

激光与光电子学进展

应用于脉冲展宽激光测距系统的自动增益控制

孙亮^{1,2,3,4}, 周星宇^{1,2,3,4}, 吴绍龙^{1,2,3,4}, 曹国洋^{1,2,3,4*}, 李孝峰^{1,2,3,4**}¹苏州大学光电科学与工程学院, 江苏 苏州 215006;²苏州大学苏州纳米科技协同创新中心, 江苏 苏州 215006;³教育部现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006;⁴江苏省先进光学制造技术重点实验室, 江苏 苏州 215006

摘要 在脉冲法激光测距系统中,由于电光/光电转换、目标物的位置及反射率变化,回波脉冲的幅值和脉宽通常会发生改变,导致直接使用固定阈值法时测距系统会产生较大的误差。虽然自动增益控制系统可以减少该误差,但当前大部分自动增益控制都是通过峰值保持电路测量回波脉冲的峰值,存在保持峰值衰减、不稳定、响应速度慢等问题。为此,本研究使用 250 MHz 高速模数转换模块采集回波脉冲的峰值,并在现场可编程逻辑门阵列内实现峰值保持与清零。与带有峰值保持电路的自动增益控制系统相比,该系统具有电路简单、电压峰值不会衰减、响应速度更快等优点。实验结果表明:设计的带有改进型自动增益控制的激光测距系统可以有效地把回波幅值控制在较小范围内(0.76~1.44 V),从而减小测量误差。

关键词 激光测距; 脉冲展宽; 自动增益控制; 快速响应

中图分类号 TN247

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222781

Automatic Gain Control for Pulse-Broadened Laser-Ranging System

Sun Liang^{1,2,3,4}, Zhou Xingyu^{1,2,3,4}, Wu Shaolong^{1,2,3,4}, Cao Guoyang^{1,2,3,4*}, Li Xiaofeng^{1,2,3,4**}¹School of Optoelectronic Science and Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, Jiangsu, China;²Collaborative Innovation Center of Suzhou Nano Science and Technology, Soochow University, Suzhou 215006, Jiangsu, China;³Key Lab of Advanced Optical Manufacturing Technologies of Jiangsu Province Soochow University, Suzhou 215006, Jiangsu, China;⁴Key Lab of Modern Optical Technologies of Education Ministry of China, Soochow University, Suzhou 215006, Jiangsu, China

Abstract In pulsed laser-ranging systems, the amplitude and pulse width of the echo pulse typically vary owing to the electrooptical/photoelectric conversion process and the changes in the target position or reflectivity, which results in significant errors when the fixed threshold method is used directly. Although an automatic gain control (AGC) system can minimize the error, most AGCs measure the peak value through the peak holding circuit, which causes problems such as peak holding attenuation, instability, and slow response speed. Therefore, a 250-MHz-high-speed analog-to-digital conversion module is used in this study to obtain the peak value of the echo pulse and achieve peak retention and zeroing in the field programmable logic gate array. Compared with the AGC system with a peak-holding circuit, the system has a simplified circuit, no attenuation of voltage peak, and a faster response. The experimental results show that the designed laser ranging system can effectively control the amplitude of the echo pulse within a narrow range (0.76–1.44 V) to reduce measurement errors.

Key words laser ranging; pulse broadening; automatic gain control; fast response

1 引言

随着激光和探测技术的快速发展,激光雷达技术

愈加成熟。激光雷达的核心部分是激光测距^[1],常见的激光测距原理有脉冲法和相位法等^[2]。脉冲法激光测距的原理是测量发射脉冲和接收脉冲之间的时间间

收稿日期: 2022-10-17; 修回日期: 2022-11-24; 录用日期: 2022-12-07; 网络首发日期: 2023-01-04

基金项目: 国家自然科学基金(62120106001, 62105126, 61875143)、江苏省自然科学基金(BK20210454)

通信作者: *gycao@suda.edu.cn; **xfli@suda.edu.cn

隔,从而计算出系统与目标物的间距。与相位法相比,脉冲法具有测量范围大、不需要合作目标、实时性好等优点,被广泛应用于各种领域,如航空航天、工业测量、大地测绘和智能驾驶等。这些场景对测距系统的量程、精度、响应速度都有很高的要求^[3-4]。因此,如何提升测距精度和响应速度具有非常重要的意义。

在脉冲法激光测距系统中,判断回波脉冲到来的时刻尤其重要,其决定了测距精度。常用的判断方法有:固定阈值法、峰值法^[5]、恒比定时法^[6]等,峰值法和恒比定时法的电路结构复杂,易引入较大的测量误差,所以实际应用仍以电路结构相对简单的固定阈值法为主。然而,由于激光器的光电转化过程、探测器的光电转化过程、目标物与测距系统的距离变化或目标物表面的反射率变化等原因,实际回波脉冲的幅值和脉宽通常会发生变化^[7-10],从而引起一定的测距误差。测距系统可以采用自动增益控制的方法,将回波峰值控制在设定的范围内以减小阈值法带来的误差。但是当前大部分应用于激光测距系统中的自动增益控制都是通过峰值保持电路测量回波脉冲的峰值,存在保持峰值衰减、系统不稳定、响应速度慢等问题。

