

基于正弦曲线的高精度脉冲激光测距时间 间隔测量技术

黄民双 龙腾宇 刘慧慧 张 泽

(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 提出了脉冲激光测距中基于多点平均原理的高精度飞行时间间隔测量新方法,该方法以参考正弦信号作为测量基准。在脉冲计数法的基础上,应用多点平均法原理消除由于正弦曲线的非线性产生的时间累积误差,对正弦信号时间进行高精度细分测量。建立了高精度脉冲激光测距系统,利用线性调频技术对参考正弦信号在一个周期内进行伪随机采样,实现高精度时间间隔测量。测距系统原理结构简单、成本低。实验获得的单次距离测量误差稳定在 ± 3 mm 以内。

关键词 测量;伪随机采样;时间间隔测量;多点平均法;线性调频技术;时间细分

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0808002

A High-Precision Pulsed Laser Ranging Time Interval Measurement Technology Based on Sine Curves Method

Huang Minshuang Long Tengyu Liu Huihui Zhang Ze

(Beijing Municipal Key Laboratory of Optical Equipment Technology, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China)

Abstract A high-precision time-of-flight interval measurement technology based-on multi-point average principle method for pulsed laser range finder has been presented. This method refers sine signals as the measurement benchmark, on the basis of pulse counting method, the sine signal time has been high-precision subdivided with the principle of multi-point average method to eliminate time cumulative error caused by nonlinear sine curves. The high-precision pulsed laser ranging system has been built, pseudorandom sampling for the reference sine signals in a cycle by using linear frequency modulation technique to achieve high-precision time interval measurement. The structure of ranging system is simple and low cost. The single distance measurement accuracy obtained by experiments is stable within ± 3 mm.

Key words measurement; pseudorandom sampling; time interval measurement; multi-point average method; linear frequency modulation technique; time subdivision

OCIS codes 40.3538; 140.3518; 120.6085; 120.1880

1 引 言

在远距离无合作目标的激光测距中,目前主要采用相位法和脉冲法。相位法激光测距虽然精度高,但是在无合作目标及对人眼安全激光(平均光功率不大于 1 mW)的条件下,测量距离受到限制。而脉冲法测距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,在平均光功率

相同的条件下,容易实现长距离测量。可广泛应用于工业、航空航天、军事、大地大气探测和机器人技术等领域。

高精度飞行时间测量是高精度脉冲激光测距中的关键技术之一。脉冲飞行时间是指从脉冲发射开始时刻到脉冲经过目标返回光电探测器时刻的这段时间间隔,传统的测量方法是采用脉冲计数法^[1-3],

收稿日期: 2013-12-09; 收到修改稿日期: 2014-03-21

作者简介: 黄民双(1964—),男,博士,教授,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。

E-mail: huangminshuang@bipt.edu.cn

这种方法虽然可以实现宽动态范围的连续测量,但其分辨率低。为了进一步提高时间测量分辨率,近年来提出了模拟插入法^[4-8]、数字延迟线插入法^[9-11]等时间内插技术,其基本原理是将脉冲计数法使用的参考时钟周期细分为若干等分。模拟法^[12]是利用一个恒流源对电容充电(或放电)后得到和时间间隔成正比的电压值,这种方法的分辨率可以做得非常高,但精度受恒流源的稳定性、电容的线性和漏电流大小、模数(A/D)转换器(ADC)芯片的分辨率等因素的影响。数字延迟线^[13-14]插入法是利用 COMS 等高速器件中的逻辑门电路的传输、锁存或缓存等延时时间进行时间内插,但这种方法受器件延时时间大小和分散性的影响。

