

❖ 特约专栏 ❖

探测距离对激光定距引信探测能力影响的分析与评价

姚宗辰, 张 合, 张祥金, 黄正祥, 岳连永

(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: 为全面评价激光定距引信的探测能力, 确定其随距离变化的规律, 通过推导脉冲激光测距回波方程, 建立脉冲激光测距数据分布解析方程并提出误差量化评价方法。仿真分析并评估了探测距离对回波信号及探测能力各指标的影响, 最后通过试验得到验证。结果表明: 可靠测程内, 引信可实现可靠探测, 随探测距离减小, 测距随机误差先减小后增加, 系统误差逐渐增加; 引信最大可靠测程为 84.8 m, 测程内随机误差为 0.22~0.73 m, 满足引信远程定距的需求; 提高阈值可明显改善测距误差, 但会造成可靠测程减小。所得探测能力变化规律与评价方法可为脉冲激光引信设计与应用提供理论依据。

关键词: 激光引信; 探测能力; 测距误差; 探测距离

中图分类号: TJ439.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0303005

Analysis and evaluation of detection distance effect on detection capability of laser fixed-distance fuze

Yao Zongchen, Zhang He, Zhang Xiangjin, Huang Zhengxiang, Yue Lianyong

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

Abstract: To comprehensively evaluate the detection capability of the laser fixed-distance fuze, and obtain the variation in detection capability with the detection distance, the analytic equation of the distribution of pulsed laser ranging was established by deriving the echo equation of pulsed laser ranging, and an error quantification evaluation method was also proposed. The influence of detection distance on echo signal and the indicators of detection capability were analyzed and evaluated, and the results were verified by experiments. Results indicate that the detection of fuze is reliable within its reliable range. In addition, the random ranging error tends to initially decrease and then increase while the system error has the trend to increase gradually as the detection distance decrease. The maximum reliable range of fuze is 84.8 m and the random error is 0.22–0.73 m in the reliable range, thus satisfying the requirement of remote fixed-distance fuze. Besides, with the increase of the threshold, the range error can be obviously improved a lot, although the reliable range is caused to be reduced. The variation rules and evaluation methods in this work can provide a theoretical basis for the design and application of the pulsed laser fuze.

Key words: laser fuze; detection capability; range error; detection distance

收稿日期: 2017-10-10; 修订日期: 2017-12-20

基金项目: 武器装备预先研究项目(41419030203, 41419050202)

作者简介: 姚宗辰(1990-), 男, 博士生, 主要从事激光近程探测方面的研究。Email: yaozongchen@njst.edu.cn

导师简介: 张合(1957-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事智能探测与控制技术方面的研究。Email: hezhangz@mail.njst.edu.cn

0 引言

近炸引信的出现大大提高弹药的攻击效能,脉冲激光定距引信便是随着激光探测技术发展应运而生的一种新型近炸引信,其探测能力直接决定了弹药能否在最佳距离精确作用,是实现弹药发挥最大作用效能的关键^[1]。

脉冲激光定距引信的基本原理是通过阈值时刻判别方式对脉冲飞行时间进行测量,获取目标的距离信息,从而实现定距作用,这与激光测距机及激光雷达的测距原理类似。在理论上可靠地确定激光引信的探测能力是激光引信设计及应用过程中必不可少的环节。由测距原理可知,探测系统固有参数、回波信号波形变化、噪声、目标反射特性及探测距离等诸多因素都将影响激光引信的探测能力^[2]。来建成等基于探测概率和虚警概率对探测能力进行评价,并对最小接收光功率及最大理论测程进行了分析^[3-5],均是基于雷达测距方程演化而来的激光测距方程而未考虑回波波形变化产生的影响。于淼研究了反射脉冲形变及时间测量时差^[6],姜海娇等分析了回波脉冲幅度、宽度、噪声、阈值与目标特性对测距数据统计分布的影响^[7-8],并未对测距误差进行系统地量化评价。沈珊珊指出,测距系统的距离精度同样是测距性能好坏的主要衡量标准,该研究将多脉冲累积下一定时间范围内的标准差作为距离精度的表征^[9],并不适用于对激光引信探测能力的评价,且仅从系统误差角度进行评价仍显不足。上述学者虽然在脉冲激光探测能力方面进行了大量研究,但均是基于固定距离的探测能力受各种单因素影响的变化规律分析,未考虑探测距离的改变引发多因素共同改变对探测能力的影响,且目前针对探测能力研究主要集中在以探测概率、虚警概率与最大测程为评价指标来进行分析,而忽略了对测距精度的考量,存在很大的局限性。

文中首先基于激光辐射理论与信号系统理论建立了适用于任意发射脉冲波形的目标响应模型,并结合传统激光测距方程推导了含时的脉冲激光测距回波方程。结合脉冲激光回波方程,在信号检测统计模型的基础上进一步推导,得到脉冲激光测距数据分布的解析方程并提出误差量化方法。分析了探测

