

基于线阵 APD 探测器的脉冲式一维非扫描激光雷达系统

郑睿童, 吴冠豪

(清华大学 精密仪器系 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 介绍了非扫描激光雷达的原理, 描述了研制的基于线阵 APD 雪崩光电二极管的一维非扫描激光雷达系统。该系统使用线阵 APD 作为探测器, 红外脉冲式纳秒激光器作为探测光源, 利用飞行时间法实现了目标的一维距离图像的非扫描测量。系统使用了 APD 多通道并行前置放大电路, 并利用模拟开关控制高速继电器进行多通道轮询切换, 实现了 APD 阵列的多通道驱动, 并有效地降低了通道间的串扰。进行了多组 6~18 m 的一维距离成像实验, 结果表明系统的距离分辨率优于 10 cm, 各通道的平均测距标准偏差约为 8.6 cm。该系统的设计为将来的面阵 APD 二维非扫描激光雷达的研制奠定了基础。

关键词: 非扫描激光雷达; 线阵 APD; 脉冲式激光测距

中图分类号: TN247 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2012)01-0096-05

Pulsed one-dimensional scannerless LiDAR system based on linear APD array

Zheng Ruitong, Wu Guanhao

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments,
Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The principle of scannerless LiDAR was introduced. The developed one-dimensional scannerless LiDAR system based on linear APD was described. Linear array APD and infrared pulsed nanosecond laser were employed as detector and probe light source respectively. By using the time-of-flight pulsed laser ranging technique, the one-dimensional scannerless distance image of the target could be obtained. Parallel multi-channel pre-amplifiers were implemented and high-speed relays were used to switch between channels, by which, the isolation of channels were improved effectively. Several groups of one-dimensional distance imaging experiments were carried out. The results illustrate that the resolutions of multi-channel distance imaging are better than 10 cm and the average standard deviation for channels is approximate to 8.6 cm. The design in this system provides the basis on developing the two-dimensional scannerless LiDAR by APD planar array.

Key words: scannerless LiDAR; linear APD; pulsed laser ranging

收稿日期: 2011-05-12; 修订日期: 2011-06-30

基金项目: 国家自然科学基金(40801123)

作者简介: 郑睿童(1985-), 男, 博士生, 主要从事激光雷达方面的研究工作。Email: zrt08@mails.tsinghua.edu.cn

0 引言

激光雷达(LiDAR)技术被广泛应用于地表形貌测绘、军事侦查、大气探测、空间技术、三维虚拟现实、机器人视觉等领域^[1]。传统的飞行时间法(TOF)脉冲式激光雷达测量激光发射脉冲及接收脉冲之间的时间差,再乘以光速,就可以得到被测物体的距离信息^[2]。如果配合扫描镜系统^[3],就可以进一步得到被测物体的三维形貌信息。非扫描激光雷达的发射光脉冲视场对应于整个阵列探测器的接收视场,每发射一个激光脉冲,探测器阵列上的所有单元都可以接收到回波信号,从而得出距离信息,实现了并行测量,大大提高了激光雷达的测量效率。基于 ICCD(Intensified CCD)的非扫描激光雷达对照明光源功率要求高,只能用于近距离三维成像^[4]。基于 APD 阵列^[5]的非扫描激光雷达具有响应时间快、灵敏度高的特点,可以应用于机载或星载激光雷达系统。美国林肯实验室将计时电路集成进入 APD 阵列中^[6],实现了高精度高集成度的非扫描激光雷达系统,对军事及国防领域具有重要意义。

国内已有相关的基于 APD 探测器的脉冲式激光雷达的原型样机的研究报道^[7],并已经展开了基于 APD 阵列的非扫描激光雷达的相关研究,但大多数仅局限于理论分析和计算^[8]。

文中设计并建立了一套基于线阵 APD 阵列的红外脉冲式非扫描激光雷达系统。首先介绍了线阵 APD 非扫描激光雷达的原理及系统构成;然后介绍了 APD 多通道驱动技术及光学系统设计;在此基础上进行了近距离一维距离成像实验,并对实验结果进行了分析;最后进行了总结和展望。

