

# 低成本脉冲激光测距系统研究

马鸿斌<sup>1</sup>, 尚建华<sup>1</sup>, 潘世光<sup>1</sup>, 罗远<sup>2</sup>, 贺岩<sup>2</sup>

(1. 东华大学 信息科学与技术学院, 上海 201620;

2. 中国科学院上海光学精密机械研究所 空间激光信息技术研究中心, 上海 201800)

**摘要:** 基于脉冲飞行时间测距法构建了一套近程高精度脉冲激光测距系统, 系统采用直接探测工作方式, 利用 FPGA(Field Programmable Gate Array)主控芯片控制脉冲激光的发射以及回波信号的采集和处理, 进而实现高精度测距。在实验室条件下, 借助测距性能验证实验, 获得了泡沫板目标的距离信息, 且系统测距精度可达 5.43 mm@8.08 m。主要介绍了脉冲激光测距系统的工作原理、系统构成以及基于 FPGA 的距离信息提取算法。

**关键词:** 激光测距; 近程测距; 脉冲飞行时间; FPGA

中图分类号: TN249

文献标识码: A

DOI: 10.19358/j.issn.2096-5133.2020.09.014

引用格式: 马鸿斌, 尚建华, 潘世光, 等. 低成本脉冲激光测距系统研究[J]. 信息技术与网络安全, 2020, 39(9): 74-78.

## Research on the low-cost pulse laser ranging system

Ma Hongbin<sup>1</sup>, Shang Jianhua<sup>1</sup>, Pan Shiguang<sup>1</sup>, Luo Yuan<sup>2</sup>, He Yan<sup>2</sup>

(1. School of Information Science and Technology, Donghua University, Shanghai 201620, China;

2. Research Center of Space Laser Information Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract:** A short-range high-precision pulse laser ranging system working on the direct detection mode is presented based on the time of flight(TOF). By means of the FPGA(Field Programmable Gate Array), the sequential control for the pulse laser transmission and the high-speed acquisition and real-time processing of the echo signal are realized. With one foam target, the ranging calibration experiment is conducted and the ranging accuracy is up to 5.43 mm at 8.08 m under laboratory conditions. In this paper, the principle, the constitution and the distance information extraction algorithm of this pulse laser ranging system are introduced.

**Key words:** laser range finder; short range measurement; time of flight; FPGA

### 0 引言

科技的进步加快了测距技术的发展步伐, 同时也对测距系统提出了更为苛刻的要求。其中, 激光测距技术利用激光优异的单色性以及极窄的脉冲宽度等特点, 能够有效降低地面杂波的影响和背景噪声的干扰, 在超低空或地面目标探测等领域具有明显的探测优势<sup>[1]</sup>。对于地理勘测以及复杂地理环境下的工程测量, 激光测距系统能够提供较高的测距精度<sup>[2]</sup>。近年来, 无人汽车<sup>[3]</sup>、无人机<sup>[4]</sup>、机器人等新兴技术的快速发展离不开高性能的测距技术, 越来越多的新型智能装备将激光测距系统作为其探

测模块, 因此, 对激光测距系统的测距性能(测距精度、动态范围和数据上传速率等)、功耗以及体积等方面提出了更高的要求, 同时也衍生出了新的测距指标标准<sup>[5]</sup>。目前, 激光器技术的发展成熟以及高灵敏度探测器等光电器件性能的不断提高给激光测距技术带来了新的机遇与挑战, 如何提高测距系统的测距性能、如何有效降低系统成本、加快其实用化进程是未来激光测距技术的重要发展趋势。