距离改变对回波信号的影响。最后从探测可靠性指标、测程指标、误差指标三方面对探测能力受探测距离的影响进行分析及评估。试验验证了理论分析的正确性,确定了可靠测程内探测能力的变化规律。

1 脉冲激光测距回波方程

激光引信的工作过程与微波雷达探测过程相类似,激光和微波同属电磁波,可由雷达方程推导激光测距方程^[10]:

$$P_r = P_0 \frac{\sigma}{4\pi A_{\perp}} \frac{A_r}{R^2} \eta_{\text{atm}} \eta_{\text{opt}} \quad (1)$$

式中: P_0 为激光发射功率; A_{\perp} 为光束在目标处的截面面积; σ 为目标的散射截面; A_r 为接收孔径面积; R 为目标距离; η_{opt} 为系统传输效率; η_{atm} 为单程大气衰减, $\eta_{\text{atm}} = e^{-\xi R}$, ξ 为大气衰减系数。

引信收发系统间距相比探测距离极小,可认为收发均位于同一点,对于漫反射探测形式的小视场脉冲激光引信,可假设目标为表面均匀的倾斜扩展平面目标,根据激光散射截面的定义^[11]有:

$$\sigma = 4\pi f(\theta) \cos(\theta) A_{\perp} \quad (2)$$

式中: θ 为目标倾角; $f(\theta)$ 为目标表面的散射系数,在朗伯体条件下, $f(\theta) = \rho/\pi$, ρ 为目标反射系数。

将公式(2)代入公式(1)可得:

$$P_r(R) = \frac{P_0 \rho A_r \cos(\theta)}{\pi R^2} \eta_{\text{atm}} \eta_{\text{opt}} \quad (3)$$

在引信探测系统参数、传输介质与目标特性不变的情况下,公式(3)描述了收发光功率随探测距离改变的衰减规律。

对于脉冲方式激光探测,公式(3)不能直接描述脉冲信号的波形及其在传输过程中的变化规律,不适用于探测能力的精确分析。

如图 1 所示,脉冲激光引信沿 z 轴向目标逐渐

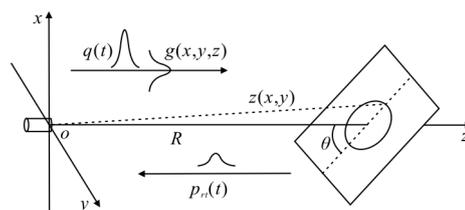


图 1 脉冲激光引信探测示意图

Fig.1 Diagram of pulsed laser fuze detection

接近,并不断发出具有时间和空间分布特征的脉冲信号,可描述为^[6]:

$$P(x, y, z, t) = P_0 q(t) g(x, y, z) \quad (4)$$

式中: $q(t)$ 与 $g(x, y, z)$ 分别为激光脉冲的归一化的时间分布和空间分布。

由于目标的纵深线度同探测距离相比极小,可认为光强的空间分布与 z 无关。当探测距离为 R 时,暂不考虑系统传输与大气的衰减,并忽略弹速对激光飞行时差的影响,根据公式(2)与公式(4),可得到具有时空响应特征的目标散射截面:

$$\sigma = 4\pi A_{\perp} \cos(\alpha) \times \int_A q(t-2z(x, y)/c) g(x, y) f(x, y, z) dA \quad (5)$$

式中: c 为光速; $f(x, y, z)$ 为目标任意面元的双向反射分布函数,当目标为朗伯体平面时有 $f(x, y, z) = \rho/\pi$; $z(x, y)$ 为探测系统至目标上任意点的距离,由于 $x, y \ll z$,则 $z(x, y) \approx R + x \tan(\alpha)$ 。

目标的入射脉冲可认为是一个时域上的短脉冲,即当 $q(t) \rightarrow \delta(t)$ 时,散射截面转变为一个线性系统的冲激响应函数:

$$\sigma \rightarrow h(t) = 4\rho A_{\perp} \cos(\theta) \times \int_A g(x, y) \delta(t-2z(x, y)/c) dA \quad (6)$$

式中: $\delta(\cdot)$ 为狄拉克函数。

对于任意输入的脉冲信号时域波形 $q(t)$,其输出信号波形可由输入信号和冲激响应函数的卷积获得^[12],即目标对脉冲信号的响应过程为:

$$S(t) = q(t) \otimes h(t) \quad (7)$$

此处将激光器输出的脉冲信号描述为具有高斯基模场分布的高斯脉冲,其时间分布和空间分布分别为^[13]:

$$q(t) = \exp(-t^2/\tau^2) \quad (8)$$

$$g(x, y) = \frac{2}{\pi\omega^2} \exp\left(-2\left(\frac{x^2+y^2}{\omega^2}\right)\right) \quad (9)$$

式中: τ 为激光发射脉冲的脉宽,取脉冲峰值 $1/e$ 处的半宽; ω 为激光在目标处的有效光斑半径 $\omega = \omega_0 \sqrt{1+(\lambda R/\pi\omega_0^2)^2}$, ω_0 为光束在光源处的束腰半径 $\omega_0 = 2\lambda/(\pi\varphi)$, λ 为激光波长, φ 为发射光束发散角。

