

脉冲激光探测平面目标特性对测距分布的影响

徐孝彬 张合 张祥金 陈杉杉 张伟

Effect of plane target characteristics on ranging distribution for pulse laser detection

Xu Xiao-Bin Zhang He Zhang Xiang-Jin Chen Shan-Shan Zhang Wei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 210601 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.210601

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.210601>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I21>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

机载多脉冲激光测距特性及其不确定度研究

[Ranging characteristic and uncertainty of airborne multi-pulse laser](#)

物理学报.2015, 64(12): 120601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.120601>

透射光栅谱仪测谱不确定度分析

[Uncertainty analysis of the measured spectrum obtained using transmission grating spectrometer](#)

物理学报.2013, 62(17): 170602 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.170602>

同步辐射标定平面镜反射率不确定度分析方法研究

[Reflectivity uncertainty analysis of planar mirror calibration in BSRF](#)

物理学报.2010, 59(10): 7078-7085 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.59.7078>

基于电子倍增电荷耦合器件的哈特曼-夏克波前传感器质心探测误差分析

[The detection error analysis of Hartmann-Shack wavefront sensor based on electron multiplying charge-coupled devices](#)

物理学报.2010, 59(8): 5904-5913 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.59.5904>

脉冲激光探测平面目标特性对测距分布的影响*

徐孝彬 张合[†] 张祥金 陈杉杉 张伟

(南京理工大学, 智能弹药技术国防重点学科实验室, 南京 210094)

(2016年6月13日收到; 2016年7月17日收到修改稿)

针对脉冲激光近程探测系统平面目标特性影响测距分布的问题, 推导了平面目标脉冲响应方程和脉冲激光回波方程, 分析了不同平面目标倾斜角、激光发射发散角和激光发射脉宽对激光回波展宽的影响. 基于脉冲激光回波方程和恒阈值时刻鉴别方法, 推导了平面目标的测距概率密度函数解析式, 并理论仿真分析了不同平面目标倾斜角、激光发射功率、激光发射发散角及阈噪比对测距统计特性分布的影响. 运用蒙特卡罗算法进行全波形模拟测距实验; 搭建脉冲激光测距实验环境, 进行 20 m 测距实验. 实验结果表明: 理论仿真、蒙特卡罗模拟实验与实际实验的测距概率密度分布基本一致, 随着平面目标倾斜角的增大, 测距均值和测距方差增大; 当倾斜角度为 0° , 20° , 40° , 60° 时, 回波信噪比高于阈噪比, 测距分布呈现高斯分布; 当倾斜角度为 70° 时, 回波信噪比低于阈噪比, 分布不再呈现高斯分布, 呈现上升沿缓下降沿陡的分布特性. 研究结果为研究目标平面特性对脉冲激光探测测距分布的影响提供了理论依据.

关键词: 脉冲激光探测, 平面目标回波特性, 恒阈值鉴别, 测距概率密度分布

PACS: 06.20.Dk, 42.55.Px, 42.79.Qx, 52.65.Pp

DOI: 10.7498/aps.65.210601

1 引言

激光近炸引信因其主动性好、方向性强且测距精度高^[1,2], 在常规弹药和导弹中都广泛应用, 如挪威 NF2000 M 和 PX581 迫弹, 美国的 Thales 导弹等^[3,4], 主要采用近程脉冲激光探测来对目标的距离进行判别^[5]. 而目标表面特性会对脉冲激光回波宽度与幅值产生影响, 从而影响测距分布.

针对激光测距的精度问题, 文献^[6—8]研究了激光雷达系统的测距精度边界, 推导出泊松噪声分布条件下测距精度的 Cramer-Rao 下界; Jiang 等^[9,10]推导出恒阈值时刻鉴别和峰值时刻鉴别条件下的理论距离分布特性, 并进行了实验验证. 但是, 其忽略了目标表面特性对测距分布的影响, 在推导假设时回波波形与发射波形相同, 未考虑波形

展宽对测距的影响, 测距统计特性分布有一定的局限性. Steinvall^[11]分析了不同目标形状参数对激光雷达散射截面的影响, 未研究对测距分布的影响. 文献^[12, 13]通过仿真的方法分析了不同目标形状对激光雷达测距精度的影响, 获得不同表面参数下测距的变化规律, 但未分析恒阈值时刻鉴别条件下的测距精度与测距分布问题.

本文针对平面目标推导了平面目标脉冲响应方程和脉冲激光回波方程, 研究了回波展宽特性. 基于回波方程和恒阈值时刻鉴别方法, 推导了平面目标的测距概率密度函数解析式. 理论仿真分析了不同平面目标倾斜角、激光发射功率、激光发射发散角及阈噪比对测距统计特性分布的影响. 采用蒙特卡罗算法建立模拟测距实验, 同时搭建实验平台进行实验验证. 理论仿真、蒙特卡罗模拟实验与实际实验的测距概率密度分布基本一致.

* 武器装备预先研究项目 (批准号: 51305020104) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: hezhang@mail.njust.edu.cn

2 脉冲激光近程探测目标回波特性

2.1 平面目标回波方程

在激光近程探测系统中, 由于收发间隙较小, 激光探测系统可认为是一个点. 激光探测系统探测平面目标的坐标系如图 1 所示. 激光探测系统在点 o 处, 激光光束沿 z 轴方向传播, 激光光束中心与目标平面相交于点 N , oN 间距为 z_0 , ox 轴铅直向上, oy 轴按右手坐标系确立. 同时, 目标平面与 oxy 平面成 α 角. 激光脉冲回波波形与目标的表面特性密切相关, 是引起脉冲回波展宽最重要的因素.

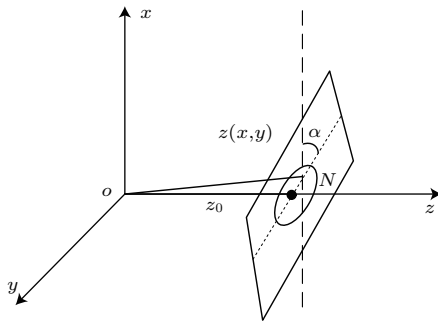


图 1 激光探测系统探测平面目标的坐标系

Fig. 1. The coordinate system of detecting the plane target for laser detection system.

假设激光器的输出脉冲为高斯脉冲, 其时空分布激光发射脉冲波形为

$$q(t) = \exp \left[- \left(\frac{t - t_0}{\tau} \right)^2 \right], \quad (1)$$

其中, t_0 为激光脉冲发出的峰值时刻, τ 为激光输出脉冲宽度 (本文定义 τ 是高斯脉冲为 $1/e$ 的脉冲半宽度).

