

激光与光电子学进展

脉冲激光器高灵敏功率检测系统设计

王秋卜¹, 刘文清^{1,2}, 张天舒^{1,2*}, 付毅宾²

¹安徽大学物质科学与信息技术研究院, 安徽 合肥 230601;

²中国科学院安徽光学精密机械研究所环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031

摘要 出射激光脉冲功率的变化对大气激光雷达数据采集的准确度具有很大的影响,因此需要对脉冲激光器功率进行准确的检测。基于出射激光脉冲窄脉宽、高重复频率的特点,提出一种针对窄脉冲激光器的功率检测系统。首先,采用光电二极管构成的光电转换电路实现对激光信号的光电转换;其次,采用跨导型峰值保持电路对激光单脉冲进行峰值保持;最后,通过同步触发信号实现单片机对峰值的采集,测出脉冲激光器出射脉冲的功率。经实验测试,该系统适用于大气激光雷达使用的脉宽为 10 ns、重复频率为 10 kHz、波长为 532 nm 的激光脉冲功率检测,且测试结果与标准激光功率计相比具有良好的线性关系和精度,满足应用需求。

关键词 激光器; 窄脉冲激光; 峰值保持电路; 跨导放大器; 光电二极管

中图分类号 TN29

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0314005

Design of High Sensitive Power Detection System for Pulsed Laser

Wang Qiubu¹, Liu Wenqing^{1,2}, Zhang Tianshu^{1,2*}, Fu Yibin²

¹Institute of Physical Science and Information Technology, Anhui University, Hefei, Anhui 230601, China;

²Key Laboratory of Environment Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract The change of the outgoing laser pulse power has a great influence on the accuracy of atmospheric lidar data collection, so it is necessary to detect the power of pulsed laser accurately. Based on the characteristics of the narrow pulse width and high repetition frequency of the outgoing laser pulse, we proposes a power detection system for narrow pulsed laser. First, the photoelectric conversion circuit composed of photodiodes is used to realize the photoelectric conversion of the laser signal. Second, the transconductance type peak hold circuit is used to hold the peak value of the laser single pulse. Finally, the synchronous trigger signal is used to collect the peak value of the single chip and measure the outgoing pulse power of the pulsed laser. After experimental testing, the system is suitable for power detection of laser pulses with a pulse width of 10 ns, a repetition frequency of 10 kHz, and a wavelength of 532 nm used by atmospheric lidar. The test results have good linear relationship and accuracy compared with standard laser power meters, which can meet application requirements.

Key words lasers; narrow pulse laser; peak hold circuit; transconductance amplifier; photodiode

OCIS codes 140.3538; 040.1880; 040.5160

收稿日期: 2020-05-21; 修回日期: 2020-06-29; 录用日期: 2020-07-13

基金项目: 安徽省自然科学基金(1908085QD160, 1908085QD170)、安徽省科技重大专项(18030801111)、安徽省重点研究与开发项目计划(202004i07020002)

*E-mail: tszhang@aiofm.ac.cn

1 引言

激光雷达的主要工作原理是通过发射系统发射激光束,激光束传播一定距离后与目标发生散射、反射和吸收等相互作用后产生激光回波,激光回波由接收系统进行光电转换和数据采集,获得的数据由数据处理系统进行分析处理^[1-2]。回波信号的功率大小除了与激光雷达的系统常数和大气参数有关外,也与出射单脉冲激光信号功率有关。在大气激光雷达长期运行的过程中,出射信号一旦发生波动,将直接影响消光系数、后向散射系数、温度、湿度、风速等大气参量高度分布^[3-5]反演结果的准确性。因此需要在大气激光雷达运行过程中对激光功率进行实时检测,及时发现出射激光脉冲信号功率的波动并进行调节,保证激光雷达正常运行。