激光测距系统是激光技术和现代信息处理技术的综合产物, 其以激光作为探测媒介, 通过对回波信号光的相位、振幅或偏振态等特征量的处理,

计算得到目标的距离信息<sup>[6-7]</sup>。根据激光测距的工作原理,可将激光测距技术分为三角测距、脉冲测距、相干测距和光子计数测距。根据测距范围,可将激光测距技术分为近程、中程和远程测距<sup>[8]</sup>。根据探测方式,可将激光测距技术分为相干探测方式和直接探测方式。相干探测时,光电探测器是对本振光和信号光的拍频信号进行响应,再通过鉴频或鉴相处理得出距离信息<sup>[9]</sup>。直接探测<sup>[10]</sup>时,光电探测器直接对回波信号光进行响应。由于直接探测容易受到背景光的干扰<sup>[11]</sup>且要求单个回波信号光的能量必须大于光电探测器的等效噪声功率,因此,常采用响应快、噪声小、灵敏度高的雪崩光电二极管(Avalanche Photodiode, APD)探测微弱的回波信号光并对其进行光电信号转换,其次,在回波信号处理过程中也需要做消噪处理,以便提高测距的准确度<sup>[12]</sup>。

目前技术最为成熟且应用最为广泛的测距方法是脉冲飞行时间测距法和单光子计数测距法。脉冲飞行时间测距法,是通过测量发射信号光和回波信号光之间的时间间隔而得到距离信息<sup>[13]</sup>;单光子计数测距法,是采用光子计数和数学统计的思想从回波信号光中提取得到距离信息<sup>[8,14]</sup>。

在信号处理方面,应用日益广泛的无人智能装备对其搭载的激光测距系统提出了新的要求,系统必须具备实时、准确的数据采集能力。然而,DSP和ARM的时钟频率比较低,仅能在软件层进行编程,无法满足实际应用时激光测距雷达的数据采集和处理要求<sup>[15]</sup>。相比而言,FPGA的时钟频率非常高且内部延时短,可直接编程实现相关逻辑功能,因而可作为激光测距系统的主控芯片,以达到工作可靠、设计灵活、响应迅速等要求。

综上所述,本文基于脉冲飞行时间测距原理设计实现了一套脉冲激光测距系统,系统采用直接探测的工作方式,并利用APD实现回波信号光的光电转换;在时序控制及距离信息提取方面,以FPGA作为主控芯片<sup>[16]</sup>控制激光脉冲的发射并从回波信号光中提取得到待测目标的距离信息。

## 1 脉冲激光测距系统工作原理

### 1.1 脉冲飞行时间测距原理

脉冲飞行时间测距法是通过测量发射激光脉冲与回波激光脉冲的时间间隔(即发射激光脉冲的往返时间)而得到待测距离信息的<sup>[17]</sup>。若激光脉冲的往返飞行时间为 $t$ ,光在空气中的速度为 $c$ ,则待

测目标的距离 $S$ 如式(1)所示。在实际的脉冲激光测距系统中,激光脉冲飞行往返时间 $t$ 是由系统内部的计数器统计激光脉冲发射时刻与回波信号光到达时刻之间的时钟脉冲个数而计算得到的。如图1所示,测距系统的工作时钟频率为 $f$ (周期为 $\tau$ ),激光发射与回波信号到达APD表面之间的时钟脉冲个数为 $n$ ,则待测距离 $S$ 可表示为式(2):

$$S = \frac{ct}{2} \quad (1)$$

$$S = \frac{cn\tau}{2} \quad (2)$$

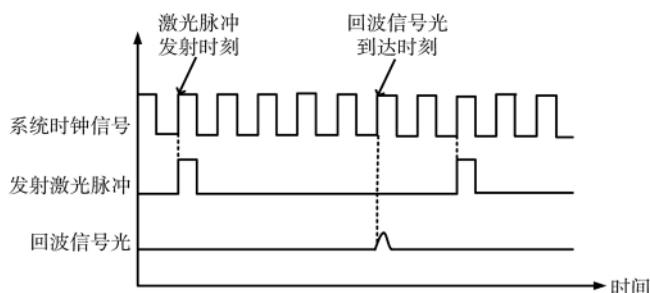


图1 脉冲飞行时间测距法工作原理

因此,激光脉冲往返时间 $t$ 的精度将直接影响系统测距分辨率,而往返时间 $t$ 的精度是由系统工作时钟的频率 $f$ 决定的(如式(3)所示),提高测距系统工作时钟频率 $f$ 可显著提高系统的测距分辨率。