针对该问题,本研究摒弃了传统的峰值保持电路,设计了应用于脉冲展宽激光测距系统的自动增益控制系统。该设计是基于现场可编程逻辑门阵列(FPGA)的自动增益控制系统,在FPGA内实现峰值保持与清零。与带有峰值保持电路的自动增益控制系统相比,

本系统具有电路简单、电压峰值不会衰减、响应速度更快等优点。本研究在理论方面对系统进行了详细的分析,而且通过搭建实验平台验证了设计的可行性。

2 基于阈值法的脉冲激光测距系统

2.1 脉冲法激光测距原理

脉冲法激光测距通过测量发射脉冲和接收脉冲之间的时间间隔,从而测量系统与目标物的距离^[11],理论公式如下:

$$d = \frac{1}{2} c \cdot t, \quad (1)$$

式中: d 为测量距离; c 为光速; t 为测量时间。

2.2 脉冲法激光测距系统

脉冲法激光测距系统可分为3个部分:发射、接收、信号处理。

发射部分:测距系统使用FPGA中的锁相环和计数器,产生两路时间上同步的窄脉冲信号,信号脉宽均为20 ns,频率均为1 kHz。测距系统将其中一路电脉冲信号输入到阈值比较器中。一旦输入电压达到设定的阈值,阈值比较器将会立刻产生计时系统的开始信号 T_{start} ,再将这个开始信号输入到计时电路。同时,测距系统将另一路电脉冲信号输入到激光驱动电路,将电脉冲信号转化为光脉冲信号,输出波长为905 nm的脉冲激光。经过发射光学系统的准直后,照射到目标物上(如图1内虚线框1所示)。

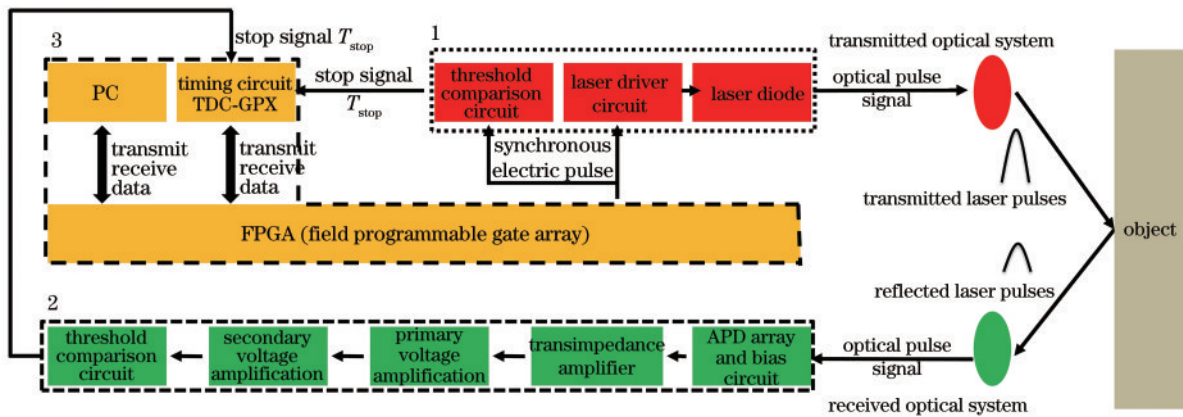


图1 脉冲法激光测距系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of pulsed laser ranging system

接收部分:激光照射到目标物上,发生漫反射,接收光学系统将漫反射的光信号聚焦到雪崩光电二极管(APD)上,APD将微弱的光脉冲信号转化为小电流信号,再将该小电流信号输入到跨阻放大器中进行适当地放大,并且转化为电压信号。此时输出的电压信号仍比较小,需将该电压信号输入到放大电路中,进行多级放大,再将放大后的电压输入到阈值比较电路中,一旦输入电压达到设定的阈值,阈值比较电路将会产生计时系统的结束信号 T_{stop} ,再将这个结束信号输入到

计时电路(如图1内虚线框2所示)。

信号处理部分:计时系统可以测量开始信号 T_{start} 和结束信号 T_{stop} 的时间间隔,之后FPGA将测量到的时间数据进行缓存与处理,再将处理过的数据通过串口上传至电脑上位机,实时显示测量的距离信息(如图1内虚线框3所示)。

2.3 阈值法的测量误差分析

在脉冲法激光测距系统中,多方面的原因都会产生测距误差,而主要原因为系统误差和随机误差。系

统误差主要有光电延迟误差和大气折射误差。随机误差主要有时钟计数电路的误差、噪声误差以及激光脉冲信号宽度和幅度变化引起的误差^[12]。激光脉冲信号宽度和幅度变化引起的误差:主回波的抖动、回波幅值的变化以及回波波形的展宽都会引起时间漂移误差,这些都可以总结为脉冲上升沿误差。可以通过恒比定时法、自动增益控制以及拟合平均算法等方法来减小此类误差。由于本文选用固定阈值法来判断结束时刻,脉冲上升沿误差是以上误差中最大的,所以重点分析了回波幅值变化和波形展宽引起的测量误差。

