

基于游标原理的快速高精度脉冲激光测距方法

黄民双*, 关在辉

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

摘要 提出一种适用于运动目标的快速高精度距离测量方法, 通过结合正弦基准时间间隔测量方法与游标时钟控制脉冲发射技术, 实现对运动目标的高精度测距。以正弦信号为基准, 测量出激光脉冲从测距仪到目标之间的飞行时间, 并将其作为估计目标距离的初值; 利用游标时钟控制脉冲发射技术, 选取正弦信号 0 点处的线性段作为定时特征点, 可以得到高分辨率的测量结果; 以该定时特征点对应的游标时刻为脉冲定点发射时刻, 通过多脉冲测量取平均值后实现快速高精度测距。实验结果表明: 当激光平均功率为 1 mW 时, 在无合作目标的 300 m 测程内, 测距精度为 $\pm(3 \text{ mm} + 2 \times 10^{-6} \times D)$ (D 为测量距离), 测量时间缩短至 5 ms。该测量系统具有结构简单、成本低、容易实现等特点。

关键词 测量; 遥感; 脉冲激光测距; 脉冲飞行时间; 正弦基准; 游标原理

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0510001

A Fast and High-Precision Pulse Laser Ranging Method Based on Cursor Principle

Huang Minshuang*, Guan Zaihui

*Opto-Mechatronic Equipment Technology Beijing Area Major Laboratory,
Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China*

Abstract This study proposes a fast and high-precision distance measurement method suitable for moving targets. By combining the sinusoidal reference time interval measurement method with the vernier clock controlled pulse emission technology, this method could achieve high-precision ranging for moving targets. The time-of-flight of a laser pulse from a range finder to a target is used as the initial value of the estimated distance; this value is measured using a sinusoidal signal as a reference. Using the vernier clock controlled pulse emission technology, the high-resolution measurement can be obtained by selecting a linear segment at zero point of the sinusoidal signal as the timing feature point. The high-accuracy ranging can be realized by averaging multi-pulse measurements based on the vernier moment corresponding to the timing feature point as the time of the fixed-point pulse emission. The experimental results show that for an average laser power of 1 mW, the range accuracy is $\pm(3 \text{ mm} + 2 \times 10^{-6} \times D)$, where D is the measured distance. Moreover, the measurement time is shortened to 5 ms within 300-m ranging without a cooperation target. The proposed system has a simple structure, is inexpensive, and can be easily implemented.

Key words measurement; remote sensing; pulse laser ranging; pulse flight time; sinusoidal reference; cursor principle

OCIS codes 140.3538; 140.3518; 120.6085; 120.1880

1 引 言

无合作目标脉冲激光测距仪是利用被测目标物体表面的漫反射光, 通过激光脉冲从测距仪到目标之间的飞行时间 (TOF) 来计算距离。与相位法测距仪相比, 脉冲激光测距仪更容易实现对较远目标

距离的快速测量, 可用于汽车防撞、机器人导航、工业现场测量等场合^[1]。

测距精度和测量时间是衡量激光测距仪性能的主要参数指标, 其中测距精度主要由定时误差和时间间隔测量误差决定^[2-3]。在脉冲激光测距仪中, 回波脉冲信号的幅值是目标距离和目标物体表面漫反

收稿日期: 2018-12-21; 修回日期: 2019-01-16; 录用日期: 2019-01-28

* E-mail: huangminshuang@bipt.edu.cn

射系数的函数,目标距离越远,脉冲幅值越小,其幅值变化范围为 $1:10000 \sim 1:100000$ ^[4],因此脉冲幅值变化将引起走离误差。目前,研究人员已采用脉冲峰值^[5]、脉冲上升率^[6]、脉宽^[4]等测量方法对走离误差进行补偿,其单脉冲测距精度达到厘米量级^[7-8]。2018年,本课题组提出一种高频共振的探测方法^[3],在 2000 m 测程内其测量精度为 $\pm(10 \text{ mm} + 10^{-5} \times D)$ (D 为测量距离),这种方法采用多脉冲测量进行平均处理,其定时误差可以达到几皮秒(1 mm 目标距离对应的脉冲飞行时间为 6.7 ps),但它是对直接采样的脉冲波形进行时间估算,主要存在受时间间隔测量误差的影响较大和测距时间较长的问题。

