

脉冲激光测距的时间间隔测量方法

陈瑞强 江月松

(北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191)

摘要 时间间隔测量方法的优劣直接影响脉冲激光测距的性能。借鉴插值法的思想,提出了利用三角波参考信号的特点实现时间间隔测量的方法,具有测量范围大、测量精度高的优点。阐述了利用三角波参考信号实现时间间隔测量的原理,定量分析了影响时间间隔测量精度的因素,指出三角波参考信号的频率和噪声是影响测量精度的主要原因,并进行了数值仿真;设计实验方案验证了三角波参考信号中噪声对时间间隔测量精度的影响。仿真和实验结果表明,使用较低频率的三角波参考信号可以实现较高的时间间隔测量精度;提高三角波参考信号的频率或降低噪声,都可以有效提高时间间隔的测量精度。仿真和实验结果证实了时间间隔测量方法的可行性,为开展脉冲激光测距提供了一定的参考。

关键词 测量;时间间隔测量;三角波参考信号;噪声;测量精度

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201333.0212004

Method of Measurement on Time-Interval in Pulsed Laser Ranging

Chen Ruiqiang Jiang Yuesong

(Department of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract The performance of pulsed laser ranging is directly influenced by the method how to measure the time-interval. Refer to the idea of interpolation time-interval measurement, the character of triangle reference signal is used to realize measurement on time-interval which has advantages of long measurement range and high precision. The principle how to use triangle reference signal to realize measurement on time-interval is described. The factors that affect the precision of time-interval measurement is quantitatively analyzed. It is pointed out that the frequency of triangle reference signal and the noise attached in triangle reference signal are the two main factors which affect the precision of time-interval measurement. Then, their affect on the precision of time-interval measurement is numerically simulated. A confirmatory experiment is designed to explain how the noise attached in triangle reference signal affects the precision of time-interval measurement. Both the numerical simulation and the experimental result show that the method of measurement on time-interval in pulsed laser ranging which uses low frequency triangle reference signal can achieve high precision. Besides, both improving the frequency of triangle reference signal and reducing the noise attached in triangle reference signal can effectively improve the precision of time-interval measurement. The numerical simulation and experimental results also confirm the feasibility of measurement on time-interval on pulsed laser ranging.

Key words measurement; measurement on time-interval; triangle reference signal; noise; measurement precision

OCIS codes 010.3640; 040.1880; 140.3538

1 引 言

激光测距方法主要有分脉冲激光测距法、连续激光相位测距法、三角测距法及光子计数测距法^[1~4]。脉冲激光测距通过测量发射与接收激光脉冲之间的时间间隔,获取目标距离信息,具有激光发

射峰值功率高、探测距离远以及对光源相干性要求低等优点,在地球地貌测绘、资源调查、城市三维建模和工业测量等领域得到广泛应用^[5~7]。

脉冲激光测距的精度主要依赖于接收通道的带宽、信噪比、回波时刻鉴别精度和激光脉冲飞行的时

收稿日期: 2012-08-21; **收到修改稿日期:** 2012-10-15

基金项目: 国家 973 计划(2011CB707001)资助课题。

作者简介: 陈瑞强(1983—),男,博士研究生,主要从事激光测距和三维成像等方面的研究。

E-mail: dreamskychrq@gmail.com

导师简介: 江月松(1959—),男,教授,博士生导师,主要从事光电探测和遥感遥测等方面的研究。

E-mail: yuesongjiang@buaa.edu.cn

间间隔的测量精度等,其中时间间隔的测量精度对测距精度起重要作用。现有的时间间隔测量方法主要有数字计数法、模拟法、插值法和延迟线法。数字计数法原理简单,直接使用基准时钟计数,测量范围很大,但基准时钟频率很难做到很高,测量精度差;模拟法将时间间隔与某些物理变化量(如电压、电荷、频率和相位等)相对应,通过测量物理变化量间接计算出时间间隔,虽然测量精度很高,但测量范围受到限制;插值法结合数字计数法和模拟法的优点,使用模拟法缩小数字计数法中存在的误差,弥补了二者的不足^[8~11];延迟线法利用信号在介质中延迟特性,可以获得精度较高的测量结果^[12~14]。

