

文章编号:1001-5078(2009)08-0880-04

· 光电技术与系统 ·

基于超窄脉宽激光器的厘米级测距技术研究

卜弘毅, 林盈侃, 孟昭华, 林颖, 舒嵘
(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要:首先对影响脉冲激光测距精度的因素进行了分析,认为提高时间间隔测量计数器频率,采用快速电路,缩短激光脉冲上升沿时间和提高系统信噪比都可以提高脉冲激光测距精度,而缩短激光脉冲上升沿时间对提高测距精度效果明显。在此基础上,基于1.2 ns超窄脉宽激光器,设计了一种高精度脉冲激光测距实验装置,实验结果表明,单点测量精度小于1.2 cm。

关键词:激光测距;上升沿;精度

中图分类号:TN247 **文献标识码:**A

Research of centimeter-level ranging technology based on ultra-narrow pulsed laser

BU Hong-yi, LIN Ying-kan, MENG Zhao-hua, LIN Ying, SHU Rong
(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Science, Shanghai 200083, China)

Abstract: The factors affecting ranging precision were analyzed firstly. It is considered that increasing the frequency of the time-measuring counter, using fast circuit, abbreviating the laser rising edge and improving the signal to noise ratio can improve the precision of laser ranging while abbreviating the laser rising edge is the most effective way. After that, a high precision pulsed laser ranging equipment was designed based on a 1.2 ns ultra narrow pulsed laser. Test result show that the single point ranging precision was less than 1.2 cm.

Key words: laser ranging; rising edge; precision

1 引言

脉冲式激光测距技术测量距离远,工作速度快,且不需要合作目标,在工业、国防、科学实验等领域应用广泛。脉冲式激光测距技术的研究在国外开展得较早,已经开发出各种类型的产品。目前国外主流的脉冲式激光测距仪测距精度已达到厘米级。国内的研究开始于20世纪80年代,通常采用半导体激光器,脉冲宽度为10~20 ns,测距精度大于10 cm。本文针对高精度测距的应用场合,对脉冲式激光测距误差进行了分析,并基于脉冲宽度为1.2 ns的超窄脉宽激光器,设计了一种激光测距实验装置,其单点测距精度小于1.2 cm。

2 脉冲式激光测距误差分析

图1显示了激光测距仪测量原理和 workflow,

激光器向目标发射一束功率为 P ,脉宽为 τ 的脉冲激光,目标表面返回的散射光被光学系统接收。光电探测器将发射脉冲的一小部分及探测到的激光回波信号转变为电信号,分别触发测距计数器开始和结束时,由此获得光脉冲飞行时间,经数据计算得到距离值 $z = c\Delta T/2$ 。其中, c 表示真空中的光速, ΔT 表示激光往返时间。

激光雷达测距误差可以分为系统误差和随机误差。系统误差主要分为固定延迟误差和距离行走误差。随机误差主要有计数抖动误差、数字电路抖动误差和回波前沿鉴别抖动误差。

作者简介:卜弘毅(1981-),男,博士生,研究方向为激光雷达技术及激光扫描技术。E-mail: hongyibu@gmail.com

收稿日期:2009-02-23

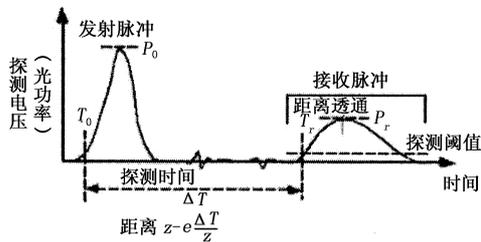


图1 脉冲式激光测距原理

2.1 系统误差

(1) 固定延迟误差

测距固定延迟误差来自于系统的固定延时,包括光程的固定延迟和电路的固定延迟,它给测量结果带来固定的偏差。这个偏差不因测量距离的长短而发生变化,可以通过实验室定标的方法予以减小。

