

DOI: 10.13382/j.jemi.B2103877

激光测距动态多阈值误差修正技术研究*

吴培鹏¹ 蔡文郁¹ 唐国栋¹ 王志强¹ 朱张峰²

(1. 杭州电子科技大学电子信息学院 杭州 310018; 2. 国家电网宁波市北仑区供电公司 宁波 315800)

摘要:在脉冲式激光飞行时间法测距中,存在着干扰脉冲叠加到信号脉冲上升沿的情况,因此双阈值处理算法无法正确修正脉冲前沿时刻鉴别误差。提出了一种动态多阈值拟合误差修正算法,通过动态切换3个阈值门限找到最佳的拟合方式,避免因某个阈值时刻鉴别受到干扰脉冲影响导致错误的拟合修正结果。除此之外,还提出了阈值时间差关联曲线的新概念,根据修正点与关联曲线的偏离程度来动态调整阈值门限。实验测试结果表明,提出的动态多阈值误差修正方法可获得理想的修正结果,使得错误数据得以滤除,从而提高远距离目标的测距精度。

关键词:激光测距; 飞行时间法; 前沿时刻鉴别; 动态多阈值法

中图分类号: TH711 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8010

Laser range measuring system based on dynamic multi-threshold error correction method

Wu Peipeng¹ Cai Wenyu¹ Tang Guodong¹ Wang Zhiqiang¹ Zhu Zhangfeng²

(1. College of Electronics and Information, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;

2. State Grid Ningbo Beilun District Power Supply Company, Ningbo 315800, China)

Abstract: At the aspect of time of flight (TOF) based laser ranging, the interference pulse is superimposed on the rising edge of signal pulse, so the classic double-threshold processing algorithm cannot correct the identification error of pulse front time. In this paper, a dynamic multi-threshold fitting error correction algorithm is proposed. By switching three thresholds dynamically, the best fitting method is found to avoid the wrong fitting correction result caused by the interference pulse. In addition, a new concept of threshold time difference correlation curve is proposed, which adjusts the threshold dynamically according to the deviation degree between correction point and correlation curve. The experimental results show that the proposed dynamic multi-threshold error correction method can obtain ideal correction results, allows incorrect data to be filtered out, so as to improve the ranging accuracy of long-range targets.

Keywords: laser based range measuring; time of flight (ToF); front-edge time identify; dynamic multi-threshold

0 引言

基于激光的非接触测距方式^[1-3]是目前应用最为广泛的测距技术。激光测距方法主要分为激光脉冲测距法、激光相位测距法和激光干涉测距法,其中脉冲激光测距方法利用激光脉冲持续时间短、能量集中、瞬时功率大(一般可达兆瓦)等特点,在地形测量、战术前沿测距、导弹运行轨道跟踪等方面获得了广泛的应用。脉冲飞行时间测距的基本原理^[4-5]如图1所示,控制电路输出使能脉

冲控制激光发射器发射激光脉冲,激光脉冲一部分通过光学结构返回时间测量模块标定为开始时刻脉冲,剩余一部分激光脉冲通过透镜经到达测目标返回后,由接收端接收到回波时刻脉冲并输入时间测量模块标定为停止时刻脉冲,时间测量模块通过测量开始脉冲到停止脉冲的时间差为激光脉冲的飞行时间,最后根据飞行时间得出测量目标距离。

脉冲式激光测距系统可以获得较远的测距能力,在以往激光测距系统研制中,提升脉冲式激光测距的精度方法主要依靠提高时间测量分辨率^[6],然而随着近几年

收稿日期: 2021-01-09 Received Date: 2021-01-09

* 基金项目:浙江省公益技术研究计划项目(LGF20F010005)、浙江省属高校基本科研业务费专项资金(GK209907299001-001)资助

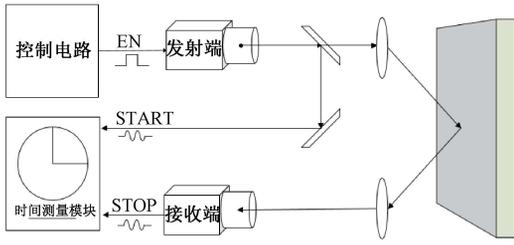


图1 飞行时间法脉冲式激光测距原理

Fig. 1 The principle of time of flight pulse laser ranging

高性能时间测量芯片的出现,极大改善了在脉冲式方法中由于飞行时间测量不准而引起的数据误差,使得测距精度得到提高,促生了大量的基于脉冲式激光测距的系统与方法^[7-8]。

