

激光近程探测中目标表面的散射特性

张祥金, 沈娜, 胡鑫, 宋健

(南京理工大学机械工程学院, 江苏南京, 210094)

摘要: 在激光引信中, 脉冲激光对目标的探测与识别是激光引信近程探测技术中的一个关键技术点, 而目标的表面反射特性对探测的影响是激光近程探测高效毁伤与精确打击目标的主要研究关键。目标的表面粗糙度以及附着物对激光回波信号的强弱影响较大, 因此, 需对激光近程探测过程中不同粗糙度目标表面所表现的反射特性进行研究。首先通过仿真得到回波信号模型, 再进行不同粗糙度表面回波功率实验对仿真结果进行验证。实验选用不同表面粗糙度的靶板, 并采用了改变角度、改变距离并同时改变角度和距离的模式来观测得到的电压曲线, 获得最终结果。

关键词: 激光回波; 粗糙度; 近程探测

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0706003

Scattering properties of target surface in the laser short-range detection

Zhang Xiangjin, Shen Na, Hu Xin, Song Jian

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In laser fuze, target detection and recognition by pulse laser is a key technical point in laser fuze short-range detection technology, and the influence of the target's surface scattering properties on detection is a major research key in efficient damage and precise strike on targets through laser short-range detection. The target's surface roughness and the attachment largely influence the strength of laser echo signal. Therefore, it is necessary to study the scattering properties shown by target surfaces with different roughness during laser short-range detection. Firstly, echo signal model was obtained through simulation, and then echo power experiment on surfaces with different roughness was carried out to verify the simulation results. In the experiment, target plates with different surface roughness were used, and methods such as changing the angle, changing the distance, etc., were adopted to observe the voltage curve, thereby obtaining the final result.

Key words: laser echo; roughness; short-range detection

收稿日期: 2016-11-09; 修订日期: 2016-12-12

基金项目: 武器装备预研基金(9140c300106150c30001); 中央高校基本科研业务费专项资金(30915011334)

作者简介: 张祥金(1970-), 男, 副教授, 博士, 主要从事声、激光、红外等探测与识别技术方面的研究。Email: z_x_j888@163.com

0 引言

武器装备的使用价值体现在其末端毁伤的效果上,现代引信是保证末端毁伤效应正常工作的关键。引信是综合作战环境、目标及网络信息等因素,按照预定策略引发后续战斗部作用,精确判断攻击距离及目标,同时可以给弹体其他部分发送指令,最终达到最佳毁伤效果等作战意图的中控系统^[1]。激光近炸引信是随着激光技术的发展而出现的一种新型的近炸引信,通常为主动式激光近炸引信,主要特点是体积小、质量轻、可靠度高,且控制炸点精度高、抗干扰能力强^[2]。由于激光发射的束散角小,形成的信号很难被敌方截获;旁瓣小,接收机的视场有限,人为干扰信号困难;激光器峰值功率大,相位统一,探测距离远;工作于光频段,波长极短,距离分辨率极高,对地、海杂波的干扰抵抗能力较强^[3]。激光近程探测的探测距离一般限制在 10 km 左右,激光光束能量的近地低空大气衰减、目标表面吸波材料的喷涂均对其造成影响。但在现代化的武器作战理念下,势必将告别白刃相见的战斗模式,增大激光作用距离,增加作战半径具有很高的战略价值。引信系统本身的体积和重量往往限制其工作能效,将激光近炸引信小型化,不仅提升制导武器的灵活机动性,更可增加其他部分的作战指标,实现威力及功能上的提高。在激光引信中,激光脉冲受大气衰减和目标散射特性影响^[4]。脉冲激光对目标的探测与识别是激光引信近程探测技术中的一个关键技术点,而目标的表面反射特性对探测的影响是激光近程探测高效毁伤与精确打击目标的主要研究关键。目标的表面粗糙度以及附着物对激光回波信号的强弱影响较大,因此,需对激光近程探测过程中不同粗糙度目标表面所表现的反射特性进行研究,首先通过仿真得到回波信号模型,再进行不同粗糙度表面回波功率实验对仿真结果进行验证。实验选用不同表面粗糙度的靶板并采用了改变角度、改变距离等模式来观测得到的电压曲线,获得最终结果。目标的表面粗糙度以及附着物对激光回波信号的强弱影响较大,因此,对激光近程探测过程中不同粗糙度目标表面所表现的反射特性进行研究,具有较高的军事应用价值。

