

文章编号: 1672-8785(2010)06-0001-05

脉冲式高精度激光测距技术研究

陈 弈 郭 颖 杨 俊 黄庚华 舒 嵘

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘 要: 本文对脉冲式激光测距仪的误差来源进行了分析, 着重讨论了影响测距仪随机误差的几个因素。通过分析可以看到, 提高时间间隔测量电路的分辨率, 采用高速阈值鉴别芯片以及缩短信号上升沿是提高测距精度的有效方法。其中, 信号上升沿的缩短可以通过采用窄脉冲激光器以及适当的接收电路带宽来实现。通过仿真计算得到, 保持 5ns 上升时间不被扩展的最小带宽约为 90MHz。采用这个思路设计了一种高精度激光测距系统。经测试, 该系统对 500m 内不同距离目标的单次测距精度 (3σ) 在 0.077m ~ 0.115m 之间, 对距离在 500m 到 3km 的目标则优于 0.1 % D+0.05m (D 为距离)。同之前采用不同激光器和带宽的设计相比, 该系统的单次测距精度有了明显的改善。

关键词: 激光测距; 单次测距精度; 误差

中图分类号: TN247 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2010.06.001

Study of High-precision Pulsed Laser Range Finding Techniques

CHEN Yi, GUO Ying, YANG Jun, HUANG Geng-hua, SHU Rong

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: The error sources of pulsed laser range finders are analyzed and the factors which have influences on the random error of a pulsed laser range finder are primarily considered. It is found that improving the time resolution of a TDC, using a high speed threshold discriminator chip and reducing the rising edge of a pulsed signal are the effective methods for improving ranging precision. Among them, the reduction of a pulsed signal can be realized by using a narrow-pulse laser and a receiving circuit with a properly designed bandwidth. Simulation shows that the minimum bandwidth required to keep a 5ns rising edge from extending is 90MHz. Then, a high-precision laser range finder is designed and tested. The test result shows that the system has a single-shot precision (3σ) from 0.077m to 0.117m for the targets at different distances within 500m and has a precision better than 0.1 % D+0.05m (D stands for the distance) for the targets at different distances from 500m to 3km. Compared with the formerly designed systems using different lasers and different bandwidths, this system has obviously improved its single-shot precision.

Key words: laser range finding; single-shot precision; error

1 引言

与连续波激光测距 (如激光相位测距) 相

比, 脉冲式激光测距具有结构简单、无需目标合作、测程远、测量速度快等优点, 这使其在航天、军事及工业领域都得到了广泛的应用。自从

收稿日期: 2010-01-15

基金项目: 国家 973 计划项目 (2009CB724004) 资助

作者简介: 陈弈 (1986-), 男, 福建莆田人, 硕士研究生, 主要从事激光主动遥感和光电检测技术研究。E-mail: Chenyi.gabriel@gmail.com

第一台脉冲式激光测距仪于上世纪 60 年代初问世以来, 脉冲式激光测距技术发展迅速, 并已经有大量的成熟应用, 其发展趋势涵盖人眼安全激光测距仪、小型化和轻量化测距仪等方面。本文首先分析了脉冲式激光测距的误差来源和影响因素, 再对影响单次测距精度的重要参数——接收电路带宽进行了仿真计算, 然后以分析数据和仿真结果为指导搭建了一个脉冲式激光测距系统, 并对 3km 内的不同距离进行了测试。

2 脉冲式激光测距仪的基本原理

脉冲式激光测距仪是通过测量光脉冲的飞行时间 (TOF) 来测量其与目标之间的距离的。具体地说, 就是激光测距仪向目标发射一个光脉冲, 它经目标反射后由测距仪的回波接收通道接收, 并测量光脉冲从发射到返回测距仪所经历的时间 T 。显然, 测距仪和目标之间的距离 D 可以通过式 (1) 求得:

$$D = \frac{cT}{2} \quad (1)$$

式中, c 为光在介质中传播的速度。

3 脉冲式激光测距仪的误差分析

3.1 系统误差

脉冲式激光测距仪的系统误差主要来自于固定延时误差和距离行走误差。固定延时误差是指脉冲信号在系统中的传播延时所造成的测距值与实际距离值的偏差, 它一般与距离无关。距离行走误差则是由回波信号上的幅度变化造成的。目标在距离和反射率上的变化都会造成接收到的回波的能量变化, 从而导致回波信号的幅度变化。在鉴别阈值一定的情况下, 这个幅度变化会引起回波信号通过阈值的时刻发生改变, 从而导致测距值的偏差。通常可以通过采用恒比鉴别、信号质心检测等方式来减少距离行走误差^[1]。

系统误差的减小可通过地面标定的方式来实现。

3.2 随机误差

随机误差是影响本测距仪系统性能的关键, 它决定了系统的单次测距精度 (3σ), 因此

下面将着重分析测距仪的随机误差。

3.2.1 时间间隔测量误差

由于脉冲激光测距仪中的时间间隔测量电路的分辨率有限, 因而它会引入一个计时误差。假设激光脉冲可以发生在从零到时钟周期之间的任何值且概率相等, 由此可得由时间间隔引入的均方根距离误差为^[2]:

$$\sigma = \frac{c}{4\sqrt{3}f} \quad (2)$$

式中, c 为光速, f 为计数器的频率。因此, 由计时模块时间间隔的测量分辨率 Δt 引起的量化误差 σ_1 计算如下:

主波触发引起的起始时间量化所引入的误差

$$\sigma_{1(START)} = \frac{c}{4\sqrt{3}}\Delta t \quad (3)$$

回波触发引起的停止时间量化所引入的误差

$$\sigma_{1(STOP)} = \frac{c}{4\sqrt{3}}\Delta t \quad (4)$$

如果采用时间间隔测量专用芯片 TDC-GP1, 其时间分辨率为 250ps, 代入式 (3) 和式 (4) 可得 $\sigma_{1(STOP)} = \sigma_{1(START)} = 0.0108m$, 则由开始和结束脉冲产生的误差为

$$\sigma_1 = \sqrt{\sigma_{1(START)}^2 + \sigma_{1(STOP)}^2} = 0.0152m \quad (5)$$

3.2.2 阈值鉴别芯片的输出抖动误差

脉冲激光信号经过放大后, 需要由阈值鉴别芯片转化为数字电平, 以触发时间间隔测量。一般的 TTL 阈值鉴别芯片的输出抖动都在 5ns ~ 10ns 数量级, 产生的测距标准误差 $\sigma_j = 0.75m$, 这会严重影响系统的整体测距精度。为了减小抖动, 采用 LVECL 高速阈值鉴别芯片, 输出结果再经 ECL/LVTTL 芯片转化为 LVTTL 信号。芯片的总抖动偏差约为 50ps, 由此产生的测距误差的标准偏差为 $\sigma_j = 0.0075m$ 。考虑到主回波有两个通道, 阈值鉴别芯片产生的均方根误差为

$$\sigma_2 = \sqrt{2\sigma_j^2} = 0.0106m \quad (6)$$

3.2.3 时刻鉴别抖动误差

产生时刻鉴别抖动误差的原因在于接收到的脉冲信号上叠加了噪声。当激光测距仪采用前沿鉴别方式进行时刻鉴别时, 脉冲的上升沿上叠加的噪声会使其穿越比较阈值的时间发生变化, 由此产生时间的抖动, 并带来测量误差。时刻鉴别抖动误差可以通过所谓的“三角法则”来表示^[3]:

$$\sigma_t = \frac{\sigma_v(t)|_{t=t_p}}{\frac{d}{dt}v(t)|_{t=t_p}} \quad (7)$$

式中, $\sigma_v(t)$ 为噪声电平, $v(t)$ 为时刻鉴别电路输入脉冲的上升速率。 t_p 为鉴别时刻。

对于高斯型激光脉冲, 前沿鉴别抖动误差的标准偏差可表示为^[4]

$$\sigma_3 = \frac{t_r}{\sqrt{2(SNR)}} \frac{c}{2} \quad (8)$$

式(8)表明, 上升时间越短, 信噪比越高, 则时刻鉴别误差越小。与前两种随机误差相比, 时刻鉴别抖动误差受接收通道的信噪比和信号上升时间的影响较大。为保证实现设计指标, 接收通道的设计就成为该系统设计的关键。

