

激光引信复合时刻鉴别法的漂移误差补偿

查冰婷^{1,2*}, 王德利¹, 张乐琪¹, 谢克峰³

¹南京理工大学智能弹药技术国防重点学科实验室, 江苏 南京 210094;

²南京理工大学常熟研究院有限公司, 江苏 常熟 215513;

³湖北航天技术研究院总体设计所, 湖北 武汉 430034

摘要 针对激光引信常用的恒比定时时刻鉴别法的饱和漂移误差问题,提出了一种前沿判别与恒比定时复合的时刻鉴别方法及其误差补偿模型。建立了恒比定时时刻鉴别的漂移误差模型,分析了饱和漂移误差随回波信号理论峰值电压的变化规律;提出了基于复合时刻鉴别法的漂移误差补偿方法,建立了复合时刻鉴别的漂移误差补偿数学模型,得到了修正的脉冲激光测距公式,并进行了测距精度验证实验。结果表明,复合时刻鉴别及误差补偿修正方法可有效减小系统误差,测距精度可控制在 ± 0.3 m 以内。

关键词 测量; 激光引信; 饱和漂移误差; 复合时刻鉴别; 误差补偿

中图分类号 TN248.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1004002

Compensation of Drift Error in Identification Method of Laser Fuze Composite Moment

Zha Bingting^{1,2*}, Wang Deli¹, Zhang Leqi¹, Xie Kefeng³

¹ZNDY Ministerial Key Laboratory, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China;

²Changshu Research Institute Co. Ltd., Nanjing University of Science and Technology, Changshu, Jiangsu 215513, China;

³General Design Institute, Hubei Institute of Aerospace Technology, Wuhan, Hubei 430034, China

Abstract Aiming at the saturation drift error occurring in the identification method of the constant ratio timing which is commonly used in laser fuze, an identification method of the composite moment between the front edge discrimination and the constant ratio timing and its error compensation model are proposed. The drift error model for the identification of the constant ratio timing is established and the variation law of the saturation drift error with the theoretical peak voltage of echo signals is analyzed. The compensation method of drift errors based on the composite moment identification method is proposed, and a mathematical model for compensating drift errors in the identification of the composite moment is established. The modified pulsed laser ranging formula is obtained and the verification experiment of the measurement precision is carried out. The results show that, the system errors can be effectively reduced by the composite moment identification and the error compensation correction methods and the ranging precision can be controlled within ± 0.3 m or less.

Key words measurement; laser fuze; saturation drift error; identification of composite moment; error compensation

OCIS codes 120.4820; 140.3538; 140.2020

1 引言

脉冲激光探测具有精度高、响应快、抗电磁干扰

性能好等优势,被广泛应用于近炸引信。脉冲激光测距通过测量光脉冲信号往返的飞行时间,从而实现目标距离的测量。现有的脉冲激光测距系统普

收稿日期: 2018-03-15; 修回日期: 2018-05-07; 录用日期: 2018-05-22

基金项目: 国家自然科学基金(51709147)

* E-mail: zhabingting@163.com

遍采用时间数字转化器(TDC)与处理器复合的信号处理技术实现对光飞行时间的精确测量^[1]。TDC芯片单次测量的分辨率可达 90 ps,通过多次测量求平均可以将分辨率提高到 20 ps^[2]。但脉冲激光测距的精度除与时间间隔测量的精度有关外,还与时刻鉴别精度密切相关。激光引信受体积和过载的限制,发射激光脉冲的宽度较大,因此对时刻鉴别精度的要求更高。为保证回波功率大幅度变化情况下的时刻鉴别精度,通常采用恒比定时时刻鉴别法,其精度高、适应性好,但要求回波信号不能发生饱和或失真现象^[3-4]。激光引信的探测范围大,当在近程遇到强反射目标时,极有可能出现接收器饱和的情况,产生饱和和漂移误差,严重影响测距精度^[5]。