首先讨论回波脉冲幅值变化的原因及对测距系统的影响。由于目标物与测距系统的距离变化或目标物表面反射率变化,回波脉冲的幅值通常会随之发生变化。如果测距系统直接使用阈值法来判断结束时刻,容易引起较大的测量误差。极端情况下,如果回波幅值过大,探测器或放大器会饱和和失真,从而对系统造成损坏;如果回波幅值过小(低于阈值),会导致系统无法判断回波时刻,探测不到目标物。

然后分析回波脉宽变化的原因以及对测距系统的影响:

1) 黄涛等^[8]阐明了在激光探测过程中,测距系统发射的脉冲激光存在发散角,所以激光照射到目标物上时是一个光斑,光斑里的各点回波导致探测器接收到多个相近信号,导致回波脉宽变大。大量报道表明该脉冲展宽可采用一个相对简化的公式表达^[8]:

$$\Delta T = (2L\omega) \cos \theta \cdot \sqrt{r}, \quad (2)$$

式中: ΔT 为脉冲展宽程度; L 为探测器到目标的距离; ω 为光束的发散角; θ 为光束与目标平面的夹角; r 为目标激光雷达截面积占光束截面积的比率; c 为光速。

2) 测距系统的发射部分将电脉冲转化为光脉冲的过程,可能会导致脉宽变大。

3) 测距系统的接收部分将光脉冲转化为电脉冲以及经过一系列处理电路后,也可能引起脉宽变大^[7-10]。最终,变宽的回波脉冲会导致测距系统的测量误差变大。如图 2 所示,图 2 中, t_0 表示开始信号脉冲幅值达到设置阈值的时刻, t_1 表示理想的结束信号脉冲幅值达到设置阈值的时刻, t_2 表示无自动增益控制

系统时结束信号脉冲幅值达到设置阈值的时刻, t_3 和 t_4 均表示有自动增益控制系统时结束信号脉冲幅值达到设置阈值的时刻。最左边的实线曲线(start signal)为发射端输出的脉冲波形,右边幅值最高的实线曲线(ideal stop signal)为理想情况下测距系统接收到的脉冲波形,使用阈值法测量的时间间隔为 t_1-t_0 。但由于系统接收到的回波脉冲的幅值和脉宽都发生变化,这将会引起系统的测量误差,实际接收到的脉冲波形如图中右边幅值最低的实线曲线(actual stop signal)所示。此时,系统测量的时间间隔为 t_2-t_0 ,可以计算出时间测量误差为 t_2-t_1 。

2.4 自动增益控制减小阈值法误差的原理

为了减小系统接收到的脉冲幅值变化和脉宽变化引起的测量误差,激光测距系统通常会引入自动增益控制电路^[5]。吴建斌等^[13]详细阐述了自动增益控制采用时变增益的方法来减小因回波幅值变化而引起的误差,即系统的增益可以随时间变化。但缺乏对目标和背景的适应能力,例如由于目标物位置不变而目标表面反射率变化导致回波幅值变化时,使用随时间变化而改变增益的方法可能存在问题。所以,在实际使用过程中需要对探测到的回波幅值设置阈值,进一步保证回波信号的平稳性。

郭颖等^[4]提出了一种基于回波幅度的自动增益控制方法:通过两级峰值保持电路和模数转换(ADC)模块采集回波信号的幅值,控制器根据此幅值改变系统的增益,将回波幅值控制在设定的范围内,从而减小由幅值变化产生的误差。

在文献[4]的基础上设计了应用于脉冲展宽激光测距系统的自动增益控制,在实现系统功能的前提下,舍去了原有的峰值保持电路,降低电路的复杂性。所提的传统自动增益控制指郭颖等^[4]提出的方法。其效果如图 2 中右侧两条虚线波形所示,当系统接收到的回波脉冲峰值小于所设置的范围最小值 V_{\min} 时,自动增益控制电路将适当提高系统的增益,以此来增大系统接收的回波峰值;当系统接收到的回波脉冲的峰值大于所设置的范围最大值 V_{\max} 时,自动增益控制电路将适当降低系统的增益,以此来减小系统接收的回波峰值。因此,自动增益控制电路可以将回波峰值控制在所设定的范围内($V_{\min} \sim V_{\max}$)。将自动增益控制电路加入到原有的测距系统后,由于回波脉宽和幅值变化引起的测量误差可以被有效地缩小,由原来的 t_2-t_1 ,缩小到 t_3-t_1 或 t_4-t_1 。

