

脉冲激光测距中阈值—峰值双通道时刻鉴别方法

吴 钰^{1,2}, 周木春^{1,2*}, 赵 琦², 李扬彦², 吴李勇²

- (1. 南京理工大学 近程高速目标探测技术国防重点学科实验室, 江苏 南京 210094;
2. 南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 脉冲激光测距系统由于其精度高、抗干扰能力强等优点, 广泛应用于激光雷达、激光引信等领域, 但是常用的时刻鉴别法存在误差, 制约了动态测距精度的提升, 主要原因是回波脉冲的衰减和展宽。针对这一问题, 提出一种采用恒阈值和峰值双通道的时刻鉴别新方法。该方法通过引入激光发射脉冲的理论方程, 建立了回波波形的时域分布模型, 可以实现不受到衰减和展宽的影响的准确回波鉴别。在此基础上设计了双通道时刻鉴别的脉冲激光测距系统。实验结果表明, 采用双通道时刻鉴别方法可以将近程测距的误差控制在 ± 3 cm 以内, 并可通过多次测量对精度进一步提升, 解决了时刻鉴别误差制约测距精度提高的瓶颈问题。

关键词: 激光测距; 时刻鉴别方法; 双通道; 时域分布

中图分类号: TN247 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0606002

Threshold—peak dual—channel time discrimination method for pulse laser ranging

Wu Yu^{1,2}, Zhou Muchun^{1,2*}, Zhao Qi², Li Yangyan², Wu Liyong²

- (1. Ministerial Key Laboratory of JGMT, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
2. School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Pulsed laser ranging system is widely used in laser radar, laser guidance and other fields due to its advantages of high precision, strong anti-interference ability, etc. However, the commonly used timing discrimination method has errors and restricts the improvement of dynamic ranging accuracy, which was mainly caused by the attenuation and widening of the echo pulse. A new method of timing discrimination was presented in view of this problem, which was based on the dual-channel timing discrimination method. The dual-channel timing discrimination method was composed of constant threshold timing discrimination method and peak timing discrimination method. Through the dual-channel timing discrimination method, accurate echo timing discrimination can be achieved without being affected by attenuation and broadening. By introducing the theoretical equations of the laser emission pulse, the time domain distribution model of the echo waveform was established. The experimental results show that the short ranging error can be controlled within ± 3 cm by adopting the dual-channel timing

收稿日期: 2019-01-10; 修订日期: 2019-02-20

基金项目: 国家自然科学基金(61675098); 中国博士后科学基金(2016M601817); 中央高校基本科研业务费专项资金(30920120180101)

作者简介: 吴钰(1994-), 女, 硕士生, 主要从事激光测距方面的研究。Email: Michelle_wuyu@126.com

导师简介: 周木春(1980-), 男, 讲师, 博士, 主要从事光电信息探测与处理方面的研究。Email: mczhou@sohu.com

discrimination method, and the accuracy can be further improved by multiple measurements, which solves the bottleneck problem that the timing discrimination error restricts the dynamic ranging accuracy.

Key words: laser ranging; timing discrimination method; dual-channel; time domain distribution

0 引言

激光由于其主动性好、方向性强、抗电磁干扰性强以及准直精度高等优点^[1],在近程测距方面取得广泛应用,如激光雷达汽车智能防撞、城市建筑和规划、激光近炸引信、激光主动制导等技术领域^[2-3]。这类探测器与目标物体都在相对运动的动态测距中,脉冲激光探测的回波脉冲受到发射激光的性质、目标的光学特性、传输介质的传输特性、接收器件响应延迟等因素的影响^[4-5],在时域上会产生回波波形的展宽和幅值的变化,由此导致的时刻鉴别误差,成为了制约动态测距精度提升的重要瓶颈^[6]。精度是脉冲激光测距最重要的性能指标之一,对激光测距系统进行精度分析,研究时刻鉴别误差产生原因并且设计精度更高的鉴别方法,对其系统设计和性能评估都具有重要的意义。