虽然集成芯片的时间测量分辨已经满足脉冲式激光测距系统的要求,但由于回波脉冲近距离会出现饱和和截止失真,回波光形的延迟展宽、幅度的变化、目标形状的不规则以及对空散射和电路干扰脉冲叠加引起的波形畸变^[9-10],使得回波脉冲的前沿时刻鉴别抖动较大,仍会严重的影响到测距精度,Kurtti等^[11]提出了一种脉冲飞行时间测距仪的步长补偿方法,使得在近距离回波波形饱和和失真的情况下对测距精度加以补偿。陈瑞强等^[12]介绍了电压比较器输出数字信号的脉宽控制方法,解决了激光脉宽过窄造成的时间数字转换器无法工作的问题。吴钰等^[13]介绍了基于时域的双通道脉冲激光测距时刻鉴别方法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,实现了较高精度的测距效果。因此在飞行时间测量精度达到要求的情况下,如何根据激光回波波形的变化来补偿的前沿时刻鉴别的误差,是目前提高脉冲式激光测距精度最主要的研究方向。传统的前沿时刻鉴别技术,仅仅采用了单个固定阈值的高速比较器进行时刻鉴别。本文对多阈值进行了扩展,实测结果表明本文方法能够提升测距精度。

1 传统阈值修正算法

为了定量分析测距误差,本文采用了高斯分布模型对激光脉冲回波进行建模^[14],如式(1)所示。

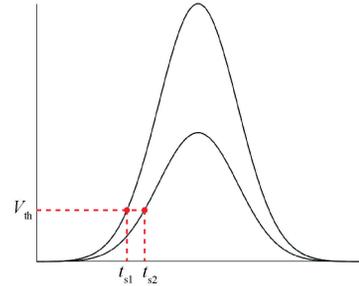
$$s(t) = k_s \times \exp\left[-\frac{(t - t_{ps})^2}{\tau_s}\right] \quad (1)$$

式中: k_s 为回波脉冲幅度; t_{ps} 为脉冲峰值时刻代表激光脉冲飞行的真实时间; τ_s 是固定常量,表示回波脉冲宽度。由于测量的环境以及测量的目标具有不可确定性,回波脉冲宽度 τ_s 保持不变,但是回波脉冲的强度 k_s 是时变的,因此基于单一阈值的前沿时刻鉴别的方式将产生较大的误差。假设单一阈值为 V_{th} , 在相同的测量距离

下,两次回波的脉冲幅度分别为 k_{s1} 和 k_{s2} , 如图2(a)所示。并且两次回波脉冲幅值满足 $V_{th} < \text{Min}\{k_{s1}, k_{s2}\}$, 则这两次回波脉冲在阈值 V_{th} 下鉴别的时刻分别为 t_{s1} 和 t_{s2} , 代入式(1)可得:

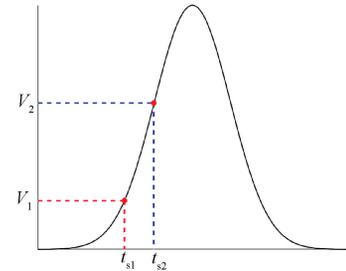
$$\begin{cases} t_{s1} = t_{ps} - \sqrt{\tau_s \cdot \ln\left(\frac{k_{s1}}{V_{th}}\right)} \\ t_{s2} = t_{ps} - \sqrt{\tau_s \cdot \ln\left(\frac{k_{s2}}{V_{th}}\right)} \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可见,即使是相同的距离下获得的激光脉冲回波信号,但回波强度不同导致了信号幅度值发生变化,使得两次测量在时刻鉴别时出现偏差。



(a) 单阈值时刻鉴别

(a) Single threshold time discrimination



(b) 双阈值时刻鉴别

(b) Double threshold time discriminant

图2 传统时刻鉴别方法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of traditional time identification methods

由于单一阈值测量方法测量某一目标时由于回波信号的强弱变化会对飞行时间的计算产生前沿时刻鉴别误差,对测距结果影响很大。为修正上述缺陷,双阈值时刻鉴别方法^[13-14]被提出用于修正测距误差。传统的双阈值进行误差拟合修正的原理如图2(b)所示,固定选取两个阈值 V_1 和 V_2 , 满足 $V_1 < V_2$, 在没有干扰脉冲叠加到脉冲上升沿的情况下,将 V_1 和 V_2 代入式(2)得到当前回波脉冲对应的鉴别时刻分别为 t_{s1} 和 t_{s2} (t_{s1} 和 t_{s2} 均小于 t_{ps})。 t_{s1} 和 t_{s2} 分别满足式(3)。

$$\begin{cases} t_{s1} = t_{ps} - \sqrt{\tau_s \cdot \ln\left(\frac{k_s}{V_1}\right)} \\ t_{s2} = t_{ps} - \sqrt{\tau_s \cdot \ln\left(\frac{k_s}{V_2}\right)} \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可得, t_{s1} 和 t_{s2} 之间的阈值时间差 Δt 如下:

$$\Delta t = t_{s2} - t_{s1} = \sqrt{\tau_s \cdot \ln\left(\frac{k_s}{V_1}\right)} - \sqrt{\tau_s \cdot \ln\left(\frac{k_s}{V_2}\right)} \quad (4)$$

