

背景光作用下脉冲激光测距仪的设计

林 晶 卜雄洙 韩 伟 曹一涵

(南京理工大学机械工程学院测试计量技术与仪器系 南京 210094)

摘 要:针对光电探测器受环境背景光干扰导致脉冲式激光测距仪测量精度下降的问题,结合激光测距系统的应用环境,构建背景光干扰下光电探测器的探测模型,分析了背景光引起的干扰对探测系统的影响。在此基础上,分别在发射、接收、光学部分进行有针对性的选型设计,从而达到抑制噪声光功率的效果。同时还提出了一种简化发射时刻鉴别电路的新方法,不仅缩小了电路结构,且易于实现。实验证明,系统在满足设计要求的条件下能有效的避免背景光的干扰,提高了系统的稳定性,且精度 <5 cm。

关键词:背景光干扰;激光测距;脉冲激光;光电探测器

中图分类号: TN247 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.20

Design of pulsed laser rangefinder under background light noise

Lin Jing Bu Xiongzhuzhan Wei Cao Yihan

(Department of Instrumentation Science and Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The measurement accuracy of the pulsed laser rangefinder is decreased due to the background light interference of the photodetector. Combined with the application environment of laser ranging system, a model of photodetector under background light is founded, and the influence of background light interference on the detection system is also analyzed. Based on that, the part of the launch, receiving, optical was targeted designed respectively to achieve effects of background suppression. Also, a new method is also proposed to simplify the launching time discrimination circuit, which not only reduces the circuit structure, but also easy to implement. The result show that, the system can effectively avoid the interference of the background light and improve the stability of the system under the condition of meeting the design requirements, and its ranging accuracy is <5 cm.

Keywords: background light interference; laser ranging; pulsed laser; photodetector

0 引 言

激光测距技术自激光器诞生以来发展迅猛,作为激光的重要应用之一,在军事应用、民用生产以及体育运动等领域广泛应用并发挥重要的历史作用^[1-2]。我国自20世纪80年代开始自主研制激光测距仪,目前对于无合作目标的LD激光测距仪,国内的研究仍处于发展阶段。中国科学院上海光机所研制的半导体激光测距仪测程10~100 m(漫反射墙体),工作波长800~900 nm,重复频率为1 kHz。西南物理研究所研制的半导体激光高度表,其工作波长为905 nm,重复频率为100 Hz,测程2~800 m,测量精度1 m^[3-4]。一般情况下,脉冲式激光测距适用于无目

标反射器,其测距动态范围在几十米或几百米^[5],但往往测距仪会受到环境条件如背景光等的制约,使系统的测距性能无法达到理想状态^[6]。因此本文主要针对实际环境中背景光的干扰进行讨论,研究了背景光对探测器的探测模型,并从数学表达式出发,根据每个参量对背景光功率影响的尺度,同时紧密结合系统的输出信噪比,主要方向在于抑制背景光噪声功率和提高系统输出信噪比。本文着重从激光测距仪的前端如器件的选型、硬件电路的设计以及光学系统的参数选择等方面采取有效措施,从而减小背景光噪声带来的影响。实验结果表明,所设计的激光测距仪能在背景光作用下的环境中进行稳定的测距实验,并保证系统的测距精度在5 cm以内。

1 周围环境干扰辐射的分析

激光测距系统的工作原理是发射光信号在目标物上产生漫反射后,绝大部分的反射光信号将原路返回,经过一定口径的光学组合系统后,汇聚在具有一定灵敏度的光电探测器上^[7-8]。因此实际环境下太阳光中这一波段的背景光噪声对系统的探测性能存在影响^[9]。背景光噪声包含太阳光散射、月光散射、背景自身辐射等,赵慧玲文中提到,背景自身辐射和月光散射的干扰对探测器的影响远小于太阳光散射^[10]。因此本文着重对太阳光的散射(以下简称背景光)进行分析和研究。

