

## 脉冲飞行时间激光测距系统中周期误差补偿

黄民双<sup>1</sup>, 刘晓晨<sup>1,2</sup>, 马 鹏<sup>1,2</sup>

- (1. 北京石油化工学院 光机电装备技术北京市重点实验室, 北京 102617;  
2. 北京化工大学 机电学院, 北京 100029)

**摘要:**在以正弦波为测量基准信号的激光脉冲飞行时间测距系统中, 由于高频信号之间的串扰或器件非线性等因素的影响, 将产生脉冲飞行时间周期误差, 导致测距精度降低。为此提出了一种利用测距仪在一定距离条件下的测量数据计算定时误差的方法, 通过最小二乘法拟合构造出一条含误差补偿功能曲线, 并将该曲线进行离散化处理, 将离散化数据存入单片机内, 在距离测量时以含误差补偿功能曲线作为测量基准, 实现对脉冲飞行时间周期误差的补偿。该方法具有原理简单、数据可靠、操作方便等优点。所研制的激光脉冲测距仪经过误差补偿后, 测距误差小于 $\pm 3$  mm。

**关键词:** 脉冲飞行时间; 激光测距; 周期误差; 误差补偿

**中图分类号:** TH741 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0317004

## Periodic error compensation of pulsed time-of-flight laser ranging system

Huang Minshuang<sup>1</sup>, Liu Xiaochen<sup>1,2</sup>, Ma Peng<sup>1,2</sup>

- (1. Opto-Mechatronic Equipment Technology Beijing Area Major Laboratory, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China;  
2. Mechanical and Electrical Engineering College, Beijing University of Chemical Industry, Beijing 100029, China)

**Abstract:** In the high precision pulse laser ranging system based on sine wave, due to the factor of high frequency signal crosstalk, or electronic and optical devices with nonlinear and other factors, which would cause pulse time-of-flight periodic error, the range accuracy is reduced. The method of calculating the timing error by using the measuring data of the range finder in a certain distance was presented. An error compensation function curve was constructed by least square fitting, this curve was discretized in a sinusoidal reference period, the discrete data was stored into the single chip. In the distance measurement, the error compensation function curve was used as the reference, the compensation of pulsed time-of-flight periodic error was realized. The method had the advantages of simple principle, reliable data, convenient operation and so on. After the error compensation of the laser pulse measurement, the distance error is within  $\pm 3$  mm.

**Key words:** pulse time-of-flight; laser ranging; periodic error; error compensation

收稿日期: 2017-10-05; 修订日期: 2017-11-03

基金项目: 北京市科技计划课题重点项目(171100000817008)

作者简介: 黄民双(1964-), 男, 教授, 博士, 主要从事光纤传感与智能结构、大地测量仪器等方面的研究。

Email: huangminshuang@bipt.edu.cn

## 0 引言

脉冲飞行时间测距是利用激光脉冲持续时间极短、能量在时间上相对集中、瞬时功率很大的特点,在平均发射激光功率小于 1 mW(1 级安全激光)条件下,能够实现较长距离测量,在移动物体速度控制<sup>[1]</sup>、三维形貌测量<sup>[2]</sup>、三维物体扫描<sup>[3]</sup>、机器人技术<sup>[4]</sup>、大地测量仪器<sup>[5]</sup>等领域有非常广泛的应用前景。

脉冲激光测距中的一个最关键问题是如何提高测距精度,而周期误差是影响测距精度的一个主要因素。目前关于测距仪周期误差的研究主要是针对相位法测距系统,已有大量参考文献[6-7]应用经典理论分析了周期误差的成因,并提出了消除或补偿<sup>[8]</sup>这一误差的方法。但是,传统相位法测距中几乎都是研究随距离变化的周期误差,这种方法存在很大的局限性<sup>[7]</sup>。因为在实际的测距系统中,为了消除温漂的影响,通过测量外光路与内光路的脉冲飞行时间之差来计算出距离。脉冲飞行时间包括在电路和光路中的传输时间两部分,由于温漂的影响使得脉冲在电路中的传输时间变化较大(实际测得的最大变化距离达到 3 m),如果内光路的距离正好在误差变化较大的地方,经过差值运算后随距离变化的周期误差的幅值和初始相位都具有很大的不确定性,最终造成无法对周期误差进行准确测量和补偿。