3 测距系统的测试与分析

3.1 传统的自动增益控制系统存在的问题

传统的自动增益控制电路^[5,14]使用峰值保持电路和 ADC 电路来检测回波脉冲峰值。峰值保持电路的核心是保持电容和二极管,当电压或电流变大时,经过

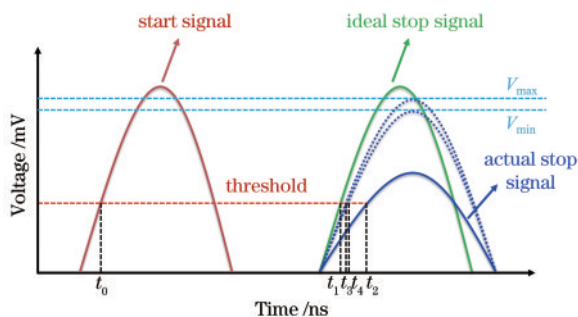


图 2 阈值法测量误差分析

Fig. 2 Error analysis of threshold method

二极管对保持电容充电,实现保持峰值的功能^[15]。但二极管和电容的存在会导致测量到的回波峰值低于实

际回波峰值^[16]。图 3 为基于 OPA615 的峰值保持电路原理图。

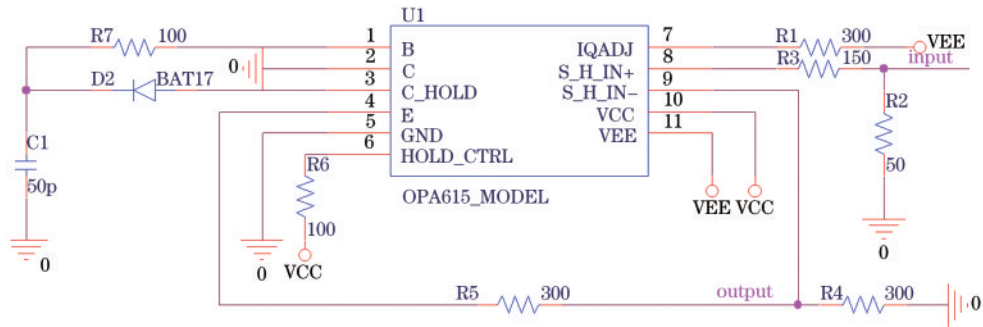


图 3 基于 OPA615 设计的峰值保持电路原理图

Fig. 3 Schematic diagram of peak holding circuit designed based on OPA615

基于 OPA615 的仿真输出情况,如图 4 所示。峰值保持电路的输入波形的峰值约为 90 mV;峰值保持电路的输出波形的峰值约为 60 mV。由图 4 可知,系统对窄脉冲回波检测时,峰值保持电路可以有效地检测到回波,降低对高速 ADC 的采样率要求以及降低电路的设计难度,从而降低成本。

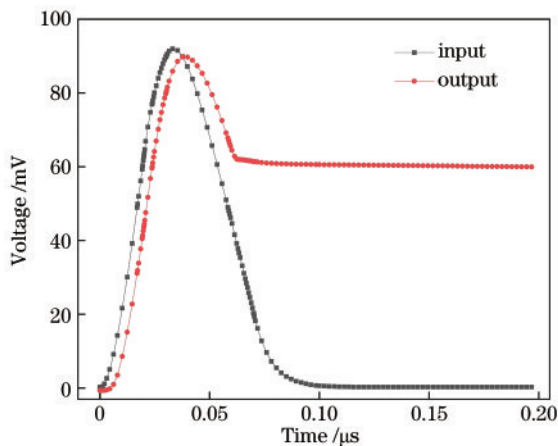


图 4 峰值保持电路仿真结果

Fig. 4 Simulation results of peak holding circuit

但该仿真结果也说明峰值保持电路存在 3 个问题:1) 存在峰值衰减现象,导致下一级高速 ADC 检测到的峰值偏小;2) 峰值保持电路中的电容两端电压会在下一个回波到来之前缓慢降低,容易影响自动增益控制系统的稳定性;3) 峰值保持电路还存在响应速度慢的问题,因为电容的充放电需要时间。如果峰值保持电路没有相应的放电电路,保持电容的放电时间将会持续较长时间,从而严重影响系统的响应速度,该缺陷尤其在对响应速度要求较高的应用场景是不可接受的,如车载激光雷达。

3.2 改进型自动增益控制系统

本研究使用采样率为 250 MHz 的高速 ADC 采集回波幅值数据,可计算出相邻两点之间的时间间隔为 4 ns。如图 5 所示,横坐标为高速 ADC 采集的原始数

据,相邻 2 个点之间的时间间隔为 4 ns,则高速 ADC 实际采集到的回波脉冲底部宽度约为 56 ns,比发射部分脉冲底部宽度的 24 ns 脉宽展宽了很多,说明了激光测距在实际应用中存在脉冲展宽的现象。此外,系统也可以很快从高速 ADC 采集的数据中读出回波的峰值。所以,该系统可以直接采用高速 ADC 测量峰值,而不需要峰值保持电路,简化了电路。

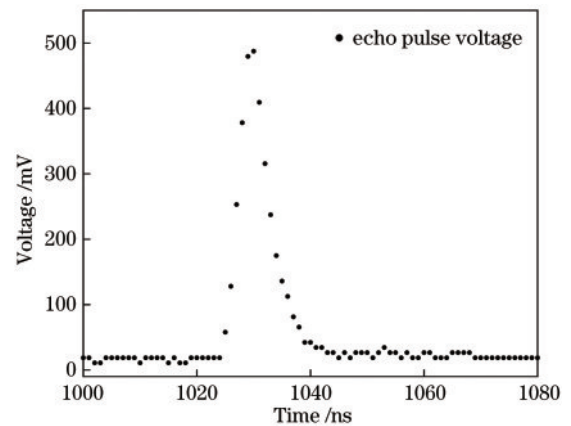


图 5 高速 ADC 测量的展宽回波脉冲

Fig. 5 High-speed ADC measurement of the broadened echo pulse

高速 ADC 采集到回波峰值数据后,自动增益控制系统会根据回波峰值的大小调节整个系统的增益,所以需要 FPGA 进行程序设计。基于 FPGA 的自动增益控制时序如图 6 所示,因为测距系统的发射部分发射脉冲频率为 1 kHz,即每隔 1 ms 发射一个脉冲。在一个周期内(1 ms),高速 ADC 采集到大量电压数据后,系统通过 FPGA 对这些数据进行处理,找出一个周期内的最大值(图 6 中的 data_max_hold),并保持一段时间,这样就可以在 FPGA 内实现峰值保持的功能。然后自动增益控制系统通过所测量的最大值来调节整个系统的增益(图 6 中的 AGC_control),而且可以随时将这个最大值清零(图 6 中的 data_max_reset),比传统的硬件上实现峰值保持电路更容易控制、响应速度也更快。