针对脉冲激光测距,国内外许多机构进行了深入研究并设计了多种方法来提升时刻鉴别精度。Jin Xiao通过连续小波变换的方法对前沿时刻鉴别的漂移误差进行补偿,设计了高精度的脉冲激光测距仪^[7];王永志针对脉冲激光测距中回波强度变化引入的时刻鉴别误差,提出一种基于回波强度测量的前沿时刻鉴别误差补偿算法^[8];陈瑞强指出采用双阈值前沿时刻鉴别法可以提升单阈值鉴别的测距精度,从而实现高精度高频率的脉冲激光测距^[9]。时刻鉴别的准确性与脉冲的时域分布密切相关,然而,目前还没有相关文献给出时刻鉴别结果与脉冲时域分布的联系以及不需要外加补偿就能直接精准测距的时刻鉴别方法。因此,建立动态测距下回波波形的时域模型,设计新的时刻鉴别方法来修正衰减和展宽引起的时刻鉴别误差是提升动态测距精度仍待解决的问题。

文中针对传统时刻鉴别方法存在误差制约了动态测距精度的问题,提出了一种基于时域的双通道脉冲激光测距时刻鉴别新方法。首先引入激光发射

脉冲的理论方程,分析了回波时刻鉴别误差产生的原理,建立了衰减和展宽后回波波形的时域分布理论模型;然后在此数学模型基础上,通过恒阈值法和峰值法双通道时刻鉴别,推导出前沿时刻、比较电平宽度、峰值时刻与回波时刻的理论关系式,由理论关系式计算出实际的飞行时间;最后通过搭建实验平台验证了理论分析的正确性和该方法的有效性。

1 基于时域模型的双通道时刻鉴别法原理

1.1 脉冲激光测距原理

脉冲激光测距主要采用飞行时间测量法(TOF)实现距离测量,触发信号驱动激光器产生激光发射脉冲,发射脉冲在目标物体处折返,一部分回波被光电探测器接收并产生电信号,经过放大和时刻鉴别后,采用时间间隔测量测得发射脉冲与回波之间的激光飞行时间来计算目标距离^[10]。

$$L = \frac{1}{2} c \cdot T \quad (1)$$

式中: L 为目标距离; c 为光速; T 为飞行时间。其中,光速可认为恒定,距离测量的大小主要随飞行时间改变。

1.2 时刻鉴别误差

由于动态测距中回波脉冲受到发射激光的性质、目标的光学特性、传输介质的传输特性、接收器件响应延迟等因素的影响,从而波形产生衰减和展宽,至于难以鉴别其真正的到达时刻而限制测距精度的提升^[11-12]。

如图1所示,脉冲激光在动态传输过程中产生了衰减和展宽,由此导致常用的时刻鉴别法如恒阈值法、峰值法和恒定比值法存在误差 Δt 。恒阈值法将回波信号的上升沿与设定的阈值 V_{th} 相同点判定为回波到达时刻,存在由衰减和展宽产生的误差 Δt_a ^[13]。峰值法将回波信号峰值判定为回波到达时刻,存在由展宽产生的误差 Δt_b 。恒定比值法将回波信号的上升沿定比分割(如50%),将分割点判定为回波到达时

