

## 用 PIN 探测器进行激光雷达参考光检测

徐正平, 金灿强, 俞 乾, 徐宝腾, 白启帆, 张 翼, 董艳芳, 孙大林

(中国科学院苏州生物医学工程技术研究所, 江苏 苏州 215163)

**摘 要:** 可靠准确的参考光检测是提高直接测距型激光主动成像系统测距精度的关键因素之一, 对基于 PIN 探测器的参考光检测电路设计进行了深入研究。首先, 对比分析了雪崩光电二极管(APD)和 PIN 光电二极管性能及其供电电路的难度。综合考虑参考光功率稳定特性及参考光光路设计难度, 选择 PIN 探测器进行激光雷达参考光检测。详细分析了高压集成芯片 LT3482 作为常规电源和利用电流监测模式驱动 PIN 探测器时的差别。选择高增益带宽积跨阻放大器 OPA657N 实现 PIN 探测器电流电压转换, 对其关键外围元件参数的选取进行了详细分析。同时介绍了超高速比较器 MAX9601 的应用注意事项。最后, 设计了电路板并进行实验验证。结果表明: 对脉冲为 10 ns 的激光光源, 当 PIN 探测器施加 89.449 V 的偏置电压时, 其输出电流信号经跨阻放大器后电压幅值达到 -3.7 V, 可保证起始信号可靠检出, 但脉冲展宽为 15 ns。整个模块可有效给出参考光对应的计时起始信号。基于集成高压芯片驱动的 PIN 探测器配合恒定阈值时刻鉴别方法在直接测距型激光主动成像系统参考光检测中是切实可行的。

**关键词:** 激光成像系统; 参考光束; PIN 探测器

**中图分类号:** TN958.98 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1020002

## Detection of reference beam in ladar with PIN detector

Xu Zhengping, Jin Canqiang, Yu Qian, Xu Baoteng, Bai Qifan, Zhang Yi, Dong Yanfang, Sun Dalin

(Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215163, China)

**Abstract:** Accurate detection of reference beam was one of the key factors to enhance the ranging accuracy in the laser active imaging system with direct ranging. The circuit design of detection of reference beam based on PIN detector was researched in detail. Firstly, the comparative analysis of performance and difficulty of power supply circuit between avalanche photodiode (APD) and PIN photodiode was conducted. Considering the power stability and designing difficulty of the reference beam, the PIN detector was selected to detect the reference beam in ladar. Two modes including normal power and current monitor existed in LT3482, and the difference when used to drive PIN detector was analyzed deeply. The transimpedance amplifier OPA657N with high gain-bandwidth product was used to convert the current of PIN detector to voltage, and the selection method of key external components was introduced. Also, points for attention in usage of MAX9601 were given. At last, the circuit was designed for experimental verification. The results show that voltage converted from the current of PIN detector

收稿日期: 2018-05-05; 修订日期: 2018-06-03

基金项目: 吉林省科技发展计划(20150204022GX)

作者简介: 徐正平(1983-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事电子学设计方面的研究。Email: xuzp090@163.com

through transimpedance amplifier is  $-3.7\text{ V}$  when the pulse width of laser is  $10\text{ ns}$  and bias voltage applied to the PIN detector is  $89.449\text{ V}$ . The pulse width of voltage is extended to be  $15\text{ ns}$ , but the starting signal is ensured to be detected. The timing discrimination signal according to the reference beam could be given effectively by the module. PIN detector based on integrated high-voltage chip combined with constant threshold timing discrimination was feasible in direct ranging laser active imaging system detection of reference beam.