为消除激光测距系统中漂移误差对测量的影响,通常采用误差补偿的方式。国内的研究主要集中于前沿判别法的误差补偿,对于恒比定时时刻鉴别中由回波信号饱和产生的漂移误差及恒比定时法的误差补偿鲜有深入的研究^[6-9]。本文针对恒比定时时刻鉴别中的漂移误差,提出了一种

复合时刻鉴别误差补偿方法,根据推导的恒比定时法漂移误差的解析表达式,分析了产生饱和和漂移误差的临界条件,并建立了基于复合时刻鉴别法的漂移误差补偿的数学模型,通过测量回波信号上升沿斜率动态调整的误差补偿量,对测量距离进行了修正,提高了激光测距系统(尤其是信号饱和时)的测距精度。

2 脉冲激光引信的测距原理

脉冲激光引信的测距原理如图 1 所示,激光器在触发信号控制下发射激光脉冲,并将同步信号输出给 TDC 芯片。激光脉冲在目标表面发生反射后,被接收系统所接收并经放大滤波处理后送入时刻鉴别电路,时刻鉴别电路根据相应的鉴别方法完成时刻鉴别后将输出信号给 TDC 芯片。时间数字转换器 TDC-GP22 以同步信号作为开始计时信号,以回波信号作为停止计时信号,测量二者之间的时间间隔,并将结果反馈给微控制器(MCU),MCU 根据激光脉冲飞行时间计算出目标距离。

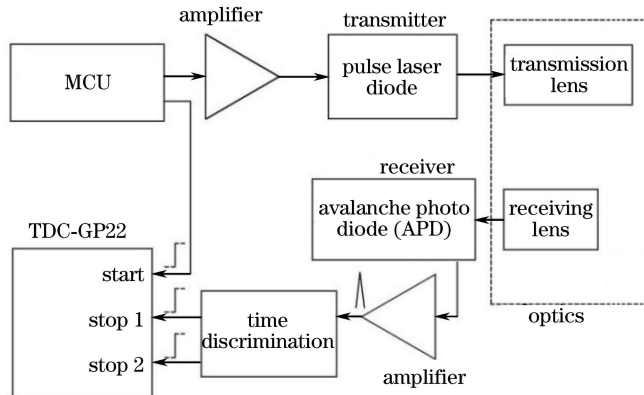


图 1 脉冲激光引信的测距原理示意图

Fig. 1 Schematic of pulsed laser fuze ranging principle

3 恒比定时时刻鉴别的漂移误差模型

恒比定时时刻鉴别法的工作原理如图 2 所示,其中横轴 t 为时间,纵轴 V_s 为信号电压。目标回波信号 $V_i(t)$ 被分为两路,分别经延时和衰减处理得到 $V_1(t)$ 和 $V_2(t)$, $V_3(t) = V_1(t) - V_2(t)$,通过高速比较器对两路信号进行比较,以 $V_0(t)$ 表示比较器的输出信号,捕捉信号跳变点 t_p 为回波时刻。当选定触发比后,跳变点会保持在信号幅值的恒定比例位置,不随信号幅度的改变而改变,以保证较高的测距精度^[4,10-11]。但是,近程存在强反射目标容易导致接收探测器发生饱和,此时回波脉冲信号的功

率变化和电路本身的非理想性会使跳变点前移,引起漂移误差,该误差称为饱和漂移误差。建立回波信号正常和饱和情况下的线性化模型,如图 3 所示,对正常和饱和情况下的漂移误差进行计算分析。

如图 3 所示,模型 P_1 、 P_2 分别为信号正常与饱和时的时刻鉴别情况。为保证比较器正确触发,恒比定时法的实际衰减电路中引入一个极小的偏置电压 ΔV ,以屏蔽噪声,并抑制波形畸变^[7],因此衰减信号的低电平不是 0 而是 ΔV 。 ΔV 的存在将影响漂移误差,在系统误差计算时需加以考虑。如图 3 所示, t_p 为正常信号的跳变点即鉴别时刻点, t_p' 为饱和信号的鉴别时刻点,根据数学关系有