假定地面为无限大的均匀平面,遵守朗伯余弦定律^[11],则光电探测器的探测模型可近似看成如图1所示。

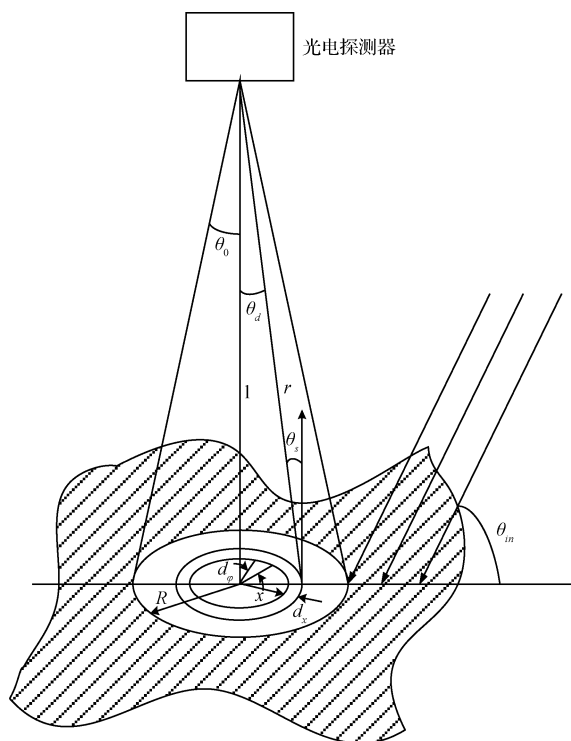


图1 光电探测器的探测模型

太阳光为一束平行光照射到地面上,光线与地面法线夹角为 θ_m ;光线传输过程会以一定形式损耗如受大气吸收、散射以及地面对光的散射作用;设大气衰减系数为 τ ,地面散射比例系数为 ρ ,则在半球空间上产生的背景光辐射功率为^[12]:

$$\Phi_s = \rho \cdot \tau \cdot E_{sun} \cdot dS \cdot \cos\theta_m \quad (1)$$

如图1所示,探测器的半视场角为 θ_0 ,视场范围内(即目标反射能被探测器接收的部分)的面积为 $A_s = \pi R^2$,地面与探测器之间的距离为 l ,且探测器表面与地面平行。将太阳光经地面散射的光看成是二次光源,则小面源在探测器处的辐射照度为:

$$E_s = \frac{\rho \cdot \tau \cdot \Phi_m \cdot \cos\theta_s \cdot \cos\theta_d}{\pi l^2} \quad (2)$$

每个小面源在探测器上都会产生辐射照度,将地面看成是无数个小面源集合而成的,则探测器上的辐射照度为面源辐射叠加的结果。因此在地面取一小面源 $dA = dx dy$,根据图上的几何关系,并对面源上圆环部分进行积分,可得:

$$E_s = \rho \cdot \tau \cdot E_{sun} \cdot \cos\theta_m \cdot \int_0^{2\pi} d\varphi \cdot \int_0^R \frac{l^2}{x^2 + y^2} x dx = \rho \cdot \tau \cdot E_{sun} \cdot \cos\theta_m \cdot \sin^2\theta_0 \quad (3)$$

则进入探测器的背景光功率为:

$$P_s = E_s \cdot \eta_{r1} \cdot \Delta\lambda \cdot \eta_{r2} \cdot A \quad (4)$$

式中: ΔA 为探测器的光敏面积, η_{r1} 、 η_{r2} 为聚焦镜和滤光片的透过率, $\Delta\lambda$ 为滤光片的带宽。可以看出,背景光功率的大小由式中参量共同决定,除上述所提的参量外,辐射照度 E_{sun} 是关于波长的函数,即 P_s 与波长 λ 有关。

若背景光未经抑制直接进入光探测器,再经放大器两级放大,很可能导致放大器输出饱和,此时光信号淹没在噪声中,致使系统无法捕捉回波信号。同时背景光噪声功率增大时,系统最小可探测的功率也相应增大,使得系统的信噪比大幅度下降,还将减小系统的探测灵敏度。当背景光作为主要的影响因素时,结合式(3)和光电探测器的输出信噪比^[13],通过对发射、接收、光学部分的有关参量进行合理的选型和电路设计,增大系统的信噪比,从而提高测量精度。