(2) 距离行走误差

随着目标距离以及目标反射率的变化,激光测距仪接收到的回波功率也会发生变化,由脉冲式激光测距原理可知,当鉴别门限一定时,相同距离上,回波信号的幅度变化会引起回波信号越过阈值门限时刻的变化,从而产生距离行走(Time Walk),如图2所示。激光测距仪通常采用恒比定时技术来减小距离行走误差^[1-4]。

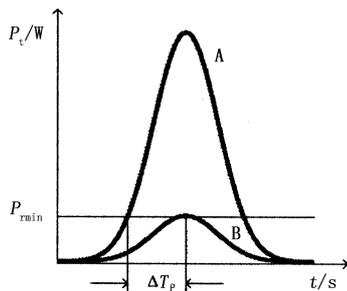


图2 固定门限鉴别造成的距离行走

2.2 随机误差

(1) 时间间隔测量

脉冲激光测距仪中的时间间隔测量电路常采用同步计数器来实现,激光脉冲和计数器之间一般是不同步的,这就引入了一个计时误差。假设激光脉冲可以发生在从零到时钟周期之间的任何时刻,且概率相等,可以得到由时间间隔引入的均方根距离误差为^[5]:

$$\sigma = \frac{c}{4\sqrt{3}f} \tag{1}$$

其中, c 为光速; f 为计数器频率。

由主波触发和回波触发计时模块分辨率引起的量化误差 σ_1 满足叠加原理,计算如下:

$$\sigma_1 = \sqrt{\sigma_{1(\text{START})}^2 + \sigma_{1(\text{STOP})}^2} \tag{2}$$

若计时分辨率为 27 ps,则时间间隔测量误差为: $\sigma_1 = 0.0017 \text{ m}$ 。

(2) 数字电路上升沿抖动

数字电路上升沿抖动也会引起测距误差。TTL 电路的时间抖动标准偏差的上限为 0.2 ns,由此产生的测距误差的标准偏差为 $\sigma_j = 0.03 \text{ m}$ 。采用速度更快的 ECL 电路,电路抖动为 20 ps,由此产生的测距误差的标准偏差为 $\sigma_j = 0.003 \text{ m}$ 。

因此由主波和回波数字电路抖动引起的均方根误差为:

$$\sigma_2 = \sqrt{\sigma_{j(\text{START})}^2 + \sigma_{j(\text{STOP})}^2} = 0.00424 \text{ m} \tag{3}$$

(3) 回波前沿鉴别误差

激光测距仪采用恒比定时技术,将一个高斯钟形脉冲信号转换成前沿不受输入信号幅度变化影响的矩形脉冲信号。这样回波前沿鉴别误差主要由叠加在回波上的噪声引起。噪声引起的时刻鉴别标准差表示为^[1]:

$$\sigma_3 = \frac{f_n(t)}{\left. \frac{df_c(t)}{dt} \right|_{t_0}} = \frac{A_n t_r \sqrt{1+k^2}}{A(1-k)} \tag{4}$$

其中, k 为衰减系数; t_r 为回波上升时间; A 为信号幅度; A_n 为噪声幅度。

噪声引起的误差与信号上升时间成正比,与信噪比成反比。通过提高信噪比或是减小回波上升沿,能有效地提高系统的测距精度,但还受之前分析的时间测量精度和电路抖动的制约。

取衰减系数 $k=0.4$,回波上升沿 $t_r=2.5 \text{ ns}$,当信噪比 $A/A_n=40$ 时,由噪声引起的误差 $\sigma_3=0.0168 \text{ m}$ 。

综上所述,只考虑随机误差得到的测距精度可以表示为:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2} \tag{5}$$

从以上的分析可以得知,提高计数器频率、采用快速电路、采用窄脉宽激光器和提高系统信噪比都可以提高脉冲激光测距精度。在高精度激光测距的应用场合,高分辨率 ASIC 计时芯片和 ECL 电路已经广泛应用,而系统信噪比受制于系统设计的若干环节,所以采用窄脉宽激光器成为了提高系统测距精度的最直接有效的方法。

若电路采用 27 ps 高分辨率时间间隔测量芯片和 ECL 电平高速电路,则由前两项产生的 0.00594 m,这样回波前沿鉴别误差成为测距误差的主要来源。取回波上升沿 2.5 ns,可以做出系统信噪比和测距精度关系曲线,如图3所示。可以看出