目前,高精度时间间隔测量主要采用模拟法和数字法。模拟法是利用在脉冲发射和接收这段时间间隔内对电容器充电或放电,通过测量电容器电压幅值变化来计算时间,精度可以控制在 100 ps 以内,但是这种方法受到电容充电的线性特性、电容漏电、线路板分散电容等因素的影响,往往需要将时间间隔测量模块制作成集成电路,以便依靠集成电路制作工艺来保证时间测量精度,因此,该方法的成本较高,不适合应用于民用测距仪。而数字方法主要是利用门电路的延时来确定时间间隔,存在分散性较大和稳定性较差等问题,实现高精度测量的难度较大。本课题组提出的利用正弦波作为基准时间间隔的测量方法^[9]具有一定优势,因为正弦波是在电路中最容易产生的波形,且具有周期性,但是时间间隔测量误差受到正弦波非线性特性的影响。

为此,本文提出一种基于游标原理的高精度脉冲激光测距方法,该方法以正弦波作为时间测量基

准,利用正弦波在零点附近的线性关系进行 1000 倍以上时间细分,并采用脉冲定点发射技术实现快速距离测量。

2 脉冲发射游标测距方法

2.1 技术方案

基于游标原理的测距方法是一种可同时实现高精度和大量程的测量方法,可以解决精确测量中不同的被测信号幅值差别大而各自变化幅度小,对分辨率要求高的问题,因此适合于对不同距离目标的测量。其基本原理是:采用正弦信号作为主时钟(基准信号),用于对发射脉冲和接收脉冲的时间间隔进行测量;同时,以该时钟为基准产生游标时钟控制脉冲发射时刻;选取正弦信号 0 点作为游标读数特征点,利用该点附近的线性关系提高测时精度,从而提高距离测量的精度。

如图 1 所示,将频率为 f_0 的正弦信号周期划分为 N 个游标刻度,两相邻刻度的间隔为 $1/(Nf_0)$ 。在每个游标刻度发射一个脉冲,共发射 N 个脉冲,假设游标变量 $n=0,1,2,3,\dots,N-1$,其中 $n=0$ 对应正弦信号的 0 相位点。经过游标测量后,取回波信号 t_{stop} 在正弦基准 0 点的采样值作为定时特征点,对应的脉冲发射时刻为 t_{start} ,即对 $n=n_{\text{fine}}$ 的游标点进行计算,测距仪与目标之间的距离可表示为

$$d = \frac{c}{2Nf_0} (N \cdot n_{\text{coar}} - n_{\text{fine}} + \Delta n), \quad (1)$$

式中: c 为真空中的光速; n_{coar} 为从 $n=0$ 时刻到 t_{stop} 时刻基准时钟的整周期数,称为粗计数; n_{fine} 和 Δn 为游标读数(细计数), n_{fine} 为游标数(整数部分); Δn 为不足一个游标数的小数部分。

