

# 基于双阈值前沿时刻鉴别法的高频脉冲激光测距系统

陈瑞强 江月松 裴 朝

(北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191)

**摘要** 百千赫兹量级测量重复频率和亚厘米量级测量精度的脉冲激光测距系统是激光测距领域的研究热点之一。分析研究了基于皮秒脉冲激光器的激光测距系统的实现原理和方法, 针对激光脉宽极窄的特点, 使用双阈值前沿时刻鉴别法和电压比较器输出数字信号的脉宽控制方法, 并配合 TDC-GPX 高精度时间数字转换芯片, 达到了设计要求。实验结果表明: 测距系统工作稳定可靠, 测量重复频率达到 500 kHz, 单次测距精度范围为 [4 mm, 10 mm]。

**关键词** 测量; 脉冲激光测距; 皮秒激光器; 双阈值前沿时刻鉴别法; 数字信号脉宽控制; TDC-GPX 芯片

**中图分类号** TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0912002

## High Frequency and High Accuracy Laser Ranging System Based on Double Thresholds Leading-Edge Timing Discrimination

Chen Ruiqiang Jiang Yuesong Pei Zhao

(Department of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract** The laser ranging system with hundreds of kilohertz measuring frequency and sub-centimeter level accuracy is one of the hotspots in the research of laser ranging. The principle and method of realizing laser ranging system are analyzed based on picosecond pulsed laser. According to the utmost narrow pulse width, the method of double thresholds leading-edge timing discrimination and width control method of digital signal generated by voltage comparator are applied. Coupled with high accuracy time to digital chip TDC-GPX, it can achieve the requirement of system. Experiments show that the system is stable and reliable, the measuring frequency can be up to 500 kHz, and the ranging accuracy is between 4 mm and 10 mm.

**Key words** measurement; pulsed laser ranging; picosecond pulsed laser; double thresholds leading-edge timing discrimination; width control of digital signal; TDC-GPX chip

**OCIS codes** 120.1880; 140.3538; 280.3400

### 1 引 言

脉冲激光测距的基本原理是, 主动向目标发射激光脉冲, 探测该目标上被照射点的激光回波, 测量激光脉冲的飞行时间, 从而计算出目标的距离信息。脉冲激光测距具有激光发射峰值功率高、探测距离远以及对光源相干性要求低等优点, 在地球地貌测绘、资源调查、城市三维建模、工业测量等领域得到广泛应用<sup>[1-4]</sup>。

脉冲激光测距的精度主要依赖于接收通道的带

宽、信噪比、回波时刻鉴别精度和时间数字转换精度等<sup>[5-9]</sup>。由脉冲激光测距原理可知, 激光脉宽越窄, 测距精度越高, 但会造成接收通道的带宽随之增大。一般脉冲激光测距系统使用的激光脉宽为纳秒量级, 接收通道为百兆赫兹级带宽。本文使用的激光脉宽约为 550 ps, 接收通道需要 1 GHz 带宽才能满足要求, 增加了恒比定时时刻鉴别法和高通容阻时刻鉴别法的实现难度, 故选用双阈值前沿时刻鉴别法消除时间漂移误差, 原理及实现相对简单可行。

收稿日期: 2013-03-04; 收到修改稿日期: 2013-04-12

基金项目: 国家 973 计划(2011CB707001)

作者简介: 陈瑞强(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事激光测距及三维成像等方面的研究。

E-mail: dreamskychrq@gmail.com

导师简介: 江月松(1959—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电探测及遥感遥测等方面的研究。

E-mail: yuesongjiang@buaa.edu.cn

电压比较器是双阈值前沿时刻鉴别法的核心部分。一般应用中,电压比较器的阈值是固定不变的,电压比较器输出数字信号的脉宽与输入高斯脉冲信号的脉宽和幅度相关,无法满足时间数字转换器 TDC-GPX 对输入数字信号的脉宽要求。因此,提出利用电压比较器的滞回比较功能,并配合计时电路,达到控制输出数字信号脉宽的目的。

本文开展了基于双阈值前沿时刻鉴别法的高频激光测距系统的研究,针对皮秒脉冲激光器特点设计了 1 GHz 带宽的接收通道和时刻鉴别电路,并配合高精度时间数字转换芯片 TDC-GPX 的评估板,成功达到了设计要求。

## 2 脉冲激光测距系统工作原理

脉冲激光测距系统工作原理如图 1 所示,脉冲激光器在外触发信号控制下发射激光脉冲,经分束

镜比例分束后,约 3% 的激光能量被 PIN 探测器接收,经光电转换产生参考信号;其余 97% 的激光能量被雪崩光电二极管(APD)探测器接收,经光电转换产生回波信号。文中没有使用激光回波光学接收系统,而是通过调节线性可变中性密度(ND)衰减片在光路中的位置,模拟激光回波强度的变化。参考信号和回波信号送入时刻鉴别电路,经电压比较器产生开始计时数字信号与停止计时数字信号。其中时刻鉴别电路利用双阈值前沿时刻鉴别法,消除回波时间漂移误差,并配合现场可编程门阵列(FPGA)开发板控制电压比较器输出数字信号的脉宽。时间数字转换器 TDC-GPX 用来测量开始计时数字信号与停止计时数字信号之间的时间间隔,并将得到的时间间隔信息送入计算机处理得到测距结果。图中 PCI 表示外部控制器接口,LAN 为局域网。