假设激光的空间模场分布为 TEM00 模的激光器, 其光强空间分布服从高斯分布, 则光强分布为^[14]

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

式中, P 为总功率; $\omega = \omega_0 \sqrt{1 + [\lambda z / (\pi\omega_0^2)]^2}$, ω 为高斯光束在离坐标原点 z 距离处的光斑半径, λ 为脉冲激光波长, ω_0 为光束在光源处束腰半径, $\omega_0 = 2\lambda / (\pi\phi)$, ϕ 为光束发散角.

激光回波脉冲响应与目标的表面特性有关, 脉冲响应 $h(t)$ 可以表示为^[13]

$$h(t) = 4\pi\rho(\beta)g(x, y)\delta(t - 2z(x, y)/c), \quad (3)$$

其中, $\delta(\cdot)$ 为狄拉克函数, $\rho(\beta)$ 为单位面元的双向反射分布函数, $z(x, y)$ 是激光探测系统与目标之间的距离, c 为光速.

$\rho(\beta)$ 可由双向反射分布函数获得^[12]:

$$\rho(\beta) = \frac{A}{\cos^6 \beta} \exp \left(- \frac{\tan^2 \beta}{s^2} \right) + B \cos^m \beta, \quad (4)$$

其中, 第一项和第二项分别为入射角 β 的镜面反射分量和漫反射分量, A 为镜面反射幅度, B 为漫反射幅度, s 为表面斜率, m 为漫反射系数.

激光光束与平面任一点之间的距离为

$$z(x, y) = \sqrt{(z_0 + x \tan \alpha)^2 + x^2 + y^2}. \quad (5)$$

由于 $x, y \ll z_0 + x \tan \alpha$, (5) 式化简为

$$z(x, y) = z_0 + x \tan \alpha. \quad (6)$$

将 (6) 式代入 (3) 式中, 脉冲响应可表示为

$$\begin{aligned} h(t) &= \frac{8\rho(\alpha)P}{\omega^2} \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left(-2 \frac{x^2}{\omega^2} \right) \\ &\quad \times \delta(t - 2(z_0 + x \tan \alpha)/c) dx \\ &\quad \times \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left(-2 \frac{y^2}{\omega^2} \right) dy, \end{aligned} \quad (7)$$

其中, $\int_{-\infty}^{\infty} \exp \left(-2 \frac{y^2}{\omega^2} \right) dy = \omega \sqrt{\frac{\pi}{2}}$. 利用狄拉克函数性质可得

$$\begin{aligned} &\int_{-\infty}^{\infty} \exp \left(-2 \frac{x^2}{\omega^2} \right) \delta(t - 2(z_0 + x \tan \alpha)/c) dx \\ &= \frac{c}{2 \tan \alpha} \exp \left[- \frac{(t - 2z_0/c)^2}{(\sqrt{2}\omega \tan \alpha/c)^2} \right]. \end{aligned} \quad (8)$$

令 $t' = 2z_0/c$, $\tau_0 = \sqrt{2}\omega \tan \alpha/c$, 则脉冲响应表示为

$$h(t) = \frac{4\sqrt{\pi}\rho(\alpha)P}{\tau_0} \exp \left[-2 \frac{(t - t')^2}{\tau_0^2} \right]. \quad (9)$$

激光脉冲回波轮廓波形是激光发射脉冲波形与激光脉冲响应的卷积^[13]:

$$l(t) = q(t) \otimes h(t). \quad (10)$$

将 (9) 式代入 (10) 式中, 由于 $\exp \left[-2 \frac{(t - t')^2}{\tau_0^2} \right]$ 与 $\exp \left[- \frac{(t - t_0)^2}{\tau^2} \right]$ 为高斯函数, 则

$$l(t) = \frac{4\pi\rho(\alpha)P\tau}{\sqrt{\tau_0^2 + 2\tau^2}} \exp \left[- \frac{2(t - t' - t_0)^2}{\tau_0^2 + 2\tau^2} \right]. \quad (11)$$

本文分析的是脉冲激光近程探测, 散斑和大气湍流的影响可以忽略, 则目标回波功率方程为^[13]

$$P_r(t) = \frac{l(t)}{d^2} \eta_{\text{opt}} \eta_{\text{atm}}^2 \cdot \frac{\pi D^2}{4}, \quad (12)$$

其中, η_{opt} 为光学系统总透过率; d 为引信与目标之间的距离; D 为引信光学接收系统口径; η_{atm} 为大气传输系数, $\eta_{\text{atm}} = e^{-2\sigma d}$, σ 为大气衰减系数.

将 (11) 式代入 (12) 式中可得激光照射到探测器上的回波功率方程:

$$P_r(t) = \frac{\pi^2 D^2 \rho(\alpha) P \tau \eta_{\text{opt}} \eta_{\text{atm}}^2}{z_0^2 \sqrt{\tau_0^2 + 2\tau^2}} \times \exp\left[-\frac{2(t-t'-t_0)^2}{\tau_0^2 + 2\tau^2}\right]. \quad (13)$$

脉冲回波功率信号经过光电探测器探测, 并通过接收探测电路放大后的脉冲回波信号为

$$V(t) = \frac{\Re M \pi^2 D^2 \rho(\alpha) P \tau \eta_{\text{opt}} \eta_{\text{atm}}^2}{z_0^2 \sqrt{\tau_0^2 + 2\tau^2}} \times \exp\left[-\frac{2(t-t'-t_0)^2}{\tau_0^2 + 2\tau^2}\right], \quad (14)$$

其中, \Re 为探测器响应度 (A/W), M 为探测器电压放大倍数.

2.2 激光回波展宽特性分析

平面目标倾斜角度的变化会引起激光回波的展宽以及回波峰值电压的衰减, 而回波脉冲展宽和回波幅值的变化影响着测距分布与探测概率.

