

## 激光引信饱和漂移误差消除算法

张乐琪, 查冰婷, 张 合

(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)

**摘 要:** 为保证激光引信在近程的测距精度, 文中针对恒比定时法在激光接收器饱和时会发生跳变点前移的现象, 提出一种基于回波功率方程的误差补偿算法。通过线性化模型描述脉冲信号, 推导了饱和漂移误差的解析表达式, 分析了其随回波信号上升沿斜率的变化规律。根据回波功率方程, 在小角度入射特定目标的条件下, 建立饱和漂移误差补偿数学模型; 通过实验标定误差补偿表达式, 得到修正后的测距公式, 验证了饱和漂移误差补偿方法的有效性。实验结果表明: 激光引信在回波信号饱和时测距有较大偏差, 最大偏差达到 1.4 m; 采用误差补偿方法后, 可使偏差控制在  $\pm 0.5$  m 以内。研究可为小型化高精度激光引信测距系统设计提供理论参考。

**关键词:** 激光近炸引信; 误差补偿模型; 饱和漂移误差; 恒比定时法

**中图分类号:** TJ430 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1206006

## Method of eliminating saturation drift error of laser fuze

Zhang Leqi, Zha Bingting, Zhang He

(ZNDY of Ministerial Key Laboratory, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** It is discovered that the jump point of the constant fraction discrimination(CFD) method moves forward when the laser receiver is saturated. In order to guarantee the range precision of laser fuze in short range, an error compensation algorithm based on the echo power equation was proposed for results correction. Firstly, based on a linear model to describe the pulse signal, the analytic expression of the saturation drift error was derived, and the relationship between drift error and echo signal slope was analyzed. Then, according to echo power equation, the compensation model of saturation drift error was established, in the case of the laser incidence on a specific target with a small angle. The error compensation expression was calibrated by experiment. Finally, a modified ranging formula was obtained. And the error compensation effect was tested by experiment. The results show that when the signal is saturated, the ranging deviates from the actual distance, and the deviation can be up to 1.4 m; due to the use of error compensation method, ranging deviation can be maintained between  $\pm 0.5$  m. Thus, this work can provide a theoretical reference for the design of miniaturized high precision laser proximity fuze.

**Key words:** laser proximity fuze; error compensation model; saturation drift error; CFD

收稿日期: 2018-07-05; 修订日期: 2018-08-03

基金项目: 国家自然科学基金(51709147)

作者简介: 张乐琪(1993-), 男, 硕士生, 主要从事水下激光测距技术方面的研究。Email: rockszhang@163.com

通讯作者: 查冰婷(1990-), 女, 讲师, 博士, 主要从事激光近程探测方面的研究。Email: zhabingting@163.com

## 0 引言

脉冲激光测距法通过测量脉冲光信号往返的飞行时间对目标进行测距。脉冲激光测距精度高,抗干扰性能较好,广泛应用于激光近炸引信中。现有激光引信中已普遍采用 TDC+处理器的信号处理技术实现对目标距离的精确测量<sup>[1-2]</sup>。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提高到 20 ps<sup>[3]</sup>。而脉冲激光测距精度除与时间间隔测量精度有关外,还与时刻鉴别精度密切相关。恒比定时法由于时刻鉴别精度高,被广泛应用于激光引信测距系统中<sup>[4-6]</sup>。受限于接收通道动态范围<sup>[7-9]</sup>,当激光引信在近程遇到强反射目标时,回波信号会发生饱和。信号饱和使得恒比定时法的跳变点前移,产生饱和和漂移误差,影响其时刻鉴别精度。为保证测距精度的前提下提高对目标的适应能力,常采用误差补偿法。国内外对误差补偿法的研究有很多,但大多集中于前沿判别法的误差补偿领域。参考文献[9]研究了双阈值前沿判别法的误差补偿机制,参考文献[10]研究了前沿判别和恒比定时法复合的误差补偿机制。上述研究对恒比定时法的饱和和漂移误差补偿有一定借鉴意义。

