

脉冲激光周向探测平面目标回波特性

徐孝彬, 张 合, 陈杉杉

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 针对脉冲激光周向探测平面目标回波特性的问题, 设计了脉冲激光周向探测系统。基于传统激光雷达方程, 采用单站式激光雷达散射截面方程, 推导了混有时空分布的回波功率的一般方程。基于倾斜平面目标的表面特性, 推导了扩展目标和非扩展目标的回波功率方程。通过仿真分析了脉冲展宽特性、朗伯体与非朗伯体平面的目标回波特性。对周向探测系统进行加工以及回波实验, 实验结果表明, 数值计算回波与粗糙平板实际回波波形一致, 为脉冲激光周向探测系统测距提供了理论依据。

关键词 激光器; 脉冲激光; 回波特性; 散射特性; 平面目标; 周向探测

中图分类号 TJ43 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0414003

Plane Target Echo Characteristics of Pulsed Laser Circular-Viewing Detection

Xu Xiaobin, Zhang He, Chen Shanshan

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

Abstract Aiming at the echo characteristics of the plane target of the pulsed laser circular-viewing detection, the pulsed laser circular-viewing detection system is designed. Based on the traditional laser radar equation, a single station laser radar scattering cross section equation is used to derive the general equation of the echo power with spatial and temporal distribution. Based on surface characteristics of the tilted plane target, the echo power equations of the extended and the non-extended target are derived. The pulse broadening characteristics and the echo characteristics of Lambertian plane and non-Lambertian plane are simulated. The circular-viewing detection system is manufactured and tested, and the experimental results show that the echo waveform is consistent with the actual echo waveform of the rough flat plate. It provides a theoretical basis for the measurement of the pulsed laser circular-viewing detection system.

Key words lasers; pulsed laser; echo characteristic; scattering characteristic; plane target; circular-viewing detection

OCIS codes 140.3538; 140.3460; 120.1880

1 引 言

脉冲激光周向探测是一种利用脉冲激光束主动探测全周目标的探测技术, 属于激光近炸引信的范畴^[1], 已大量应用在导弹中, 如瑞典的 RBS-90 地空导弹、英国的 RAPIER MARK2 导弹和美国的 Thales 导弹等^[2-4]。脉冲激光周向探测中, 系统最大测程影响其探测能力, 而影响系统作用距离的主要因素除了系统本身的技术性能和环境条件外, 关键在于目标对激光的散射特性^[5]。为了获得目标确切的回波信号, 必须研究激光波束近场的传播和散射特性回波功率^[6]。

收稿日期: 2016-08-31; **收到修改稿日期:** 2016-11-24

基金项目: 武器装备预先研究项目(51305020104)

作者简介: 徐孝彬(1990—), 男, 博士研究生, 主要从事激光探测与目标识别方面的研究。E-mail: njstxxb@163.com

导师简介: 张 合(1957—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事探测制导与控制方面的研究。

E-mail: hezhang@mail.njust.edu.cn(通信联系人)

在目标回波功率方面,国内外学者进行了大量的研究。Johnson^[7]基于能量守恒原理,通过仿真分析了平面目标对测距精度的影响,但其推导的回波功率方程中未考虑激光表面散射特性的影响。瑞典学者Steinvall^[8-9]分析了扩展与非扩展平面、圆锥和圆球对激光回波功率信号的影响。Grönwall等^[10]将反射过程作为一个线性系统的冲击响应,推导了平面目标的脉冲响应方程,但公式有一定的局限性,无法体现目标尺寸对回波能量的影响。国内于森等^[11]基于激光辐射理论,推导了单像素激光脉冲测距中与时间相关的激光反射横截面关系式,但在推导过程中未考虑非朗伯体表面以及平面目标尺寸的影响。寇添等^[12]对激光大气传输能量衰减模型进行了改进,得出激光脉冲能量随距离的增大和目标投影面积的减小而呈现指数衰减规律,并进行实验验证,其回波方程能很好地反映能量的衰减,但是无法体现激光时间上的分布。寇添等^[13-14]建立了激光成像雷达探测目标的回波数学模型,分析了后向散射光强分布,但未考虑脉冲激光发射光束的光强分布特性。以上学者均未推导带有脉冲激光时空分布参数的扩展与非扩展平面目标的统一回波方程。