以相对较低的阈值 V_1 所对应的鉴别时刻 t_{s1} 作为测量得到的修正前的飞行时间,以脉冲峰值时刻 t_{ps} 作为飞行时间的真实值, e_t 为飞行时间误差,则飞行时间的修正表达式为:

$$t_{ps} = t_{s1} - e_t \quad (5)$$

根据式(4)和(5),飞行时间误差 e_t 和回波强度 k_s 有如下关系:

$$e_t = t_{s1} - t_{ps} = -\sqrt{\tau_s \cdot \ln\left(\frac{k_s}{V_1}\right)} \quad (6)$$

联立式(4)和(6),可得:

$$\Delta t = -e_t - \sqrt{\tau_s \cdot \ln\left(\frac{k_s}{V_2}\right)} \quad (7)$$

再联立式(6)和(7),化简可得 e_t 关于 Δt 的阈值时间差误差修正表达,如式(8)所示。

$$e_t(\Delta t) = \frac{\tau_s}{2\Delta t} \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right) - \frac{1}{2\Delta t} \quad (8)$$

通过测量得到的阈值时间差 Δt ,代入式(8)求得 e_t ,再将 e_t 代入修正表达式(5)获得真实飞行时间 t_{ps} 来修正前沿时刻鉴别误差。对比单阈值误差修正算法与双阈值算法,双阈值 e_t 误差修正算法在求解飞行时间 t_{ps} 时,其函数只与阈值时间差 Δt 有关而与回波脉冲的幅度无关,因此能够有效解决单阈值算法中因为回波脉冲幅度不同而引起的飞行时间计算偏差。双阈值算法相较于单阈值算法有十分明显的改进,但是在实际工程测试中,由于测量目标形状不规则以及电路噪声等原因经常会有干扰脉冲叠加到信号脉冲的上升沿从而导致回波信号畸变的情况,此时利用基于双阈值的误差修正算法仍会有较大的误差。在实际应用中,激光脉冲不是完全按照高斯脉冲分布的^[14-15],因此,本文提出了一种动态多阈值拟合修正的方法应用于激光测距。

2 动态多阈值误差修正方法

将干扰信号 $n(t)$ 按高斯分布模型建模^[14],模型函数如式(9)所示。

$$n(t) = k_n \cdot \exp\left[-\frac{(t - t_{pn})^2}{\tau_n}\right] \quad (9)$$

干扰信号叠加到回波信号的上升沿后的信号为 $x(t)$ 如式(10)所示。

$$x(t) = s(t) + n(t) = k_s \cdot \exp\left[-\frac{(t - t_{ps})^2}{\tau_s}\right] + k_n \cdot \exp\left[-\frac{(t - t_{pn})^2}{\tau_n}\right] \quad (10)$$

基于双阈值 V_1 和 V_2 且满足 $V_1 < V_2$ 的情况下,可以得到对应的前沿鉴别时刻分别为 t_{s1} 和 t_{s2} ,如图3所示。

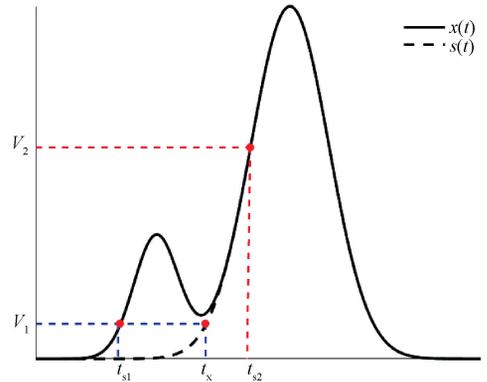


图 3 叠加脉冲干扰示意图

Fig. 3 Diagram of superimposed pulse jamming

此时阈值时间差为 $\Delta t'$,存在如下关系:

$$\Delta t' = t_{s2} - t_{s1} > t_{s2} - t_x \quad (11)$$

在这种情况下,阈值误差拟合方法在对较低阈值 V_1 进行时刻鉴别时无法鉴别到正确的时刻 t_x ,将会得到一个错误的阈值时间差 $\Delta t'$,将 $\Delta t'$ 代入误差拟合修正曲线,将造成较大的偏差。

为了提高基于阈值时间差拟合校准的抗干扰性,解决双阈值无法判断前沿时刻鉴别,从而无法自动调整阈值门限避开干扰脉冲影响的问题,本文提出了一种动态多阈值误差修正方法,使用3个阈值来分别获取脉冲前沿时刻,通过阈值两两之间的阈值时间差建立关于阈值时间差的关联曲线,当修正点远远偏离关联曲线时即判断当前情况下出现了图3的脉冲上升沿畸变的问题,此时通过动态切换阈值门限,找到当前情况下修正点能够落在关联曲线周围的阈值门限,通过这个点在误差修正空间曲线上找到对应的修正误差。