文中采用 100 ns 脉宽的激光器,接收通道 1 GHz 带宽满足要求。相对于窄脉冲激光测距系统,由于上升沿较平缓,因此对时刻鉴别精度的要求更高。文中以线性化模型推导饱和和漂移误差的解析表达式,针对饱和和漂移误差提出相应消减补偿误差的方法,建立饱和和漂移误差补偿数学模型,并通过实验标定误差补偿表达式,得到修正后的测距公式,验证了饱和和漂移误差补偿方法的有效性。

## 1 激光引信测距工作原理

激光引信测距原理如图 1 所示,脉冲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时刻鉴别电路。激光脉冲经靶板反射后,被光电探测器所接收后送入时刻鉴别电路。时刻鉴别电路采用恒比定时法,以保证较高的位置精度。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,并将结果返回单片机(MCU)。

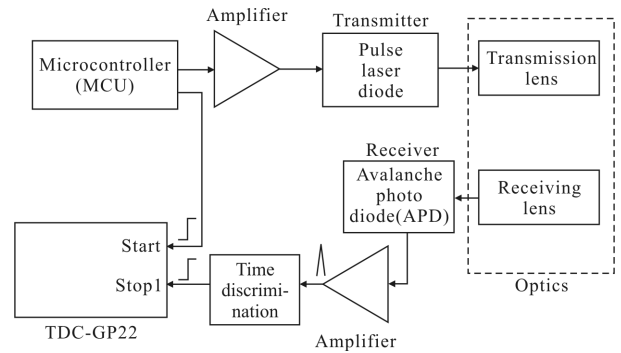


图 1 激光引信测距原理框图

Fig.1 Diagram of laser fuze ranging principle

## 2 饱和和漂移误差的产生及分析

由于接收到的激光脉冲信号的功率变化和电路本身的非理想性,恒比定时法会产生由信号饱和和引起的漂移误差。用线性化模型描述回波信号,对饱和和漂移误差进行估算。

当回波信号正常时,如图 2(a)所示,信号  $V_i(t)$  被分成两路,一路经过延迟变为信号  $V_o(t)$ ,延迟时间为  $t_d$ ;另一路经过衰减变为信号  $V_k(t)$ ,衰减因子为  $k$ 。两路信号然后经过比较器输出零点位置,即为定时点

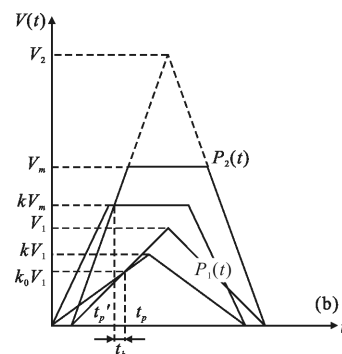
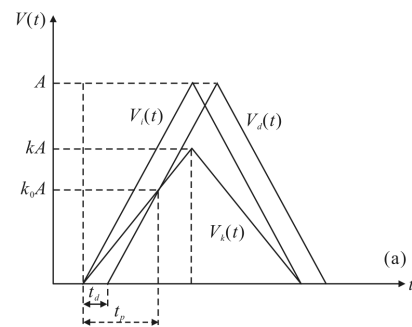


图 2 信号正常(a)和信号饱和时(b)的时刻鉴别示意图

Fig.2 Schematic of time discrimination with normal (a) and saturated (b) signal

$t_p$  位置。 $t_p$  即理论时刻点,与信号幅度无关,仅与衰减因子  $k$  和延迟时间  $t_d$  有关<sup>[1]</sup>:

$$t_p = \frac{t_d}{1-k} \quad (1)$$

当回波信号饱和时,如图 2(b)所示,其中  $P_1$ 、 $P_2$  为信号正常区和饱和区的脉冲信号,  $t_p$  为信号正常区的鉴别时刻点,  $t_p'$  为信号饱和时的鉴别时刻点,由于饱和和漂移误差的影响,偏离理论时刻点  $t_p$ :