本文设计了脉冲激光周向探测系统;基于传统激光雷达方程,采用单站式激光雷达散射截面方程,推导了带有脉冲激光时空分布的回波功率的一般方程;基于倾斜平面目标的表面特性,推导了激光周向探测扩展目标和非扩展目标的回波功率方程;通过实验验证了理论公式的正确性,并通过仿真分析了朗伯体与非朗伯体平面的目标回波特性。

2 脉冲激光周向探测系统

脉冲激光周向探测系统组成示意图如图1所示。脉冲激光周向探测系统的工作原理:测距处理电路产生一路脉冲触发信号,驱动脉冲激光发射驱动电路工作,产生另一路参考脉冲作为测距起始点。驱动电路驱动激光器发出脉冲光束,脉冲激光光束经准直透镜准直后入射到发射平面镜上;同时,发射平面镜随着电机高速旋转,将光束通过大气信道进行传输。光束遇到目标后产生散射光束,其通过接收反射平面镜照射进入接收聚焦透镜,光束通过透镜会聚进入PIN光电探测器中产生脉冲回波信号,脉冲回波信号经PIN接收电路放大后进入时刻鉴别电路产生回波结束时刻,测距电路测算起始时刻与回波结束时刻时间获取距离信息;方位角探测系统获取周期转速信号,并将回波结束时刻输入方位角探测系统中,计算目标方位角。

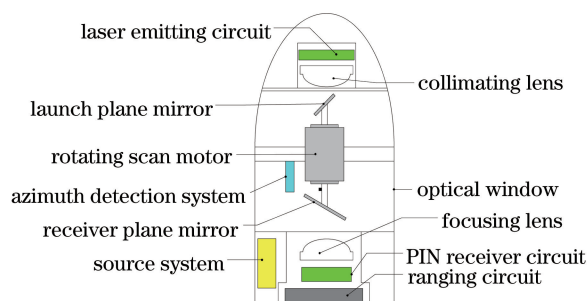


图1 脉冲激光周向探测系统组成示意图

Fig. 1 Diagram of pulsed laser circular-viewing detection system

3 平面目标回波方程

在脉冲激光周向探测系统中,由于收发间隙较小,脉冲激光周向探测系统可认为是同一点。在平面目标系统中,平面目标的探测模型如图2所示,平面目标的长为 l_1 、宽为 l_2 。激光光束沿 z 轴方向传播,与目标平面相交于点 o ; ox 轴铅直向上, oy 轴按右手坐标系确立;目标平面与 oxy 平面成 ψ 角。

对于激光探测系统,激光回波方程为^[15]

$$P_r = \frac{P_t G_t}{4\pi R_t^2} \frac{\sigma}{4\pi R_r^2} \frac{\pi D^2}{4} \eta_{atm} \eta_{sys}, \quad (1)$$

式中 P_t 为脉冲激光发射功率, G_t 为发射天线增益, R_t 为激光发射系统与目标之间的距离, R_r 为激光接收系统与目标之间的距离, σ 为雷达散射截面, D 为接收系统直径, η_{atm} 为大气透过率, η_{sys} 为系统光学通过率。

(1)式第一项即为高斯光束照度。

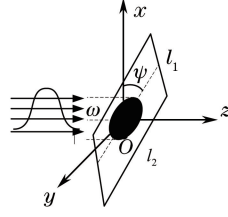


图 2 平面目标的探测模型

Fig. 2 Detection model of plane target

假设激光的空间模场分布为 TEM₀₀ 模,其空间分布服从高斯分布,则高斯光束照度的表达式为^[10]