本文提出了以正弦信号作为测量基准,将脉冲计数法、多点数字平均法、伪随机采样技术相结合实现高精度时间间隔测量。该方法具有原理结构简单、容易实现、测量精度高等优点。

2 测量原理

采用粗时间测量和细时间测量相结合的方法,以实现高精度和大尺度测量范围的距离测量。

2.1 计数法粗时间测量

如图 1 所示,以周期为 T_0 的参考时钟正弦信号作为测量基准,在激光脉冲起始时刻和结束时刻之间的时间间隔 T 可表示为

$$T = N_c \cdot T_0 + t_a - t_b, \quad (1)$$

式中 N_c 表示在时间间隔 T 内参考时钟信号的整周期数。在电路中可由一个计数器来实现对 N_c 的测量,即当起始脉冲到来时打开计数器,在参考时钟过零点(下降沿)触发计数器计数加 1,当结束脉冲到来时计数结束。然而起始或结束脉冲下升沿到来的时刻是随机的,与参考时钟过零点相差时间间隔分别为 t_a 、 t_b ,它的极限值是 $\pm T_0$,如图 1 所示。若忽略 t_a 、 t_b ,引起的最大距离误差为

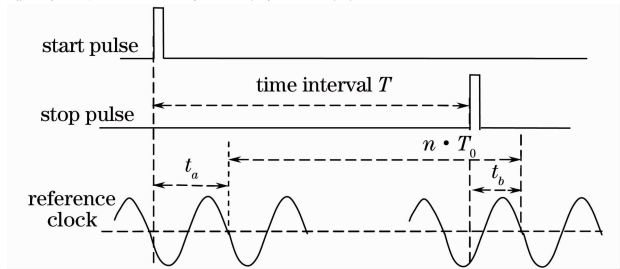


图 1 脉冲飞行时间间隔测量示意图

Fig. 1 Schematic diagram of time-of-flight internal measurement

$$\Delta D_{\max} = \pm \frac{c}{2} \cdot T_0 = \pm \frac{c}{2f_0}, \quad (2)$$

式中 $c=3 \times 10^8$ m/s 为光速, f_0 是参考时钟的频率。因为 f_0 的值是有限的,所以仅采用计数法难以实现高精度测距。例如采用 15 MHz 的时钟,最大测时误差为 67 ns,测距误差为 10 m,即使时钟频率提高到 1 GHz,测时精度为纳秒量级,测距精度也只达到米量级,且电路不易实现。

2.2 多点平均法细时间测量

假设将正弦曲线当成线性处理,如图 2 所示,将 $T_0/4 \sim 3T_0/4$ 的一段正弦曲线近似为直线 L ,则当测量电压值为 V_i 时,正弦曲线 y 对应的的时间 t_{yi} 与直线 L 对应的的时间 t_{Li} 之间存在一个时间差 $\Delta T_i = t_{yi} - t_{Li}$,这个时间差 ΔT_i 定义为时间累积误差。为了消除这个累积误差,考虑对同一距离进行多次测量,由时刻点 $t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_N$ 将一个时钟周期 T_0 等分为 N 个等间隔的时间段,设在 t_i 时刻的时间累积误差为 ΔT_i ,并假设从 t_i 到 t_{i+1} 时间段的累积误差都等于 ΔT_i 。由于 t_a 和 t_b 的随机性,若 t_a 起始时刻落在 t_i 到 t_{i+1} 时间段,则 t_b 起始时刻将落在 t_j 到 t_{j+1} 时间段,因此

$$\begin{aligned} t_a &= t_a(i) - \Delta T_i, \\ t_b &= t_b(j) - \Delta T_j, \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $t_a(i)$ 、 $t_b(j)$ 为测量值。

假设对同一距离进行 N 测量,并使得 t_a 起始时刻分别落在每个时间段一次,由于对于同一距离细时间间隔 $t_a - t_b$ 为常数,并考虑正弦函数的周期性,因此 t_b 起始时刻也将分别落在每个时间段一次,故

$$t_a - t_b = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [t_a(i) - \Delta T_i] - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [t_b(j) - \Delta T_j]. \quad (4)$$