刻,存在由展宽产生的误差 Δt_c [14]。

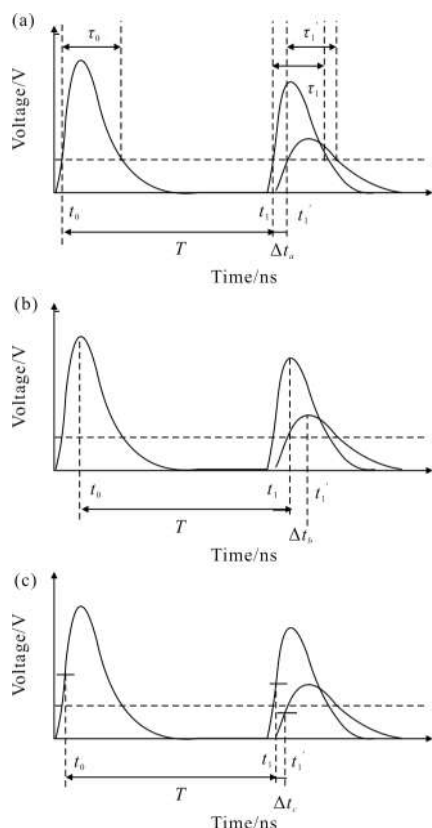


图 1 (a) 恒阈值时刻鉴别法的测距误差;(b) 峰值时刻鉴别法的测距误差;(c) 恒比值时刻鉴别法的测距误差

Fig.1 (a) Measured error in constant threshold timing discrimination; (b) measured error in peak timing discrimination; (c) measured error in constant-ratio timing discrimination

对于给定的激光发射脉冲波形,实际飞行时间 T ,到达时刻 t_1 ,表征衰减情况的回波幅值 v_1 ,以及表征展宽情况的比较电平宽度 τ_1 存在一个固定的函数关系:

$$T=f(t, v_1, \tau_1) \quad (2)$$

式中:函数 $f(t, v_1, \tau_1)$ 的形式与激光脉冲的波形有关,通常实际发射脉冲的形状不是理想的高斯波形,而是一种上升沿比下降沿陡的非对称分布。

1.3 双通道时刻鉴别法原理

为了更准确描述回波脉冲的时域分布,根据发射脉冲的实际形状,结合了高斯函数和重尾函数,采用近高斯函数作为发射脉冲时域波形的表达式^[9, 15]:

$$S_0(t)=\left(\frac{t}{\tau_{1/2}}\right)^2 \exp\left(-\frac{t}{\tau_{1/2}}\right) \quad (3)$$

式中: $\tau_{1/2}$ 为与脉冲宽度有关的参数。

回波脉冲在传输、反射和接收过程中产生的衰减可表示为:

$$\alpha=\frac{\eta_{opt} \eta_r^2 A_r \rho R_{oe} M}{R_r^2} \quad (4)$$

式中: η_{opt} 为光学系统的透射率; η_r 为单程大气衰减率; A_r 为接收孔径的面积; R_r 为目标物体的距离; R_{oe} 为目标物体的反射率; ρ 为探测器响应系数; M 为探测电路放大系数。

探测器接收的回波脉冲时域波形可表示为:

$$S_1(t)=\alpha\left(\frac{t/\beta-T}{\tau_{1/2}}\right)^2 \exp\left(-\frac{t/\beta-T}{\tau_{1/2}}\right) \quad (5)$$

式中: β 为时域展宽系数。

时刻鉴别中的恒阈值法可以检测出发射脉冲和回波的阈值到达时刻,分别记为 a 和 b ,比较电平宽度分别记为 c 和 d 。峰值法可以测得发射脉冲和回波的峰值到达时刻,分别记为 e 和 f 。

将测得的发射脉冲数据代入公式(3),由于 $S_1'(t)=0$,可以得到与脉冲宽度有关的参数 $\tau_{1/2}$:

$$\tau_{1/2}=\frac{e}{2} \quad (6)$$

将测得的回波数据和公式(6)代入公式(5),可以得到:

$$S_1(b)=\alpha\left(\frac{b/\beta-T}{\tau_{1/2}}\right)^2 \exp\left(-\frac{b/\beta-T}{\tau_{1/2}}\right)=V_{th}' \quad (7)$$

$$S_1(b+d)=\alpha\left(\frac{(b+d)/\beta-T}{\tau_{1/2}}\right)^2 \exp\left(-\frac{(b+d)/\beta-T}{\tau_{1/2}}\right)=V_{th}' \quad (8)$$

$$S_1'(f)=0 \quad (9)$$

式中: V_{th}' 为相对回波强度下的相应阈值。化简后可以得到:

$$\left(1+\frac{d}{b-f+e\beta}\right)^2=\exp\left(\frac{2d}{e\beta}\right) \quad (10)$$

$$T=\frac{f}{\beta}-e \quad (11)$$

由于 b, d, e, f 都是已知数,根据公式(10)可以求出 β ,将 β 代入公式(11)可以求出实际飞行时间 T ,从而消除了 1.2 节中由于脉冲衰减和展宽导致的时刻鉴别误差 Δt 。

