

## 脉冲激光探测多平面目标回波特性

王佳立<sup>1,2</sup>, 徐孝彬<sup>1,2,3,4\*</sup>, 吴家林<sup>1,2</sup>, 谭治英<sup>1,2</sup>, 骆敏舟<sup>1,2</sup><sup>1</sup>河海大学机电工程学院, 江苏 常州 213022;<sup>2</sup>河海大学江苏省特种机器人技术重点实验室, 江苏 常州 213022;<sup>3</sup>南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016;<sup>4</sup>常州常工电子科技股份有限公司, 江苏 常州 213001

**摘要** 针对激光雷达多目标探测回波特性问题, 基于传统单点激光回波理论, 考虑激光照射区域和目标倾斜角度因素, 推导出多目标激光雷达回波方程。数值仿真结果表明: 多个目标回波峰值电压随着目标照射区域减小和目标倾斜角度增大而逐渐减小。搭建了多目标回波探测实验平台, 采集了不同激光照射区域和目标倾斜角度下的回波波形, 对比了峰值电压理论计算结果与实测结果。结果表明: 理论波形与实验波形一致, 峰值相对误差控制在 6.7% 以内, 验证了理论模型和所推导公式的有效, 所得结论可以为脉冲激光雷达全波形分解和反演提供理论参考性。

**关键词** 测量; 激光雷达; 全波形; 多目标; 回波特性

**中图分类号** TP391

**文献标志码** A

**doi:** 10.3788/CJL202249.0604004

## 1 引言

激光雷达是一种光学频段的主动式光学遥感探测工具, 通过激光照射目标后的回波信号, 探测目标的距离及物理信息。同时, 激光雷达具有分辨率高、全天时工作的优点<sup>[1]</sup>。随着光电探测技术、激光技术、计算机技术的飞速发展, 激光雷达在探测距离、精度及空间分辨率等方面获得了长足的进展<sup>[2]</sup>。激光雷达的应用领域越来越广泛, 包括水深测量和水柱光学剖面测量, 也常被用于探测浮游生物散射层、气泡、内波、鱼群等<sup>[3]</sup>。Schmidt 等<sup>[4]</sup>发现激光雷达强度信息可用于地面覆盖物的区域划分和地物分类。路兴昌等<sup>[5]</sup>同样采用激光雷达回波强度和距离结合的方式对建筑物进行初步分割。靳翔等<sup>[6]</sup>使用激光雷达进行风廓线观测。

激光雷达回波强度可以表征目标对激光的反射特性, 可看作反映目标特性的一个物理量<sup>[7]</sup>。Yan

等<sup>[8]</sup>的研究表明, 利用激光雷达强度数据能够有效提升地物信息提取的适用性和精确性。寇添等<sup>[9]</sup>对激光大气传播能量衰减模型进行了改进, 并通过实验验证了激光脉冲能量随距离和目标投影面积呈指数变化的规律。何东等<sup>[10]</sup>对于多光谱激光雷达点云数据, 采用强度校正、色彩重建和色彩优化方法获取了更精确的点云强度。Kaasalainen 等<sup>[11]</sup>研究了距离和入射角对不同地面激光扫描仪的强度测量和辐射定标的影响, 并建立了针对这两种影响的校正方案。Fang 等<sup>[12]</sup>分析了回波强度和表面反射率的比例关系, 并提出一种基于激光传输函数估计的校正方法。程小龙等<sup>[13]</sup>基于激光雷达距离函数, 采用分段多项式结合距离和角度对同一目标的强度值进行归一化修正, 能够有效消除由距离和入射角带来的强度误差。沈法华等<sup>[14]</sup>分析了激光雷达在低层风场中的风速反演误差。上述学者都对激光雷达回波进行了深入的研究。

**收稿日期:** 2021-08-04; **修回日期:** 2021-08-19; **录用日期:** 2021-08-30

**基金项目:** 国家自然科学基金(51805146)、江苏省重点研发计划项目(BE2018004-1)、中央高校基本科研业务费专项(B200202221)

**通信作者:** \*xxbtc@hhu.edu.cn

在分析不同目标对回波的影响方面,杜松等<sup>[15]</sup>对激光雷达传输方程进行积分,得到单个激光脉冲回波方程的解析解,并通过实验验证了反射率、距离和入射/出射角对回波强度的影响。谭凯等<sup>[16]</sup>利用 Weierstrass 定理,将激光反射强度表示为反射率、入射角和距离的多项式函数的乘积形式,并通过实验确定了各个多项式的次数及系数。Steinval<sup>[17]</sup>通过积分方法推导出圆锥、圆柱、球和抛物面对激光回波强度的影响的计算公式。戴阳等<sup>[18]</sup>将 Lambertian 球、均匀漫反射体、均匀向四周的反射体和反射光作为发散角内均匀分布的反射体,得到点目标和拓展目标的测距方程。Grönwall 等<sup>[19]</sup>将反射过程作为一个线性系统的冲击响应,推导出平面目标的脉冲响应方程,但该方程有一定的局限性,无法体现目标尺寸对回波能量的影响。Johnson<sup>[20]</sup>基于能量守恒定律,推导出机载激光雷达探测地面目标的回波方程,对平面

目标测距精度的影响因素进行了分析。但是,以上研究均未推导出多平面目标带有脉冲激光时空分布参数的统一回波方程。

本文基于传统激光雷达方程,推导出多目标激光雷达回波方程的一般形式,仿真分析了激光照射区域和入射角对回波信号的影响,并搭建了实验平台对其进行验证。

## 2 平面多目标回波方程推导

在多目标探测系统中,探测系统模型如图 1 所示,激光光斑中心为  $o$  点,垂直  $xoy$  平面沿  $z$  轴正方向射向目标,3 块目标板的长、宽均为  $L$ ,远大于光斑直径,目标 1、目标 2、目标 3 在  $xoz$  平面内与  $x$  轴的夹角分别为  $\Psi_1$ 、 $\Psi_2$ 、 $\Psi_3$ ,沿激光发射方向看  $xoy$  平面,目标 1、目标 2、目标 3 在  $x$  轴负方向的可视边界分别为  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ ,在  $x$  轴正方向的可视边界分别为  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ 。

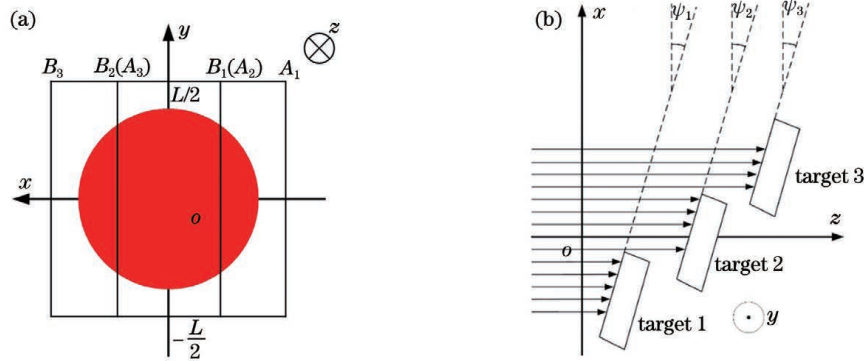


图 1 多平面目标探测模型。(a)  $z$  方向视角;(b)  $y$  方向视角

Fig. 1 Multi-planes detection model. (a)  $z$  direction; (b)  $y$  direction

对于激光探测系统,激光回波方程<sup>[21]</sup>为

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

式中: $P_t$  为脉冲激光发射功率; $G_t$  为发射光学系统增益; $R_t$  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,本系统中  $R_t = R_r$ ; $\sigma$  为激光雷达等效散射截面; $D$  为接收光学系统的直径; $\eta_{\text{atm}}$  为大气透过率; $\eta_{\text{sys}}$  为系统光学通过率。