以 $T_0/2$ 点为中心的任意两对对称点的时间累积误差大小相等,方向相反,显然有

$$\sum_{i=1}^N \Delta T_i = 0. \quad (5)$$

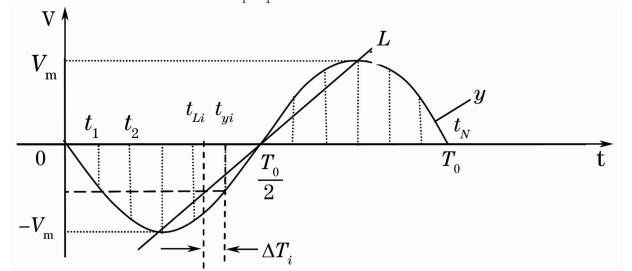


图 2 正弦曲线时间累积误差和时间等分

Fig. 2 Time accumulated error and time division of the sine curve

由此可以得出结论,正弦曲线在一个周期内的时间等分,其时间累积误差恒等于零。因此通过 N 点测量并取平均后,可以抵消时间累积误差,最后得到

$$t_a - t_b = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [t_a(i) - t_b(i)]. \quad (6)$$

2.3 大数误差的剔除

由于正弦信号的对称性,在一个周期内同一个电压值将对应于两个不同的时刻点,因此,模数转换器量化位数为

$$B_{\text{A/Dbit}} \geq \text{lb}\left(\frac{c}{4f_0\sigma}\right), \quad (7)$$

式中 σ 为测距精度, $c = 3 \times 10^8$ m/s 为真空中光速。本系统中参考时钟频率 $f_0 = 15$ MHz,若要求测距精度为 2 mm,可选取 $B_{\text{A/Dbit}} = 12$ 。很显然,增加 A/D 位数,可以提高测距精度,但 A/D 位数的增加受到电路信噪比的限制。

正弦电压值的量化将产生差分时间误差,如图 3 所示,正弦电压量化后,对应的正弦曲线时间分段是不均匀的,将按正弦曲线划分的时间段 $\Delta t(i)$ 与按直线等分的时间段 ΔT_0 的差值定义为差分时间误差。这个误差值随正弦电压值变化,并与 A/D 的量化位数有关,例如取 A/D 为 12 位,在电压绝对值小于 $0.85 V_m$ 部分,正弦电压与时间具有较好的线性关系,其差分时间误差小于 ΔT_0 ;而在电压绝对值大于 $0.85 V_m$ 部分,差分时间误差大于 ΔT_0 ,特别是在正弦电压幅值附近,差分时间误差将达到 ΔT_0 的数十倍,很显然这个误差属于大数误差,由于每一个大数误差都会对测量结果不确定度产生贡献,因此在数据处理时需要将这些数据剔除,以预测值来取代采样值。

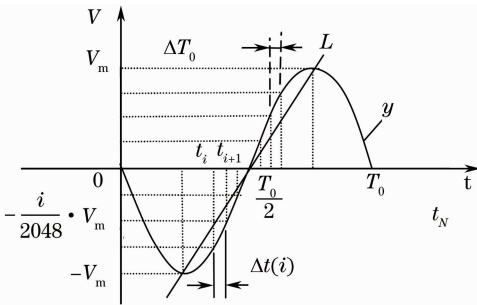


图 3 正弦电压量化对应的时间划分

Fig. 3 Time division to sinusoidal voltage quantization

2.4 原理误差分析

将一个时钟周期 T_0 的时间等分为 N 个时间段时,每时间段的时间累积误差存在残差,最大残差 $\delta(\Delta T_i)_{\text{max}}$ 为相邻两个时间等分点的累积误差的差

值,即

$$\delta(\Delta T_i)_{\text{max}} = \Delta T_{i+1} - \Delta T_i. \quad (8)$$

由于 t_a 和 t_b 的随机性,可以用标准差来表征由时间累积误差的残差产生的原理误差,即最大的标准差为

$$\delta T_{\text{max}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta(\Delta T_i)_{\text{max}}}. \quad (9)$$