3个阈值 V_1 、 V_2 和 V_3 所对应的阈值时间分别为 t_{s1} 、 t_{s2} 、 t_{s3} 。其中 $V_1 < V_2 < V_3$, V_1 和 V_2 之间的阈值时间差为 Δt_{12} , V_1 和 V_3 之间的阈值时间差为 Δt_{13} ,如式(12)所示。

$$\begin{cases} \Delta t_{12} = t_{s2} - t_{s1} \\ \Delta t_{13} = t_{s3} - t_{s1} \end{cases} \quad (12)$$

通过拟合的方式可以得到时刻鉴别误差 e_t 分别关于 Δt_{12} 和 Δt_{13} 的误差拟合修正平面函数 $e_{t1} = f(\Delta t_{12}, \Delta t_{13})$ 和 $e_{t2} = g(\Delta t_{12}, \Delta t_{13})$,可以生成式(13)的空间曲线。

$$\begin{cases} e_{t1} = f(\Delta t_{12}, \Delta t_{13}) = \frac{\tau_s}{2\Delta t_{12}} \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right) - \frac{1}{2\Delta t_{12}} \\ e_{t2} = g(\Delta t_{12}, \Delta t_{13}) = \frac{\tau_s}{2\Delta t_{13}} \ln\left(\frac{V_1}{V_3}\right) - \frac{1}{2\Delta t_{13}} \end{cases} \quad (13)$$

令式(13)中 $e_{t1} = e_{t2}$,得到空间曲线关于 Δt_{12} 和 Δt_{13} 组成的平面的投影:

$$\frac{\tau_s}{\Delta t_{12}} \cdot \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right) - \frac{\tau_s}{\Delta t_{13}} \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_3}\right) + \Delta t_{13} - \Delta t_{12} = 0 \quad (14)$$

式(14)表示的曲线即为阈值时间差关联曲线,设实际测量中得到的阈值时间差为 $(\Delta t_{12}, \Delta t_{13})$ 。 Δt_{12} 代入式(14)关联曲线方程,解得其对应的 $\Delta t_{13}'$,定义修正偏离度 d 为理论上的 $\Delta t_{13}'$ 与实际的测量 Δt_{13} 时间偏差,如式(15)所示。

$$d = |\Delta t_{13}' - \Delta t_{13}| \quad (15)$$

根据实际的激光测距误差允许情况,规定最大偏离度 d_{max} 。当 $d \leq d_{max}$ 的时候认为当前的修正点没有偏离阈值时间差关联曲线,将点 $(\Delta t_{12}, \Delta t_{13}')$ 代入式(15)获得空间曲线上的修正误差值;当 $d > d_{max}$ 的时候认为当前修正点已经偏离阈值时间差关联曲线,说明此时回波脉冲的上升沿已经发生了畸变导致时刻鉴别错误,需要动态调整阈值门限,将3个阈值 V_1 、 V_2 和 V_3 分别适当调整,得到 V_1' 、 V_2' 和 V_3' ,针对这3个阈值分别可以得到误差拟合修正曲线 $e_t = f'(\Delta t_{12})$ 和 $e_t = g'(\Delta t_{13})$,再重复之前的修正方法,直到满足 $d \leq d_{max}$,找到误差允许范围内的拟合修正值。

动态多阈值的误差拟合修正过程如图4所示。实线阈值为动态调整前的阈值,此时 V_1 鉴别到了干扰脉冲的上升沿,将导致修正点偏离关联曲线,通过动态地将阈值 V_1 切换到 V_1' 、再进行时刻鉴别,得到未偏离关联曲线的修正点,并对误差进行修正。实际测量的关联曲线与修正点位置如图5所示,图5(a)中的3个阈值分别为0.5、0.7、1 V,为该阈值组合所对应的关联曲线,通过实际测量发现在该阈值下实际的测量 Δt_{13} 与关联曲线所对应的 $\Delta t_{13}'$ 差值大于预设的偏离度,因此判定该组阈值鉴别到了干扰脉冲的上升沿,从而导致当前的阈值时间差修正点偏离关联曲线,因此切换到另一组阈值组合如图5(b)所示,3个阈值分别为1、1.2、1.5 V,此时实际测量的 Δt_{13} 时间偏差与关联曲线所对应的 $\Delta t_{13}'$ 差值符合预设的偏离度范围内,则该数据满足系统误差允许范围,将该数据输入到该阈值组合所对应的误差拟合曲线函数中从而得出最终的 Δt_{13} 数值,再利用双阈值时刻鉴别的方法得出测量距离。动态多阈值算法的流程示意图如图6所示。

通过上述动态多阈值误差修正方法,能够在上升沿存在干扰信号的情况下得到满足修正偏离度 d 的阈值时间差修正点 Δt_{13} ,并将该修正点数值回代入阈值时间差误差修正表达式(7)得出真实飞行时间的修正误差,从而对测量的距离进行修正。因为实际的激光回波波形通常不是完全按照高斯脉冲分布,因此对于不同阈值组合要设置不同的拟合函数以保证修正效果,实际测试中3种阈值组合所对应的拟合函数图形如图7所示。