1 反射模型相关理论

1.1 双向反射分布函数

目标表面对入射激光的反射分为镜面反射和漫反射。但在实际探测中,目标往往具有局部镜面反射和局部漫反射混杂的复杂反射情况,这时不能简单地将两种反射分量叠加处理。双向反射分布函数(BRDF)是实际测量目标材料表面对激光反射特性研究的一种有效模型。对于某微小表面,它定义了给定入射方向上的辐射照度(irradiance)和给定出射方向上的辐射照度(radiance)的相互关系,描述了入射光线经某目标表面反射后在各个出射方向上的分布。它由表面粗糙度、介电常数、辐射波长、偏振和入射激光辐射特性决定,其数学表达式为:

$$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, E_i) = \frac{dL_r(\theta_r, \varphi_r, E_i)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i)} \quad (1)$$

双向反射分布函数如图 1 所示, L 为光源辐射

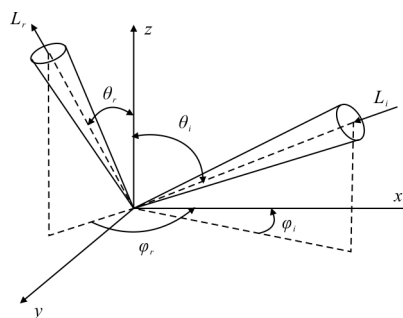


图 1 BRDF 几何示意图

Fig.1 Geometry schematic diagram of BRDF

亮度。 (θ_i, φ_i) 为光入射方向的入射角,也称为天顶角; (θ_r, φ_r) 为光出射方向的出射角或方位角。用单位面积上入射功率 P_i 与反射功率 P_r 表示双向反射分布函数有:

$$f_r = \frac{dP_r}{P_i \Omega \cos \theta_r} \quad (2)$$

对于完全漫反射面的目标来说, f_r 为常数, 则被照射目标半球空间内反射功率为:

$$P_r = \int_{2\pi} \frac{dP_r}{\Omega} d\Omega = \int_{2\pi} f_r P_i \cos \theta_r d\Omega = \pi f_r P_i \quad (3)$$

1.2 激光雷达散射截面

目标的激光雷达散射截面(LRCS)是反映目标对照射到其表面上激光反射或散射的能力,若不考虑光路中光损失和大气衰减,表达式是:

$$P_r = \left(\frac{P_i}{R^2 \Omega_i} \right) (r_n A_i) \left(\frac{A_r}{R^2 \Omega_r} \right) \quad (4)$$

式中： Ω_i 为入射光束的立体角； r_n 为目标的半球反射率； A_i 为目标垂直于光束入射方向的投影面积； A_r 为接收系统接收面积； Ω_r 为经过目标反射后的光束立体角； R 为目标距离。

由公式(4)分析后, 雷达截面积 σ 公式:

$$\sigma = 4\pi R^2 \frac{P_r/A_r}{P_i G_i / (4\pi R^2)} = 4\pi R^2 \frac{H_r}{H_i} \quad (5)$$

式中： G_i 为天线增益； H_r 为接收系统接收到的反射功率密度； H_i 为目标处入射功率密度^[5]。

当目标表面面积大于光束到达目标表面时光斑的直径, 同时目标被照射处的面积远小于目标和光源之间的距离, 激光束散角较小时, 目标处的激光束光通量密度不能近似为均匀, 而是高斯分布的^[6]。目标处入射功率密度为:

$$H_i = \frac{E_0^2}{W^2(R)} e^{-2\frac{r^2}{W^2(R)}} \quad (6)$$

式中： E_0 为激光束电矢量的振幅； r 为被照射表面上某点到激光束中心的距离； $W(R)$ 为距离为 R 处的光斑尺寸。特别地, 对于遵循朗伯余弦定律, 面积为 A 的漫反射目标板等效反射截面:

$$\sigma = 4\rho\pi R_r \cos\alpha \quad (7)$$

式中： ρ 为朗伯表面半球反射率； R_r 为朗伯盘半径, α 为对朗伯表面的入射角。

1.3 激光光束理论模型

通常从发射系统出射的激光束既不是均匀的平面波, 也不是均匀的球面波, 而是一种特殊的高斯光束^[7], 如图 2 所示。

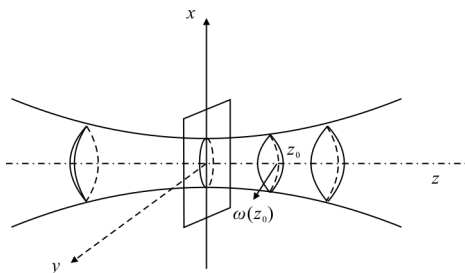


图 2 高斯光束空间分布

Fig.2 Spatial distribution of Gauss beam

激光沿 Z 轴传播, 光束在点 (x,y,z) 处电矢量的表

达式为:

$$E(x,y,z) = \frac{A_0}{\omega(z)} \exp\left[\frac{-x^2 - y^2}{\omega^2(z)} \right] \exp\left[-iK\left(\frac{x^2 + y^2}{2R(z)} \right) + i\varphi(z) \right] \quad (8)$$

