

文章编号 1004-924X(2014)02-0252-07

利用延时法进行高精度脉冲激光测距

施智勇¹, 潘晓声², 张 谦^{2*}

(1. 上海师范大学 数理学院, 上海 200234; 2. 上海师范大学 信息与机电工程学院, 上海 200234)

摘要: 由于激光测距的精度取决于时间测量精度, 本文提出了一种提高时间测量精度的方法。该方法在现场可编程门阵列(FPGA)的控制下, 将电信号通过延时电路送入到 D 触发器的输入端 CLK; 激光器发出的光到目标, 经过目标反射后返回进入光电转换器转变为电信号送入到 D 触发器的输入端 D。通过调整延时芯片和机械位移产生的电信号的延时时间, 使 D 触发器输入端的信号同时到达, 从而利用延时时间来确定光到达目标所需的时间。用 FPGA 对 100 MHz 恒温晶振器的脉冲计数, 经 MC100EP195 芯片延时, 再通过精密机械定位的方法将时间测量精度提高到 0.3 ps 数量级。实验结果表明: 使用该方法, 激光测距的误差在 1 km 内能保证在 0.1 mm 数量级, 可满足高精度测距的要求。

关键词: 激光测距; 延时法; 延时芯片; 时间测量

中图分类号: TN247 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142202.0252

High-precision pulsed laser measuring distance by time delay method

SHI Zhi-yong¹, PAN Xiao-sheng², ZHANG Qian^{2*}

(1. *Mathematics & Science College, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China;*

2. *College of Information, Mechanical and Electrical Engineering,
Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China)*

* *Corresponding author, E-mail: zhangqian@shnu.edu.cn*

Abstract: Since the accuracy of laser ranging depends on the accuracy of time measurement, this paper introduces a method to improve the accuracy of time measurement. Under the control of a Field Programming Gate Array(FPGA), the electric signal is transported into the CLK port of a D flip-flop through a delay circuit, the laser sends a laser beam to the target and the target reflects the laser beam back to the photoelectric converter. Then, the laser beam is changed to an electric signal and transported to the D port of D flip-flop. By adjusting the delay time of electric signal produced by a delay chip and mechanical displacement, the laser makes the signal of input ports of D flip-flop arrive at the target at the same time. Therefore, the delay time can be utilized to determine the time of laser arriving the target. Furthermore, the FPGA is used to count the pulse of a constant temperature crystal oscillator with 100 MHz, the MC100EP195 is used to delay and then the accuracy of time measurement is improved to 0.3 ps by the mechanical location method. The experimental results show that the

收稿日期: 2013-07-23; 修订日期: 2013-09-31.

基金项目: 国家社科基金资助项目(No. 12CYY031); 教育部基金资助项目(No. 12YJC740082)

measurement accuracy of the target in 1 km has reached to 0.1 mm, which means that the method can satisfy the requirements of high-precision ranging.

Key words: laser measuring distance; time delay method; delay chip; time measurement

1 引言

激光测距在军事应用、科学技术、生产建设方面都起着重要作用,其主要方法有脉冲法和相位法^[1]。目前,脉冲法的最大测量距离能达到 30 km 以上,其测距精度一般为 5 m,最高可达 0.15 m。相位法的测距精度一般为几毫米,将希尔伯特变换应用于谱分析鉴相,测距精度可达 0.4 mm^[2]。目前一些中型水电站的大坝位移观测、钢轨变形量及沉降测量、精密机件传送带的铺设等重要的科学试验和复杂的大型工程均要求测距精度为 0.1 mm,显然脉冲法和相位法不能满足这样的精度需求^[3]。

随着科学技术的发展,更多的高科技应用都涉及激光测距,如直升机防撞^[4]、三维成像^[5-6]、激光跟踪^[7]等,而随着卫星激光测距技术的产生,其应用研究已延伸到卫星激光测高仪^[8]及大气可见

度等领域^[9]。在这些测试中,虽然激光器的温度对激光光速的影响很小,但它会影响发射的激光波长和发光功率,所以用相位法测距无法保证激光测距的精度^[10]。

为了满足高精度激光测距的需求,本文提出用延时法进行激光测距,提出的方法在 100 m 内的时间测量精度可达 0.3 ps,在 1 km 的测量精度可达 0.1 mm。