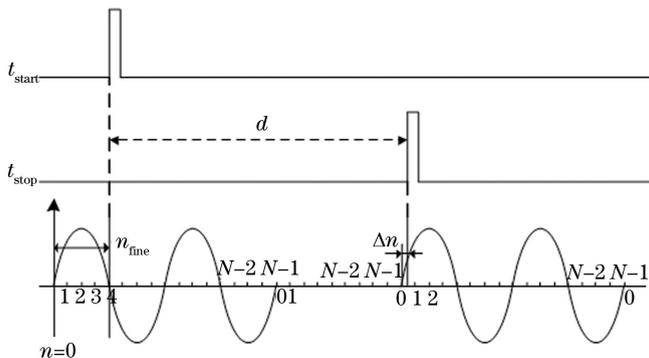


图 1 基于游标测量的脉冲激光测距原理

Fig. 1 Pulsed laser ranging principle based on vernier measurement

与现有的游标测距原理不同的是,该方法将一个基准正弦信号同时作为脉冲发射和时间间隔测量

基准,并且将控制脉冲发射时刻设置为游标时钟。这样不仅可以避免两个时钟在跟踪过程中产生的相

位误差,简化电路结构,而且可以利用正弦波在 0 点的线性关系对游标刻度的间距作进一步细分,实现 1000 倍以上的高精度细分测量。

2.2 游标函数重构

脉冲激光发射频率受激光器产品性能和测程的限制,现有的激光测距仪光源主要为半导体激光二极管(LD),这主要是因为 LD 的价格便宜、稳定性较高。脉冲 LD 的最大重复频率可超过 100 kHz,而正弦基准频率由温度补偿晶体振荡器(TCXO)的性能和电路性能决定,一般在数十兆赫兹,这意味着激光发射周期远大于正弦基准信号周期,不能在一个周期内实现游标测量。考虑到正弦波的周期性,可以通过求模运算来重构游标函数,选取的激光脉冲发射时间间隔为

$$T_{\text{tran}} = \left(L + \frac{1}{N} \right) \cdot T_0, \quad (2)$$

式中: L 、 N 均为整数, L 为整周期数, N 为一个周期内的游标刻度数; $T_0 = 1/f_0$ 为正弦基准信号的周期。

在(2)式中,游标时间间隔对应于正弦基准信号的 $L + 1/N$ 个周期,对 N 进行求模运算,得到等效的激光脉冲发射间隔:

$$\Delta T_{\text{tran}} = \frac{1}{N} \cdot T_0. \quad (3)$$

实际上,将激光脉冲发射过程看作是一个狄拉克 δ 脉冲调制过程,则通过一次发射 N 个连续脉冲就可以重构出一个周期内的游标函数:

$$a(n) = \sum_{n=0}^{N-1} \delta(t - nT_{\text{tran}}) = \sum_{n=0}^{N-1} \delta(n\Delta T_{\text{tran}}). \quad (4)$$

(4)式所构建的函数 $a(n)$ 相当于将一个正弦波周期划分为 N 个游标刻度。

2.3 测距精度改善

距离分辨率由(1)式的测量分辨率 Δn 决定,在利用正弦波作为测量基准时,由回波脉冲返回时刻触发模拟数字转换器(ADC),采集正弦基准信号的幅值,然后通过反三角函数的运算求出该点的相位,从而得到 Δn 。ADC 的位数 N_{ADC} 决定了正弦信号的幅值细分倍数,距离分辨率 Δd 可表示为

$$\Delta d = \frac{cT_0}{2} \cdot \frac{1}{2^{N_{\text{ADC}}+1}}. \quad (5)$$

(5)式说明 ADC 的位数越多,距离分辨率越高,例如正弦时钟频率 $f_0 = 15$ MHz,若要求距离分辨率 $\Delta d = 2$ mm,由(5)式可知,ADC 的位数为 12。

实际上,增加 ADC 的位数并不能提高正弦幅

值细分倍数,因为正弦波幅值分辨率还受到正弦波幅值噪声的限制。在测量过程中,光学噪声、电路噪声等都会叠加到被测数据中,导致测量数据具有较大的随机波动性。随机噪声引起的时间抖动如图 2 所示,正弦信号 $y(t)$ 在定时点 t_P 处的斜率可表示为 $y'(t_P) = \left. \frac{dy(t)}{dt} \right|_{t=t_P}$, t 为时间,设幅值噪声概率密度是均值等于零、均方根等于 σ_N 的正态分布,则噪声引起的定时抖动可近似为

$$\sigma_t \approx \frac{\sigma_N}{y'(t_P)}. \quad (6)$$

特别地,当 t_P 点在正弦波的 0 点或 π 点时, $y'(t_P) = \pm 1$;在其他点处, $y'(t_P) \in (-1, 1)$ 。定时抖动误差 σ_t 在 0 点或 π 点时最小,将定时特征点设置在 0 点附近,可以获得最大的时间细分倍数。在测距仪电路设计中,正弦基准产生电路通常由晶振电路和简单的 RLC (resistance inductance capacitance) 并联滤波电路组成,正弦电压幅值信噪比 R_{SNR} 只能达到 50,噪声将高达 0.02(假设信号为 1),这个噪声值要比距离分辨率为 2 mm 时对应的 ADC 分辨率大 20 倍左右。可通过多次测量取平均值的方法来提高信噪比,由于信噪比的改善与测量次数的平方根成正比,因此需要对 P 点进行 400 次测量,才能将信噪比提高 20 倍。

