

文章编号: 0258-7025(2008)Supplement2-0237-05

非合作目标脉冲相位式激光测距仪的测程研究

姚萍萍 张 毅 涂碧海 赵 欣 赵平建

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要 对于非合作目标的中程距离测量,从测距范围、测量精度、速度和可靠性的折衷方面来讲,脉冲相位式激光测距法优于常规的脉冲法测距和连续波相位法测距。在脉冲相位式激光测距中提出采用连续发射的正弦调制脉冲信号提高发射激光的峰值功率以提高测程,但发射激光的平均功率被保持很低保证了发射激光对人眼的安全。同时根据硅雪崩光电二极管(Si-APD)噪声谱密度理论,设计了具有温度补偿和反馈电阻噪声补偿的激光测距仪前放接收模块,详细分析了背景光,反向高压和反馈电阻对于 Si-APD 接收性能的影响。实验表明:根据该方法设计的前放接收模块使测距仪接收系统获得最大信噪比,APD 工作在最佳倍增状态,从而提高测距仪的探测灵敏度和最大测程。

关键词 光电子学;非合作目标;激光测距;硅雪崩光电二极管

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL200835s2.0237

Range Research in Pulse-Phase Laser Rangefinder with Non-Cooperative Target

Yao Pingping Zhang Yi Tu Bihai Zhao Xin Zhao Pingjian

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract In terms of range, speed, accuracy and reliability for medium range measurement with non-cooperative target, the pulse-phase laser rangefinder is superior to conventional pulsed laser rangefinder and phase-shift laser rangefinder. A high resolution ranging method is described utilizing a novel modulated waveform, hereafter referred to as coherent burst modulation. The laser is sinusoidally modulated for a brief period of time and then is off for a much longer period of time. This burst waveform has benefits compared to a continuous wave emission in that the laser peak power can be very high for measuring long distances, yet the average power can be kept low for eye safety. And more, the pre-amplified optical receiver possessing temperature compensation and feedback resistance noise compensation is designed which is based on the noise spectrum density theory of silicon avalanche-photodiode (Si-APD). The influence of background light, reverse biasing voltage and feedback resistance on the performance of APD detection circuit is analyzed in detail. The experimental results confirm that the method proposed and the optical receiver has obtained the best signal-to-noise ratio (SNR) keeping the Si-APD operating under the optimum multiplied condition and improved the detecting sensitivity and measuring distances of the pulse-phase laser rangefinder.

Key words Optoelectronics; non-cooperative target; laser ranging; silicon avalanche-photodiode

1 引 言

激光测距因其主动性、准直性以及相干性等特点广泛应用于航空航天、军事、遥感、精密测量、工程建设、安全监测以及智能控制等领域,涉及多种学科

技术。不同的应用对测量范围与精度有不同的要求,在面向特种环境如城市高层楼群区、隧道、地下空间、室内、树林冠盖下地区,大坝、桥梁等构筑物,灾变环境等精密定位和监测应用中,为了实现高精

作者简介: 姚萍萍(1985—),女,博士研究生,主要从事激光测距仪研究方面的工作。

E-mail: ppyao@aiofm.ac.cn

导师简介: 张 毅(1955—),男,研究员,主要从事光电子技术和计算机控制方面的研究工作。

E-mail: yzhang@aiofm.ac.cn

度、低成本实时定位与工程形变的精准监测,距离是必不可少的信息,其范围通常为零点几米到几百米,相应的精度要求在毫米量级。目前应用较广的激光测距仪主要有脉冲式和连续波相位式。脉冲式激光测距利用激光脉冲持续时间极短,能量在时间上相对集中,瞬时功率很大的特点,可实现大的测程,但精度不高。连续波相位式激光测距通过测量连续调制光波在待测距离上的往返传播所发生的相位变化来间接测量距离,其测距精度高但测程近,在有合作目标情况下测量范围达到几十千米。本文提出采用相干脉冲调制的脉冲相位式激光测距,克服了以上两种激光测距的缺点,取得高的测量精度和无合作目标的中程距离测量,并具有抗干扰能力强、低成本和小型化等优点。