2 原理

激光测距系统通过测量激光器发出激光与激光返回到光接收机的时间间隔来计算目标距离,测距公式为: $S=c \times t/2$ 。其中: S 为目标距离, c 为光速, t 为激光器发出激光与激光返回到光接收机的时间。测量误差为 $\Delta S=c \times \Delta t/2$,由此可知, ΔS 的大小取决于测量时间 Δt 。

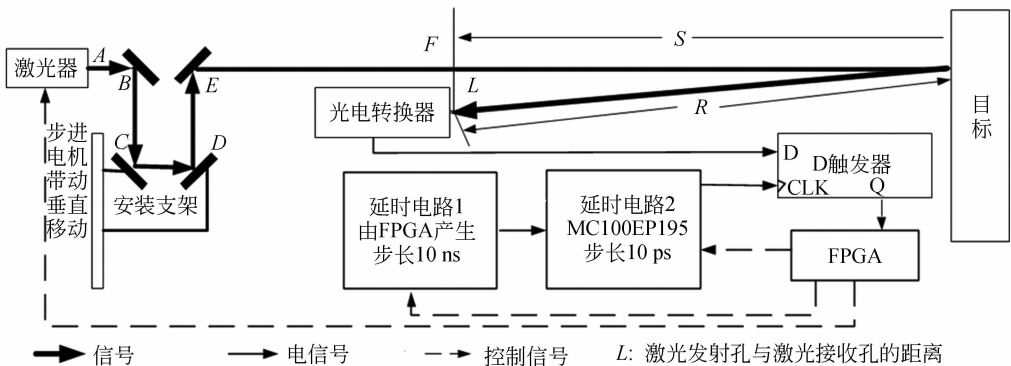


图1 激光测距原理

Fig. 1 Principle of laser measuring distance

图1为激光测距原理图,由现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)产生与时钟同步的电脉冲,触发激光器发射激光,同时此电脉冲通过延时电路送入到D触发器输入端CLK;激光经过目标反射后返回进入光电转换器转变为电信号送入到D触发器输入端D。改变延时时间使输入端CLK与D触发器输入端D的信号同时到达,则可认为激光从发射到返回的时间与延时时间相当。

第一次测量,FPGA控制激光器发射激光的同时,对时钟同步的100 MHz的脉冲信号开始计数,当激光从目标返回时触发计数器停止计数,则激光往返时间为 $t=m \times T$, T 为脉冲周期。所以通过记录光往返过程的脉冲个数 m 可以测量时间,其误差小于一个脉冲周期 T 。通过提高计数时钟频率可减小测量时间的误差;但过高的时钟频率会使电路噪声过大,从而影响计数器计数造成测时误差。本文用FPGA对100 MHz恒温晶

振频率信号进行计数。首先获得一个误差不超过 10 ns 的激光往返时间。由于采用标称值为 100 MHz、误差为 $\pm 0.001 \times 10^{-6}$ 、工作温度为 $-40 \text{ }^{\circ}\text{C} \sim +75 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的恒温晶振,所以在测量距离为 10 km 的目标时,由晶振的频率误差造成的目标距离误差为 $0.001 \times 10^{-6} \times 10\ 000 \times 10^3 = 0.01 \text{ mm}$ 。由此可知,晶振的频率误差造成的目标距离误差过小,可以忽略。

本文使用安森美半导体公司生产的 MC100EP195 可编程延迟芯片对 10 ns 以下的时间进行测量。该延迟芯片的延迟时间为 0 ps \sim 10.23 ns,延迟的时间间隔为 10 ps 的整数倍。这种方法理论上的时间测量精度可达 10 ps,距离测量精度可达 1.5 mm。由于 D 触发器的建立时间为 50 ps,因此 MC100EP195 可编程延迟芯片采用 50 ps 的整数倍;而 100 ps 以下的延时(光行 3 cm 距离)则用步进电机带动光电转换器沿水平方向移动来实现。