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

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

脉冲激光发射功率与时间函数相关,假设激光器的输出脉冲为高斯脉冲,其激光发射脉冲为

$$P_i(t) = P_0 \exp(-t^2 \ln 2 / \tau^2), \quad (3)$$

式中 P_0 为脉冲激光峰值功率, τ 为激光输出脉冲半宽度(半峰全宽的 1/2)。

单位面元的单站雷达散射截面方程为^[16]

$$d\sigma = 4\pi f_r(\beta) \cos^2\beta dA, \quad (4)$$

式中 $f_r(\beta)$ 为单位面元的双向反射分布函数(BRDF), dA 为激光散射单位面元, β 为入射角。

在周向探测时,光束发散角较小,目标的纵深线度与探测距离相比可忽略,可认为横向强度分布仅是 x 和 y 的函数,与 z 无关,即 $dA \cos\beta = dx dy$ 。将(2)~(4)式代入(1)式,并对其进行积分可得:

$$P_r(t) = \frac{\pi D^2}{4R_r^2} \eta_{\text{atm}} \eta_{\text{sys}} \iint E(x, y, R_r) P_i(t') f_r(\beta) \cos\beta dx dy. \quad (5)$$

根据图 2 可知 $z = x \tan\psi$, 将其代入(5)式,可得

$$P_r(t) = \frac{P_0 D^2}{2\omega^2 R_r^2} \eta_{\text{atm}} \eta_{\text{sys}} \iint \exp\left[-2\left(\frac{x^2 + y^2}{\omega^2}\right)\right] \exp\left[-\left(t - \frac{2R_r}{c} - \frac{2x \tan\psi}{c}\right)^2 \ln 2 / \tau^2\right] f_r(\psi) \cos\psi dx dy. \quad (6)$$

当激光光束照射非扩展目标时,光束照射到全部目标平面,回波方程为

$$P_r(t) = \frac{P_0 D^2 \eta_{\text{atm}} \eta_{\text{sys}} f_r(\psi) \cos\psi}{2\omega^2 R_r^2} \int_{-\frac{l_2}{2}}^{\frac{l_2}{2}} \exp\left(-2\frac{x^2}{\omega^2}\right) \exp\left[-\left(t - \frac{2R_r}{c} - \frac{2x \tan\psi}{c}\right)^2 \ln 2 / \tau^2\right] dx \int_{-\frac{l_1}{2}}^{\frac{l_1}{2}} \exp\left(-2\frac{y^2}{\omega^2}\right) dy, \quad (7)$$

由于 $\int_{-\frac{l_1}{2}}^{\frac{l_1}{2}} \exp\left(-2\frac{y^2}{\omega^2}\right) dy = \omega \sqrt{\frac{\pi}{2}} \operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{2}l_1}{2\omega}\right)$, erf 为误差函数,则(7)式为

$$P_r(t) = \frac{P_0 D^2 \eta_{\text{atm}} \eta_{\text{sys}} f_r(\psi) \cos\psi}{2\omega^2 R_r^2} \omega \sqrt{\frac{\pi}{2}} \operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{2}l_1}{2\omega}\right) \int_{-\frac{l_2}{2}}^{\frac{l_2}{2}} \exp\left(-2\frac{x^2}{\omega^2}\right) \exp\left[-\left(t - \frac{2R_r}{c} - \frac{2x \tan\psi}{c}\right)^2 \ln 2 / \tau^2\right] dx, \quad (8)$$