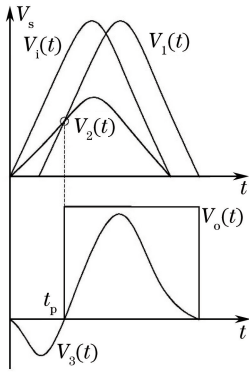


图 2 恒比定时时刻鉴别原理

Fig. 2 Identification principle of constant ratio timing

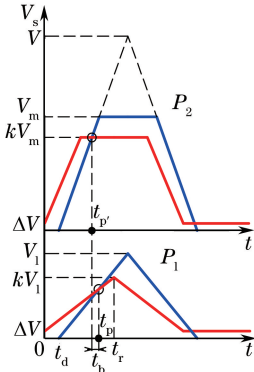


图 3 漂移误差的线性化模型

Fig. 3 Linearized model of drift errors

$$t_p = \frac{t_d}{1-k} + \frac{\Delta V}{(1-k)V} t_r, \quad (1)$$

$$t_{p'} = t_d + \frac{kV_m + \Delta V}{V} t_r, \quad (2)$$

式中 V 为回波信号的理论峰值电压, V_m 为接收放大电路的饱和输出电压, t_r 为脉冲上升沿时间, t_d 为延时电路的延时时间, k 为衰减电路的衰减系数。通常的恒比定时法不考虑偏置电压 ΔV 的影响, 直接以(1)式中的第一项 $t_d/(1-k)$ 作为跳变点的时间基准, 则 $t_{p'}$ 与基准时刻的时间间隔即为饱和和漂移误差, 记为 t_b , 其表达式为

$$t_b = \frac{kV_m + \Delta V}{V} t_r - \frac{k}{1-k} t_d. \quad (3)$$

对图 2 分析发现, 只有当信号饱和到一定程度后才会产生饱和和漂移误差, 临界条件如图 4 所示, 此时有 $t_p = t_{p'}$, 联立(1)式和(2)式, 可计算出出现饱和和漂移误差的最小理论峰值电压 V_{\min} 为

$$V_{\min} = \frac{(1-k)V_m - \Delta V}{t_d} t_r. \quad (4)$$

当回波信号的理论峰值电压 V 低于 V_{\min} 时, 跳变点为 t_p ; 当 V 高于 V_{\min} 后, 跳变点变为 $t_{p'}$, 出现饱

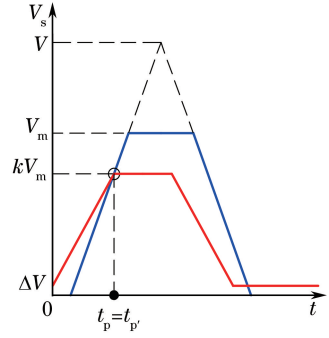


图 4 产生饱和和漂移误差的临界条件

Fig. 4 Critical conditions for generation of saturation drift errors

和漂移误差 t_b 。

若激光引信回波信号的上升沿时间 t_r 为 100 ns, 恒比定时法的衰减系数 k 为 0.5, 延迟时间 t_d 为 30 ns, 放大器的饱和输出电压 V_m 为 2.3 V, 偏置电压 ΔV 为 0.125 V, 则最小理论峰值电压 V_{\min} 为 3.4 V。当回波信号的理论峰值电压 V 为 3.4 ~ 50 V 时, 饱和和漂移误差 t_b 随理论峰值电压 V 的变化规律如图 5 所示。当信号饱和时, 饱和和漂移误差 t_b 使时刻鉴别的跳变点前移, 导致测量时间普遍偏小, 最大误差可达 28 ns, 严重影响系统的测距精度。