激光引信测程尺度较小,可忽略散斑与湍流对其影响,通过将公式(6)、(8)和(9)代入公式(7)并替换公式(1)中的第二目标反射过程,即可得到脉冲激光测距回波方程:

$$P_{rt}(t, R) = \frac{P_0 \rho A_r \cos(\theta)}{\pi R^2 \varepsilon(R)} \eta_{atm}^2 \eta_{opt} \exp\left(-\frac{(t-2R/c)^2}{\tau^2 \varepsilon(R)}\right) \quad (10)$$

式中: $\varepsilon(R) = \sqrt{1+2\omega^2(R)\tan^2(\theta)/(\tau^2 c^2)}$ 为相对发射脉冲的回波脉冲展宽系数。

定义 $P_{peak}(R)$ 为距离为 R 时探测的回波脉冲峰值功率,则有 $P_{peak}(R) = P_r(R)/\varepsilon(R)$ 。回波的光功率信号经探测器接收,并由放大器放大为电压信号:

$$V_{rt}(t, R) = S_i A_f \frac{P_0 \rho A_r \cos(\theta)}{\pi R^2 \varepsilon(R)} \eta_{atm}^2 \eta_{opt} \times \exp\left(-\frac{(t-2R/c)^2}{\tau^2 \varepsilon(R)}\right) \quad (11)$$

式中: S_i 为光电探测器的电流灵敏度; A_f 为放大电路的电压放大倍数。则回波峰值电压为 $V_{peak}(R) = S_i A_f \times P_{peak}(R)$ 。

2 测距数据分布模型建立与误差量化评价方法

噪声干扰会对激光探测造成影响,导致系统错判,表现为引信提前作用、不作用或作用点偏移。为此,首先有必要引入信号检测统计概念,其普遍适用于对连续光探测与脉冲光探测可靠性指标的评价。

通常噪声信号可以描述为均值为零的高斯分布,噪声信号的概率密度函数为^[4]:

$$\rho(V_n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \bar{V}_n} \exp\left(-\frac{V_n^2}{2\bar{V}_n^2}\right) \quad (12)$$

式中: V_n 为噪声信号电压幅值; \bar{V}_n 为噪声电压的均方根,当有回波时,探测器输出信号可认为是叠加了噪声的回波信号 $V = V_s + V_n$,其中 V_s 为理想回波信号电压幅值,则有探测器输出信号的概率密度函数:

$$\varphi(V_n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \bar{V}_{sn}} \exp\left(-\frac{(V - V_s)^2}{2\bar{V}_{sn}^2}\right) \quad (13)$$

式中: \bar{V}_{sn} 为有回波信号时的噪声均方根电压。

噪声均方电压值由光散粒噪声、暗电流噪声、热噪声及放大电路噪声构成。通常将有回波信号时的噪声统一认为是无回波信号时的噪声,事实上, \bar{V}_{sn} 总是大于 \bar{V}_n ,且不同脉冲回波光强时的 \bar{V}_{sn} 也会有所不同,故文中需对两者进行明确区分。根据参考文献[4],由

信号光引起的散粒噪声电流均方为 $i_n^{-2} = 2eS_i P_s B_w F_m$, 则有回波时放大器输出的总噪声电压均方是无回波时的噪声均方与信号光散粒噪声均方之和, 即:

$$\bar{V}_{sn}^{-2} = A_f^2 i_n^{-2} = V_n^{-2} = A_f^2 (2eS_i P_s B_w F_m) + \bar{V}_n^{-2} \quad (14)$$

式中: P_s 为脉冲回波信号峰值功率 $P_s = P_{\text{peak}}(R)$; B_w 为噪声频谱带宽; e 为电子电荷; F_m 为探测器噪声系数。

分别定义虚警率为无回波信号时噪声超过阈值的概率, 探测概率为有回波信号时叠加了噪声的回波信号峰值超过阈值的概率, 则信号检测虚警率与探测概率两统计量可有效表征探测能力的可靠性指标, 分别为:

$$P_F = \int_{V_T}^{\infty} \rho(V_n) dV_n = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{V_T}{\sqrt{2} \bar{V}_n} \right) \quad (15)$$

$$P_D = \int_{V_T}^{\infty} \varphi(V_n) dV_n = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{V_T - V_s}{\sqrt{2} \bar{V}_{sn}} \right) \quad (16)$$

式中: V_T 为设定的阈值电平, $\operatorname{erfc}(\cdot)$ 为互补误差函数,

$$p(r) = -\frac{8(r-R)S_i A_f P_0 \rho A_r \cos(\theta)}{\pi \sqrt{2\pi} \bar{V}_n R^2 \tau^2 c^2 \varepsilon^3 (R)} \eta_{\text{atm}}^2 \eta_{\text{opt}} \times \exp \left[-\frac{1}{2V_{nr}} \left(V_T - \frac{S_i A_f P_0 \rho A_r \cos(\theta)}{\pi R^2 \varepsilon (R)} \eta_{\text{atm}}^2 \eta_{\text{opt}} \exp \left(\frac{4(r-R)^2}{c^2 \tau^2 \varepsilon^2 (R)} \right) \right)^2 \right] \exp \left(\frac{4(r-R)^2}{c^2 \tau^2 \varepsilon^2 (R)} \right) \quad (19)$$