第二次测量时,可将延迟电路 1 的延迟时间设为 FPGA 第一次测量得到的时间 t_1 ,然后将延时 t_1 后的电信号再经延迟电路 2 (即 MC100EP195)进行延时(t_2)并送入 D 触发器的输入端 CLK。通过改变 MC100EP195 延时芯片的延时时间 t_2 (最小间隔单位为 50 ps),使延时后的信号与激光从目标返回的信号“同时到达”(误差在设计的范围内)D 触发器输入端,因此从激光发射到激光接收的时间间隔 $t = m_1 \times T + t_2$,测量距离 $S = c \times t / 2$ 。

如图 1 所示,因为送入 D 触发器输入端 CLK 与输入端 D 的信号同时到达,所以有:

$$t_{\text{send}} + \frac{S_{AB} + S_{BC} + S_{\text{step}} + S_{CD} + S_{\text{step}} + S_{DE} + S_{EF}}{c} +$$

$$\frac{S+R}{c} + t_3 = t_4 + t, \quad (1)$$

$$\text{即: } S+R = c \times (t_4 + t - t_3 - t_{\text{send}}) - 2 \times S_{\text{step}} - S_{AB} - S_{BC} - S_{CD} - S_{DE} - S_{EF},$$

式中: t_{send} 为 FPGA 控制激光器发激光所用的时间, t_3 为光电转换器的转换时间, t_4 为两边电路产生的时间差, S_{step} 为步进电机移动的距离, t 为延时电路的延时时间。

令 $k = c \times (t_4 - t_3 - t_{\text{send}}) - S_{AB} - S_{BC} - S_{CD} - S_{DE} - S_{EF}$ 是一个与设备有关的常数,式(1)可写成:

$$S+R = c \times t - 2 \times S_{\text{step}} + k. \quad (2)$$

由图 1 可知, $R = \sqrt{S^2 + L^2}$,其中: L 为激光发射孔与激光接收孔的距离。将 R 代入式(1)得:

$$S + \sqrt{S^2 + L^2} = c \times t - 2 \times S_{\text{step}} + k. \quad (3)$$

整理式(3)得:

$$S = \frac{c \times t - 2 \times S_{\text{step}} + k}{2} - \frac{L^2}{2 \times (c \times t - 2 \times S_{\text{step}} + k)}. \quad (4)$$

由式(4)可知,只需要精确地测出延迟电路产生的延迟时间 t 与步进电机移动的距离 S_{step} ,就能计算出目标距离。

由式(3)得:

$$k = 2 \times S_{\text{step}} - c \times t - S + \sqrt{S^2 + L^2}. \quad (5)$$

因此根据式(5),通过测量距离 S 已知的目标就能测出仪器常数 k 的值。测量过程为:首先将目标放在由 PC 机控制的行程为 5 000 mm 带光栅尺的系列 HEL5000aPR 电控平移台上,平移台的重复定位精度为 $\pm 1 \text{ } \mu\text{m}$,绝对位置精度为 $\pm 3 \text{ } \mu\text{m}$ 。将目标分别放在 1, 2, 3, 4, 5 m 处测量仪器常数 k 。目标放在 1 m 与 2 m 处,不需要脉冲计数,即不需要延时电路 1 结束后触发延时电路 2 的转换时间,取平均值作为仪器常数 k_1 。目标放在 3, 4, 5 m 处,需要一个脉冲计数,即需要延时电路 1 结束后触发延时电路 2 的转换时间,取平均值作为仪器常数 k_2 。测量时,根据 FPGA 是否发脉冲计数来确定使用仪器常数 k_1 或 k_2 ,将其值代入式(4)可以得到未知目标的距离 S 。

由于采用峰值作为测量标准,激光发射与脉冲计数都是由 FPGA 执行的,所以 FPGA 计时开始到激光器发出激光的时间差是固定的,可以作为一个系统误差并予以纠正。同步脉冲由 FPGA 的电路产生,在较短的时间内,同步脉冲上升沿宽度的波动不大。找到光电转换器转换的电信号的峰值,在峰值处发脉冲信号。实验发现,这样产生的误差基本相同。所以在校准设备常数 k 时,将由同步脉冲上升沿宽度造成的误差、光电转换器发出的脉冲信号、系统误差都作为常数 k 的一部分,并用多次测量计算求平均值的方法来减少误差。