大气激光雷达所采用的脉冲激光器的出射脉冲具有窄脉宽、高重复频率的特点,脉宽仅在纳秒级,频率一般在千赫兹以上,信号的采集难度大、易损耗,并且对检测电路的处理速度和响应时间要求极高。针对激光脉冲的功率检测主要有波形分析法、峰值保持法、等效采样法等^[6-7],研究学者对此开展了广泛的研究。张贵军等^[8]基于波形分析法,利用示波器、波形探测器等对激光脉冲的时域波形进行分析,通过计算的方法得到准确的功率值;熊焱等^[9]基于峰值保持的方法,对脉宽为 20 ns 的脉冲信号进行峰值保持,并对多种峰值保持电路进行分析;胡峥等^[10]将多级脉冲展宽和峰值保持的方法相结合,将展宽的信号通过单片机进行采集,并利用示波器和计算机对测量误差进行修正;此外,等效采样法主要是通过大量采样随机值的方法,取最大值作为激光功率的采样结果,此种方法数据量大、准确率较低,一般不使用。同时现有的成品激光功

率计发展迅速,量程范围和测量精度不断提高,具有代表性的如美国索雷博公司开发的 PM100A,该产品可以根据检测需求更换不同类型的探头,实现了较大的波长覆盖和功率检测范围,但是由于探头所需的特殊材料以及仪器制造复杂的工艺,成品售价高昂,不符合设计产业化对成本的要求。因此本文提出一种自研型脉冲激光器功率检测系统,并在已有的研究成果基础上,进一步提高脉冲激光器功率检测的准确度和灵敏度,降低系统结构复杂度和设计成本。

本文以 STM32 单片机为检测系统的主控,以光电二极管为传感器,通过设计光电转换电路、峰值保持电路和同步触发电路,构成一个完整的脉冲激光器功率检测系统,并对最后的测量误差进行修正。系统通过对大气激光雷达所用的激光器功率进行高灵敏、低损耗的测量,可以实时监测激光器的工作状态,及时调节,保证大气激光雷达的正常运行;也可以为雷达数据的修正提供依据,提高雷达数据反演的准确性;此外,功率检测系统还可以产生同步信号,为激光器提供同步信号源,使其正常工作。

2 硬件设计

2.1 方案总体设计

整个系统采用分模块设计的方式(图 1),首先激光器高反镜的外部漏光经过衰减后,由光电二极管构成的光电转换电路接收,将激光脉冲信号转换成电信号。之后再由包含放电电路的峰值保持电路对窄脉冲信号进行峰值保持,最后输入 STM32 单片机进行采集和数据处理。同时,光电转换得到的电信号借由同步触发电路触发 STM32 单片机对峰值保持信号的采集和处理。最后将处理后的数据通过串口发送至上位机,完成对脉冲功率的检测过程。

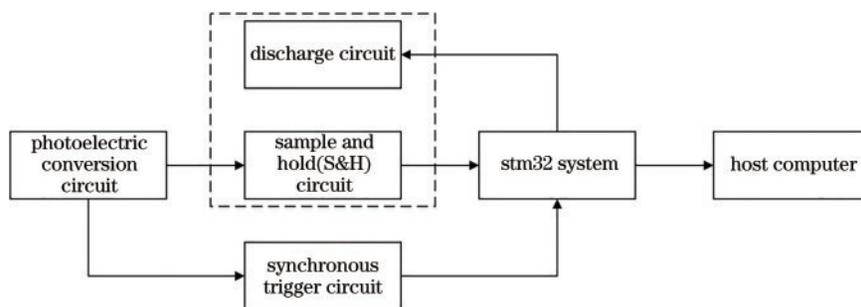


图 1 系统总体设计框图

Fig. 1 System overall design block diagram

2.2 光电转换电路

光电二极管是一种可以将光信号转换成电信号的光电传感器件。根据检测信号波长为 532 nm、脉宽为 10 ns、频率为 10 kHz, 选用光电二极管 PS13-6b。该型号光电二极管主要的典型参数如表 1 所示。可以看出, 此种型号的光电二极管可测脉冲信号的波长范围满足使用需求, 并且具有较小的暗电流和极短的上升时间, 响应速度快, 可以减少光电二极管输出信号的时延。此外, 为保证光电二极管工作在功率线性的区域, 应将入射激光脉冲进行合适的衰减, 避免出现功率饱和和导致功率检测不准确的情况。