在信噪比较差时,随着信噪比的改善,测距精度改善很多,而随着信噪比的提高,测距精度变化逐渐趋于平坦。

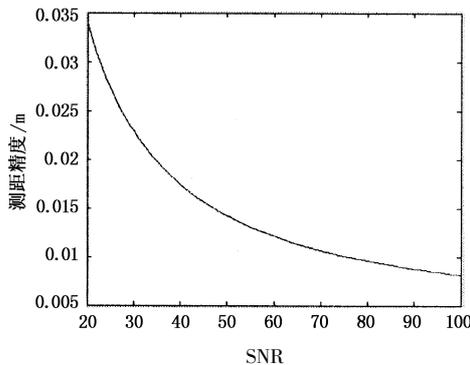


图3 系统信噪比和测距精度关系

以回波脉冲上升沿为变量,系统信噪比取为40,做出回波脉冲上升沿时间和系统测距精度曲线,如图4所示。测距精度随着上升沿时间的减小几乎成线性关系。可见缩短回波脉冲上升沿宽度可以有效的提高系统测距精度。

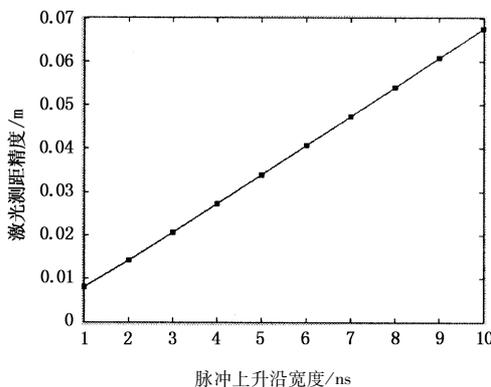


图4 脉冲上升沿宽度和测距精度关系

3 高精度脉冲激光测距实验装置设计

高精度脉冲激光测距实验装置采用了超窄脉宽激光器, LVPECL 电平高速电路和高精度时间间隔测量芯片。激光器型号为 SNG - 01.5E, 波长为 532 nm, 单脉冲能量 1.5 μJ , 脉宽 1.2 ns。激光器发射后有一小部分能量被后向散射, 散射的能量作为主波探测之用。主波放大后经过固定门限鉴别, 作为计时的开始信号。激光束经过扩束镜和衰减片后发射出去, 经过目标发射后被探测光学接收。接收探测器采用 APD 探测器, 型号为 HAMAMATSU 公司 S8864 - 20K, 探测带宽为 280 MHz。探测系统放大器采用一级跨阻放大器和一级可变增益放大器级联的形式, 整个系统的放大器带宽约为 130 MHz。其中跨阻放大器型号为 AD8015, 跨阻为 20 k Ω , 带宽 240 MHz。可变增益放大器采用 AD8330, 带宽为

150 MHz, 上升速率为 1500 V/ μs 。放大后的信号经恒比定时鉴别之后送入时间间隔测量芯片, 作为计时结束的控制。时间间隔测量采用 ASIC 芯片, 型号为 TDC - GPX, 单通道计时精度可达 27 ps。实验系统的原理框图如图 5 所示。

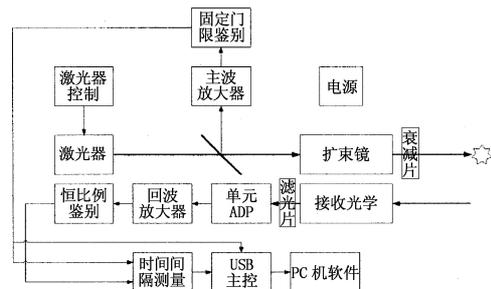


图5 高精度测距实验装置框图

4 实验结果及分析

(1) 单点测距精度

对同一目标用高重复频率激光器进行一段时间的测量得到一组测距数据, 对该组数据进行分析可以得到目标的单点测距精度。单点测距精度表示为^[5]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - EX)^2}{N - 1}} \quad (6)$$