1 线阵非扫描激光雷达系统

基于线阵 APD 探测器的脉冲式非扫描激光雷达系统(LLiDAR10)是在较早研制的脉冲式激光测距系统 PD-LRF20^[9]的基础上建立起来的。LLiDAR10 采用线阵 APD 作为探测元件,其每个通道都相当于一个独立的基于飞行时间法 TOF 的脉冲式激光测距系统。系统测量发射激光脉冲与被测目标激光漫反射回波之间的时间差,根据公式(1)可以计算出被测目标的实际距离为:

$$D = C\Delta T/2 \quad (1)$$

式中: D 为所测距离; C 为光速; ΔT 为时间差。

图 1 为自主研制的 LLiDAR10 原理示意图(省略了信号处理电路部分)。激光发射器是波长为 1064nm 的脉冲式半导体泵浦 Nd:YAG 激光器(MPL-H-1064)。激光脉冲宽度约为 10 ns,单脉冲能量约为 100 μ J。受主板触发信号的控制,激光发射器发出频率为 1 kHz 的激光脉冲。发射激光脉冲经过柱面发射镜和分光镜,分别射向 PIN 光电二极管接收器和被测目标。PIN 接收器接收到发射脉冲后,产生 START 信号,时间测量单元(TDC Unit)开始计时。APD 接收器接收到经被测目标漫反射的激光脉冲回波后,产生 STOP 信号 TDC 停止计时。这样,APD 阵列上的每个单元就都得到了 STOP 与 START 之间的时间差,从而可以通过公式(1)计算出每个 APD 单元所测量的距离信息。LLiDAR10 使用 1 \times 16 线阵 APD 作为探测元件,因此可以直接得到被测目标的一维距离图像信息。

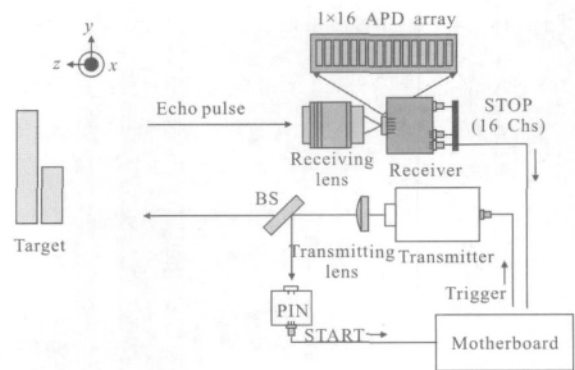


图 1 线阵非扫描激光雷达系统 LLiDAR10

Fig.1 Linear scannerless LiDAR system-LLiDAR10

2 LLiDAR10 关键技术

线阵 APD 多通道驱动模块使 LLiDAR10 具有多通道并行测量能力。同时,使用了通用的照像机镜头作为接收镜,使得 LLiDAR10 的光学系统更加稳定和紧凑。

2.1 线阵 APD 多通道驱动模块

图 2 为线阵 APD 多通道驱动模块原理示意图。线阵 APD 上的 16 个 APD 单元都有一个独立的高速、宽带前置放大通路与其对应。16 路的输出信号通过多通道选择模块实现分时输出。为了降低通道

之间的串扰,采用 16 个高隔离度、高速继电器(Omron G6Y)作为通道的开关。单片机(MCU)控制译码器及高速模拟开关实现 16 个通道的轮询输出。每路回波脉冲依次通过数字可控增益放大模块(VGA)、恒定比时点鉴别模块(CFD)及时间测量单元(TDC),最后得到数字化的时间差信息。上位机(PC)通过串口与 MCU 通信,进行数据采集。最后使用 Matlab 进行数据处理与分析。

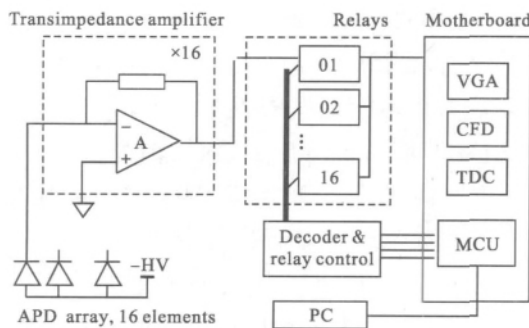


图 2 线阵 APD 多通道驱动原理示意图

Fig.2 Diagram of multi-channel driver for linear APD array

VGA 模块借助峰值保持电路(S/H)探测回波峰值,使用 MCU 上的低速模数转换器便可实现纳秒级脉冲的峰值检测。MCU 通过通用 IO 接口实现对 VGA 的增益控制。VGA 作为一级主放大器,不仅增加了 LLiDAR10 的最大探测距离,还同时扩大了探测动态范围。