在基于正弦波的脉冲激光测距系统中<sup>[9]</sup>,时间间隔测量方法与相位法类似,因此同样存在周期误差,但是引起周期误差产生的因素复杂,要想通过对误差产生因素进行一一分析并对其进行补偿是比较困难的,因此文中针对基于正弦波的脉冲激光测距系统,提出一种新的周期误差补偿方法。

## 1 测距原理及定时误差

脉冲飞行时间激光测距系统方案如图 1 所示,

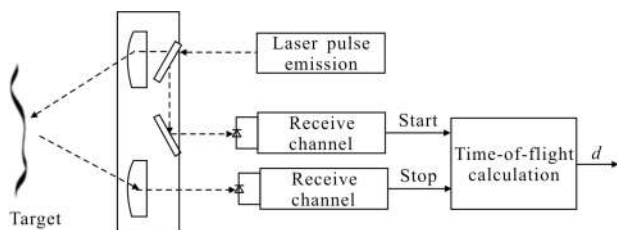


图 1 脉冲飞行时间激光测距系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of pulse time-of-flight laser ranging system

其基本原理是通过测量激光发射脉冲经被测目标后返回到光电探测器的飞行时间来计算距离,设激光脉冲发射时刻为  $t_{start}$ , 返回到光电探测器的时刻为  $t_{stop}$ , 光速为  $C$ , 则可以计算出目标距离  $d$ :

$$d = \frac{C \cdot \Delta t}{2} = \frac{C \cdot (t_{stop} - t_{start})}{2} \quad (1)$$

脉冲飞行时间(时间间隔)的测量以正弦波为基准<sup>[9]</sup>,采用粗计数和细分测量相结合的测量方法。如图 2 所示,以频率为  $f_0$  的正弦波作为量化基准,通过测量出脉冲从发射时刻  $t_{start}$  到接收时刻  $t_{stop}$  经过的正弦波整周期数  $n$  和细分相位值  $\varphi_1, \varphi_2$ , 可计算出脉冲飞行时间间隔:

$$\Delta t = \frac{n}{f_0} + \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2\pi f_0} \quad (2)$$

公式(2)等号右边的第一项为粗计数值,第二项表示细分时间值。

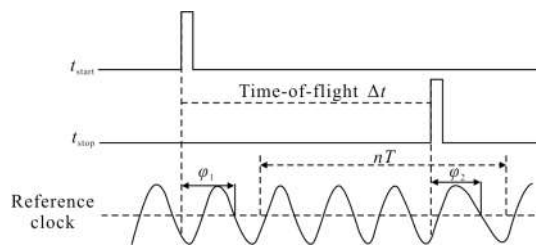


图 2 脉冲飞行时间间隔测量原理图

Fig.2 Schematic diagram of pulse time-of-flight interval measurement

在该系统中,采用温补晶体振荡器(Temperature Compensate X-tal(crystal) Oscillator, TCXO)产生正弦基准信号,其频率取 15 MHz。在脉冲发射时刻  $t_{start}$  和返回时刻  $t_{stop}$  的时间间隔内,由 TCXO 产生的正弦波的上升沿过零时刻触发计数器计数,得到粗计数值  $n$ 。

细分相位值  $\varphi_1, \varphi_2$  的测量原理如图 3 所示。由压控晶体振荡器(Voltage Controlled X-tal(crystal) Oscillator, VCXO)分频后控制激光脉冲发射,在脉冲发射时刻  $t_{start}$  和返回时刻  $t_{stop}$  分别触发高速 A/D 对正弦基准信号进行采样,由此计算出  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$ 。这里采用 VCXO 的目的是为了消除由于正弦波的非线性产生的误差,其基本原理是通过线性扫描 VCXO 的控制电压使输出频率变化,这样每次触发激光脉冲发射的时刻是随机的,这就意味着激光脉冲发射时刻(或返回时刻)对应于 TCXO 正弦信号的相位是随