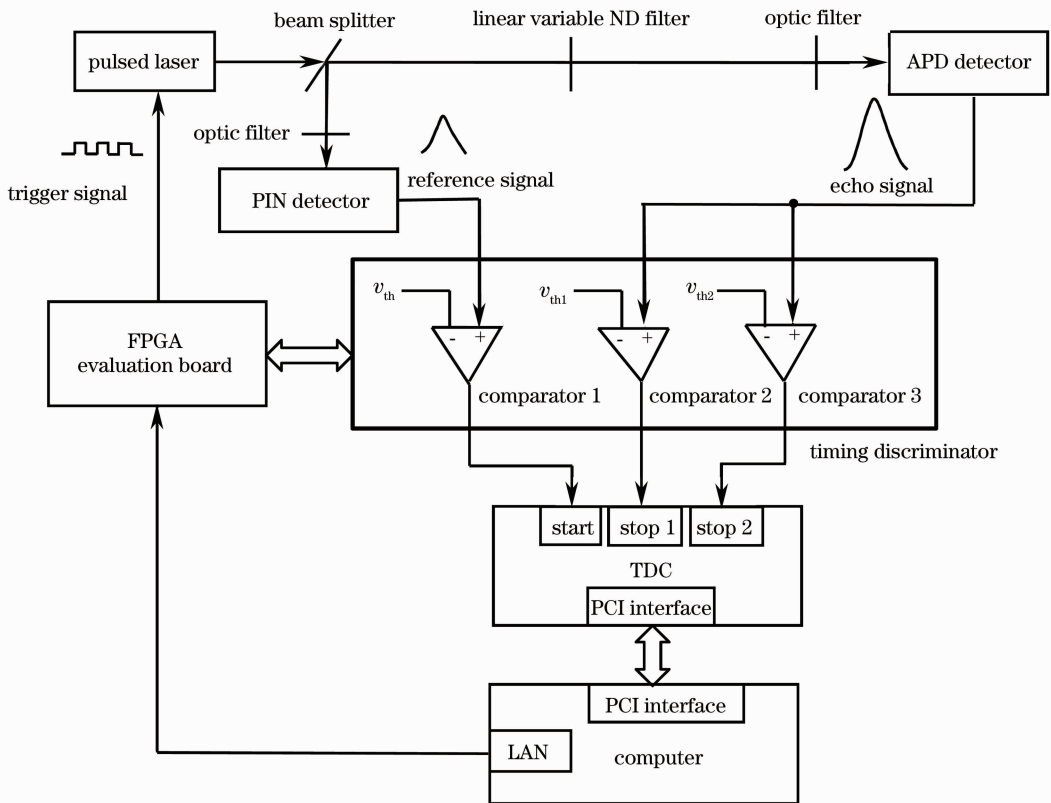


图 1 脉冲激光测距系统原理图

Fig. 1 Principle and block diagram of a pulsed laser rangefinder

下面详细说明原理图涉及到的双阈值前沿时刻鉴别法和电压比较器输出数字信号的脉宽控制方法。

### 2.1 双阈值前沿时刻鉴别法

激光脉冲受大气及目标散射特性的影响,激光回波强度变化很大,单阈值前沿时刻鉴别法会引起

很大的时间漂移误差,这给准确确定激光回波时刻带来困难。如图 2 所示,假设激光回波信号服从高斯分布,上升沿持续时间为  $t_r$ ,电压比较阈值设置为  $v_{th}$ ,则由激光回波信号强度变化引起的时间漂移误差  $\Delta t_{twe}$  最大可达  $t_r/2$ 。

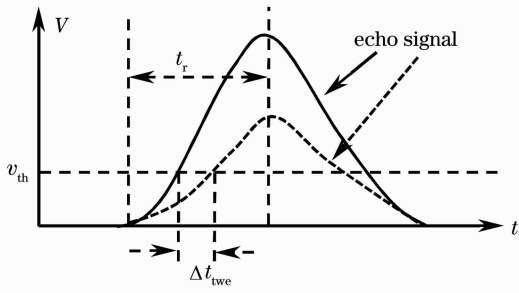


图 2 回波时间漂移误差

Fig. 2 Walk error in leading-edge timing discrimination

为了消除时间漂移误差,常用的激光回波时刻鉴别方法主要有恒定比值鉴别法、高通容阻鉴别法和误差补偿鉴别法<sup>[10-13]</sup>。恒定比值鉴别法以激光回波信号前沿半高点到达的时刻作为激光回波的停止时刻;高通容阻鉴别法利用高通容阻滤波电路的微分效应,将激光回波信号的峰值点转变为零点,以此作为激光回波的停止时刻;误差补偿法使用多个