CFD 模块将回波脉冲分成两路信号,一路使用电阻网络衰减,另一路使用脉冲延迟电路延迟,用这两路信号的脉冲上升沿的交叉点产生 TDC 计时开始或结束的触发信号。CFD 模块产生不依赖于回波幅值的 TDC 计时点触发信号,显著减小了因回波脉冲幅值变化所造成的测距误差。

TDC 模块使用 TDC-GP2 测量时间间隔。TDC-GP2 利用内部参考时钟作为粗计数器,利用脉冲门延迟作为精细计数器,将时间测量分辨率提高到 65 ps,使得 LLiDAR10 的理论测距分辨率达到 1 cm。

2.2 发射与接收光学系统

使用尼康的 300 mm, $F/2.8$ 的定焦镜头作为接收透镜,使得线阵 APD 的接收视场角约为 19 mrad。为了在较近距离时线阵 APD 的视场与激光光斑有一定的重合区域,使用柱面镜将红外脉冲式激光器

发出的激光脉冲展宽成与地面平行的直线,即与图 1 中 xz 平面平行。水平发散角约为 38 mrad,竖直发散角约为 1 mrad。

3 成像实验

为了初步验证 LLiDAR10 的系统性能,分别进行线阵 APD 的一维距离成像实验及线阵 APD 对台阶的一维成像实验。实验的装置图可以参考图 1。

3.1 一维距离成像标定

在线阵 APD 距离成像标定实验中,用一个蒙上白纸的纸箱作为被测目标。将被测目标沿图 1 中定义的 z 方向从 6.3 m 到 18.4 m 移动 25 个不同的位置,每个位置间隔约 50 cm。在每个位置处,将精度为 1 mm 的商用相位式激光测距仪(HILTI PD30)测量的距离作为真值,将 LLiDAR10 各通道的距离信息作为测量值。图 3 为使用相位式测距仪对通道 CH08 的标定结果,其他通道结果类似。

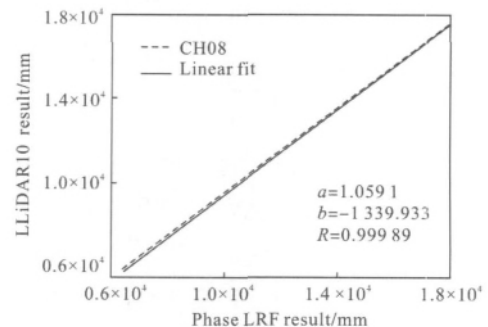


图 3 通道 8 的标定结果

Fig.3 Calibration result of CH08

图 3 中,横轴为真值(x),纵轴为 CH08 的测量值(y)。使用最小二乘法对 CH08 在 25 个不同位置的测量值进行了线性拟合: $y=ax+b$ 。由线性相关系数(R)可以看出,CH08 的线性度非常好。同理,对其他 15 个通道都进行相同的标定,其中线性度最差的通道为 CH11, $R=0.98712$ 。

同时,还计算了 16 个通道的测量值与拟合值的偏差: $y_i-(ax_i+b)$,其中, i 代表不同的测量位置的序号。结果如图 4 所示。

图 4 中,横轴为测量的 25 个位置的真值,纵轴为测量值与线性拟合值的偏差,每个曲线对应一个通道。可以明显看出通道 CH11(图 4 中的圆圈曲线)

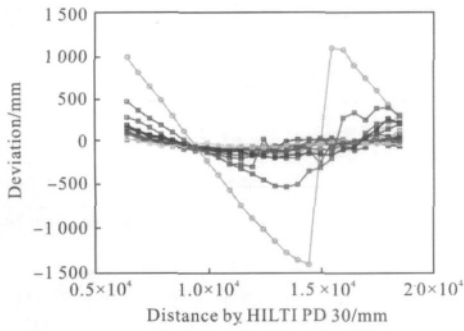


图 4 各通道测量值与拟合值的偏差

Fig.4 Deviation between measured data and linear fit data for every channel

的偏差远大于其他通道。在示波器上观察通道 CH11 的波形,可以发现有较强的预脉冲,即在主脉冲到来之前的一个与主脉冲反向的脉冲。在 LLiDAR10 系统中,每个通道都有独立的高速前置放大链路,可能由于 PCB 布线的缺陷或输出级的阻抗不匹配等原因导致通道 CH11 的波形畸变,从而造成恒定比时点鉴别模块 CFD 错误地判断了计时点,导致 TDC 的误触发,产生测距的粗大误差。