3 硬件与软件系统设计

硬件系统的整体设计思路如下:步长为 10 ns 的延时时间用 FPGA 对 100 MHz 时钟同步脉冲

进行测量;步长为 50 ps 的延时时间用安森美半导体公司生产的可编程延迟芯片 MC100EP195 进行测量;100 ps 以下的延时时间则用步进电机

带动光电转换器在垂直方向移动(移动距离最大为 15 mm,最小为 0.01 mm)来实现测量。硬件系统框图如图 2 所示。

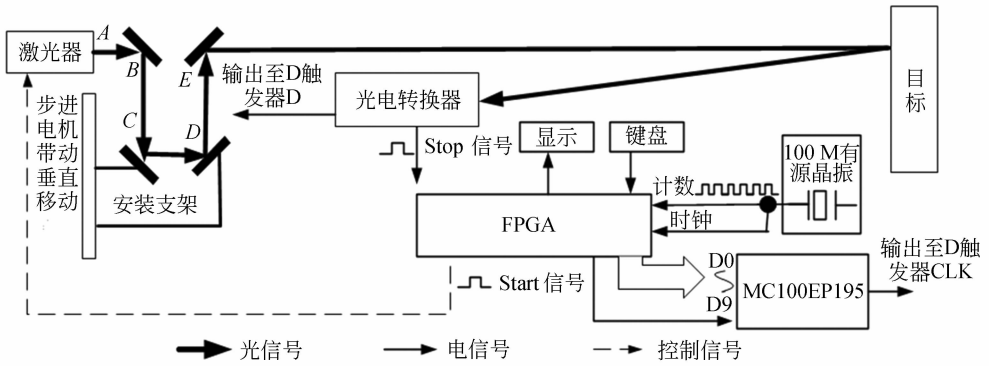


图 2 硬件系统框图

Fig. 2 Block diagram of hardware system

采用脉冲法进行第一次测量。首先,由 FPGA 发一与时钟同步的启动脉冲 Start,开启激光器,同时用 FPGA 对 100 MHz 与时钟同步的脉冲进行计数。经过一定时间后,当 FPGA 接收到回波产生的 Stop 脉冲后立即停止计数,这样就可确定激光从发射到接收的大约时长。但脉冲法会造成一个脉冲时间(10 ns)的误差,10 ns 的光行传输距离约为 3 m,所以造成的距离测量误差约为 3 m。因此,要提高距离测量精度,需要更精确地测量时间。本文采用 FPGA + MC100EP195 芯片延时的方法来提高时间测量精度。FPGA 产生约 $number \times 10$ ns 的延时,利用延时芯片可实现 0~10 000 ps 的延时。但是 MC100EP195 延时芯片也有由硬件造成的误差,根据厂家发布的参数,误差呈线性,如在 10 ps 的延时处误差为 0.1 ps,则在 100 ps 的延时处误差为 1 ps,在 1 000 ps 的延时处误差为 10 ps。因此,延时芯片的误差可通过软件来减小。

的行程为 5 m 的电动平移台上,此平移台的绝对位置精度为 $\pm 3 \mu\text{m}$ 。通过此设备测量得到 $(P_2 - P_1)$ 的最大误差为 $6 \mu\text{m}$,所以由延时芯片产生的最大时间误差为 0.002 ps。由此可知,该误差对目标距离测量所造成的影响可以忽略。

本设计中 D 触发器采用安森美半导体公司生产的 MC100EP52 芯片,其建立时间为 50 ps,保持时间为 0 ps。建立时间是指在触发器的时钟信号上升沿到来以前,数据稳定不变的时间;保持时间是指在触发器的时钟信号上升沿到来以后,数据稳定不变的时间。如果能保证经光电转换器后的电脉冲有足够的宽度(一般为几个 ns),就可以不必考虑保持时间。