表 1 PS13-6b 主要参数

Table 1 PS13-6b main parameters

| Symbol | Value |
|------------------------------------|-------------------------|
| Spectral response range /nm | 350—1100 |
| Dark current /nA | 0.25 |
| Responsivity /($A \cdot W^{-1}$) | 0.35($\lambda=532$ nm) |
| Rise time /ns | 70 |
| Active area /($mm \times mm$) | 3.504 \times 3.504 |

图 2 为电路结构, 光电二极管在电路中通常采用反向偏压接法。在反向偏压的工作状态下, 会加快光生载流子的产生和运动, 因此有利于弱光信号的测量^[11]。由于二极管转化的电流较小, 不便于后续处理, 所以先对光电流进行放大, 这里采用一种跨阻式放大器(TIA)的接法。AD8009 是一种高速的电流反馈放大器, 带宽较宽、压摆率高、噪声低, 同时具有高功率和低功耗的特点, 可以很好地对高速脉冲信号进行放大。光电转换电路的输出电压表示为

表 2 常用跨导放大器参数比较

Table 2 Comparison of common transconductance amplifier parameters

| Part number | Band width /MHz | Transconductance /($mA \cdot V^{-1}$) | Slew rate /($V \cdot \mu s^{-1}$) | Supply voltage /V |
|-------------|-----------------|---|-------------------------------------|-------------------|
| OPA860 | 80 | 95 | 900 | ± 5 |
| OPA615 | 710 | 72 | 2500 | ± 5 |
| OPA660 | 850 | 125 | 3000 | ± 5 |
| MAX436 | 200 | — | 850 | ± 5 |

OPA615(图 3)由一个 SOTA 和一个用作缓冲器的 OTA 构成, SOTA 的同相输入端输入的信号逐渐增大, 电容 C_1 开始充电, 同时将电压反馈到 SOTA 的反向输入端, 当反向输入端电压大于同相输入端时, 二极管 D_2 处于反向偏置状态, 电容 C_1 无法放电, 保持的峰值电压输入后级电路^[16-17]。同时, 电路中加入模拟开关 TS5A3166 对电容进行及时放

$$V_s = I_{D1} \cdot R_1, \quad (1)$$

式中: I_{D1} 为光信号转化成电信号后流经光电二极管的电流大小; R_1 为反馈电阻阻值。该放大电路不仅可以放大微弱的光电流信号, 也可以将电流信号转化成电压信号, 便于后级电路对于信号的进一步处理。

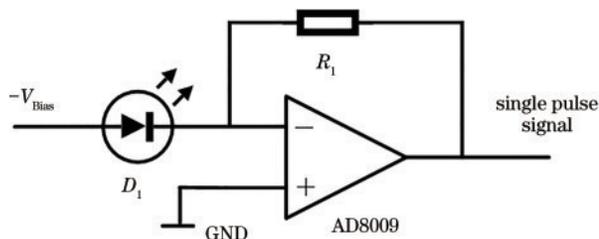


图 2 光电转换电路

Fig. 2 Photoelectric conversion circuit

2.3 峰值保持电路

针对窄脉宽脉冲激光信号的采集主要使用峰值保持电路的方法, 峰值保持电路主要分为二极管型、电压运放型和跨导运放型^[12-13]。传统的二极管型和电压型峰值保持电路的非线性较大、动态范围和通频带较小, 且不适合处理快信号^[9]。跨导型峰值保持电路相比于其他两种类型的峰值保持电路具有更好的动态特性, 响应速度更快, 损耗低, 在高灵敏测量的应用中具有显著的优势, 适合处理高速窄脉冲信号。电路结构通常采用一种由采样跨导放大器(SOTA)、保持电容和缓冲放大器(OTA)构成的跨导型峰值保持电路^[14-15]。常用的几种跨导放大器参数如表 2 所示, 经比较可知, 电路主要选用高速跨导运算放大器 OPA615, 这种放大器具有宽带宽、短时延的特点, 适合处理纳秒级别脉冲信号, 提高了系统的响应速度。

电, 以保证输出电压的准确性。

二极管在 SOTA 输出反向时的关断速度直接影响电路的性能。肖特基二极管作为一种低功耗、超高速半导体器件, 是一种快恢复的二极管^[18]。所选用的肖特基二极管 BAT17 具有极低的导通电压和极短的开关时间, 当 SOTA 的反相输入端电压大于同相输入端时, 二极管能很快关断, 有效地减小