$$t_{p'} = t_d + \frac{kV_m}{V_2} t_r \quad (2)$$

式中:  $V_2$  为脉冲饱和信号的理论幅度,在上升沿时间  $t_r$  保持不变时,用于衡量信号上升沿斜率的大小;  $V_m$  为放大器饱和脉冲信号被截断的电压;  $t_r$  为脉冲上升沿时间。则两个鉴别时刻点的时间间隔即为饱和和漂移误差,记为  $t_{drift}$ :

$$t_{drift} = t_{p'} - t_p = \frac{k}{1-k} t_d - \frac{kV_m}{V_2} t_r \quad (3)$$

由公式(3)可知,除了理论幅度  $V_2$ ,其余参数在同一激光器上均保持不变,因此在信号饱和时,饱和和漂移误差  $t_{drift}$  可看做理论幅度  $V_2$  的函数。

当恒比定时法的衰减系数  $k$  为 0.5,延时时间  $t_d$  为 30 ns,脉冲上升沿时间  $t_r$  为 100 ns,饱和电压  $V_m$  为 5 V,输入信号的理论幅度  $V_2$  为 8.5~100 V 时,产生的饱和和漂移误差  $t_{drift}$  可达 27.5 ns。随着信号理论幅度增加,饱和和漂移误差迅速增大,并趋向于一个极值。由公式(3)可知误差的极值为  $\frac{k}{1-k} t_d$ ,为 30 ns。此时饱和和漂移误差已极大地影响了测量精度。

### 3 饱和和漂移误差补偿建模

根据误差来源,补偿分为两部分,一部分是对信号饱和引起的漂移误差的补偿,另一部分是固定电路延迟的补偿。

由公式(3)可知,饱和和漂移误差  $t_{drift}$  的大小与信号理论幅度  $V$  有关,因此可以使用脉冲幅度的信息对饱和和漂移误差进行修正。由于放大电路是线性的,故脉冲信号的幅度与目标的回波功率成正比。

假设激光引信近似为收发同轴,当以小角度入射某一类特定目标,目标为扩展目标且表面满足朗伯余弦定律<sup>[12-13]</sup>,则激光大气中的目标回波功率方程如下:

$$P_r(R) = \frac{P_t \eta \rho \cos \theta A_r}{\pi R^2} e^{-2\mu R} \quad (4)$$

式中:  $\eta$  为光学系统的总透过率;  $P_t$  为发射脉冲激光的峰值功率;  $\theta$  为激光发射方向与目标平面法线之间所夹锐角;  $\rho$  为目标表面的平均反射率;  $A_r$  为接收系统的有效孔径面积;  $\mu$  为大气的衰减系数。

由公式(4)可知大气中目标的回波功率可以表示为距离  $R$  的函数,因此脉冲信号的理论幅度  $V$  可以表示为距离  $R$  的函数:

$$V(R) = \frac{B}{R^2} \cdot e^{-2\mu R} \quad (5)$$

其中  $B$  为:

$$B = \frac{P_t \eta G \rho \cos \theta A_r}{\pi}$$

式中:  $G$  为放大电路的增益。公式(5)表明,当激光器参数、目标反射率和入射角等确定时,输入信号的理论幅度  $V$  可由目标距离  $R$  唯一确定,且具有严格的数值关系。因此,饱和和漂移误差表达式为:

$$t_{drift} = t_d + \frac{kV_m t_r}{B} R_0^2 \cdot e^{2\mu R_0} \quad (6)$$

式中:  $R_0$  为目标真实距离。由于大气的衰减系数很小,指数部分的影响很小,随距离变化不大,因此可以看成常数。指数部分用在饱和距离  $R_b$  的值近似替代,则饱和和漂移误差表达式改写成:

$$t_{drift} = t_d + \frac{kV_m t_r e^{2\mu R_b}}{B} R_0^2 \quad (7)$$

已知处理电路延迟为  $t_D$ ,则误差补偿表达式为:

$$t_{error} = t_D + t_{drift} \quad (8)$$

式中:  $t_{error}$  为误差补偿量。将公式(7)代入公式(8),得到误差补偿最终表达式为:

$$t_{error} = t_d + t_D + \frac{kV_m t_r e^{2\mu R_b}}{B} R_0^2 \quad (9)$$

在实际测量过程中,已知测量时间  $t_1$  和标准时间  $t_0$ ,误差补偿量  $t_{error}$  也可表示为两者之差:

$$t_{error} = t_1 - t_0 \quad (10)$$

式中:  $t_0$  为真实距离  $R_0$  对应的光飞行时间。联立公式(9)和公式(10),将标准时间  $t_0$  用真实距离  $R_0$  表示,移项可得  $t_1$  与  $R_0$  的函数关系:

$$\begin{cases} t_1 = a \cdot R_0^2 + b \cdot R_0 + e \\ a = \frac{kV_m t_r e^{2\mu R_b}}{B} \\ b = 2/c \\ e = t_d + t_D \end{cases} \quad (11)$$

式中： $c$  为大气光速； $e$  代表系统总延时。由于式中部分参数难以直接获得，采用实验标定的方法，通过曲线拟合得到。

实际测量过程中，测量时间  $t_1$  是已知量，真实距离  $R_0$  是待求量，因此求反函数，得到误差补偿后的测距公式：

$$R_0 = \frac{\sqrt{4at_1 + b^2 - 4ae} - b}{2a} \quad (12)$$

#### 4 系统测试结果与讨论

为测试信号饱和对系统测距精度的影响，实验采用标准漫反射板(平均反射率  $\rho=0.15$ )作为目标，分别测量 5、7、8 m 处的定时点情况。

图 3 显示在不同距离下回波波形及恒比定时法的定时点情况。图 3(a)、(b)分别为 8、7 m 处的回波波形，图中显示了恒比定时法的衰减信号和延时信号，它们的交点即定时点  $t_b$ ；此时信号未饱和，用示波器光标测量信号起始点与定时点的时间间隔，均稳定在 122 ns 左右。图 3(c)为目标在 5 m 处的定时点情况，此时回波较强，激光接收器饱和，由于 LC 电路影响，延时信号、衰减信号有一定变形，但大致符合第二节的线性模型；定时点  $t_b$  仍旧存在，但有一定的前移，用光标测量起始点与定时点的时间间隔为 110 ns，前移偏差约为 12 ns，此时饱和漂移误差的影响很大。

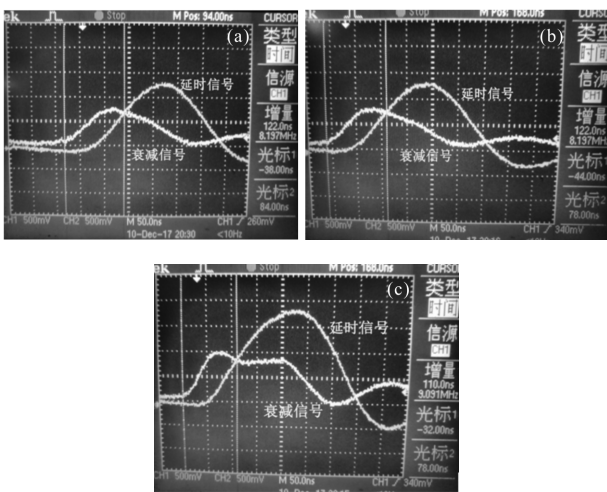


图 3 恒比定时实验图

Fig.3 Experimental figure of CFD

为消除饱和漂移误差，需要重新标定测距公式。

激光测距系统分别对 2、3、4、5 m 处标准漫反射板各测量 5 次，获得 20 组数据。为减小时刻鉴别抖动误差的影响，获得准确的误差补偿表达式，采用多次测量(40 组)的平均值作为测量结果<sup>[11]</sup>。