图 6 是一组典型的测距数据, 测距精度为 0.01117 m。

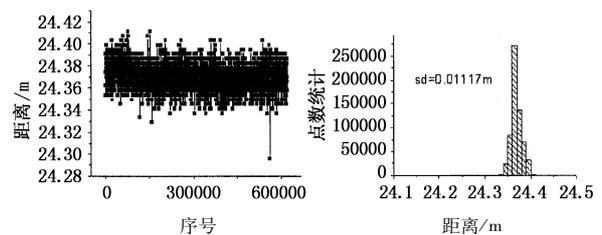


图6 一组典型的测距数据

(2) 距离行走误差

更换不同反射率的目标(其反射率由手持式光谱仪测量得到), 测量得到回波电信号峰值不同的几组数据, 如表 1 所示。对各组测距数据求平均值, 该值随回波电信号峰值不同而出现漂移, 即距离行走。不同回波峰值下的测距平均值如图 7 所示。

表 1 不同反射率目标的测量数据

序号	目标反射率	回波峰值 /V	RMS 噪声 /mV	信噪比	上升沿宽度 /ns
1	0.23	0.5	15	33	2.6
2	0.32	0.6	16	37.5	2.6
3	0.50	0.7	18	38	2.7
4	0.61	0.9	18	50	2.8
5	0.78	1.1	18	61	3.0

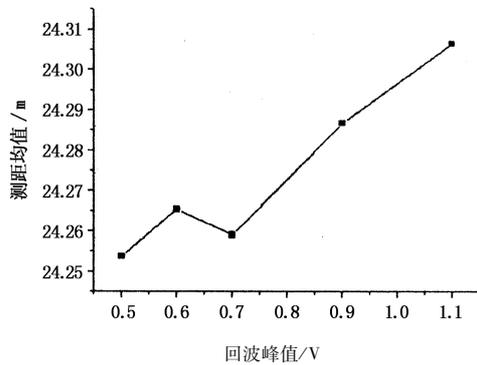


图7 不同回波峰值下的测距平均值

从图7看出,回波峰值从0.5 V变换到1.1 V的过程中,距离行走误差约为5 cm。从表1看出,随着回波幅度的变大,回波的上升沿逐渐变宽,这主要是由于回波放大器的上升速率不够高造成的。信号带宽和上升沿的关系可以表示为^[6]:

$$BW = \frac{0.338}{t_r} \quad (7)$$

由于采用了超窄脉宽激光器,激光上升沿宽度为0.6 ns,带宽为560 MHz,超过了探测系统带宽,导致了波形的展宽。换用更高速度的回波放大器,使之与激光脉冲相匹配可以进一步减小距离行走误差和提高单点测距精度。

5 结论

本文对影响脉冲激光测距精度的因素进行了分

析和归类,认为缩短激光脉冲上升时间是提高脉冲激光测距精度最简单有效的方法。在此基础上,基于超窄脉宽激光器设计了一种高精度脉冲测距实验装置,单点测距精度小于1.2 cm,满足高精度的应用需求。但是采用超窄脉宽激光器增加了系统成本,同时也对回波接收和放大系统提出了更高的要求。如何设计与超窄脉宽激光器相匹配的放大电路将作为下一步的工作。

参考文献:

- [1] 胡春生. 脉冲半导体激光器高速三维成像激光雷达研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2005:79-87.
- [2] Binkley D M. Performance of non-delay-line constant-fraction discriminator timing circuits[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science,1994,41(4):1169-1175.
- [3] Julia Kostamovaara KM, Risto Myllyla. Pulsed time-of-flight laser range-finding techniques for industrial applications[J]. SPIE, Optics, Illumination, and Image Sensing for Machine Vision VI,1991,1614:283-295.
- [4] 冯国旭,常保成. 高精度激光测距技术研究[J]. 激光与红外,2007,37(11):1137-1140.
- [5] Fox CS. 主动光电系统[M]. 天津:《红外与激光工程》编辑部,1996:41-44.
- [6] Johnson H. 高速数字设计[M]. 北京:电子工业出版社,2004:1-8.