机的。取 VCXO 频率与 TCXO 接近,使得在一个细分测量周期(正弦基准信号 TCXO 周期)内,对应于 TCXO 正弦信号相位的各个时刻发射激光脉冲的概率基本相同,利用多点数字平均技术,就可以消除正弦波非线性的影响<sup>[9]</sup>。由于 VCXO 的一个周期对应的距离只有 10 m,因此利用 FPGA 等高速数字电路对 VCXO 进行分频,其分频数由最大测程确定。

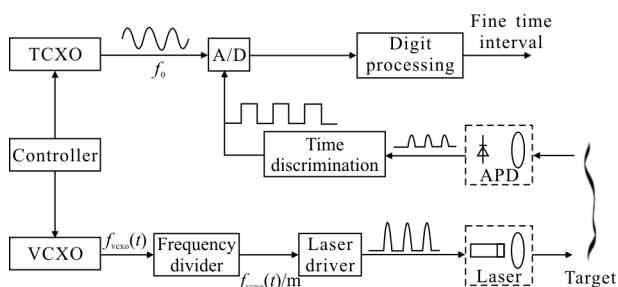


图 3 细时间测量单元框图

Fig.3 Diagram of fine time measurement

脉冲测距仪属于便携式仪器,由于受到测距仪结构空间和成本的限制,并且有 VCXO 和 TCXO 两个频率相近的高频信号,高频信号之间容易相互串扰产生周期误差。这些高频信号经过非线性器件后会产生二次谐波和高次谐波,同样会经过相互串扰产生周期误差,干扰的途径可以通过电路也可以通过光路。

由公式(2)可以得到激光脉冲飞行时间误差:

$$\delta t = -\frac{2\pi n + \varphi}{2\pi f_0} \cdot \delta f_0 + \frac{1}{2\pi f_0} \cdot \delta \varphi \quad (3)$$

式中:  $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ ,  $\delta \varphi = \delta \varphi_1 - \delta \varphi_2$ 。

公式(3)中右边第一项为基准频率误差  $\delta f_0$  对飞行时间误差  $\delta t$  的贡献,由于采用高精度的 TCXO 来产生基准频率,如果要求测距精度达到  $\pm 3$  mm,选取频率稳定度小于 1 ppm(1 ppm =  $10^{-6}$ )的 TCXO,则  $\delta f_0$  的影响可以忽略;右边第二项为正弦波的相位测量误差  $\delta \varphi$  对飞行时间误差  $\delta t$  的贡献,可见,激光脉冲飞行时间误差  $\delta t$  仅由相位误差  $\delta \varphi$  确定。由于  $\delta \varphi = \delta \varphi_1 - \delta \varphi_2$ ,  $\varphi = 2\pi f_0 t$ ,因此,相位误差  $\delta \varphi_1$ 、 $\delta \varphi_2$  可以由脉冲飞行时间误差  $\delta t_1$ 、 $\delta t_2$  表征。

## 2 周期定时误差的测量方法

这里提出一种利用激光测距仪在一定距离条件

下的测量数据来计算周期定时误差  $\delta t_i$  的方法,其原理是利用误差的周期特性。设脉冲发射时刻为  $t_i$ ,测量值为  $t_{im}$ ,定时误差为  $\delta t_i$ ;脉冲返回时刻为  $t_j$ ,测量值为  $t_{jm}$ ,定时误差为  $\delta t_j$ 。如图 4 所示,测量过程分为