因此,在发射脉冲形状满足近高斯分布的情况

下,根据公式(3)、(5)建立的发射脉冲和回波的时域公式,通过时刻鉴别中恒阈值法和峰值法测得的阈值到达时刻、比较电平宽度以及测得的峰值时刻可以计算出不受衰减和展宽影响的实际飞行时间 T ,从而实现动态测距下准确的回波时刻鉴别。

2 实验测试与结果分析

2.1 双通道时刻鉴别实验系统

为了对双通道时刻鉴别方法进行实验验证,搭建了脉冲激光测距系统,其系统构成原理框图如图2所示。其中,脉冲激光发射器发出 905 nm 的激光,脉冲宽度约为 40 ns,重复频率 50 Hz,峰值功率为 75 W。采用雪崩光电二极管(APD)来接收回波信号。

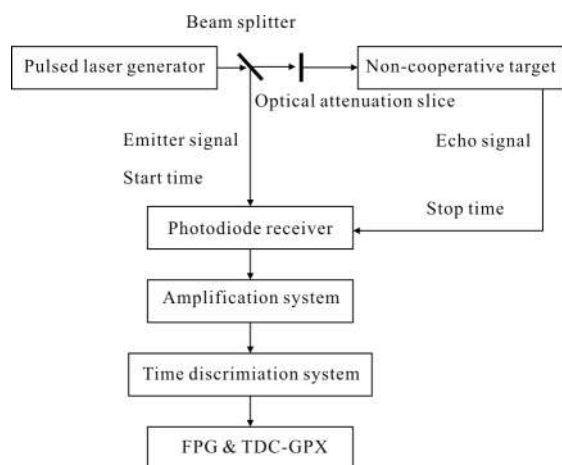


图 2 双通道时刻鉴别实验系统

Fig.2 Dual-channel time discrimination experimental system

LD 发出的脉冲光经过分光器分为两束,一束直接进入接收系统作为起始信号,相当于发射脉冲,另一束经过衰减片到达目标物后折返作为停止信号,即回波。两个信号被 APD 接收后分别经过放大系统和时刻鉴别系统。时刻鉴别系统利用 TDC-GPX 进行时间测量,在一个通道中采用恒阈值鉴别法测量回波的到达时刻和比较电平宽度,在另一个通道中采用峰值鉴别法测量回波的峰值时刻。最后,利用 FPGA 根据测得的到达时刻、峰值时刻和比较电平宽度的数据,代入上述理论公式进行计算,得到实际飞行时间。

2.2 实验结果和数据分析

根据第 1 节建立的动态测距下激光发射脉冲和

回波的时域模型进行实验。在相同距离和相同发射脉冲的情况下,回波脉冲展宽与幅值衰减有关^[9],幅值衰减主要受到目标的光学特性、传输介质的传输特性、飞行距离等因素的影响。通过在发射脉冲后加衰减片,调节衰减片的角度可以模拟不同场景下的衰减情况,由此模拟同一距离下,回波波形的幅值衰减和时域展宽现象。

经过数字示波器采样得到的激光发射脉冲信号如图 3 所示。

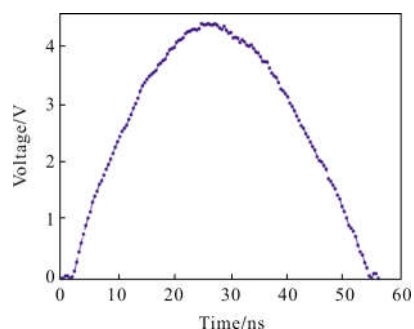


图 3 实验测得的激光发射脉冲信号

Fig.3 Laser emission pulse signal obtained by experiment

考虑在动态近程测距背景下,在近距离处可以更好地观察脉冲激光的衰减和展宽情况。因此,在实际测距距离为 5、10、15、20、25、30 m 处,分别以 10° 为一个单位,使衰减片旋转一周来进行实验,选取 5 m 处的实验数据为代表进行详细分析。图 4 所示为衰减片旋转 0°、10°、20°、30°、40°,分别对应回波脉冲比发射脉冲的衰减程度 M 为 0、0.16、0.28、0.37、0.46 时测得的回波脉冲。