式中： A_0/ω 为当 $x=y=0$ 时 z 轴上各点的电矢量振幅； $\omega(z)$ 为 z 点的光斑尺寸函数, 表达式为:

$$\omega(z) = \omega_0 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\omega_0^2 \pi} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (9)$$

式中： $\omega(z=0)=\omega_0$ 称为高斯光束的“束腰”； $K=2\pi/\lambda$ 为波数； $R(z)$ 为激光束在 z 处的波阵面的曲率半径函数, 即

$$R(z) = \omega_0 \left[1 + \left(\frac{\omega_0^2 \pi}{\lambda z} \right)^2 \right] \quad (10)$$

$\varphi(z)$ 是与 z 有关的位相因子:

$$\varphi(z) = \arctan \frac{\lambda z}{\omega_0^2 \pi} \quad (11)$$

当 $z=0$ 时, 代入公式(9), 可得在 $z=0$ 处的电矢量表达式:

$$E(x,y,0) = \frac{A_0}{\omega_0} \exp\left[\frac{-\rho^2}{\omega_0^2} \right] \quad (12)$$

式中： $\rho^2 = x^2 + y^2$ 。

2 目标反射特性建模

激光近程探测是通过对目标照射后, 提取接收回波信号特征, 从而获取目标的相关信息。激光接收系统能否接收到有效信息取决于目标表面的反射特性。根据目标表面对激光的反射特性, 目标可分为镜面反射目标和漫反射目标两种。目标表面散射特性示意图如图 3 所示。

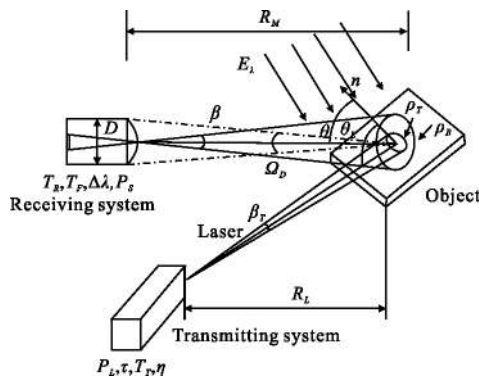


图 3 目标散射示意图

Fig.3 Schematic diagram of target scattering

2.1 背景环境辐射特性分析

恶劣的自然环境会对激光近程探测造成影响。当阳光直射云层上散射后被激光近程探测接收系统接收,在光敏探测器上响应的散粒噪声会导致虚警概率的增加^[8]。

接收系统接收到靶板(实验中代替物体表面)反射阳光的背景辐射功率 P_B 为:

$$P_B=L_\lambda GT_R T_P \tau_{at} \quad (13)$$

式中: L_λ 为在目标上的太阳光谱辐射亮度; G 为一个几何因子; T_R 为接收光学系统透过率; T_P 为滤光片的透过率; τ_{at} 为大气透过率,定义几何因子 G 为两个小区域的辐射交换因子。

$$G=\frac{A_D \cos \theta_R \cdot A_R \cos \theta_{\rho o}}{R_M^2} \quad (14)$$

式中: A_D 为靶板面积; $A_R \cos \theta_{\rho o}$ 为光学接收系统的有效面积; θ 为在靶板表面法线和目标与接收系统中心连线之间的角度; $\theta_{\rho o}$ 为在接收系统表面法线和目标与接收系统中心连线之间的角度($\theta_{\rho o}=0$,因为在好的定位和追踪情况下,光学接收系统是一直朝向目标的); R_M 为在物体与光学接收系统之间的距离。

对于特定波长 λ 的太阳辐射的漫反射,产生的太阳光谱辐射 L_λ 是^[9]:

$$L_\lambda=\frac{E_\lambda \rho_B}{\pi} \quad (15)$$

式中: E_λ 为太阳光谱辐照度; ρ_B 为靶板反射率。

τ_{at} 为大气透过率:

$$\tau_{at}=e^{-\sigma(\lambda)R_M} \quad (16)$$

式中: $\sigma(\lambda)$ 为波长为 λ 的大气消光系数。

背景辐射功率为:

$$P_B=\frac{\pi}{16} E_\lambda \Delta \lambda \rho_B \beta^2 D^2 T_R T_P e^{-\sigma(\lambda)R_M} \quad (17)$$

式中: $\Delta \lambda$ 为光学滤光片带宽; ρ_B 为靶板反射率; β 为接收光学系统视场角; D 为接收系统孔径; T_R 为接收光学系统透过率;指数项为大气透过率,与大气消光系数及靶板距离有关。

