renpeng Chen Deying Yu Xin Wang Zhengguo

*National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser, Harbin Institute of Technology,  
Harbin, Heilongjiang 150001, China*

**Abstract** Waveform sampling lidar is the technical tendency in lidar technology in virtue of its high precision of three-dimensional geodesy and multi-layer target detection ability. Especially, array detection imaging lidar systems applying the streak tube principle have promising application prospect because of their full waveform sampling and high degree of integration. A new lidar system which is based on full waveform echo sampling and array detection of the streak tube is established to extract noise in echo signal of airborne flight experiments and summarize statistical properties of echo noise. A new denoising method for echo signal in waveform sampling lidar is proposed by comparing the different statistical properties between noise and echo signals.

**Key words** remote sensing; waveform sampling; streak principle; airborne lidar; noise features

**OCIS codes** 280.3640; 100.2960; 100.3008

## 1 引 言

激光雷达技术是基于激光测距原理并结合扫描及空间定位技术的新型测绘技术,可实现空间目标三维高精度位置信息的获取<sup>[1-2]</sup>。搭载在航空平台上的激光雷达具有布置灵活、测绘效率高等显著优点,已经在美国、欧盟及日本等发达国家和地区获得了广泛的应用。目前激光雷达已与光学相机、干涉合成孔径雷达(InSAR)并称为地理信息产业的三大核心装备<sup>[3-6]</sup>。

为进一步提升激光雷达测绘效率,阵列探测及多回波技术是目前激光雷达技术研究的重点,代表了今后激光雷达技术的发展趋势。尤其是近年来出现的基于条纹原理的激光雷达,不但具有集成度及灵敏度高的特点,还具备波形采样能力,可实现多层目标探测及高精度的三维测绘。该类激光雷达在机载测绘方面具有广阔的应用前景<sup>[7-10]</sup>。但目前基于条纹原理的新型激光雷达研究工作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研究在国内鲜有报道。

本文通过分析外场实验获得的条纹管激光雷达回波信号噪声的统计特性为该类新体制激光雷达的数据

**收稿日期:** 2016-01-25; **收到修改稿日期:** 2016-02-18

**基金项目:** 国家重大科学仪器设备开发专项资金(2012YQ040164)、黑龙江省自然科学基金(F2016015)

**作者简介:** 董志伟(1980—),男,博士,副教授,主要从事激光遥感及激光光谱等方面的研究。

E-mail: dong19809@163.com

处理提供必要的依据。介绍了一种基于条纹原理的阵列探测式新体制激光雷达。利用噪声提取技术对外场飞行实验获得的多回波信号噪声特性进行统计及分析,获得了新型激光雷达回波噪声统计规律。通过与目标总体回波信号统计特性的对比,提出了新型波形采样激光雷达回波信号的快速提取方法。

## 2 主要研究内容与结果

### 2.1 新体制机载激光雷达的工作原理及系统组成

基于条纹原理的阵列探测式激光雷达探测器的工作原理是条纹变像,即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空间内得以分离,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,如图1所示。由于斜坡电压可精确控制,该种探测器具有探测灵敏度及集成度高、可进行回波信号的波形采样等独特的技术优势。新体制机载激光雷达获得的条纹图横向对应地面不同位置目标的回波信号,纵向代表回波信号到达探测系统的时间,反映了该目标相对探测器的距离信息。由于探测系统输出的是高分辨率的数字灰度图像,图像纵向完整记录了一段时间内对应目标的时域回波波形信息,因此具有波形采样能力。

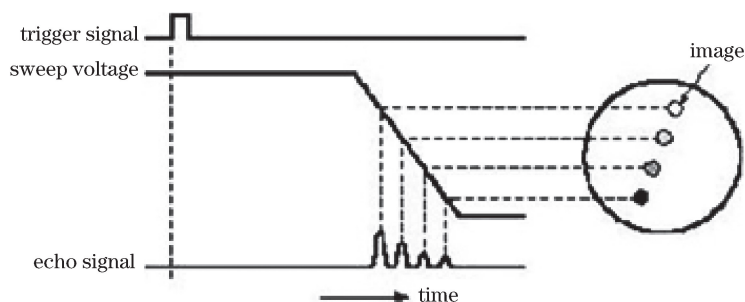


图1 新体制机载激光雷达探测原理

Fig. 1 Detection principle of the novel airborne lidar

新体制激光雷达系统主要包括激光发射系统、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组成部分。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,经发射光学系统整形为线状光斑,通过扫描系统后到达目标,由目标反射的回波经由接收光学系统被探测器接收,得到相应目标回波的条纹图像。结合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。控制系统在整个工作过程中对激光雷达各分系统进行同步控制。飞行平台自身运动由机载定位定姿系统(POS)进行实时监测。有关该新体制激光雷达的工作原理及系统组成可参考文献[11-12]。