本文提出的脉冲激光测距的时间间隔测量方法,借鉴了插值法的思想,一方面利用三角波参考信号的周期性特点,克服了模拟法测量范围受限的缺点;另一方面利用模拟法测量精度高的优点,将时间间隔转换为三角波参考信号的电压信息,通过测量不同时刻三角波参考信号的电压值,获得较高的时间间隔测量精度,因而同样具有插值法测量范围大和测量精度高的优点。与传统插值法相比,本文提出的时间间隔测量方法具有以下优点:1)传统插值法必须结合使用数字计数法和模拟法,而本文提出的时间间隔测量方法只需要使用一种三角波参考信号即可达到插值法的效果,因此原理更简单。2)在实际工程实现上,传统插值法需要同时使用较高频率(一般为几百兆赫兹)的计数脉冲和较高精度的电容进行充放电操作,且电容两端电压与充放电时间是非线性关系,电路结构及后期计算较复杂。而本文提出的时间间隔测量方法,使用的三角波参考信号频率较低(几十兆赫兹)且电压与时间符合线性关系,直接测量三角波参考信号的电压值即可。另外,本方法中需要记录三角波参考信号的波峰和波谷个

数,现有的电路实现技术也很成熟,不存在技术难点。

本文开展了脉冲激光测距中时间测量方法的研究,提出使用三角波参考信号实现时间间隔测量的方法。利用现有的实验条件,定量说明了三角波参考信号中噪声对本文测量方法精度的影响机理。

2 测量原理

实现时间间隔测量的信号时序关系如图1所示,设三角波参考信号参数如下:频率为 f ,波峰值为 V_p ,波谷值为 0 ,斜率 $\gamma_{\text{ramp}} = 50\%$ 。开始计时脉冲的前沿到达时,使用模数(A/D)转换器(ADC)获取三角波参考信号的电压值,记为 V_1 ;停止计时脉冲的前沿到达时,使用A/D转换器获取三角波参考信号的电压值,记为 V_2 。在时间间隔 t_m 内,三角波参考信号经历的波峰数为 n_{p1} ,波谷数为 n_{p2} 。

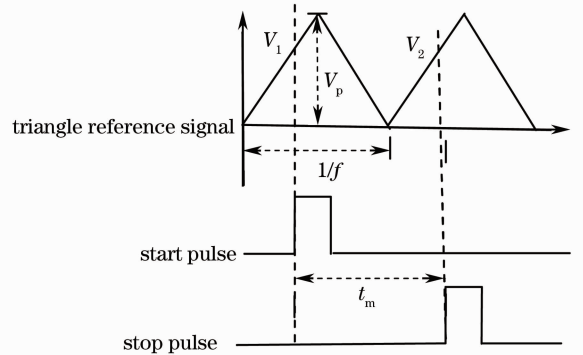


图1 信号时序关系示意图

Fig. 1 Schematic diagram of signal sequence

使用 V_{type} 表示三角波参考信号在时间间隔 t_m 内经历的第一个极值点的类型:如果没有经历极值点,则 $V_{\text{type}} = 0$;如果第一个极值点为波峰,则 $V_{\text{type}} = 1$;如果第一个极值点为波谷,则 $V_{\text{type}} = 2$ 。

综上所述,可以计算得到时间间隔

$$t_m = \begin{cases} \frac{|V_1 - V_2|}{2fV_p}, & V_{\text{type}} = 0, n_{p1} = n_{p2} = 0, \\ \frac{V_p + V_2 - V_1}{2fV_p} + \frac{n - 1/2}{f}, & V_{\text{type}} = 1, n_{p1} = n_{p2} = n, n = 1, 2, 3, \dots \\ \frac{V_p + V_1 - V_2}{2fV_p} + \frac{n - 1/2}{f}, & V_{\text{type}} = 2, n_{p1} = n_{p2} = n, n = 1, 2, 3, \dots \\ \frac{2V_p - V_1 - V_2}{2fV_p} + \frac{n - 1}{f}, & V_{\text{type}} = 1, n_{p1} = n - 1, n = 1, 2, 3, \dots \\ \frac{V_1 + V_2}{2fV_p} + \frac{n - 1}{f}, & V_{\text{type}} = 2, n_{p1} = n - 1, n_{p2} = n, n = 1, 2, 3, \dots \end{cases} \quad (1)$$