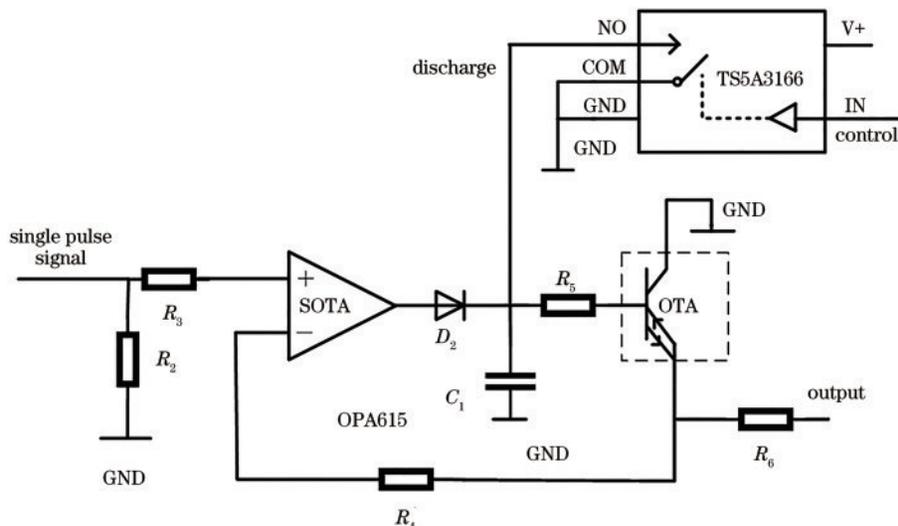


图 3 峰值保持及放电电路

Fig. 3 Peak hold and discharge circuit

电容放电引起的误差,提高系统的灵敏度和准确度。保持电容 C_1 的容值太大将会减慢充电速度,降低电路动态性能;而容值太小则有可能容量不够,引起测量误差。通常保持电容的容值由下式决定。

$$f_p = 0.35/t_r, \quad (2)$$

$$f_T = g/(2\pi C_1), \quad (3)$$

式中: t_r 为脉冲上升沿时间; f_p 为脉冲信号带宽; g 为放大器的跨导; C_1 为保持电容的容值; f_T 为峰值保持器的带宽。当满足 $f_T \geq f_p$ 时,峰值保持电压可以避免失真情况的出现。由于电路板板间存在杂散电容,实际保持电容的取值应小于上述提到的理论值。

经过理论计算和实践,取保持电容的容值为 47 pF 时,电路具有良好的动态性能和峰值保持效果。

2.4 同步触发电路

同步触发电路设计的目的是为了触发主控 STM32 单片机对于峰值保持电压的采集,由一个比较器和一个稳态触发器构成(图 4)。比较器选用 MAX999 芯片,通过电阻分压得到比较电压,产生触发脉冲。同时,比较电压的存在可以防止电路存在的噪声信号出现误触发的情况。后级采用一个稳态触发器 74LV123,可以调节触发信号的脉宽,进而触发单片机进行采集。同时,同步触发电路也为激光器提供了同步信号,保证激光器正常的运行。