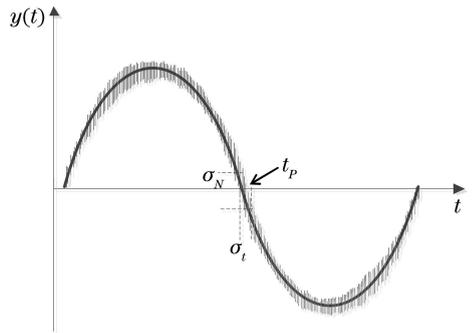


图 2 正弦幅值噪声产生的时间抖动

Fig. 2 Time jitter due to sinusoidal amplitude noise

正弦基准波形的畸变将 σ_N 直接转化为系统误差而导致测量精度降低,它是由电路或器件非线性以及其他高频信号的干扰耦合作用产生的,在相位法测距仪中被称为周期误差,需要通过误差补偿^[10]等方法来消除。周期误差具有不确定性,这主要是因为电路参数受温度漂移的影响,将随时间发生变化,但是在很短的时间内,周期误差是确定的,因此在本技术方案中,这一误差可以通过设置参考光路来消除。

2.4 脉冲定点发射

测量精度的提高是以增加测量时间为代价,例如,假设脉冲发射频率 $f_c = 100$ kHz,一个周期等分数 $N = 100$,对 P 点的测量次数为 400 次,则意味着需要游标测量 400 次,相应的脉冲发射个数为 40000 个,可计算出单次测量过程需要的数据采集时间为 0.4 s,这非常不利于其在诸如机器人导航等领域的应用。因此,基于传统游标原理的方法难以兼顾测距精度和时间的要求,可以通过将测量过程分为两个步骤来解决。

1) 脉冲游标发射。通过一次游标过程测量,确定游标数 n_{fine} 。

2) 脉冲定点发射。以游标数为 n_{fine} 的延时时间对发射脉冲进行测量,设发射脉冲数为 N_{pulse} ,则测量时间为

$$t_{time} = (N + N_{pulse}) \cdot \frac{1}{f_c} + t_{proc}, \quad (7)$$

式中:等号右边第一项为数据采集时间,第二项 t_{proc} 为信号处理时间。

仍然假设 $f_c = 100$ kHz, $N = 100$,一次游标测

量过程需要发射 N 个脉冲才能重构一个完整周期的正弦信号,从而确定 P 点,并在与 P 点对应的时刻发射 400 个脉冲。若忽略 t_{proc} ,则可计算出测量时间仅为 5 ms。

3 实验结果

3.1 实验装置

利用游标原理的脉冲激光测距系统框架如图 3 所示。该系统主要包括脉冲激光发射、接收通道、定时甄别、时间间隔测量以及控制等部分。TCXO 产生正弦信号,该信号经过频率综合器后,一路以固定频率时钟 f_0 作为时间间隔测量基准输入到采样器,另一路经过倍频、时钟分相和高精度延时器后形成游标时钟,控制激光脉冲发射器所发射的激光,经过目标漫反射后,由接收通道将返回的脉冲激光转化为光脉冲电流,采用高频共振预探测方法将光脉冲电流信号转化为衰减振荡电压输出,然后经过定时甄别器获得精确的定时信号,触发采样器对基准正弦信号进行采样,同时由粗时间测量单元测得基准时钟的整周期数 n_{coar} 。