3 时间间隔测量误差分析

3.1 理论测量误差

从测量原理可知,如果三角波参考信号是理想的,则用于获取三角波参考信号电压值的 A/D 转换器的分辨率是影响测量精度的原因。

设 A/D 转换器的分辨率(位数)为 m ,满量程输入电压为 v_m 。为了充分利用 A/D 转换器的资源,取 $v_m = V_p$,则最小分辨电压为

$$V_{AD_min} = \frac{V_p}{2^m}. \quad (2)$$

由此引起的测量误差

$$\nabla_{t_ideal} = \frac{1}{2f} \frac{V_{AD_min}}{V_p} = \frac{1}{f2^m}. \quad (3)$$

由此可知,使用文中提出的方法,可将时间间隔测量误差减小到三角波参考信号周期的 $1/2^m$ 。因此在理论上,使用较低频率的三角波参考信号即可获得较高的时间间隔测量精度。

3.2 实际测量误差

在实际测量中,三角波参考信号的性能(频率、信号线性度等)并不是绝对稳定的,总有一定的抖动性,而且含有干扰噪声,因此需要综合考虑实际测量误差。

3.2.1 噪声

传统的信噪比定义为

$$R_{SN} = 20 \lg \left(\frac{v_s}{v_n} \right), \quad (4)$$

式中 v_s 为信号的有效电压值, v_n 为噪声的有效电压值。

由(4)式可知,传统的信噪比定义使用的是电压有效值,无法直观地反映噪声对测量误差的影响程度。本文给出一种新的衡量标准,定义噪声因子 ϵ 为

$$\epsilon = \frac{V_{n_std}}{V_{s_p_mean}}, \quad (5)$$

式中 V_{n_std} 为噪声的标准方差, $V_{s_p_mean}$ 为三角波参考信号波峰值的平均值。

根据(5)式可以得到噪声引起的测量误差

$$\nabla_{t_noise} = \frac{\epsilon}{f}. \quad (6)$$

3.2.2 三角波参考信号稳定性

实际的三角波参考信号并不是理想的,存在一定的不稳定性,由此引起的测量误差为

$$\nabla_{t_instability} = \frac{\beta}{f(1+\beta)} + \frac{\gamma}{f}, \quad (7)$$

式中 f 和 β 分别为三角波参考信号的频率和频率稳

定度, γ 为三角波参考信号的线性度。

3.2.3 综合测量误差

根据(5)~(7)式,可以得出时间间隔综合测量误差

$$\begin{aligned} \nabla_t &= \nabla_{t_ideal} + \nabla_{t_noise} + \nabla_{t_instability} = \\ &= \frac{1}{f \cdot 2^m} + \frac{\epsilon}{f} + \frac{\beta}{f(1+\beta)} + \frac{\gamma}{f} = \\ &= \frac{1}{f} \left(\frac{1}{2^m} + \epsilon + \frac{\beta}{1+\beta} + \gamma \right). \end{aligned} \quad (8)$$

由(8)式可知,当 m 、 β 和 γ 确定后,减小噪声因子或提高三角波参考信号的频率都可以减小时间间隔测量误差。但在实际应用中,三角波参考信号中的噪声难以降低,所以噪声因子不可能取到很小。另外,当三角波参考信号的频率很高时,信号谐波失真也会变得很严重(谐波失真的定量分析和测量是很复杂的,本文没有讨论),无法满足文中的时间间隔测量方法。因此,需要根据实际应用场合,合理选择三角波参考信号的频率和噪声因子。

4 数值仿真

不考虑三角波参考信号谐波失真的条件下,设三角波参考信号的频率稳定度 $\beta = 2 \times 10^{-6}$,斜率 $\gamma_{ramp} = 50\%$,信号线性度 $\gamma = 0.05\%$; A/D 转换器的位数 $m = 12$ bit。图 2 为三角波参考信号的频率 ($f = 1 \sim 50$ MHz) 和噪声因子 ($\epsilon = 0.001 \sim 0.01$) 对测量误差影响的仿真结果。