假设  $\Omega_t$  为激光光束的立体角, $A_t$  为光照面积,将  $G_t = 4\pi/\Omega_t$  和  $A_t = \Omega_t R_t^2$  代入(1)式,(1)式右边第一个因子即为脉冲激光发射表面照度,其空间分布服从高斯分布,则高斯分布光束照度<sup>[19]</sup>的表达式为

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

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

$$P_r(t) = \frac{P_0 D^2}{2\omega^2 R_r^2} \eta_{\text{atm}}^2 \eta_{\text{sys}} \iint \exp\left[-2\left(\frac{x^2 + y^2}{\omega^2}\right)\right] \exp\left[-\left(t - \frac{2R_r}{c} - \frac{2x \tan \psi}{c}\right)^2 / \tau^2\right] f_r(\psi) \cos \psi dx dy, \quad (3)$$

式中: $P_0$  为脉冲激光峰值功率; $\tau$  为激光输出脉冲宽度; $t$  为时间。对于本系统的 3 个平面目标,回波方程为

$$P_r(t) = \frac{P_0 D^2 \eta_{\text{atm}}^2 \eta_{\text{sys}} f_r(\psi_1) \cos \psi_1}{2\omega_1^2 R_{r1}^2} \int_{A_1}^{B_1} \exp\left(-2\frac{x^2}{\omega_1^2}\right) \exp\left[-\left(t - \frac{2R_{r1}}{c} - \frac{2x \tan \psi_1}{c}\right)^2 / \tau^2\right] dx \times \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \exp\left(-2\frac{y^2}{\omega_1^2}\right) dy + \frac{P_0 D^2 \eta_{\text{atm}}^2 \eta_{\text{sys}} f_r(\psi_2) \cos \psi_2}{2\omega_2^2 R_{r2}^2} \int_{A_2}^{B_2} \exp\left(-2\frac{x^2}{\omega_2^2}\right) \exp\left[-\left(t - \frac{2R_{r2}}{c} - \frac{2x \tan \psi_2}{c}\right)^2 / \tau^2\right] dx \times \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \exp\left(-2\frac{y^2}{\omega_2^2}\right) dy + \frac{P_0 D^2 \eta_{\text{atm}}^2 \eta_{\text{sys}} f_r(\psi_3) \cos \psi_3}{2\omega_3^2 R_{r3}^2} \int_{A_3}^{B_3} \exp\left(-2\frac{x^2}{\omega_3^2}\right) \exp\left[-\left(t - \frac{2R_{r3}}{c} - \frac{2x \tan \psi_3}{c}\right)^2 / \tau^2\right] dx \times \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \exp\left(-2\frac{y^2}{\omega_3^2}\right) dy$$

$$\int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \exp\left(-2\frac{y^2}{\omega_2^2}\right) dy + \frac{P_0 D^2 \eta_{\text{atm}}^2 \eta_{\text{sys}} f_r(\psi_3) \cos \psi_3}{2\omega_3^2 R_{r3}^2} \int_{A_3}^{B_3} \exp\left(-2\frac{x^2}{\omega_3^2}\right) \exp\left[-\left(t - \frac{2R_{r3}}{c} - \frac{2x \tan \psi_3}{c}\right)^2 / \tau^2\right] dx \times \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \exp\left(-2\frac{y^2}{\omega_3^2}\right) dy, \quad (4)$$

式中:  $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 、 $\omega_3$  分别为激光在  $R_{r1}$ 、 $R_{r2}$ 、 $R_{r3}$  距离上的光斑直径。

首先对  $y$  积分,  $\int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \exp\left(-2\frac{y^2}{\omega_1^2}\right) dy = \omega_1 \sqrt{\frac{\pi}{2}} \operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{2}L}{2\omega_1}\right)$ , 因为  $L$  远大于  $\omega_1$ , 因此

$$\int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \exp\left(-2\frac{y^2}{\omega_1^2}\right) dy = \omega_1 \sqrt{\frac{\pi}{2}}. \quad (5)$$

然后对  $x$  求积分, 可得

$$\int_A^B \exp\left(-2\frac{x^2}{\omega^2}\right) \exp\left[-\left(\frac{2x \tan \psi + 2R_r - ct}{c}\right)^2 / \tau^2\right] dx = \int_A^B \exp\left[-\frac{(2c^2\tau^2 + 4\omega^2 \tan^2 \psi)x^2 + 4\omega^2 \tan^2 \psi(2R_r - ct)^2 x + (2R_r - ct)^2 \omega^2}{c^2\tau^2\omega^2}\right] dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{a}} \exp\left(-\frac{\xi^2}{c^2\tau^2} + \frac{b}{4a}\right) \left\{ \operatorname{erf}\left[\sqrt{a}\left(B + \frac{b}{2a}\right)\right] - \operatorname{erf}\left[\sqrt{a}\left(A + \frac{b}{2a}\right)\right] \right\}, \quad (6)$$

式中:  $\xi = 2R_r - ct$ ;  $a = \frac{2c^2\tau^2 + 4\omega^2 \tan^2 \psi}{c^2\tau^2\omega^2}$ ;  $b = \frac{4\xi \tan \psi}{c^2\tau^2}$ 。则(4)式可表示为

$$P_r(t) = \frac{\pi P_0 D^2 \eta_{\text{atm}}^2 \eta_{\text{sys}} f_r(\psi_1) \cos \psi_1}{4\omega_1 R_{r1}^2 \sqrt{2a_1}} \exp\left(-\frac{\xi_1^2}{c^2\tau^2} + \frac{b_1^2}{4a_1}\right) \left\{ \operatorname{erf}\left[\sqrt{a_1}\left(B_1 + \frac{b_1}{2a_1}\right)\right] - \operatorname{erf}\left[\sqrt{a_1}\left(A_1 + \frac{b_1}{2a_1}\right)\right] \right\} + \frac{\pi P_0 D^2 \eta_{\text{atm}}^2 \eta_{\text{sys}} f_r(\psi_2) \cos \psi_2}{4\omega_2 R_{r2}^2 \sqrt{2a_2}} \exp\left(-\frac{\xi_2^2}{c^2\tau^2} + \frac{b_2^2}{4a_2}\right) \left\{ \operatorname{erf}\left[\sqrt{a_1}\left(B_2 + \frac{b_2}{2a_2}\right)\right] - \operatorname{erf}\left[\sqrt{a_1}\left(A_2 + \frac{b_2}{2a_2}\right)\right] \right\} + \frac{\pi P_0 D^2 \eta_{\text{atm}}^2 \eta_{\text{sys}} f_r(\psi_3) \cos \psi_3}{4\omega_3 R_{r3}^2 \sqrt{2a_3}} \exp\left(-\frac{\xi_3^2}{c^2\tau^2} + \frac{b_3^2}{4a_3}\right) \left\{ \operatorname{erf}\left[\sqrt{a_1}\left(B_3 + \frac{b_3}{2a_3}\right)\right] - \operatorname{erf}\left[\sqrt{a_1}\left(A_3 + \frac{b_3}{2a_3}\right)\right] \right\}, \quad (7)$$

式中:  $\xi_1 = 2R_{r1} - ct$ ,  $a_1 = \frac{2c^2\tau^2 + 4\omega_1^2 \tan^2 \psi_1}{c^2\tau^2\omega_1^2}$ ,  $b_1 = \frac{4\xi_1 \tan \psi_1}{c^2\tau^2}$ ;  $\xi_2 = 2R_{r2} - ct$ ,  $a_2 = \frac{2c^2\tau^2 + 4\omega_2^2 \tan^2 \psi_2}{c^2\tau^2\omega_2^2}$ ,  $b_2 = \frac{4\xi_2 \tan \psi_2}{c^2\tau^2}$ ;  $\xi_3 = 2R_{r3} - ct$ ,  $a_3 = \frac{2c^2\tau^2 + 4\omega_3^2 \tan^2 \psi_3}{c^2\tau^2\omega_3^2}$ ,  $b_3 = \frac{4\xi_3 \tan \psi_3}{c^2\tau^2}$ 。