由于通道 CH11 明显存在粗大误差,将该通道舍去后,在剩余的 15 个通道中计算测量值与拟合直线的偏差的标准差,可得最大值为 $\sigma_{CH16} = 333.4 \text{ mm}$,最小值为 $\sigma_{CH13} = 25.1 \text{ mm}$,平均值为 $\sigma_{\text{mean}} = 98.5 \text{ mm}$ 。

3.2 一维距离成像结果

一维距离成像实验与标定实验条件相同,不同的是间隔取为 1 m。使用 3.1 节所述的标定实验数据求出的 a, b 参数对一维距离成像实验的数据进行消除系统误差的计算: $x' = (y - b)/a$, 其中, x' 为消除系差之后的值, y 为测量值。计算得出的所有 16 个通道在 12 个不同位置的一维距离像如图 5 所示。

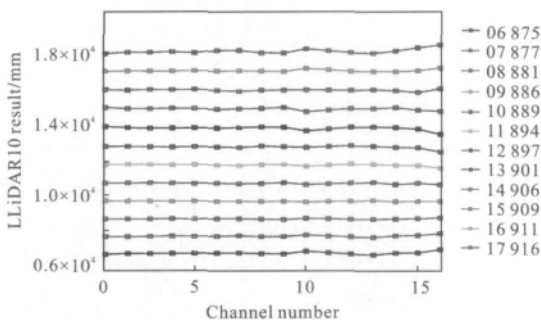


图 5 线阵 APD 一维距离成像结果

Fig.5 One-dimensional distance image by linear APD

图 5 中,横轴为通道的编号,纵轴为测量的距离值。每个位置对应的由相位式测距仪测得的真值标在图右侧的图例中。如 3.1 节所述,通道 CH11 存在粗大误差,所以使用相邻的通道 CH10 与 CH12 的平均值来代替通道 CH11 的测量值。

为了进一步的定量考察每个通道的误差,计算除通道 CH11 外的 15 个通道测量值与真值的差的标准差:最大值为 $\sigma_{CH16} = 272.3 \text{ mm}$;最小值为 $\sigma_{CH13} = 24.8 \text{ mm}$;平均值为 $\sigma_{\text{mean}} = 85.7 \text{ mm}$ 。为了考察重复性,在相同条件下进行了第三组实验。同样地,不包含通道 CH11,计算得出:标准差最大值为 $\sigma_{CH16} = 277.8 \text{ mm}$;最小值为 $\sigma_{CH13} = 24.6 \text{ mm}$;平均值为 $\sigma_{\text{mean}} = 85.6 \text{ mm}$ 。

3.3 一维距离成像极限分辨率

为了得到距离成像的极限分辨率,将被测目标从 15.9 m 到 16.2 m、间隔约 5 cm、移动 6 个不同的位置。图 6 所示为一维距离成像的实验结果。

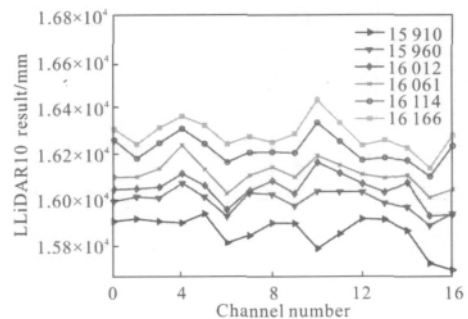


图 6 线阵 APD 的距离成像极限分辨率

Fig.6 Minimum distance image resolution of linear APD

图 6 中,横轴为通道的编号,纵轴为测量的距离值,6 条曲线分别表示被测物体在 6 个不同位置时的一维距离图像信息,其中通道 CH11 的值由相邻两个通道的平均值代替。可以看出,6 条曲线基本相互分开。计算了除通道 CH11 外的 15 个通道测量值与真值的差的标准差,最大值为 $\sigma_{CH10} = 137.3 \text{ mm}$,最小值为 $\sigma_{CH12} = 24.2 \text{ mm}$,平均值为 $\sigma_{\text{mean}} = 61.1 \text{ mm}$ 。

为了进一步说明极限距离分辨率的重复性,将此实验在相同条件下又进行了两组。在重复性实验中,出现了个别通道在相邻位置曲线有相交的情况,即个别通道的分辨率低于 5 cm。但是,在三组重复性实验中,所有 16 个通道的间隔约 10 cm 的两条曲线都是明显分开的。综上,估计出 LLiDAR10 的一维距