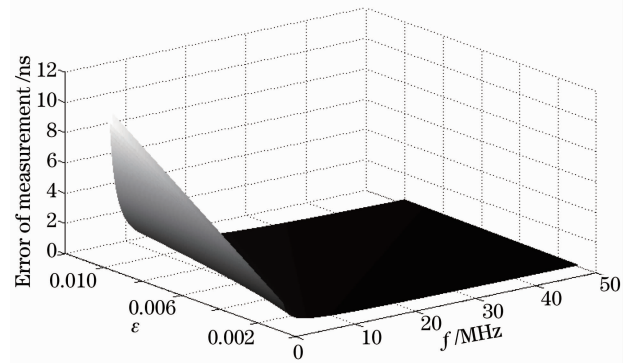


图 2 时间间隔测量误差仿真图

Fig. 2 Simulation diagram of time-interval measurement

由图 2 仿真结果可知

1) 当三角波参考信号的频率 $f < 10$ MHz,三角波参考信号中噪声对测量误差有明显影响。当 $f = 1$ MHz, ϵ 由 0.01 减小到 0.001 时,时间测量误差降低了约 9 ns。

2) 当三角波参考信号的频率 $f > 10$ MHz,三角波参考信号中噪声对测量误差的影响开始变得不

明显。当 $f=10\text{MHz}$, ϵ 从 0.01 减小到 0.001 时, 时间测量误差降低了约 0.9 ns。

3) 当三角波参考信号的频率 $f=20\text{MHz}$, 噪声因子 $\epsilon=0.001$ 时, 时间间隔测量误差约为 100 ps。

5 实验验证

5.1 实验方案

设计实验方案如图 3 所示, 实验方案中设备的具体参数可参考表 1 所示。脉冲激光器发射的激光脉冲经分束镜比例分束, 其中约 3% 的激光脉冲能量通过窄带滤光片打到 PIN 光电探测器上, 得到的电信号经时刻鉴别电路的固定阈值电压比较器产生开始计时脉冲; 其中约 97% 的激光脉冲能量通过窄带滤光片打到雪崩光电二极管 (APD) 光电探测器上, 得到的电信号送入信号延迟器产生预设延迟后, 经时刻鉴别电路的固定阈值电压比较器产生停止计时脉冲。时刻鉴别电路输出的开始计时脉冲和停止计时脉冲以及信号发生器产生的三角波参考信号同时由示波器记录下来, 使用计算机分析记录的实验数据并根据(1)式计算可得到开始计时脉冲与停止计时脉冲之间的时间间隔。

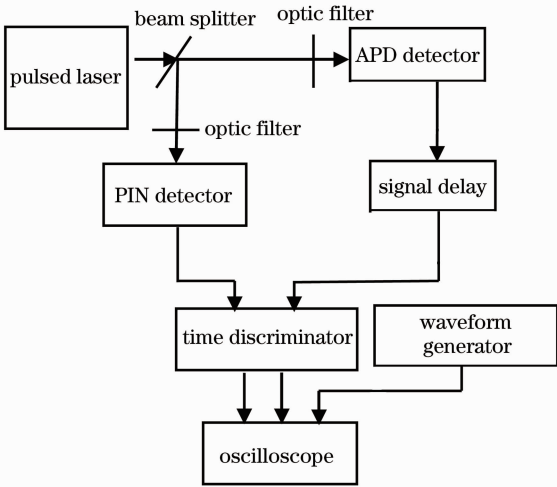


图 3 实验方案

Fig. 3 Scheme of experiment

5.2 实验标定

为了准确评价三角波参考信号对时间间隔测量误差的影响, 需要首先标定时刻鉴别电路输出的开始计时脉冲和停止计时脉冲的抖动误差。实验方案中, 脉冲激光器输出功率和电压比较器的阈值电压都是固定的, 光电探测器的噪声很小(约 3 mV), 同时使用的高速电压比较器 (ADCMP582) 的输出抖动只有 10 ps, 因此开始计时脉冲和停止计时脉冲的

