

文章编号:1007-2780(2015)01-0083-06

脉冲激光测距中高速精密时间间隔测量研究

岱 钦*, 毛有明, 吴凯旋, 吴 杰, 李业秋
(沈阳理工大学 理学院, 辽宁 沈阳 110159)

摘要:在脉冲激光测距系统中,设计实现了基于 FPGA 和 TDC-GP21 的高速精密时间间隔测量系统。采用 TDC-GP21 的高精度测量模式,配置 TDC-GP21 完成了时间间隔测量,通过校准测量对测量结果进行补偿修正,提高了系统的测量精度;设计了多级嵌套状态机实现高速 SPI 通信,减小了系统单次测量周期;分析了影响测量精度的因素,比较分析了 3 种时刻鉴别方法的漂移误差,设计了高通阻容时刻鉴别模块,减小了系统的非线性误差。实验分别进行了基于 FPGA 脉冲信号的时间间隔测量和激光测距试验,对比验证了系统的测量误差,分析了系统在测量区间的线性度。实验结果表明,系统可以实现高速稳定测量,线性度良好,重复测量频率达 1 kHz,测量精度在 ± 100 ps 内。

关 键 词:时间间隔测量;FPGA;TDC-GP21;高精度;时刻鉴别

中图分类号:TN247 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20153001.0083

High speed and high precision time-interval measurement system in pulsed laser ranging

DAI Qin*, MAO You-ming, WU Kai-xuan, WU Jie, LI Ye-qiu

(School of Science, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

Abstract: A high speed and high precision time-interval measurement system based on FPGA and TDC-GP21 was introduced in this paper. The high precision module of TDC-GP21 was used and by configuring TDC-GP21, the time-interval measurement and calibration are finished to improve the precision, and a multi-level FSM were designed to realize the SPI communication and reduce the measurement period. According to the analysis of the factors which affected the precision of measure and the drift error of three discriminators, a discriminator was designed to reduce the nonlinearity error of the system. The signal of FPGA and the signal of laser echo were also used to realize time-interval measurement and laser ranging. The experiment results showed that the good linearity and the measurement repetition rate of 1 kHz and the measuring precision of ± 100 ps can be achieved.

Key words: time-interval measurement; FPGA; TDC-GP21; high precision; time discriminator

收稿日期:2014-05-13; **修订日期:**2014-06-12.

基金项目:国家自然科学基金(No. 61378042);辽宁省高校杰出青年学者成长计划(No. LJQ2013022);辽宁省教育厅科技项目(No. L2012070);沈阳理工大学激光与光信息技术辽宁省重点实验室开放基金

* 通信联系人, E-mail: daiqin@126.com

1 引言

脉冲激光测距因其测量精度高、测量距离远、抗干扰能力强等特点被广泛的应用于国防、航天、测绘等领域^[1]。时间间隔的测量精度是提高脉冲激光测距精度的决定性因素之一^[2]，现有的时间间隔测量方法主要有数字计数法、模拟法、插值法^[3]。文献[3]提出了使用三角波参考信号实现时间间隔测量的方法，借鉴了插值法的思想，克服了模拟法测量范围受限的缺点。文献[4]通过调整延时芯片和机械位移产生的电信号的延时时间，确定光到达目标所需的时间，来提高激光测距精度。数字法可以实现对微小时间间隔的精确测量^[5]，但测量范围较小；数字插入法在脉冲激光测距中精度最高，如延迟线插入法具有测量范围大、测量精度高的优点^[6]，延迟线插入法既可以使用专用芯片实现也可使用 FPGA 内部的专用进位链产生延迟单元^[7]，影响延迟线插入法测量精度的因素有很多，包括延迟单元的内部结构^[8]、工作电压和温度，当 FPGA 内部延迟线跨越多个 LE 资源时，延迟单元的非线性更加明显，难以在低成本 FPGA 上实现线性较好的延迟单元。