由于延时芯片可实现 0~10 230 ps 的延时,即可相应地实现 0~3 069 mm 的距离测量,所以可首先测量在延时 10 ps(实际延时为 t_5)时的目标位置 P_1 ,然后测量在延时 10 230 ps(实际延时为 $1 023 \times t_5$)时的目标位置 P_2 。则有:

FPGA 可产生 $number \times 10$ (ns)的延时,利用延时芯片可实现 0~10 000 ps 的延时。初始状态时,设延时电路 2 的延时时间为 0 ps,再发激光,CLK 端的输入脉冲比输入端 D 早到,由于 D=0,所以输出 Q=0。信号如图 3 所示。

$$(P_2 - P_1) = \frac{c \times (1 023 \times t_5 - t_5)}{2},$$

$$t_5 = \frac{(P_2 - P_1)}{511 \times c}. \quad (6)$$

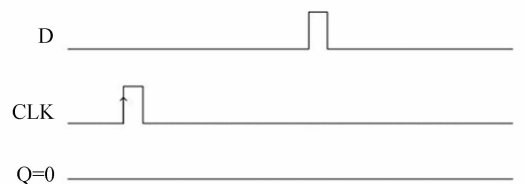


图 3 初始时的脉冲

Fig. 3 Initial pulses

为了保证测量精度,目标放在由 PC 机控制

然后, FPGA 产生 $\text{number} \times 10(\text{ns})$ 的延时, 利用延时芯片按 50 ps 步长增加延时, 每次设置延时而再发激光, 直到 $Q=1$ 。由于 MC100EP52 芯片的建立时间为 50 ps , 因此激光从目标返回的信号与延时后的信号的时间差有可能在建立时间范围内, 此范围内输出的数据是不稳定的, 有可能为 0, 也有可能为 1, 信号如图 4 所示; 也有可能超出建立时间范围, 此范围内输出的数据是稳定的, 只能为 1, 信号如图 5 所示, 所以此时的最大时间误差 $< 100 \text{ ps}$ 。

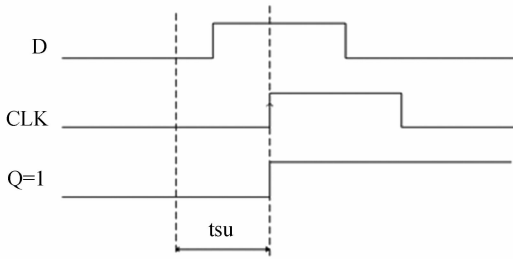


图 4 在建立时间范围内的脉冲

Fig. 4 Pulses within scope of setup time

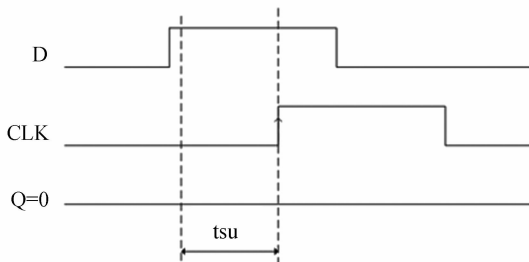


图 5 在建立时间范围外的脉冲

Fig. 5 Pulses outside scope of setup

对于 100 ps (相当于光行传输距离约为 30 mm) 以下的延时时间则用步进电机带动光电转换器在垂直方向移动来实现, FPGA 产生 $\text{number} \times 10(\text{ns})$ 的延时, 延时芯片产生 $\text{times}(\text{ps})$ 的延时, 步进电机带动光路安装支架 (如图 1 所示) 的移动距离采用二分算法计算, 步骤为:

(1) 将步进电机带动光路安装支架的可移动距离设为 $0 \sim 15.00 \text{ mm}$ 。

(2) 判断步进电机带动光路的安装支架可移动距离是否大于 0.02 mm 。如果大于 0.02 mm , 执行步骤 (3); 如果小于 0.02 mm , 说明延时后的信号与激光从目标返回的信号同时到达 D 触发器输入端, 信号如图 6 所示。确定光行时间 ($\text{number} \times 10(\text{ns}) + \text{times}(\text{ps})$) 行进的距离再减