抖动误差很小。使用安捷伦 9254A 示波器观察时刻鉴别电路输出的信号, 开始计时脉冲和停止计时脉冲的抖动误差约 30 ps。

表 1 实验设备参数

Table 1 Parameters of experimental devices

Device	Parameter	Value
Pulsed laser	Wavelength	1060 nm
	Frequency	5 MHz
	Rise time	~300 ps
Optic splitter	Proportion	~ 3/97
Optic filter	Wavelength range	(1060±10) nm
	Peak transmittance	80%
PIN detector	Response wavelength	800~1550 nm
	Rise time	~300 ps
	3 dB bandwidth	1 GHz
APD detector	Response wavelength	800~1550 nm
	Rise time	~300 ps
	3 dB bandwidth	1 GHz
Waveform generator (Agilent33250A)	Waveform	Triangle signal
	Frequency	1 MHz
	Frequency stability	2×10^{-6}
	v_{pp}	380 mV
	Offset voltage	190 mV
Signal delay	Ramp	50%
	Linearity	<0.1% output v_{pp}
	Delay time	100 ns
Time discriminator	3 dB bandwidth	1 GHz
	Voltage comparator	ADCMP582
Oscilloscope (Agilent9254A)	Threshold voltage	20 mV
	Sample rate	20 GHz
	ADC bits	12 bit

5.3 数据处理方法

5.3.1 噪声因子的计算方法

将示波器记录的实验数据导入 Matlab 软件中, 分析其中三角波参考信号的数据:

1) 遍历三角波参考信号数据, 使用迭代法筛选出三角波参考信号每个周期内的波峰值 (V_p);

2) 计算波峰值的平均值 ($V_{s_p_mean}$) 和标准方差 (V_{n_stb});

3) 将步骤 2) 中得到的数值, 代入(5)式中, 计算出三角波参考信号的噪声因子。

在表 1 所示的实验条件下, 得到如图 4 所示的 5000 次三角波参考信号的波峰值分布情况, 计算可知波峰平均值 $V_{s_pp_mean} = 373.3\text{ mV}$, 波峰标准方差 $V_{n_std} = 1.3\text{ mV}$, 三角波参考信号的噪声因子 $\epsilon = 0.0034$ 。

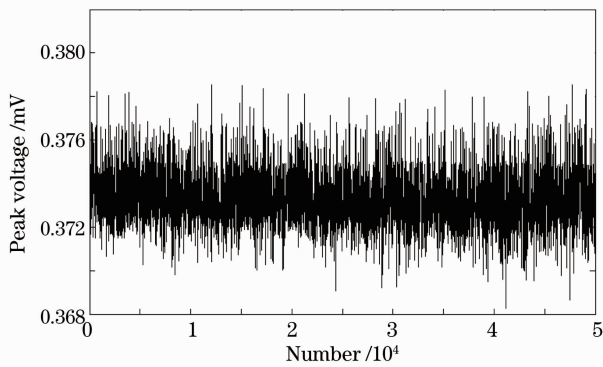


图4 三角波参考信号的波峰值统计图
Fig. 4 Statistical graph of peaks in triangle reference signal

5.3.2 时间间隔的计算方法

将示波器记录的实验数据导入 Matlab 软件中, 在一个时间间隔测量周期内:

- 1) 以开始计时脉冲信号上升沿的半高点作为开始计时时刻, 获取三角波参考信号的电压值 V_1 ;
- 2) 以停止计时脉冲信号上升沿的半高点作为停止计时时刻, 获取三角波参考信号的电压值 V_2 ;
- 3) 记录开始计时时刻到停止计时时刻, 三角波参考信号经历的极值点信息 n_{p1} 、 n_{p2} 和 V_{type} ;
- 4) 将步骤 1)~3) 中的数据代入(1)式, 计算得到开始计时脉冲到停止计时脉冲的时间间隔, 在表 1 所示的实验条件下, 得到如图 5 所示的 5000 次时间间隔测量结果生成的直方图。统计结果表明, 时间间隔的平均值是 102.0 ns, 标准方差是 4.2 ns。

