

# 单发脉冲飞行时间激光测距技术

黄民双

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** 单发脉冲飞行时间测距技术在移动目标跟踪测量、汽车防撞、机器人运动控制等要求快速响应的场合具有重要应用。介绍了单发脉冲飞行时间激光测距技术的研究现状,分析了基于前沿定时和共振定时的单发脉冲测距原理、方法及误差补偿技术,并给出了各种单发脉冲测距范围、单发测距精度等技术指标。

**关键词** 测量; 脉冲激光测距; 飞行时间测距; 前沿定时; 共振定时; 误差补偿

**中图分类号** TN78      **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.120007

## Time-of-Flight Laser Ranging Technique of Single Transmitted Pulse

Huang Minshuang

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

**Abstract** Time-of-flight laser ranging technique of single transmitted pulse has very important application prospect in fast response applications, such as moving target tracking measurement, vehicle anticollision, robot motion control and so on. The research status of time-of-flight laser ranging technique of single transmitted pulse is introduced. The principle, method and error compensation of single transmitted pulse ranging based on leading edge timing and resonance timing are analyzed. The technical indices, such as the range of single transmitted pulse ranging and the accuracy of single transmitted pulse ranging are given.

**Key words** measurement; pulse laser ranging; time-of-flight ranging; leading edge timing; resonance timing; error compensation

**OCIS codes** 280.3400; 150.5670; 150.3040

## 1 引言

激光测距仪在大型物体的三维(3D)结构测量、油罐液位水平的高度测量、大地测量等方面广泛应用。激光测距通常是基于脉冲飞行时间原理进行测量的,通过测量从脉冲发射经过目标后再返回到光电探测器的这段时间间隔来计算距离。虽然可以采用传统的相位法进行测距,即通过测量发射高频调强波与返回高频调强波之间的相位差来确定时间间隔,但是采用脉冲飞行时间原理可以达到很高的测量速度,这是因为采用脉冲飞行时间原理测量只需要发射一个脉冲,即单发脉冲,且测距精度可以达到厘米级<sup>[1-3]</sup>。

单发脉冲飞行时间测距技术在3D测量和环境感知系统中有非常重要的应用前景,例如无人驾驶汽车、智能机器人、无人机姿态控制等<sup>[4-8]</sup>。又如文献[9]采用多通道旋转雷达结构同时对16个或32个目标进行测距,实现了快速3D扫描测量。3D测量系统采用无合作目标测距,测量范围通常为几十米,单发精度为厘米级,这主要是由半导体激光二极管(LD)的性能参数决定的。目前生产的LD脉冲峰值功率为10~30 W,脉冲宽度为3~5 ns,LD价格便宜,工作稳定可靠,是目前测距仪中的首选器件。单发脉冲与传统的多脉冲飞行时间激光测距的最大不同之处为:单发脉冲测距系统的接收通道无法对回波脉冲信号进行增益控制,且无法利用误差平均原理提高测距精度<sup>[10]</sup>。一方面,回波脉冲幅值与距离的平方成反比,回波脉冲的幅值变

收稿日期: 2017-04-21; 收到修改稿日期: 2017-05-21

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

化范围往往达到 1:100000,甚至更大,这意味着接收通道必须能够处理非常大的脉冲电流输入信号(最大输入脉冲电流达到 100 mA 或更大);另一方面,由于脉冲光电流幅值的变化将产生定时误差,这一误差必须消除或补偿<sup>[11-13]</sup>;此外,由于 67 ps 的延时变化将导致 1 cm 的距离误差,这就要求接收通道的延时变化应尽可能小,也就是说接收通道的带宽必须足够宽。

本文主要对单发脉冲飞行时间激光测距技术的研究现状进行综述,并对基于前沿定时和共振定时方法的单发脉冲测距原理、方法及误差补偿技术进行分析。

## 2 单发脉冲飞行时间激光测距系统的组成

单发脉冲飞行时间激光测距系统的原理框图如图 1 所示,主要由脉冲 LD 激光发射器、雪崩光电二极管(APD)光电探测器、低噪声宽带前置放大器、后级电压放大器、鉴别器及时间间隔测量单元等部分组成<sup>[14-15]</sup>。激光发射器产生小于 10 ns 的光脉冲,其中的一束作为参考信号光直接入射到光探测器,转换为电脉冲后经过放大滤波、定时甄别后获得准确的起始脉冲,以此脉冲触发时间间隔测量单元开始计时。另一束光经过目标漫反射后,返回到光电探测器并经接收通道产生结束脉冲,控制时间间隔测量单元停止计时。根据起始脉冲和结束脉冲之间的时间间隔可计算出距离。