**Key words:** laser imaging system; reference beam; PIN detector

## 0 引言

激光主动成像系统采用激光对目标进行主动照明以获取目标的距离信息<sup>[1-3]</sup>,具有较高的角度、距离和速度分辨率,能够提供目标的角-角-距-灰度-速度信息,可抗电子战、反辐射导弹、抗低空突防及隐身目标,其体积质量小,因此被广泛应用于制导、空间交会对接、水下探测、直升机防撞、战场侦察、隐藏目标识别、高速公路维护、海岸线探测、植被分布、电力巡线、城市及大气精细建模等领域<sup>[4-12]</sup>。依据成像体制不同,激光主动成像系统分为相干测距型和直接测距型。相比于相干测距型,直接测距型测距精度稍低,但其结构简单,易于实现,应用更为广泛<sup>[13-14]</sup>。

测距精度是激光主动成像系统的关键指标之一。直接测距型激光主动成像系统是由脉冲激光器发射一束窄脉冲激光照射目标,采用光电探测器分别感应参考激光脉冲和被目标反射回来的回波激光脉冲,通过光电效应转化为电压或电流信号,测量参考光脉冲和回波光脉冲之间的时间间隔确定脉冲飞行时间,最后得到目标距离。可靠准确地捕获参考光脉冲和回波光脉冲并得到计时起止时刻是提高测距精度的关键。常用于探测激光的传感器包括雪崩光电二极管(Avalanche Photodiode, APD)和 PIN 光电二极管。相比于 PIN 光电二极管,APD 探测器灵敏度高、响应时间短,更适合微弱激光信号的探测,但缺点是工作电压高,且需要复杂的温度补偿电路,成本较高。考虑激光主动成像系统对远距离目标成像时,回波信号功率很低,常利用 APD 对微弱光信号的探测能力实现回波信号的检测。参考光功率一般较大,

且一致性较好,可采用 APD 探测器或 PIN 光电二极管检测<sup>[15]</sup>。

文中分析对比了 APD 探测器和 PIN 光电二极管性能,综合考虑参考光的功率稳定性、探测器供电需求、探测器增益、有效感光面积等因素,提出采用基于 DC-DC 变换的集成芯片驱动 PIN 探测器以检测参考光。对基于 PIN 光电二极管的激光雷达参考光探测电路进行了详细描述,主要包括集成高压芯片驱动方式、高增益带宽积跨阻放大器应用设计要素及超高速低延迟漂移比较器的使用。最后,设计了硬件系统进行实验,并给出了实验结果及分析。

## 1 APD 和 PIN 探测器性能对比分析

考虑到系统应用,选取  $1064\text{ nm}$  激光器作为光源。APD 探测器选取 First Sensor 公司的 AD230-9 TO,其有效感光面积为  $0.04\text{ mm}^2$ ,温度系数为  $1.25\sim 1.55\text{ V/K}$ ,击穿电压为  $160\sim 240\text{ V}$ ,在增益为 100 时的光谱响应曲线如图 1 所示。图 1 给出了敏感面前端带滤波窗和不带滤波窗两种形式的 APD 响应曲线,鉴于激光器波长为  $1064\text{ nm}$ ,系统需选择不带滤波窗的 APD。

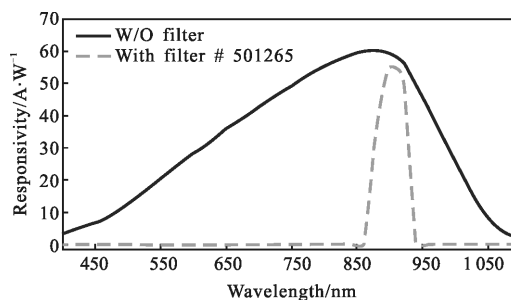


图 1 增益为 100 时,AD230-9 TO 的光谱响应曲线  
Fig.1 Spectral response curves of AD230-9 TO when gain is 100

可以看出,当增益为 100 时,AD230-9 TO 在 1 064 nm 处的响应度为 5 A/W。AD230-9 TO 的增益与偏压之间的关系曲线如图 2 所示。