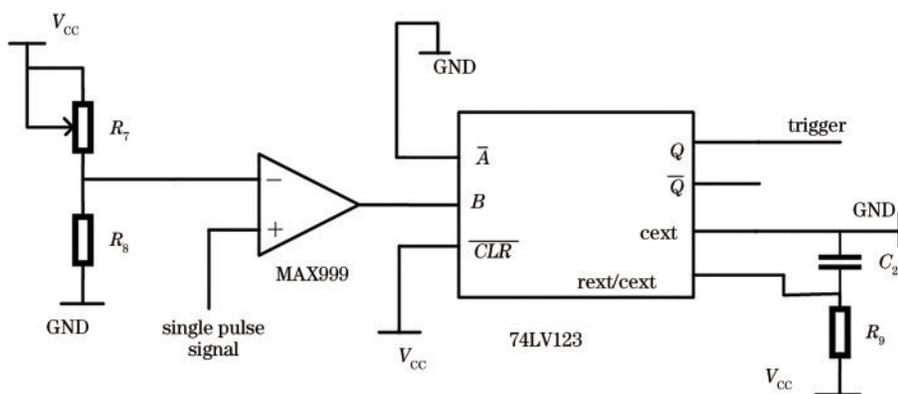


图 4 同步触发电路

Fig. 4 Synchronous trigger circuit

3 系统实现

3.1 软件流程设计

系统采用意法半导体公司的 Stm32f103rct6 作

为主控,这是一种 32 bit 以 Cortex-M3 为内核的高速处理器,拥有 3 个 12 bit 彼此独立的模数转换器(ADC)。处理器时钟达到 72 MHz, ADC 最短采样时间达到 1 μ s,可以满足高速采集的需求。整个程

序执行过程如图 5 所示。激光脉冲经光电转换电路一路峰值保持后送入 STM32 单片机的输入输出 (IO) 口; 另一路送入同步触发电路, 当脉冲幅值大于比较电压时, 产生触发脉冲, 送入 STM32 单片机, 上升沿触发外部中断, 开始模数 (AD) 转换过程, 程序中需要合理配置 AD 采集时间, 防止采样时间太短电容充电不完全或采样时间太长对高速脉冲测量有遗漏; 等待 AD 采集完成, STM32 单片机发出一个很短的高电平放电脉冲, 送入图 3 所示的 TS5A3166 控制端, 此时模拟开关闭合, 保持电容接地, 进行放电过程; 当放电脉冲重新回到低电平后, 模拟开关断开, 完成电容的放电; 最后将数据通过串口发送到上位机。最终输出采用均值滤波的方法, 减小白噪声和极端数据对测量值的影响, 降低实验误差。

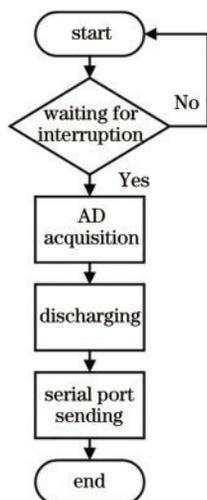


图 5 程序执行过程框图

Fig. 5 Block diagram of program execution process

3.2 误差修正

整个采集过程的软件信号读取时序如图 6 所示, 在 a 点, 窄脉冲信号增加到比较电压时触发同步信号, STM32 单片机开始 AD 采集。由于 STM32 单片机的采集需要一定的时间间隔 (bc 段) 才能保证准确度, 所以无法正好采集到峰值点, 即在 c 点才能完成采集。由于 b 点到 c 点峰值保持信号发生了一定的下垂, 实际采集到的信号偏小。通过示波器测量 OPA615 峰值保持电路的峰值, 与 AD 采集的电压值相比, 大致可以计算出由于 AD 采集时间间隔损失的差值。经过多次实验发现 OPA615 峰值保持电路的保持信号下垂速率相对稳定, 因此可以近似认为 AD 采集时间间隔损失的差值为固定值。通过多次测量计算出平均差值, 最后 STM32 采集的

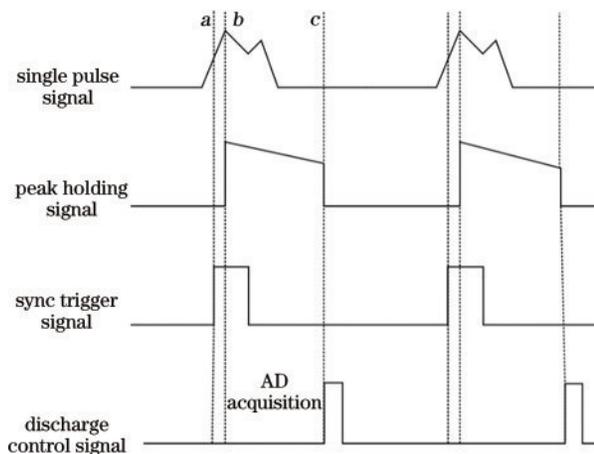


图 6 采集过程时序图

Fig. 6 Timing diagram of acquisition process

电压值加上这个差值后可对最终结果进行修正, 减小实验误差。

4 实验结果

4.1 峰值保持电路性能模拟测试

针对图 3 的峰值保持电路进行模拟信号的测试, 其中电路增益通过电路的参数设置为 2。信号发生器参数设置为脉宽 10 ns、频率 10 kHz、幅值 500 mV 的脉冲信号, 模拟窄脉冲信号, 并用数字示波器对输出结果进行监测。实测示波器波形如图 7 所示, 通道 CH1 为输入的窄脉冲信号, CH2 为峰值保持的结果。实验结果表明, 窄脉冲信号的峰值保持已实现, 并且信号得到了 2 倍的增益放大。