根据 (13) 式, 经过展宽后的脉冲半峰值全宽为

$$\Delta t = \frac{\sqrt{\tau_0^2 + 2\tau^2}}{\sqrt{2}} 2\sqrt{\ln 2}. \quad (15)$$

定义相对展宽比为

$$RE = \frac{\Delta t - 2\tau\sqrt{\ln 2}}{2\tau\sqrt{\ln 2}} = \sqrt{\frac{\tau_0^2}{2\tau^2} + 1} - 1. \quad (16)$$

从相对展宽比可知, 回波脉冲展宽与 α , τ 和 ϕ 有关. 假设脉冲激光波长为 905 nm, 探测距离为 20 m, RE 与 α , ϕ 和 τ 之间的关系如图 2 (a)—(c) 所示. 从图 2 (a) 可知, 当激光发射发散角和激光脉冲宽度相同时, 相对展宽比随着平面目标倾斜角度的增加而增加. 当 $0^\circ \leq \alpha \leq 40^\circ$ 时, 相对展宽比增长缓慢, 均未超过 30%; 当 $40^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ 时, 相对展宽比斜率迅速增加, 展宽越发严重. 同时从图 2 (a) 可知, 在同一平面目标倾斜角度和激光脉冲宽度条件下, 随着发散角的增大, 相对展宽比也随之增大. 当 $\alpha = 60^\circ$, 发散角为 50 mrad 时的相对展宽比超过 50%, 发散角为 30 mrad 时的相对展宽比超

过 20%, 而发散角为 10 mrad 时的相对展宽比低于 10%; 当 $\alpha = 70^\circ$ 时, 发散角为 50 mrad 时的相对展宽比为 100%, 发散角为 30 mrad 时的相对展宽比超过 50%, 而发散角为 10 mrad 时的相对展宽比仍然低于 20%. 因此, 减小激光发射发散角有利于抑制回波脉冲展宽. 对比图 2 (a), (b) 和 (c) 可得, 当发散角和倾斜角度相同时, 相对展宽比随着 τ 的减小而增大, 脉冲越窄, 回波脉冲展宽越严重. 因此, 增大激光发射脉宽有利于抑制倾斜角度变化产生的回波脉冲展宽. 但是激光发射脉宽的增大会影响测距分布, 因此, 选择合适的激光发射脉宽进行测距极为重要.

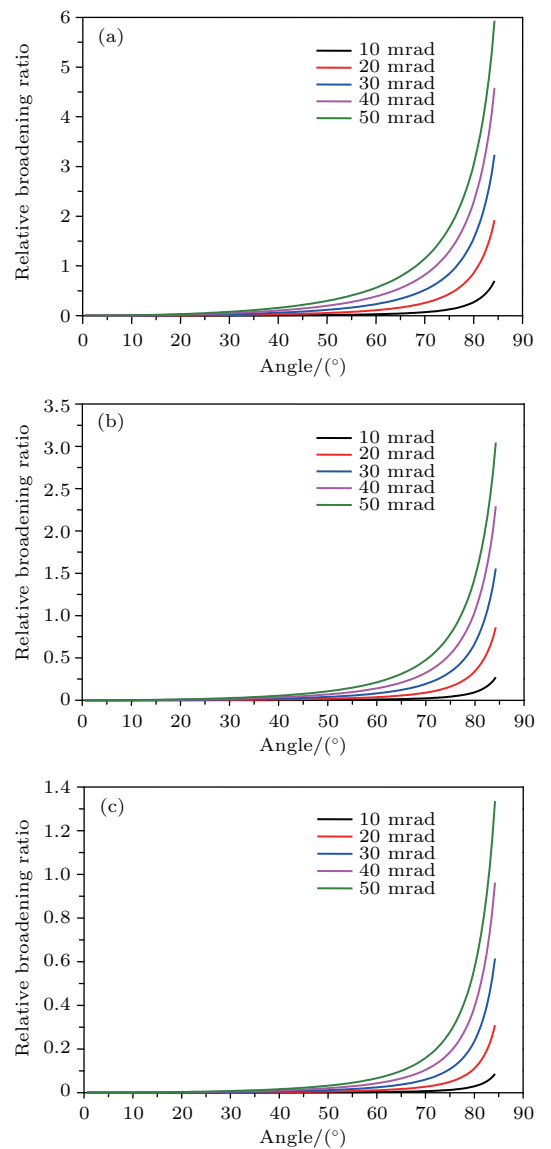


图 2 RE 与 α , ϕ 和 τ 之间的关系 (a) $\tau = 2.4$ ns; (b) $\tau = 4.2$ ns; (c) $\tau = 7.8$ ns
Fig. 2. The relative broadening ratio with different α , ϕ and τ : (a) $\tau = 2.4$ ns; (b) $\tau = 4.2$ ns; (c) $\tau = 7.8$ ns.

3 恒阈值时刻鉴别测距统计特性分布

激光引信采用脉冲激光近程测距体制探测目标,对回波波形进行时刻鉴别.常见的时刻鉴别有三种,分别是恒阈值时刻鉴别、峰值时刻鉴别和恒比定时时刻鉴别.恒比定时时刻鉴别能有效降低漂移误差(walk error),但是其受限于测距范围^[15].峰值时刻鉴别不受回波信号幅度的影响,但需做线性化处理,电路结构复杂,稳定性差.恒阈值时刻鉴别拥有更好的动态距离范围,适合在目标多变的战场环境,且电路结构简单,易于小型化,激光引信中常采用恒阈值时刻鉴别.因此,本文着重研究恒阈值时刻鉴别测距统计特性分布.

3.1 测距概率统计特性

激光近程探测接收系统噪声通常由背景噪声、电路噪声和放大器噪声组成,通常噪声信号可以用高斯分布描述.因此,假设接收系统噪声为均值为0的高斯噪声,则噪声的概率密度函数可表示为

$$p(V_n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\bar{V}_n} \exp\left(-\frac{V_n^2}{2\bar{V}_n^2}\right), \quad (17)$$

其中, V_n 为放大电路输出噪声电压, \bar{V}_n 为噪声等效均方根电压, $p(V_n)$ 是比较器输出噪声电压的概率密度分布.

因此,噪声和激光脉冲回波信号 $V(t)$ 叠加信号 $V_{sn}(t)$ 的概率密度函数是

$$p(V_{sn}(t)) = p(V(t) + V_n). \quad (18)$$

因本文研究恒阈值时刻鉴别,在 t 时刻之前的探测概率为

$$F(t, V_{th}) = \int_{V_{th}}^{\infty} p(V(t) + V_n) dV_{sn}, \quad (19)$$

其中, V_{th} 是阈值电平.

激光引信探测概率密度函数 $p(t)$ 为^[9]

$$p(t) = p(V_{th} - V(t))V'(t). \quad (20)$$

将 $r = ct/2$ 代入(20)式中,

$$p(r) = p(V_{th} - V(r))V'(r)\frac{2}{c}, \quad (21)$$

其中 r 是探测系统与平面目标之间的距离.