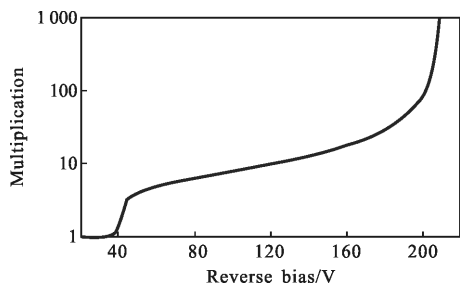


图 2 AD230-9 TO 增益与偏压之间的关系曲线

Fig.2 Curve between gain and bias voltage of AD230-9 TO

从图 2 可以看出,如增益达到 100,偏压需达到 200 V;当偏压降到 100 V 时,增益仅为 8。即增益与偏压之间呈现非线性特性。为实现高增益,需给 AD230-9 TO 施加高偏压。采用 BOOST 电路和电容二极管倍压可实现较高电压输出,但因采用分立元件,电路调节比较困难,而且可靠性不高。另外,可采用 EMCO 公司生产的 CA05N-5 高压模块,输出电压为 0~500 V,最大输出电流达 2 mA,但成本高。

PIN 探测器选取 First Sensor 公司的 PC10-Q TO,其有效感光面积为 10 mm<sup>2</sup>,温度系数为 15%/K,击穿电压典型值为 300 V,在偏置电压为 10 V 时的光谱响应曲线如图 3 所示。

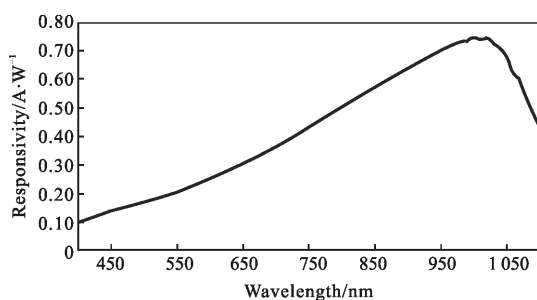


图 3 偏置电压为 10 V 时,PC10-Q TO 的光谱响应曲线

Fig.3 Spectral response curve of PC10-Q TO when bias voltage is 10 V

可以看出,该探测器为 1 064 nm 增强型,当偏置电压为 10 V 时,PC10-Q TO 在 1 064 nm 处的响应度为 0.55 A/W。对其供电可考虑基于 DC-DC 变换的集成芯片,外围电路简单,简化了电路设计,且成本低。

对比 AD230-9 TO 和 PC10-Q TO 的主要性能指标对比如表 1 所示。

表 1 AD230-9 TO 和 PC10-Q TO 的主要性能指标对比

Tab.1 Main performance indexes comparison of AD230-9 TO and PC10-Q TO

Model	Type	Responsivity/ A · W <sup>-1</sup> @ λ=1 064 nm	Photosensitive area/mm <sup>2</sup>
AD230-9 TO	APD	5@V <sub>b</sub> =200 V	0.04
PC10-Q TO	PIN	0.55@V <sub>b</sub> =10 V	10.0

综上所述,虽然 1 064 nm 增强型 PC10-Q TO 探测器在偏压为 10 V 的响应度低于 AD230-9 TO 在偏压为 200 V 的响应度,但其感光面积大,在参考光功率满足探测条件下,允许 PC10-Q TO 探测器工作在低偏置电压下,有利于采用集成高压芯片供电,在降低成本、简化系统设计的同时提高系统可靠性。同时,PC10-Q TO 探测器感光面积大于 AD230-9 TO 探测器,可简化参考光路设计。系统选择 PC10-Q TO 探测器检测参考光束。

## 2 基于 PC10-Q TO 的参考光探测电路

综合考虑 PC10-Q TO 的增益和集成高压芯片供电能力,系统电源芯片选用 LT3482,其为固定频率、电流模式升压型 DC/DC 转换器,具有较宽的输入电压范围:2.5~16 V,输出电压可达 90 V,且具备高压侧探测器电流监视功能,封装形式为 3 mm×3 mm 的 QFN 封装,有利于减小模块体积。LT3482 用于驱动 PIN 探测器最简单的方法是将其视为常规电源芯片,连接电路图如图 4 所示。