由(9)式可以计算出最大的标准差 δT_{max} 随时间等分段数 N 的变化,如图 4 所示。图中曲线 a、b、c、d 分别为剔除电压绝对值大于 90%、85%、80% 和 75% 的大数误差数据后的计算结果。可以看出曲线 a 的误差值远大于曲线 b、c、d,而曲线 b、c、d 的误差值变化较小,说明剔除大数误差数据可以明显地减小原理误差,在剔除电压绝对值大于 85% 的数据后,当取 $N \geq 100$ 时,原理误差小于 3 mm,如取 $N = 200$,则原理误差约 0.6 mm。很显然,通过多点平均法测量细时间间隔 $t_a - t_b$ 精度高、原理简单、容易实现。

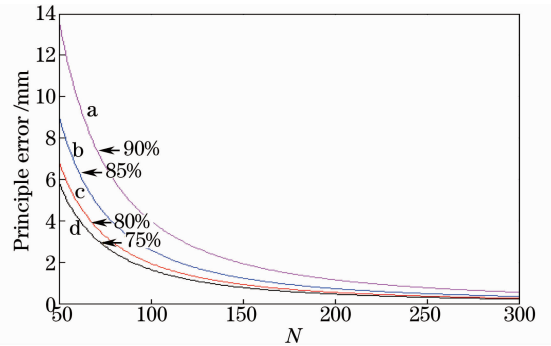


图 4 原理误差随时间等分段数 N 的变化

Fig. 4 Principle error changes over time segmentation of N

3 测量系统

3.1 系统组成

图 5 是高精度脉冲激光测距细时间间隔测量原理图。参考时钟正弦信号由温补晶体振荡器(TCXO)产生,其频率为 f_0 。压控晶体振荡器(VCXO)产生频率 $f_{\text{vcxo}}(t)$ 随时间 t 变化的正弦信号,经过 m 倍的分频器分频后,得到频率为 $f_{\text{vcxo}}(t)/m$ 的正弦信号,一方面,由该正弦信号的过零时刻点触发 A/D 对参考时钟正弦信号进行采样,即得到对应的时刻 t_a ;另一方面,由该正弦信号的过零点时刻点控制激光脉冲发射,脉冲激光经过被测目标返回后由脉冲时刻甄别器得到准确的定时时刻点,由这个时刻点触发 A/D 对参考时钟正弦信号进行采样,即得到对应的时刻 t_b 。最后经过数据处理后得到细时间间隔。

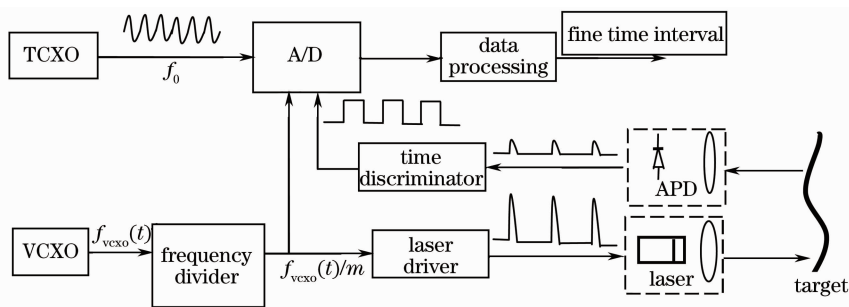


图 5 高精度脉冲激光测距细时间间隔测量原理图

Fig. 5 Diagram of fine interval measurement principle for a high precision pulse laser ranging

脉冲信号从控制激光脉冲发射时刻 t_a 到探测回波脉冲时刻 t_b , 需要经过激光驱动电路、电光转换电路、外光路、光电 (APD) 探测放大电路、时刻甄别电路等环节, 脉冲信号经过每个环节都将产生延时, 总的延时时间在微秒量级, 这相当于 t_a 时刻到 t_b 时刻的时间间隔在微秒级, 这样, 选取较低采样率的 A/D 转换芯片就能测量出 t_a 和 t_b 。由于脉冲信号通过电路时的延时时间受温度等因素的影响, 在光学系统中设计了一个内外光路转换装置, 以消除由于电路热稳定性等对测量精度的影响。