与 FPGA 延迟线插入法相比，TDC-GP21 内部的延迟线的延迟时间严格统一，线性度较高，双精度模式的测量精度达 45 ps，并且通过校准测量可以补偿由于温度和工作电压对测量结果的影响，减小了系统的非线性误差，系统的积分非线性度 $< 0.1 \text{ LSB}$ ，差分非线性度 $< 0.8 \text{ LSB}$ 。

论文设计了基于 FPGA 和 TDC-GP21 的高速精密时间间隔测量系统，通过 FPGA 控制 TDC 完成了时间间隔测量和校准补偿；设计了时刻鉴别模块减小了回波信号的漂移误差；进行了时间间隔测量和激光测距实验，实验结果表明系统线性度较好，可以快速测量微小时间间隔，能够在短时间内得到大量精准的数据。

2 时间间隔测量原理

系统时间间隔测量原理如图 1 所示，待测时间间隔可以表示成 $T_c = T_s + nT_d - T_e$ 。

其中 nT_d 为参考时钟 CLK 的周期数， T_s 和 T_e 为触发信号与计数脉冲 CLK 的上升沿之间的

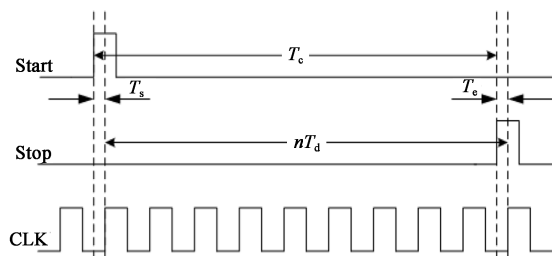


图 1 时间间隔测量原理图

Fig. 1 Diagram of time interval measurement

时间差。

系统通过配置 TDC-GP21 进行校准测量，对测量环境进行实时监测，补偿由于温度和电压变化引起的测量误差，减小了系统的非线性误差，校准测量原理图如图 2 所示。

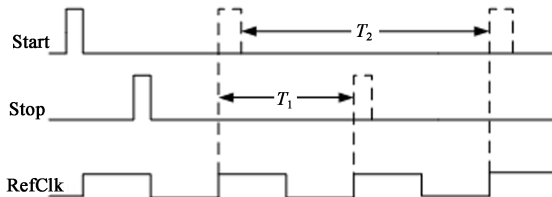


图 2 校准测量原理图

Fig. 2 System block diagram of calibration

首先通过内部延迟单元测量时间间隔，然后测量外部基准时钟周期 T_1 和 T_2 ；最后由 TDC-GP21 内部的 ALU 单元根据 T_1 和 T_2 对测量结果进行校准，校准结果 RES_X 和待测时间间隔 Time 表示为如下公式：

$$\text{RES_X} = \frac{(\text{Stop} - \text{Start})}{T_2 - T_1}, \quad (1)$$

$$\text{Time} = \text{RES_X} \times T_{\text{ref}} \times 2^{\text{CLKHSDIV}}, \quad (2)$$

其中：RES_X 是 32 位校准结果，是基准时钟的倍数，高 16 位为整数，低 16 位为小数，CLKSDIV 是外部基准时钟 T_{ref} 的分频数，系统通过配置 CLKSDIV 调整测量范围，通过 FPGA 构建高速乘法器完成后续数据处理。

3 高速测量系统设计

3.1 时间间隔测量系统

设计以 Cyclone II 系列 FPGA 作为核心控制单元，以 TDC-GP21 的测量流程为基础构建时间间隔测量系统，系统方框图如图 3 所示。

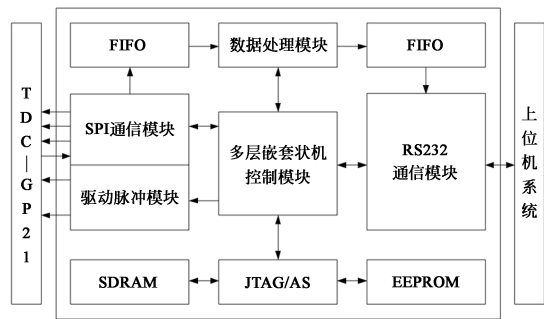


图 3 时间间隔测量系统方框图

Fig. 3 Diagram of time interval measurement system

首先由 FPGA 通过 SPI 通信模块对 TDC 进行配置及初始化,然后产生驱动脉冲触发激光二极管发射激光窄脉冲信号,并以此脉冲信号作为 TDC 的开始信号,当 TDC 收到回波信号后对测量值进行校准测量和 ALU 校准,最后将测量结果存到结果寄存器中并产生中断。