将(14)和(17)式代入(21)式中,不同倾斜角度的测距概率密度函数为

$$\begin{aligned} p(r) &= -\frac{16(r-r'-r_0)\Re M\pi^2 D^2 \rho(\alpha) P\tau\eta_{opt}\eta_{atm}^2}{\sqrt{2\pi}\bar{V}_n z_0^2 c^2 (\tau_0^2 + 2\tau^2) \sqrt{\tau_0^2 + 2\tau^2}} \\ &\times \exp\left(-\frac{1}{2\bar{V}_n^2} \left\{ V_{th} - \frac{\Re M\pi^2 D^2 \rho(\alpha) P\tau\eta_{opt}\eta_{atm}^2}{z_0^2 \sqrt{\tau_0^2 + 2\tau^2}} \right. \right. \\ &\times \exp\left[-\frac{8(r-r'-r_0)^2}{c^2(\tau_0^2 + 2\tau^2)}\right] \left. \left. \right\}^2\right) \\ &\times \exp\left[-\frac{8(r-r'-r_0)^2}{(\tau_0^2 + 2\tau^2)c^2}\right]. \end{aligned} \quad (22)$$

定义阈噪比为

$$TNR = \frac{V_{th}}{\bar{V}_n}, \quad (23)$$

定义信噪比为

$$SNR = \frac{V_{sm}}{\bar{V}_n}, \quad (24)$$

其中 V_{sm} 为回波信号的峰值电平.

根据(22)式,测距概率密度函数与激光发射峰值功率、激光发射光束发散角、目标表面倾斜角度和阈噪比等有关.在文献[9]中已经分析过回波幅值、脉宽对测距分布的影响,因此,本文关注的重点是与发射特性和目标特性相关的参数对测距分布的影响,如激光发射峰值功率、激光发射光束发散角、目标表面倾斜角度和阈噪比等.激光引信仿真参数如表1所列.

表1 激光引信仿真参数
Table 1. Simulation parameters of laser fuze.

Parameter	Value	Parameter	Value
$\Re/A \cdot W^{-1}$	9	M	1.7×10^4
D/mm	20	A	0.0803
B	0.1367	s	0.2033
m	1	P/W	20
τ/ns	7.8	η_{opt}	0.64
σ	0.27	\bar{V}_n/mV	70
z_0/m	20	λ/nm	905
r'/m	0	r_0/m	15

3.2 平面目标倾斜角度对测距分布的影响

假设发散角为30 mrad,阈值为0.6 V,不同平面目标倾斜角测距概率密度分布如图3所示.从图3可得,测距概率密度函数波形随表面倾斜角度的增大而展宽,同时意味着测距方差增大,测距均值随表面倾斜角度的增大而右移.由于将发射波形的峰值时刻设置为起始时刻,因此,测距概率密

度函数波形的分布都在 20 m 以内. 不同平面目标倾斜角回波信号如图 4 所示. 从图 4 可得, 随着倾斜角度的增大, 脉冲激光回波信号幅值减小, 脉冲回波展宽. 结合图 2、图 3 和图 4 可知: 当 $\alpha = 0^\circ$ 时, 回波信号未展宽, 回波脉冲宽度为 7.8 ns; 当 $\alpha = 20^\circ$ 时, 相对展宽比较小, 但回波信号的双向反射分布函数的减小导致回波信号降低. 对于恒阈值时刻鉴别来说, 上升沿变平坦, 测距概率密度分布右移. 当 $20^\circ < \alpha < 40^\circ$ 时, 相对展宽比缓慢增加, 回波展宽也缓慢增加, 回波信号上升沿变平缓; 当 $40^\circ \leq \alpha < 60^\circ$ 时, 与 $20^\circ < \alpha < 40^\circ$ 的情况相比, 上升沿的平缓造成上升沿判别时刻的后移, 判别时刻后移导致测距均值偏大, 同时, 测距概率密度波形略有变宽, 方差增大; 当 $60^\circ \leq \alpha < 70^\circ$ 时, 相对展宽比迅速增加, 回波展宽迅速增加, 测距均值明显增大, 整体波形向 20 m 方向偏移, 方差增大. 因此, 测距方差随目标倾斜角度的增大而增大, 尤其在 $\alpha \geq 60^\circ$ 情况下测距方差开始明显增大. 当 $\alpha = 0^\circ, 20^\circ, 40^\circ$ 和 60° , 信噪比高于阈噪比, 测距分

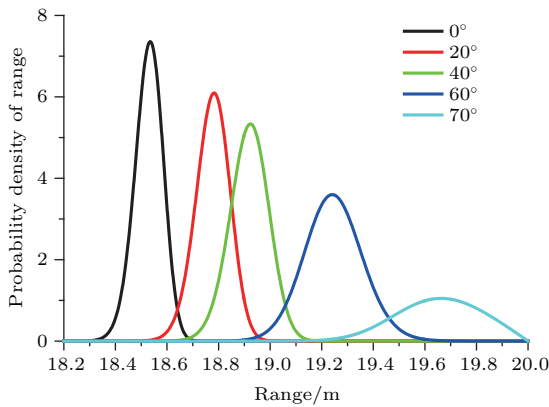


图 3 不同平面目标倾斜角测距概率密度分布
Fig. 3. Probability density distribution of range for different angles of plane target.

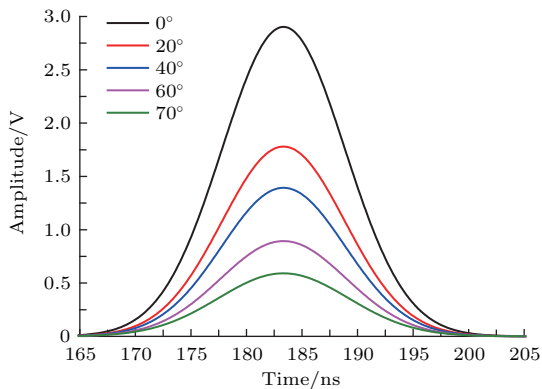


图 4 不同平面目标倾斜角回波信号
Fig. 4. Echo signals of different angles of plane target.

布呈现高斯分布; 当 $\alpha = 70^\circ$, 信噪比低于阈噪比, 测距分布不再呈现高斯分布, 呈现上升沿平缓下降沿陡的测距分布.