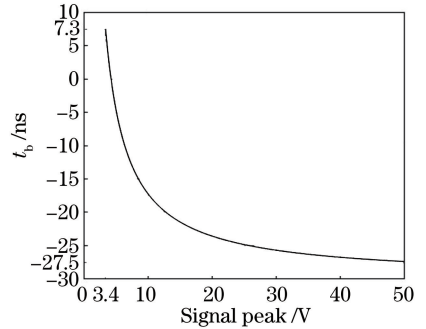


图 5 饱和和漂移误差随回波信号峰值电压的变化规律

Fig. 5 Saturation drift error versus peak voltage of echo signal

4 基于复合时刻鉴别法的漂移误差补偿

漂移误差难以通过系统本身进行改进, 需采用误差补偿的方式加以消除。根据误差的主要来源, 误差补偿分为二部分, 一部分是恒比定时漂移误差的补偿, 另一部分是固定电路延迟的补偿。若固定电路延迟为 t_D , 当未产生饱和和漂移误差 t_b 时, 跳变点为 t_p , 漂移误差的补偿量 t_{error1} 可表示为

$$t_{\text{error1}} = t_D + t_p = t_D + \frac{t_d}{1-k} + \frac{\Delta V}{(1-k)V} t_r. \quad (5)$$

当系统产生饱和和漂移误差后, 跳变点为 $t_{p'}$, 漂

移误差补偿量 t_{error2} 为

$$t_{error2} = t_D + t_{p'} = t_D + t_d + \frac{kV_m + \Delta V}{V} t_r \quad (6)$$

由(5)、(6)式可知,同一恒比定时激光测距系统在饱和和漂移误差产生前后,其漂移误差补偿量 t_{error1} 和 t_{error2} 仅随回波信号的理论峰值电压 V 变化。当脉冲上升沿时间 t_r 不变时, V 表示信号上升沿斜率的大小,因此 t_{error1} 和 t_{error2} 可看作回波信号上升沿斜率的函数,可以通过测量脉冲上升沿的斜率对系统的漂移误差进行实时修正。而回波信号的上升沿斜率需通过两个时间点的回波幅值计算得到,无法由恒比定时时刻鉴别法获得。

为此提出一种复合时刻鉴别法,其工作原理图如图6所示,其中 V_m 为输入信号, V_{th} 为前沿鉴别器的判别阈值。系统包含两个时刻鉴别器,回波信号同时经前沿鉴别器和恒比定时鉴别器产生两个停止计时信号, TDC 在同步信号开始计时后分别测量得到两个鉴别器输出的停止时间 t_1 和 t_2 , 信号模型如图7所示。

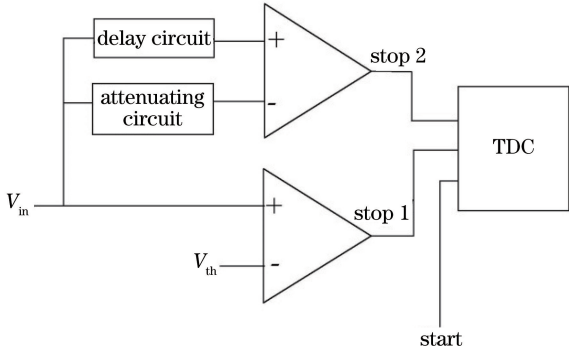


图6 复合时刻鉴别原理

Fig. 6 Principle of composite moment identification

恒比定时鉴别器和前沿鉴别器分别对回波信号的上升沿进行鉴别,产生两个跳变点。当未产生饱和和漂移误差时, t_2 对应于恒比定时跳变点 t_p ; 出现饱和和漂移误差后, t_2 对应于恒比定时跳变点 $t_{p'}$ 。根据