由公式(19)可见, 测距数据分布明显偏离正态分布, 传统方差概念已不适用于定量描述测距误差, 于是引入最优置信区间概念对测距误差进行量化。给定置信度为 $1-\alpha$, 由:

$$P\{r_a \leq r \leq r_b\} = \int_{r_a}^{r_b} p(r) dr = 1-\alpha \quad (20)$$

可求得置信区间 $[r_a, r_b]$, 但这样确定的置信区间有无穷多个, 为合理地定量评价测距误差, 在所有的置信区间中, 应选择最优, 即区间长度最短。为此, 通过加入条件 $p(r_a) = p(r_b)$ 得到最优置信区间^[14], 即

$$\begin{cases} \int_{r_L}^{r_H} p(r) dr = 1-\alpha \\ p(r_L) = p(r_H) \end{cases} \quad (21)$$

则 $[r_L, r_H]$ 为测距数据分布的最优置信区间, $r_H - R$ 与 $r_L - R$ 分别为测距误差上下界。凡超过此界的误差可视为异常值予以剔除。在此基础上, 根据系统误差的定义, 最优置信区间内的数据均值与距离真值之差即为系统误差:

$$\bar{r}_{\text{sys}} = \int_{r_L}^{r_H} p(r) \cdot r dr - R \quad (22)$$

此时 $V_s = V_{\text{peak}}(R)$ 。

对于具有时域波形回波信号, 探测器输出信号 $V(t) = V_n + V_r(t)$ 。基于探测概率公式(16), 则时刻 t 之前的探测概率 $P_D(t) = \int_{V_T}^{\infty} \varphi(V(t)) dV(t)$ 。对于时间分辨率 Δt 内的探测概率可表示为 $P_t^{t+\Delta t}$, 当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, $P_t^{t+\Delta t} / \Delta t$ 为阈值鉴别时刻数据的概率密度函数^[7], 即:

$$p(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_D(t+\Delta t) - P_D(t)}{\Delta t} = \frac{d}{dt} P_D(t) = \rho(V_T - V_r(t)) V'_r(t) \quad (17)$$

根据回波时刻与光程关系, $t = 2r/c$, r 为测距距离, 则激光引信测距概率密度函数为:

$$p(r) = \rho(V_T - V_r(r)) V'_r(r) \cdot 2/c \quad (18)$$

将公式(11)和(13)代入公式(18)即可得到测距

数据分布模型:

则测距随机误差上下界分别为 $r_H - \bar{r}_{\text{sys}} - R$ 、 $r_L - \bar{r}_{\text{sys}} - R$ 。

3 距离因素对系统探测能力影响分析

文中重点考察同一激光引信在不同定距要求下的探测能力及变化规律。故将引信探测系统参数、环境参数与目标特性设为确定值。仿真参数如表 1。

表 1 激光引信参数

Tab.1 Parameters of laser fuze

Parameter	Value	Parameter	Value
P_0/W	70	λ/nm	905
A_r/mm^2	314	φ/mrad	25
η_{opt}	0.51	$S_i/A/W$	0.5
ξ/km^{-1}	0.27	A_f	1×10^5
ρ	0.3	B_w/MHz	40
$\theta/(\circ)$	45	\bar{V}_n/V	0.0049
τ/ns	5.62		

3.1 探测距离对回波信号的影响

根据公式(3)及公式(10),不同距离测距的回波功率变化规律如图2所示,曲线 $P_c(R)$ 为连续光探测或不考虑回波波形的回波信号功率, $P_{peak}(R)$ 为引入了波形展宽衰减的回波信号峰值功率。

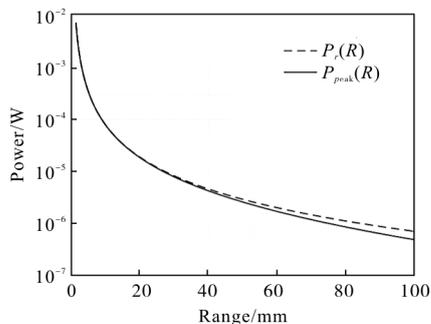


图2 探测距离对回波信号功率的影响

Fig.2 Echo power at different detection distance

图3展示了不同距离处测距回波理想波形与阈值的关系,阈值设定为0.0206V,横坐标表示相对于计时停止时刻真值的偏移量,由于脉冲回波波形仍服从高斯分布,为便于观察,不妨截取0~0.6V的幅值范围。