3.3 发散角对测距分布的影响

假设阈值为 0.6 V, 目标表面倾斜角度固定, 分析发散角对测距分布的影响. 当倾斜角度较小时, 发散角对测距分布的影响较小. 因此选择倾斜角度为 60° 时进行分析, 不同发散角的测距概率密度分布如图 5 所示. 从图 5 可得, 测距概率密度函数波形整体向右偏移. 随着发散角的增大, 测距均值增大, 测距方差增大, 概率密度峰值降低.

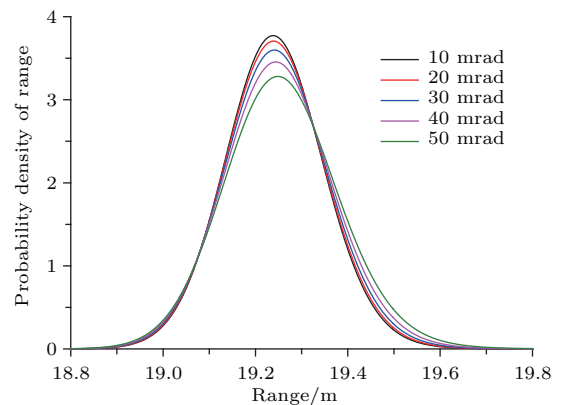


图 5 不同发散角的测距概率密度分布
Fig. 5. Probability density distribution of range for different divergence angles.

3.4 阈噪比对测距分布的影响

在恒阈值探测中, 阈噪比不同对探测性能有极大的影响. 假设表面倾斜角度为 0° , 发散角为 30 mrad, 则 $SNR = 96.7$, 不同 TNR 下测距概率密度分布如图 6 所示. 从图 6 可得, 随着 TNR 的增大, 测距概率密度函数向右移, 即测距均值向 20 m 处移动; 随 TNR 的增大, 测距方差先增大后减小. 当 $TNR < SNR$ 时, 测距概率密度分布为高斯分布. 当 $TNR = SNR$ 时, 测距概率密度分布右移, 已有探测到 20 m 的概率; 测距概率密度分布波形不对称, 下降沿相比上升沿较陡. 当 $TNR > SNR$ 时, 其探测概率明显降低, 由于阈噪比大于信噪比, 信号本身未达到阈值, 理想情况下测距概率为 0, 而噪声的抖动造成回波信号峰值有时高于阈值, 测距概率不为 0; 虚警的存在使其概率积分值不再为 1, 测距概率密度分布波形上升沿较平缓, 下降沿较陡, 不再呈现出高斯分布.

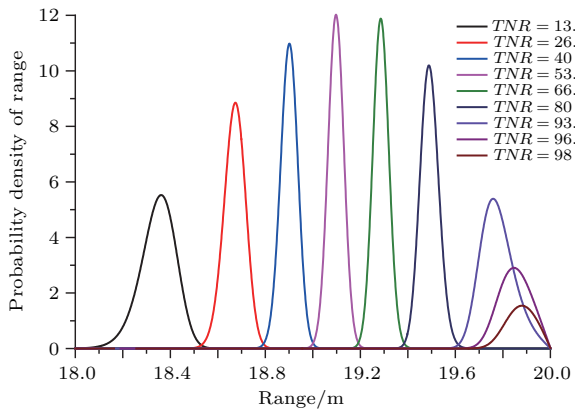


图6 不同 TNR 下测距概率密度分布
Fig. 6. Probability density distribution of range for different threshold noise ratio values.

3.5 脉冲激光发射功率对测距分布的影响

通过改变激光发射峰值功率分析其对测距分布的影响. 假设表面倾斜角度为 0° , 发散角为 30 mrad , 发射峰值功率从 10 W 增加到 20 W , 步长 2 W . 当阈值为 0.6 V 时, 不同功率的测距概率密度分布如图7所示. 随着功率的增加, 信噪比随之增大, 测距概率密度分布向左移, 即距离均值偏离 20 m , 因为随着发射峰值功率的增加, 回波信号幅度增加, 同一阈值条件下的回波时刻前移, 且因幅度增加漂移误差增大, 所以测距均值偏离 20 m , 测距方差逐渐减小.

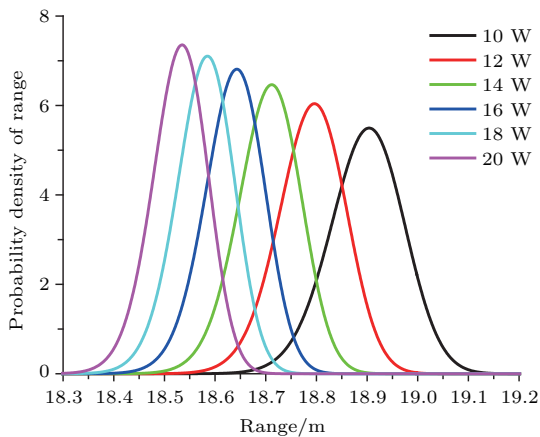


图7 不同功率的测距概率密度分布
Fig. 7. Probability density distribution of range for different power.

4 实验与分析

4.1 脉冲激光全波形模拟测距实验

为验证理论测距的概率密度分布, 运用蒙特卡

罗算法实现全波形模拟测距实验. 模拟测距流程图如图8所示.

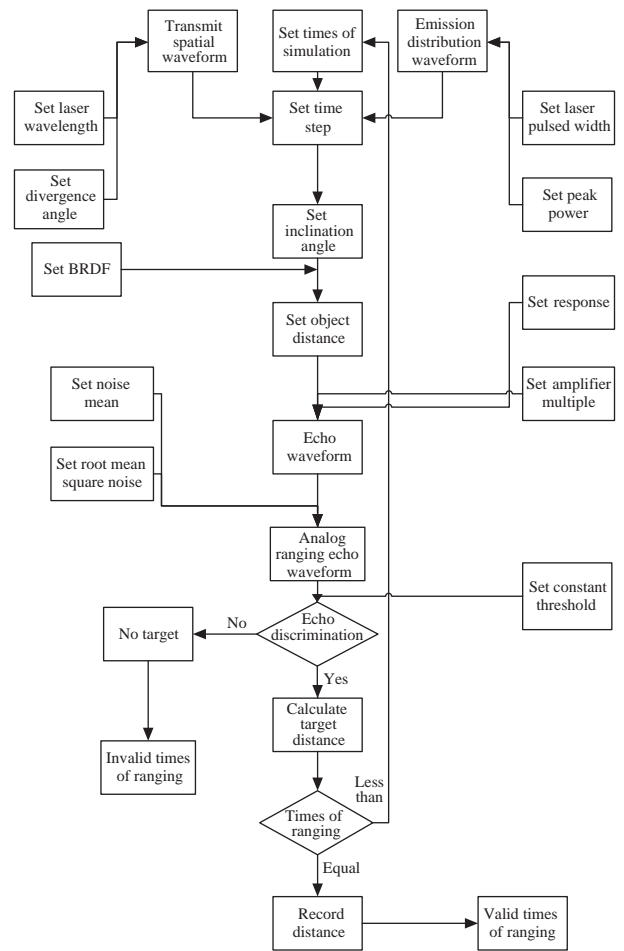


图8 模拟测距流程图

Fig. 8. The flow chart of simulation ranging.