参照公式(11)，经多项式曲线拟合得到参数  $a=1.1515$ ， $b=5.3020$ ， $e=114.3762$ ，则测量时间  $t_1$  与实际距离  $R_0$  的函数关系为：

$$t_1 = 1.1515 R_0^2 + 5.3020 R_0 + 114.3762 \quad (13)$$

由公式(13)可得误差补偿的表达式为：

$$\bar{t}_{error} = 1.1515 R_0^2 - 1.3646 R_0 + 114.3762 \quad (14)$$

图 4 显示了实际距离  $R_0$  与误差补偿量  $\bar{t}_{error}$  之间的关系。图中离散点为实际的误差补偿量  $\bar{t}_{error}$ ，曲线为拟合得到的误差补偿表达式，对应的是拟合误差补偿量  $\bar{t}_{error}$ 。已知测量时间为  $t_1$ ，标准时间为  $t_0$ ，两者之差为实际误差补偿量  $\bar{t}_{error}$ 。用判定系数  $R^2 \left( \frac{SSR}{SST} \right)$  来说明误差补偿表达式对实际误差补偿量的拟合程度。 $R^2$  越接近 1，说明表达式的拟合程度越好。数据处理得到  $R^2=0.9584$ ，表明信号饱和时，误差补偿表达式较符合实际情况。

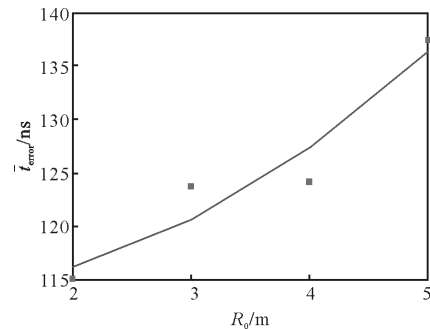


图 4 误差补偿表达式的拟合曲线

Fig.4 Fitted curve of error compensation expression

根据公式(13)，在已知  $t_1$  的条件下可反解出  $R_0$ ，最终得到脉冲激光测距公式：

$$R_0 = \frac{\sqrt{4.606t_1 - 498.7056}}{2.303} - 2.3022 \quad (15)$$

由于系统总延时  $e$ ，测量时间  $t_1$  始终大于 114.3762 ns，满足根号的非负性。但修正后的测距公式也有一定局限性，只适用于  $\rho=0.15$  的目标。要获得其他目标的测距公式，需要重新标定。

激光引信需要实时获取目标距离，因此只能通

过几个回波信号来计算。通过测量 3 次距离数据,并采用标定得到测距公式对距离数据进行误差补偿后,得到系统测距结果。定义测距距离均值 $\bar{R}$ 与目标真实距离的偏差为  $\Delta R$ , 多次测距距离的均方差为  $\sigma_R$ 。用  $\Delta R$  和  $\sigma_R$  来表征系统测距精度,前者表示测距系统的准确度,后者表示测距系统的稳定性。

图 5 为误差补偿法前后得到的测距结果图,其中图 5(a)中  $\Delta R_{\text{bec}}$ 、 $\Delta R_{\text{acc}}$  分别表示误差补偿法前后得到的测距偏差。当信号饱和后,系统原有测距公式标定的测距结果均值逐渐偏离目标真实距离,最大偏差  $\Delta R_{\text{bec}}$  达到 1.4 m; 使用误差补偿法后,偏差  $\Delta R_{\text{acc}}$  控制在  $\pm 0.5$  m 以内。图 5(b)中  $\sigma_{R_{\text{bec}}}$ 、 $\sigma_{R_{\text{acc}}}$  为采用误差补偿法前后得到的测距均方差,修正后的  $\sigma_{R_{\text{acc}}}$  不超过 0.55 m。考虑到还存在皮尺测量的误差,误差补偿得到的距离值与实际值符合地较好,在提高了信号饱和时测距系统准确性的同时,又保证了测距系统的稳定性。