2 脉冲激光测距总体设计

脉冲激光测距系统的原理如图2所示。系统主要由发射单元、接收单元、光学系统、时间测量单元等组成^[14]。

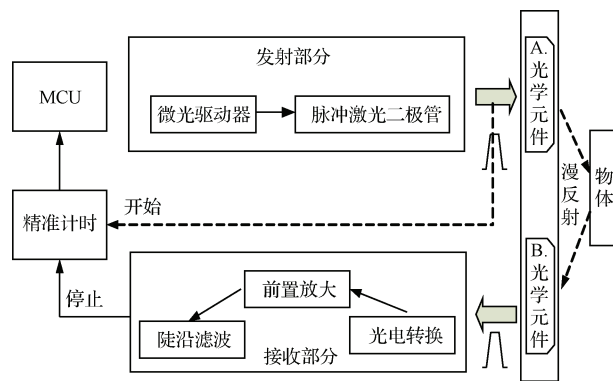


图2 脉冲激光测距系统的原理

2.1 系统硬件电路部分的设计

2.1.1 发射模块硬件电路的设计

1) 发射模块器件的选型

式(3)中背景光辐射照度及目标物的散射特性均与激光测距仪发射光束的工作波长有关。光电探测器检测波段为 $0.4 \sim 1.1 \mu\text{m}$,因此选用 905 nm 波长作为激光的工作波长,此时太阳光辐射照度 $E_{sun} = 500 \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot \mu\text{m}^{-1}$,地面在 905 nm 处的散射比例 ρ 为 0.2 。当背景光功率一定时,发射功率能量越大,系统的输出信噪比越高,精度也越高。因

此,综合各项因素,本文选用了 OSRAM 的脉冲激光二极管 SPLLL90-3,其发射峰值功率为 70 W,输出波长为 905 nm。

2) 发射电路的设计

发射电路主要由激光驱动电路和时刻鉴别电路组成。为提高脉冲发射的能量,驱动电路中发射频率和脉冲宽度为主要因素,参考激光二极管 SPL LL90-3 手册内容,利用电路产生 10 kHz 的发射频率,驱动脉冲宽度 40 ns,此时的光脉冲发射峰值功率约为 70 W。

由于脉冲式激光测距是依靠时间间隔的测量来计算距离,时刻提取电路的准确性至关重要。传统的方法主要是通过发射激光的分光束在近处被反射回来,经由 PIN 管后再进行放大来确定起始时刻,不仅增加了电路复杂度,还会降低测距精度^[15]。因此本文结合所选用的激光二极管内置集成电路的特点,通过激光二极管的电容放电过程来提取起始时刻,简化后的电路原理如图 3 所示。同时为满足系统快速性的要求,本文选用了 MAXIM 的超高速比较器 MAX999,配合简单的外围电路,实现了 START 信号的提取。

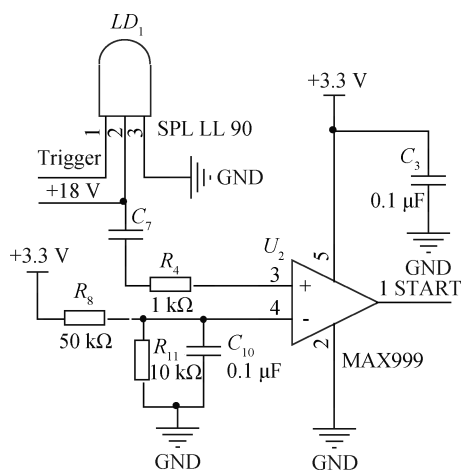


图3 简化后起始时刻的电路原理

在传统时刻提取方法中,分光镜不仅对安装要求很高,而且衰减了部分激光功率,导致激光测距仪探测灵敏度减小。本文提出的新型时刻鉴别电路,不仅很好的解决了上述问题,而且对激光发射时刻的把握更为准确,缩小器件延迟造成的系统误差,提高了系统的测量精度,并大幅度降低了系统的成本和开发难度,使得系统的灵活性得以提高。

2.1.2 接收模块硬件电路的设计

1) 接收模块器件的选型

由接收系统的输出信噪比定义式可得,提高系统输出信噪比,应选择具有较高量子效率的光探测器,以产生较大的信号功率;并且使光探测器和放大器的噪声尽可能的低。基于上述讨论,本系统采用 Si-APD 探测器 AD500-9,其不仅在红外区域探测能力强,而且倍增噪声低;前置放大器和主放大器均选用 OPA657, $4.8\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 输入噪声电压,275 MHz 增益带宽,符合本系统的要求。