FPGA 接收到 TDC 的中断标志后,系统读取 TDC 的状态寄存器并判断 TDC 的状态,当 TDC 溢出时,终端显示 TDC 溢出信息,程序返回初始化阶段;当待测时间间隔满足系统测量范围时,FPGA 读取结果寄存器,然后返回初始化阶段,准备进入下一次测量,同时将测量结果送到数据处理模块进行计算并将结果传送给上位机,在终端上显示测量结果。

3.2 测量周期分析

系统测量周期包括以下几个部分:初始化 TDC;发射触发脉冲;等待回波信号;TDC 校准测量;ALU 校准;读取 TDC 状态寄存器;从结果寄存器读取 32 位数据。各阶段所用时间如图 4 所示。

由图 4 可知,系统完成一次精密测量的时间



图 4 测量周期结构图

Fig. 4 Structure of measurement period

包括 3 部分:FPGA 与 TDC-GP21 之间的 SPI 通信时间、TDC 校准时间和等待回波时间,其中 SPI 通信时间是可控的,虽然 TDC-GP21 支持 SPI 串口通信协议,但是收发数据的位宽不是固定的。针对 TDC 的每个操作码的位数和收发的数据位数不同的特点,避免不必要的通信时间,系统构建多层嵌套状态机控制模块,通过主状态机完成对测量流程的整体控制,调用从状态机实现高速 SPI 数据通信,系统中嵌套了多个从状态机,配合 TDC-GP21 的时序要求,分别完成收发 8、16 和 32 位的数据指令,实现了各个状态机的高速切换,减少了通信等待时间,在确保 TDC 测量精度和测量范围的前提下,提高了系统的测量频率。

3.3 时刻鉴别及误差分析

在脉冲激光测距中,由于大气湍流,跟瞄抖动,目标姿态变化等因素会引起回波信号幅度小范围的快速涨落^[9],为了消除回波幅值和波形畸变对触发时刻的影响,设计了时刻鉴别模块对回波信号进行处理,减小了漂移误差。

时刻鉴别的实现方法包括前沿时刻鉴别、恒比定时时刻鉴别和零点检测时刻鉴别等方法,前沿时刻鉴别法^[10]受回波信号幅值的影响,跳变点的漂移误差较大,不适用于精确测量。

恒比定时法将回波信号分成两路,分别进行衰减和延时处理,通过高速比较器捕捉信号跳变点,可以减小激光脉冲信号幅度变化而引起的时刻鉴别误差,同时为了屏蔽噪声并抑制波形畸变对测量结果的影响,通常加入偏置电压以保证比较器的正确触发。在未引入偏置电压前,跳变点只取决于衰减因数和延迟时间,与信号幅值无关;但是在引入偏置电压后,跳变点受到幅值、衰减因数和偏置电压的影响会产生漂移误差,经调试验证,当信号幅值在 0.5~5 V 之间波动时,跳变点的漂移误差约 10 ns。针对偏置电压对跳变点漂移误差的影响,可以采用偏置开关补偿技术^[9],根据输入信号幅度来决定偏置电压的大小,从而减小时刻鉴别的漂移误差。

高通阻容时刻鉴别法^[11]即零点检测法,采用高通阻容滤波电路对回波信号进行微分变换,将极值点转换为零点,此时跳变点不受信号幅值的影响,与恒定比值时刻鉴别相比,避免了外加偏置电压对信号跳变点的影响,经调试验证,当信号幅值在 0.5~5 V 之间波动时,跳变点的漂移误差小