阈值测量同一激光回波信号,利用标定的误差补偿关系,补偿单个阈值引起的时间漂移误差,得到准确的激光回波停止时刻。

激光回波信号的前沿持续时间很短(比如皮秒量级),会增大恒定比值鉴别法和高通容阻鉴别法的电路设计及加工难度。更糟糕的是,这两种方法都要求回波信号不能出现饱和,难以适应回波强度剧烈变化的场合。相比之下,误差补偿鉴别法不存在这两方面问题。

双阈值前沿时刻鉴别法属于误差补偿鉴别法,其工作原理如图 3 所示。结合图 1 可知:参考信号经阈值  $v_{th}$  产生开始计时数字信号。回波信号同时经  $v_{th1}$  和  $v_{th2}$  ( $v_{th1} < v_{th2}$ ) 产生两个停止计时数字信号。使用虚线和实线分别表示强度不同的回波信号,同一回波信号可以测量得到两个飞行时间  $t_1$  和  $t_2$  ( $t'_1$  和  $t'_2$ )。通过实验可以标定  $t_2 - t_1$  (或  $t'_2 - t'_1$ ) 与时间漂移误差  $\Delta t_{twe}$  的关系,利用标定好的误差补偿曲线,消除由单阈值引起的时间漂移误差。

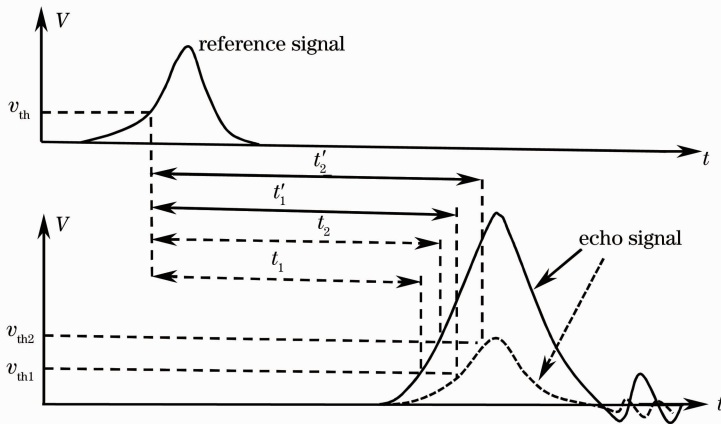


图 3 双阈值前沿时刻鉴别示意图

Fig. 3 Principle of double thresholds leading-edge timing discrimination

## 2.2 电压比较器输出数字信号的脉宽控制方法

电压比较器的工作原理如图 4 所示,输入的模拟信号  $v_{in}$  与阈值  $v_{th}$  做比较,当模拟信号  $v_{in}$  的电压值超过阈值  $v_{th}$  时,电压比较器输出数字信号  $v_{out}$  跳变为高电平;当模拟信号  $v_{in}$  的电压值低于阈值  $v_{th}$  时,电压比较器输出数字信号  $v_{out}$  跳变为低电平。假设数字信号  $v_{out}$  的脉宽  $t_w$  为高电平的持续时间,由图 4 可知,数字信号  $v_{out}$  的脉宽  $t_w$  由模拟信号  $v_{in}$  高于阈值  $v_{th}$  的部分决定,造成数字信号  $v_{out}$  的脉宽  $t_w$  随模拟信号  $v_{in}$  强度的变化而变化。

文中使用的模拟信号为光电探测器输出的高斯脉冲信号,其脉宽(上升沿半高点到下降沿半高点间的时间)约为 550 ps,因此电压比较器输出数字信号

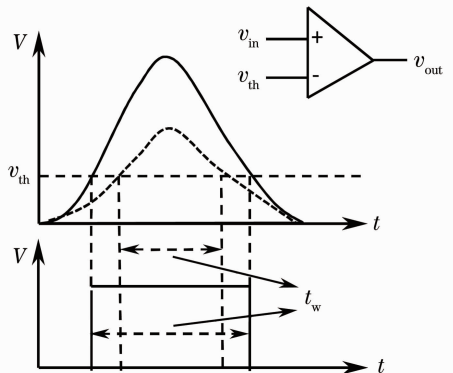


图 4 电压比较器工作原理

Fig. 4 Principle of voltage comparator

无法满足 TDC-GPX 对输入数字信号的脉宽要求。因此,利用电压比较器的滞回比较功能,并配合外围电路控制电压比较器输出数字信号的脉宽,以满足脉宽要求。

图 5(a)显示了电压比较器的滞回传递函数,滞回比较阈值  $\pm v_{th}$  的电压值由滞回控制电阻  $R_{HYS}$  决

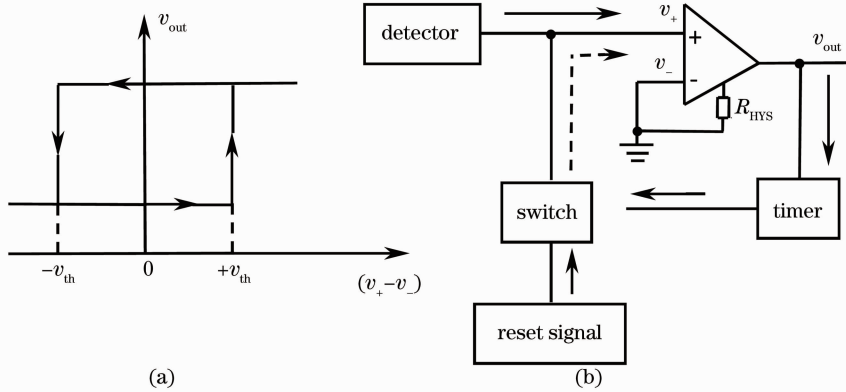


图 5 电压比较器输出数字信号脉宽控制原理。(a)滞回传递函数; (b)脉宽控制系统示意图

Fig. 5 Principle and block diagram of width control for digital signal. (a) Hysteresis transfer function; (b) block diagram of width control system