$$S = n\Delta S = n \frac{c\tau}{2} = n \frac{c}{2f} \quad (3)$$

### 1.2 脉冲激光测距系统

如图2所示,脉冲激光测距系统由三部分组成,一是以FPGA芯片为主的主控模块,负责测距系统的时序控制以及数据采集和距离信息提取;二是发射光源部分,主控模块输出时序控制信号控制发射光源的驱动电路工作,发射光源按照相应的时序要求发射激光脉冲,经光学发射单元的光束准直作用后,垂直入射到待测目标表面;三是回波信号光接收模块,经光学接收单元作用,回波信号光在APD表面聚焦并由APD转换为电信号,再经过放大、整形等处理后,FPGA对该信号进行高速采集和实时处理,计算并输出待测目标的距离信息。此外,APD的电流放大增益 $M$ 决定了其电流放大能力,为了使APD的电流放大能力保持稳定,测距系统中还设计了APD温度检测补偿模块,从而提高APD探测回波信号光的可靠性。

脉冲激光测距系统的工作波长为905 nm,工作

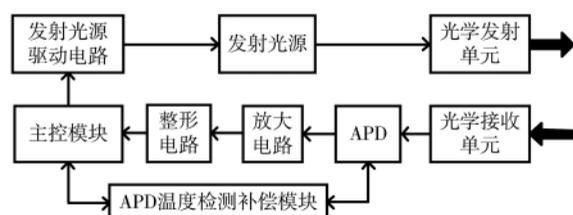


图 2 脉冲激光测距系统原理框图

方式为直接探测方式。因此,测距系统中的光电探测器 APD 只对回波信号光功率进行响应。APD 主要性能指标包括光谱响应范围、量子探测效率、暗电流和最小可探测光功率等,如表 1 所示。其中,量子探测效率与 APD 的工作波长有关,暗电流会随 APD 反向偏置电压的变化而变化,最小可探测光功率则直接决定了测距系统的最大可测距离。

表 1 APD 的光电性能指标(工作温度 23°)

项目	测试条件	最小值	典型值	最大值
暗电流/nA	$M=100$	-	0.5	1
电容值/pF	$M=100$	-	0.3	-
响应度/(A/W)	$M=100@905\text{ nm}$	52	58	60
上升沿时间/ns	$M=100; \lambda=905\text{ nm}; R=50\ \Omega$	-	0.5	-
击穿电压/V	$I=2\ \mu\text{A}$	160	-	200
温度系数/(V/K)	Change of UBR with temperature	1.25	-	1.55

根据外加偏置电压  $U$  的大小,APD 的工作模式分为盖革工作模式和线性工作模式两种。当反向偏置电压  $U$  达到反向击穿电压 UBR 时,APD 进入盖革工作模式;当反向偏置电压  $U$  小于反向击穿电压 UBR 时,APD 工作在线性模式,此时 APD 输出电流与入射光功率成正比且容易区分光电流和暗电流<sup>[18]</sup>。本文设计的脉冲激光测距系统中,APD 工作在线性模式下。

由于 APD 是温度敏感型光电探测器<sup>[19]</sup>,APD 的击穿电压 UBR 会因温度的变化而改变,如表 1 所示;对于 APD 的电流放大增益  $M$ ,其值与反向偏置电压  $U$ 、APD 的制作材料以及反向击穿电压 UBR 有关,如式(4)所示:

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{U}{UBR}\right)^m} \quad (4)$$

其中,  $m$  是与 APD 材料结构有关的常数。

因此,测距系统中增加了 APD 温度检测补偿<sup>[20-21]</sup>模块,在反向击穿电压 UBR 随温度变化的同时,温度传感器实时监测该温度的变化情况并反馈给主控模块,再由主控模块中的 FPGA 设置相应的 DA 参