2) 接收电路的设计

由系统输出信噪比公式可知^[13],接收系统的带宽越小,则输出信噪比越高。但为保证信号不失真的传输,系统的带宽还应与信号的速率相适应。带宽过小,回波信号的上升时间将被展宽;带宽过大,则噪声也会增大,测距精度会随着噪声的增大而减小。接收系统的部分原理如图 4 所示。图中 R_6 和 R_{13} 共同组成跨阻增益, C_{11} 为反馈电容。两者都对系统的带宽有一定的影响,增益越大,反馈电容越大,信号的带宽越窄。经过反复实验,得到合理的增益和反馈电容,不仅能有效抑制背景光噪声,还能消除振荡。

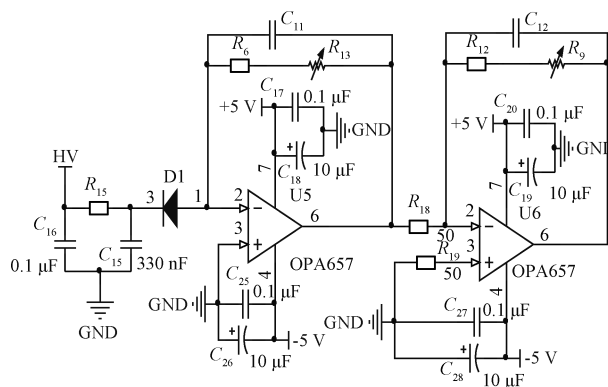


图4 接收系统的部分电路原理

在上述基础上,仍有部分背景光噪声进入光探测器并经放大器放大,其主要表现为缓慢直流流量,因此接收电路的时刻鉴别应通过设置合理的阈值,滤除直流噪声,以提高系统探测的准确性。该部分电路原理如图 3 所示。

2.2 光学系统的设计

根据式(4)可得,背景光的功率还与接收系统光学镜组的参数有关,如聚焦镜的透过率,滤光片的带宽及其透过率。聚焦镜对所有入射的光都有汇聚的作用,为增强信号的回波,应适当增大透镜的口径,以确保该口径大于光电探测器的接收视场角。在光探测器前加装窄带滤光片,使带限内的光通过,滤除非带内波段的光线。滤光片的带宽越小,截止带外的背景光越多,引起的噪声就越小^[16]。因此本系统选用口径为 40 mm 的 K9 玻璃透镜,窄带滤光片带宽 $\Delta\lambda = \pm 10\text{ nm}$,聚焦镜和滤光片的背景光透过率 η_1 和 η_2 均为 0.8。

3 实验结果测试与验证

搭建激光测距仪的实验装置,验证系统的整体功能。实验测试的条件为:东经 $118^{\circ}46'$ 北纬 $32^{\circ}03'$,微风,室外晴天有阳光。安装时应保证实验装置的光电探测器表面与地面平行。

发射单元不工作状态下,测量背景光功率噪声在两级放大后的直流流量,分别取一天内的不同时刻进行测量,测量结果如表 1 所示。

表1 不同时刻的噪声电压测量值

时刻/h	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00
噪声电压/V	0.453	0.522	0.588	0.629	0.632

当天顶角为 0° (正午)时,背景光噪声为 $1.497\ 3\ \text{nW}$,理论背景光噪声电压为 $539\ \text{mV}$,该结果存在误差,可视为器件内部噪声的影响。因此,对背景光采取的抑制措施,有效降低了系统的输出噪声,减小系统输出信噪比,提高了系统测距精度。

在此基础上,设置接收系统时刻鉴别器的阈值为 $1\ \text{V}$,并进行测距实验。测距实验先对激光测距仪进行标定,对实验数据进行最小二乘法拟合,拟合的方程为 $y = 0.137\ 2x + 0.263\ 4$,曲线如图5所示,并通过标定的数据对软件进行修正。