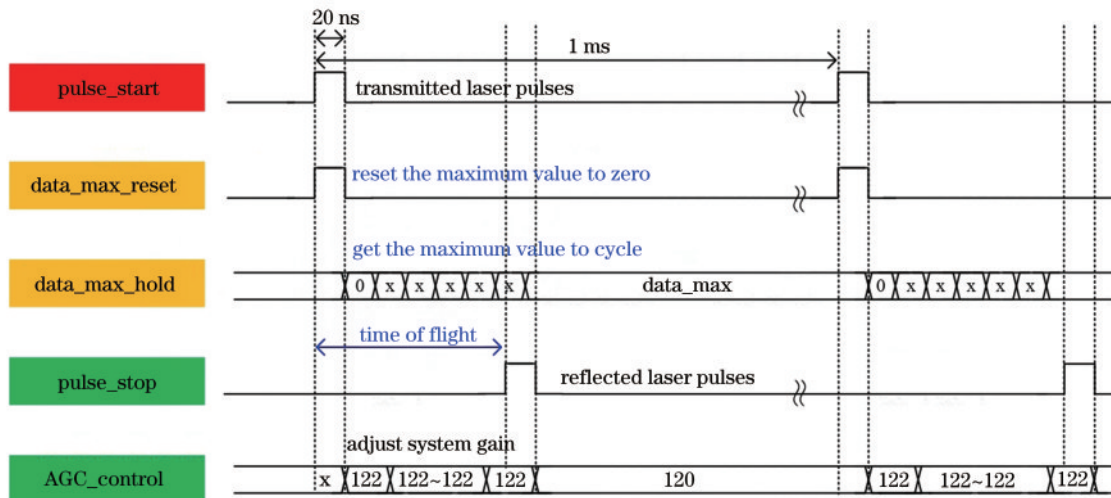


图 6 基于FPGA的自动增益控制时序

Fig. 6 Automatic gain control timing based on FPGA

在接收回波时测距系统增益发生变化,会导致回波异常,如图 7(a)所示,系统容易发生测量错误。为了使系统更加稳定,即在接收回波脉冲时系统增益保持不变,系统需要设定最大值清零的时刻。本研究将最大值

清零设置在系统发射脉冲时,因为在发射脉冲的一瞬间,系统不可能接收到回波。实际测试效果如图 7(b)所示,表明该方案有效解决了系统接收到回波时因增益变化导致的异常问题。

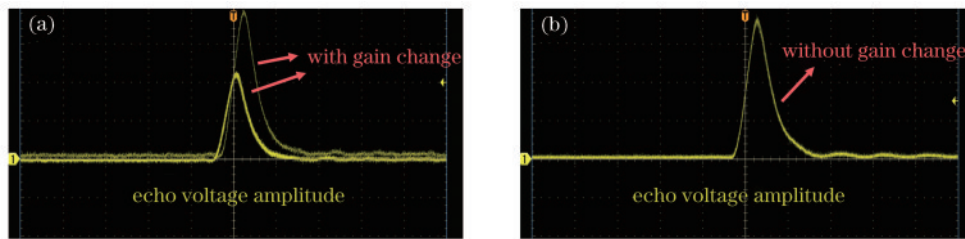


图 7 系统接收回波时的输出波形对比图。(a)增益变化,回波异常;(b)增益不变化,回波正常

Fig. 7 Comparison diagram of output waveform when the system receives the echo. (a) Echo is abnormal with gain change; (b) echo is normal without gain change

对自动增益控制系统的效果进行初步测试。当目标物距离测距系统 2.0 m 时,通过示波器观察其输出波形。图 8(a)下方幅值较低的波形 (transimpedance amplifier output) 为没有自动增益控制电路的测距系统输出波形,可以看出此时系统接收到的回波峰值很小,

不利于后续比较电路的时刻鉴别,会引起很大的测距误差,甚至无法识别回波;图 8(a)上方幅值较高的波形为有自动增益控制电路的测距系统输出波形,此时系统将回波峰值放大到了设置的范围之内,在示波器光标模式下的垂直光标之间 (2 条 cursor 之间)。当目