2.2 漫反射目标反射特性分析

脉冲激光近程探测下,激光光斑往往比目标表面小。当激光束面积小于目标面积,来自反射激光辐射被照目标的接收回波功率 P_S 为:

$$P_S=L_T A_T \Omega_D T_R T_P e^{-\sigma(\lambda)R_M} \cos \theta \quad (18)$$

式中: L_T 为来自目标反射的光谱辐射亮度; A_T 为目标上激光点的面积; Ω_D 为光学接收孔径立体角; L_T 为辐射亮度:

$$L_T=\frac{4 P_L T_T \rho_T e^{-\sigma(\lambda)R_L} \cos \theta_L}{\pi^2 \beta_T^2 R_L^2} \quad (19)$$

式中: P_L 为激光峰值功率; T_T 为发射光学的透过率; ρ_T 为目标反射率; θ_L 为目标表面与激光束之间的角度; β_T 激光束发散角; R_L 为在激光和目标之间的距离。

在目标上的激光束表面面积 A_T 为:

$$A_T=\frac{\pi R_L^2 \beta_T^2}{4 \cos \theta_L} \quad (20)$$

立体角 Ω_D 为:

$$\Omega_D \approx \frac{\pi D^2}{4 R_M^2} \quad (21)$$

最终接收回波功率 P_S 如下:

$$P_S=\frac{D^2}{4 R_M^2} P_L \rho_T T_T T_R T_P e^{-\sigma(\lambda)(R_L+R_M)} \cos \theta \quad (22)$$

由接收回波功率 P_S 的表达式(18),假设激光光斑完全落在目标表面,则由公式(22)可知接收光功率的大小与 D^2 、 ρ_T 、 T_T 、 T_R 、 T_P 、 $e^{-\sigma(\lambda)(R_L+R_M)}$ 、 $\cos \theta$ 成正比,与 R_M^2 成反比。为指导探测仿真系统设计,首先需要对接收光功率模型中的各参量取值进行讨论,并以此为依据进行仿真系统最优化参数设置。

激光光束通过聚碳酸酯(PC)透镜进行准直。PC是一种综合性能优良的非结晶性聚合物,能在-135~120℃温度范围内保持较高的机械性能,抗冲击、延展性好,能满足引信工作的复杂环境场要求,其透射率与入射光线波长、透镜厚度有关^[10]。在正常工作温度下,聚碳酸酯对波长为905 nm的激光透光率为88%。接收光路中使用了905 nm窄带滤光片,军用滤波片要求中心波长具有优良的稳定性、峰值透光率高、膜层具有良好的均匀性与牢固度^[11]。滤光片中心波长 λ 为 905 ± 5 nm,半带宽 $\Delta \lambda/2=30$ nm,滤光片透过率 $T_P=T_{\max}=90\%$ 。

大气透过率 $e^{-\sigma(\lambda)(R_L+R_M)}$ 中 $\sigma(\lambda)$ 为大气消光系数,可以表示为:

$$\sigma(\lambda)=\sigma_{r_m}(\lambda)+\sigma_{r_n}(\lambda)+\sigma_{b_m}(\lambda)+\sigma_{r_n}(\lambda) \quad (23)$$

式中： $\sigma_r(\lambda)$ 为散射系数； $\sigma_b(\lambda)$ 为吸收系数；角标 m 与 α 分别代表大气中分子和气溶胶成分。

大气透过率除与微粒吸收和散射有关外，还受多种因素影响，分析较为复杂，采用低分辨率大气透射率计算程序 Lowtran 进行统一计算。

考察实验环境后，对程序设置如下：大气模式选项卡中选择环境为中纬度冬季，边界层和对流层气溶胶模式选择 0~2 km 的城市气溶胶，由 20% 烟灰类物质、56% 水溶性物质和 24% 尘埃物质组成。云模式选择无云雨，初始高度和终点高度均为 0，路径长度为 20 m，波长参数选择上限 1.000 μm ，下限 0.800 μm ，波长间隔为 0.001 μm 。

905 nm 激光的大气透过率如表 1 所示，可知总的大气透过率为 0.977 5。

表 1 905 nm 激光大气透过率

Tab.1 905 nm laser atmospheric transmittance

Total transmittance	Transmittance of H ₂ O	Transmittance of AER-HYD	AER-HYD ABS	Integrated absorption
9.775E-001	9.945E-001	9.909E-001	2.558E-003	2.551E+001

背景辐射功率主要来源于太阳辐射、月亮辐射(夜晚)、星体辐射(夜晚)和云团的后向散射，其中太阳作为发射源背景辐射造成的干扰为主要部分。引信工作环境的背景辐射能成分复杂，主要是太阳引起的背景辐射能，一般地面与太阳光垂直的平面上辐照度值为 1 535 W/m²，大气层外日光法线照度为 125 800 lx^[12]，但数值受太阳方位角、气象条件、监测地点的限制，浮动较大。