于 30 ps,满足设计要求,但受噪声及信号畸变的影响,零点检测信号会产生多个零点,会错误的触发时间间隔测量单元,从而降低了系统测量结果的可靠性。

系统采用高通阻容时刻鉴别法捕捉信号跳变点,通过阈值比较电路产生选通脉冲开启门电路捕捉正确的触发脉冲,采用 MAX961 作为高速比较器件,有效地抑制了噪声和波形畸变对跳变点的影响,减小了时刻鉴别模块的漂移误差。图 5 所示为受到噪声和波形畸变影响的回波信号在高通阻容时刻鉴别单元中的波形变换。

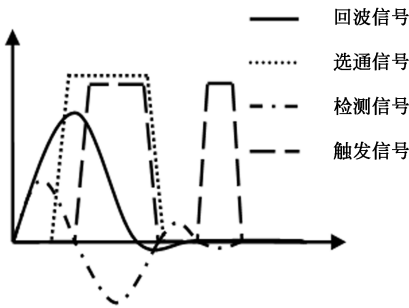


图 5 高通阻容时刻鉴别波形图

Fig. 5 Diagram of CR-high pass time discrimination

4 实验结果及误差分析

4.1 时间间隔测量结果及误差分析

实验采用 FPGA 内部的 PLL 锁相环产生 100 MHz 高速时钟信号,作为驱动脉冲的时间基准,配置 TDC-GP21 对 100 ns 时间间隔进行多次

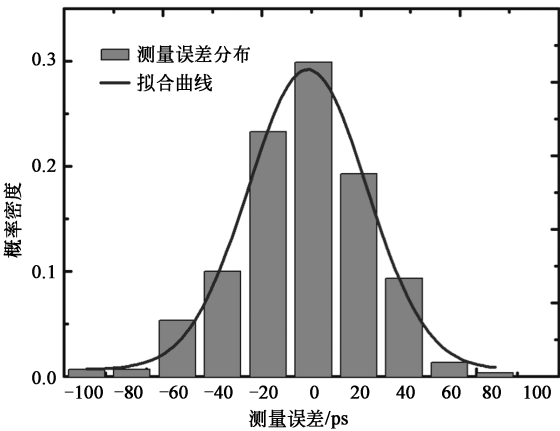


图 6 测量误差及拟合曲线

Fig. 6 Measured error and fitting curve

重复测量,验证系统测量精度,测量误差的概率密度分布和拟合曲线如图 6 所示。

由图 6 可知,系统测量误差大多分布在 ± 60 ps 之间,测量误差的拟合曲线近似高斯正态分布,标准差为 46 ps,系统测量精度可以控制在 ± 100 ps 内。

4.2 激光测距结果及误差分析

进行了脉冲激光测距实验,通过 FPGA 与 TDC-GP21 时间间隔测量系统测量时间间隔,并通过时刻鉴别模块减小系统的非线性误差,实验对 10 m 距离进行了重复测量,系统测量结果的分布图如图 7 所示。

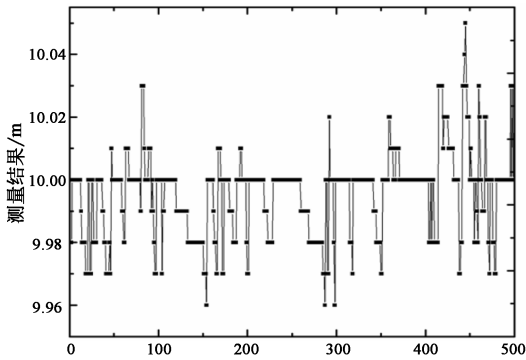


图 7 测量结果分布图

Fig. 7 Distribution map of measuring results

从图 7 可知,由于激光回波信号受测量环境等因素的影响会产生非线性失真,测距误差比时间间隔测量误差略大一些,测距结果分布在 9.95~10.05 之间,满足高精度测量要求。