令 $\xi_1 = 2R_r - ct$, $a_1 = \frac{2c^2\tau^2 + 4\omega^2 \tan^2\psi \ln 2}{c^2\tau^2\omega^2}$, $b_1 = \frac{4\xi_1 \tan\psi \ln 2}{c^2\tau^2}$, 则(8)式积分可得:

$$P_r(t) = \frac{\pi P_0 D^2 \eta_{\text{atm}} \eta_{\text{sys}} f_r(\psi) \cos\psi}{4\omega R_r^2 \sqrt{2a_1}} \operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{2}l_1}{2\omega}\right) \exp\left(-\frac{\xi_1^2 \ln 2}{c^2\tau^2} + \frac{b_1^2}{4a_1}\right) \left\{ \operatorname{erf}\left[\sqrt{a_1}\left(\frac{l_2}{2} + \frac{b_1}{2a_1}\right)\right] - \operatorname{erf}\left[\sqrt{a_1}\left(-\frac{l_2}{2} + \frac{b_1}{2a_1}\right)\right] \right\}, \quad (9)$$

当光束照射扩展目标时,积分面积为一半径为 ω 的圆,由于激光光斑内的能量占据了总能量的 95%,为计算方便,将积分范围扩展到无穷远并不会对结果产生太大影响,(6)式变换为

$$P_r(t) = \frac{P_0 D^2 \eta_{\text{atm}} \eta_{\text{sys}} f_r(\psi) \cos \psi}{2\omega^2 R_r^2} \int_{-\infty}^{\infty} \left(-2 \frac{y^2}{\omega^2} \right) dy \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left\{ - \left[\frac{2x^2}{\omega^2} + \frac{(2x \tan \psi + 2R_r - ct)^2 \ln 2}{c^2 \tau^2} \right] \right\} dx, \quad (10)$$

式中 $\int_{-\infty}^{\infty} \left(-2 \frac{y^2}{\omega^2} \right) dy = \omega \sqrt{\frac{\pi}{2}}$, 将其代入(10)式中,回波方程为

$$P_r(t) = \frac{P_0 D^2 \eta_{\text{atm}} \eta_{\text{sys}} f_r(\psi) \cos \psi}{2\omega R_r^2} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left\{ - \left[\frac{2x^2}{\omega^2} + \frac{(2x \tan \psi + \xi_1)^2 \ln 2}{c^2 \tau^2} \right] \right\} dx, \quad (11)$$

对(11)式积分进行计算,扩展目标回波功率方程为

$$P_r(t) = \frac{\pi P_0 D^2 \eta_{\text{atm}} \eta_{\text{sys}} f_r(\psi) \cos \psi}{2\omega R_r^2 \sqrt{2a_1}} \exp \left(- \frac{\xi_1^2 \ln 2}{c^2 \tau^2} + \frac{b_1^2}{4a_1} \right). \quad (12)$$

当 $l_1 \rightarrow \infty, l_2 \rightarrow \infty$ 时,(9)式退化为(12)式,可见(9)式是(12)式的推广。

4 实验与仿真分析

为验证理论公式推导的正确性,设计了脉冲激光周向探测系统,并进行脉冲回波功率探测实验。脉冲激光波长为 905 nm,脉冲峰值功率为 20 W,光束发散角为 20 mrad,探测距离为 5 m,实验目标半球反射率为 0.3,靶板与光束垂直,分别调节电路参数实现脉冲宽度为 10 和 50 ns,5 m 处实验结果与仿真结果如图 3(a)和(b)所示。从图 3 中可以看出,实际的回波波形与理论波形基本一致,实验波形非正部分是由于电路中的寄生参数造成的信号振荡衰减。理论仿真与实验结果未完全重合,是由于目标表面并不是理想朗伯体产生的,实际加工制作的表面是粗糙表面,其散射特性与表面高度起伏均方根和相关长度有关。