数以调整 APD 的反向偏置电压  $U$ ,进而使反向偏置电压  $U$  和反向击穿电压 UBR 同步变化,最终获得稳定的电流放大增益  $M$ 。

### 1.3 时序控制及距离信息提取算法

本文设计的脉冲激光测距系统是面向近场高精度实时测距的应用需求,因此,测距系统中的时序控制以及距离信息的提取均是在 FPGA 主控芯片上使用 Verilog 语言编程实现的,包括发射激光脉冲的时序控制、信号采集、距离信息提取以及温度补偿控制等。

#### 1.3.1 发射激光脉冲的时序控制

如图 3 所示,发射激光脉冲的时序控制包括设置发射激光脉冲的重复频率以及相应的 D/A 调制控制模块,其中,D/A 调制控制模块包括控制激光器的 DA\_LD 子模块和控制 APD 的 DA\_APD 子模块两部分。

#### 1.3.2 回波信号接收

测距系统发射激光脉冲经待测目标表面漫反射后,再经光学接收单元、APD、放大整形电路依次作用后,由 FPGA 中的高速收发器 ALTGX 接收。以 FPGA 高速收发器代替传统高速 D/A 芯片是节省测距系统成本的一个重要因素。当测距系统的最大待测距离为 30 m 时,可将 ALTGX 的采样率设置为 2 Gb/s(采样周期 0.5 ns)。因此,测距系统只需在发射激光脉冲之后接收 200 ns 时长、共 400 个周期的回波数据,即可达到测距要求。并且,回波脉冲的到达时刻取脉冲上升沿与下降沿到达时刻的中间值,因此,在距离提取算法中,脉冲飞行时间的精度提升了两倍,根据式(2)和(3)可得系统的测距分辨率为 37.5 mm。

在利用脉冲飞行时间测距法测量距离时,为了降低测距误差,需要准确获得激光脉冲的发射时刻

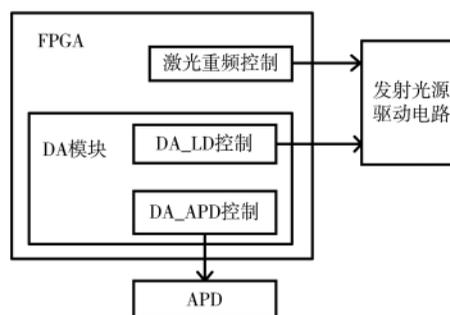


图 3 发射激光脉冲的时序控制

和回波脉冲信号的到达时刻。若  $time_1$  和  $time_2$  为回波脉冲信号上升沿时刻和下降沿时刻对应的计数器值,则回波脉冲信号返回时刻对应的计数器值取二者的平均值,因此,待测距离  $S$  可表示为式(5):

$$S = n\Delta S = \left( \frac{time_1 + time_2}{2} \right) \times 0.075 \quad (5)$$

当 ALTX 完成 400 个周期的回波数据采集之后,再将其以 25 个 16 位数据并行输出给后续处理单元,以提取待测距离信息。

### 1.3.3 距离信息提取

在计算待测距离信息时,首先由 FPGA 中的 parallel\_serial 模块按照设定的逻辑顺序将收到的 25 个 16 位并行数据转换为 400 位串行数据 serial\_data 并输出,parallel\_serial 模块的数据转换输出时序关系如图 4 所示。由于 FPGA 是以 ALTX 输出的频率为 125 MHz(周期 8 ns)信号作为工作时钟(clk)的,因此,parallel\_serial 模块完成数据采集和串行数据输出至少需要 425 个工作时钟,即至少耗时 3.4  $\mu$ s。

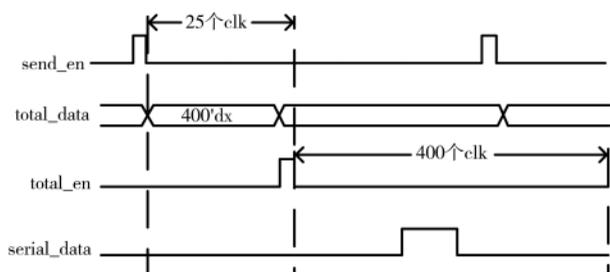


图 4 parallel\_serial 的数据转换输出时序关系

然后,上述携带有距离信息的 400 位数据被等分为四部分并进行并行数据处理,如图 5 所示。对于每部分信号,首先在 pre\_caculation 单元中设定采样阈值宽度并依次判断各回波信号的脉宽情况,从而滤除部分无效回波信号,降低背景光等噪声的干扰。当信号脉宽大于阈值宽度时,回波信号被判定