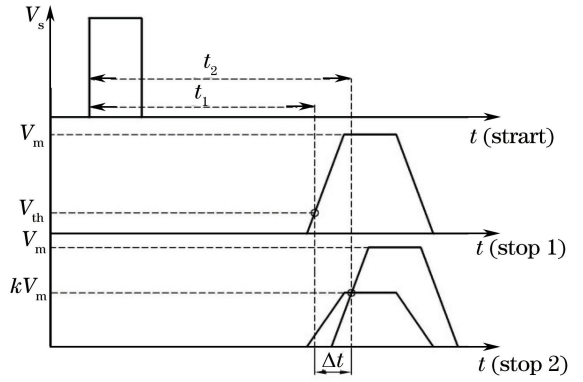


图7 复合时刻鉴别法的信号模型

Fig. 7 Signal model of composite moment identification method

(2)式和图7,未出现饱和和漂移误差时,两个鉴别器跳变点之间的时间间隔 Δt_1 为

$$\Delta t_1 = t_p - t_1 = \frac{t_d}{1-k} + \frac{\Delta V - (1-k)V_{th}}{(1-k)V} t_r \quad (7)$$

出现饱和和漂移误差后,两个鉴别器跳变点之间的时间间隔 Δt_2 为

$$\Delta t_2 = t_{p'} - t_1 = t_d + \frac{kV_m + \Delta V - V_{th}}{V} t_r \quad (8)$$

根据(7)、(8)式,对于同一激光测距系统,回波信号的上升沿斜率与复合时刻鉴别法两跳变点之间的时间间隔 Δt 具有严格的数值对应关系,可通过测量两跳变点的时间间隔 Δt 计算得到回波信号的理论峰值电压 V 。

出现饱和和漂移误差的最小理论峰值电压 V_{min} 对应的最小时间间隔为 Δt_{min} , 联立(4)式和(8)式,得到

$$\Delta t_{min} = \frac{V_m - V_{th}}{(1-k)V_m - \Delta V} t_d \quad (9)$$

当时间间隔 Δt 小于 Δt_{min} 时,利用正常时的漂移误差补偿量 t_{error1} 修正系统误差;时间间隔 Δt 大于 Δt_{min} 后,系统出现饱和和漂移误差,需利用饱和时的漂移误差补偿量 t_{error2} 对系统误差进行修正。综合(5)~(9)式,得到误差修正公式为

$$t_{error} = \begin{cases} t_D - \frac{V_{th} \cdot t_d}{\Delta V - (1-k)V_{th}} + \frac{\Delta V \cdot \Delta t}{\Delta V - (1-k)V_{th}}, & \Delta t \leq \Delta t_{min} \\ t_D + t_d + \frac{kV_m + \Delta V}{kV_m + \Delta V - V_{th}} (\Delta t - t_d), & \Delta t > \Delta t_{min} \end{cases} \quad (10)$$

修正后的脉冲激光测距公式为

$$R = \frac{1}{2} c (t_2 - t_{error}), \quad (11)$$

式中 c 为光速, t_2 为恒比定时鉴别器通道的测量时间。

5 误差补偿实验

为验证理论模型的正确性,开展测距实验。实验使用波长为 905 nm 的激光引信,发射峰值功率

为 75 W, 脉冲脉宽为 100 ns, 重复频率为 3 kHz, 目标选用平均反射系数 $\rho=0.3$ 的标准漫反射板。复合时刻鉴别器中恒比定时衰减系数 k 为 0.5, 延迟时间 t_d 为 30 ns, 饱和输出电压 V_m 为 2.3 V, 偏置电压 ΔV 为 0.125 V, 前沿判别阈值 V_{th} 为 1.9 V, 处理电路延迟 t_D 为 184 ns。由(9)式可计算得到系统出现饱和和漂移误差的最小时间间隔 Δt_{min} 为 11.7 ns。根据(10)式得

$$t_{error} = \begin{cases} -0.15\Delta t + 253, & \Delta t \leq 11.7 \text{ ns} \\ -2.04\Delta t + 275, & \Delta t > 11.7 \text{ ns} \end{cases} \quad (12)$$

将目标分别置于 2.5~8 m 范围内以 0.5 m 为间隔的 12 个位置处, 测量各距离点上复合时刻鉴别的两跳变点之间的时间间隔 Δt 与测距时间误差, 每处测量 10 次取平均值以消除抖动误差的影响, 得到时间间隔 Δt 随目标真实距离的变化关系, 如图 8 所示。