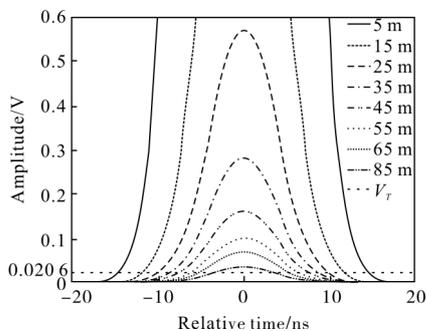


图3 不同探测距离时的回波波形

Fig.3 Waveform of echo at different detection distance

由公式(8),认为计时零点位于发射脉冲峰值处,可以看到,回波的计时停止时刻真值同样位于回波信号的峰值处。随距离增加,脉冲信号幅度减小,脉冲也发生了展宽。近距离测距时,回波波形上升沿较陡,斜率先逐渐增大后迅速减小,上升时间较长。对于阈值探测,回波信号在阈值处的计时时刻比真值有较大提前,导致测距数据较实际距离偏近。随着距离增加,回波展宽程度迅速增大,上升沿逐渐平缓,测距计时停止时刻向真值靠近,而峰值逐渐接近阈值。

从图3还可以看到,对于回波峰值远远超过阈值的回波波形,在阈值点附近的斜率较大,波形上升沿在阈值点前平缓,阈值点后陡峭;随着探测距离增加,回波峰值逐渐接近阈值,回波波形上升沿在阈值点附近越来越平缓。

由公式(14)可知有回波时的噪声均方根由于受到回波光信号的影响,随距离增加,噪声随回波光功率的减小而减小。如图4所示,噪声与距离平方近似呈反比关系。20m内,噪声减弱较为迅速,40m后,噪声减弱趋势逐渐趋于平缓,并接近无回波时的噪声水平。

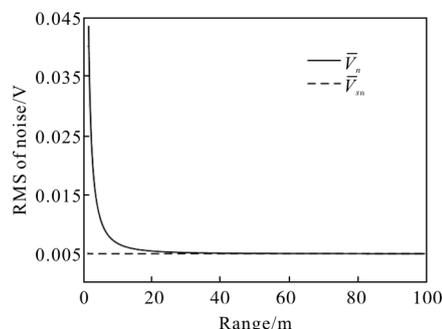


图4 不同探测距离时噪声均方根

Fig.4 RMS of noise at different detection distance

3.2 探测距离对探测可靠性影响分析

对激光引信探测能力通常从测距可靠性与测程方面进行评价。虚警率和探测概率是评价测距可靠性的重要标准,对于引信来说,作用时机仅有一次,任何错测与漏测都是不能接受的。由公式(15)和公式(16)可以看出,由于 \bar{V}_n 与探测距离无关,虚警率仅为关于阈值 V_T 的函数,呈负相关。而探测概率取决于信号峰值、有回波信号时的噪声水平,均与探测距离相关。

一般地,规定虚警率不大于 10^{-5} 且探测概率不小于0.9995,才可保证系统可靠探测,通过联立公式(11)、(15)和(16)即:

$$\begin{cases} \frac{V_T}{\bar{V}_n} \geq 4.264 \ 89 \\ \frac{V_T - V_{peak}(R)}{\bar{V}_{sn}(R)} \leq -3.290 \ 53 \end{cases} \quad (23)$$

可得到满足条件的阈值设置 $V_T \geq 0.020 \ 9V$,及对应的测程 $R \leq 84.8m$,即系统最大可靠测程为 $R_{max}=84.8m$,对应的最低阈值为 $V_{Tmin}=0.020 \ 9V$ 。

同样地,在最低阈值 V_{Tmin} 的基础上适当提高阈值至 V_T ,根据公式(23)可得到满足探测概率要求的可靠测程 R_r 。该可靠测程必然小于最大可靠测程,测程内的虚警率与探测概率必然满足要求。

图 5 为不同阈值设置时的可靠测程, 阈值间隔为 20 mV。可以看到,在最低阈值附近,阈值的微小调整对引信测程影响极大; 当阈值提高到 300 mV 附近,对应的可靠测程约为 30 m 时,可靠测程的减小速度开始放缓。结合图 2 可知,该趋势与距离变化引起的回波信号功率衰减趋势是相关联的。在此之后,可靠测程趋于稳定,对较小的不确定因素诸如未知干扰、回波峰值跳动、系统电压波动等不敏感。

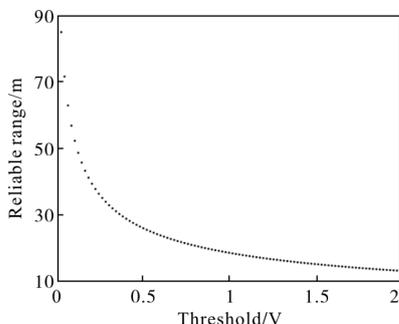


图 5 不同阈值时的可靠测程
Fig.5 Reliable range with different threshold

由以上分析可见,引信的测程与探测可靠性息息相关。因此,两者可由可靠测程统一描述,即在可靠测程内,探测能力的可靠性指标均能达到或超过给定要求,超过可靠测程,系统可靠性不能满足要求。故激光引信定距作用距离设置不应大于可靠测程。