由于特种环境应用背景的特殊性,测距系统不能使用传统光电测距仪中的合作目标(即角反射镜)获得返回光,而只能采用非合作目标,即利用被测物自身的漫反射特性获得返回光,接收到的激光信号十分微弱,使得接收检测相对较为困难,所以使用硅雪崩光电二极管(Si-APD)作为光敏接收器件^[1,2]。它借助内部强电场作用产生雪崩倍增效应,具有很高的量子效率和内部增益(增益可达 $10^2 \sim 10^4$ 量级),响应速度非常快(响应时间为 ns 量级)。然而要得到满意的雪崩增益,必须给 APD 提供适合的高反向偏置电压(几十伏至几百伏),另外该增益还会随着温度的变化而改变。因此文中还根据 APD 温度漂移的偏压补偿原理,设计了具有温度补偿和高压纹波抑制功能的激光测距仪前放接收模块,保持 APD 工作在最佳倍增状态从而提高测距仪的探测灵敏度和测量数据的稳定性和可靠性。

2 脉冲相位式激光测距原理

2.1 基本原理

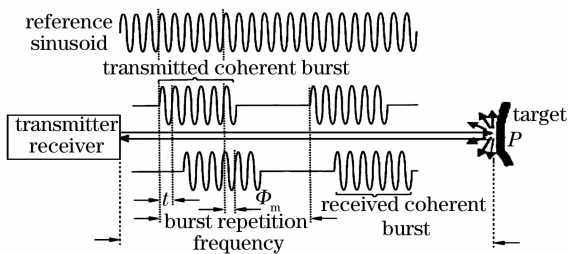


图 1 脉冲相位式测距原理

Fig. 1 Principle of pulse-phase laser rangefinder

脉冲相位式激光测距原理如图 1 所示,是将脉冲式和连续波相位式两种测距方法结合起来实现的

一种测距方法,利用发射相干脉冲调制的激光信号来实现脉冲和相位测距。从图中可看出激光信号变成周期出现的脉冲波,每个周期中脉冲幅度为高电平的时间内被频率为 f_0 的正弦波经过振幅调制,其后在很长时间内脉冲幅度为低电平。相干脉冲调制信号由参考正弦信号(reference sinusoid)经过门控脉冲控制的快速开关选通得到。该信号照射到待测点 P 上,物体表面发生漫反射,与发射波同轴(或成一定角度)的反射波被接收器接收,由于待测距离 R 的存在,发生波与接收波之间产生往返时间差 t 和相位差 Φ_m , t 代表高频相干脉冲调制信号周期的整数部分,用高频计数法^[3-5]测量得到距离的粗测值, Φ_m 代表未满一个周期的相位差,采用欠采样技术^[6,7]进行数字解相得到距离的精测值,然后将两种测量距离在技术上有效地衔接起来得到待测距离 R (单位 m)关系式:

$$R = c \left(\frac{t}{2} + \frac{1}{2f_0} \cdot \frac{\Phi_m}{2\pi} \right), \quad (1)$$

式中 c 为真空中的光速,正弦波调制频率 f_0 通常在 10 MHz 以上。由公式(1)知相干脉冲调制方法测距的距离分辨率

$$\Delta R = \frac{c}{2f_0} \cdot \frac{\Delta \Phi_m}{2\pi} \quad (2)$$

$\frac{\Delta \Phi_m}{2\pi}$ 是最小测相精度,根据目前电子学发展水平,信号处理单元使用 DSP 进行数字检相,测相精度在 0.1% 以下是十分容易做到的。测距仪的最大明确距离(maximum unambiguous range)

$$R_{\text{amb}} = \frac{c}{2f_{\text{br}}}, \quad (3)$$

式中 f_{br} 是脉冲重复频率(burst repetition frequency)。当 $f_0 = 25$ MHz, $f_{\text{br}} = 50$ KHz,由公式(2),(3)得到 $\Delta R = 6$ mm, $R_{\text{amb}} = 3$ km,这种方法有效解决了传统测距方法中精度和最大明确距离间相互制约的矛盾,测量较长距离时获得高距离分辨率成为可能,十分适用特种环境测量的应用。