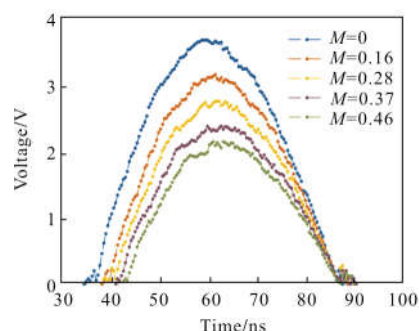


图 4 实验测得的激光回波

Fig.4 Laser echoes obtained by experiment

根据第 2 节所建立的理论模型得到的发射和回波脉冲如图 5 所示。可以看出,在时域上实际波形基本吻合理论波形,验证了所建模型的正确性。

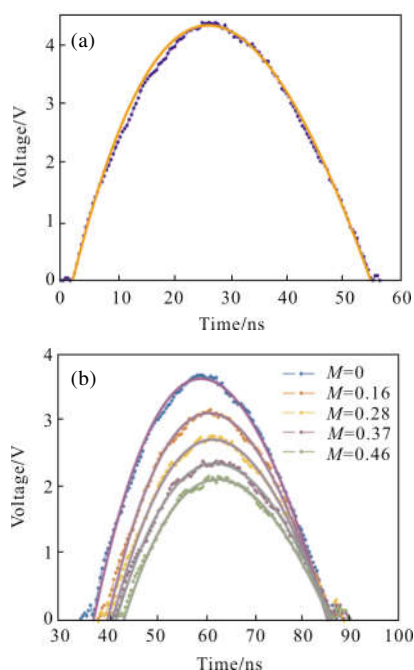


图 5 (a) 仿真得到的理论发射脉冲信号; (b) 仿真得到的理论回波
Fig.5 (a) Theoretical emission pulse signal obtained by simulation; (b) Theoretical echoes obtained by simulation

将衰减片旋转 $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, \dots, 120^\circ$, 得到不同的回波脉冲, 根据实际回波可以观察到, 回波脉冲的展宽与幅值衰减同时存在, 且存在一定关系, 如图 6 所示。经过对回波数据分析, 可以得到规律: 展宽系数随着衰减程度的增大而增大, 且增大速率加快。

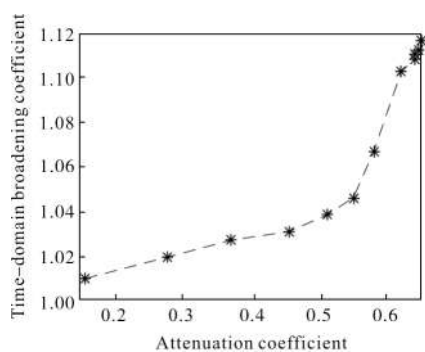


图 6 时域展宽系数与衰减系数的关系
Fig.6 Time-domain broadening coefficient vs attenuation coefficient

在激光测距系统经过衰减片旋转 $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, \dots, 90^\circ$ 而产生不同的衰减和展宽情况下, 采用恒阈值时刻鉴别法、峰值时刻鉴别法和双通道时刻鉴别法进行脉冲激光测距, 测得的距离与实际距离的误

差如图 7~9 所示。

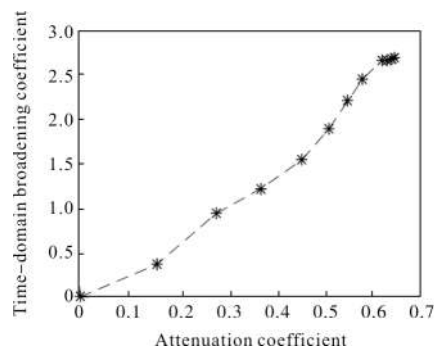


图 7 恒阈值法测距误差与衰减系数的关系
Fig.7 Constant threshold-detection ranging error vs attenuation coefficient