在接收通道中,单发脉冲飞行时间激光测距系统不能进行增益控制,这是其与普通脉冲激光测距系统的最大区别。

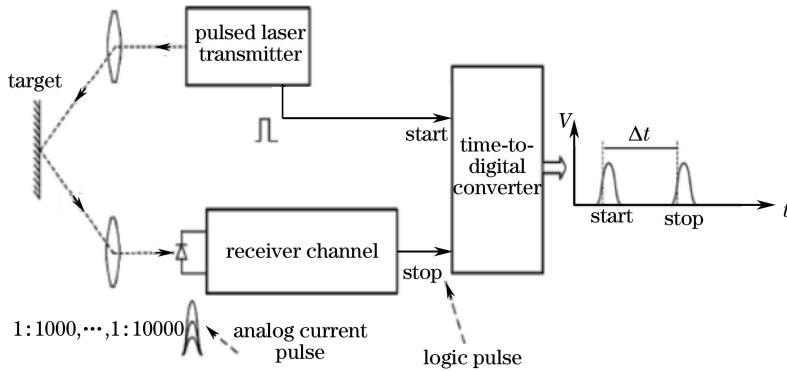


图 1 单发脉冲飞行时间测距系统的原理框图

Fig. 1 Principle block diagram of time-of-flight ranging system of single transmitted pulse

## 3 前沿定时探测技术

应用前沿定时探测技术可以进行单发脉冲测距,但是前沿定时的主要问题是存在因输入光电流脉冲信号振幅变化而产生的系统误差,即走离误差,很多文献研究了走离误差的产生及补偿方法<sup>[16-17]</sup>。

### 3.1 抖动误差

定时抖动是由噪声等原因<sup>[18]</sup>造成的定时点处单次距离测量值的统计误差,如图 2 所示。噪声引起的定时抖动误差可表示为

$$\sigma_t = \frac{\sigma_N}{\partial i_s / \partial t} \approx \frac{\sigma_N}{i_{Smax} / t_r} = \frac{t_r}{R_{SN}}, \quad (1)$$

式中  $\sigma_t$  为定时抖动的标准差,  $i_s$  为输入脉冲信号的振幅,  $t$  为时间,  $\sigma_N$  为接收噪声的标准差,  $i_{Smax}$  为输入脉冲信号的最大振幅,  $t_r$  为脉冲前沿的上升时间,  $R_{SN}$  为脉冲信号的信噪比。假设接收通道带宽  $\alpha_{BW}$  与脉冲上升时间相匹配,即  $\alpha_{BW} \approx 0.35/t_r$ ,这就意味着要求接收通道足够宽,以保证脉冲经过接收通道后形状不变,从而避免产生过多的噪声。在前沿定时方法中,脉冲上升沿的变化斜率受放大电路频带宽度的限制,因此在  $\alpha_{BW} \leq 0.35/t_r$  的条件下,前沿探测的单发脉冲测距精度为

$$\sigma_R = c\sigma_t / 2 \approx 0.35c / (2\alpha_{BW}R_{SN}), \quad (2)$$

式中  $c$  为光速。

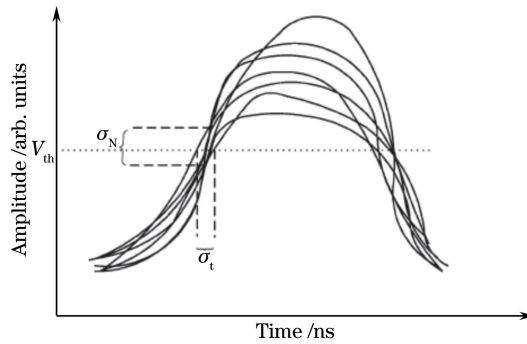


图 2 接收通道在输出端的噪声效应

Fig. 2 Noise effect at output end of receiver channel

### 3.2 走离误差

前沿定时探测技术以固定的阈值电压  $V_{th}$  与脉冲上升沿的交点作为定时点,图 3(a)所示为简化的分段线性估算模型,其中  $v_{clip}$  为脉冲饱和电平。设两个脉冲定时点的变化为  $\Delta t_p$ ,其表达式为