太阳对引信能形成干扰是由于背景辐射能被激光近程探测接收系统接收，经接收电路处理在输出中产生噪声，这种噪声通常为随机白噪声，与频率无关。若此种噪声超过引信某探测距离的阈值电压，使信号处理系统误判断，引起引信后级输出，便形成了干扰^[13]。对于背景辐射的干扰可以采用接收系统加装窄带滤光片的方法减弱影响。窄带滤光片的作用是使特定波段的光波通过，将其他频段光线滤除，实现光谱的分割，减弱背景辐射功率的影响作用^[14]。用中心波长为 905 nm 的窄带滤光片作为接收窗口并利用 Lowtran 研究太阳光谱辐照

度。根据实验环境，选择中纬度冬季，水平等压且高度为地平线的实验海拔，边界层气溶胶为城市消光系数，无云天气，年中天数为第 332 天，波数下限、上限，波数间隔 12。对于波长为 905 nm 的太阳辐照度如表 2 所示。

表 2 太阳光 905 nm 波段的辐照度

Tab.2 905 nm solar light waveband irradiance

Time interval	Incident irradiance	Surface irradiance	Transmissivity
Forenoon	7.538E-006	2.337E-006	3.101E-001
Noon	7.538E-006	3.506E-006	4.651E-001
Toward evening	7.538E-006	4.460E-007	5.917E-002
Midnight	-	1.596E-007	4.651E-001

由公式(17)太阳光谱辐照度取 3.0×10⁻⁶ W/(m²·μsr)，滤光片带宽 $\Delta\lambda=30$ nm，接收视场角取 15 mrad，接收系统探测直径为 20 mm²，激光器峰值功率为 75 W，其他参数按上节确定参数，则背景辐射功率：

$$P_B = \frac{\pi}{16} \times 3.0 \times 10^{-6} \times 3.0 \times 10^{-3} \times \left(\frac{0.015 \times 180}{\pi} \right)^2 \times$$

$$(2 \times 10^{-2})^2 \times 0.88 \times 0.95 \times 0.977 5 = 1.593 \times 10^{-18} (\text{W})$$

按上述所确定各参量取值，接收系统探测直径为 20 mm²，则接收回波功率可表示为：

$$P_B = (2 \times 10^{-2})^2 \times 75 \times 0.88 \times 0.88 \times 0.95 \times$$

$$0.977 5 \cdot \frac{\rho_r}{4R_M^2} \cos\theta = 5.437 \times 10^{-3} \cdot \frac{\rho_r}{R_M} \cos\theta$$

2.3 仿真结果

在 Tracepro 中建立实验环境仿真模型见图 4，图中直线为激光光束照射到靶板，经反射后在空间中的分布，仿真以光线表示。根据蒙特卡罗法的原理，光线的条数决定了仿真的真实程度，光线数量越多，则越贴近真实数值。设定光束参数为外半径 0.1 mm，总光通量为 75 W，密度分布为高斯分布，空间比重为均匀光通/位置加权，无偏振，波长为 0.905 μm ，光线数为 26 991 001 条。建立高斯光束空间分布模型仿真见图 5，光束数学模型见式 1.10，仿真取光腰位置为 1，角分布 0.43 rad，则光束能量分布中心处为最大值 17 000 W/m²，光束能量较为集中。

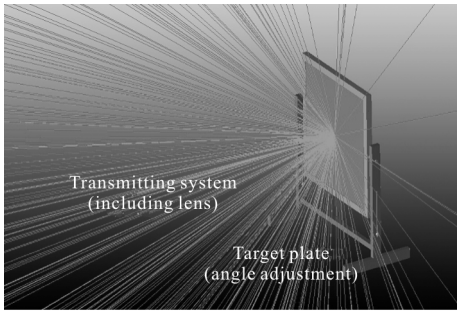


图 4 实验环境仿真模型

Fig.4 Simulation model of experimental environment

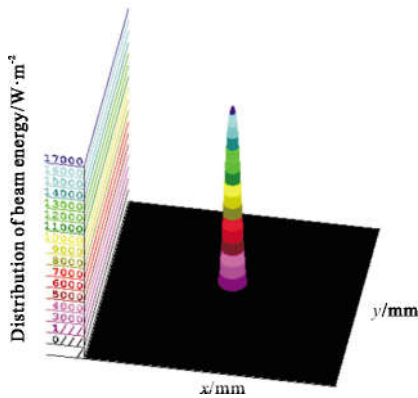
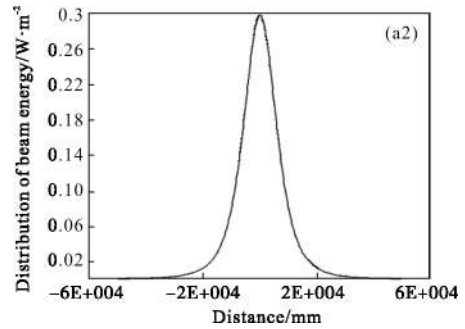