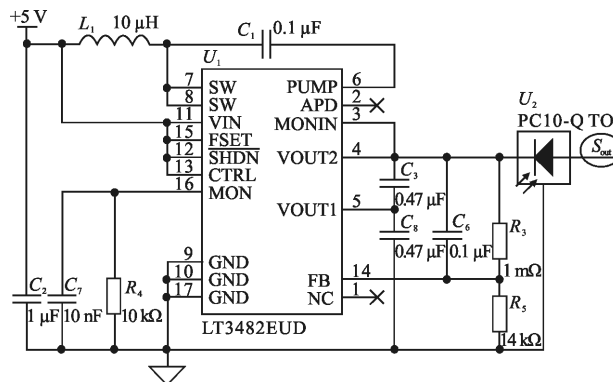


图 4 LT3482 作为常规电源为 PIN 探测器供电原理图

Fig.4 Schematic diagram of LT3482 as normal power for PIN detector

LT3482 输出电压由  $R_3$ 、 $R_5$  阻值决定, 关系表达式如下:

$$V_{out} = V_{REF} \left( \frac{R_3}{R_5} + 1 \right) = 1.235 \text{ V} \times \left( \frac{R_3}{R_5} + 1 \right) \quad (1)$$

式中:  $V_{REF}$  为 LT3482 内部参考电压。

依据图 4 中所示电阻值, LT3482 输出电压为 89.449 V。在该电路连接方式下, PIN 探测器输出信号  $S_{out}$  为电流信号, 后经跨阻放大器转换为电压信号以便后续处理。

跨阻放大器选择低噪声、FET 输入、增益带宽积高达 1.6 GHz 的 OPA657N, 应用电路如图 5 所示。

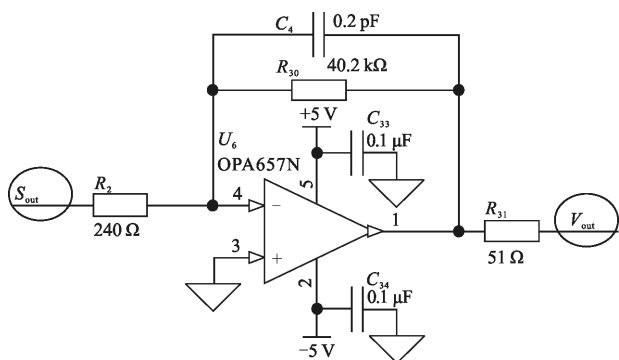


图 5 OPA657N 用于 PIN 探测器电流电压转换电路图

Fig.5 Current and voltage conversion circuit diagram of OPA657N in PIN detector

电阻  $R_{30}$  阻值决定了 OPA657N 的跨阻增益。因 OPA657N 是增益带宽积跨阻放大器, 跨阻增益的选取应根据系统带宽决定:  $R_{30}$  阻值越大, 跨阻放大器带宽越低。经实验验证, 当激光脉冲宽度为 10 ns 时,  $R_{30}$  的最佳电阻值为 40.2 k $\Omega$ 。  $R_2$  的阻值依据典型电路及实验结果优化选取。  $R_{31}$  的主要作用是信号传输的阻抗匹配。

反馈电阻  $C_4$  的主要作用是控制 OPA657N 的频率响应特性。决定 OPA657N 的频率响应特性的主要因素包括输入电容  $C_D$ 、跨阻增益、跨阻放大器增益带宽积 GBP, 对照图 5 中符号, 上述因素之间的关系表达式如下:

$$\frac{1}{2\pi \times R_{30} \times C_4} = \sqrt{\frac{GBP}{4\pi \times R_{30} \times C_D}} \quad (2)$$