以此类推, 对更多目标回波方程进行拓展, 可得到  $N$  个目标的回波方程

$$P_r(t) = \sum_{n=1}^N \frac{\pi P_0 D^2 \eta_{\text{atm}}^2 \eta_{\text{sys}} f_r(\psi_n) \cos \psi_n}{4\omega_n R_{rn}^2 \sqrt{2a_n}} \exp\left(-\frac{\xi_n^2}{c^2\tau^2} + \frac{b_n^2}{4a_n}\right) \times \left\{ \operatorname{erf}\left[\sqrt{a_n}\left(B_n + \frac{b_n}{2a_n}\right)\right] - \operatorname{erf}\left[\sqrt{a_n}\left(A_n + \frac{b_n}{2a_n}\right)\right] \right\}, \quad (8)$$

式中:  $\xi_n = 2R_{rn} - ct$ ;  $a_n = \frac{2c^2\tau^2 + 4\omega_n^2 \tan^2 \psi_n}{c^2\tau^2\omega_n^2}$ ;  $b_n =$

$$\frac{4\xi_n \tan \psi_n}{c^2\tau^2}。$$

### 3 回波功率仿真

从理论公式来看, 影响回波功率的因素主要有目标距离、光照面积和激光入射角度, 本文重点研究激光光照面积和入射角度对回波方程的影响。假设仿真参数如下:  $D=0.02$  m,  $P_0=500$  W,  $\eta_{\text{sys}}=0.64$ ,

$R_{r1}=10$  m,  $R_{r2}=11$  m,  $R_{r3}=12$  m,  $\tau=6.51$  ns,  $\omega_1=\omega_2=\omega_3=2$  mm,  $f_r(\psi_1)=f_r(\psi_2)=f_r(\psi_3)=0.3151$ 。

#### 3.1 激光光照面积的影响

从理论公式来看, 激光光斑内的能量占绝大多数, 因此当  $|B_n|$  和  $|A_n|$  大于光斑半径时, 可以令  $|B_n|$  和  $|A_n|$  为 1 mm, 令  $\Psi_1=\Psi_2=\Psi_3=0$ , 改变  $B_n$  和  $A_n$  完成回波功率方程的仿真。首先进行双目标双波形仿真, 结果如图 2 所示。当  $A_1=-1$ ,  $B_2=1$ , 然后分别令  $B_1(A_2)$  分别为  $-0.00075$ 、

-0.00050、-0.00025、0、0.00025、0.00050、0.00075, 仿真结果如图 2 所示。由图 2 可知, 随着  $A_2$  的增大, 激光光斑在目标 1 上占有的区域增大, 目标 1 的回波峰值逐渐增大, 目标 2 的回波峰值逐渐减小, 但整体脉宽未有明显变化。

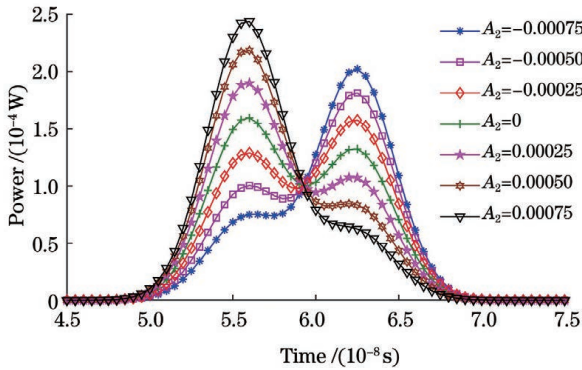


图 2 双目标回波仿真结果

Fig. 2 Echo simulation results of double targets

然后进行三目标三波形仿真, 令  $A_1 = -1$ ,  $B_3 = 1$ , 并改变  $B_1(A_2)$  和  $B_2(A_3)$  的值, 分别令  $B_1(A_2)$  和  $B_2(A_3)$  等于 -0.00075、-0.00050、-0.00025 和 0.00075、0.00050、0.00025, 仿真结果如图 3 所示。随着  $A_2$  和  $A_3$  绝对值减小, 激光光斑

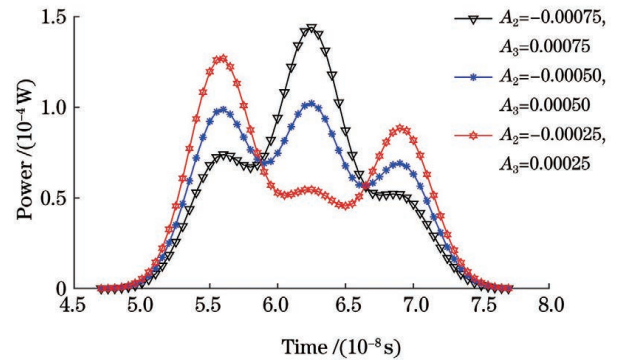


图 3 三目标回波仿真结果

Fig. 3 Echo simulation results of three targets

在目标 1 和目标 3 上占有的区域增大, 目标 1 和目标 3 的回波峰值逐渐增大, 目标 2 的回波峰值逐渐减小。总体来看, 三波形的脉宽变化较小。

### 3.2 激光入射角度的影响

令  $A_1 = -1$ ,  $B_3 = 1$ ,  $B_1(A_2) = -0.0005$ ,  $B_2(A_3) = 0.0005$ , 分别改变  $\psi_1$ 、 $\psi_2$ 、 $\psi_3$ , 观察其波形变化, 仿真结果如图 4 所示。随着 3 个目标的激光入射角增大, 相应的回波峰值逐渐减小。此外, 当入射角增大时, 相应波形的峰值减小速度越来越快。

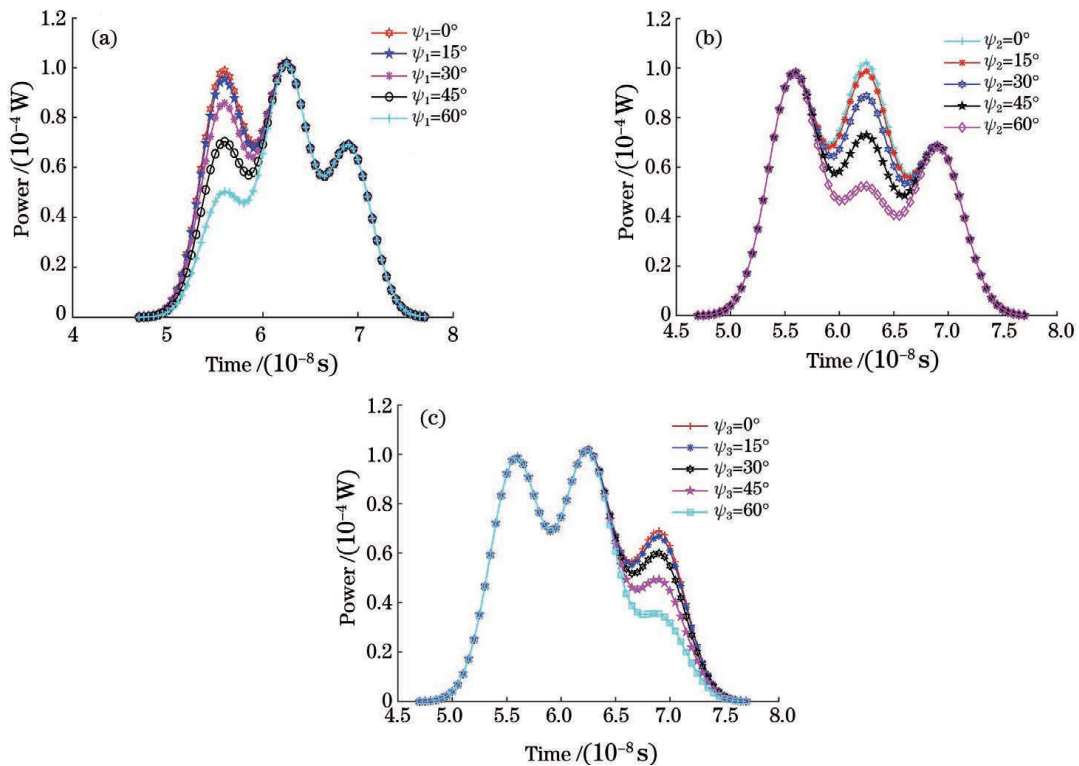


图 4 角度变化时三波形回波仿真结果。(a)  $\psi_1$ ; (b)  $\psi_2$ ; (c)  $\psi_3$

Fig. 4 Echo simulation results of three waveforms with different angles. (a)  $\psi_1$ ; (b)  $\psi_2$ ; (c)  $\psi_3$