3.3 探测距离对测距精确度影响分析与评价

对激光引信探测能力的评价指标还应包含探测精确度指标,由 3.2 节分析可知,高探测概率与低虚警率仅能表示系统可以正确探测到回波信号,而并不能说明测距的精确度。于是将探测精确度指标引入激光引信探测能力评价体系,并对可靠测程内不同距离时的误差变化规律进行分析,对于探测能力的进一步评价是十分必要的。

测距精确度主要由系统误差与随机误差决定,其中系统误差规律相对固定,可通过标定或补偿算法等技术手段实现最大程度消除。恒阈值探测体制下,对于理想的回波波形,距离引起的回波的波形变化与阈值设定均会产生不同的系统误差^[2]。根据上

节分析,选取不同阈值,对不同阈值时的距离与理想系统误差关系进行分析,如图 6 所示。

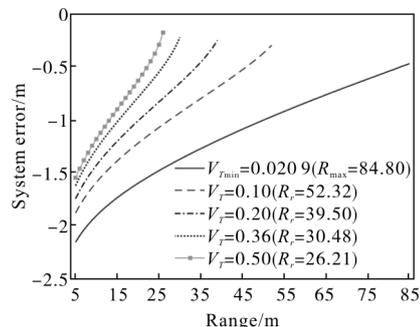


图 6 不同阈值时的理想系统误差
Fig.6 Ideal system error with different threshold

由图 6 可知,在同一阈值条件下,理想系统误差与探测距离近似成反比关系,但其变化规律并非呈线性。在测程中段,可近似为线性,测程两端斜率变化相对较大,不难看出,这与高斯分布形式的脉冲波形存在关联性。在最低阈值条件时,系统误差在远距离时变化规律与其他阈值时略有不同。可见,系统误差与阈值和探测距离均有相关性,且变化规律较为复杂,这为系统误差的消除增加了难度。

而对于随机误差的消除更为困难,其中,噪声是引起测距随机误差的主要因素,而在不同距离探测时,随机误差也会有所不同。同时,由于噪声的存在,会导致实际系统误差偏离理想系统误差的变化规律。

于是利用公式(19),最低阈值时不同距离测距数据分布曲线如图 7 所示,为便于观察,将测距真值统一移至 R 处。由图中可以看到,最大可靠测程内,虽然探测概率均接近 100%,但在最低阈值时,探测

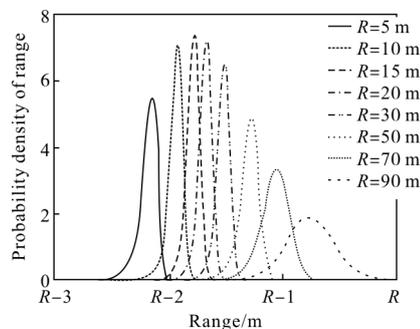


图 7 不同距离处的测距概率密度分布
Fig.7 Probability density distribution of range at different distance

系统的探测精度指标并不理想。随探测距离的减小,测距数据分布范围表现为由大逐渐减小再增大的过程,且分布区间逐渐前移,也反映了测距随机误差先减小再增大,系统误差逐渐增大的规律。

结合 3.1 节,由于回波波形在阈值前后的斜率特性,造成概率密度曲线上升沿缓下降陡的不对称性,近似呈威布尔分布。5 m 时,由于阈值设置较低,而强回波光功率引起的噪声较大,导致阈值处较大的时间抖动,造成较大的测距散布;随着距离的增加至 20 m,回波光功率迅速减小,噪声也随之大幅减小,而回波信号在阈值点附近的斜率相对近距离时变化程度较小,导致测距数据逐渐集中,但依然呈威布尔分布;20 m 后,随着距离的进一步增加,回波展宽明显加剧,阈值处回波信号上升沿逐渐平坦,导致阈值点的时间抖动重新增大。90 m 时,探测距离超过最大可靠测程(84.8 m),探测概率密度曲线积分远小于 1,此时回波信号波峰已极接近阈值,在噪声的影响下已出现了漏测,测距数据分布近似呈正态分布。

通过随距离改变的分布曲线变化规律可以很好地描述引信在预定距离的实际作用点散布情况,散布应呈威布尔分布或高斯分布,而非传统认为的均匀分布。

通常给定 $1-\alpha=95\%$ 的置信度即可很好地衡量测距数据的离散情况,则根据公式(21)与(22),不同阈值时理想回波测距误差与带噪声回波测距误差对比如图 8 所示。

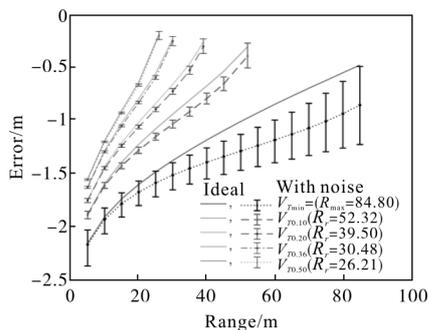


图 8 不同阈值时在不同距离处的测距误差
Fig.8 Ranging error with different threshold at different distances