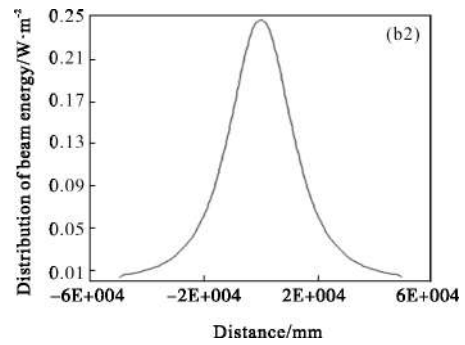
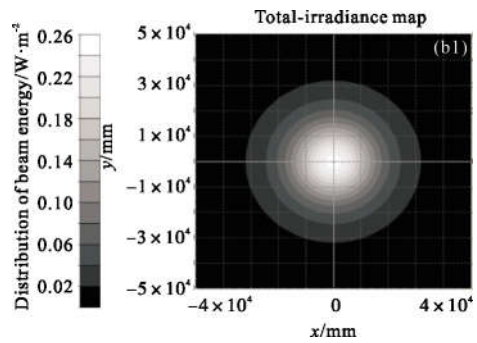
图 5 经靶面反射后高斯光束的空间分布模型

Fig.5 Gauss beam spatial distribution mode of target surface reflection

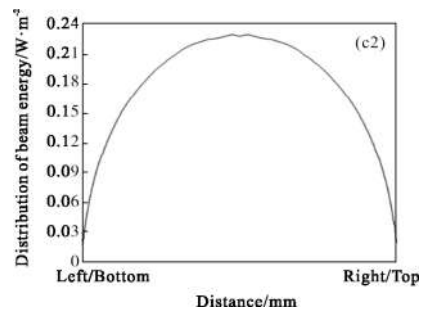
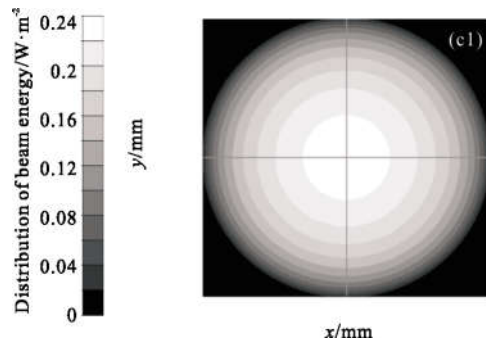
根据实验条件, 实验用目标靶板为铁板、胶木板、实木板和锈铁板, 经测定铁板表面粗糙度为 $Ra1.6$ (表面粗糙度是指加工表面具有的较小间距和微小峰谷的不平度, 数值越小, 则表面越光滑。 Ra 是高度特征参数, 叫做轮廓算术平均偏差, $Ra1.6$ 是指在取样长度内轮廓偏距绝对值的算术平均值为 $1.6 \mu\text{m}$); 实木板表面粗糙度为 $Ra6.3$; 胶木板表面粗糙度为 $Ra12.5$; 锈铁板表面粗糙度为 $Ra50$ 。在 Tracepro 中对不同表面粗糙度的靶板进行仿真, 并对回波光通量在空间中的分布进行对比, 波长取 905 nm 。图 6