离成像极限分辨率优于 10 cm。

3.4 台阶一维距离成像

为了测试 LLiDAR10 系统的一维距离成像效果,在 16 m 附近对两个纸盒拼成的约 20 cm 的台阶做了一维距离成像实验,如图 7 所示。

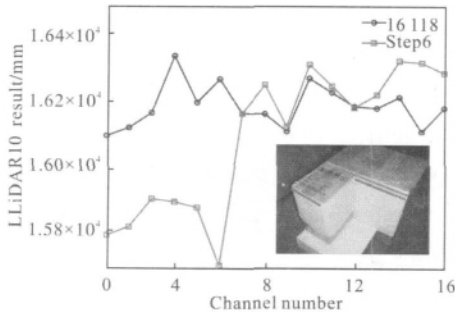


图 7 线阵 APD 台阶一维距离成像

Fig.7 Step one-dimensional distance image by linear APD

图 7 中,横轴为通道的编号,纵轴为测量的距离值,方块曲线表示被测台阶表面的一维距离轮廓,圆圈曲线表示移走前面的纸盒后,后面纸盒的表面一维距离轮廓。同样地,通道 CH11 的值由相邻两个通道的平均值代替。图 7 的右下角为用两个纸盒拼成的被测台阶的实际照片。可以看出,测量得出的台阶一维距离轮廓在台阶分界处跃变明显,在台阶的下面表处(距离值较大处),两条曲线重合较好。

4 结束语

文中设计并建立了一套基于线阵 APD 的脉冲式一维非扫描激光雷达系统,在 6~18 m 的范围内,初步测试了系统的一维距离成像能力。实验结果表明:系统的距离分辨率优于 10 cm,各通道的测距平均标准差约为 8.6 cm。系统中的 APD 多通道驱动等技术为今后的面阵 APD 二维非扫描激光雷达的研制奠定了基础。为了使系统更加实用,进一步扩大测量范围,今后会在两个方面做出改进:(1)使用望远镜作为光学接收系统,使线阵 APD 的接收视场角尽可能小,这样就不需要对发射激光脉冲进行过度地扩束,从而提高了激光能量的利用率;(2)需要优化电路的设计,提高 APD 放大链路的灵敏度,并将正在使用的探测中心波长为 905 nm 的线阵 APD 更换

为中心波长为 1 064 nm 的 APD 阵列,使其与激光器的中心波长相匹配。

参考文献:

- [1] Wang Jianyu, Hong Guanglie. Technologies and applications of laser active remote sensing [J]. *Laser & Infrared*, 2006 (S1): 742-748. (in Chinese)
王建宇,洪光烈. 激光主动遥感技术及其应用 [J]. 激光与红外, 2006(S1): 742-748.
- [2] Li Mi, Song Yingsong, Yu Jing, et al. High precision laser pulse distance measuring technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(8): 1469-1473. (in Chinese)
李密,宋影松,虞静,等. 高精度激光脉冲测距技术 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(8): 1469-1473.
- [3] Aloysius Wehr, Uwe Lohr. Airborne laser scanning an introduction and overview [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 1999, 54: 68-82.
- [4] Jiang Yanbing. Array imaging three dimensional lidar [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009. (in Chinese)
姜燕冰. 面阵成像三维激光雷达 [D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- [5] Heikki Ailisto, Veli Heikkinen, Risto Mitikka, et al. Scannerless imaging pulsed-laser range finding [J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2002, 4: S337.
- [6] Heinrichs, R M, Aull, B F, Marino, R M, et al. Three-dimensional laser radar with APD arrays [C]//*Laser Radar Technology and Applications VI*, 2001, 4377: 106-117.
- [7] Hu Chunsheng. Investigation into the high-speed pulsed laser diode 3D-imaging lidar [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005. (in Chinese)
胡春生. 脉冲半导体激光器高速三维成像激光雷达研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2005.
- [8] Liu Xiaobo, Li Li. Design of the optical system of flash lidar based on an APD array [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(5): 893-896. (in Chinese)
刘晓波,李丽. 基于 APD 阵列的闪光雷达光学系统设计 [J]. 红外与激光工程, 2009, 38(5): 893-896.
- [9] Zheng Ruitong, Wu Guan hao. Infrared pulsed semiconductor laser range finder [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(S): 134-138. (in Chinese)
郑睿童,吴冠豪. 红外半导体脉冲激光测距系统 [J]. 红外与激光工程, 2010, 39(S): 134-138.