$$\Delta t_p = \frac{V_{th}}{v_{p2}} t_r - \frac{V_{th}}{v_{p1}} = \left( \frac{1}{v_{p2}} - \frac{1}{v_{p1}} \right) V_{th} t_r, \quad (3)$$

式中  $v_{p1}$  和  $v_{p2}$  为脉冲峰值。这个  $\Delta t_p$  就是走离误差,由(3)式可以看出,通过减小阈值电压或上升时间可以减小  $\Delta t_p$ 。为防止误触发,将阈值电压设置为噪声电压方均值的 10 倍<sup>[19]</sup>。

接收通道可视为一个幅值和带宽受限的放大电路,电路带宽可以用接收通道电路的时间常数  $RC$  ( $R$  为电阻值, $C$  为电容值)来描述,信号经过接收通道的最大延时误差约等于接收通道的时间常数,这个误差称为  $RC$  延时走离误差,它也与脉冲幅值有关,如图 3(b)所示。图中, $t_p$  为几何走离误差, $v_{min}$  为最小脉冲幅值, $t_{RC}$  为  $RC$  延时走离误差, $R_{SN,min}$  为最小信噪比。

前沿定时产生的走离误差很大,例如接收通道带宽为 230 MHz 时的走离误差约为 700 ps,总的走离误差是几何走离误差和  $RC$  延时走离误差的代数和,约为 1.5 ns,相当于 22 cm 的距离。若要提高测距精度,必须对走离误差进行补偿。目前提出的走离误差补偿方法主要有脉冲峰值补偿法、脉冲上升率补偿法和脉冲宽度补偿法等。

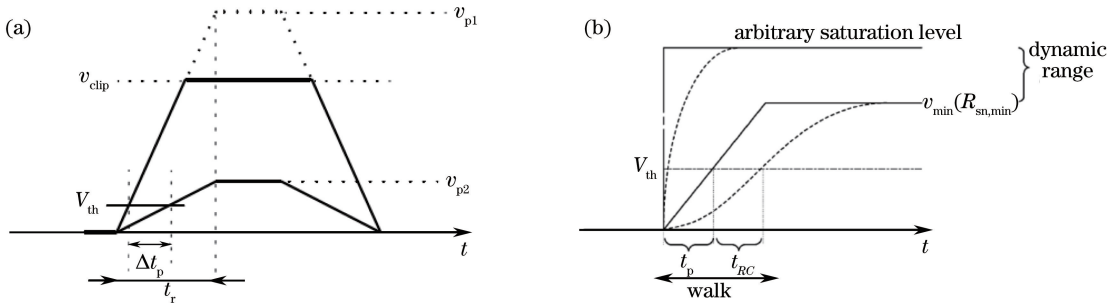


图 3 前沿定时产生的走离误差示意图。(a)简化的分段线性估算模型;(b)前沿定时中的走离误差

Fig. 3 Schematic of walk error generated by leading edge timing. (a) Simplified piecewise linearity estimation model; (b) walk error in leading edge timing

#### 3.2.1 脉冲峰值补偿法

走离误差是由脉冲峰值变化引起的,因此可以通过测量脉冲峰值来补偿走离误差。该方法最早由 Peltola 等<sup>[19]</sup>提出,可以分为两部分进行补偿(如图 3(b)所示)。几何走离误差  $t_p$  的计算公式为  $t_p = (V_{th}/v_p) t_r$ ,  $v_p$  为脉冲峰值。假如  $t_r = 1.6$  ns,  $V_{th} = 40$  mV, 脉冲振幅从 80 mV 变化到 2 V 时,产生的几何走离误差为 770 ps。光电流脉冲信号经过时间常数为  $RC$  的接收通道后的输出可表示为  $V_{out} = v_p \{1 - \exp[-t/(RC)]\}$ 。令  $V_{out} = V_{th}$ , 就可以近似计算出  $RC$  延时走离误差  $t_{RC}$ 。 $t_{RC}$  与脉冲峰值  $v_p$  为一一对应关系,因此在测量出  $v_p$  后可通过查表法求出  $t_{RC}$ 。