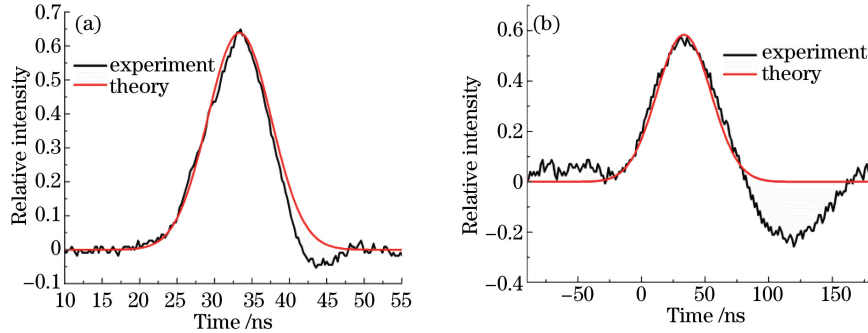


图 3 5 m 处实验结果与仿真。(a) 10 ns; (b) 50 ns

Fig. 3 Simulation and experimental results at 5 m. (a) 10 ns; (b) 50 ns

4.1 脉冲展宽分析

将(12)式中的含时参数展开:

$$- \frac{\xi_1^2 \ln 2}{c^2 \tau^2} + \frac{b_1^2}{4a_1} = - \frac{(2R_r/c - t)^2 \ln 2}{\tau^2 + 2\omega^2 \tan^2 \psi \ln 2 / c^2}. \quad (13)$$

经过平面目标反射后的脉冲展宽为

$$\Delta \tau = 2(\sqrt{\tau^2 + 2\omega^2 \tan^2 \psi \ln 2 / c^2} - \tau). \quad (14)$$

根据(14)式可知,脉冲展宽与平面目标的倾斜角度和光束半径有关,而光束半径与光束发散角和探测距离有关。

假设脉冲激光波长为 905 nm,光束发散角为 20 mrad,探测距离为 5 m。不同倾角和脉宽下的脉冲展宽如图 4 所示。从图 4 可以看出,在平面目标倾斜角度相同的情况下,随着脉宽的增加,脉冲展宽减小。当倾斜角度为 0° 时,脉冲展宽为 0,回波未有展宽。当倾斜角度较小时,脉冲展宽较小。当倾斜角度为 70° 时,脉宽为 2 ns 时的展宽为 0.27 ns,展宽了 13.5%,影响测距结果;脉宽为 4 ns 时的展宽为 0.14 ns;脉宽为 6 ns

时的展宽为 0.09 ns;脉宽为 8 ns 时的展宽为 0.07 ns;脉宽为 10 ns 时的展宽为 0.06 ns;增加脉宽有利于降低脉宽的展宽影响,但是增加脉宽会增加回波上升沿,降低了上升沿阈值检测时的测距精度。因此,后续仿真都采用脉宽为 10 ns 进行分析,随着倾斜角度的增加,脉冲展宽增加。

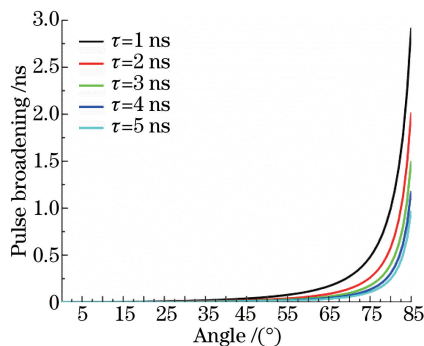


图 4 不同倾角和脉宽下的脉冲展宽

Fig. 4 Pulse broadening with different tilted angles and pulse widths

4.2 朗伯体平面目标

若目标为朗伯体,即粗糙平面。则 $f_r(\beta)$ 可由 BRDF 获得:

$$f_r(\beta) = \frac{\rho}{\pi}, \quad (15)$$

式中 ρ 为目标半球反射率。

假设仿真参数分别为 $D=0.02$ m, $P_0=20$ W, $\eta_{\text{opt}}=0.4$, $R_r=5$ m, $\tau=5$ ns, $\varphi=20$ mrad, $\rho=0.2$, $\lambda=905$ nm, $\eta_{\text{sys}}=0.95$ 。