首先,从图 8 中可以看到,由于受噪声影响,除 5 m 外的可靠测程内系统误差均远大于理想系统误差,仅在近距离时两者差距相对较小,随着阈值提

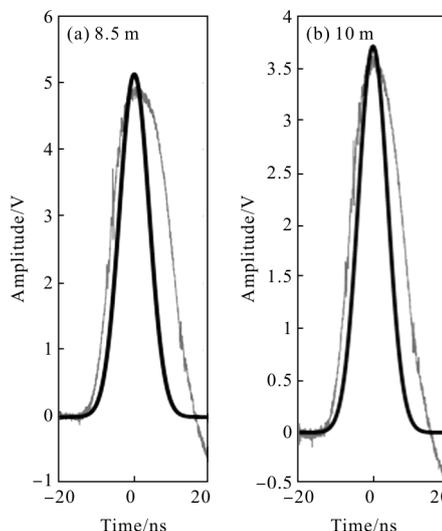
高,系统误差逐渐向理想系统误差靠近;其次,带噪声的回波测距误差曲线具体地展示了图 7 的测距随机误差随探测距离减小而先减小后增大的变化趋势,且负误差略大于正误差,最低阈值时,最小随机误差位于约 20 m 处;随着阈值的增加,该趋势始终存在,但整体上随机误差迅速减小,最小随机误差点逐渐向目标方向移动。

4 试验验证

为验证理论与分析的正确性,利用某型激光定距引信脉冲激光探测系统,通过对不同距离的静态多次测距,收集测距数据并进行统计。探测系统参数与表 1 所列相同。

由于 5 m 时回波光功率较高,接收信号峰值可达到 15 V,已引起探测器饱和。此外,受探测系统稳定性限制,无法进行最低阈值的试验。故分别选取 8.5、10、20、30 m 四个关键点及 0.1、0.5 V 阈值进行测距试验。距离回波波形如图 9 所示。

实验测得的回波波形与理论较为吻合。近距离时回波下降沿与理论存在较大偏差,这是由于近距离回波功率较高,探测器接近饱和所引起的,该偏差不影响恒阈值探测的测距结果,上升趋势吻合较好,但近距离处存在小幅偏差。这是由于理论无法精确描述非理想脉冲信号而简化为理想高斯脉冲波形引入的附加脉冲展宽。回波峰值均较理论有少量降低。由单次回波波形可以看到 8.5 m 时回波波形上叠加的噪声抖动幅度约为 ± 0.03 V,30 m 时约 ± 0.015 V,与理论一致。



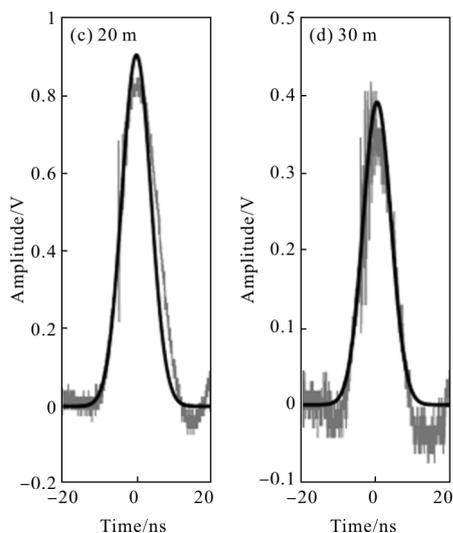


图 9 不同距离处的理论波形与实测波形

Fig.9 Theoretical and experimental waveforms at different distances

采用与理论相同的脉冲峰值计时起点对测距数据进行处理,距离分辨率为 0.026 5 m,每组条件分别进行了 30 次测距,剔除明显的虚警及漏测后,测距误差统计量化结果如图 10 所示。

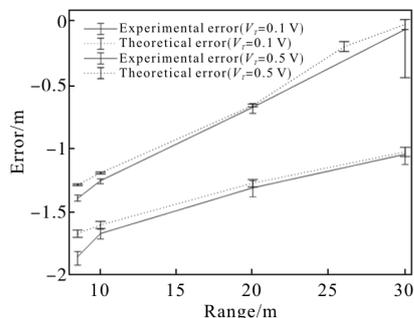


图 10 理论与实测误差对比

Fig.10 Experimental and theoretical ranging error

由图 10 可以看到,两种阈值条件下,随机误差呈现两端大,中前部小的趋势,最小值均位于 10 m 处。试验数据系统误差与随机误差随距离变化趋势与理论趋势整体吻合。但由于试验系统与实际环境中的未建模小扰动的引入,导致随机误差较理论整体偏大,近距离时的回波波形附加展宽导致系统误差小幅偏离。