在该电路中, 输入电容  $C_D$  即为 PIN 探测器结电容。PIN 探测器结电容随偏置电压发生变化, 两者之间的关系曲线如图 6 所示。

当偏置电压为 89.449 V 时, PC10-Q TO 结电容

为 5 pF, 代入公式(2)可计算得到反馈电容  $C_4$  的理论容值为 0.16 pF, 实际应用选取 0.2 pF。

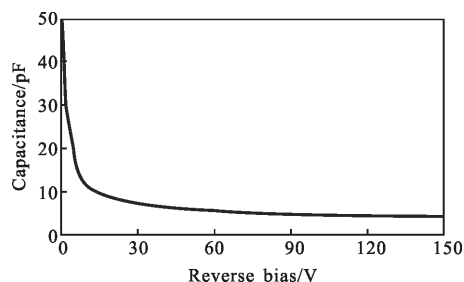


图 6 PC10-Q TO 结电容与偏置电压之间的关系曲线

Fig.6 Curve between junction capacitance and bias voltage of PC10-Q TO

因参考光功率稳定, 进而跨阻放大器输出信号峰值稳定性很好, 后续采用恒定阈值时刻鉴别方法即可得到较高的时刻鉴别精度。时刻鉴别电路选用 LVPECL 电平标准输出的超高速比较器 MAX9601, 其传输延迟时间仅为 500 ps, 传输延迟时间偏移及离散性分别为 10 ps 和 30 ps, 适用于对窄脉冲进行高保真跟踪且要求定时误差小的应用。基于 MAX9601 的高速比较电路图如图 7 所示。

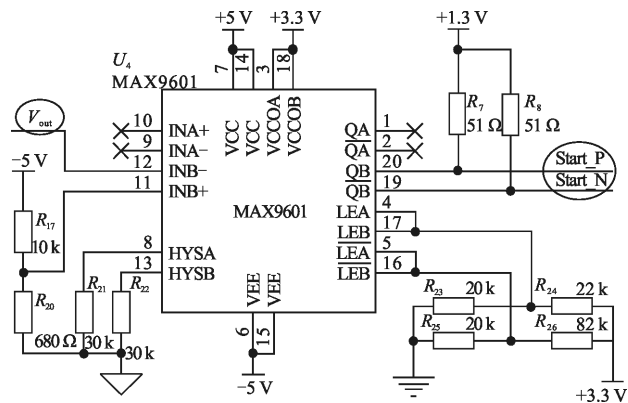


图 7 基于 MAX9601 的高速比较电路

Fig.7 High speed comparator circuit based on MAX9601

MAX9601 为双路比较器, PIN 探测器输出电流信号经跨阻放大器后为负脉冲信号, 连接至 B 通道负向输入, 比较阈值由  $R_{17}$ 、 $R_{18}$  对 -5 V 分压得到。当回波信号峰值超过设定的比较阈值时, 该模块即输出差分形式的正向脉冲计时起始信号 Start\_P、Start\_N。依据 LVPECL 电平特性, 输出信号需上拉至  $V_{CCO} - 2.0 \text{ V}$ , 即 +1.3 V。MAX9601 具有低有效的使能端, 参考 LVPECL 电平标准, 需将使能端正负端分

别接至+1.58 V 和+2.36 V，图 7 中是通过  $R_{23} \sim R_{26}$  分压实现。 $R_{21}$ 、 $R_{22}$  则主要用于设置迟滞电压。MAX9601 迟滞电压与外接电阻之间关系曲线如图 8 所示。

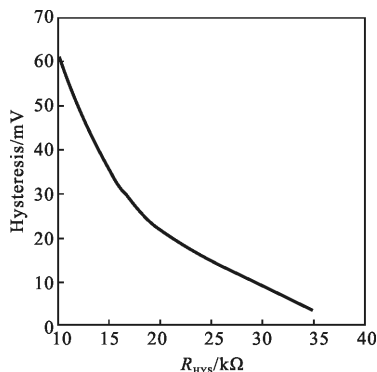


图 8 MAX9601 迟滞电压与外接电阻之间关系曲线

Fig.8 Curve between hysteresis voltage and disjunctive resistance of MAX9601

当外接电阻为 30 kΩ 时对应迟滞电压为 8 mV。后续试验可知,探测器输出信号峰值信噪比很高,在设定比较值附件,信号噪声低,8 mV 的迟滞电压可以满足系统要求。