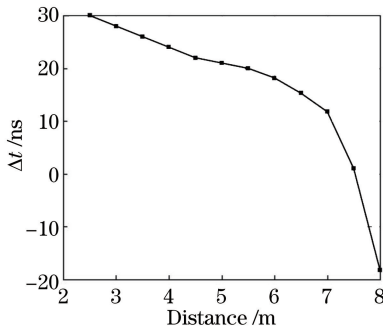


图 8 时间间隔随目标距离的变化规律
Fig. 8 Time interval versus target range

由图 8 可知, 目标在 2.5~6.5 m 时 Δt 均大于 11.7 ns, 回波信号发生饱和并在时刻鉴别过程中产生饱和和漂移误差, 目标距离越远, Δt 越小, 表明随着回波信号饱和程度的降低, 两跳变点逐渐接近; 目标距离大于 7 m 后 Δt 小于 11.7 ns, 在时刻鉴别过程中不再有饱和和漂移误差; 目标距离进一步增大, 当信号不再饱和后, 前沿鉴别器的跳变点将在恒比定时鉴别器的跳变点之后, Δt 变为负值。

时间误差与 Δt 的变化关系曲线如图 9 所示, 其中实线为由(8)式计算得到的理论曲线, 虚线为实验测量结果。可以看出, 理论误差修正曲线与实验数据曲线基本一致, 回波信号饱和引起的饱和和漂移误差得到了较好的补偿。

(12)式代入(11)式得到修正的激光引信测距公式为

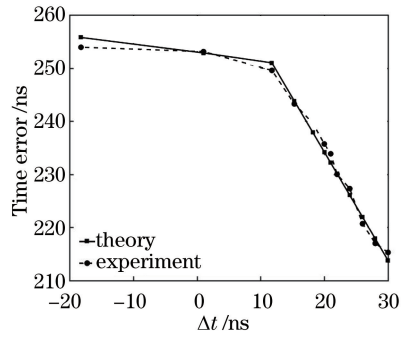


图 9 时间误差曲线
Fig. 9 Time error curve

$$R = \begin{cases} \frac{1}{2}c(t_2 + 0.15\Delta t - 253), & \Delta t \leq 11.7 \text{ ns} \\ \frac{1}{2}c(t_2 + 2.04\Delta t - 275), & \Delta t > 11.7 \text{ ns} \end{cases} \quad (13)$$

采用修正后的测距公式对测量时间进行误差补偿, 误差补偿前后系统的测距误差如图 10 所示, 其中虚线为补偿前的系统测距精度, 代表恒比定时激光测距系统的测距精度; 实线为补偿后的系统测距精度, 代表复合时刻鉴别激光测距系统经(13)式误差补偿后的测距精度。

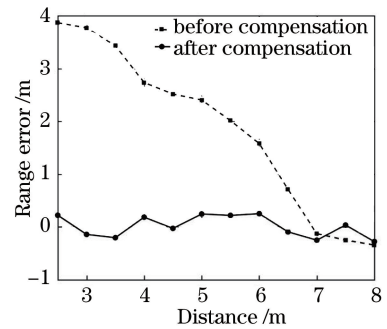


图 10 误差补偿前后系统的测距误差
Fig. 10 System ranging errors before and after error compensation

由图 10 可知, 目标距离越近, 信号饱和程度越大, 测距偏差越大, 最大达到 3.9 m, 当不再有饱和和漂移误差(目标距离不小于 7 m)后, 测距精度较高。补偿后的系统测距精度曲线表明误差补偿公式对漂移误差(包括饱和和漂移误差)有较好的控制效果, 有效提高了系统在回波信号正常和饱和时的测距精度。修正后系统仍存在一定的测距误差, 其主要来源于噪声引起的时刻抖动, 特别是对于激光引信这类脉冲宽度较宽的测距系统, 抖动效应更为剧烈, 同时实验中还存在人工测量误差。实验结果表明, 经复合时刻鉴别修正后, 系统测距精度明显提升, 补偿