设定模拟测距实验次数为 10000 次, 基本参数设置如表1, 倾角为 0° 的全波形模拟实验如图9(a)—(c)所示.

4.2 脉冲激光测距实验

激光近程探测实验系统框图如图10所示. 激光近程探测实验系统由光学平台、激光测距系统以及可调靶板三部分组成. 激光近程探测系统由激光发射系统(脉冲触发电路、激光驱动电路、激光器 SPLPL90-3、激光准直透镜)、激光接收系统(阈值电压时刻鉴别电路、放大接收电路、光电探测器 LSSAPD8-500、聚焦透镜、滤光片)和激光测时系统(TDC-GP21, C8051 F310单片机)组成. 测距实验原理: 脉冲触发电路产生一路脉冲触发信号, 驱动激光驱动电路工作, 产生另一路参考脉冲作为测距起始点并输入 TDC-GP21; 驱动电路驱动激光器

发出脉冲光束, 脉冲光束经准直透镜准直后进行传输; 当光束遇到可调靶板后产生散射光束, 其通过滤光片后射入接收聚焦透镜, 光束通过聚焦透镜汇聚进入雪崩光电二极管 (APD) 探测器中产生脉冲回波信号, 脉冲回波信号经接收电路放大后, 进入阈值电压时刻鉴别电路产生回波结束时刻, 并输入

TDC-GP21 中; C8051 F310 采用 SPI 通讯接收测距时间计算距离信息, 最终, 通过串口通讯传入 PC 上位机中.

设定脉冲激光发射功率为 20 W, 调整接收系统接收视场角, 保证接收视场与发射视场空间匹配. 设置电路、透镜以及靶板参数如表 1 所列. 以平

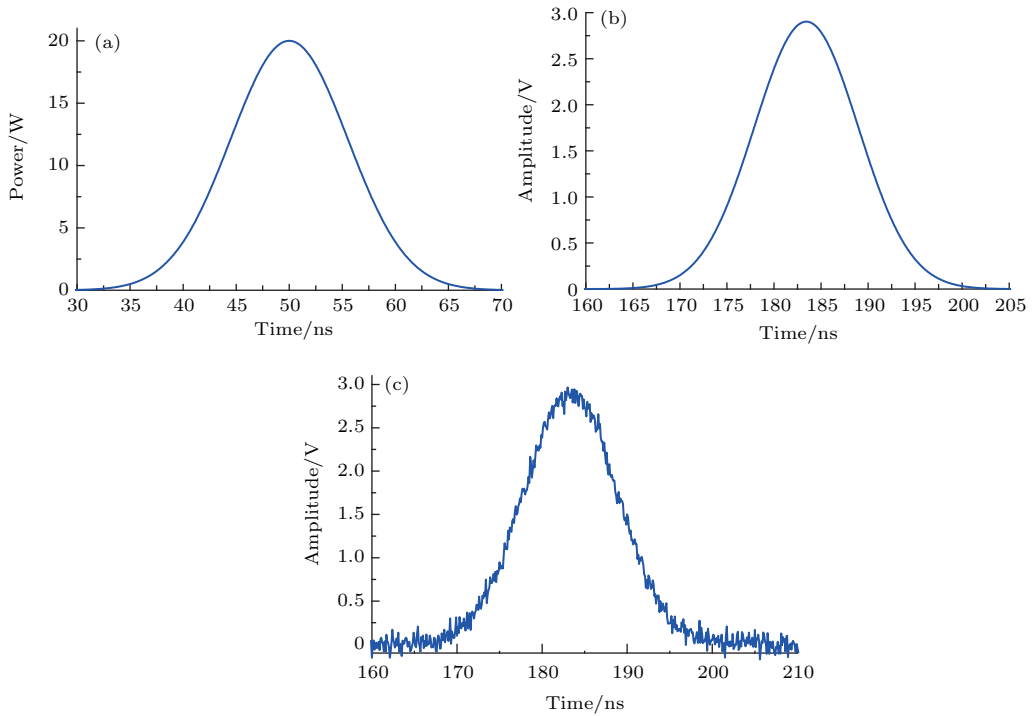


图 9 全波形模拟实验 (a) 激光发射波形; (b) 激光回波波形; (c) 带噪声的回波波形

Fig. 9. The ranging probability density distribution of theory, simulation and experiment from different angles: (a) Laser emission wave; (b) laser echo wave; (c) laser echo wave with noise.