为有效数据,反之则视为噪声并加以去除。其次,分别判断各回波信号上升沿和下降沿的准确到达时刻,并在 distance\_caculation 单元中依据测距公式初步计算待测距离值。最后,综合考虑 APD 工作温度、激光器 D/A 设定、目标反射率等因素的影响,在 distance\_adjust 单元中校正测距结果,并将校正后的距离值发送到 average\_distance 单元,与其他三个进程得到的校正距离执行累加求平均的算法,最终得出待测目标的距离信息。其中,增加累加平均的次数可进一步提高系统的测距精度,但是也会降低距离信息的计算速度。在提取距离信息的同时,FPGA 主控芯片还输出激光脉冲重复频率的控制信号。

由于测距系统中激光的重频为 1 MHz,因此,FPGA 主控芯片采用乒乓操作模式实现数据处理和时序控制等功能,进而有效提升了测距系统的数据处理速度,优化了系统的实时性,使系统能够快速获得待测距离信息。

## 2 实验验证

在实验室条件下,以反射率为 0.1 的泡沫板为待测目标,且泡沫板距离测距系统发射望远镜 8.08 m。基于上述脉冲激光测距系统搭建测距性能测试实验平台,以初步验证测距系统的可行性和测距精度。针对泡沫板材料,共进行 9 组测距实验,并对回波信号累加平均次数与测距结果标准差之间的关系进行了比较分析,修正了距离提取算法相关参数,所得测距结果如表 2 所示。由表 2 可知,测距系统获得的距离值分布在 8.07 m~8.085 m 之间,当测距值为 8.08 m 时,测距系统的测距精度可达 5.43 mm。

## 3 结论

随着无人驾驶、仓储报警等新型智能应用的不断推广,近程高精度激光测距雷达的需求不断增加,如何降低设备成本、减小系统功耗和体积、提高测

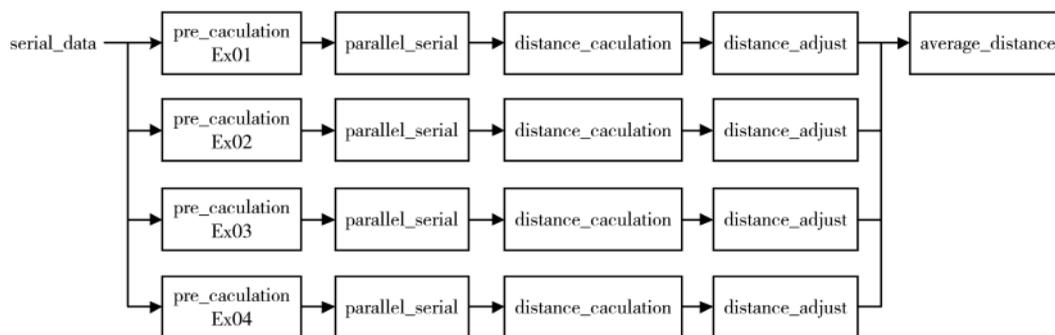


图 5 距离信息提取流程图

表 2 系统验证测试数据

测试组别	1	2	3	4	5	6	7	8	9
距离/mm	8 077	8 084	8 081	8 073	8 084	8 085	8 082	8 070	8 084