这种方法存在的最大问题是输入光电流的动态范围较小,因为接收通道必须工作在放大区域,否则无法

检测到脉冲信号的峰值,因此该方法适用于测程较短和测距精度要求不高的场合。另外,由于脉冲峰值越小,走离误差变化越敏感,因此要求峰值检测电路具有很高的精度。文献[20]在接收通道带宽为250 MHz、脉冲峰值比为1:4000时,获得的单发脉冲测距精度为 $\pm 35$  mm。

为了提高输入光电流的动态范围,Palojarvi等<sup>[21]</sup>提出了通过测量两级脉冲峰值来补偿走离误差的方法,即在接收通道的前置放大器之后和电压放大器之前增加一级峰值检测模块(PD2),当输入光电流幅值较大时,采用PD2的数据可以解决电压放大器因饱和而无法检测脉冲峰值的问题。

### 3.2.2 脉冲上升率补偿法

为了解决峰值脉冲补偿法的问题,Kurtti等<sup>[11]</sup>提出了通过脉冲上升时间进行误差补偿的方法。这种方法是利用时间-数字转换器(TDC)测量时间间隔来实现的,可称为时间域走离误差补偿技术,其原理如图4所示( $\Delta t_{\text{walk-res}}$ 为剩余走离误差,它由最大脉冲峰值来确定; $v_{p,\text{max}}$ 为最大脉冲峰值),其中一个鉴别器的阈值为 $V_{\text{th1}}$ ,另一个鉴别器的阈值 $V_{\text{th2}} = \beta V_{\text{th1}}$  ( $\beta > 1$ ),脉冲上升沿经过这两个鉴别器输出定时时刻信号送TDC,通过测量出这两个定时点之间的时间间隔 $\Delta t$ ,就可以计算出走离误差 $\Delta t_{\text{err}}$ 。

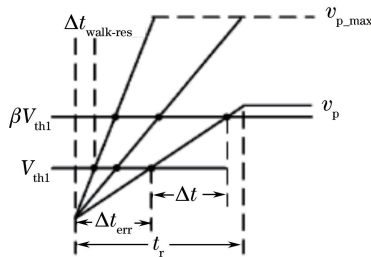


图4 脉冲上升率补偿法原理

Fig. 4 Principle of rise rate compensation

因为有两个鉴别比较阈值,上升沿在这两个定时点处都将产生随机定时误差,因此该方法要比采用一个阈值定时的随机误差大。在文献[11]中,脉冲幅值动态范围为1:10000,其走离误差最低可以减小到600 ps量级。

### 3.2.3 脉冲宽度补偿法

如图5所示,采用同一个鉴别阈值电压分别对脉冲上升沿和下降沿进行定时鉴别,两个定时信号送TDC后可以测量出脉冲宽度,由于脉冲宽度随脉冲幅值增加而变宽,因此通过测量脉冲宽度就可以对走离误差进行补偿。图中 $t_{w1}$ 、 $t_{w2}$ 、 $t_{w3}$ 分别为脉冲幅值从小到大变化时对应的脉冲宽度。这种方法的最大的特点是电压放大器达到饱和时同样能够进行精确的走离误差补偿,因此光脉冲电流信号幅值的动态范围非常大,可以达到1:100000,经过走离误差补偿后测距误差可以减小到 $\pm 15$  mm<sup>[22]</sup>。