该种新体制激光雷达具有测绘效率高、灵敏度高及全波形采样等技术优势,非常适合大面积复杂地面目标成像测绘及识别。

### 2.2 激光回波数据

图2所示为新体制激光雷达外场实验典型目标航空照片影像及采集到的激光回波信号。激光回波信号中横向代表回波信号到达探测器的时间即目标距离信息,纵向代表地面激光脚点相对激光扫描线的扫描线内张角,像素点的亮度代表回波信号的强度。由于外场实验中存在日光散射、探测器本底噪声等噪声来源,因此回波图像中存在随机分布的噪声点。

## 3 实验结果

### 3.1 外场实验

新体制激光雷达的外场实验为机载飞行实验。实验内容包括任务规划、实验场建设、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6个部分。选择天气状况良好,能见度较高的飞行窗口进行飞行实验。激光光源为Nd:YAG激光器,重复频率为1000 Hz,扫描角度范围为 $30^\circ$ ,飞行高度为3 km,POS系统工作频率为200 Hz,激光发散角为 $3^\circ$ ,探测系统输出图像分辨率为 $500 \text{ pixel} \times 1000 \text{ pixel}$ 。



图 2 新体制激光雷达外场实验目标图像。(a)航空照片;(b)回波信号

Fig. 2 Target image obtained by the new lidar in field experiment. (a) Aerophoto; (b) echo signal

### 3.2 回波信号噪声提取

在激光雷达系统正常工作条件下,由于目标回波信号平均亮度远大于噪声平均亮度,可通过设定合适的噪声阈值亮度来提取回波信号中的噪声。

图 3 所示为不同噪声阈值亮度下提取的回波信号噪声平均亮度值。阈值设定在 5000 以下提取的噪声平均亮度基本不变,而在阈值超过 5000 后,提取的噪声平均亮度显著增大。这是因为阈值设定过高会将部分目标回波误提为噪声。因此实验设定噪声提取阈值亮度为 1000,将回波图像中每列亮度值的和在 1000 以下的像素点作为可能的噪声点进行提取并分析其统计规律。

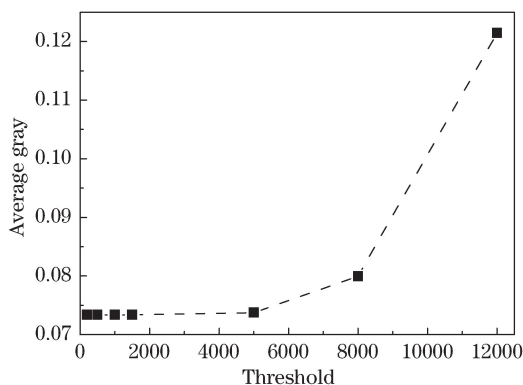


图 3 不同阈值提取的噪声平均亮度

Fig. 3 Average noise gray under different thresholds

### 3.3 信号噪声统计特性分析

利用选定的噪声阈值提取回波信号中的噪声,可获得不同亮度值对应的噪声点数量的统计分布情况。

根据来源不同,激光雷达回波信号噪声强度统计规律满足波尔兹曼、洛仑兹、高斯及泊松等函数分布<sup>[13]</sup>。图 4 所示为对外场实验采集到的 50000 幅激光回波图像进行统计分析获得的噪声强度统计分布条形图及其统计规律拟合曲线(图中红色实线)。表 1 所示为各种拟合函数对应的拟合结果。可见噪声统计规律更接近波尔兹曼或洛仑兹分布。因此探测器的暗电流噪声及热噪声为新体制波形采样激光雷达的主要噪声来源。

## 4 目标信号与噪声统计特性对比

利用前文方法,可对外场实验采集到的所有回波信号进行强度统计特性分析。结果如图 5 所示。

从图 5 可以看出,回波灰度值数量分布存在两个较为明显的峰值,一个峰值位于零亮度值附近,分布规律与前文中的提取噪声分布特性相同,因此为回波噪声统计分布;另一个峰值位于亮度值 40 附近,为地面目标回波信号的强度分布特性。两个强度峰值亮度值存在明显差异,因此可通过引入合适的强度门限阈值去除回波信号的噪声。实验合适的单点噪声门限阈值可设定在亮度值 10 附近。

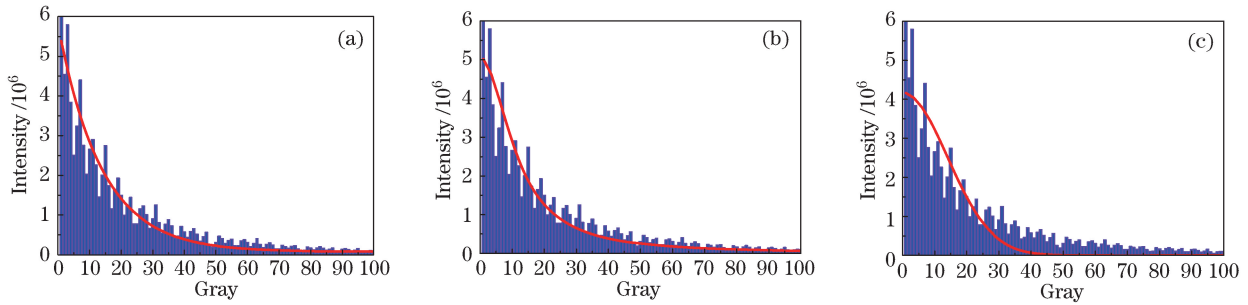


图 4 噪声强度统计分布图及拟合结果。(a)波尔兹曼拟合;(b)洛仑兹拟合;(c)高斯拟合  
Fig. 4 Statistical distributions of noise intensity and fitting results. (a) Boltzmann fitting;  
(b) Lorentz fitting; (c) Gauss fitting