利用定时时刻来触发 A/D 对参考时钟正弦信号进行采样, A/D 采样时刻点的准确性由 A/D 芯片的采样和保持延时时间分散性这一参数决定, 因此, 可选择采样和保持延时时间分散性小于 1 ps 的芯片, 这样, A/D 采样环节产生的定时误差对测距精度的影响很小。

3.2 伪随机采样

下面分析采用伪随机采样方法实现高精度细分时间间隔测量的原理。

设 VCXO 输出频率 $f_{vcxo}(t)$ 随时间 t 的变化受输入电压的线性调制, 可表示为

$$f_{vcxo}(t) = f_{vcxo}(0) + a \cdot t, \quad (10)$$

式中 $f_{vcxo}(0)$ 为 VCXO 的初始扫描频率, a 为扫描斜率。假设 VCXO 在第 i 点采样时刻的频率为 $f_{vcxo}(i)$, 则第 i 点与第 $i-1$ 点之间的采样时间间隔为 $m/f_{vcxo}(i)$, 以该时间间隔对频率为 $f_0 = 1/T_0$ 的参考正弦信号进行采样, 得到在第 i 点与第 $i-1$ 点参考正弦信号的相位值, 由于细时间间隔 (相位差) $t_a - t_b$ 的值小于周期 T_0 , 因此这两点之间的相位差可以等效为一个小于周期 T_0 的时间差, 相当于等效的采样时间间隔, 即

$$\Delta\tau(i) = T_0 \cdot \left\{ \frac{mf_0}{f_{vcxo}(i)} - \text{INT} \left[\frac{mf_0}{f_{vcxo}(i)} \right] \right\}, \quad (11)$$

式中 $f_0 = 1/T_0$ 是参考正弦信号的频率, $\text{INT}[\cdot]$ 为取整函数。由 (11) 式可以确定采样第 i 点的等效时刻为

$$\tau(i) = \tau(i-1) + \Delta\tau(i) - T_0 \cdot \text{INT} \left[\frac{\tau(i-1) + \Delta\tau(i)}{T_0} \right]. \quad (12)$$

很显然, 等效采样时刻 $\tau(i)$ 的取值在 $[0, T_0]$ 区间, 换言之, 在一次测距过程中的采样数据都可以看成是在同一个周期 T_0 内采样得到的正弦电压值。由于等效的采样时间间隔 $\Delta\tau(i)$ 要远小于实际采样时间间隔 $m/f_{vcxo}(i)$, 这就意味着可以采用较低采样率的模数转换器芯片来实现高速数据采样, 因此, 采用这种方法原理简单、元器件少、成本低。

由 (12) 式可以计算出 $\tau(i)$ 值在 $[0, T_0]$ 区间的概率分布。例如选取参数 $f_0 = 14.98 \text{ MHz}$, $f_{vcxo}(0) = 15.13 \text{ MHz}$, $a = 85.7 \text{ Hz/ms}$, $m = 1770$, 将一个时钟周期 T_0 时间分成 200 等份, 共采样 20000 点, 其 $\tau(i)$ 值在 $[0, T_0]$ 区间各等份的概率分布如图 6 所示。从图中可以看出: 尽管采样中每个采样点的选择是经过挑选的, 但是采样时刻点落在 $[0, T_0]$ 区间内各等份的概率是近似均匀的, 也就是说采样点是一个伪随机数, 这说明采用线性调频技

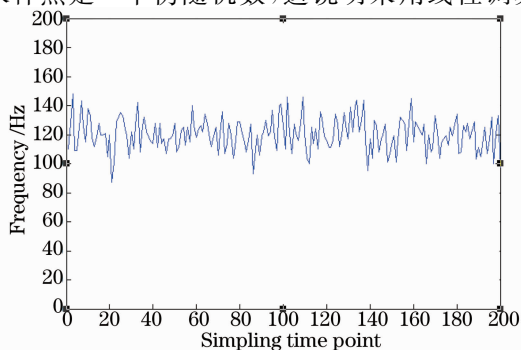


图 6 采样时刻点落在 $[0, T_0]$ 区间内各等份的概率分布
Fig. 6 Probability distribution of each equal part for sampling time point falls in the interval $[0, T_0]$