4.2.1 扩展目标

对于扩展目标,回波方程(12)式可表示为含有 $\cos \psi$ 的回波方程,将(12)式中的展宽参数忽略所获得的回波方程即常用测距回波方程。不同倾斜角度下的扩展目标平面的回波特性如图 5 所示。随着倾斜角度的增加,回波功率峰值衰减:当 $\psi=0^\circ$ 时,峰值功率为 $6 \mu\text{W}$; $0^\circ < \psi < 60^\circ$, 峰值功率衰减较小;当 $\psi=60^\circ$ 时,峰值功率为 $3 \mu\text{W}$, 是 $\psi=0^\circ$ 时的峰值功率的 1/2;当 $\psi=70^\circ$ 时,峰值功率为 $2 \mu\text{W}$, 是 $\psi=0^\circ$ 时的峰值功率的 1/3。根据对回波功率的分析:为保证探测性能,当发射系统参数一定时,需以最大倾斜角度时的探测功率为最小探测功率,进行接收探测电路设计。

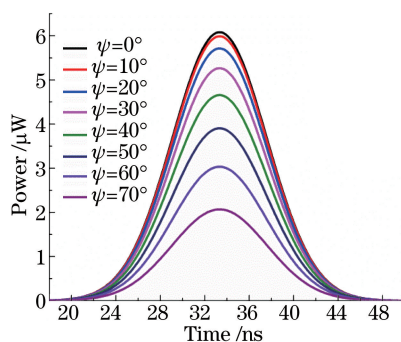


图 5 不同倾斜角度下的扩展目标平面的回波特性

Fig. 5 Echo characteristics of extended target plane with different tilted angles

4.2.2 非扩展目标

非扩展目标尺寸会对目标回波功率峰值带来影响,假设倾斜角度为 0° , $l_1=0.1$ m。不同平面目标尺寸的回波如图 6(a)、(b)所示。从图 6(a)、(b)可以看出,随着非扩展平面边长的增加,回波峰值功率增加且近似呈幂函数增长。

4.3 非朗伯体平面目标

若平面目标为非朗伯体目标,则 $f_r(\beta)$ 可由 BRDF 获得^[8]:

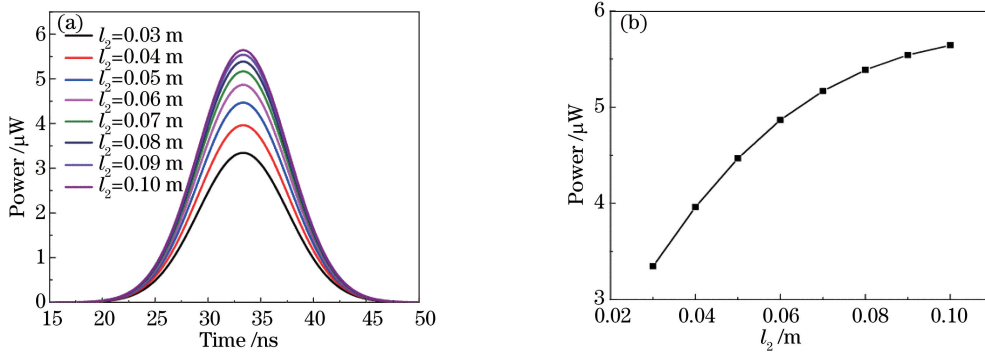


图 6 不同平面目标尺寸的回波。(a) 回波信号；(b) 峰值功率

Fig. 6 Echo signals of different plane target sizes. (a) Echo signal; (b) peak power

$$f_r(\beta) = \frac{A}{\cos^6 \beta} \exp\left(-\frac{\tan^2 \beta}{s^2}\right) + B \cos^m \beta, \quad (16)$$

式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。

选取参数如 4.2 节所示, 同时, 选取 BRDF 参数分别为 $A=0.3, B=0.25, s=0.2, m=1$ 。不同倾斜角度下的 BRDF, 如图 7 所示。