5 结 论

设计了基于 FPGA 和 TDC-GP21 的高速高精度时间间隔测量系统,将 FPGA 的高频稳定性和 TDC-GP21 的高精度测量结合起来,通过校准测量补偿了由于温度和工作电压引起的测量误差;通过多级嵌套状态机实现了可以自由收发不同数据宽度的 SPI 通信接口,压缩了系统通信时间,提高了系统的测量重频;分析并设计了时刻鉴别单元,可以准确捕捉信号跳变点,减小了系统的非线性误差;实验结果表明,系统重复测量频率达 1 Hz,精度达 ± 100 ps,可以快速捕捉微小时间间隔,可在低成本 FPGA 器件上实现线性度良好的高精度高重频测量系统。

参 考 文 献:

- [1] 黄军芬,黄民双,孙亚玲,等. 基于伪非均匀采样的高精度时间间隔测量方法[J]. 光电子·激光,2012, 23(16): 1945-1948.
Huang J F, Huang M S, Sun Y L, *et al.* High precision time-interval measurement method based on pseudo-nanuniform sampling [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2012, 23(16):1945-1948. (in Chinese)
- [2] 宋建辉,袁峰,丁振良. 脉冲激光测距中高精度时间间隔的测量[J]. 光学精密工程,2009, 17 (5):1046-1050.
Song J H, Yuan F, Ding Z L. High precision time interval measurement in pulsed laser ranging [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17 (5):1046-1050. (in Chinese)
- [3] 施智勇,潘晓声,张谦. 利用延时法进行高精度脉冲激光测距[J]. 光学精密工程,2014,22(2):253-258.
Shi ZY, Pan X S, Zhang Q. High-precision pulsed laser measuring distance by time delay method [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(2): 253-258.
- [4] 陈瑞强 江月松. 脉冲激光测距的时间间隔测量方法[J]. 光学学报,2013,33(2):0212004-1-0212004-5.
Chen R Q, Jiang Y S. Method of measurement on time-interval in pulsed laser ranging [J]. *ACTA Optica Sinica* 2013, 33(2):0212004-1-0212004-5.
- [5] 吴刚,李春来,刘银年. 脉冲激光测距系统中高精度时间间隔测量模块的研究[J]. 红外与毫米波学报,2007, 26(3): 214-216.
Wu G, Li C L, Liu Y N. Study on high resolution time interval measurement module in pulsed laser ranging system [J]. *Journal of Infrared And Millimeter Waves*, 2007, 26(3): 214-216. (in Chinese)
- [6] 邢燕. 高精度时间间隔测量系统[J]. 电子测量技术,2010, 33(5):1-3.
Xing Y. High-precision time interval measurement system [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2010, 33(5): 1-3. (in Chinese)
- [7] 冯志辉,刘恩海,岳永坚. 基于FPGA延迟线插入法的半导体激光测距[J]. 光电工程,2010, 37(4): 53-59.
Feng Z H, Liu E H, Yue Y J. FPGA delay-line interpolation method for laser range finding [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(4): 53-59. (in Chinese)
- [8] 张丽丽,傅江涛,张志勇,等. FPGA在远程激光测距中的应用[J]. 激光与红外,2010, 40(3): 288-289.
Zhang L L, Fu J T, Zhang Z Y, *et al.* Application of FPGA in long distance laser ranging [J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(3): 288-289. (in Chinese)
- [9] 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.
Feng G X, Chang B C. Study of high precision laser ranging technology [J]. *Laser & Infrared*, 2007 37(11):1137-1140. (in Chinese)
- [10] 纪荣祎,赵长明,任学成. 脉冲激光测距时刻鉴别方法的研究[J]. 激光与红外,2010,31(11): 34-36.
Ji R Y, Zhao C M, Ren X C. Study of timing discriminator for pulsed laser rangefinder [J]. *Laser & Infrared*, 2010,31(11): 34-36. (in Chinese)
- [11] 朱福,林一楠. 一种提高脉冲激光测距精度的方法[J]. 光电技术应用,2011, 26(2):42-44.
Zhu F, Lin Y N. Method to improve accuracy of pulse laser ranging [J]. *Electro-Optic Technology Application* 2011,26(2):42-44. (in Chinese)

作者简介:岱钦(1977—),内蒙古人,博士,副教授,主要从事激光器件技术方面的研究。E-mail:daiqin2003@126.com