术的伪随机采样方法,通过合理地选择电路参数,可以使一次测距过程中等效采样时刻点 $\tau(i)$ 均匀地分布在 $[0, T_0]$ 区间,从而利用上述多点平均法测量原理来实现高精度时间细分。

4 实验结果

将基于伪随机采样的多点平均细时间测量系统应用于高精度激光脉冲测距仪中。参考时钟正弦信号由频率稳定的温补晶体振荡器 TCXO 产生,其频率为 $f_0 = 14.98$ MHz,压控晶振 VCXO 的初始频率 $f_{vcxo}(0) = 15.130$ MHz, A/D分辨率为12位,采样率

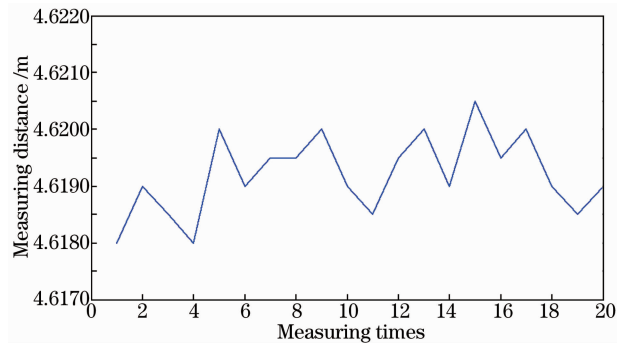


图7 4.620 m 目标的距离测量结果

Fig. 7 Measurement results of 4.620 m target

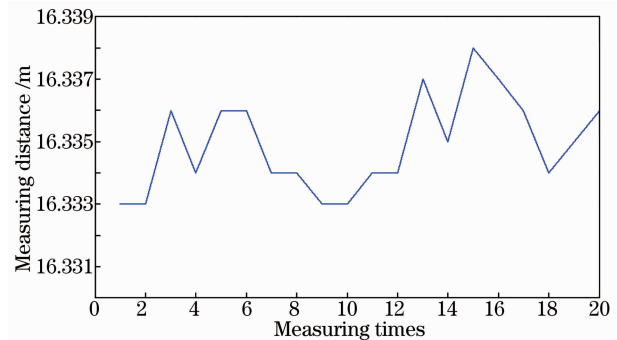


图8 16.335 m 目标的距离测量结果

Fig. 8 Measurement results of 16.335 m target

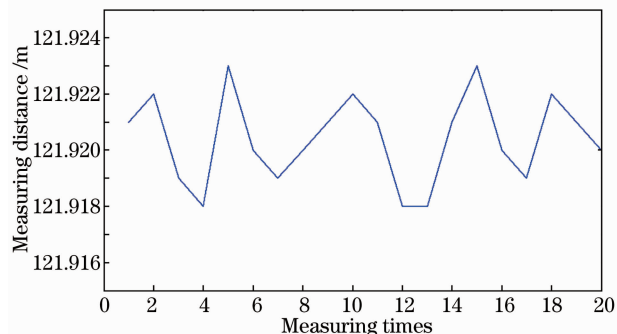


图9 121.920 m 目标的距离测量结果

Fig. 9 Measurement results of 121.920 m target

为 $5 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$,采样 20000 点求平均后计算出细时间间隔,然后根据所测得的粗时间间隔值和光速等参数计算出激光脉冲测距仪到被测目标之间的距离。研制出的高精度激光脉冲测距仪经加常数和乘常数校准后,在测距基线上进行距离测试,图 7~9 分别是对 4.620、16.335、121.920 m 目标距离的测量结果,其中横坐标为测量次数,纵坐标为距离测量值。测试结果表明,单次距离测量误差小于 ± 3 mm。因此,基于伪随机采样的高精度时间间隔测量方法是可行的。