## 4 实验验证

### 4.1 实验平台

设计多目标回波实验装置,如图 5 所示。脉冲激光器产生波长为 532 nm 的蓝绿激光,激光器型号为 AO-N-532nm-30 $\mu$ J-19091464。激光器参数如下:重复频率为 10 kHz,平均功率为 314.3 mW,平均功率稳定性为 0.697%,脉冲宽度为 6.51 ns,峰值功率 > 3 kW,光束直径  $\omega_0 = 2$  mm,光束发散角(全角) $\varphi < 1.5$  mrad,因此,光斑直径  $\omega_n = \omega_0 (1 + 2R_m \tan \varphi)$ 。定制 3 块标准漫反射板,在每块标准漫反射板下方安装水平滑动平台和旋转平台,通过水平滑动平台可以调节激光照射目标的数量,以及

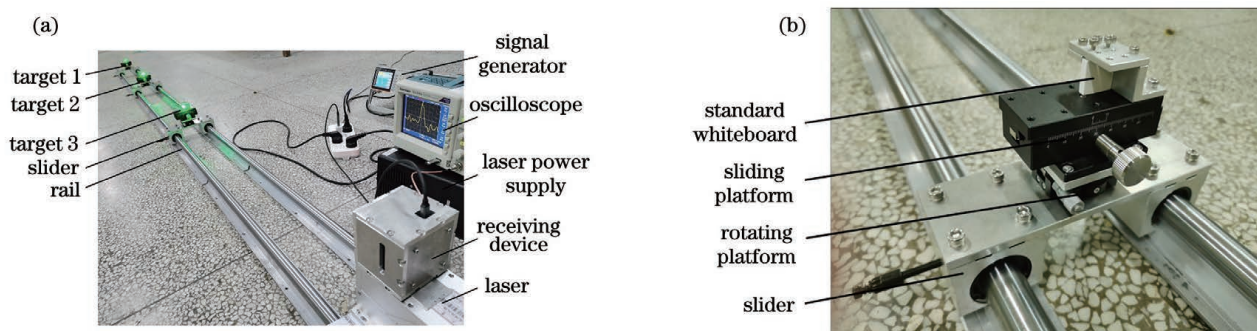


图 5 多目标探测实验平台。(a)实验场景;(b)组合平台

Fig. 5 Experimental platform of multi-target detection. (a) Experimental scene; (b) combined platform

### 4.2 回波功率方程归一化

理论上分别测量距离、角度和激光照射区域对回波功率的影响,但由于激光光斑直径较小,过长的导轨会放大微小的误差,导致实验数据不准确。为了提高实验的精确性,导轨不宜过长。当采集多目标回波信号时,如果相邻两个目标距离过短,波形提取误差将导致实验结果和仿真结果相差较大,因此导轨长度也不能过短。在本实验中,滑动导轨全长 4 m,相邻两目标间隔为 1 m 左右。另外,如图 6 所

每个被激光打中的目标的激光覆盖区域。旋转平台用于调节激光射向漫反射板的入射角,将每块漫反射板的旋转平台安装在导轨滑块上,滑块可以在下方的导轨上滑动,从而改变激光器和漫反射板的距离;每个滑块侧边有螺纹孔可以插入锁紧扳手进行锁死,激光经过标准漫反射板的反射后由接收装置接收,分别获取单波形、双波形、三波形的回波,并引入峰值相对误差  $\delta$ 。

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^k |A_i - B_i|}{A_i \cdot k}, \quad (9)$$

式中: $k$  为回波目标的个数; $A_i$  为第  $i$  个回波分量的理论峰值; $B_i$  为第  $i$  个回波分量的实验峰值。

示,由于 3 块目标板与激光器的距离比较短,3 块目标板相对接收模块的视场角不同,因此本实验无法验证距离对回波功率的影响,主要验证角度和激光照射区域对回波功率的影响。在距离上取 3 个固定值,采用深达威激光测距仪,测量精度为  $\pm 2$  mm,  $R_{r1} = 1.084$  m,  $R_{r2} = 2.126$  m,  $R_{r3} = 3.166$  m。首先在多目标检测前用激光器完全照射在单个目标上,结果如图 7 所示,并取极大值和回波方程进行拟合;然后,依次进行仿真并通过实验验证回波功率方程。



图 6 视场角对回波功率的影响

Fig. 6 Influence of field of view on echo power

### 4.3 两个目标的双波形实验

将激光照射到目标 1 和目标 3 时,双波形实验结果如图 8 所示。图 9 所示为目标 2 和目标 3 的双波形实验结果。从图 7 所示的单目标回波波形可以看出,由于接收电路存在电压过冲现象,在回波波形右侧会出现负数幅值,因此在多波形实验中,位于后

侧的目标回波一定会受到影响,图 8 和图 9 所示结果印证了这个假设。目标 1 和目标 3 的距离较远,对应的波形峰值横坐标之差大于单波形脉宽,因此实验和仿真波形幅值之差较小,峰值相对误差  $\delta$  分别为 2.713%、2.717%、8.328%,而目标 2 和目标 3 的距离较近,对应波形峰值横坐标之差小于单波形