综合上述模块,基于 PC10-Q TO 的参考光探测电路主要包括探测器驱动、电流/电压变换及恒定阈值比较等模块,整个电路结构框图如图 9 所示。

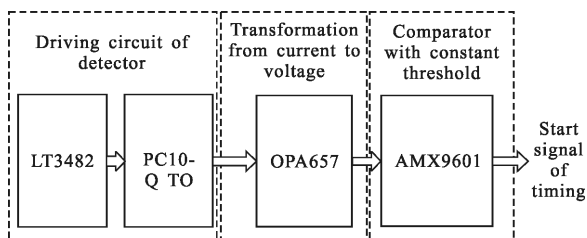


图 9 基于 PC10-Q TO 的参考光探测电路

Fig.9 Detecting circuit of reference beam based on PC10-Q TO

除作为常规电源模块驱动 PIN 探测器外,LT3482 具有高压侧探测器电流监视功能,其引出流过探测器总电流的 20%并通过外接电阻转化为电压信号,连接电路图如图 10 所示。

与图 4 所示电路图不同的是,PIN 探测器连接至 APD 引脚,电压信号从 MON 引脚引出。 $R_4$  与  $C_7$  组成低通滤波器。LT3482 内部电流监测模块通过 MONIN 引脚供电,应用时刻直接与 VOUT2 引脚相连接。该连接方式直接输出电压信号,从而省去了电流/电压变换模块,后续连接比较器即可得到计时起

始基准信号。

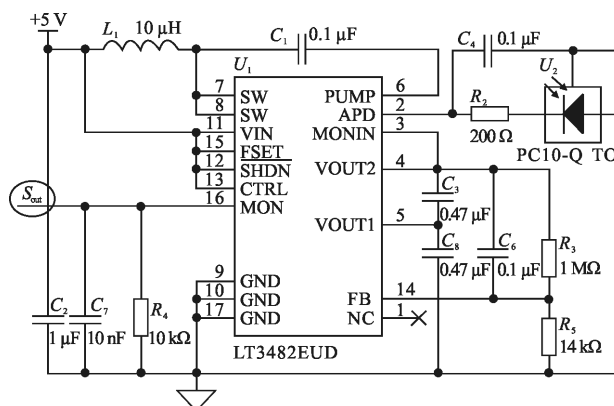


图 10 利用 LT3482 探测器电流监视功能获取信号原理图

Fig.10 Schematic diagram of signal acquisition with current monitor function of LT3482 detector

### 3 系统实验

以 LT3482 作为常规电源驱动 PIN 探测器为例进行实验,设计电路板,最终得到的电路板实物图如图 11 所示。因系统采用了集成高压芯片,整个结构紧凑,便于整机装配。

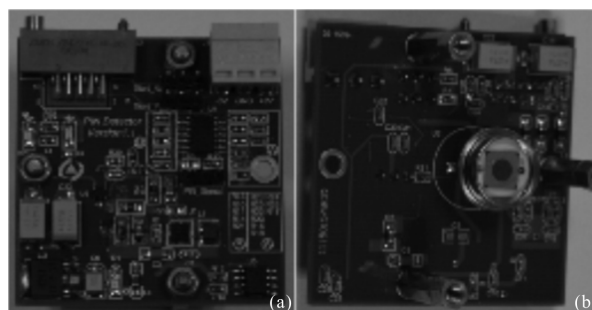


图 11 电路板实物图

Fig.11 Physical drawing of the circuit board

对 PIN 探测器供电时,供电电压纹波是一关键指标,对集成高压芯片输出信号纹波进行测试,结果如图 12 所示。可以看出,高压芯片输出信号纹波在  $\pm 15$  mV 以内,与 PIN 驱动电压 89.449 V 相比很小,对探测器输出信号的影响不大。