5 结 论

经过本文的研究,可以得出以下结论:

1) 由于正弦信号在电路中更容易获取和实现,与传统的采用直线作为细分时间测量基准的方法相比,采用这种方法可以大大简化电路结构;

2) 采用脉冲计数法、多点数字平均法、伪随机采样技术相结合的时间间隔测量方法,原理简单、实现容易;

3) 根据对实际目标的测量结果可以看出,采用本文提出的时间间隔测量方法可以获得距离测量误差小于 ± 3 mm,表明该方法是可行的。如果提高 A/D分辨率、增加采样点数,或进一步优化 VCXO 和 TCXO 频率参数,在时钟周期 T_0 内获得更均匀的概率分布,可望进一步将精度提高至 ± 1 mm 以内。

参 考 文 献

- 1 Jozef Kalisz. Review of methods for time interval measurements with picosecond resolution[J]. Metrologia, 2004, 41(1): 17-32.
- 2 Chen Ruiqiang, Jiang Yuesong. Time interval measurement method of pulse laser ranging[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0212004.
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.
- 3 Yang fang, Zhang Xing, He Yan, et al.. Laser ranging system based on the pseudo random code modulation and photon counting laser ranging technique[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0208001.
杨芳, 张鑫, 贺岩, 等. 基于高速伪随机码调制和光子计数激光测距技术[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0208001.
- 4 E Räisänen-Ruotsalainen, T Rahkonen, J Kostamovaara. An integrated time-to-digital converter with 30-ps single-shot precision[J]. IEEE J Solid-State Circuits, 2000, 35(10): 1507-1510.
- 5 K Määttä, J Kostamovaara. A high-precision time-to-digital converter for pulsed time-of-flight laser radar applications[J]. IEEE Trans Instrum Meas, 1998, 47(2): 521-536.
- 6 J Kostamovaara, R Myllylä. Time-to-digital converter with an analog interpolation circuit[J]. Rev Sci Instrum, 1986, 57(11): 2880-2885.
- 7 J Kalisz, R Pelka, A Poniecki. Precision time counter for laser

- ranging to satellites[J]. *Rev Sci Instrum*, 1994, 65(3): 736—741.
- 8 B K Swann, B J Blalock, L G Clonts, *et al.*. A 100-ps time-resolution CMOS time-to-digital converter for positron emission tomography imaging applications[J]. *IEEE J Solid-State Circuits*, 2004, 39(11): 1839—1852.
- 9 A Mäntyniemi, T Rahkonen, J Kostamovaara. A CMOS time to-digital converter (TDC) based on a cyclic time domain successive approximation interpolation method [J]. *IEEE J Solid-State Circuits*, 2009, 44(11): 3067—3078.
- 10 J P Jansson, A Mäntyniemi, J Kostamovaara. A CMOS time-to-digital converter with better than 10 ps single-shot precision[J]. *IEEE J Solid-State Circuits*, 2006, 41(6): 1286—1296.
- 11 P Dudek, S Szczepanski, J V Hatfield. A high-resolution CMOS time-to-digital converter utilizing a vernier delay line[J]. *IEEE J Solid-State Circuits*, 2000, 35(2): 240—247.
- 12 T Rahkonen, J Kostamovaara. Pulswidth measurements using an integrated pulse shrinking delay line[J]. *Proc IEEE Int Symp Circuits Syst*, 1990, 1: 578—581.
- 13 S Tisa, A Lotito, A Giudice, *et al.*. Monolithic time-to digital converter with 20 ps resolution[C]. *Proc ESSCIRC*, 2003. 465—468.
- 14 J Kalisz. Review of methods for time interval measurements with picosecond resolution[J]. *Metrologia*, 2004, 41(1): 17—32.

栏目编辑:何卓铭