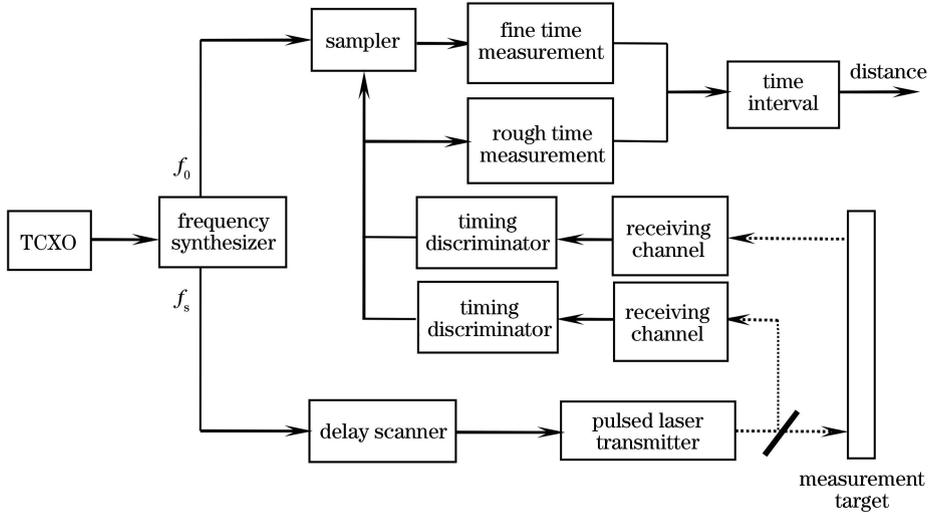


图 3 脉冲激光测距系统框图

Fig. 3 Block diagram of pulsed laser ranging system

游标时钟设计是所提脉冲激光测距系统的关键,现有的游标测量方法是将游标时钟频率设计成与基准时钟相差很小的固定频率信号,以这两个频率信号的相位差作为游标刻度。为了实现脉冲定点发射,结合利用时钟分相技术和现场可编程逻辑器件(FPGA)中的专用进位链延时技术来获得游标时钟,具体方法是先对正弦基准频率进行 N_{doub} 倍频,利用时钟分相技术获得 $4N_{doub}$ 个游标刻度,然后再将每一刻度通过 FPGA 中的专用进位链延时细

分 N_{delay} 倍,一个正弦基准周期划分的刻度数为

$$N = 4N_{doub} \cdot N_{delay}. \quad (8)$$

N_{doub} 的取值受到 FPGA 最高工作频率的限制,而 N_{delay} 应选取 10 以内的数值,以避免进位链太长产生额外误差,在本实验中取 $N = 100$,可计算出每刻度延时约 0.67 ns,例如美国 Altera 公司 FPGA 产品的进位链延时仅 0.1 ns 左右,通过优化所提系统的设计可以满足游标刻度细分要求。通过游标时钟设计来实现游标测量,从而实现脉冲定点发射,极

大地缩短测量时间,这也是本设计不同于现有游标时间测量的又一特点。

在脉冲激光测距光路中设置了参考光路:一是为了消除脉冲在电路中传输时受到的温度漂移影响;二是为了消除周期误差的影响。

在脉冲激光测距仪设计中,选取的关键器件参数如表 1 所示。

表 1 关键器件参数

Table 1 Parameters for key components

Class	Parameter	Value
TCXO	Oscillation frequency f_{nom}/MHz	15
	Frequency stability $f_{tol}/10^{-6}$	± 0.5
	Phase noise at 1 kHz offset	-130
	$R_{NF}/(\text{dBc}\cdot\text{Hz}^{-1})$	-130
	Central wavelength λ_p/nm	870
LD	Rise time t_r/ns	2
	Peak power Φ_{ep}/W	10
	Maximum repetition rate f_{rep}/kHz	100
	Capacitance C_d/pF	2
	Resolution/bit	12
ADC	Sampling frequency f_{SAMPLE}/MHz	5
	Sample-and-hold aperture delay time t_{AP}/ps	-250
	Ample-and-hold aperture delay	0.6
	time jitter t_{jitter}/ps	0.6