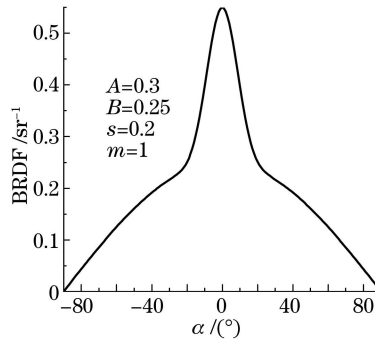


图 7 不同倾斜角度下的 BRDF

Fig. 7 BRDF with different tilted angles

4.3.1 扩展目标

对于非朗伯体扩展目标进行仿真, 仿真参数与 4.2 节相同, BRDF 采用图 7 中的数据。不同倾斜角度下的扩展目标平面的回波特性如图 8(a)、(b)所示。从图 8(a)可以看出, 随着倾斜角度的增大, 回波峰值功率衰减、回波展宽。当 $\psi=0^\circ$ 时, 峰值功率为 $52.5 \mu\text{W}$; 当 $\psi=30^\circ$ 时, 峰值功率为 $17.9 \mu\text{W}$, 是 $\psi=0^\circ$ 时的峰值功率的 $1/3$ 左右; 当倾斜角度较小时, 回波峰值功率衰减较快; 当 $\psi=70^\circ$, 峰值功率为 $2.8 \mu\text{W}$, 是 $\psi=0^\circ$ 时的峰值功率的 $1/18$ 左右。当其他参数相同时, 峰值功率与 $f_r(\psi) \cos \psi$ 成正比。峰值功率随倾斜角度衰减波形

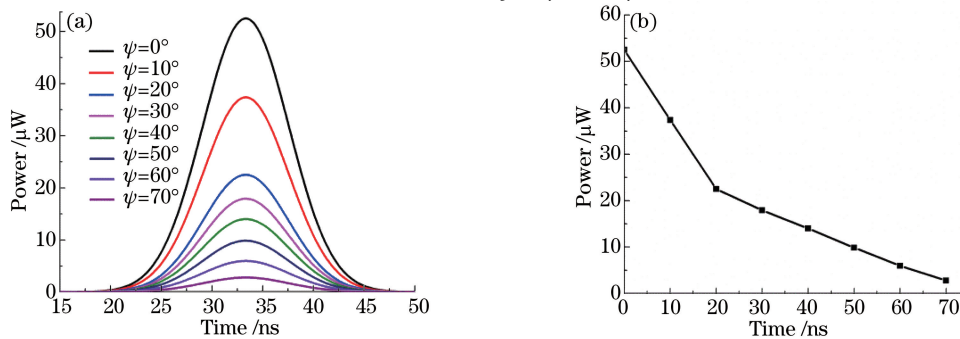


图 8 不同倾斜角度下的扩展目标平面的回波特性。(a) 回波信号；(b) 峰值功率

Fig. 8 Echo characteristics of extended target plane with different tilted angles. (a) Echo signal; (b) peak power

与图 5 中的相近。

4.3.2 非扩展目标

非扩展目标尺寸形状会对目标回波功率峰值带来影响,假设倾斜角度为 0° , $l_1 = 0.1$ m。不同平面目标尺寸的回波如图 9 所示。随着非扩展平面边长的增加,回波峰值功率增加。对比非扩展朗伯体与非朗伯体波形可知,平面散射特性不影响回波峰值的变化规律。