表 1 不同函数拟合相关系数

Table 1 Correlation coefficients for different fitting functions

Fitting function	Boltzmann	Lorentz	Gauss
Correlation coefficient	0.93	0.92	0.83

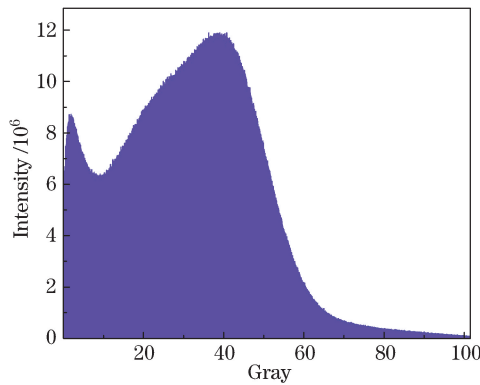


图 5 回波信号强度统计结果  
Fig. 5 Statistical result of echo signal intensity

在波形采样激光雷达回波信号处理过程中,可先对少量回波信号进行统计分析,由此获得噪声门限阈值。基于噪声门限阈值,可实现波形采样激光雷达回波信号的快速去噪。新体制波形采样激光雷达外场实验的结果分析证明基于条纹原理的波形采样激光雷达信号与噪声具有不同的强度统计特性,在该体制激光雷达的数据处理中可通过设定合适的强度门限阈值进行回波信号的快速提取。

## 5 结 论

提出了基于条纹原理的新体制波形采样激光雷达。通过对部分外场飞行实验采集到的激光回波图像进行统计,获得了新体制波形采样激光雷达回波噪声的统计规律,证明了探测器暗电流噪声及热噪声等为回波噪声主要来源。通过与信号强度统计规律的对比,证明了利用强度门限阈值去除回波噪声的合理性。该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.  
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 Yonghe. A brief introduction of airborne laser technology [J]. Meteorological, Hydrological and Marine Instruments, 2009, 26(2): 13-16.  
张永合. 浅谈机载激光测深技术[J]. 气象水文海洋仪器, 2009, 26(2): 13-16.

- 3 Wu Huayi, Song Aihong, Li Xinke. Review on post-processing of airborne lidar data [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2006, 29(3): 58-63.  
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技术[J]. *测绘与空间地理信息*, 2006, 29(3): 58-63.
- 4 Wei Jingsong. Research of streak tube laser 3D imaging technology[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.  
魏靖松. 条纹管激光三维成像技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- 5 Xu Qiang, Wang Haiyan, Wang Fang, *et al.* Identifying moving target from background with airborne laser multi-pulse stretching[J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(12): 1336-1340.  
徐 强, 王海晏, 王 芳, 等. 机载激光多脉冲展宽识别运动目标和地面背景[J]. *激光和红外*, 2013, 43(12): 1336-1340.
- 6 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.  
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.
- 7 Chen Yuwei, Zhang Li, Hu Yihua, *et al.* Array detection technology of echo on earth observation laser imager[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2004, 23(3): 169-171.  
陈育伟, 张 立, 胡以华, 等. 对地观测激光成像的回波阵列探测技术[J]. *红外与毫米波学报*, 2004, 23(3): 169-171.
- 8 Li Fan, Wu Shuangyang, Yang Hongguo, *et al.* Multi-element array detecting technology of radar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(2): 295-299.  
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): 295-299.
- 9 Zhao Wen, Han Shaokun. Range resolution of a streak tube imaging lidar system[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(7): 0714004.  
赵 文, 韩绍坤. 条纹管成像激光雷达距离分辨率[J]. *中国激光*, 2013, 40(7): 0714004.
- 10 Zhang Yong, Cao Xibin, Wu Long, *et al.* Experimental research on small scale Risley prism scanning imaging laser radar system[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(8): 0814001.  
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.
- 11 Dong Yan. Study on the impaction of detector noise on the accuracy of laser mapping[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.  
董 岩. 探测器噪声对激光测绘精度影响的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- 12 Dong Zhiwei, Zheng Liwei, Fan Guoxiang, *et al.* The impaction of SNR for mapping accuracy of radar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(s2): s228002.  
董志伟, 郑立威, 范国祥, 等. 回波信噪比对激光雷达测绘精度的影响[J]. *光学学报*, 2014, 34(s2): s228002.
- 13 Xie Guangyong. Noise analysis for optoelectronic detector[J]. *Information Technology*, 2008(11): 8-10.  
解光勇. 光电探测器噪声特性分析[J]. *信息技术*, 2008(11): 8-10.