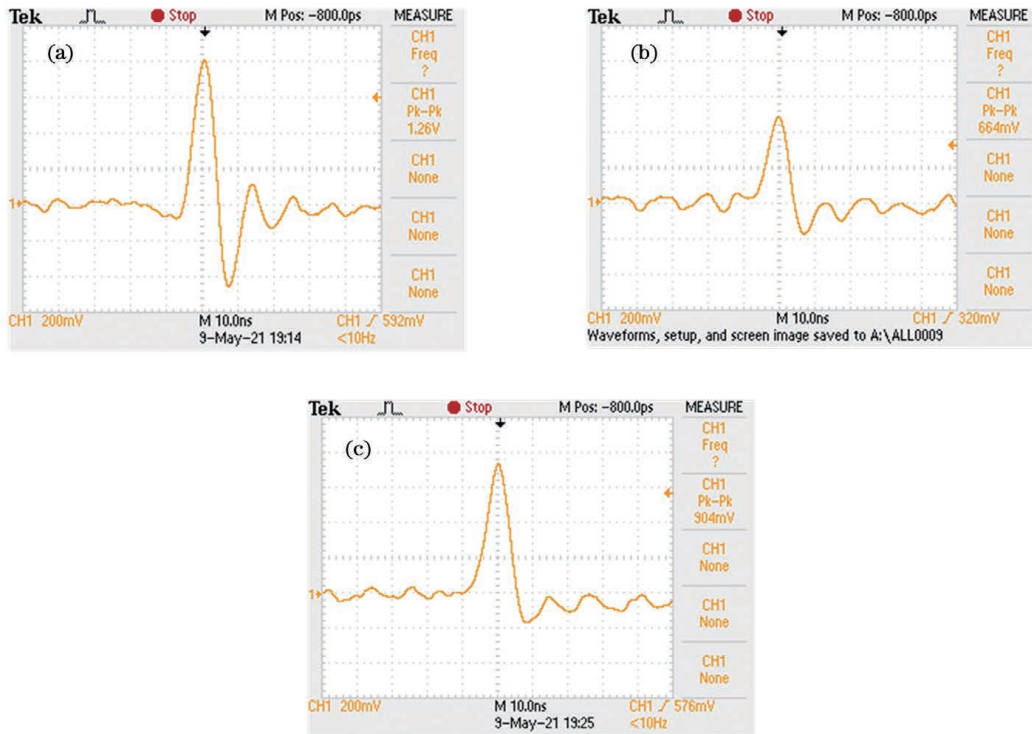


图 7 单目标回波波形。(a)目标 1;(b)目标 2;(c)目标 3

Fig. 7 Single target echo waveform. (a) Target 1; (b) target 2; (c) target 3

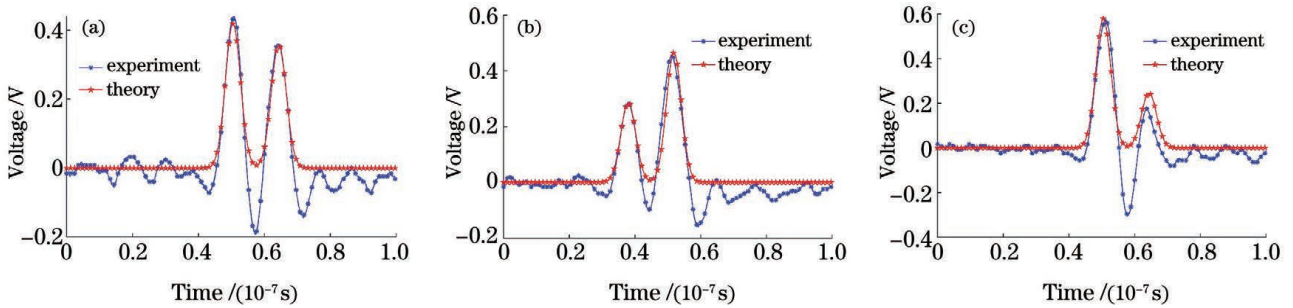


图 8 目标 1 和目标 3 的双波形实验结果。(a)  $A_1 = -1, B_1(A_3) = 0, B_3 = 1$ ; (b)  $A_1 = -1, B_1(A_3) = -1/3, B_3 = 1$ ;  
(c)  $A_1 = -1, B_1(A_3) = 1/3, B_3 = 1$

Fig. 8 Double waveform experiment results of target 1 and target 3. (a)  $A_1 = -1, B_1(A_3) = 0, B_3 = 1$ ;

(b)  $A_1 = -1, B_1(A_3) = -1/3, B_3 = 1$ ; (c)  $A_1 = -1, B_1(A_3) = 1/3, B_3 = 1$

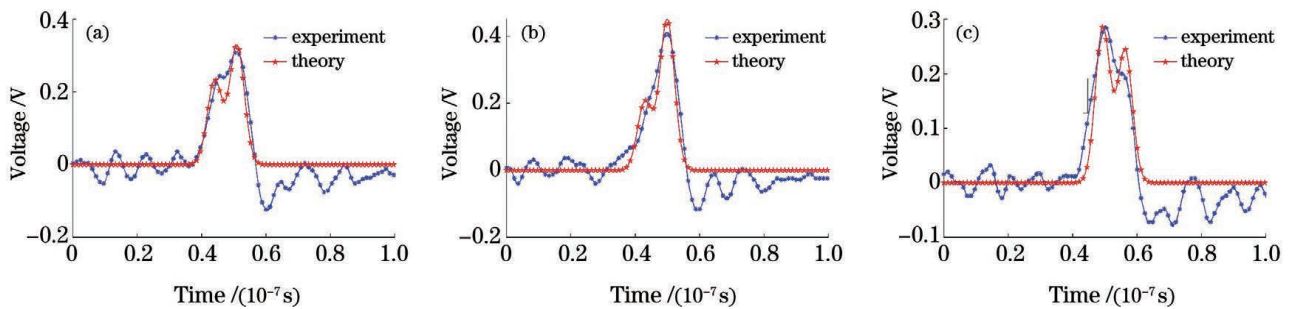


图 9 目标 2 和目标 3 的双波形实验结果。(a)  $A_2 = -1, B_2(A_3) = 0, B_3 = 1$ ; (b)  $A_2 = -1, B_2(A_3) = -1/3, B_3 = 1$ ;  
(c)  $A_2 = -1, B_2(A_3) = 1/3, B_3 = 1$

Fig. 9 Double waveform experiment results of target 2 and target 3. (a)  $A_2 = -1, B_2(A_3) = 0, B_3 = 1$ ;

(b)  $A_2 = -1, B_2(A_3) = -1/3, B_3 = 1$ ; (c)  $A_2 = -1, B_2(A_3) = 1/3, B_3 = 1$

脉宽,两个高斯回波波形叠加,峰值相对误差  $\delta$  分别为 6.528%、11.962%、13.528%。

当激光的一半光斑照射目标 1,一半照射目标 3,目标 3 的角度分别为  $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$  时的仿真和实验结果如图 10 所示。当激光的 1/3 光斑照射目标 1,2/3 光斑照射目标 3,即在图 8(b) 的情况下,目标 3 的角度分别为  $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$  时的仿

真和实验结果如图 11 所示。当激光的 1/3 光斑照射目标 2,2/3 光斑照射目标 3,即在图 9(b) 的情况下,目标 3 的角度分别为  $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$  时的仿真和实验结果如图 12 所示。可以看到,图 10、图 11 中实验和仿真得到的回波幅值之差较小,图 12 中由于两目标距离近,两回波叠在一起,实验和仿真得到的波形幅值相差较大。

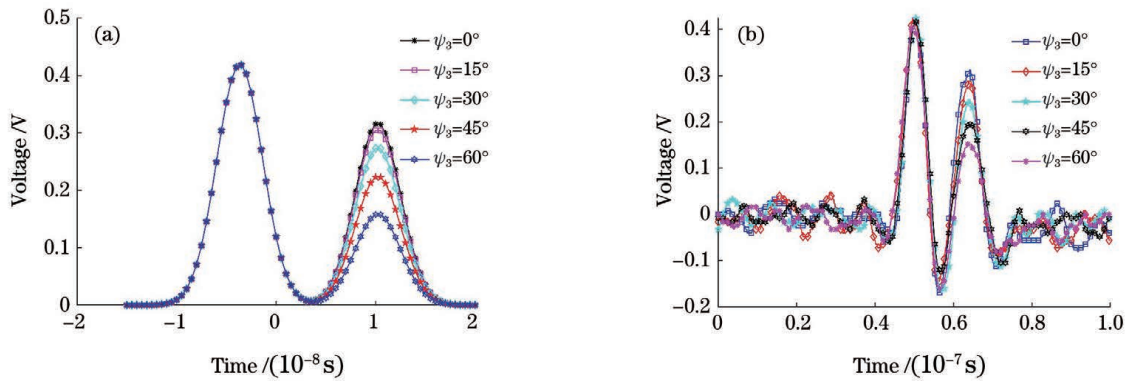


图 10 激光照射目标 1(1/2)和目标 3(1/2)时,改变目标 3 入射角得到的波形。(a)仿真结果;(b)实验结果  
Fig. 10 Waveforms with different incident angles of target 3 when laser irradiates target 1 (1/2) and target 3 (1/2).  
(a) Simulation results; (b) experimental results