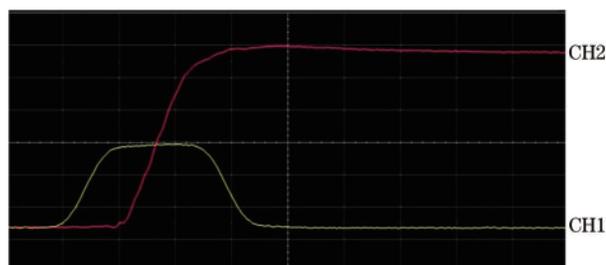


图 7 示波器实时监测图形

Fig. 7 Oscilloscope real-time monitoring graph

通过多次改变输入脉冲信号的峰值, 记录输出的峰值保持信号的峰值, 并与理想输出比较, 结果如图 8 所示。实际测得的峰值输出总体上满足增益 2 倍的关系, 但是与理想值相比偏大, 这是过冲电压导致的^[19]。过冲电压形成的原因是当 SOTA 的反馈电压与同向段输入电压相等时, SOTA 会有一个短暂的反应时间改变状态, 而此时电容仍然继续充

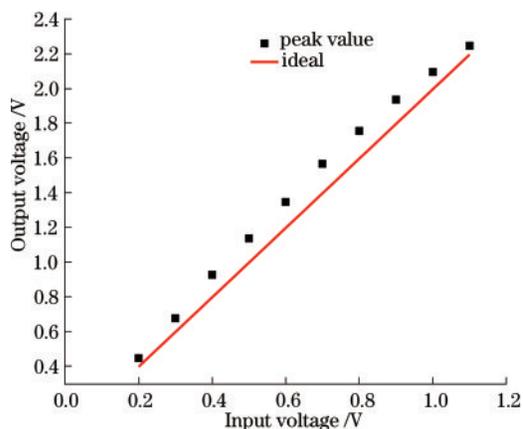


图 8 测得峰值输出与理想值对比

Fig. 8 Comparison of measured peak output and ideal value

电,所以会导致实际输出的电压峰值略大于理论值。因此,在实际测量的过程中可以适当延长采样时间的间隔,以减小过冲电压的影响。

4.2 脉冲激光器功率检测系统的标定

激光器高反镜的外部漏光经过衰减后的激光脉冲送入功率检测系统的接收器进行检测,图 9 为实验装置示意图。

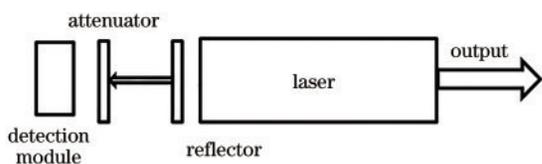


图 9 实验装置示意图

Fig. 9 Schematic of experimental device

通过 STM32 单片机的 AD 采集,将测量的保持脉冲电压峰值数据通过串口发送到上位机并导出,便于处理。同时使用标准激光功率计对脉冲激光器的平均功率进行测量,并将结果与脉冲激光器功率检测系统的测试结果进行比较和线性拟合,由图 10 可知,电压和功率具有良好的线性关系。拟合结果为

$$U = 1.56308P + 0.07289, \quad (4)$$

式中: P 为标准功率计测得脉冲的平均功率值; U 为脉冲激光器功率检测系统所测得的电压值。当 $P=0$ 即无激光脉冲信号时,电路中仍然会有电压存在,即 $U=0.07289$,这是由于光电二极管具有暗电流的特性,导致无激光脉冲信号时电路中仍有微弱电流通过。脉冲激光器功率检测系统所测值具有良好的线性,因此可以利用(4)式进行标定,得到实际的脉冲功率值。