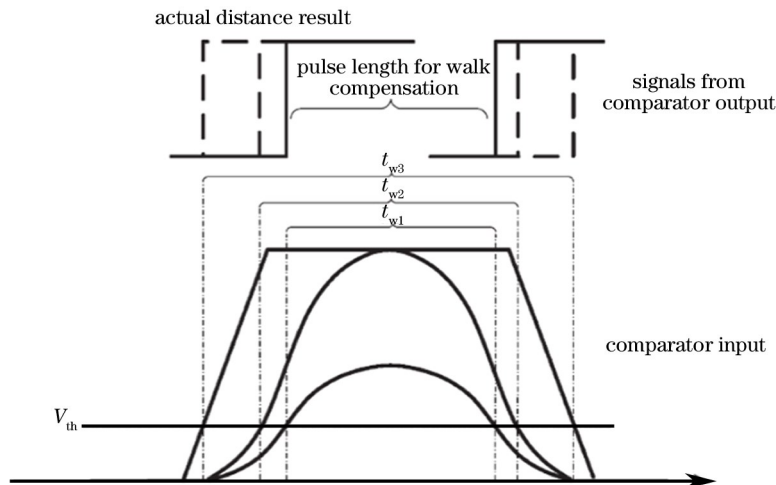


图5 脉冲宽度补偿法原理

Fig. 5 Principle of pulse width compensation

## 4 共振定时探测技术

过零定时探测技术可以消除前沿定时中的几何走离误差<sup>[23]</sup>,但传统的过零定时方法是将脉冲成形器置于电压放大器的输出端与定时鉴别器的输入端之间,对脉冲进行线性放大,这就意味着在接收通道中需要进行增益控制,因此传统的过零定时方法很难应用于单发脉冲测距<sup>[24]</sup>。为此,Ruotsalainen 等<sup>[25]</sup>提出了一种在接收通道输入端生成定时点的过零定时探测技术。如图 6(a)所示,光电探测器直接与脉冲成形器相连,也就是说在接收通道的前端将单极性脉冲转换为双极性脉冲,这样在放大级中只需要在定时点附近进行线性放大,无需考虑输入光电流过大引起的增益饱和等问题。

Kurtti 等提出的方法是利用 RC 高通滤波来实现脉冲变换的,但这种方法存在输入寄生电容的影响,因为测距中使用的光电二极管的接收面积较大,寄生电容值有几个皮法,而 RC 高通滤波电路中的电容值通常比寄生电容值小。

为了解决上述问题,Pehkonen 等<sup>[26]</sup>提出利用电阻电感电容(RLC)并联共振进行脉冲成形的方法,其原理结构如图 6(b)所示, $V_{APD}$ 为高压偏置电压, $R_{BIAS}$ 为偏置电阻。雪崩光电探测器(APD)输出光电流激励 RLC 使其产生欠阻尼自由衰减振荡,取双极性脉冲的第一个过零点作为定时点。这种方法具有结构简单、测量速度快、动态范围宽和测量精度高等优点,并且可以避免产生几何走离误差,但在接收通道中仍存在随脉冲幅值变化的 RC 延时走离误差。要将这个误差降至最小,应尽量减小接收通道的时间常数,也就是尽量提高接收通道的带宽。

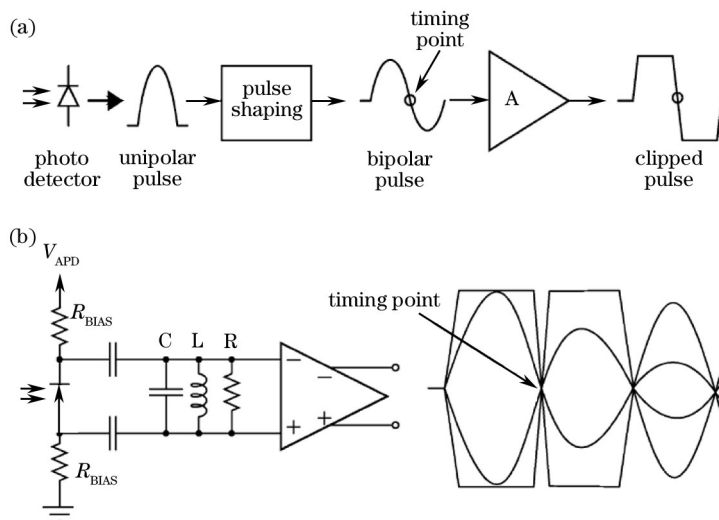


图 6 接收通道前端的过零定时探测。(a)基本原理;(b)共振脉冲成形

Fig. 6 Zero crossing timing detection at receiver channel front. (a) Basic principle; (b) resonant pulse forming