此外,在 0.5 V 阈值时 30 m 处也进行了 10 次测距试验,此时回波信号已小于阈值,但仍有 3 次正确的测距数据,这是由噪声抖动产生的虚警,该数据

无效。该组实验结果印证了 3.2 节中关于探测可靠性与测程的关系分析,即超过可靠测程,系统无法实现可靠探测。

5 结论

文中通过建立激光引信探测能力评价理论计算模型,完善了现有激光引信探测能力评价体系。通过对探测能力各评价指标受距离影响进行仿真分析与试验验证,结合仿真条件可知:

(1) 探测距离变化可引起回波信号各参数不同程度的同时改变。在 5~85 m 测程内,回波功率衰减可达 10^3 倍,在 0.020 6 V 时的回波半宽度减小达 10 ns,而噪声衰减较为迅速,20 m 后接近无回波时的噪声水平并趋于稳定。这种变化可使得探测能力各项指标发生复杂的变化;

(2) 探测能力精确度指标受探测距离影响的变化具有明显的普适规律,即:可靠测程内,测距随机误差随探测距离减小呈先减小后增大趋势,系统误差持续增大。在低阈值设定下,引信最大可靠测程为 84.8 m,但其随机误差均超过 0.22 m,最理想的作用点位于 20 m 附近。阈值的提高,可大幅改善测距误差,但引信可靠测程减小,同时最佳作用点前移。在满足可靠测程前提下适当提高阈值对于提高引信的作用效能有利。

文中所提出的理论方法与所得结论可为激光定距引信误差补偿技术发展、多档定距引信炸点散布及弹药定距作用效能评估提供支持,具有参考意义与应用价值。

参考文献:

[1] Zhang Xiangjin. Research on the design theory & application of pulsed laser short range fixed distance system [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)
张祥金. 脉冲激光近程定距系统设计理论及应用研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.

[2] Chen Huimin, Jia Xiaodong, Cai Kerong. Laser Fuze Technology [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2016. (in Chinese)
陈慧敏, 贾晓东, 蔡克荣. 激光引信技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.

- [3] Lai Jiancheng, Wang Chunyong, Jiang Haijiao, et al. Theoretical method for evaluating the detecting capability of laser ranging radar [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2008, 28(6): 279–282. (in Chinese)
来建成, 王春勇, 姜海娇, 等. 激光测距雷达探测能力的理论评价方法[J]. *弹箭与制导学报*, 2008, 28(6): 279–282.
- [4] Hu Chunsheng. Investigation into the high-speed pulsed laser diode 3D-imaging ladar [D]. Changsha: National University of Defence Technology, 2005. (in Chinese)
胡春生. 脉冲半导体激光器高速三维成像激光雷达研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2005.
- [5] Huang Bo, Qiu Qi. A calculation of minimal detectable power of laser radar in space [J]. *Journal of UEST of China*, 2004, 33(1): 35–38. (in Chinese)
黄波, 邱琪. 空间激光雷达最小接收光功率的计算[J]. *电子科技大学学报*, 2004, 33(1): 35–38.
- [6] Yu Miao, Ren Jianhua, Zhao Tonggang, et al. Study on time error and anamorphosis of imaging ladar induced by time-dependent inverse cross sections [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2013, 33(6): 617–621. (in Chinese)
于淼, 任建华, 赵同刚, 等. 激光雷达中含时截面引起的时差和成像失真研究 [J]. *北京理工大学学报*, 2013, 33(6): 617–621.
- [7] Jiang Haijiao. Statistical properties of high repetition rate pulse laser radar range and its image quality evaluation [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
姜海娇. 高重复脉冲激光雷达测距统计特性及其像质评价 [D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- [8] 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): 78–87. (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): 78–87.
- [9] Shen Shanshan, Chen Qian, He Weiji, et al. Research and realization on performance of single photon counting ranging system optimizing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(2): 166–171. (in Chinese)
沈珊珊, 陈钱, 何伟基, 等. 单光子测距系统性能优化研究和实现[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(2): 166–171.
- [10] Richmond R D. Direct-Detection LADAR Systems [M]. New York: SPIE Press, 2010.
- [11] Han Y, Sun H, Guo H. Research on rocket laser scattering characteristic simulation software [J]. *Laser Physics*, 2013, 23(5): 056007.
- [12] Sun Junling, Ma Pengge, Sun Guangmin, et al. Multi-pulse laser radar target signal simulation based on targetecho waveform model [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(7): 278–284. (in Chinese)
孙俊灵, 马鹏阁, 孙光民, 等. 基于目标波形模型的多脉冲激光雷达目标信号模拟[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(7): 278–284.
- [13] Cronwall C, Steinvall O, Gustafsson F, et al. Influence of laser radar sensor parameters on range-measurement and shape-fitting uncertainties [J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(10): 106201–106211.
- [14] William Mendenhall, Terry Sincich. Statistics for Engineers and the Sciences [M]. Fifth ed. Liang Fengzhen, translated. Beijing: China Machine Press, 2009. (in Chinese)
William Mendenhall, Terry Sincich. 统计学 [M]. 第5版. 梁冯珍, 译. 北京: 机械工业出版社, 2009.