2.2 测程的提高

与连续发射的正弦波相比,在平均功率相同的情况下,相干脉冲调制波形的激光功率主要集中在脉冲幅度为高电平的很短时间内,利用这些高峰值功率的脉冲段可以有效地提高测程,同时平均功率被保持很低保证了发射激光对人眼的安全。非合作目标激光测距系统的接收光功率表达式^[8,9]为

$$P_r = \frac{P_t M_t A_r K_t K_r}{\pi} \cdot \frac{1}{R^2} \cdot \rho \cos \theta \cdot e^{-2\alpha R} \quad (4)$$

式中 P_t 为激光出射峰值功率, M_t 为调制度, A_r 为有效接收面积, K_t 为发射系统光学透射率, K_r 为接收系统的光学透射率, R 为被测距离, ρ 为被测物体漫反射率, θ 为测量方向与被测点法线的夹角, α 为大气衰减系数, P_r 为接收光功率。由于被测距离在几百米内, 计算中可以忽略光传播过程中的大气衰减。设相干脉冲激光平均功率为 P_{av} , 脉冲占空比为 duc , 脉冲幅度为高电平的时间内调制正弦波个数为 k , 则激光峰值功率与平均功率关系为

$$\frac{P_t}{P_{av}} = \frac{2}{duc}, \quad (5)$$

式中 $duc = \frac{k \cdot f_{br}}{f_0}$, 由公式(4)得知当系统其他参数选定后, 测距系统可以探测的最大距离 R 与激光

出射峰值功率 P_t 的平方根成正比, 可见在平均功率相同的情况下相干脉冲调制方法可以把仪器最大测程提高 $\sqrt{\frac{2}{duc}}$ 倍。

2.3 低噪声前放接收模块

基于非合作目标的激光测距系统通常采用 APD 作为光接收器件。APD 虽然信噪比很高, 但是正常工作时需要高的偏置电压且倍增增益随温度变化。它的工作性能对后级的信号处理及测量精度起着决定性的影响, 为保证接收信号的纯净, 应尽量减小 APD 偏压的纹波, 随时调整偏压值, 对 APD 进行温度补偿。根据此原理^[10]我们设计的 APD 前放接收模块如图 2 所示:

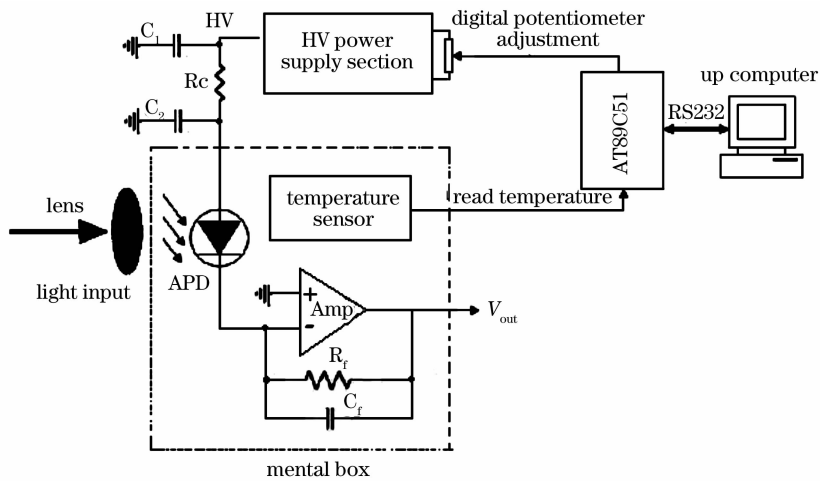


图 2 前放接收模块

Fig. 2 Preamplifier circuit for APD

温度传感器和 APD 及前置放大电路一同封装于金属盒中, 并尽量靠近 APD, 使得两者的温度基本保持一致, 金属盒能有效屏蔽空间电磁干扰对前置电路的影响。温度值由外部单片机读取, 读取频率每秒一次。单片机通过判断读取的温度值的高低, 并和内部储存的温度对应的最佳偏压值比较来调整数字电位器, 从而调整高压模块的输出电压产生变化, 使得 APD 始终工作在最佳倍增状态。同时温度传感器的值和高压值可通过串口上传给上位机进行监控, 上位机也可通过发送指令对 APD 的高压进行调整。电阻 R_c 和电容 C_1, C_2 组成 π 型低通滤波器对高压模块的输出电压进行滤波, 减小电压纹波。前置放大电路将 APD 输出的光电流转化成电压信号送至后级信号处理单元进行处理, 由于 APD 自身结电容和电子线路的寄生电容使相位滞后, 电路

变得容易振荡, 故采用反馈电阻 R_f 与电容 C_f 并联进行相位补偿使电路稳定。

3 测试结果与分析

在研究过程中我们搭建了实验草台, 激光器选用 HLaseroptoco 公司的 InGaAsP 激光二极管, 型号是 HLD660030P5J, 中心波长 650 nm, 最大平均功率 30 mW, APD 选用 EG&G 公司的 C30954E, 应用上文设计的前放接收模块, 环境温度 20 °C 情况下, 对不同距离处的白色打印纸垂直照射, 用 Tektronix 公司的 TDS3032 型示波器观测回波信号。激光器发出的相干脉冲调制光波平均功率为 10 mW, 脉冲占空比 duc 设定为 20%, 则由(5)式得激光峰值功率为 100 mW, 正弦波调制频率 f_0 为 25 MHz, 脉冲重复频率为 50 kHz, 调制度为 1, 发射

系统光学透射率 K_t 为 0.9,接收系统光学透过率 K_r 为 0.9,有效接收面直径为 10 cm,白纸表面漫反射率 ρ 约为 0.5。根据(4)式可以作出接收光功率 P_r 和被测距离 R 的关系曲线,如图 3 所示。

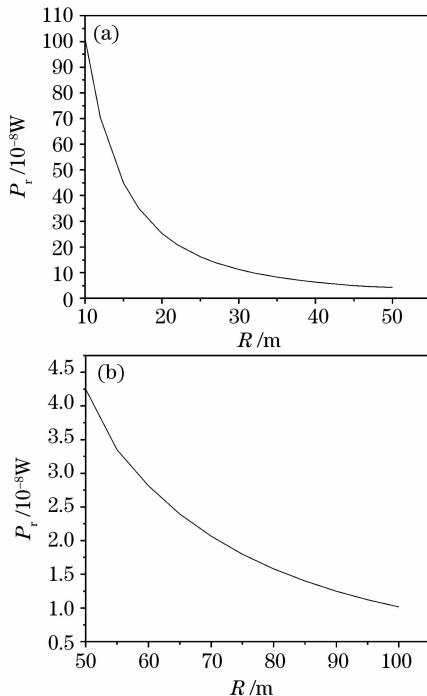


图 3 被测距离 R 与接收光功率 P_r 的关系
Fig. 3 Relationship between measured range and received power P_r

C30954E 最小可探测功率为 10^{-8} W,则由图 3 知系统最大测程为 100 m,与连续波相位式测距相比,其最大测程仅有 31.62 m,测程提高了 3.162 倍。经过实际验证,前放接收模块的高压纹波抑制电路输出高压纹波被抑制在 10 mV 左右,与之前未经低纹波设计的高压电路(通常纹波为几百毫伏)相比,纹波电压得到了很好的抑制,完全满足 APD 偏压对典型噪声的要求,可大大提高接收信号的检测精度。在温度补偿电路设计中,通过 π 型低通滤波公式计算,对电阻电容进行参数配置,由此得出的高偏置电压部分的输出电压曲线与 C30954E 获得最佳增益时温度-偏压的曲线非常吻合,有效地实现了它的温度补偿。

为了验证系统最大测程,对 100 m 处的白纸进行测量得到的回波波形如图 4 所示。

前置放大器是反向输入,所以回波波形为负向周期脉冲,横坐标是时间轴($20\mu\text{s}/\text{div}$),正弦调制波周期 40 ns,故从图 4 看出正弦波被挤压在脉冲负向电平最大处,纵坐标是电压值($10\text{ mV}/\text{div}$),从图中