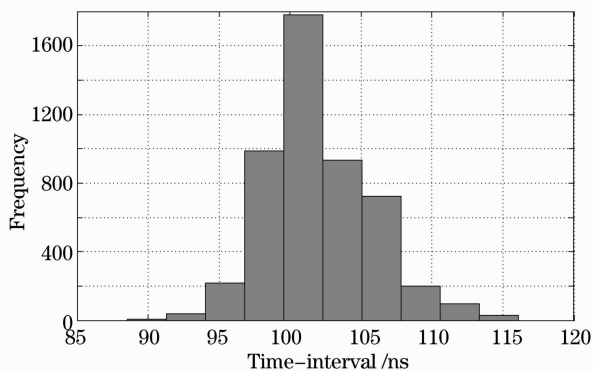


图5 时间间隔统计直方图
Fig. 5 Statistic histogram of time-interval

5.4 噪声因子对时间间隔测量精度的影响

通过改变表 1 中信号发生器的电压峰值和偏置电压, 可以得到不同波峰电压值(波谷电压值始终为 0)的三角波参考信号, 使用 4.3 节的数据处理方法, 分别计算出三角波参考信号的噪声因子和时间间隔的标准方差。由于使用示波器记录实验数据, 示波

器本身存在噪声, 三角波参考信号的噪声因子难以做到很小, 同时三角波参考信号的噪声因子较大时又没有研究意义。图 6 为三角波参考信号的噪声因子与时间间隔标准方差的变化关系图。

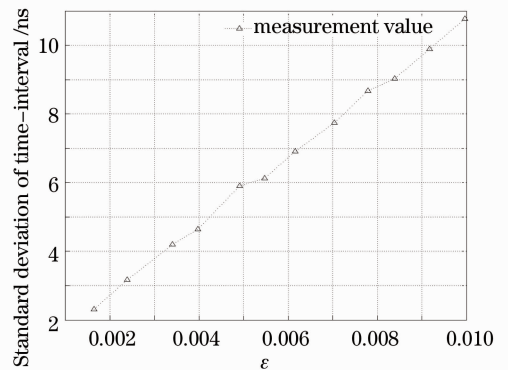


图6 时间间隔测量标准方差与噪声因子关系曲线
Fig. 6 Relationship between standard deviation of time-interval and noise factor

由图 6 所示的实验结果可知:

- 1) 实验结果较真实地反映了时间间隔标准方差与噪声因子之间的关系。根据数理统计学知识, 当统计样本满足随机性和独立性, 而且样本数足够很大时, 能很好地代表总体。实验中, 每个测量值都是根据随机记录约 5000 个样本后计算出来的, 因此具有一定的真实性。
- 2) 当三角波参考信号的频率一定时, 时间间隔的标准方差基本和噪声因子成线性关系。图 6 中, 三角波参考信号的噪声因子从 0.01 降低到 0.001, 时间间隔的标准方差也随之降低了约 90%。
- 3) 在三角波参考信号的频率为 1 MHz 的条件下, 当噪声因子取 0.001 时, 测量得到的时间间隔标准方差约为 2 ns。

6 结 论

借鉴插值法思想, 将时间间隔转换为三角波参考信号的电压信息, 在理论上探索了文中测量方法的可行性。理论仿真结果表明, 使用较低频率的三角波参考信号可实现厘米级的时间间隔测量精度和较大的时间间隔测量范围。受实验条件限制, 文中测量方法的测量距离较短, 测量精度相对较低, 但实验结果已经能够充分说明三角波参考噪声对测量误差的影响机理, 这为下一步研究工作提供了一定的参考依据。因此, 后续的研究工作已经积极开展, 借助现有成熟的信号发生电路技术及信号滤波技术, 力求提高三角波参考信号的频率和减低噪声, 实现