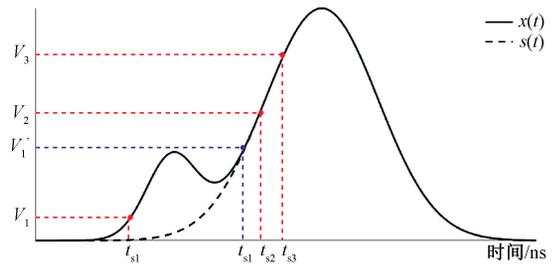


图4 动态多阈值校正示意图

Fig. 4 Principle of dynamic multi-threshold correction

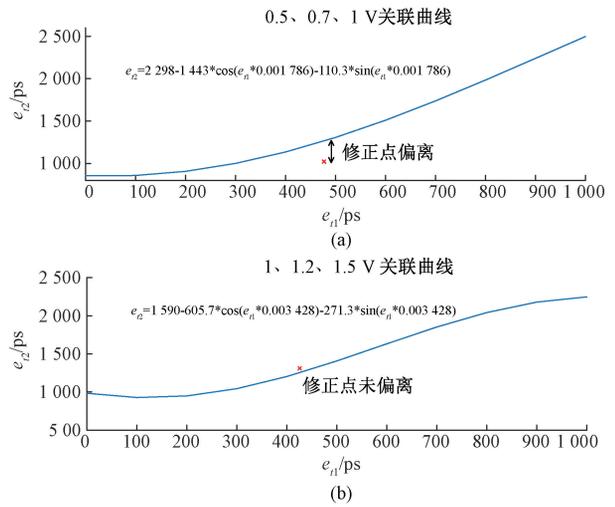


图5 关联曲线与修正点

Fig. 5 Correlation curve and derived correction point

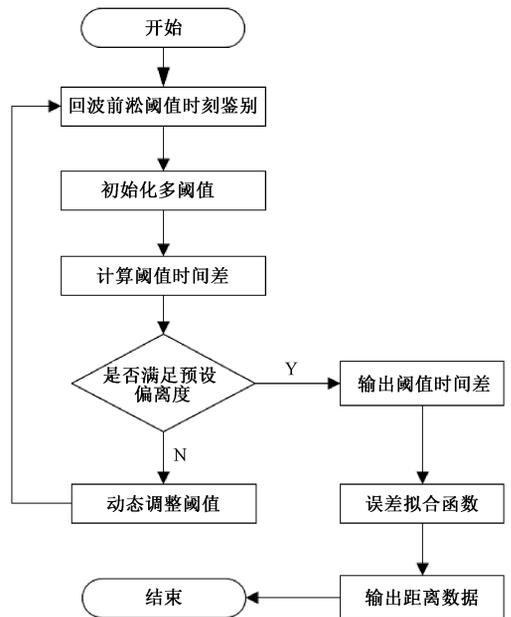


图6 动态多阈值算法流程

Fig. 6 Flow chart of dynamic multi-threshold algorithm

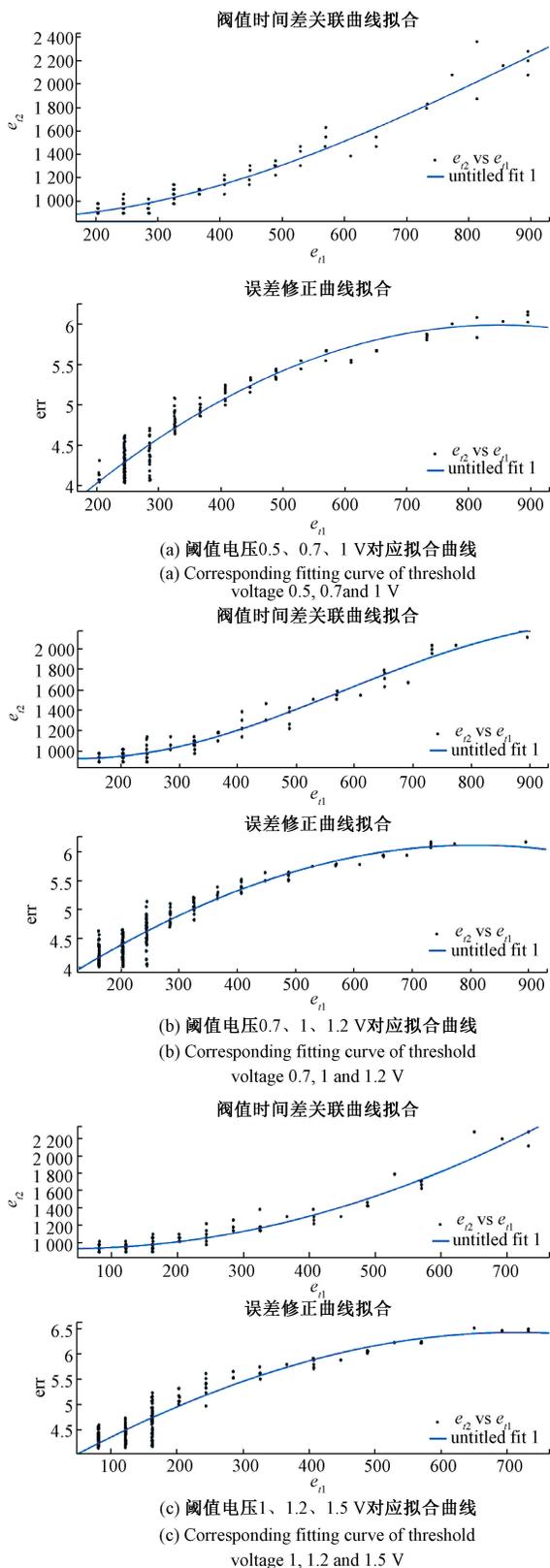


图 7 阈值修正曲线

Fig. 7 Threshold correction curve

3 多阈值误差修正办法的鲁棒性分析

在实际测试中,干扰脉冲的幅度通常小于回波脉冲幅度,而干扰脉冲的幅度大小与待测物体的距离、周围环境以及激光接收电路具体设计等因素有关。当阈值组合设计不当或者干扰脉冲幅度过大时,容易出现 3 个阈值同时落在干扰脉冲的上升沿,从而可能导致误将干扰脉冲识别为回波信号的情况,使得多阈值误差修正法失效,如图 8 所示。

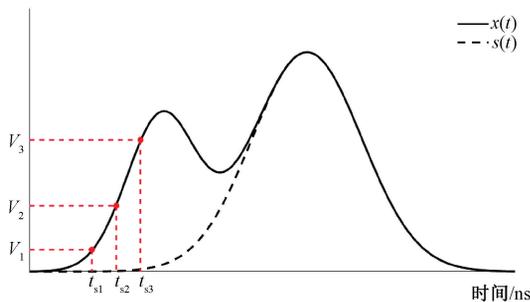


图 8 不合适的阈值组合示意图

Fig. 8 Inappropriate threshold combination schematic

为防止上述情况出现,则需要至少一个阈值落在回波信号的上升沿上才能够使得多阈值误差修正法正确识别出畸变信号并根据预设偏离度来判断是否滤除该数据。