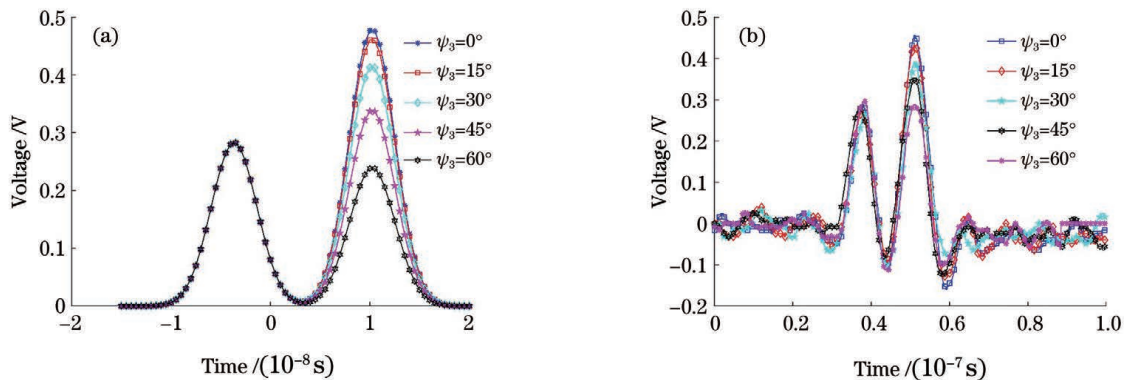


图 11 激光照射目标 1(1/3)和目标 3(2/3)时,改变目标 3 入射角得到的波形。(a)仿真结果;(b)实验结果  
Fig. 11 Waveforms with different incident angles of target 3 when laser irradiates target 1 (1/3) and target 3 (2/3).  
(a) Simulation results; (b) experimental results

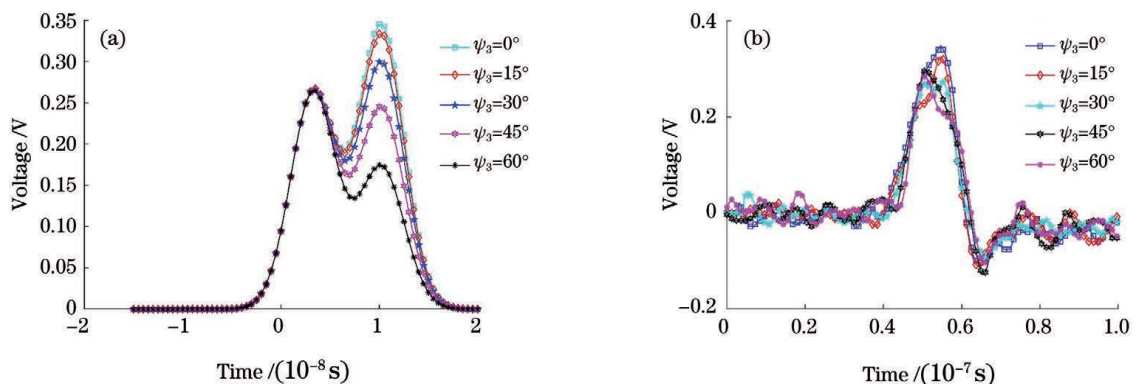


图 12 激光照射目标 2(1/3)和目标 3(2/3)时,改变目标 3 入射角得到的波形。(a)仿真结果;(b)实验结果  
Fig. 12 Waveforms with different incident angles of target 3 when laser irradiates target 2 (1/3) and target 3 (2/3).  
(a) Simulation results; (b) experimental results



### 4.4 三波形实验

图 13 所示为激光同时照射目标 1、目标 2 和目标 3 时实验与仿真得到的回波波形,其中  $A_1 = -1$ ,  $B_3 = 1$ ,  $B_1(A_2) = -0.0005$ ,  $B_2(A_3) = 0.0005$ 。对比仿真和实验波形可得,在 3 个回波峰值中,实验得到的第一个回波峰值和仿真得到的第一个回波峰值很接近,实验得到的第二个和第三个回波峰值均小于仿真得到的相应回波峰值,这是因为接收电路过冲现象产生回波负值,  $\delta$  为 13.728%。

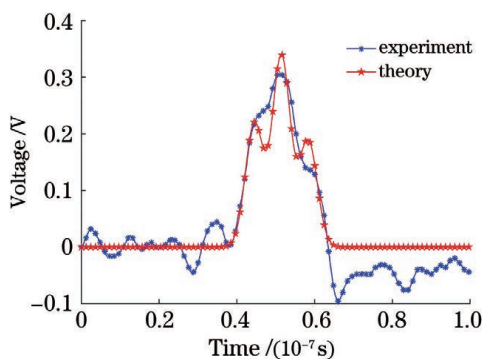


图 13 激光同时照射 3 个目标时得到的波形

Fig. 13 Echo waveforms when laser irradiates three targets at the same time

### 4.5 针对电压过冲现象的实验

针对接收电路由于电压过冲现象产生的多目

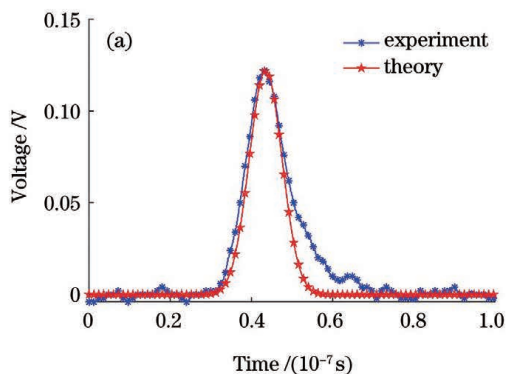


图 15 两个目标的距离为 1.5 m 时单波形回波归一化结果。(a) 目标 1; (b) 目标 2

Fig. 15 Normalization results of single echo waveform when the distance between two targets is 1.5 m. (a) Target 1; (b) target 2

目标 1 和目标 2 的距离分别为 1.5 m 和 1 m 时不同光照面积下的回波结果分别如图 17 和图 18 所示。当目标 1 和目标 2 的距离为 1.5 m 时,  $\delta$  的计算结果分别为 6.645%、3.338%、5.556%; 目标 1 和目标 2 的距离为 1 m 时,  $\delta$  的计算结果分别为 4.444%、5.636%、6.182%。将图 17、图 18 与图 9 进行比较,发现采用新的接收电路后,由于没有电压过冲现象,近距离下仿真和实验得到的波形一致。因此,本实验不仅验证了所推导理论公式的正确性,

标近距离实验结果与理论仿真结果差别较大的情况,更换接收电路进行了目标 1 和目标 2 近距离波形叠加的实验,其接收电路如图 14 所示,两次实验中目标 1 和目标 2 的距离分别为 1.5 m 和 1 m,即  $R_{r1} = 1.6$  m、 $R_{r2} = 3.1$  m 和  $R_{r1} = 1$  m、 $R_{r2} = 2$  m。由于接收电路的展宽效应以及视场角的影响,首先将激光完全照射在单个目标上,通过改变回波方程的参数对理论和实验得到的单目标回波进行归一化,图 15 所示为两个目标的距离为 1.5 m 时单波形回波归一化结果,图 16 所示为两个目标的距离为 1 m 时单波形回波归一化结果。

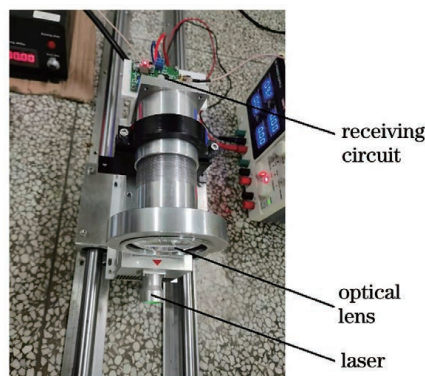
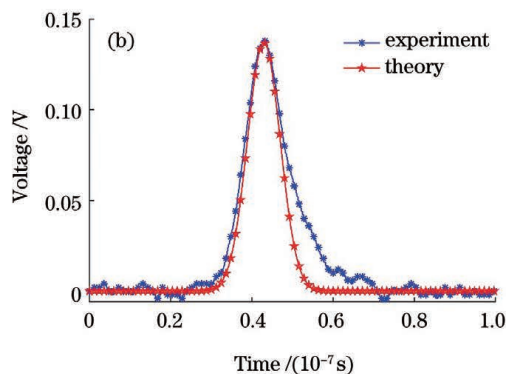