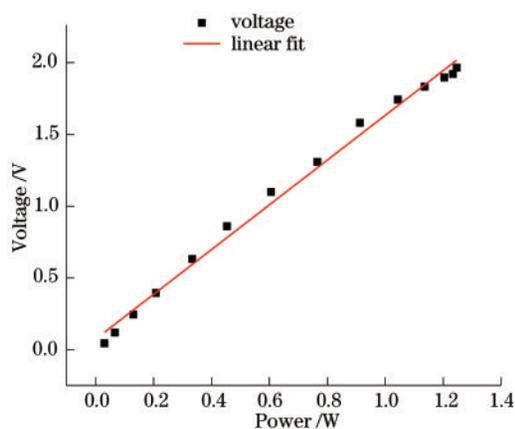


图 10 功率与电压线性拟合结果

Fig. 10 Linear fitting result of power and voltage

4.3 脉冲激光器的功率测试

完成功率检测系统的标定之后,对激光雷达所用的脉冲激光器进行功率检测。测试平台主要包括一台大气激光雷达(采用重复频率约为 10 kHz、脉宽为 10 ns 的 532 nm 脉冲激光器)、标准激光功率计和设计的脉冲激光器功率检测系统。实验的结果见表 3,总体误差率可以控制在 5% 以内,说明系统具有较高的准确度。

表 3 自制功率检测系统与标准功率计误差比较

Table 3 Comparison of errors between homemade power detection system and standard power meter

| Designed power meter / W | Standard power meter / W | Error rate / % |
|--------------------------|--------------------------|----------------|
| 0.348 | 0.333 | 4.5 |
| 0.474 | 0.453 | 4.6 |
| 0.630 | 0.605 | 4.1 |
| 0.781 | 0.765 | 2.1 |
| 0.928 | 0.912 | 1.8 |
| 1.026 | 1.043 | 1.6 |
| 1.116 | 1.135 | 1.7 |
| 1.174 | 1.203 | 2.4 |

5 结 论

针对大气激光雷达使用的脉冲激光器,设计了一个基于 STM32 的脉冲激光器功率检测系统。采用光电二极管作为传感器,灵敏度高、响应快,并且降低了检测过程中的能量损耗;采用跨导型峰值保持电路实现峰值保持,减少了系统的响应时间,保证信号的高速处理速度;此外,软件上使用均值滤波算法并进行误差修正,使得功率的测量结果更加可靠。经理论设计和实际测试,峰值保持电路可以

精确输出窄脉冲激光信号的峰值保持电压;功率检测系统可以高灵敏、低损耗地反映窄脉冲的功率值,并且可以将数据实时上传到上位机,便于分析。比较实验结果与标准值发现,误差率能控制在 5% 以下,符合设计精度的预期,具有重要的实用意义。未来希望将功率检测系统与激光器的温度、电流控制环节结合,使得大气激光雷达所用的脉冲激光器能更加稳定的工作,获得更加准确的探测数据。