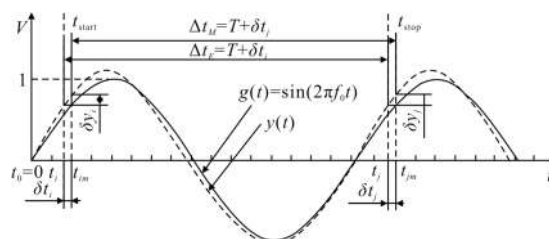


图 4 定时误差  $\delta t_j$  的测量原理图

Fig.4 Measuring principle diagram of timing error  $\delta t_j$

3 步:(1) 在测量前首先移动被测目标距离,当测量出脉冲飞行时间间隔约等于  $n/f_0$  时,将被测目标固定;(2) 在 VCXO 频率扫描控制下,发射激光脉冲信号,由于发射时刻对应于 TCXO 正弦信号相位是随机的,因此由 A/D 在激光脉冲发射时刻  $t_m$  和返回探测器时刻  $t_{jm}$  采集正弦基准信号。脉冲发射的个数  $N$  视发射时刻在一个周期内各时间段的均匀性决定,脉冲发射的个数越多,均匀性越好,测量定时误差  $\delta t_i$  的精度就越高,但脉冲发射的个数不能太多,因为测量时间过长时,电路中温度漂移影响会产生新的定时误差,一般可取 5 000 次左右即可;(3) 计算定时误差  $\delta t_i$ ,由于在测量时将脉冲飞行时间间隔调节到约等于基准正弦信号的整周期  $n/f_0$ ,在此条件下显然有  $\delta t_i \approx \delta t_j$ ,由图 4 可见,脉冲飞行时间间隔的实际值  $\Delta t_E$  可以由通过正弦曲线计算出的测量值  $\Delta t_M$  表示:

$$\Delta t_E \approx \Delta t_M \quad (4)$$

公式(4)说明定时误差  $\delta t_i$  可由测量值  $\Delta t_M$  计算出来。由于在 VCXO 频率扫描下, $N$  个脉冲发射(或返回)时刻将遍历一个周期内的各个时刻段,且定时误差在一个周期内的均值近似为 0,因此公式(4)中的  $T$  可以由下式估计:

$$\hat{T} \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta t_M \quad (5)$$

由公式(4)和公式(5)可以求出定时误差  $\delta t_i$ :

$$\delta t_i \approx \Delta t_M - \hat{T} \quad (6)$$

采用上述测量周期定时误差的方法不需要增加

任何硬件设备,测量原理和方法简单,容易操作,可以编制相应的软件实现对周期误差的自动测量,并在单片机中存储含误差补偿功能曲线,以实现误差补偿。

下面介绍通过测量出周期定时误差  $\delta t_i$  构建含误差补偿功能曲线  $y(t)$  的方法,如图 5 所示,设定时刻(激光脉冲发射时刻或返回探测器时刻)为  $t_i$ ,其中  $i$  为测量点数;假设由于电路元器件的非线性或

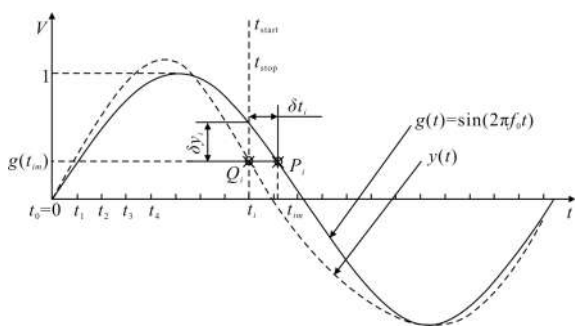


图 5 含误差补偿功能曲线  $y(t)$  的构建

Fig.5 Construction of error compensation function curve  $y(t)$

高频干扰等因素的影响,产生定时误差  $\delta t_i$ ,则定时时刻变为  $t_m = t_i + \delta t_i$ ,此时采样正弦基准信号为  $P_i$  点,其幅值为  $g(t_m)$ ,经过反正弦计算就可以求出  $t_m$ :

$$t_m = \arcsin(g(t_m)) \quad (7)$$

$t_m$  的定时误差为  $\delta t_i$ ,而实际定时时刻应该是  $t_i$ ,即实际值应该在图 5 中的  $Q_i$  点,即  $y(t_i) = g(t_m)$ ,因此  $y(t)$  可由下式构造出:

$$y(t) = \sin(t + \delta t_i) \quad (8)$$

公式(8)意味着将定时误差  $\delta t_i$  转化为定时正弦幅值误差  $\delta y_i$  来处理,这样利于简化测量计算。

### 3 实验结果

由于 TCXO 的频率为 15 MHz,一个周期对应的距离为 10 m。为了验证测量仪器存在周期误差,测量了随距离变化的周期误差。其测量方法是将被测仪器与一台高精度测距仪进行比较测量,每移动 0.25 m 的距离测量一个值,共测量了从 10~40 m 的 3 个周期,其测量结果如图 6 所示,可以看出,仪器误差随距离  $d$  呈周期变化的趋势明显,该周期误差对测距误差贡献很大,因此对其进行补偿可以大幅提高测距精度。

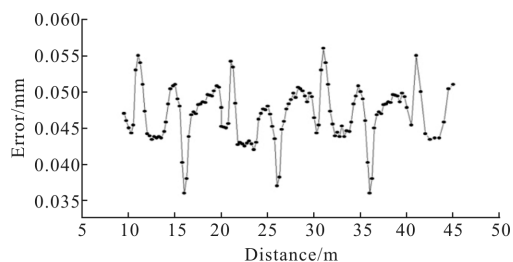


图 6 随距离变化的周期误差测量曲线

Fig.6 Measurement curve of periodic error with distance

在实验中,取 A/D 采样频率为 500 MHz,分辨率 10 位,重复频率为 100 kHz。为了减小测量随机误差的影响,每组发射脉冲个数  $N$  为 5000,共测量 10 组数据。首先将 A/D 采样的 5 组数据进行预处理;然后计算出 A/D 采样值与正弦曲线幅值的差值,即定时正弦幅值误差  $\delta y_i$ ,图 7 为在一个周期内定时正弦幅值误差  $\delta y_i$  随时间的变化关系,图 8 为定时正弦幅值误差频谱图。可以看出,在频率 30 MHz 处出现幅值最大值,这个频率正好是正弦基准频率的 2 倍、而在频率为 24、36 MHz 等处出现了较高的幅值,说明干扰信号是由 TCXO 或 VCXO 等高频信号之间的串扰形成的。

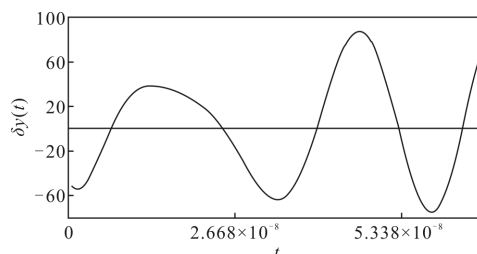


图 7 定时正弦幅值误差测量曲线

Fig.7 Measuring curve of the timing sine amplitude error

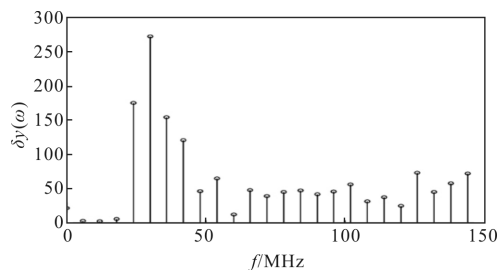


图 8 定时正弦幅值误差频谱

Fig.8 Frequency spectrum of the timing sine amplitude error

将拟合出的含误差补偿功能曲线  $y(t)$  进行存储

处理。在对  $y(t)$  进行归一化处理, 为了方便存储, 将横坐标在一个周期内等分成 100 份, 设等份点  $i=0, 1, 2, 3, \dots, 99$ , 图 9 中的点为将含误差补偿功能曲线  $y(t)$  离散化后的 100 个数据, 实线为正弦曲线。