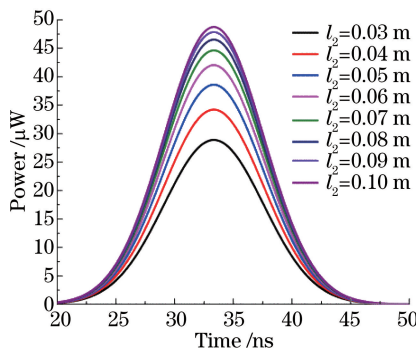


图 9 不同平面目标尺寸的回波

Fig. 9 Echo signals of different plane target sizes

5 结 论

采用单站式激光雷达散射截面方程,推导了带有脉冲激光时空分布的回波功率的一般方程。设计了周向探测系统进行实验,实验结果表明,脉冲激光峰值功率为 20 W、脉宽分别为 10 ns 和 50 ns 时,理论波形与实验波形一致。通过仿真分析了朗伯体与非朗伯体条件下的回波特性,获得了脉宽展宽方程。仿真结果表明,推导的朗伯体扩展目标回波方程与常用激光测距回波方程一致;随着角度的增加,脉宽展宽;同时给出了非扩展目标的回波峰值变化规律,为周向探测系统最大测程探测提供理论依据,也为后续提升脉冲激光测距性能提供理论支持。

参 考 文 献

- [1] Xu Xiaobin, Zhang He, Zhang Xiangjin, *et al.* Miniaturized transmitting technology of laser circumferential detection [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(3): 0314005.
徐孝彬, 张 合, 张祥金, 等. 激光周向探测小型化发射技术[J]. *光子学报*, 2016, 45(3): 0314005.
- [2] Buzzard G. Advanced laser proximity fuzing[C]. *First Annual International Missile & Rocket Symposium*, 2000.
- [3] Buzzard G. Modeling the Interaction of a laser target detection device with the sea surface[C]. *54th Annual Fuze Conference*, 2010, 4: 67-69.
- [4] Zhang Zhenghui, Yang Ming, Xu Shiwen. Analysis of FOV configuration in laser proximity fuze[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(6): 700-704.
张正辉, 杨 明, 许士文. 激光引信光束布局方式的选择与分析[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(6): 700-704.
- [5] Han Yi, Sun Huayan, Li Yingchun, *et al.* Simulation of space object laser radar cross section[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(5): 819-823.
韩 意, 孙华燕, 李迎春, 等. 空间目标激光雷达散射截面仿真分析[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(5): 819-823.
- [6] Wu Zhensen, Chen Hui. Characteristics of detonator laser beam scattering from an object in the near field[J]. *Laser & Infrared*, 2001, 31(5): 294-297.
吴振森, 陈 辉. 激光引信目标近场散射特性研究[J]. *激光与红外*, 2001, 31(5): 294-297.
- [7] Johnson S E. Effect of target surface orientation on the range precision of laser detection and ranging systems[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2009, 3(1): 033564.
- [8] Steinvall O. Effects of target shape and reflection on laser radar cross sections[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(24): 4381-4391.
- [9] Steinvall O, Chevalier T, Larsson H. Data collection and simulation of high range resolution laser radar for surface mine detection[J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2006: 6214.

- [10] Grönwall 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.
- [11] 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.
于 森, 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.
- [12] Kou Tian, Wang Haiyan, Wang Fang, *et al.* Research on pulse echo characteristic of airborne laser detecting air target[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(4): 0414001.
寇 添, 王海晏, 王 芳, 等. 机载激光探测空中目标脉冲回波特性研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(4): 0414001.
- [13] Kou Tian, Wang Haiyan, Wang Fang, *et al.* Study on back-scattering light intensity in airborne laser range-gated imaging[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(1): 0113003.
寇 添, 王海晏, 王 芳, 等. 机载激光距离选通成像大气后向散射光强研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(1): 0113003.
- [14] Kou Tian, Wang Haiyan, Wang Fang, *et al.* Model of moving target trajectory detected based on airborne laser radar imaging[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(10): 101002.
寇 添, 王海晏, 王 芳, 等. 基于机载激光雷达成像的动目标轨迹检测模型[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(10): 101002.
- [15] Jelalian A V. *Laser radar systems*[M]. Boston: Artech House, 1992.
- [16] Shirley L G, Hallerman G R. *Applications of tunable lasers to laser radar and 3D imaging*[J]. *Applications of Tunable Lasers to Laser Radar Andd Imaging*, 1996.