为应对这种特殊情况,将信号脉冲输入一高通容阻微分线路^[16],使得原来的极值点转变为零点如图 9 所示,图 9 中 $s(t)$ 表示叠加干扰信号的回波信号, $d(t)$ 为 $s(t)$ 的微分信号。 $d(t)$ 信号通过过零检测电路^[17]结合 TDC 电路得到干扰脉冲极值点所对应的时刻。将干扰脉冲极值点所对应的时刻对比 3 个阈值所对应的时刻,就可以知道阈值是否均落在干扰脉冲的上升沿,从而判断该组阈值组合是否适用于当前的回波接收信号。

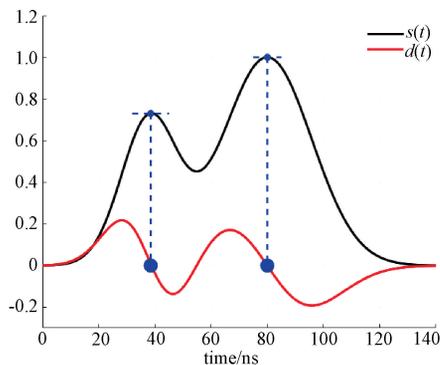


图 9 高通阻容时刻鉴别原理

Fig. 9 High-pass resistance and capacitance time identification diagram

4 实验验证

基于多阈值误差修正算法的高精度远距离激光测距实验平台如图 11 所示,测试平台由放大镜相机、激光测距系统组成了一套巡检仪实验平台。实际测量所得的回波波形与测试目标示意如图 12 所示。

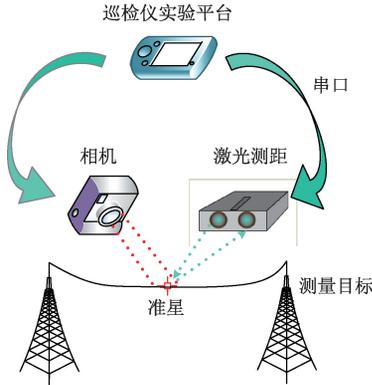


图 11 实验平台

Fig. 11 Experimental platform

如图 12 所示,在实际测量中回波波形中存在干扰,在上升沿处会有明显畸变,这时候传统的双阈值修正误差效果较差,通过实际测试对比双阈值算法与动态多阈值算法对误差修正的效果。测试以 GLM250VF 型号激光测距仪测试结果为标准进行对比,该型号仪器能够实现 ±1 mm 的测距精度。分别给出在使用双阈值方法测试以及动态多阈值方法测试时的结果如表 1 和 2 所示。