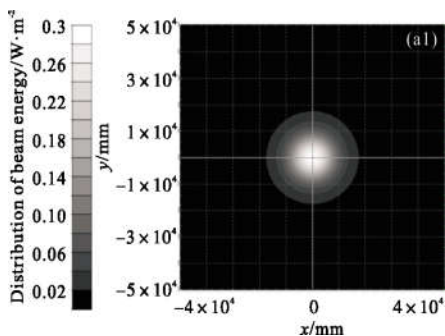
(a) $Ra=2\lambda$



(b) $Ra=6\lambda$



(c) $Ra=10\lambda$



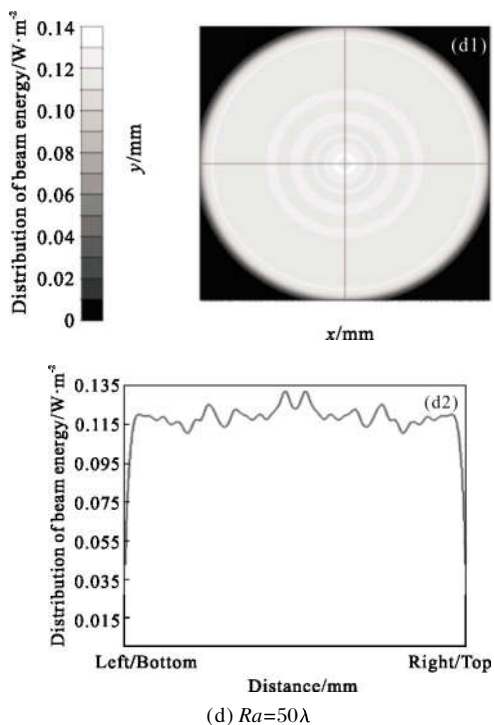


图 6 不同表面粗糙度下的回波功率分布

Fig.6 Echo power distribution of different surface roughness degree

为靶板表面粗糙度为 2λ 、 6λ 、 10λ 、 50λ 时回波光通量的空间分布曲线。

对上述结果进行分析,根据仿真数值可以看出目标表面粗糙度值越低,则目标表面反射特性越偏向镜面反射,回波能量的空间分布向高斯分布靠近,此时垂直探测得到的能量较大,但随探测角度改变,回波能量快速衰减;表面粗糙度值越高,则目标表面越表现出漫反射特性,特别是取值较大时,表现为均匀漫反射,回波能量的空间分布与探测角度几近无关,但垂直探测时的探测距离不如表面粗糙度数值低的目标远;当目标表面粗糙度介于一般机械加工可得到的平面或刷漆后的取值区间时,回波能量的空间分布表现为朗伯余弦反射,此时与靶面角度、距离及靶面反射率都有较大关系。

根据仿真靶板的表面粗糙度及理论分析,当目标表面粗糙度为 $Ra12.5$ 时,仿真后空间反射能量分布曲线与理论的余弦反射模型曲线大致吻合,但对于表面粗糙度在 $Ra1.6\sim Ra6.3$ 之间的目标,波形最高能量幅值大于理论值,同时其他部分能量小于理论值;当表面粗糙度为 $Ra25$ 以后,反射能量各方

向均匀分布,理论数学模型仅在目标表面粗糙度取值小范围与仿真值相吻合,并不能表现全部的实际情况。

3 目标表面反射特性实验

根据对回波功率方程的相关影响因素及电路分析,建立实验测试系统平台。

实验选用不同表面粗糙度的靶板。其中两个木板(1、2)、两个铁板(3、4)。1、2号靶板的粗糙度分别为 $Ra6.3$ 和 $Ra12.5$,3、4号靶板的粗糙度分别为 $Ra1.6$ 和 $Ra50$ 。实验采用以下模式进行:

(1) 改变角度,对 1~4 号靶板,以一定的角度间隔改变靶板角度。

(2) 改变距离,靶板和激光垂直。

(3) 改变距离和角度,选取 2 号和 4 号靶板,取靶面角度为 0° 、 30° 、 45° 、 68° ,探测距离从光敏管不饱和开始,到信号电压衰减至 1 V 以下不可测。

首先分别对几种靶板以改变靶面角度的方式进行实验,实验结果如图 7 所示。取 1、2 号目标距离为 20 m ,3 号 13 m ,4 号 7 m 。

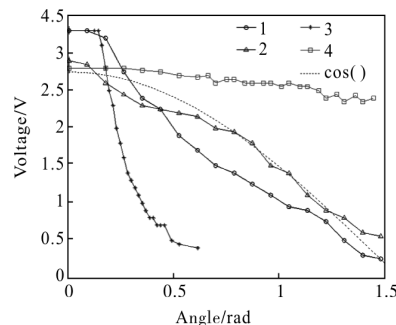


图 7 回波电压随靶板弧度变化曲线图

Fig.7 Voltage curve of target echo with curvature change

由实验结果可知,表面粗糙度为 $Ra12.5$ 的 2 号靶板的回波电压最符合余弦分布特性,在 $0^\circ\sim 40^\circ$ 之间 2 号靶板表现为叠加的高斯分布特性,故曲线在 0° 附近呈现中心凸出边沿降低的高斯分布形态;大约 80° 以后则表现出均匀漫反射的特性,曲线趋于平滑。而表面更为光滑的 1 号靶板表现为 0° (垂直入射)入射时光敏管饱和,在 27° 以前均比余弦反射电压幅值更高, 27° 以后比余弦反射电压幅值更低,在 80° 以后曲线变平滑,但幅值比余弦反射的幅值低。

对比 1、2 号靶板可知,1 号靶板较 2 号靶板能量更为集中,垂直入射时能量更为强(表现为截止)。在 25°前 1 号靶比 2 号靶能量更强,在 25°后 1 号靶比 2 号靶能量分布弱。在 80°以后两者均表现为均匀漫反射,但是 2 号靶板比 1 号靶板均匀漫反射电压值更高。