将该电路板固定在系统参考光出光口,激光器输出光峰值功率为 500 kW,参考光功率小于 100  $\mu$ W,即参考光功率仅占激光输出功率很小一部分,大部分光能量通过光学系统照射到目标景物上。测试 PIN 探测器输出电流经跨阻放大器之后的输出波形

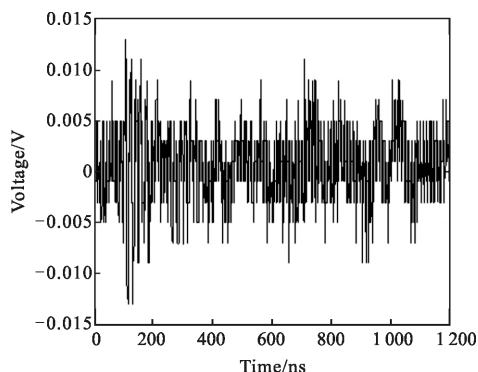


图 12 PIN 探测器供电电压纹波测试结果

Fig.12 Testing result of supply voltage ripple for PIN detector

如图 13 所示。可以看出,输出信号幅值达到 $-3.7\text{ V}$ ,信噪比很高,能够可靠检测到起始信号。但由于 PIN 管及跨阻放大器响应速度等因素限制,输出信号半峰宽约为  $15\text{ ns}$ , 略大于激光光源脉冲宽度  $10\text{ ns}$ ,对计时起始信号的检测精度影响不大。