脉冲经过鉴别器的延时时间会随脉冲幅值(即上升速率)的变化而变化,即产生所谓的“超阈走离误差”。在前沿定时方法中,这项走离误差占总走离误差的比例很小,几乎可以忽略,并且这项走离误差可通过上述走离误差补偿方法进行综合补偿。在共振过零定时技术中,输入光电流脉冲幅值的变化非常大,该误差的影响必须考虑。脉冲经过鉴别器的延时时间可近似表示为

$$t_{dcomp} \approx t_{dmin} + B (du_i/dt)^{-1/2}, \quad (4)$$

式中  $t_{dmin}$  为固定延时部分; $B (du_i/dt)^{-1/2}$  是随脉冲上升速率  $du_i/dt$  变化的部分,其中  $B$  是与鉴别器结构和带宽等参数有关的常数。文献[10]中提出了一种简单的超阈走离误差补偿方法,该方法不是将鉴别器电压的阈值  $V_{th}$  设置为 0,而是设置为一个非常小的电压值,即  $V_{th} = V_{offset}$ ,  $V_{offset}$  为偏移补偿电压,利用脉冲上升沿的线性近似,可得偏移补偿时间  $t_{offset} \approx V_{offset} (du_i/dt)^{-1}$ 。

图 7 为超阈走离误差补偿示意图,其中,  $\omega_{comparator}$  为鉴别器产生的超阈走离误差,  $\omega_{offset}$  为补偿值,  $\omega_{compensated}$  为补偿后的剩余误差。可以看出,这种方法只能对超阈走离误差进行部分补偿。实验结果中输入光电流动态范围为 1:1280,走离误差为 74 ps。

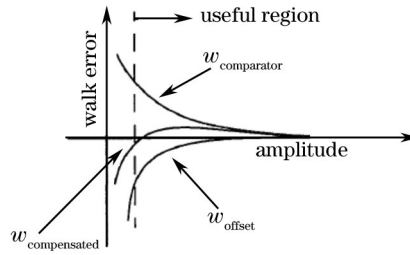


图 7 超阈走离误差补偿示意图

Fig. 7 Schematic of super threshold deviation compensation

## 5 结束语

单发脉冲飞行时间激光测距系统具有结构简单、成本低等特点,其测程可以达到数百米,单发测距精度可以达到厘米级,在工业测量领域具有非常重要的应用前景。单发脉冲飞行时间激光测距系统无法在接收通道进行增益控制,这就要求接收通道必须能够处理非常大的脉冲电流输入信号。另外,单发脉冲飞行时间激光测距系统中无法采用误差平均原理来提高激光测距精度。在现有的技术方案中,无论是采用前沿定时还是共振定时,走离误差是影响测距精度的主要因素,因此如何补偿走离误差是单发脉冲飞行时间激光测距技术中需要解决的关键问题。

## 参 考 文 献

- [1] Amann M C, Myllylae R A. Laser ranging: a critical review of unusual techniques for distance measurement[J]. *Optical Engineering*, 2001, 40(1): 10-19.
- [2] Kostamovaara J T, Maatta K E, Myllylae R A. Pulsed time-of-flight laser range-finding techniques for industrial applications[C]. *SPIE*, 1992, 1612: 283-295.
- [3] Thiel K H, Wehr A. Performance capabilities of laser scanners—an overview and measurement principle analysis[C]. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2004: 14-18.
- [4] Zhao Dawei, Pei Hailong, Ding Jie, *et al.* Research of the unmanned plane airborne lidar system strip stitching method [J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(1): 0114002.  
赵大伟, 裴海龙, 丁洁, 等. 无人机机载激光雷达系统航带拼接方法研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(1): 0114002.
- [5] Mallet C, Bretar F. Full-waveform topographic lidar: state-of-the-art[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2009, 64(1): 1-16.
- [6] Coffey V C. Imaging in 3-D: killer apps coming soon to a device near you![J]. *Optics & Photonics News*, 2014, 25(6): 36-43.
- [7] Schwarz B. Lidar: mapping the world in 3D[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(7): 429-430.
- [8] Velupillai S, Guvenc L. Laser scanners for driver-assistance systems in intelligent vehicles applications of control[J]. *IEEE Control Systems*, 2009, 29(2): 17-19.
- [9] Huang M S, Huang J F, Tang J, *et al.* Research on 3-D real-time measurement system of seam with laser[C]. *Fifth International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, 2013: 870-874.
- [10] Ruotsalainen T, Palojarvi P, Kostamovaara J. A wide dynamic range receiver channel for a pulsed time-of-flight laser radar[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2001, 36(8): 1228-1238.
- [11] Kurtti S, Kostamovaara J. Anintegrated laser radar receiver channel utilizing a time-domain walk error compensation scheme[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, 2011, 60(1): 146-157.
- [12] Anghinolfi F, Jarron P, Krummenacher F, *et al.* NINO, an ultra-fast, low-power, front-end amplifier discriminator for the time-of-flight detector in ALICE experiment [C]. *Nuclear Science Symposium Conference Record*, 2003: 8066596.
- [13] Despeisse M, Powolny F, Jarron P, *et al.* Multi-channel amplifier-discriminator for highly time-resolved detection[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2011, 58(1): 202-208.