回波信号的上升时间首先受制于出射激光脉冲的宽度, 因此为了实现高精度的激光测距, 应采用窄脉冲激光器。而在激光脉冲上升时间确定的情况下, 为了保持这个上升时间, 要求接收电路的带宽约为^[5]

$$BW = \frac{3.5}{t_r} \dots \frac{4.4}{t_r} \quad (9)$$

当激光脉冲的上升时间为 5ns 时, 接收通道的带宽应为 70MHz ~ 90MHz。我们对上升时间为 5ns 的高斯型脉冲进行了仿真计算, 并考察了不同接收电路带宽对上升时间的影响。图 1 显示了经不同带宽的接收电路滤波后脉冲波形的上升时间。可以看出, 当带宽 ≤ 50 MHz 时, 激光脉冲的高频信号被抑制, 上升时间被展宽; 带宽 ≥ 90 MHz 后, 上升时间基本不变, 约为 5ns。这与理论分析结果基本相符, 同时随着带宽的增大, 噪声也会增大, 因此这个仿真结果为带宽的设计带来了启示: 当带宽大于 90MHz 时, 测距精度

可能会因噪声的增大而降低, 而小于这个值时测距精度可能会因为上升时间的变长而降低。设接收到的主回波信号的上升时间均为 8ns, 信噪比均为 50, 由式(8)可以算出主回波信号的前沿鉴别误差约为 $\sigma_{31} = \sigma_{32} = 0.017m$ 。

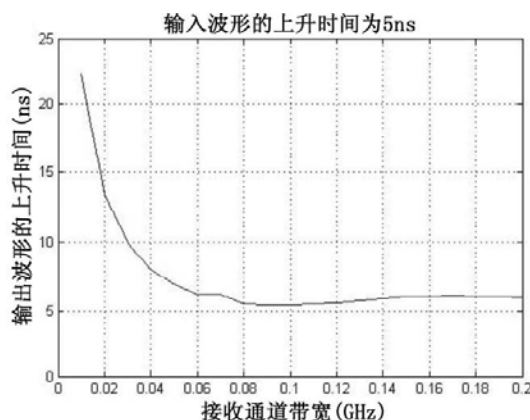


图 1 上升时间随接收通道带宽的变化图

综合以上诸项误差, 得到的单次测距精度为

$$3\sigma = 3\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_{31}^2 + \sigma_{32}^2} = 0.0911m \quad (10)$$

4 激光测距系统的设计

根据上述分析, 激光测距系统的设计框图如图 2 所示。主回波接收通道分别接收、发射和返回激光脉冲信号, 并产生开始和停止信号, 再送往时间间隔测量电路以触发时间测量。

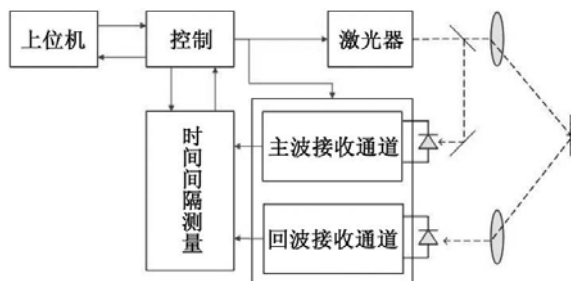


图 2 激光测距仪的基本结构图

该测距仪采用窄脉冲激光器, 其单脉冲能量为 1mJ, 工作波长为 1064nm, 脉冲的半功率宽度约为 10ns, 因此出射激光脉冲的上升时间约为 5ns。接收光学系统中的窄带滤光片 (1064nm) 可以有效抑制背景光噪声。回波接收探测器采用