图 5(b)显示了电压比较器输出数字信号的脉宽控制系统示意图。探测器输出的模拟信号  $v_+$  可近似为正高斯电压信号,由于电压比较器负输入端接地,输入信号电压差就等于  $v_+$ 。当模拟信号  $v_+$  的上升沿电压值超过阈值  $+v_{th}$  时,数字信号  $v_{out}$  跳变为高电平。由于模拟信号  $v_+$  的电压值不会低于阈值  $-v_{th}$ ,数字信号  $v_{out}$  会一直保持高电平。数字信号  $v_{out}$  跳变为高电平时,计时电路开始计时,达到预设时长后,控制模拟开关导通,将复位信号源提供的幅值小于阈值  $-v_{th}$  的直流电压信号加到电压比较器的正向输入端,数字信号  $v_{out}$  跳变为低电平,达到控制数字信号  $v_{out}$  脉宽的目的。

## 3 硬件实现

### 3.1 脉冲激光器与光电探测器

脉冲激光器使用的是 CrownTech 公司的 DLD-900 皮秒激光器,波长 1060 nm,半峰全宽(FMHW)约为 550 ps,通过外触发信号同步产生频率可调(10 Hz~80 MHz)的激光脉冲。PIN 探测器和 APD 探测器均为铟镓砷光电探测器,波长响应范围为 800~1700 nm,带宽 1 GHz,可以很好地响应 DLD-900 发射的激光脉冲。

### 3.2 时刻鉴别电路

结合图 1 与图 5 可知,时刻鉴别电路主要由三路

定。输入信号电压差  $(v_+ - v_-)$  从阈值  $-v_{th}$  向阈值  $+v_{th}$  方向变化时,只有输入信号电压差  $(v_+ - v_-)$  超过阈值  $+v_{th}$ ,输出数字信号才跳变为高电平;输入信号电压差  $(v_+ - v_-)$  从阈值  $+v_{th}$  向阈值  $-v_{th}$  方向变化时,只有输入信号电压差  $(v_+ - v_-)$  低于阈值  $-v_{th}$ ,输出数字信号才跳变为低电平。

电压比较通道组成,分别产生 start、stop1 和 stop2 三路数字信号,作为 TDC-GPX 的输入信号。三路电压比较通道的电路设计完全相同,图 6 显示了其中一路电压比较通道的电路图,图中电阻默认单位为  $\Omega$ ,K 表示  $k\Omega$ 。高速电压比较器 ADCMP582 为核心部分,输入带宽为 1 GHz,输出 LVPECL 类型数字信号,14 脚为滞回比较端,调节可调电阻可以设置合适的滞回比较阈值;电阻分压网络产生约  $-0.5$  V 的直流电压信号 NEG\_RST\_V,并通过运放 OP07D 提高驱动能力;模拟开关 ADG601 的 6 脚为控制端,控制信号 OUTPUT\_RST 为高电平时,ADG601 的 5 脚(信号输入端)和 2 脚(信号输出端)导通,否则断开;黑金公司的 FPGA 开发板( NOIS II)实现计时功能,通过插件分别连接 ADCMP582 的输出端(Q\_P 和 Q\_N)和 ADG601 的控制端。

### 3.3 时间数字转换器和测距控制软件

使用德国 ACAM 公司的 TDC-GPX 评估板测量激光脉冲飞行时间,其核心硬件是 TDC-GPX 时间数字转换芯片。该芯片利用电信号在介质中传播延迟原理,支持双测量通道,每个测量通道最高 10 ps 测量精度,最高 500 kHz 的测量重复频率以及最大  $7 \mu s$  的测量范围(不考虑系统延迟的情况)。