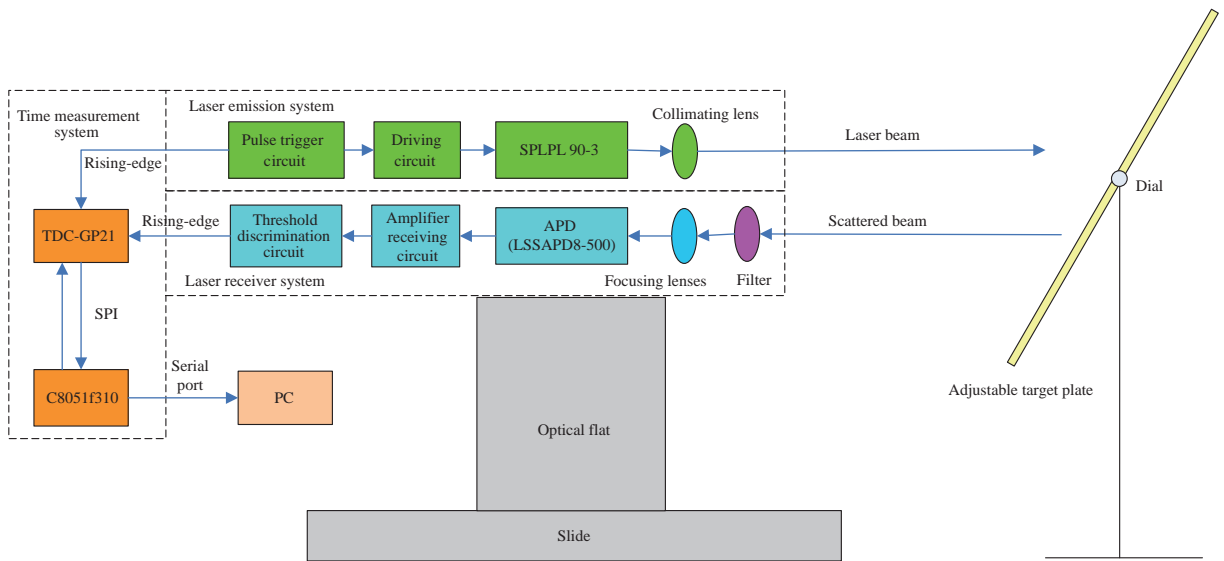


图 10 激光近程探测实验系统框图

Fig. 10. Block diagram of laser short range detection system.

面木板为目标, 将其放置在 20 m 处, 调节靶板分别在倾斜角为 0° , 20° , 40° , 60° 和 70° 进行测距实验, 测距实验次数为 250 次. 同时设定参数, 运用本文 4.1 节的全波形模拟测距实验进行仿真. 不同倾斜角的理论仿真、蒙特卡罗模拟实验和实际实验测距的概率密度分布如图 11(a)—(e) 所示. 当倾斜角为 0° , 20° , 40° 和 60° 时, 实际实验有效次数为 250 次. 从图 11(a)—(d) 可知蒙特卡罗模拟实验、实际实验概率密度分布与理论概率密度分布基本一致,

呈现高斯分布; 随着倾斜角的增大, 测距均值向右偏移, 测距方差增大, 并且实际实验测距均值均比理论测距均值小. 从图 11(e) 可知, 当倾斜角为 70° 时, 实际有效测量次数为 54 次, 探测概率为 0.216, 蒙特卡罗模拟实验、实际实验概率密度分布与理论概率密度分布有所偏离, 概率密度分布不再呈现高斯分布, 上升沿变缓, 下降沿变陡; 且测距均值和测距方差进一步增大, 实际实验测距均值比理论测距均值大.

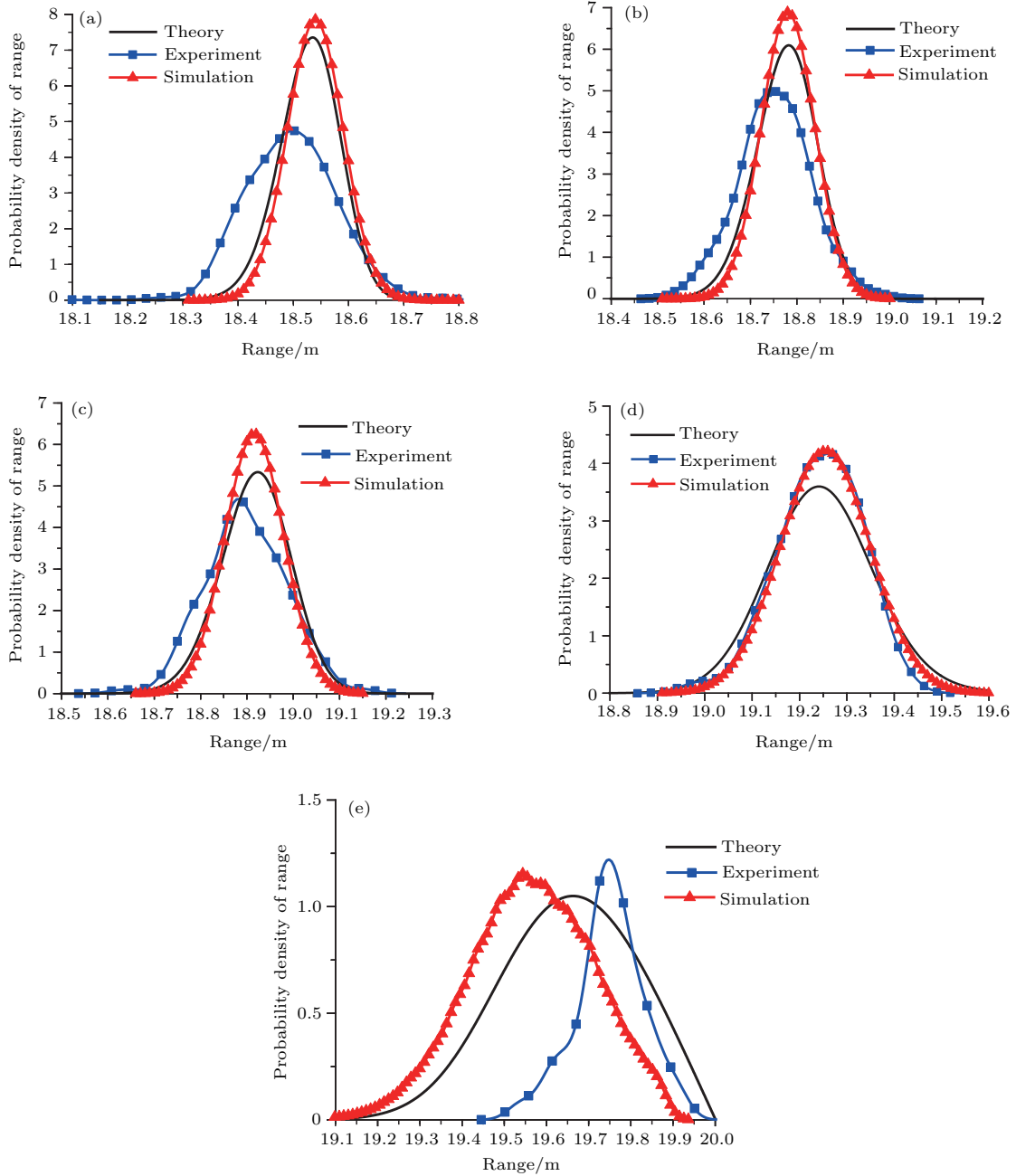


图 11 不同倾斜角的理论、仿真和实验测距的概率密度分布 (a) $\alpha = 0^\circ$; (b) $\alpha = 20^\circ$; (c) $\alpha = 40^\circ$; (d) $\alpha = 60^\circ$; (e) $\alpha = 70^\circ$

Fig. 11. The ranging probability density distribution of theory, simulation and experiment from different angles: (a) $\alpha = 0^\circ$; (b) $\alpha = 20^\circ$; (c) $\alpha = 40^\circ$; (d) $\alpha = 60^\circ$; (e) $\alpha = 70^\circ$.