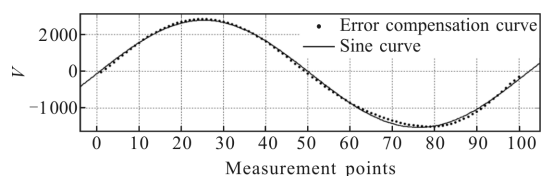


图 9 离散化含误差补偿功能曲线

Fig.9 Discretization of error compensation function curve

以含误差补偿功能曲线  $y(i)$  最为测量基准, 通过内插计算就可以补偿周期误差。为了验证补偿效果, 在测距基准检测机线上测量测距仪补偿前后的距离误差。图 10 中的实线和虚线分别是以正弦曲线  $t(i)$  和以含误差补偿功能曲线  $y(i)$  作为测量基准时的距离误差测距结果, 可以看出, 利用以含误差补偿功能曲线  $y(i)$  作为基准的测距误差显著减小, 测距误差小于 3 mm, 说明文中提出的误差补偿方法是可行的。

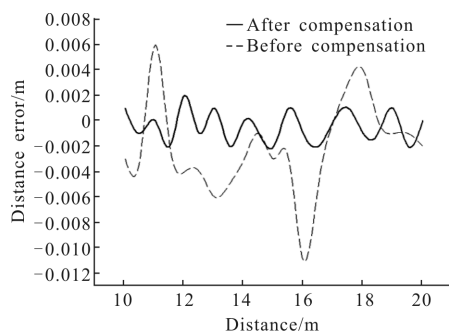


图 10 误差补偿前后测量结果

Fig.10 Measurement results before and after error compensation

## 4 结 论

经过文中的研究, 可以得出以下结论:

(1) 在基于正弦波的脉冲激光测距系统中, 利用激光测距仪在一定距离条件下的测量数据来计算定时误差的方法, 具有不需要增加硬件设备、测量原理和方法简单、测量容易操作等优点, 可编制相应的软件实现对周期误差的自动测量;

(2) 通过测量脉冲飞行时间误差来进行误差补

偿的方法, 可以解决传统的利用随距离变化的误差来进行周期误差补偿的局限性, 因此文中的研究也可作为相位法测距周期误差补偿研究提供一条新的途径;

(3) 根据对目标的测量实验结果可以看出, 经过周期误差补偿后的距离测量误差小于  $\pm 3$  mm, 说明文中提出的方法是可行的。

## 参考文献:

- [1] Luo Yuan, He Yan, Geng Liming, et al. Long-distance laser ranging lidar based on photon counting technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(5): 0514001. (in Chinese)
- [2] Mohammadikaji M, Bergamann S, Irgenfried S, et al. A framework for uncertainty propagation in 3D shape measurement using laser triangulation [C]//IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 2016: 7520324.
- [3] Gallay M, Hochmuth Z, Kaňuk J, et al. Geomorphometric analysis of cave ceiling channels mapped with 3-D terrestrial laser scanning [J]. *Hydrology & Earth System Sciences Discussions*, 2016, 20(5): 1827-1849.
- [4] Lindner L, Sergiyenko O, Rodriguez-Quinonez J C, et al. Mobile robot vision system using continuous laser scanning for industrial application [J]. *Industrial Robot*, 2016, 43(4): 360-369.
- [5] Kostamovarra J, Huikari J, Hallman L, et al. On laser ranging based on high-speed/energy laser diode pulses and single-photon detection techniques [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(2): 1-15.
- [6] Liang Fang, Sun Xiaoming. Crosstalk in intensity modulated-continuous wave laser rangefinder [J]. *Optical Technique*, 1999(4): 73-75. (in Chinese)
- [7] Xu Qianhui. On the cycle error and error of unshapely phase with photoelectric ranger [J]. *Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping*, 1997, 22 (2): 156-159. (in Chinese)
- [8] Fujima I. Correction of cyclic error in optical waveguide distance meter [C]//Proceedings of SPIE, 1999, 3823: 274-280.
- [9] Huang Minshuang, Long Tengyu, Liu Huihui. A high-precision pulsed laser ranging time interval measurement technology based on sine curves method [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(8): 0808002. (in Chinese)