图 14 无电压过冲现象的接收电路

Fig. 14 Receiving circuit without voltage overshoot



还通过不同探测器的比较证明了电压过冲现象对回波信号的影响。

## 5 结 论

基于传统激光回波理论,推导了多目标激光回波功率方程并进行了仿真,分析了回波方程中目标激光照射区域和入射角度对波形的影响;搭建了多目标探测实验平台,验证了回波方程的准确性,并通过不同接收电路的实验分析了电路过



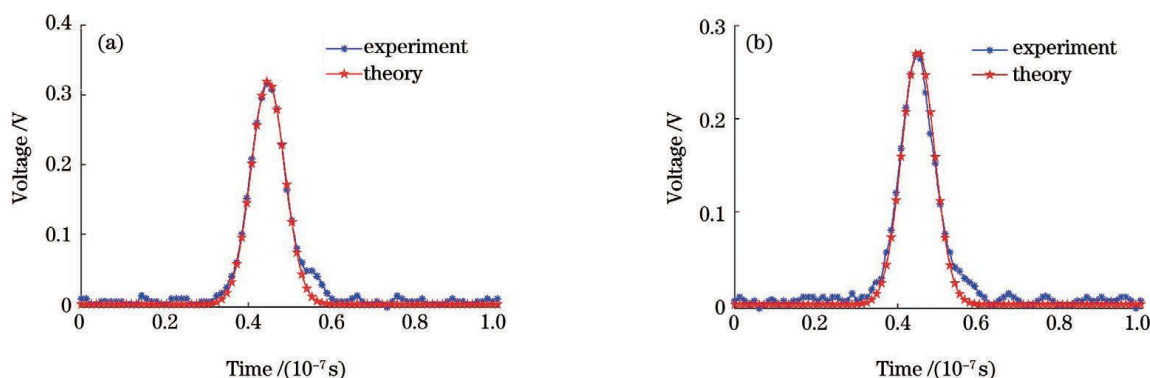


图 16 两个目标的距离为 1 m 时单波形回波归一化结果。(a) 目标 1; (b) 目标 2

Fig. 16 Normalization results of single echo waveform when the distance between two targets is 1 m. (a) Target 1; (b) target 2

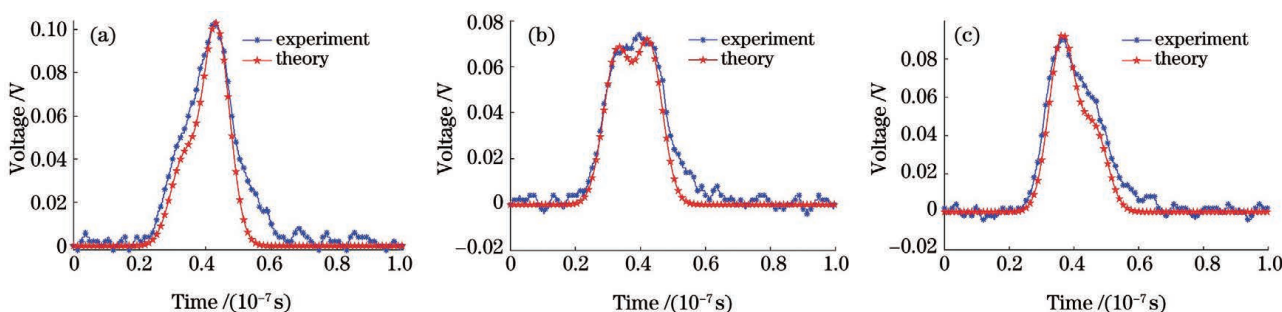


图 17 两个目标的距离为 1.5 m 的回波结果。(a)  $A_1 = -1, B_1(A_2) = -1/3, B_2 = 1$ ; (b)  $A_1 = -1, B_1(A_2) = 0, B_2 = 1$ ; (c)  $A_1 = -1, B_1(A_2) = 1/3, B_2 = 1$

Fig. 17 Echo results with distance of 1.5 m between two targets. (a)  $A_1 = -1, B_1(A_2) = -1/3, B_2 = 1$ ; (b)  $A_1 = -1, B_1(A_2) = 0, B_2 = 1$ ; (c)  $A_1 = -1, B_1(A_2) = 1/3, B_2 = 1$

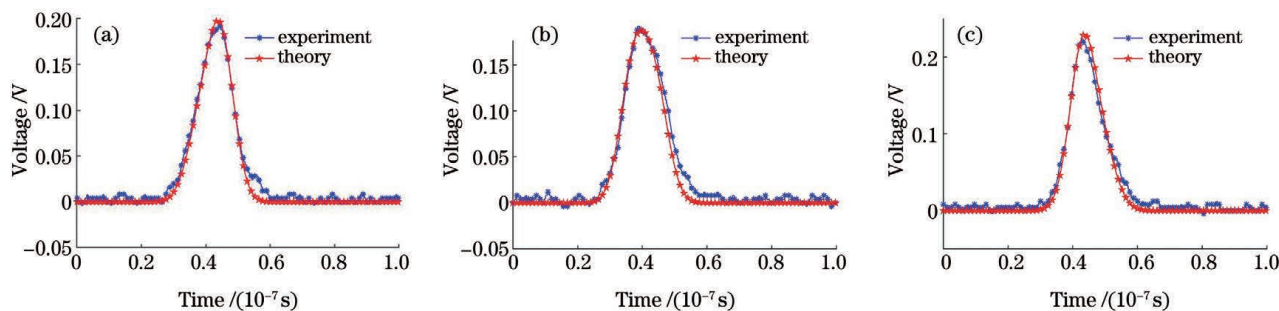


图 18 两个目标的距离为 1 m 的回波结果。(a)  $A_1 = -1, B_1(A_2) = -1/3, B_2 = 1$ ; (b)  $A_1 = -1, B_1(A_2) = 0, B_2 = 1$ ; (c)  $A_1 = -1, B_1(A_2) = 1/3, B_2 = 1$

Fig. 18 Echo results with distance of 1 m between two targets. (a)  $A_1 = -1, B_1(A_2) = -1/3, B_2 = 1$ ; (b)  $A_1 = -1, B_1(A_2) = 0, B_2 = 1$ ; (c)  $A_1 = -1, B_1(A_2) = 1/3, B_2 = 1$

冲对多波形回波的影响。根据仿真和实验结果可得以下结论：

1) 当多个平面目标被探测时,激光照射面积和目标倾斜角度会对回波产生影响,且所有目标具有相同的回波特性:目标被激光照射区域越大,波形幅值越大;目标倾斜角度越大,波形幅值越小。

2) 当接收电路回波产生过冲现象时,峰值相对误差超过 10%,理论回波波形和实验波形的一致性

较差;采用新接收电路消除电压过冲现象后,实验相对误差降低,峰值相对误差可控制在 6.7% 以内,理论回波波形和实验波形的一致性较好。电压过冲现象会影响实验分析精度,因此,改善接收电路过冲,可以提高多平面目标脉冲激光回波拟合精度。