上位机运行的测距控制软件在 C# 语言编译环境下编译完成,采用多线程编程技术,线程之间采用委托代理方式传递数据,一方面提高了软件的运行

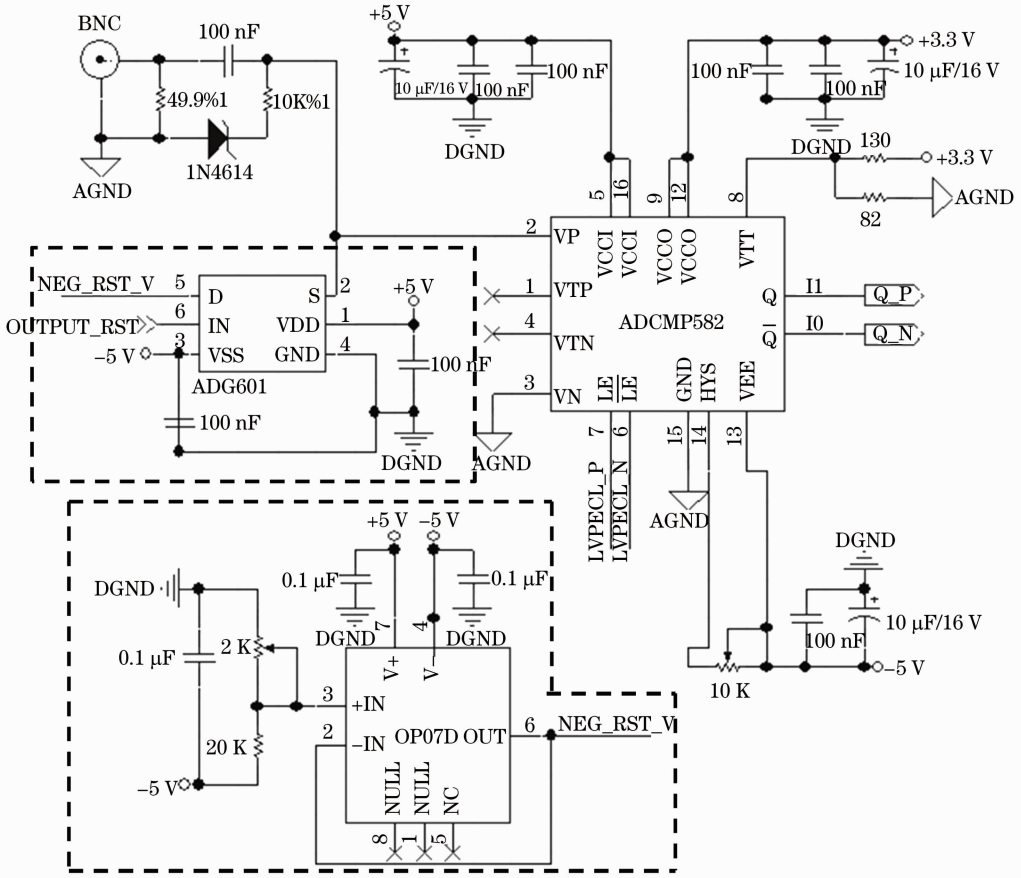


图 6 电压比较通道电路图

Fig. 6 Circuit of voltage comparison channel

效率,缩短了数据采集与处理的周期,另一方面增强了软件的人机交互能力。

## 4 实验结果及分析

### 4.1 激光脉冲飞行时间测量精度

参考高速电压比较器 ADCMP582 的数据手册,改变与滞回比较端相连电阻的阻值,设定图 1 中电压比较器 1 的滞回比较阈值为  $\pm 10$  mV,电压比较器 2 的滞回比较阈值为  $\pm 10$  mV,电压比较器 3 的滞回比较阈值为  $\pm 20$  mV。

图 7 显示了不同回波信号强度下两个测量通道测量得到的激光脉冲飞行时间分布图。回波信号强度  $V_{\text{echo\_peak}} = 65$  mV 时,测量通道 1(stop1-start)测量得到的激光脉冲飞行时间的平均值为 2.17 ns,测量精度(标准方差)为 44.58 ps;测量通道 2(stop2-start)测量得到的激光脉冲飞行时间的平均值为 2.25 ns,测量精度为 42.89 ps。回波信号强度  $V_{\text{echo\_peak}} = 970$  mV 时,测量通道 1(stop1-start)测量得到的激光脉冲飞行时间的平均值为 2.11 ns,测量

精度为 19.15 ps;测量通道 2(stop2-start)测量得到的激光脉冲飞行时间的平均值为 2.12 ns,测量精度为 19.20 ps。

图 8 显示了测量通道 1 和测量通道 2 测量得到的激光脉冲飞行时间测量精度与回波信号强度  $V_{\text{echo\_peak}}$  之间的关系,从图 8 可以得出如下结论。

1) 回波信号强度 200 mV 处是飞行时间测量精度的拐点。系统信噪比和时间数字转换精度是影响飞行时间测量精度的主要因素:提高回波信号强度,系统的信噪比增大,飞行时间测量精度相应提高;信噪比提高到一定程度后,时间数字转换精度成为主要影响因素,而时间数字转换精度是基本不变的,飞行时间测量精度会维持在一个很小的变化区间内,即[10 ps, 20 ps]。

2) 回波信号强度 200 mV 处也是测量通道之间飞行时间测量精度差异化的拐点。参考图 1 和图 2,回波信号一开始缓慢上升,然后快速达到峰值。当回波信号强度很小时,两个测量通道都处于回波信号的缓慢上升区,测量通道 1 的阈值  $v_{\text{th1}}$  小于测量通道 2 的阈值  $v_{\text{th2}}$ ,系统噪声对测量通道 1 的