厘米量级的实时测量系统。

参 考 文 献

- 1 M. C. Amann, T. M. Bosch, M. Lescure *et al.*. Laser ranging: a critical review of unusual techniques for distance measurement [J]. *Opt. Eng.*, 2001, **40**(1): 10~19
- 2 Jia Fangxiu, Ding Zhenliang, Yuan Feng. Phase shift laser rangefinder receiver system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(10): 2377~2384
贾方秀, 丁振良, 袁 锋. 相位法激光测距接收[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(10): 2377~2384
- 3 Tian Yuzhen, Zhao Shuai, Guo Jin. Analysis of non-cooperative target photon counting laser ranging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(5): 0514002
田玉珍, 赵 帅, 郭 劲. 非合作目标光子计数激光测距技术研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(5): 0514002
- 4 Liu Miao, Yang Xueyou, Liu Changjie. Phase shift laser range finding with a novel quadrature modulation method and system implementation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(2): 0208004
刘 邈, 杨学友, 刘常杰. 正交混频相位式激光测距方法与系统实现[J]. *中国激光*, 2012, **39**(2): 0208004
- 5 Wang Jianyu, Hong Guanglie, Bu Hongyi *et al.*. Study on airborne scanning lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2585~2589
王建宇, 洪光烈, 卜弘毅等. 机载扫描激光雷达的研制[J]. *光学学报*, 2009, **29**(9): 2585~2589
- 6 Yuan Hongwu, Mei Haiping, Huang Yinbo *et al.*. Research on atmospheric refraction correction algorithm and model for satellite laser range-finding [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0401004
袁宏武, 梅海平, 黄印博等. 星载激光测距大气校正算法与模型研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(4): 0401004
- 7 Zheng Xiangming, Li Zhulian, Fu Honglin *et al.*. 1.2 m telescope satellite co-optical path kHz laser ranging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(5): 0512002
郑向明, 李祝莲, 伏红林等. 云台1.2 m望远镜共光路千赫兹卫星激光测距系统[J]. *光学学报*, 2011, **31**(5): 0512002
- 8 B. Al-Qudsi, A. A. H. Ameri, A. Bangert. Low cost highly precision time interval measurement unit for radar applications [C]. Microwave Conference, 2012. 1~4
- 9 Hu Yihua, Wei Qingnong, Liu Jianguo *et al.*. Using A/D converter to improve precision of time interval measurement in pulse laser range finder [J]. *Laser Technology*, 1997, **21**(3): 189~192
胡以华, 魏庆农, 刘建国等. 采用模数转换技术提高脉冲激光测距的测时精度 [J]. *激光技术*, 1997, **21**(3): 189~192
- 10 Yang Chengwei, Chen Qiansong, Lin Yan *et al.*. Measurement on time-interval in pulsed laser ranging and error analysis [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, **32**(2): 123~126
杨成伟, 陈千颂, 林 彦等. 脉冲激光测距时间间隔测量及误差分析 [J]. *红外与激光工程*, 2003, **32**(2): 123~126
- 11 Wang Hongzhe, Xin Desheng, Zhang Jianjia *et al.*. Pulsed laser ranging time-interval measuring technique [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(8): 1751~1754
王洪喆, 辛德胜, 张剑家等. 脉冲激光测距时间间隔测量技术 [J]. *强激光与粒子束*, 2010, **22**(8): 1751~1754
- 12 M. Zielinski, D. Chaberski, M. Kowalski *et al.*. High-resolution time-interval measuring system implemented in single FPGA device [J]. *Measurement*, 2004, **35**(3): 311~317
- 13 Zhu Lei, Huang Genghua, Ouyang Junhua *et al.*. Study on time interval measurement system in photo counting imaging LIDAR [J]. *J. Infrared and Millimeter Waves*, 2008, **27**(6): 461~464
朱 磊, 黄庚华, 欧阳俊华等. 光子计数成像激光雷达时间间隔测量系统研究 [J]. *红外与毫米波学报*, 2008, **27**(6): 461~464
- 14 Qu Bayi, Zhou Wei, Chen Faxi *et al.*. Development of high precision time interval measurement module [J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2009, **30**(7): 1476~1480
屈八一, 周 渭, 陈发喜等. 高精度时间间隔测量仪的研制 [J]. *仪器仪表学报*, 2009, **30**(7): 1476~1480

栏目编辑: 何卓铭