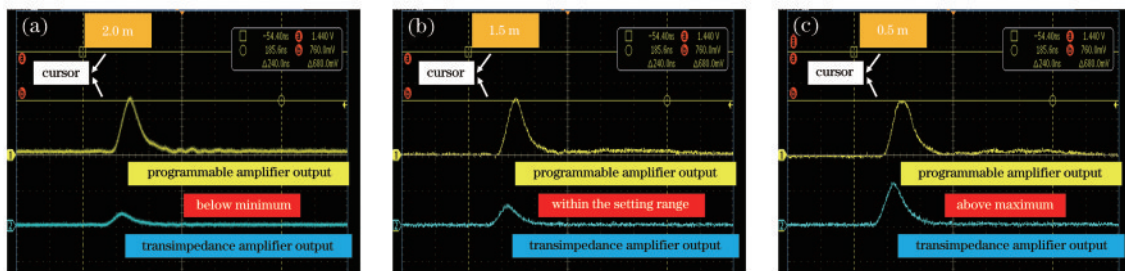


图 8 改变距离时有无自动增益控制系统的回波脉冲波形图对比。(a)目标物与测距系统间距为 2.0 m;(b)目标物与测距系统间距为 1.5 m;(c)目标物与测距系统间距为 0.5 m

Fig. 8 Comparison of echo pulse waveforms with and without automatic gain control system when changing distance. (a) Distance between the target and the ranging system is 2.0 m; (b) distance between the target and the ranging system is 1.5 m; (c) distance between the target and the ranging system is 0.5 m

标物与系统距离减小到 1.5 m 时,有无自动增益控制系统的回波波形如图 8(b)所示。可以看出自动增益控制系统将回波峰值调控在所设定的范围内。此时系统适当地提高或降低增益,可以有效地减小阈值法带来的测量误差。当目标物与系统距离减小到 0.5 m 时,如图 8(c)所示,可以看出回波已经明显变大,此时如果系统不减小增益,容易造成后级放大电路的饱和和失真,所以自动增益控制系统适当地降低了增益,亦将回波峰值调控在所设定的范围内,从而有效地减小阈值法带来的测量误差。

此外,经过多次改变目标物与系统的距离或激光器的出射功率后,得出自动增益控制实验结果:可以有效地将回波幅值控制在较小范围内(0.76~1.44 V)。

3.3 基于自动增益控制的改进型激光测距系统

改进后的测距系统工作流程如图 9 所示,具体为激光测距系统的发射端输出波长为 905 nm 的脉冲激光,经过发射光学系统的准直后,照射到目标物上,发生漫反射,测距系统的接收光学系统将漫反射的光信号聚焦到 APD 上,APD 将微弱的光脉冲信号转化为

电流信号,再将电流信号通过跨阻放大器进行适当地放大,并且转化为电压信号,再通过高速 ADC 采集该信号的电压峰值,将电压峰值作为反馈来调节系统的增益,使回波电压峰值稳定在一定范围内,再将电压信号输入到阈值比较电路中,产生结束信号 T_{stop} ,输入到计时电路(如图 9 中虚线框 2 所示)。为了更精确地实现自动增益控制效果,按照目标物与系统的距离进行分级处理,分级越多自动增益控制效果越好,此处以 4 级为例,改进型激光测距系统增益控制,如表 1 所示。当目标物在超近范围时设为第 1 级,测距系统接收到的回波峰值高于最大阈值,系统自动降低放大器的增益,同时降低 APD 的反向偏压,减小系统增益;当目标物在较近范围时设为第 2 级,测距系统接收到的回波峰值高于较大阈值,自动降低放大器的增益;当目标物在较远范围时设为第 3 级,测距系统接收到的回波峰值低于较小阈值,自动提高放大器的增益;当目标物在超远范围时设为第 4 级,测距系统接收到的回波峰值低于最小阈值,自动提高放大器的增益,同时降低比较电路的阈值。

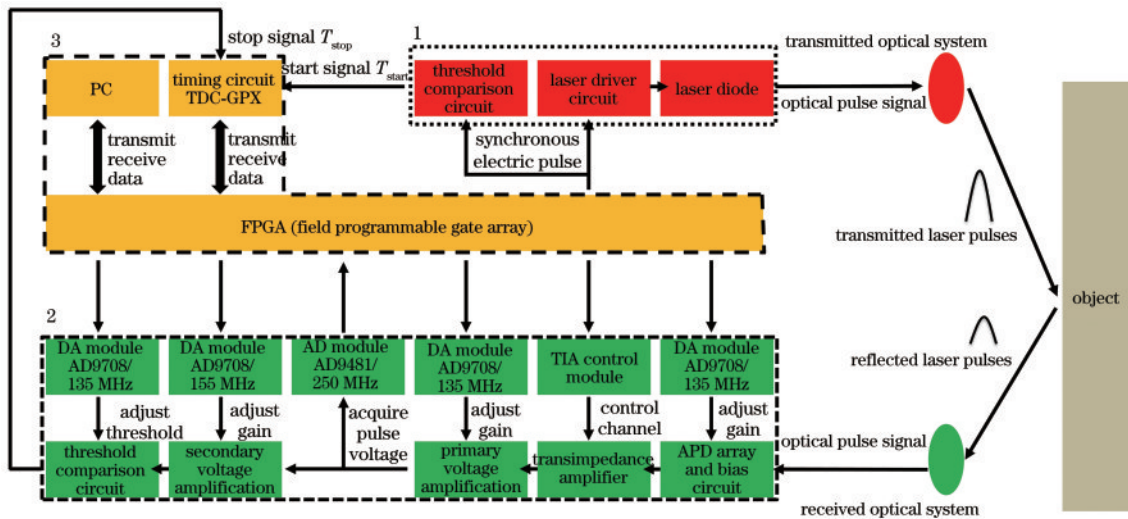


图 9 基于自动增益控制的改进型激光测距系统

Fig. 9 Improved laser ranging system based on automatic gain control

表 1 改进型激光测距系统增益控制

Table 1 Gain control of the improved laser ranging system

Distance	Control method
Ultra-long range	Increase the gain of system and reduce the threshold voltage
Long range	Increase the gain of system
Short range	Reduce the gain of system
Ultra-short range	Reduce the gain of system and reduce APD reverse bias