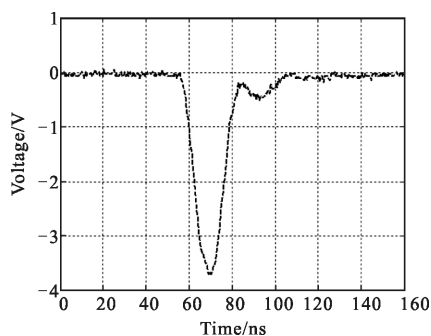


图 13 跨阻放大器输出结果

Fig.13 Output of transimpedance amplifier

同时测试跨阻放大器及比较器输出,结果如图 14 所示。

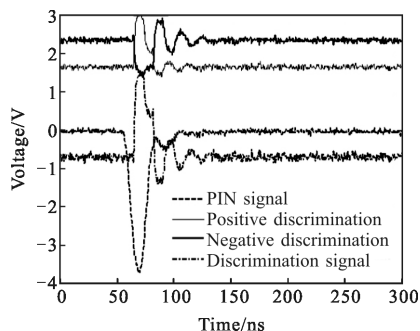


图 14 跨阻放大器及比较器输出结果

Fig.14 Output of transimpedance amplifier and comparator

可以看出,基于 PC10-Q 的参考光探测电路可有效给出参考光对应的计时起始时刻,且输出差分

信号有利于克服系统噪声的影响。因系统采用恒定阈值时刻鉴别方法,PIN 探测器输出信号脉冲展宽效应使得输出起始时刻脉冲宽度增加,更有利于后续计时电路的识别。

## 4 结 论

直接测距型激光主动成像系统中准确获知参考光对应的计时时刻是提高系统测距精度的关键。鉴于远距离目标对应的激光回波信号功率较弱,发挥 APD 探测器检测微弱光信号的能力,常采用 APD 探测器检测目标回波信号。参考光功率一般较大,在数十微瓦量级,远大于目标回波功率。综合考虑参考光功率稳定性、探测器供电需求、探测器增益、有效感光面积等因素,采用基于 DC-DC 变换的集成芯片 LT3482 驱动 PIN 探测器以检测参考光,在降低成本的同时,可有效提高系统稳定性、简化系统设计。LT3482 具有常规电源及探测器电流监视两种模式驱动 PIN 探测器:LT3482 作为常规电源驱动 PIN 探测器时,探测器输出电流信号需经跨阻放大器转换为电压信号以便与后续处理;采用电流监视模式驱动 PIN 探测器时,可直接从监视端获取电压信号,实际应用中可根据需求灵活选择。经系统实验验证,对脉冲为  $10\text{ ns}$  的激光光源,当 PIN 探测器施加  $89.449\text{ V}$  的偏置电压时,其输出电流信号经跨阻放大器后电压幅值达到 $-3.7\text{ V}$ ,可保证起始信号可靠检出,但脉冲展宽为  $15\text{ ns}$ 。考虑到系统采用恒定阈值时刻鉴别方法,输出信号脉宽展宽效应将增大计时起始信号的脉冲宽度,以便与后续计时电路的识别。实验结果表明:基于集成高压芯片驱动的 PIN 探测器配合恒定阈值时刻鉴别方法在直接测距型激光主动成像系统中是切实可行的。

## 参 考 文 献:

- [1] Wang Fei, Tang Wei, Wang Tingfeng, et al. Design of 3D laser imaging receiver based on  $8\times 8$  APD detector array[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(3): 422-427. (in Chinese)
- [2] Hu Chunsheng. Investigation into the high-speed pulsed laser diode 3D-imaging lidar [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005. (in Chinese)
- [3] Xu Zhengping, Shen Honghai, Xu Yongsen, et al. Target-distance and intensity information detecting with high

- precision in laser imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2668–2672. (in Chinese)
- [4] Xu Zhengping, Shen Honghai, Xu Yongsun. Review of the development of laser active imaging system with direct ranging[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(1): 28–38. (in Chinese)
- [5] Liu Lisheng, Zhang Heyong, Wang Tingfeng, et al. Doppler spectrum imaging of vibrating target using laser heterodyne detection[J]. *Opt Precision Eng*, 2015, 23(6): 1508–1515. (in Chinese)
- [6] Marino R M, Davis W R. Jigsaw: a foliage-penetrating 3D imaging laser radar system [J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2005, 15(1): 23–36.
- [7] Yan Jie, Ruan Youtian, Xue Peiyao. Active and passive optical image fusion technology [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(3): 378–385. (in Chinese)
- [8] Borniol E D D, Rothman J, Guellec F, et al. Active three-dimensional and thermal imaging with a 30  $\mu\text{m}$  pitch 320 $\times$ 256 HgCdTe avalanche photodiode focal plane array [J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(6): 061305.
- [9] Zhang Junqiang, Xie Fei, Xue Qingsheng, et al. Laser guided lens based on four-quadrant detector [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(3): 471–479. (in Chinese)
- [10] Zhang Yong, Cao Xibin, Wu Long, et al. Experimental research on small scale risley prime scanning imaging laser radar system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(8): 0814001. (in Chinese)
- [11] Luo Yuan, He Yan, Hu Janjiang, et al. Three-dimensional video imaging lidar system based on acousto-optic laser scanning [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(8): 0802005. (in Chinese)
- [12] Feng Baicheng, Li Zhaohui, Shi Yafan, et al. Laser ranging with large dynamic range based on dual-mode detectors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(5): 0504001. (in Chinese)
- [13] Xu Zhengping, Shen Honghai, Yao Yao, et al. Scannerless laser active imaging validating system by directly ranging[J]. *Opt Precision Eng*, 2016, 24(2): 251–259. (in Chinese)
- [14] Yu Xiao, Yao Yuan, Xu Zhengping. Laser imaging optical system design with a shared aperture employing APD array [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(3): 349–355. (in Chinese)
- [15] Xu Zhengping, Xu Yongsun, Yao Yuan, et al. Performance verification of staring laser active imaging system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(6): 1441–1448. (in Chinese)