参 考 文 献

- [1] Wen F. The study of framework of data acquisition system for lidar [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013: 2-4.
文斐. 激光雷达数据采集系统框架研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013: 2-4.
- [2] Yan J X, Gong S S, Liu Z S. Environmental monitoring Lidar [M]. Beijing: Science Press, 2001: 1-2.
阎吉祥, 龚顺生, 刘智深. 环境监测激光雷达[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 1-2.
- [3] Zhuang Q F, Wang Y M, Wang Z J, et al. Typical case of multi-wavelength aerosol lidar observation of persistent hazy weather in Beijing [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(24): 240101.
庄全风, 王一萌, 王章军, 等. 多波长气溶胶激光雷达观测北京地区持续性雾霾的典型案例分析[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(24): 240101.
- [4] Tian X M, Liu D, Xu J W, et al. Review of lidar technology for atmosphere monitoring[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2018, 13(5): 321-341.
田晓敏, 刘东, 徐继伟, 等. 大气探测激光雷达技术综述[J]. 大气与环境光学学报, 2018, 13(5): 321-341.
- [5] Song Y H, Zhou Y D, Wang L, et al. Design of 780 nm high spectral resolution lidar based on laser diode [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(10): 1001006.
宋跃辉, 周煜东, 汪丽, 等. 基于半导体激光器的 780 nm 高光谱分辨率激光雷达系统设计[J]. 中国激光, 2019, 46(10): 1001006.
- [6] Han G, Yan B. Study on testing method for peak power and average power of pulse laser [J]. Industrial Measurement, 2008, 18(6): 4-6.
韩刚, 闫博. 脉冲激光峰值/平均功率测试方法研究[J]. 工业计量, 2008, 18(6): 4-6.
- [7] Wu D Y, Gao S X, Yan D Y, et al. The design about high power laser diode linear array coupling with optic fiber [J]. Laser Journal, 2002, 23(5): 19-20.
武德勇, 高松信, 严地勇, 等. 高功率线阵半导体激光器光纤耦合设计[J]. 激光杂志, 2002, 23(5): 19-20.
- [8] Zhang G J, Zhang R, Feng K F. Study on the methods of measurement and calibration of the peak power of the narrow pulsed semiconductor laser [J]. Laser Journal, 2009, 30(1): 26-27.
张贵军, 张锐, 冯凯飞. 窄脉冲半导体激光器峰值功率测试及校准方法研究[J]. 激光杂志, 2009, 30(1): 26-27.
- [9] Xiong Y, Lu Y D, Zhu M, et al. Design of peak holding circuit for narrow laser pulse [J]. Laser & Infrared, 2012, 42(12): 1377-1380.
熊焱, 陆耀东, 祝敏, 等. 窄脉冲激光信号峰值保持电路设计[J]. 激光与红外, 2012, 42(12): 1377-1380.
- [10] Hu Z, Shao L F, Li C, et al. Study on the technique for measuring the peak power of narrow pulsed semiconductor laser arrays [J]. Laser & Infrared, 2019, 49(6): 670-674.
胡峥, 邵莉芬, 李川, 等. 窄脉冲阵列激光器峰值功率测试的研究[J]. 激光与红外, 2019, 49(6): 670-674.
- [11] Zhou Y J, Ren K, Qian W X, et al. Noise analysis of photoelectric detection circuit based on photodiode reverse bias [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(1): 0117003.
周玉蛟, 任侃, 钱惟贤, 等. 基于光电二极管反偏的光电检测电路的噪声分析[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(1): 0117003.
- [12] Xue R F. Design of a high-speed peak holding circuit with automatic discharge function [D]. Changchun: Jilin University, 2017: 4-9.
薛荣峰. 一种具有自动放电功能的高速峰值保持电路的设计[D]. 长春: 吉林大学, 2017: 4-9.
- [13] Liu H, Zhang Y M, Na Y X. Research on amplification and peak-holding circuits of nanosecond light pulse [J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2013: 18.
- [14] Chow H C, Hor Z. A high performance peak detector sample and hold circuit for detecting power supply noise [C]//APCCAS 2008-2008 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems, Nov. 30-Dec. 3, 2008, Macao, China. New York: IEEE, 2008: 672-675.

- [15] Haas W, Dullenkopf P. A novel peak amplitude and time detector for narrow pulse signals [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1986, 35(4): 547-550.
- [16] Kruiskamp M W, Leenaerts D M W. A CMOS peak detect sample and hold circuit [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1994, 41 (1) : 295-298.
- [17] Achtenberg K, Mikołajczyk J, Szabra D, et al. Optical pulse monitoring unit for Free Space Optics [J]. Opto-Electronics Review, 2019, 27(3): 291-297.
- [18] Du Y, Hua D X, Xin W H, et al. Emission energy monitoring of atmospheric detection lidar [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2018, 35 (2): 209-215.
杜洋, 华灯鑫, 辛文辉, 等. 大气探测激光雷达发射能量监测 [J]. 量子电子学报, 2018, 35 (2) : 209-215.
- [19] Lin J R, Chou H P. A peak detect and hold circuit using ramp sampling approach [C]//2009 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record (NSS/MIC), October 24 - November 1, 2009, Orlando, FL, USA. New York: IEEE Press, 2009: 309-312.