3) 所推导的多平面目标脉冲激光雷达回波方程,可为脉冲激光雷达全波形分解和回波信息反演提供理论参考。

## 参 考 文 献

- [1] Dong Z W, Yan Y J, Jiang Y G, et al. Classification technique of echo signal from streak-tube LiDAR based on neural network [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(S2): 124-130.  
董志伟, 闫勇吉, 姜玉刚, 等. 基于神经网络的条纹管激光雷达回波信号分类(英文)[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(S2): 124-130.
- [2] Du C. Research of signal detection and data processing for lidar echo[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.  
杜超. 激光雷达回波信号探测及数据处理技术研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
- [3] Chen P, Pan D L. Ocean optical profiling in South China sea using airborne LiDAR[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(15): 1826.
- [4] Schmidt A, Rottensteiner F, Sörgel U. Water-land-classification in coastal areas with full waveform lidar data[J]. *Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation*, 2013, 2013(2): 71-81.
- [5] Lu X C, Zhang X X. Study on points cloud filtering based on reflectance intensity and range[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2009, 34(6): 196-197.  
路兴昌, 张学霞. 基于回波强度和采样点距离的点云滤波研究[J]. *测绘科学*, 2009, 34(6): 196-197.
- [6] Jin X, Song X Q, Liu J X, et al. Estimation of turbulence parameters in atmospheric boundary layer based on Doppler lidar[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(11): 1110001.  
靳翔, 宋小全, 刘佳鑫, 等. 基于多普勒激光雷达的边界层内湍流参数估算[J]. *中国激光*, 2021, 48(11): 1110001.
- [7] Tan K, Cheng X J. TLS laser intensity correction based on polynomial model[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(3): 0314002.  
谭凯, 程效军. 基于多项式模型的 TLS 激光强度值改正[J]. *中国激光*, 2015, 42(3): 0314002.
- [8] Yan W Y, Shaker A, El-Ashrawy N. Urban land cover classification using airborne LiDAR data: a review[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 158: 295-310.
- [9] Kou T, Wang H Y, Wang F, 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.
- [10] He D, Song S L, Wang B H, et al. Multispectral LiDAR data intensity calibration and point cloud color optimization[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(11): 1110004.  
何东, 宋沙磊, 王滨辉, 等. 多光谱激光雷达数据强度校正及点云色彩优化[J]. *中国激光*, 2021, 48(11): 1110004.
- [11] Kaasalainen S, Jaakkola A, Kaasalainen M, et al. Analysis of incidence angle and distance effects on terrestrial laser scanner intensity: search for correction methods [J]. *Remote Sensing*, 2011, 3(10): 2207-2221.
- [12] Fang W, Huang X F, Zhang F, et al. Intensity correction of terrestrial laser scanning data by estimating laser transmission function [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(2): 942-951.
- [13] Cheng X L, Cheng X J, Li Q, et al. Laser intensity correction of terrestrial 3D laser scanning based on sectional polynomial model[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(11): 112802.  
程小龙, 程效军, 李泉, 等. 基于分段多项式模型的地面三维激光扫描激光强度改正[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(11): 112802.
- [14] Shen F H, Zhuang P, Wang B X, et al. Research on retrieval method of low-altitude wind field for Rayleigh-Mie scattering Doppler lidar [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(11): 1110005.  
沈法华, 庄鹏, 王邦新, 等. 瑞利-米散射多普勒激光雷达低层风场反演方法研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(11): 1110005.
- [15] Du S, Li X H, Liu Z Y, et al. Radiometric characteristics of the intensity data of laser scanner [J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 36(3): 392-400.  
杜松, 李晓辉, 刘照言, 等. 激光雷达回波强度数据辐射特性分析[J]. *中国科学院大学学报*, 2019, 36(3): 392-400.
- [16] Tan K, Cheng X J, Zhang J X. Correction for incidence angle and distance effects on TLS intensity data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(2): 223-228.  
谭凯, 程效军, 张吉星. TLS 强度数据的入射角及距离效应改正方法[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2017, 42(2): 223-228.
- [17] Steinvall O. Effects of target shape and reflection on laser radar cross sections[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(24): 4381-4391.
- [18] Dai Y, Cheng X W, Li F Q, et al. Study on the relationship of return power with different reflection model of object in laser ranging [J]. *Laser Journal*, 2007, 28(4): 83-84.  
戴阳, 程学武, 李发泉, 等. 目标反射特性与激光测

- 距回波强度关系的研究[J]. 激光杂志, 2007, 28(4): 83-84.
- [19] Grönwall C A, Steinvall O K, Gustafsson F, et al. Influence of laser radar sensor parameters on range-measurement and shape-fitting uncertainties[J]. Optical Engineering, 2007, 46(10): 106201.
- [20] 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.
- [21] Jelalian A V. Laser radar systems [M]. Boston: Artech House, 1992.

## Echo Characteristics of Multiplane Targets Detection Using Pulsed Laser

Wang Jiali<sup>1,2</sup>, Xu Xiaobin<sup>1,2,3,4\*</sup>, Wu Jialin<sup>1,2</sup>, Tan Zhiying<sup>1,2</sup>, Luo Minzhou<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> College of Mechanical & Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou, Jiangsu 213022, China;

<sup>2</sup> Jiangsu Key Laboratory of Special Robot Technology, Hohai University, Changzhou, Jiangsu 213022, China;

<sup>3</sup> College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China;

<sup>4</sup> Changzhou Changgong Electronic Technology Co., Ltd., Changzhou, Jiangsu 213001, China

### Abstract

**Objective** Lidar is an active detection tool for detecting the distance and physical information of a target through an echo signal after laser irradiation. There are several researches on single-point lidar echo at home and abroad. When compared with single-point lidar echo, full-waveform lidar echo can carry more echo information. However, there are few studies on the echo equation of the full-waveform lidar. In this study, based on the traditional lidar equation, we derive the general formula of the multitarget lidar echo equation and analyze the effects of laser irradiation area and incident angle on the echo through simulation, which is verified by the proposed experiment platform.

**Methods** The goal of this study is to determine and validate the effect of laser irradiation area and incident angle on the echo of the full-waveform lidar. First, a Lambert body with a reflectivity of 99% was used as the target. Then, a horizontal sliding platform and a rotating platform were combined to control the horizontal and rotating motions of the target. The combined platform, laser, and receiving device were installed on the guide rail to obtain echoes for different irradiation areas and incident angles (Fig. 5). Owing to the problem of field of view angle (Fig. 6), we first collected the fixed distance to fully irradiate each target using laser to obtain a single objective function echo. Then, the peak value of the echo waveform was fitted with the simulated single target echo peak value. The theoretical echo waveform was then compared with the experimental echo waveform after a series of echoes were obtained through moving and rotating targets. To demonstrate the correctness of the theoretical formula, the relative error was calculated by subtracting the theoretical echo's peak value from that of the experimental echo.

**Results and Discussions** The simulation results show that the larger the laser-irradiated area of the target, the greater the waveform amplitude (Figs. 2 and 3), and the larger the tilt angle of the target, the smaller the waveform amplitude (Fig. 4). When the abscissa difference between waveform peaks exceeds the single waveform echo pulse width, the average relative error is 4.586% (Figs. 8, 10, and 11). When the abscissa difference between waveform peaks is less than the single waveform echo pulse width, because of the voltage overshoot in the receiving circuit, the average relative error is 10.673% (Figs. 9, 12, and 13). After removing the voltage overshoot using a new receiving circuit, the average relative error is 5.307% (Figs. 15–18).

**Conclusions** Based on the traditional laser echo theory, the multitarget laser echo power equation is deduced and simulated and the effects of target laser irradiation area and incident angle on the waveform echo are examined. A multitarget detection experimental platform is built to validate the accuracy of the echo equation, and the effect of circuit overshoot on multiwaveform research is verified through experiments using various receiving circuits, which provide a calculation model for full-waveform decomposition and inversion. Following are the conclusions that can be drawn from the simulation and experiment. The target irradiation area is directly proportional and the laser incidence angle is inversely proportional to the echo peak. For the receiving circuit with voltage overshoot, the experimental results show that when the distance between multiple targets is large, the abscissa difference of the waveform peak



in the echo waveform is greater than that of the single waveform pulse width and the average experimental relative error is less than 5%. When the distance between multiple targets is less, the abscissa difference of the waveform peak in the echo waveform is less than that of the single waveform pulse width, the experimental relative error increases, and the average value is more than 10%. After using the new receiving circuit to eliminate the voltage overshoot, the experimental relative error is reduced and the average value is less than 6%. It is demonstrated that improving the receiving circuit's overshoot or fitting overshoot can improve the accuracy of full-waveform echo decomposition.

**Key words** measurement; lidar; full waveform; multi targets; echo characteristics