光路安装支架的位置, 即得到激光往返目标的距离。

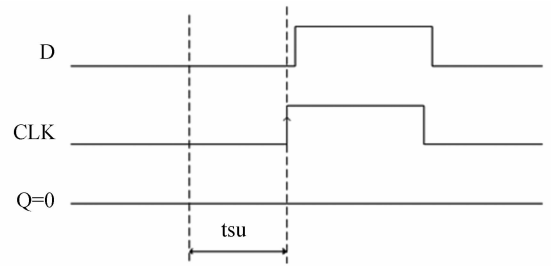


图 6 同时到达的脉冲信号

Fig. 6 Pulse signals reach D port at the same time

(3) 步进电机带动光路的安装支架在可移动距离范围的中心处时, 发激光, 检测 Q 的电平。为了保证激光从目标返回的脉冲信号不在建立时间内, 在每个点上重复检测 Q 的电平 40 次 (每检测完一次, 就再发激光检测)。

(4) 只要有 1 次 $Q=1$, 说明激光从目标返回的信号与延时后的信号的时间差在建立的时间范围内, 调整步进电机使光路的安装支架从中心处到可移动距离范围的最后位置, 再执行步骤 (2)。

(5) 如果 40 次检测结果都是 Q 电平为 0, 说明激光从目标返回的信号与延时后的信号的时间差不在建立的时间范围内, 调整步进电机带动光路的安装支架可移动距离的范围从可移动距离范围的开始位置到原来的中心处, 返回步骤 (2)。

这样对目标测量的次数最多需要 460 次。经实验, 距离 100 m 的目标, 测量时间约为 427 ms 。用本方法对距离为 10 km 的目标进行测量, 测量的最大误差包括: 由晶振的频率误差造成的目标距离误差 (0.01 mm)、由延时芯片产生的误差 (0.006 mm)、步进电机带动光电转换器移动的最小距离 (0.01 mm), 即为 0.026 mm 。

4 大气折射率误差

大气折射率 n 变化将使光波在大气中的传播速度发生变化, 从而影响测量距离 D , 产生测距误差 ΔD 。折射率误差 Δn 与测距误差 ΔD 的关系为^[11]: $\Delta D/D = \Delta n/n$, 这说明折射率的精度与测距精度相同, 且折射率误差对测距结果的影响是随距离变化的。大气折射率主要受测量环境的温度、湿度和气压等因素的影响, 因此需要实时地测

量环境参数以进行气象修正。在短程测距的气象修正中,折射率误差引起的测距偏差(气象改正值)可近似为^[11]:

$$\Delta D = \pm(1.0 \times \Delta t + 0.4 \times \Delta p) \times D \times l_0 - 6, \quad (7)$$

式中: Δt 为测量温度与标准气象条件下的温度差; Δp 为测量气压与标准气象条件下的气压差。标准气象条件下 $p = 1.01 \times 10^5$ Pa, $t = 15$ °C。

本设计采用新普惠科技有限公司的 PH-SZQYH 高精度型大气压力传感器,准确度为 ± 0.2 Pa,工作温度为 $-50 \sim 80$ °C,所以气压误差为 ± 0.2 Pa,1 km 目标的测量误差约为 0.008 mm。采用锦州精微仪表有限公司的 GT11 高精度双输入 RTD 温度计,量程为 $-200 \sim 600$ °C,准确度 ≤ 0.003 °C,则 1 km 目标的测量误差约为 0.003 mm。通过软件编程调整设备系数得到 1 km 目标的最大测量误差约为 0.011 mm。

5 实验

实验在室外空旷场地、晴天、基本无风的条件下进行。首先测量 0, 10, 20, 30, 50, 70, 95 m 的目标(因为用卷尺测量,其最小刻度为 1 cm,所以误差在几厘米并可作为系统误差校正),用平面镜代替目标。由于没有 100 m 的高精度电动平移台,所以为了保证测量精度,目标放在由 PC 机控制的行程为 5 000 mm、精度为 $3 \mu\text{m}$ 的电动平移台上,将 FPGA 设备分别放在约为 10, 20, 30, 50, 70, 95 m 的位置上(因为放置目标可能有 cm 数量级的误差,可假设校零)。这样保证每段目标距离从 5.000 00 m 开始,每次减少 0.200 00 m,最大机械误差为 $3 \mu\text{m}$ 。测量 10 次,排除 2 个最大的及 2 个最小的测量结果后,剩余的测量结果取平均值以改善系统误差,保证测量精度。