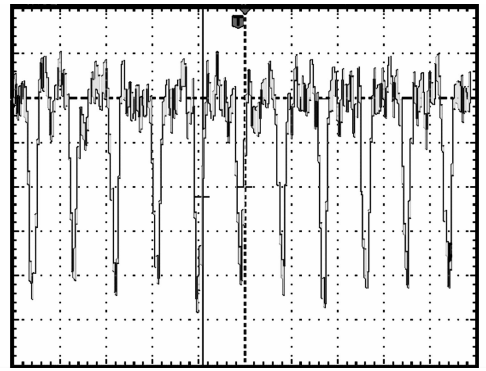


图 4 R 为 100 m 时回波波形

Fig. 4 Received waveform at 100 m range
看出噪声平均值为 10 mV,回波信噪比达到 5:1,这样的信号经过后级十倍以上放大和滤波后经过后级信号处理后即可提取出距离信息。

4 结 论

相干脉冲调制的脉冲相位式激光测距是激光测距仪发展和研究的方向,在理论上这是一种新的测量方式,它能克服脉冲式和连续波相位式激光测距仪的缺点,这给许多实际的测量带来了很大的方便。同时设计的具有温度补偿和高压纹波抑制功能的激光测距仪前放接收模块,大大降低了前放输出端的噪声,提高了信噪比。下一步工作将绘制信号处理板完成对飞行时间的测量和相位差的解算,并将各模块组合起来构建实验样机。

参 考 文 献

- 1 C. W. Helstrom. Computing the performance of optical receivers with avalanche diode detectors [J]. *IEEE Transactions on Communication*, 1988, **36**(1):61~66
- 2 Xun Maoheng, Ding Yan. Study on application of avalanche photodiode in phase laser distance measurement [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2007, **30**(2):121~124
孙懋珩,丁 燕. 雪崩光电二极管在相位式激光测距仪中的应用[J]. *电子测量技术*, 2007, **30**(2):121~124
- 3 J. Kailisz. Review of methods for time interval measurements with picoseconds resolution [J]. *Institute of Physics Metrologia*, 2004, **41**: 17~32
- 4 Qin Laigui, Huo Yujing. Study on pulsed laser range finder based on digital polarity [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(7): 941~944
秦来贵,霍玉晶. 基于数字极性相关算法的激光脉冲测距. *中国激光*, 2006, **33**(7):941~944
- 5 Huo Yujin, Chen Qiansong, Pan Zhiwen. Review on time-of-flight measurement of pulsed laser radar [J]. *Laser & Infrared*, 2001, **31**(3):136~139
霍玉晶,陈千颂,潘志文. 脉冲激光雷达的时间间隔测量综述 [J]. *激光与红外*, 2001, **31**(3):136~139
- 6 Mr. B. Journet, Mr. S. Poujouly. High resolution laser range-finder based on phase-shift measurement method [J]. *SPIE*, 1998, **3520**: 123~132

- 7 Mr. S. Poujouly, Mr. B. Jourmet. Digital laser range finder; phase-shift estimation by under sampling technique [J]. *IEEE Transactions on Communication*, 1999, **7805**:1312~1315
- 8 Liang Fang, Sun Xiaomin, Qiang Xifu. Range estimation in phase-shift laser rangefinder with non-cooperative target [J]. *Opt. of Technol.*, 1999, 5(9):28~30
梁芳, 孙晓明, 强锡富. 非合作目标相位式激光测距系统的测程估计[J]. *光学技术*, 1999, **5**(9):28~30
- 9 Liang Fang. Research of Phase-Shift Laser Rangefinder with Non-Cooperative Target [D]. Harbin Institute of Technology, 1999. 10~30
梁芳. 非合作目标相位式激光测距技术研究[D]. 哈尔滨工业大学, 1999. 10~30
- 10 Sun Chunsheng, Qin Shiqiao. Optimal design of APD biasing circuit [J]. *Optoelectronics Letters*, 2007, **3**(3): 237~240