了近距离处饱和漂移误差引起的测距偏差,提高了传统恒比定时激光测距系统的测距精度,可将系统精度控制在 ± 0.3 m以内。

6 结 论

建立了恒比定时时刻鉴别漂移误差的数学模型,讨论了信号饱和对测量精度的影响,分析了产生饱和漂移误差的临界条件,提出了复合时刻鉴别方法及其误差补偿模型,推导了误差补偿表达式,并得到了修正后的测距公式。开展了测距实验,结果表明,信号饱和时测距结果普遍偏离真实距离,最大测量误差达到 3.9 m;采用复合时刻鉴别法并进行误差补偿后,系统测距精度可控制在 ± 0.3 m以内,漂移误差的修正效果良好,可提高激光引信对目标和环境的适应能力。研究结论为激光引信测距系统精度的优化提供了参考。

参 考 文 献

- [1] Jiang H J, Lai J C, Wang C Y, *et al.* Research on ranging property of laser radar and its range accuracy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(5): 234-240.
姜海娇, 来建成, 王春勇, 等. 激光雷达的测距特性及其测距精度研究[J]. 中国激光, 2011, 38(5): 234-240.
- [2] Zhang L M, Zhang Y, Zhao X. Study on flight time measurement laser ranging sensor based on TDC[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2011, 30(12): 71-74.
张黎明, 张毅, 赵欣. 基于 TDC 的激光测距传感器飞行时间测量研究[J]. 传感器与微系统, 2011, 30(12): 71-74.
- [3] Wang S, Sun H Y, Guo H C. Error analysis of time discrimination module based on Simulink [J]. Laser & Infrared, 2017, 47(2): 137-143.
王帅, 孙华燕, 郭惠超. 基于 Simulink 的时刻鉴别模块误差分析[J]. 激光与红外, 2017, 47(2): 137-143.
- [4] Dai Q, Geng Y, Li Y Q, *et al.* High-precision measurement technology of laser pulse flight time based on TDC-GP21[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(7): 1706-1709.
岱钦, 耿岳, 李业秋, 等. 利用 TDC-GP21 的高精度激光脉冲飞行时间测量技术[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(7): 1706-1709.
- [5] Chen X C. Research on echo processing methods and system of pulsed laser radar[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015.
陈向成. 脉冲激光雷达回波处理方法与系统研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.
- [6] Chen R Q, Jiang Y S, Pei C. High frequency and high accuracy laser ranging system based on double thresholds leading-edge timing discrimination[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0912002.
陈瑞强, 江月松, 裴朝. 基于双阈值前沿时刻鉴别法的高频脉冲激光测距系统[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0912002.
- [7] Xu Z P, Shen H H, Yao Y, *et al.* Scannerless laser active imaging validating system by directly ranging [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(2): 251-259.
徐正平, 沈宏海, 姚园, 等. 直接测距型无扫描激光主动成像验证系统[J]. 光学精密工程, 2016, 24(2): 251-259.
- [8] Feng G X, Chang B C. Study of high precision laser ranging technology [J]. Laser & Infrared, 2007, 37(11): 1137-1140.
冯国旭, 常保成. 高精度激光测距技术研究[J]. 激光与红外, 2007, 37(11): 1137-1140.
- [9] Ma Y, Li S, Yang F L, *et al.* Model of waveform parameters for laser altimeter system under flattened Gaussian beams[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(4): 0413002.
马跃, 李松, 阳凡林, 等. 激光测高仪平顶高斯光束条件下的回波参数模型[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0413002.
- [10] Yao P P, Tu B H, Wang X J, *et al.* Design and application of high-precision threshold circuit for laser proximity fuze[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(4): 1156-1161.
姚萍萍, 涂碧海, 王相京, 等. 高精度激光近炸引信阈值电路设计与应用[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(4): 1156-1161.
- [11] 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.