5 结 论

本文基于平面目标特性, 推导了脉冲激光近程探测目标回波方程, 分析了回波展宽特性. 基于恒阈值时刻鉴别方法, 推导了平面目标的测距概率密度函数解析式. 通过理论仿真分析、蒙特卡罗模拟测距实验和实际实验得出近程探测结论: 1) 随着平面目标倾斜角的增大, 回波信号衰减, 回波脉冲展宽, 测距概率密度分布均值和方差增大; 2) 当目标倾斜角较小时, 回波信号信噪比高于阈噪比, 测距分布呈现高斯分布; 当目标倾斜角较大时, 回波信号信噪比低于阈噪比, 测距分布不再呈现高斯分布, 呈现上升沿缓下降沿陡的分布, 且探测概率小于1; 3) 在激光引信测距时, 高强度回波信号能有效平面目标倾斜角的变化所引起的虚警率.

本文所得结论为研究目标特性对脉冲激光近程探测测距分布的影响提供了理论依据. 比较分析理论仿真分析、蒙特卡罗模拟测距实验和实际实验的结果, 为进一步研究提高激光发射系统相应技术指标和恒阈值时刻鉴别测距补偿策略减小测距误差提供了理论和实验依据.

参考文献

- [1] Gan L, Zhang H, Zhang X J 2013 *Chin. J. Lasers* **40** 0702009 (in Chinese) [甘霖, 张合, 张祥金 2013 中国激光 **40** 0702009]
- [2] Guo J, Zhang H, Wang X F 2012 *Chin. J. Lasers* **39** 0113001 (in Chinese) [郭婧, 张合, 王晓锋 2012 中国激光 **39** 0113001]
- [3] Buzzard G 2000 *First Annual International Missile & Rocket Symposium and Exhibition* San Diego, USA, Feburay 22-24, 2000 p24
- [4] Buzzard G 2010 *54th Annual Fuze Conference* Kansas City, USA, May 2-6, 2010 p67
- [5] Liu P, Li P, Chen H M 2010 *Laser J.* **31** 14 (in Chinese) [刘鹏, 栗苹, 陈慧敏 2010 激光杂志 **31** 14]
- [6] Johnson S, Cain S 2008 *Appl. Opt.* **47** 5147
- [7] Cain S, Richmond R, Armstrong E 2006 *Appl. Opt.* **45** 6154
- [8] Zhao W, Han S K 2014 *Trans. Beijing Inst. Technol.* **34** 501 (in Chinese) [赵文, 韩绍坤 2014 北京理工大学学报 **34** 501]
- [9] Jiang H J, Lai J C, Yan W, Wang C Y, Li Z H 2013 *Opt. Laser Technol.* **45** 278
- [10] Lai J C, Jiang H J, Yan W, Wang C Y, Li Z H 2013 *Optik* **124** 5202
- [11] Steinvall O 2000 *Appl. Opt.* **39** 4381
- [12] Johnson S E 2009 *J. Appl. Remote Sens.* **3** 033564
- [13] Grönwall C, Steinvall O, Gustafsson F, Chevalier T 2007 *Opt. Eng.* **46** 106201
- [14] Steinvall O, Chevalier T, Larsson H 2006 *Proc. SPIE* **6214** 62140B
- [15] Kurtti S, Kostamovaara J 2011 *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **60** 146

Effect of plane target characteristics on ranging distribution for pulse laser detection*

Xu Xiao-Bin Zhang He[†] Zhang Xiang-Jin Chen Shan-Shan Zhang Wei

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

(Received 13 June 2016; revised manuscript received 17 July 2016)

Abstract

Laser proximity fuze is a kind of active detecting system which has been extensively equipped in both conventional and guided missile ammunitions. It uses a pulsed laser for detecting and ranging a target, accurately providing information about target angle and distance. The system emits a short pulse of laser beams which come into contact with the target and receives the light scattered back. After transducing light into electric signal, target range could be obtained with proper signal processing technique. The width and amplitude of the echo could vary if targets are of different characteristics, which leads to distributed target ranging results. Therefore, a better understanding of the relationship between target characteristic and ranging distribution can increase the precision of the pulsed laser proximity detecting system.

In this paper, the emitted laser is modeled as a Gaussian pulse. The corresponding impulse response equation and echo equation of the pulsed laser for the planer target are derived. Considering the echo broadening effect, relative broadening ratio is determined from the echo equation. Then the relationships between the echo broadening coefficient and the parameters of tilt angle of planar target, laser divergence angle, and laser pulse width are analyzed. The results show that relative broadening ratio increases with the increase of the tilt angle of planar target or laser divergence angle, and decreases as the laser pulse width decreases. Based on the echo equation of pulsed laser and constant threshold leading edge detection, the probability density function of the planar target ranging is derived analytically. The influences of changing parameters of tilt angle of planar target, power of emitted laser, laser divergence angle, and threshold-to-noise ratio (TNR) on statistical ranging distribution are simulated.

Monte Carlo simulation is performed for the whole waveform ranging experiment. The pulsed laser ranging platform is built and 20 m ranging experiment is conducted. The result shows that the ranging probability density distribution from Monte Carlo simulation is close to that from the experiment. As the tilting angle of target increases, ranging mean and variance both increase. When the tilting angles are 0° , 20° , 40° or 60° , the signal-to-noise ratio (SNR) is larger than the TNR, and the ranging distribution is Gaussian. When the tilting angle is 70° , the SNR is smaller than the TNR, and the ranging distribution is distorted with a longer rising edge and a shorter falling edge from the original Gaussian profile. This study could provide theoretical basis for the research of the ranging distribution of pulsed laser detector with the consideration of target characteristic.

Keywords: pulsed laser detection, plane target echo characteristics, constant threshold value, probability density distribution of ranging

PACS: 06.20.Dk, 42.55.Px, 42.79.Qx, 52.65.Pp

DOI: 10.7498/aps.65.210601

* Project supported by the Weapon-equipment Pr-research Project Foundation, China (Grant No. 51305020104).

[†] Corresponding author. E-mail: hezhang@mail.njust.edu.cn