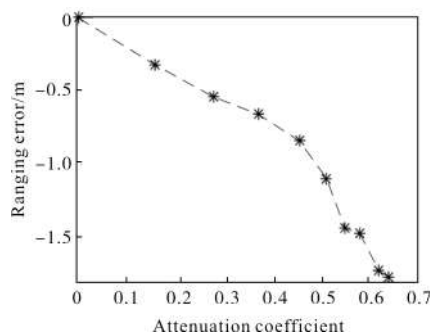


图 8 峰值法测距误差与衰减系数的关系
Fig.8 Peak-detection ranging error vs attenuation coefficient

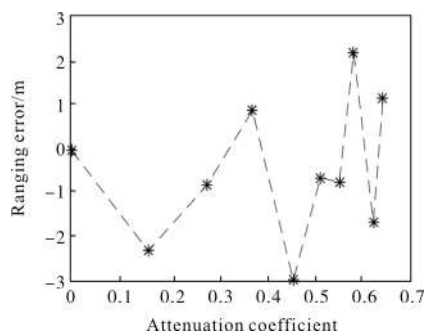


图 9 双通道法测距误差与衰减角度的关系
Fig.9 Double-channel-detection ranging error vs attenuation angle

采用恒阈值时刻鉴别法进行脉冲激光测距, 测得的距离与实际距离的误差如图 7 所示, 可以看出恒阈值法时刻鉴别误差随衰减系数成近似线性关系。衰减系数越大, 展宽程度越大, 误差随着衰减和展宽的程度增大而增大。采用恒阈值时刻鉴别法, 测距误差大, 未经修正的测距误差可达数米。

采用峰值时刻鉴别法进行脉冲激光测距, 测得

的距离与实际距离的误差如图 8 所示。可以看出衰减程度越大,展宽程度越大,峰值法时刻鉴别误差随之增大。由于峰值时刻鉴别法只受到脉冲展宽的影响,不受到幅值衰减的影响,所以测距误差相对于恒阈值法小,但仍达到米量级。

采用双通道时刻鉴别法进行脉冲激光测距,测得的距离与实际距离的误差如图 9 所示。其测距精度在 ± 3 cm 左右,平均误差为 -0.49 cm,均方差为 2.28 cm。可以看出双通道时刻鉴别法不受回波脉冲的衰减和展宽的影响,理论上的测距误差为零,但实际上由于 TDC-GPX 的时间间隔测量精度为 10 ps 量级,存在随机的测时误差,同时峰值时刻和前沿时刻存在微小晃动,从而导致时刻鉴别误差,该误差可以通过多次测量取均值的方法降低。

因此,在发射脉冲波形高斯分布近似的情况下,通过双通道时刻鉴别法可以鉴别出不受衰减和展宽影响的实际飞行时间 T , 从而实现动态情况下的较高精度测距。

3 结 论

针对脉冲激光测距中存在的回波展宽和幅值衰减问题,文中提出了基于时域的双通道脉冲激光测距时刻鉴别方法。通过结合高斯函数和重尾函数,建立回波波形的近高斯函数时域分布理论模型,推导出了恒阈值和峰值双通道时刻鉴别法测算脉冲实际飞行时间的公式。实验表明:采用恒阈值法和峰值法同时检测的双通道时刻鉴别方法,结合 TDC-GPX 进行时间测量,将测得的阈值到达时刻、比较电平宽度以及测得的峰值时刻数据输入 FPGA 进行计算,可以计算出不受衰减和展宽影响的实际飞行时间,实际应用可以基本将近程测距误差控制在 ± 3 cm 以内,实现了较高精度的测距效果,并可通过多次测量进一步提升精度。该方法为进一步提高动态激光测距系统相应技术指标提供了理论和实验依据。

参考文献:

- [1] Dai Yongjiang. Laser Radar Technology [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010: 578-596. (in Chinese)
戴永江. 激光雷达技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 578-596.
- [2] Zhang Xiangjin, Shen Na, Hu Xin, et al. Scattering properties of target surface in the laser short-range detection [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2017, 46(7): 0706003. (in Chinese)
张祥金, 沈娜, 胡鑫, 等. 激光近程探测中目标表面的散射特性[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(7): 0706003.
- [3] Zeng Fei, Gao Shijie, San Xiaogang, et al. Development status and trend of airborne laser communication terminals[J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(1): 65-73. (in Chinese)
曾飞, 高世杰, 伞晓刚, 等. 机载激光通信系统发展现状与趋势[J]. 中国光学, 2016, 9(1): 65-73.
- [4] Wang Fengjie, Chen Huimin. Simulation of characteristics of cloud and fog echo for pulsed laser fuze [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(10): 1-7. (in Chinese)
王凤杰, 陈慧敏. 脉冲激光引信云雾回波特性仿真 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(10): 1-7.
- [5] Huang Minshuang, Liu Xiaochen, Ma Peng. Periodic error compensation of pulsed time-of-flight laser ranging system [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2018, 47(3): 0317004. (in Chinese)
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): 0317004.
- [6] Palojarvi P, Ruotsalainen T, Kostamovaara J. A new approach to avoid walk error in pulsed laser rangefinding [C]//IEEE International Symposium on Circuits and Systems. IEEE Xplore, 1999(1): 258-261.
- [7] Xiao J, Lopez M, Hu X, et al. A continuous wavelet transform-based modulus maxima approach for the walk error compensation of pulsed time-of-flight laser rangefinders [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2016, 127(4): 1980-1987.
- [8] Chen Ruiqiang, Jiang Yuesong, Pei Zhao. High frequency and high accuracy laser ranging system based on double thresholds leading-edge timing discrimination [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(9): 0912002. (in Chinese)
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.
- [9] Xu Wei, He Weiji, Chen Qian, et al. Analysis for the influence of time-domain broadening on correlation detection [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2012, 41

- (4): 875–879. (in Chinese)
- 徐伟, 何伟基, 陈钱, 等. 时域展宽特性对相关检测性能的影响分析 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41 (4): 875–879.
- [10] Zhou G, Huang W, Zhou X, et al. A new approach to minimize walk error in pulsed laser rangefinding[C]// IGARSS 2017 –2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2017: 1708–1711.
- [11] Wang Yongzhi, Sun Chaojun, Duan Cungao, et al. Algorithm research of error compensation for laser ranging based on echo intensity[J]. *Guidance & Fuse*, 2017, 38(3): 35–38, 43. (in Chinese)
- 王永志, 孙超君, 段存高, 等. 基于回波强度的激光测距误差补偿算法研究[J]. 制导与引信, 2017, 38(3): 35–38, 43.
- [12] Ma Yue, Li Song, Zhou Hui, et al. Effect of system parameters on ranging and pulse width in ocean satellite laser altimeter system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(3): 813–820. (in Chinese)
- 马跃, 李松, 周辉, 等. 系统参数对激光测高仪海洋测距和回波脉宽影响[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(3): 813–820.
- [13] Xu Xiaobin, Zhang He, Zhang Xiangjin, et al. Effect of plane target characteristics on ranging distribution for pulse laser detection [J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(21): 210601. (in Chinese)
- 徐孝彬, 张合, 张祥金, 等. 脉冲激光探测平面目标特性对测距分布的影响[J]. 物理学报, 2016, 65(21): 210601.
- [14] Mu Jiaying, Cao Jie, Hao Qun, et al. Experimental research on pulsed laser ranging based on differential optical-path [J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46 (8): 934–937. (in Chinese)
- 穆嘉星, 曹杰, 郝群, 等. 基于差分光路的脉冲激光测距实验研究[J]. 激光与红外, 2016, 46(8): 934–937.
- [15] Tian Jinrong, Song Yanrong, Wang Li. Error analysis of peak power formula in pulsed lasers [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(2): 253–259. (in Chinese)
- 田金荣, 宋晏蓉, 王丽. 常用激光峰值功率公式误差分析 [J]. 中国光学, 2014, 7(2): 253–259.