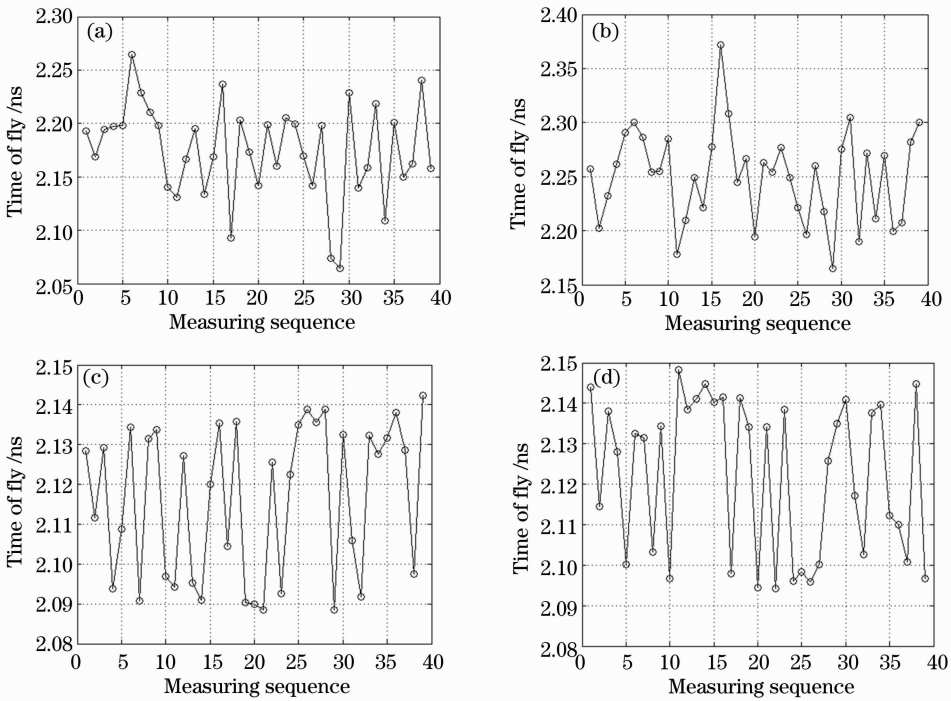


图 7 激光脉冲飞行时间测量数据。(a)  $V_{\text{echo\_peak}} = 65 \text{ mV}$ , stop1-start; (b)  $V_{\text{echo\_peak}} = 65 \text{ mV}$ , stop2-start;

(c)  $V_{\text{echo\_peak}} = 970 \text{ mV}$ , stop1-start; (d)  $V_{\text{echo\_peak}} = 970 \text{ mV}$ , stop2-start

Fig. 7 Measuring results of time of fly. (a)  $V_{\text{echo\_peak}} = 65 \text{ mV}$ , stop1-start; (b)  $V_{\text{echo\_peak}} = 65 \text{ mV}$ ,

stop2-start; (c)  $V_{\text{echo\_peak}} = 970 \text{ mV}$ , stop1-start; (d)  $V_{\text{echo\_peak}} = 970 \text{ mV}$ , stop2-start

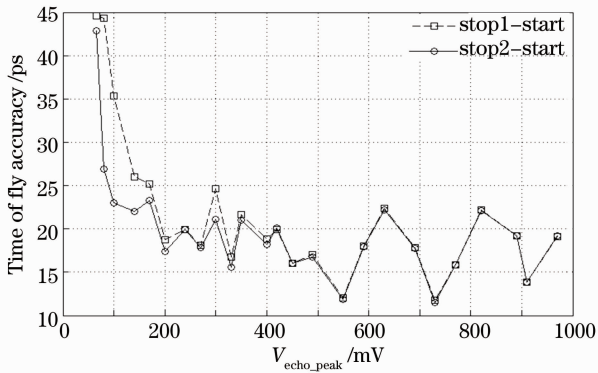


图 8 激光脉冲飞行时间测量精度与回波模拟信号强度的关系

Fig. 8 Relationship between time of fly accuracy and echo intensity

影响大于对测量通道 2 的影响,因此测量通道 1 的飞行时间测量精度就低于测量通道 2 的飞行时间测量精度;当回波信号强度提高到一定程度后,两个测量通道都处于回波信号的快速上升区,系统噪声对测量通道 1 的影响和对测量通道 2 的影响近似相同,因此测量通道 1 与测量通道 2 的飞行时间测量精度近似相等。

#### 4.2 系统测距精度

根据图 1 所示的脉冲激光测距原理,设 APD 探

测器的光敏面与分束镜的距离是 0.3 m(对应激光脉冲飞行时间 1 ns)。测量通道 1 测量得到的激光脉冲飞行时间为  $t_1$ ,测量通道 2 测量得到的激光脉冲飞行时间为  $t_2$ ,令  $\Delta t = t_2 - t_1$ 。为获取准确的时间误差补偿关系, $t_1$  和  $t_2$  都是相同回波信号强度下多次(40 次)测量结果的平均值。