3.4 测距系统的实验测试

本研究进行了测距系统的实验测试。为降低系统的复杂性,将系统中的数据处理功能(均值滤波、线性拟合等)去除,系统只记录时间数据转化器(TDC)测量到的原始数据,分析幅值变化引起的飞行时间测量

误差。此外,将测距系统中阈值比较电路的阈值调大,便于在近处模拟距离系统较远的目标物。

首先,对无自动增益控制的激光测距系统进行测试。在距离不变的情况下,调节激光器的输出功率,如图 10(a)所示,横坐标为测距系统与目标物的距离,纵

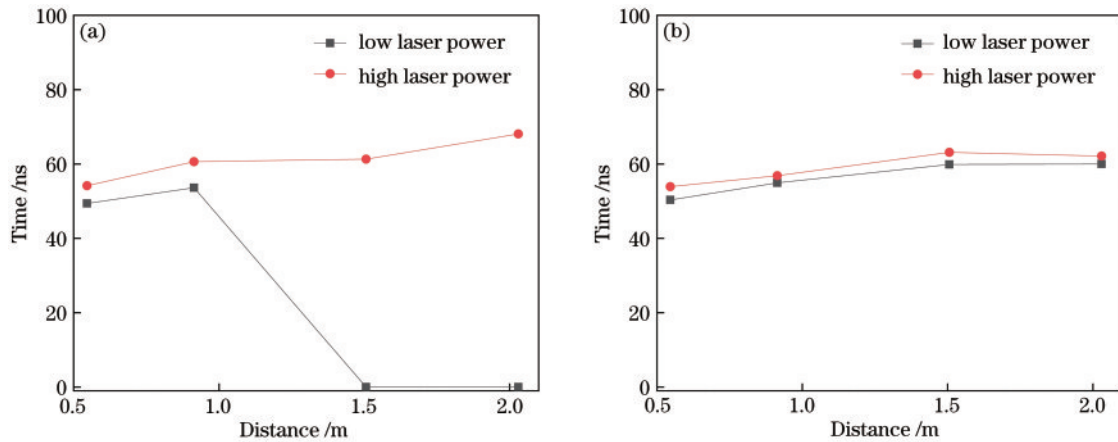


图 10 有无自动增益控制的激光测距系统对比测试。(a)无自动增益控制的激光测距系统测试;(b)有自动增益控制的激光测距系统测试

Fig. 10 Comparative test of laser ranging system with and without automatic gain control. (a) Test of laser ranging system without automatic gain control; (b) test of laser ranging system with automatic gain control

坐标为时间数据转化器(TDC)实际测量到的原始数据。方格点曲线表示激光功率较小时系统测量的飞行时间,圆点曲线表示激光功率较大时系统测量的飞行时间。由图 10(a)可知,在 1.5 m 处,测距系统已经无法测量到时间数据,原因为回波峰值低于设置的阈值,这也是无自动增益控制系统的弊端;在距离相同时,激光功率较大和激光功率较小的数据差异较大。具体来说,距离系统 0.5 m 和 1 m 处的目标物在输出激光功率变化时,系统测量到的数据变化最大达到 4.77 ns 和 7 ns;超过 1.5 m 时测距系统已经无法探测到目标物,表明系统接收到的回波幅值变化导致测量误差较大。

然后,对基于自动增益控制的改进型激光测距系统进行测试,测试方法不变,如图 10(b)所示。由图 10(b)可知,在 1.5 m 处仍可以测量到飞行时间,表明自动增益控制可以有效解决因回波峰值低于阈值而无法测量的问题;在相同距离时,与图 10(a)相比,图 10(b)中的激光功率较大和激光功率较小的数据差异明显变小。具体来说,距离系统 0.5、1、1.5、2 m 处的目标物在输出激光功率变化时,系统测量到的数据变化分别为 3.56、1.90、3.25、2.16 ns,与无自动增益控制的测距系统数据变化(最高达到 7 ns)相比,数据波动明显减小。该结果表明:简化电路后的改进型激光测距系统可以实现传统的峰值保持电路测距系统的功能,减小回波幅值变化引起的测量误差或数据波动。

4 结 论

在脉冲法激光测距系统实际测试中,由于激光器、探测器、测距变化等多方面因素,回波脉冲幅值和脉宽会发生变化,导致基于固定阈值法的激光测距系统测量误差较大。详细解释了阈值法引起误差的原