对比传统的双阈值方法与动态多阈值误差修正方法,可以发现本文提出的动态多阈值方法能够有效剔除偏差较大的数据使得测距数据的抖动减小,相较于简单的对测试数据进行方差和均值计算然后进行数据剔除,极易造成真实测量数据的被错误滤除,而动态多阈值方法能够有效识别目标回波脉冲,并剔除偏差较大的错误数据,使得数据整体方差明显减小,对测距精度有明显改善,从而验证了动态多阈值算法的性能。

5 结论

针对双阈值误差拟合方法在干扰脉冲叠加到信号脉冲上升沿时无法准确修正时刻鉴别误差的问题,本文提出了一种新型的动态多阈值误差拟合算法,通过动态切换 3 个阈值门限以找到最佳的拟合方式,从而有效鉴别,避免了阈值鉴别前沿时刻导致错误的拟合修正。在此基础上进一步提出了阈值时间差关联曲线,通过判断修正点是否完全偏离当前阈值的关联曲线来动态调整阈值门限,以此达到较准确的拟合修正效果。除此之外,动态的



(a) 实测场地

(a) Measured site



(b) 实测回波波形

(b) Measured echo waveform

图 12 测试场景

Fig. 12 Experimental scene

表 1 双阈值时刻鉴别测试数据

Table 1 Time discrimination test data of double threshold

测试距离	30 m	50 m	80 m	100 m
GLM250VF	30.08	50.08	80.13	100.07
	30.12	50.08	80.8	101.8
	31.98	50.67	82.9	100.1
	30.17	49.37	81.4	100.6
自研设备	33.8	50.27	80.3	100.4
测试数据	29.12	51.26	82.7	101.3
	31.96	49.91	82.3	101.4
	31.6	51.27	82.4	101.4
	32.27	51.14	81.8	101.8
均值/方差	31.378/1.39	50.496/0.66	81.8/0.87	101.1/0.61

表 2 动态多阈值时刻鉴别测试数据

Table 2 Dynamic multi threshold time discrimination test data

测试距离	30 m	50 m	80 m	100 m
GLM250VF	30.08	50.08	80.13	100.07
	30.12	50.08	80.13	100.1
	30.07	49.87	80.07	100.12
	30.21	50.13	80.11	100.08
自研设备	29.92	50.08	80.06	100.06
测试数据	30.08	50.11	80.04	100.07
	30.14	50.06	79.97	100.08
	30.17	50.10	80.13	100.10
	29.97	49.92	80.05	100.03
均值/方差	30.08/0.09	50.04/0.09	80.07/0.05	100.08/0.03