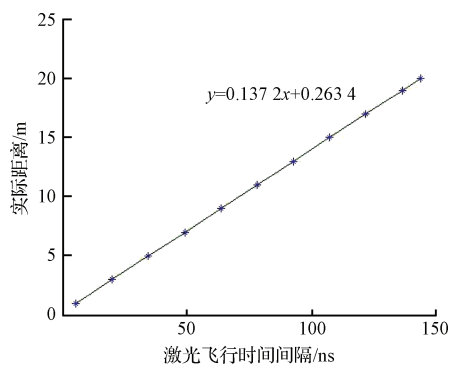


图5 实验标定的结果直线

利用标定后的激光测距仪进行定点测试,测试结果如表2所示。

表2 激光测距仪定点测试结果

实际距离/m	5	10	15	20
测量距离	4.991	10.032	15.014	20.044
	5.002	10.028	14.979	20.014
	5.024	9.978	14.987	20.033
	5.019	10.017	15.034	20.013
最大偏差	0.024	0.032	0.034	0.044

从表中可以看出,在晴天背景光噪声的影响较大的情况下,采取背景光的抑制措施后,实验测得的最大偏差为 $0.044\ \text{m}$,可控制在 $0.05\ \text{m}$ 以内,大幅度提高了测距的精度,且系统测得的距离具有较高的一致性和稳定性。

4 结 论

本文所设计的激光测距仪结合了测量环境中主要影响因子——地面对太阳光的漫反射,构建了背景光噪声对光电探测器的探测模型,并给出了具体的数学表达式。系统发射单元提高了信号光的光功率,且起始时刻鉴别方法的精简化电路使电路的可行性和测量精度均得以提高。接收部分分别在光学镜组和硬件电路上做相应的处理,有

效减小背景光功率进入探测器的光功率,从而降低了系统的输出信噪比,提高了测距仪的测距精度。应用于具有背景光的实际环境中,取得了很好的效果。

参 考 文 献

- [1] NISSINEN J, NISSINEN I, KOSTAMOVARA J. Integrated receiver including both receiver channel and tdc for a pulsed time-of-flight laser rangefinder with cm-level accuracy[J]. IEEE J Solid-State Circuits, 2009, 44(5): 1486-1497.
- [2] 徐伟. 高度运动下高精度激光测距关键技术研究[D]. 南京:南京理工大学,2015.
- [3] 刘基余. 60年距离测量的演变[J]. 海洋测绘, 2010, 30(2): 74-78.
- [4] 陈向成. 脉冲激光雷达回波处理方法与系统研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2015.
- [5] 程鹏飞. 大动态范围高精度激光测距关键技术研究[D]. 上海:中国科学院研究生院(上海技术物理研究所),2014.
- [6] 韩光宇, 瞿锋, 郭劲, 等. 卫星激光测距中白天测距的分析与实现[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(4): 885-890.
- [7] 王顺录, 李党娟, 范源, 等. 短距离激光测距传感器系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(11): 98-102.
- [8] 李颖宏, 马龙. 一种新型双激光测速系统的设计与应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(2): 256-264.
- [9] 沈成方, 张祥金, 张合. 阳光背景下小口径激光引信探测性能研究[J]. 兵器装备工程学报, 2016, 37(12): 145-149.
- [10] 赵慧玲. APD微弱光电信号探测技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2010.
- [11] 伊丕源, 童鹏, 赵英俊. 典型地物机载激光雷达测量系统回波强度特征实验分析[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(16): 216-221.
- [12] 郭渭荣, 栗苹, 陈慧敏, 等. 不同角度下散射太阳光对光电探测器的干扰[J]. 探测与控制学报, 2009, 31(1): 41-45.
- [13] 孙超. 背景光作用下激光雷达中 Si-APD 噪声特性研究[D]. 南京:南京理工大学,2014.
- [14] 吴庆生. 基于时差法的激光测距方法与应用[D]. 大庆:东北石油大学,2014.
- [15] 应欢, 王少平. 提高脉冲激光测距精度的方法研究[J]. 电子测量技术, 2014, 37(10): 25-28.
- [16] 韩光宇, 瞿锋, 郭劲, 等. 卫星激光测距中白天测距的分析与实现[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(4): 885-890.

作 者 简 介

林晶, 1992 年出生, 硕士研究生, 主要研究方向为激光测距传感器, 测试技术等。
E-mail: lj2882828@126.com