Perkin Elmer 公司的 C30659 雪崩光电二极管和集成跨阻前放输出电压信号。回波信号放大电路的主放大级采用可变增益放大器 AD8330, 其带宽为 150MHz, 上升速率为 1500V/ μ s, 增益动态范围为 0dB ~ 50dB。由于增益控制电压与增益成 dB 线性关系, 因此采用电容充电法给可变增益放大器提供一个随测距时间呈指数上升的增益控制电压, 可以补偿由于目标距离变化而引起的回波能量变化, 从而令回波的幅值相对稳定。采用 RC 滤波网络将通道带宽限制为 90MHz。时刻鉴别电路采用前沿鉴别方式, 并使用 LVPECL 电平高速阈值鉴别芯片。时间间隔测量模块采用时间间隔测量专用芯片 TDC-GP1。

5 激光测距系统的性能验证

用激光测距系统对同一目标连续进行了多次测距。随机测距误差的表述如式 (11) 所示^[2], $\bar{x}$ 为测距平均值, x_{mi} 为测量值, N 为测量次数。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_{mi} - \bar{x})^2}{N-1}} \quad (11)$$

由于受场地空间限制, 本系统难以对几到几百公里的分布点进行标靶测距实验, 这是测距精度测试的一个难点。

由前面的分析可知, 随机测距误差的来源主要有时间间隔测量误差、阈值鉴别芯片的输出抖动误差和时刻鉴别抖动误差。本系统中, 前两种随机误差均与目标距离变化无关。在目标距离变化的情况下, 系统的测距精度主要受信号的强度变化影响。因此, 对于难以用实际布点进

行测量的测距精度试验, 可以采用消光比法, 即在固定距离点放置标准靶板, 通过在光学通路中插入光学衰减片来模拟不同距离上的信号强度变化, 从而获得对应距离的测距精度数据。每个距离的发射激光次数 $N \geq 100$ 次, 剔除虚警数据后, 获得该距离上相对应的随机测距误差。

采用这种测试方法得到的结果如图 3 所示。

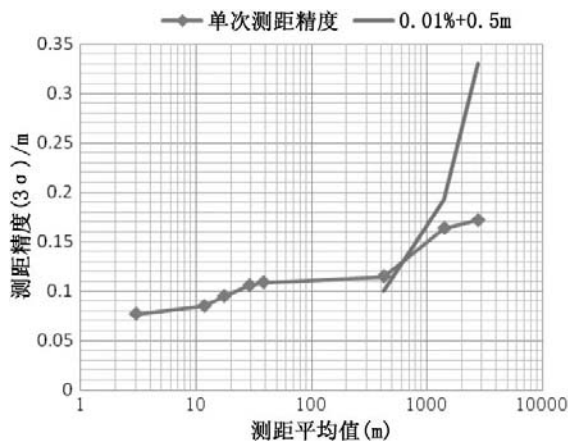


图 3 测距精度的测试结果

从图 3 中可以看到, 在 3m ~ 500m 范围内, 几个目标处的单次测试精度 (3σ) 分布在 0.077m ~ 0.115m, 在 500m ~ 3km 范围内, 则优于 0.1% D+0.05m (D 为距离)。

表 1 为同等条件 (目标为 40m) 下采用不同激光器和带宽设计的测试结果。可以看出, 与之前的一些设计相比, 在信噪比相似的情况下, 采用不同的激光器和回波接收电路带宽设计对测距精度确实有很大的影响。因此, 提高接收电路带宽对测距精度的改善有明显效果。

表 1 不同设计的测试结果

	激光脉冲宽度 (ns)	接收电路带宽 (MHz)	回波信号上升沿 (ns)	测距精度 (3σ)/m
设计 1	30	35	18	0.279
设计 2	10	35	14	0.244
设计 3	10	90	8	0.102

6 结论

本文着重讨论了影响脉冲式激光测距仪随

机误差的几个因素。通过分析可以看到, 提高时间间隔测量电路的分辨率, 采用高速阈值鉴别

(下转第 39 页)