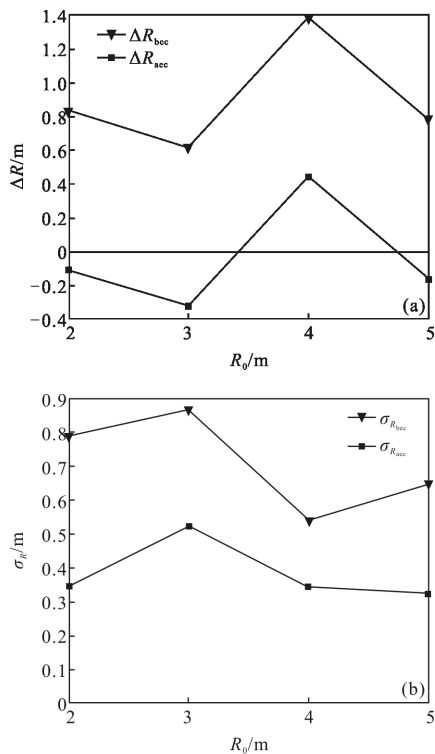


图 5 误差补偿前后测距结果对比图

Fig.5 Ranging comparison between before and after error compensation

## 5 结论

文中以误差补偿为背景,建立恒比定时法的饱

和漂移误差补偿模型,采用多项式拟合法标定误差补偿曲线,得到测量时间与实际距离的对应关系,用于信号饱和时的测量结果校准。通过实验测试,信号饱和时测距均值普遍偏离真实距离,最大偏差达 1.4 m;采用误差补偿方法后,偏差控制在  $\pm 0.5$  m 以内,同时测距均方差不超过 0.55 m。该方法对修正信号饱和引起的漂移误差效果良好,且是纯软件方法,可以较容易地移植到采用恒比定时法的激光引信上,能很好地解决信号饱和时的测距精度问题。

## 参考文献:

- [1] Chen Huimin, Jia Xiaodong, Cai Kerong. The Technology of Laser Fuze [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2016: 139. (in Chinese)
- [2] An Haixia, Deng Kun, Bi Zhiyue. Miniaturization and lightweight technology of high-power laser equipment [J]. Chinese Optics, 2017, 10(3): 321-330. (in Chinese)
- [3] Zhang Liming, Zhang Yi, Zhao Xin. Study on flight time measurement laser ranging sensor based on TDC [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2011, 30 (12): 71-74. (in Chinese)
- [4] Wang Shuai, Sun Huayan, Guo Huichao. Error analysis of time discrimination module based on Simulink [J]. Laser & Infrared, 2017, 47(2): 137-143. (in Chinese)
- [5] Dai Qin, Geng Yue, Li Yequi, 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. (in Chinese)
- [6] Wang Heqi, Meng Fanjiang, Guo Lihong, et al. High precision data acquisition of control system for high-power TEA CO<sub>2</sub> laser based on DSP [J]. Chinese Optics, 2011, 4 (4): 411-417. (in Chinese)
- [7] Chen Xiangcheng. Research on echo processing methods and system of pulsed laser radar[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015. (in Chinese)
- [8] Guo Ying, Chen Yi, Huang Genghua, et al. Method of automatic gain control used in high precision pulse laser range finder[J]. Laser & Infrared, 2010, 40(4): 345-348. (in Chinese)
- [9] 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): 1-8. (in Chinese)

- 
- [10] Xu Zhengping, Shen Honghai, Yao Yuan, et al. Scannerless laser active imaging validating system by directly ranging[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(2): 251-259. (in Chinese)
- [11] Yao Pingping, Tu Bihai, Wang Xiangjing, et al. Design and application of high-precision threshold circuit for laser proximity fuze [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(4): 1156-1161. (in Chinese)
- [12] Zhang Xiangjin, Shen Na, Hu Xin, et al. Scattering properties of target surface in the laser short-range detection [J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(7): 0706003. (in Chinese)
- [13] Chen Huimin, Liu Xinyang. Backscattering polarization characteristics of pulsed laser fuze with coaxial optical system in water fog [J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(3): 626-631. (in Chinese)