距精度是近程激光测距雷达的一个重要研究方向。本文针对近场测距(30 m)的需求,提出了基于脉冲飞行时间测距法的脉冲激光测距系统设计方案,借助 FPGA 主控芯片同时实现时序控制以及信号的高速采集和实时处理。较传统的高速 AD 采集芯片而言,本系统中 FPGA 的高速收发器 ALTX 可显著降低系统的成本和故障率;并且,通过累加求平均等距离信息提取算法,可在 FPGA 上实时获取待测距离信息;在实验室条件下,通过测距性能验证实验,获得了泡沫板目标的距离信息,且系统测距精度可达 5.43 mm@8.08 m。相较于市场同类型的产品而言,该测距系统有效提升了近程测距的测距精度,并且降低了系统的生产制造成本。后续,将深入开展近程测距实验研究,判断脉冲激光测距系统的测距性能,测试不同条件下系统的测距能力和测距精度,并通过灰度校正等手段进一步提高系统的测距精度和测距准确度。

参考文献

[1] 周冰,黄富瑜,徐春梅.现代脉冲激光测距技术[M].北京:电子工业出版社,2016.

[2] 徐恒梅.激光测距系统的设计研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2010.

[3] 吴越,蓝伟,许大浦,等.一种基于单线激光雷达的无人车辆导航避障系统设计[J].计算机测量与控制,2013,21(7):1092-1097.

[4] BERS K, SCHULZ K R, ARMBRUSTER W. Laser radar system for obstacle avoidance[J]. Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering, 2005, 5958: 377-386.

[5] 康静.中国半导体激光器的早期发展(1963-1980)[D].北京:首都师范大学,2013.

[6] 宋正方.应用大气光学基础[M].北京:气象出版社,1990.

[7] 张振振,刘统玉,南钢洋,等.激光雷达在大气探测中的应用研究进展[J].山东科学,2015,28(6):73-80,149.

[8] 胡伟伟,李永亮,顾小琨,等.远程激光测距技术及其进展[J].激光与红外,2019,49(3):19-27.

[9] 肖洪梅.微弱激光脉冲信号的相关检测[D].成都:

电子科技大学,2004.

[10] 刘博,于洋,姜朔.激光雷达探测及三维成像研究进展[J].光电工程,2019,46(7):21-33.

[11] SONG H J, LEE C J, KOH H S, et al. Implementation of a pulse-type laser detection and ranging system based on heterodyne detection for long-range measurement with high repetition rate[J]. The Review of Scientific Instruments, 2019, 90(12): 125001.

[12] 戴永江.激光雷达技术[M].北京:电子工业出版社,2010.

[13] 于彦梅.激光测距机及发展趋势[J].情报指挥控制系统与仿真技术,2002(8):19-21.

[14] 杨照金.激光测量技术概论[M].北京:国防工业出版社,2017.

[15] 杨旭.基于FPGA的激光雷达SLAM测绘设计与实现[J].科技创新与应用,2020(8):15-16.

[16] 于玉亭.基于FPGA的激光测距系统设计[J].赤峰学院学报(自然科学版),2017,33(21):16-17.

[17] YANG J Q, LIU X L, GU G H, et al. A double threshold correction method for walk error in pulsed laser ranging system[J]. Infrared Physics & Technology, 2019(100): 28-36.

[18] 马鹏阁,羊毅.多脉冲激光雷达[M].北京:国防工业出版社,2017.

[19] AMIRI I S, HOUSSEIN F M A M, RASHED A N Z, et al. Temperature effects on characteristics and performance of near-infrared wide bandwidth for different avalanche photodiodes structures[J]. Results in Physics, 2019, 14: 1-10.

[20] 高远,李松.温度控制与温度补偿双模式的APD驱动电路设计[J].半导体光电,2019,40(6):869-873.

[21] 段存高,姜毅,陆长平,等.雪崩光电二极管偏压自动温度补偿电路设计[J].制导与引信,2019,40(1):10-13.

(收稿日期:2020-04-26)

作者简介:

马鸿斌(1994-),男,硕士研究生,主要研究方向:避障激光雷达避障技术。

尚建华(1983-),女,副教授,主要研究方向:激光遥感技术及其在材料学、地理学领域的应用。

潘世光(1995-),男,硕士研究生,主要研究方向:远程激光测距技术。

# 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《信息技术与网络安全》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、JST日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《信息技术与网络安全》编辑部  
中国电子信息产业集团有限公司第六研究所