3.2 实验验证

为了验证脉冲发射游标原理重构正弦基准信号的可行性,将重构出的正弦基准信号波形与原始基准波形进行比较。图 4 所示为用美国 Agilent 公司生产的 54642A 示波器观测到的正弦基准波形,示波器带宽为 500 MHz,采样率为 2 GSa/s。图 5 所示为通过一次游标测量过程重构出的正弦基准波形,在测量过程中,回波脉冲经过定时甄别器得到准确的定时特征点,以此点作为 ADC 采样时刻点,对

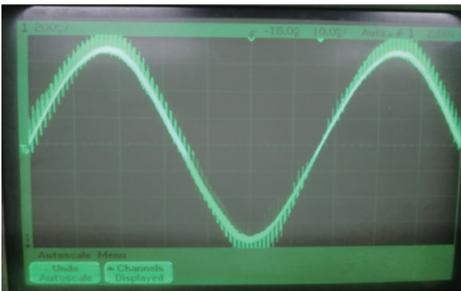


图 4 用示波器观测到的正弦基准信号波形
Fig. 4 Sinusoidal reference signal waveform observed with oscilloscope

正弦基准信号进行采样。可以看出,图 5 与原始正弦基准波形基本相同。从图 4 和图 5 还可看出,正弦基准波形相对于理想的正弦波有较大的随机噪声和波形畸变。

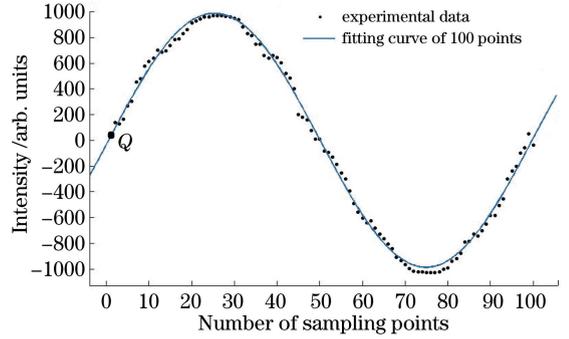


图 5 1 次游标过程重构的正弦基准信号波形
Fig. 5 Sinusoidal reference signal waveform reconstructed by one vernier process

图 6 所示为对 50 次游标测量过程取平均后重构出的正弦基准波形,与图 5 所示的结果相比,其信噪比得到显著改善。图 6 中游标读数 $n_{fine}=6$ 和 $\Delta n=0.231$,其目标距离为 39.4231 m。以脉冲定点发射的方法对同一目标进行测量,其结果与游标方法得到的结果一致。

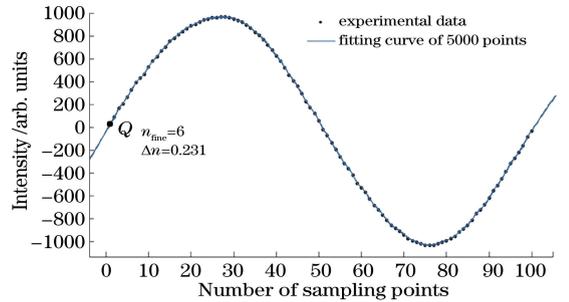


图 6 50 次游标过程重构的正弦基准信号波形
Fig. 6 Sinusoidal reference signal waveform reconstructed by fifty vernier processes

在测距仪基线上对所研制的测距系统进行测试,基线上设置了从 4 m 到 50 m 的多个目标,目标距离经过测距精度 $\pm(1 \text{ mm} + 2 \times 10^{-6} \times D)$ 的相位测距仪进行了校准,同时对测距系统进行校正,并对大气折射率误差进行修正,其测量误差曲线如图 7 所示。

将研制的测距系统应用于室外测试,测试时的气象条件为低强度阳光、没有热闪烁,以白色柯达灰度尺为目标。在 4~300 m 范围内设置了多个目标,利用高精度的测距仪进行对比测试,精度评价方式为:对目标点进行 5 次测量并计算标准偏差,以所有被测目标点中最大标准偏差作为评价精度的指标。测试结果表明:在无合作目标 300 m 测程内,测距精度为