5.1 空气中测量的距离

实验时激光发射孔与激光接收孔的距离 $L = 2.000 00$ cm,为了校准式(10)中的仪器常数 k ,在测量前首先在 0 m 处对处在 1, 2, 3, 4, 5 m 的目标进行测量,分别计算相应的常数 k ,并取 1, 2 m 处的平均值及 3, 4, 5 m 处的平均值。

然后测量距离不同的目标,在每段最大目标距离为 5 m 的情况下,分别对 10, 20, 30, 50, 70, 95 m 的距离测量结果进行修正,使在这些位置的

测量结果均为 0.000 mm。测量结果如图 7 所示。

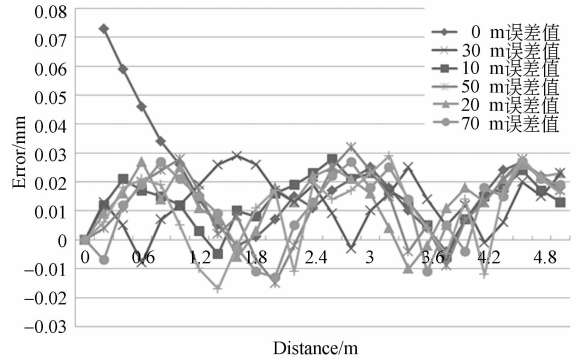


图7 不同距离目标测量的绝对误差

Fig. 7 Absolute errors of targets measured in different distances

5.2 实验结果分析与讨论

实验测得误差的平均值小于 0.03 mm,最大误差为 0.073 mm,距离 100 m 目标的测量误差在 0.03 mm 数量级上。从式(4)和式(5)可知,这些误差在计算 c 和 k 时产生。

由于受电动平移台的量程等因素的影响,在 5 m 的距离内,修正后大气折射率误差对测距的影响可忽略不计。但激光的脉冲宽度、被测物体表面的平整度、晶振频率的标定误差等因素与测量结果有关。这些误差如同前面分析的一样,误差为 0.1 ps 数量级。距离越远,空气对光的扰动越大,造成的测距误差也越大。由分析可知,在室内测量 5 m 内的目标,最大误差为步进电机带动光电转换器移动的最小间隔 0.01 mm。由式(6)可知,只需确保两个不同延时的目标位置 P_2, P_1 的值正确,通过软件的方法可以修正延时芯片产生的误差,并能确保该误差为 0。由电路等原因而造成的误差都作为常数 k 来纠正。

由于激光的能量集中在光斑中心处,所以峰值信号不受激光光斑大小的影响。如果不取峰值信号,经过计算可知,在激光发射孔与激光接收孔的距离 $L = 2$ cm,目标距离大于 10 m 时,才能忽略激光的光斑大小对测距的影响。但目标距离太近(小于 1 m)时,光斑大小对测距精度还是有影响的^[12]。要保证测量精度,可采用分段测量法。

由于电动平移台的行程为 5 m,每次测量时移动电动平移台后又重新较零,所以在 5 m 内大气折射率误差很小,基本可以忽略。

6 结 论

本文采用脉冲法进行激光测距。测距时,10 ns 及整数倍的延时时间用 100 MHz 时钟 FPGA 来进行;50 ps 至 9.95 ns 的延时时间用可编程延迟芯片 MC100EP195 来实现;而 100 ps 以下的延

时用步进电机带动光电转换器的水平移动来完成。实验结果显示,在 100 m 内激光测距的误差为 0.03 mm。理论分析表明,只要调整好仪器系数,在 1 km 内激光测距的误差能保证在 0.1 mm。由此可知,本文提出的方法能够满足高精度测距的要求,适用于高速铁路、桥梁、隧道和矿用检测设备等工程领域的精密测量。

参考文献:

- [1] 阎吉祥. 激光原理与技术[M]. 北京:高等教育出版社,2011.
YAN J X. *Laser Principles and Techniques* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2011. (in Chinese)
- [2] 王选钢, 缙宁祎, 张珂殊. 相位式激光测距谱分析鉴相的无偏改进[J]. 光学精密工程, 2012, 20(4): 888-895.
WANG X G, GOU N Y, ZHANG K SH. Unbiased improvement of spectrum analysis phase discrimination for phase-shift laser range finder[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(4): 888-895. (in Chinese)
- [3] 赵吉先. 精密工程测量[M]. 北京:科学出版社, 2010.
ZHAO J X. *Precise Engineering Surveying* [M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese)
- [4] 张清源, 李丽, 李全照, 等. 直升机防撞激光雷达综合信息处理系统[J]. 中国光学, 2013, 6(1): 80-86.
ZHANG Q Y, LI L, LI Q ZH, et al.. Comprehensive information processing system of helicopter anticollision laser radar[J]. *Chinise Optics*, 2013, 6(1): 80-86. (in Chinese)
- [5] 孟庆季, 张续严, 周凌, 等. 机载激光 3D 探测成像系统的关键技术[J]. 中国光学, 2011, 4(4): 327-339.
MENG Q J, ZHANG X Y, ZHOU L, et al.. Key technologies of airborne laser 3D detection imaging system [J]. *Chinise Optics*, 2011, 4(4): 327-339. (in Chinese)
- [6] 王飞. 实时激光三维成像焦平面阵列研究进展[J]. 中国光学, 2013, 6(3): 297-304.
WANG F. Research progress in focal plane array for real-time laser three dimensional imaging[J]. *Chinise Optics*, 2013, 6(6): 297-304. (in Chinese)

作者简介:



施智勇(1964—),男,上海人,工程师,1986年于上海师范大学获得学士学位,主要从事单片机、FPGA、嵌入式系统、光电测量技术的应用研究。E-mail: shizy@shnu.edu.cn

- [7] 屈恒阔, 张清源, 阮友田. 扫描成像跟踪激光雷达[J]. 中国光学, 2012, 5(3): 242-247.
QU H K, ZHANG Q Y, RUAN Y T. Laser radar based on scanning image tracking[J]. *Chinise Optics*, 2012, 5(3): 242-247. (in Chinese)
- [8] 马跃, 李松, 周辉, 等. 系统参数对激光测高仪海洋测距和回波脉宽影响[J]. 光学精密工程, 2013, 21(3): 813-820.
MA Y, LI S, ZHOU H, et al.. Effect of system parameters on ranging and pulse width in ocean satellite laser altimeter system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3): 813-820. (in Chinese)
- [9] 陈浩, 宣丽, 胡立法, 等. 大气相干长度的稳定测量[J]. 光学精密工程, 2013, 21(4): 911-918.
CHEN H, XUAN L, HU L F, et al.. Steady measurement of atmospheric turbulence coherence length [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(4): 911-918. (in Chinese)
- [10] 陈苗, 陈福深, 肖勇. 温度对半导体激光器特性的影响[J]. 中国科技信息, 2011, 3: 46-47.
CHEN M, CHEN F SH, XIAO Y. The effect of temperature on semiconductor laser [J]. *China Science and Technology Information*, 2011, 3: 46-47. (in Chinese)
- [11] 高林奎, 宋玮. 激光测距[M]. 北京:人民铁道出版社, 1977.
GAO L K, SONG W. *Laser Measuring Distance* [M]. Beijing: People's Railway Press, 1977. (in Chinese)
- [12] 黄继鹏, 王延杰, 孙宏梅, 等. 激光光斑位置精确测量系统[J]. 光学精密工程, 2013, 21(4): 842-848.
HUANG J P, WANG Y J, SUN H M, et al.. Precise position measuring system for laser spots [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(4): 842-848. (in Chinese)

通讯作者:



张 谦(1964—),男,浙江嘉兴人,学士,讲师,1986年于上海师范大学获得学士学位,主要从事单片机、FPGA、嵌入式系统的应用研究。E-mail: zhangqian@shnu.edu.cn