图 9 显示了  $\Delta t$  与需要补偿的时间漂移误差  $t_{\text{cmp\_error}}$  之间的关系,二项式曲线拟合得到的表达式为

$$t_{\text{cmp\_error}} = -0.34\Delta t^2 + 0.8\Delta t + 1.11. \quad (1)$$

利用误差补偿表达式(1)式,最终得到脉冲激光

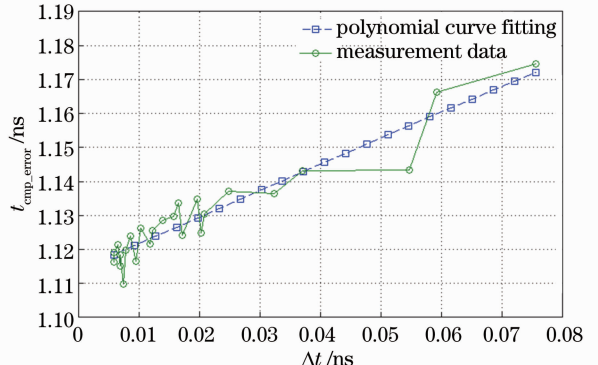


图 9 时间误差补偿曲线

Fig. 9 Compensation curve for time walk error

测距公式为

$$d_{\text{distance}} = c(t_1 - t_{\text{cmp\_error}}) = c[t_1 + 0.34(t_2 - t_1)^2 - 0.8(t_2 - t_1) - 1.11], \quad (2)$$

式中  $c$  表示光在真空中的传播速度。

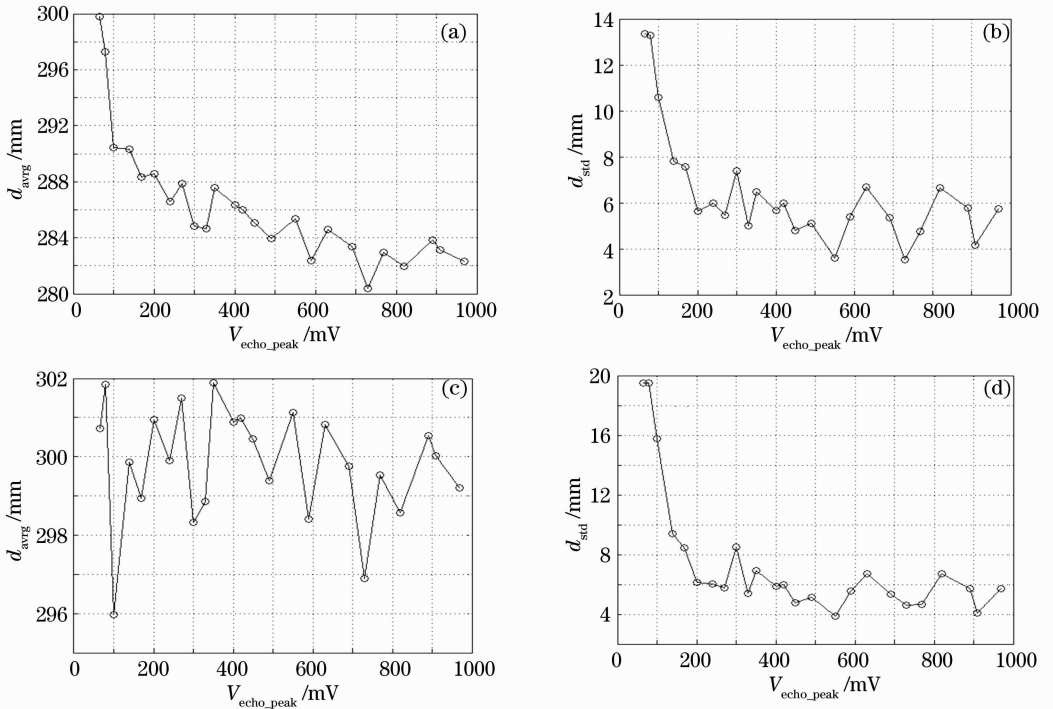


图 10 单阈值前沿时刻鉴别法与双阈值前沿时刻鉴别法测距结果对比。(a)单阈值测距均值；(b)单阈值测距标准方差；(c)双阈值测距均值；(d)双阈值测距标准方差

Fig. 10 Ranging comparison between single threshold and double thresholds leading-edge timing discrimination. (a) Ranging mean with single threshold; (b) ranging standard deviation with single threshold; (c) ranging mean with double thresholds; (d) ranging standard deviation with double thresholds

从图 10 可以得出以下结论：

1) 双阈值前沿时刻鉴别法很好地克服了单阈值前沿时刻鉴别法引起的时间漂移误差。回波信号强度为 65 mV 时,根据测定的系统固定延迟,标定测量距离为 300 mm。随着回波信号强度的增大,单阈值前沿时刻鉴别法的测距均值逐渐偏离标定距离,最大偏差达到 20 mm。由于使用了时间漂移误差补偿机制,双阈值前沿时刻鉴别法的测距均值误差基本维持在 $[-2 \text{ mm}, +2 \text{ mm}]$ 区间内。

2) 双阈值前沿时刻鉴别法的测距标准方差略高于单阈值前沿时刻鉴别法的测距标准方差。这种差异是由测量原理导致的。双阈值前沿时刻鉴别法相当于使用了两次单阈值前沿时刻鉴别法,同时时间漂移误差校正过程中也引入了一定误差。但这种测距标准方差的损失是有意义的,结合稳定的测距均值,系统整体测距精度会维持在很高的水平。