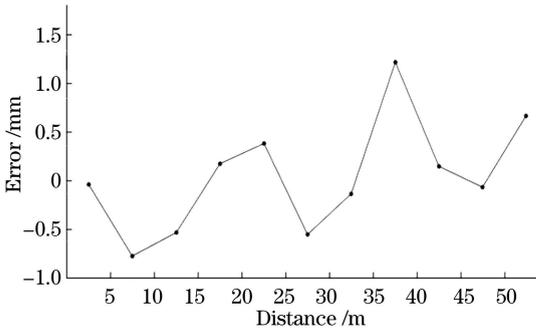


图 7 测得的距离误差曲线

Fig. 7 Measured distance error curve

±(3 mm+2×10⁻⁶×D),说明所提出的基于游标原理的脉冲激光测距技术方案是可行的。

5 结 论

提出一种基于游标原理的脉冲激光测距方法,其测距原理是通过控制脉冲发射时刻获得游标时钟,并以正弦波为测量基准,其单次测量时间仅为 5 ms,测距精度为±(3 mm+2×10⁻⁶×D),该方法既可广泛用于机器人导航、汽车防撞、设备装调等动态测量领域,也可用于大型工程结构(如公路、桥梁)、建筑结构、工业现场等静态测量领域。在高精度脉冲激光测距仪原理样机的研制中,通过结合利用时钟分相技术和 FPGA 中的专用进位连线延时技术,得到精确的游标时钟;利用正弦波在 0 点处的线性关系对一个游标刻度作进一步细分,可实现对正弦信号周期进行 1000 倍以上的时间细分;采用采样频率为 5 MHz 的 ADC 芯片,利用欠采样技术对频率约为 15 MHz 的基准信号进行采样,根据采样信号可重构出正弦基准信号,其测距系统具有结构简单、成本低等优点。对于工业应用来说,需要进一步提高测距精度,以满足设备装调等现场测量的需求。

参 考 文 献

[1] Gong T A, Wang Y C, Kong L Q, *et al.* Chaotic lidar for automotive collision warning eystem [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(9): 2426-2430. 龚天安,王云才,孔令琴,等. 面向汽车防撞的混沌激光雷达[J]. 中国激光, 2009, 36(9): 2426-2430.

[2] Huang M S. Time-of-flight laser ranging technique of single transmitted pulse[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(12): 120007.

黄民双. 单发脉冲飞行时间激光测距技术[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(12): 120007.

[3] Huang M S, Ma P, Liu X C. Multi-pulse laser ranging method for pre-detection with high frequency resonance[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(7): 074202. 黄民双, 马鹏, 刘晓晨. 高频共振预探测多脉冲激光测距方法[J]. 物理学报, 2018, 67(7): 074202.

[4] Kurtti S, Kostamovaara J. An integrated laser radar receiver channel utilizing a time-domain walk error compensation scheme [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, 60(1): 146-157.

[5] Palojarvi P, Ruotsalainen T, Kostamovaara J. A 250-MHz BiCMOS receiver channel with leading edge timing discriminator for a pulsed time-of-flight laser rangefinder[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2005, 40(6): 1341-1349.

[6] Cho H S, Kim C H, Lee S G. A high-sensitivity and low-walk error LADAR receiver for military application [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I, 2014, 61(10): 3007-3015.

[7] Nissinen J, Nissinen I, Kostamovaara J. Integrated receiver including both receiver channel and TDC for a pulsed time-of-flight laser rangefinder with cm-level accuracy [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2009, 44(5): 1486-1497.

[8] Amann M C, Bosch T M, Lescure M, *et al.* Laser ranging: a critical review of unusual techniques for distance measurement [J]. Optical Engineering, 2001, 40(1): 10-20.

[9] Huang M S, Long T Y, Liu H H, *et al.* A high-precision pulsed laser ranging time interval measurement technology based on sine curves method [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(8): 0808002. 黄民双, 龙腾宇, 刘慧慧, 等. 基于正弦曲线的高精度脉冲激光测距时间间隔测量技术[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0808002.

[10] Huang M S, Liu X C, Ma P. Periodic error compensation of pulsed time-of-flight laser ranging system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(3): 229-233. 黄民双, 刘晓晨, 马鹏. 脉冲飞行时间激光测距系统中周期误差补偿[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(3): 229-233.