因,分析了传统的自动增益控制存在的问题以及改进方法。进一步地,根据脉冲激光测距系统接收到的实际回波脉冲底部宽度约为 56 ns,设计了一套自动增益控制的改进型激光测距系统。该系统在 FPGA 的控制下使用采样率为 250 MHz 的高速 ADC 测量回波脉冲幅值,通过 FPGA 对所测数据进行处理,找出一个周期内的最大值,并保持一段时间,即可在 FPGA 内实现峰值保持的功能。FPGA 根据测量到的回波峰值,控制多个数模转换模块输出电压,进而调节系统各部分的增益,包括 APD 的偏压、各级放大器的增益以及比较器的阈值等。测试结果表明:所设计的自动增益控制系统具有电路简单、电压峰值不会衰减、响应速度更快等优点,该设计为基于阈值法的脉冲激光测距系统减小测量误差提供了理论分析和实验基础。

参 考 文 献

- [1] Perenzoni D, Gasparini L, Massari N, et al. Depth-range extension with folding technique for SPAD-based TOF LIDAR systems[C]//SENSORS, 2014 IEEE, November 2-5, 2014, Valencia, Spain. New York: IEEE Press, 2014: 622-624.
- [2] Jayarajan J, Kumaran R, Paul S, et al. Design of high precision electronics for laser range finder[C]//2013 IEEE Recent Advances in Intelligent Computational Systems, December 19-21, 2013, Trivandrum, India. New York: IEEE Press, 2013.
- [3] 朱福, 林一楠. 一种提高脉冲激光测距精度的方法[J]. 光电技术应用, 2011, 26(2): 42-44, 52.
Zhu F, Lin Y N. Method to improve accuracy of pulse laser ranging[J]. Electro-Optic Technology Application, 2011, 26(2): 42-44, 52.
- [4] 郭颖, 陈弈, 黄庚华, 等. 一种应用于高精度脉冲激光测距的自动增益控制方法[J]. 激光与红外, 2010, 40(4): 345-348.

- Guo Y, Chen Y, Huang G H, et al. Method of automatic gain control used in high precision pulse laser rangefinder[J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(4): 345-348.
- [5] 吴钰, 周木春, 赵琦, 等. 脉冲激光测距中阈值: 峰值双通道时刻鉴别方法[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(6): 0606002.
- Wu Y, Zhou M C, Zhao Q, et al. Threshold-peak dual-channel time discrimination method for pulse laser ranging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(6): 0606002.
- [6] 蔡贵霞, 钱惟贤, 杨锦清, 等. 差分信号时刻鉴别法的脉冲激光测距技术分析[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(12): 1205001.
- Cai G X, Qian W X, Yang J Q, et al. Pulse laser ranging technique based on differential signal time discrimination method[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(12): 1205001.
- [7] Palojarvi P, Ruotsalainen T, Kostamovaara J. A new approach to avoid walk error in pulsed laser ranging [C]//1999 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, May 30-June 2, 1999, Orlando, FL, USA. New York: IEEE Press, 1999: 258-261.
- [8] 黄涛, 胡以华, 赵楠翔, 等. 遮蔽目标激光雷达回波波形的建模与仿真[J]. *激光技术*, 2011, 35(1): 11-14.
- Huang T, Hu Y H, Zhao N X, et al. Simulation and modeling of lidar waveforms returned from obscure targets[J]. *Laser Technology*, 2011, 35(1): 11-14.
- [9] 孙俊灵, 马鹏阁, 郭清源, 等. 低信噪比下机载平台多脉冲激光测距机目标回波降噪算法[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(6): 20210005.
- Sun J L, Ma P G, Guo Q Y, et al. Target echo denoising algorithm of airborne platform multi pulse laser rangefinder under low SNR[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(6): 20210005.
- [10] 王佳立, 徐孝彬, 吴家林, 等. 脉冲激光探测多平面目标回波特性[J]. *中国激光*, 2022, 49(6): 0604004.
- Wang J L, Xu X B, Wu J L, et al. Echo characteristics of multiplane targets detection using pulsed laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(6): 0604004.
- [11] 陈瑞强, 江月松. 脉冲激光测距的时间间隔测量方法[J]. *光学学报*, 2013, 33(2): 0212004.
- Chen R Q, Jiang Y S. Method of measurement on time-interval in pulsed laser ranging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(2): 0212004.
- [12] 甄文庆. 脉冲激光测距机的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014: 33-39.
- Zhen W Q. Research on pulsed laser rangefinder[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014: 33-39.
- [13] 吴建斌, 田茂. 基于 AD603 的时变增益放大器的实现[J]. *电子测量技术*, 2008, 31(4): 29-32.
- Wu J B, Tian M. Implementation of time varying gain amplifier based on the AD603[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2008, 31(4): 29-32.
- [14] 王皓, 罗沛, 李小路. 近程动态范围激光雷达测距系统设计及误差分析[J]. *北京航空航天大学学报*, 2020, 46(2): 422-429.
- Wang H, Luo P, Li X L. Design of LiDAR ranging system for short-distance dynamic range and error analysis [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2020, 46(2): 422-429.
- [15] 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.
- 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.
- [16] 郎建华, 李晨希. 一种基于激光测距的能量探测电路设计[J]. *光电技术应用*, 2020, 35(3): 78-82.
- Lang J H, Li C X. Design method of energy detection circuit based on laser ranging[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2020, 35(3): 78-82.