- [14] Zhai Dongsheng, Tang Rufeng, Huang Kai, *et al.* Analysis on detection performance of satellite laser ranging based on Geiger mode APD arrays[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(6): 0608007.  
翟东升, 汤儒峰, 黄凯, 等. 基于 G-APD 阵列的卫星激光测距系统探测性能分析[J]. 中国激光, 2015, 42(6): 0608007.
- [15] Sun Junling, Sun Guangmin, Ma Pengge, *et al.* Laser target localization based on symmetric wavelet denoising and asymmetric Gauss fitting[J]. Chinese J Lasers, 2017, 44(6): 0604001.  
孙俊灵, 孙光民, 马鹏阁, 等. 基于对称小波降噪及非对称高斯拟合的激光目标定位[J]. 中国激光, 2017, 44(6): 0604001.
- [16] Huang Minshuang, Long Tengyu, Liu Huihui, *et al.* A high-precision pulsed laser ranging time interval measurement technology based on sine curves method[J]. Chinese J 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.
- [17] Abidi A A. On the noise optimum of gigahertz FET transimpedance amplifiers[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1987, 22(6): 1207-1209.
- [18] Kostamovaara J T, Myllylä R A, Myllylä R, *et al.* Pulsed laser radars with high-modulation frequency in industrial applications[C]. SPIE, 1992, 163: 114-127.
- [19] Peltola T, Ruotsalainen T, Palojarvi P, *et al.* A receiver channel with a leading edge timing discriminator for a pulsed time-of-flight laser radar[C]. European Solid-State Circuits Conference, 2000: 427-430.
- [20] Kostamovaara J, Nissinen J, Kurtti S, *et al.* On the minimization of timing walk in industrial pulsed time-of-flight laser radars[C]. SPIE, 2009, 7356: 2838-2847.
- [21] 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.
- [22] Nissinen J, Kostamovaara J. A 0.13  $\mu\text{m}$  CMOS laser radar receiver with leading edge detection and time domain error compensation[C]. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2009: 10789914.
- [23] Huang Junfen, Huang Minshuang, Sun Yaling, *et al.* High precision time-interval measurement method based on pseudo-nonuniform sampling[J]. Journal of Optoelectronics•Laser, 2012, 23(10): 1945-1948.  
黄军芬, 黄民双, 孙亚玲, 等. 基于伪非均匀采样的高精度时间间隔测量方法[J]. 光电子•激光, 2012, 23(10): 1945-1948.
- [24] Kurtti S, Kostamovaara J. Laser radar receiver channel with timing detector based on front end unipolar-to-bipolar pulse shaping[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2009, 44(3): 835-847.
- [25] Ruotsalainen T, Palojarvi P, Kostamovaara J. A wide dynamic range receiver channel for a pulsed time-of-flight laser radar[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2001, 36(8): 1228-1238.
- [26] Pehkonen J, Kostamovaara J. Walk error minimisation by resonance-based laser pulse timing detection[J]. Electronics Letters, 2003, 39(23): 1624-1625.