阈值调整也避免了因为初始阈值过高而导致的测距能力下降的问题。

参考文献

- [1] 陈千颂, 杨成伟, 潘志文, 等. 激光飞行时间测距关键技术进展 [J]. 激光与红外, 2002(1): 7-10.
CHEN Q S, YANG CH W, PAN ZH W, et al. Key technology progress of laser time of flight ranging [J]. Laser and Infrared, 2002 (1): 7-10.
- [2] 马鸿斌. 近程脉冲激光测距技术研究 [D]. 上海: 东华大学, 2020.
MA H B. Research on short range pulsed laser ranging technology [D]. Shanghai: Donghua University, 2020.
- [3] SUN X B, TAN J J, XU J, et al. Research on key technology for phase-shift laser range finder [C]. 2013 IEEE 11th International Conference on Dependable, Autonomic and Secure Computing, 2013.
- [4] XIE C C, LIU C J, ZHANG Z K. A method of automatic gain control for improving measurement level in pulse laser rangefinder [C]. 2011 2nd International Conference on Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce (AIMSEC), 2011.
- [5] LIANG K, LIU H, JU H. Accurate ranging method of pulse laser time-of-flight based on the principle of self-triggering [C]. Proceedings of the 32nd Chinese Control Conference, 2013: 5583-5587.
- [6] 耿春萍, 程度, 张治. 激光脉冲测距的测距精度及误差分析 [J]. 光电技术应用, 2007(2): 28-31.
GENG CH P, CHENG D, ZHANG ZH. Ranging accuracy and error analysis of laser pulse ranging [J]. Application of Optoelectronic Technology, 2007 (2): 28-31.
- [7] 白雪菲, 冯迪, 秦川, 等. 高精度脉冲激光测距系统设计及实验研究 [J]. 激光杂志, 2019, 40(10): 6-10.
BAI X F, FENG D, QIN CH, et al. Design and experimental study of high precision pulsed laser ranging system [J]. Laser journal, 2019, 40 (10): 6-10.
- [8] 黄民双, 关在辉, 姜博. 利用正弦幅值时间转换的脉冲激光测距方法 [J]. 红外技术, 2020, 42(5): 483-487.
HUANG M SH, GUAN Z H, JIANG B. Pulsed laser ranging method using sine amplitude time conversion [J]. Infrared Technology, 2020, 42 (5): 483-487.
- [9] 高勇, 黄飞波, 陈丽达. 脉冲式激光测距机测距能力研究 [J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2020, 38(5): 44-47.
GAO Y, HUANG F B, CHEN L D. Research on ranging capability of pulse laser rangefinder [J]. Reliability and Environmental Test of Electronic Products, 2020, 38 (5): 44-47.
- [10] 邵艳明, 王爽, 王兴, 等. 激光脉冲弱小回波信号提取方法研究 [J]. 激光与红外, 2020, 50(3): 285-292.
SHAO Y M, WANG SH, WANG X, et al. Study on extraction method of weak small echo signal of laser pulse [J]. Laser and Infrared, 2020, 50 (3): 285-292.
- [11] KURTTI S, KOSTAMOVAARA J. Pulse width time walk compensation method for a pulsed time-of-flight laser rangefinder [C]. 2009 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Singapore, 2009: 1059-1066.
- [12] 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): 155-162.
CHEN R Q, JIANG Y S, PEI CH. High frequency pulse laser ranging system based on double threshold forward time discrimination [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33 (9): 155-162.
- [13] 吴钰, 周木春, 赵琦, 等. 脉冲激光测距中阈值-峰值双通道时刻鉴别方法 [J]. 红外与激光工程, 2019, 48(6): 318-324.
WU Y, ZHOU M C, ZHAO Q, et al. Time identification method of threshold peak dual channel in pulsed laser ranging [J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48 (6): 318-324.
- [14] 周辉, 李松. 激光测高仪接收信号波形模拟器 [J]. 中国激光, 2006(10): 1402-1406.
ZHOU H, LI S. Received signal waveform simulator of laser altimeter [J]. China Laser, 2006 (10): 1402-1406.
- [15] 谢庚承, 叶一东, 李建民, 等. 脉冲激光测距回波特性及测距误差研究 [J]. 中国激光, 2018, 45(6): 260-267.
XIE G CH, YE Y D, LI J M, et al. Research on echo characteristics and ranging error of pulsed laser ranging [J]. China Laser, 2018, 45 (6): 260-267.
- [16] PALOJARVI P, RUOTSALAINEN T, KOSTAMOVAARA J. A new approach to avoid walk error in pulsed laser range finding [C]. IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), 1999: 258-261.
- [17] 巩银苗, 鲁西坤, 徐帅, 等. 基于 LM339 电压比较器的交流过零检测电路设计 [J]. 煤矿机电, 2018(5): 33-36, 39.
GONG Y M, LU X K, XU SH, et al. Design of AC zero crossing detection circuit based on LM339 voltage comparator [J]. Coal Mine Electromechanical, 2018 (5): 33-36, 39.

作者简介



吴培鹏, 2018 年于浙江万里学院获得学士学位, 现为杭州电子科技大学研究生, 主要研究方向为激光测距与通信技术研究。
E-mail: 851048648@qq.com

Wu Peipeng received his B. Sc. degree from Zhejiang Wanli University in 2018. He is currently a M. Sc. candidate at Hangzhou Dianzi University. His main research interests include laser ranging and communication technology research.



蔡文郁(通信作者), 2002 年、2007 年于浙江大学分别获学士学位和博士学位, 现为杭州电子科技大学教授, 博导, 主要从事无线物联网、激光测距与通信技术研究。
E-mail: dreampp2000@163.com

Cai Wenyu (Corresponding author) received her B. Sc. degree and Ph. D. degree from Zhejiang University in 2002 and 2007 respectively. He is currently a professor and doctoral supervisor at Hangzhou Dianzi University. His main research interests include wireless internet of things, laser ranging and communication technology research.



唐国栋, 2019 年于杭州电子科技大学获学士学位, 现为杭州电子科技大学在读研究生, 主要从事 AUV 控制系统、激光测距与通信技术研究。
E-mail: hdu_tangguodong@163.com

Tang Guodong received his B. Sc. degree from Hangzhou Dianzi University in 2018. He is currently a M. Sc. candidate at Hangzhou Dianzi University. His main research interests include AUV control system, laser ranging and communication technology research.



王志强, 2019 年于蚌埠学院获学士学位, 现为杭州电子科技大学硕士研究生, 主要从事 AUV 控制系统、激光测距与通信技术研究。

E-mail: qiang_3125@163.com

Wang Zhiqiang received his B. Sc. degree from Bengbu University in 2019. He is currently a M. Sc. candidate at Hangzhou Dianzi University. His main research interests include AUV control system, laser ranging and communication technology research.



朱张峰, 毕业于浙江大学(自考), 现任国家电网宁波市北仑区供电公司工程师, 主要研究方向为电力电子技术。

E-mail: qiang_3125@163.com

Zhu Zhangfeng graduated from Zhejiang University. He is now an engineer of Ningbo Beilun Power Supply Company of State Grid. His main research interest includes power electronics technology.