3) 双阈值前沿时刻鉴别法的测距精度(测距结

图 10 显示了使用单阈值前沿时刻鉴别法与双阈值前沿时刻鉴别法得到的测距结果对比图,其中  $d_{\text{avg}}$  和  $d_{\text{std}}$  分别表示相同回波强度下测距结果的均值及标准方差。

果与标定距离的标准方差)与回波信号强度成正比关系。结合双阈值前沿时刻鉴别法的测距均值[图 10(c)]和测距标准方差[图 10(d)],整体测距精度维持在 $[8 \text{ mm}, 20 \text{ mm}]$ 区间内,由于文中的测量距离对应实际测距中激光的往返距离之和,所以对应的实际测距精度为 $[4 \text{ mm}, 10 \text{ mm}]$ 。

## 5 结 论

本文实现了百千赫兹级测量重复频率和亚厘米级测量精度的脉冲激光测距系统,在系统设计及具体实施方面已经存在巨大挑战,测距系统是基于皮秒脉冲激光器的,这进一步增加了实现难度。采用双阈值前沿时刻鉴别法消除回波时间漂移误差,并提出一种电压比较器输出数字信号的脉宽控制方法,解决了激光脉宽过窄造成的时间数字转换器无法工作的问题,最后配合时间数字转换芯片 TDC-GPX 达到了设计要求。在后续的研究工作中,将对

测距系统做进一步优化,在降低电路噪声、提高系统集成度、APD探测性能、系统差标校、大气路径改正及高重复频率中激光可能的后向散射干扰等方面还有很多工作需要完成。

## 参 考 文 献

- 1 Tian Yuzhen, Zhao Shuai, Guo Jin. Analysis of non-cooperative target photon counting laser ranging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(5): 0514002.  
田玉珍, 赵帅, 郭劲. 非合作目标光子计数激光测距技术研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(5): 0514002.
- 2 Wang Jianyu, Hong Guanglie, Bu Hongyi, *et al.*. Study on airborne scanning lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(9): 2585–2589.  
王建宇, 洪光烈, 卜弘毅, 等. 机载扫描雷达的研制[J]. *光学学报*, 2009, 29(9): 2585–2589.
- 3 Yuan Hongwu, Mei Haiping, Huang Yinbo, *et al.*. Research on atmospheric refraction correction algorithm and model for satellite laser range-finding [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(4): 0401004.  
袁宏武, 梅海平, 黄印博, 等. 星载激光测距大气校正算法与模型研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(4): 0401004.
- 4 Zheng Xiangming, Li Zhulian, Fu Honglin, *et al.*. 1.2 m telescope satellite co-optical path kHz laser ranging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(5): 0512002.  
郑向明, 李祝莲, 伏红林, 等. 云台 1.2 m 望远镜共光路千赫兹卫星激光测距系统[J]. *光学学报*, 2011, 31(5): 0512002.
- 5 Belal Al-Qudsi, Ahmed Abbas H Ameri, Axel Bangert. Low cost highly precision time interval measurement unit for radar applications [C]. *Microwave Conference*, 2012. 1–4.
- 6 Marek Zielinski, Dariusz Chaberski, Marcin Kowalski, *et al.*.

- High-resolution time-interval measuring system implemented in single FPGA device [J]. *Measurement*, 2004, 35(3): 311–317.
- 7 Qu Bayi, Zhou Wei, Chen Faxi, *et al.*. Development of high precision time interval measurement module [J]. *Chinese J Scientific Instrument*, 2009, 30(7): 1476–1480.  
屈八一, 周渭, 陈发喜, 等. 高精度时间间隔测量仪的研制[J]. *仪器仪表学报*, 2009, 30(7): 1476–1480.
- 8 Ji Rongyi, Zhao Changming, Ren Xuecheng. High precision and high frequency pulse laser ranging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(8): 1461–1464.  
纪荣祎, 赵长明, 任学成. 高精度高重复脉冲激光测距系统[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(8): 1461–1464.
- 9 Ni Xuxiang, Hu Kai. Multi-pulse train cross-correlation method in remote laser ranging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1112005.  
倪旭翔, 胡凯. 脉冲串互相关方法在远程激光测距中的应用[J]. *光学学报*, 2012, 32(11): 1112005.
- 10 Hu Chunsheng. Investigation into the High-Speed Pulsed Laser Diode 3D-Imaging Lidar [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005. 79–85.  
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. 79–85.
- 11 Sami Kurtti, Juha Kostamovaara. An integrated optical receiver with wide range timing discrimination characteristics [C]. *Proceedings of ESSCIRC*, 2005. 435–438.
- 12 Juha Kostamovaara, Jan Nissinen, Sami Kurtti, *et al.*. On the minimization of timing walk in industrial pulsed time-of-flight laser radar [C]. *SPIE*, 2009, 7356: 73560N.
- 13 Sami Kurtti, Juha Kostamovaara. An integrated laser radar receiver channel utilizing a timing-domain walk error compensation scheme [J]. *Instrumentation and Measurement*, 2011, 60(1): 146–157.

栏目编辑: 何卓铭