对于表面光滑的 3 号靶板,波形基本呈现高斯分布特性,在 8°前电压均截止在 3.3 V,而从 8°~25°,电压幅值迅速降低至 1 V 以下,在 28°以后曲线慢慢变平滑。3 号靶板已经不表现余弦反射特性,较为明显的表现为高斯分布特性。4 号靶板板面粗糙度最大,表面形貌较为复杂,故光线向空间反射较为均匀,电压下降较为缓慢,总体在 2.8~2.4 V 间变动。

将 1~4 号靶板在垂直入射的条件下采集回波幅值并绘图得图 8。

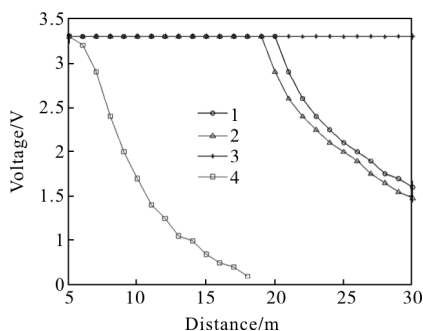


图 8 1~4 号靶板距离变化曲线

Fig.8 Target distance curve from number 1 to number 4

由图 8 可知,垂直入射的条件下,粗糙度 $Ra6.3$ 的 1 号靶面和粗糙度 $Ra12.5$ 的 2 号靶面探测距离相差不大,均能在 25 m 内有很强的回波信号。而由于粗糙度 $Ra1.6$ 的 3 号靶面表面粗糙度很低,通过对角度变化曲线结果分析可知,其分布近似为高斯分布,在垂直入射的情况下会接收到很强的回波能量,故在 30 m 内,3 号靶面的接收回波始终饱和截止。而粗糙度 $Ra50$ 的 4 号靶,由于其表面粗糙度对光散射均匀,垂直方向上的激光回波能量的大幅衰减,使得在垂直入射时不能探测到很远的距离,仅在 10 m 内回波信号相对较大一些。

以变距离的方式测量 2 号靶板不同靶面角度下的回波电压幅值,结果经过 Matlab 绘制后见图 9。

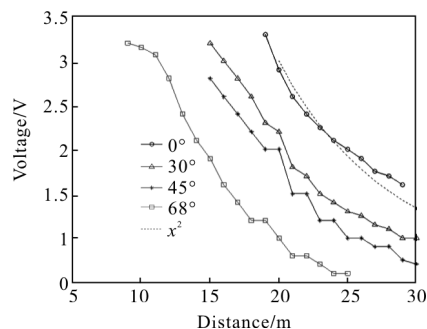


图 9 回波电压随靶板距离变化曲线(2 号靶板)

Fig.9 Echo voltage with the target distance curve(target 2)

由图 9 可以看出,2 号靶板反射特性与距离的关系为距离的平方成反比,跟靶面角度有一定关系,截取 2 号靶板 20 m 处不同角度的电压幅值如表 3 所示。

表 3 2 号靶板不同角度 20 m 处电压幅值

Tab.3 Voltage of different angles at 20 m in 2 plates

Target angle/(°)	0	30	45	68
Voltage/V	2.9	2.2	2.0	1.0
cos	1	0.866	0.707	0.375

以变距离的方式测量 4 号靶板,结果经过 Matlab 绘制后如图 10 所示。

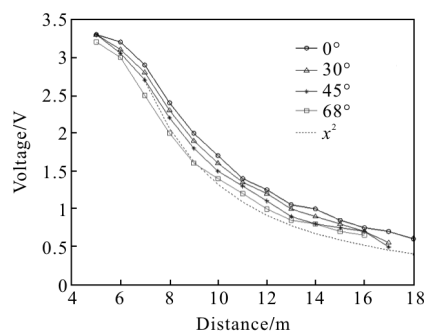


图 10 回波电压随靶板距离变化曲线(4 号靶板)

Fig.10 Echo voltage with the target distance curve (target 4)

由图可以看出,对于表面更为粗糙的 4 号靶板,反射特性与距离的关系仍为跟距离的平方成反比,但幅值随靶面角度变化的关系已不大,这与 4 号靶板随角度变化的曲线相符。

通过粗糙表面的反射特性实验,可以看出实验结果与仿真吻合度较高,在表面粗糙度 $<Ra6.3$ 的目标表面,应该以高斯分布为模型建模较为准确,特别

是在垂直入射的 0° 角附近,与靶面法线方向夹角不宜过大,应小于 30° ,此时理论模型中高斯系数取值为主,且表面粗糙度越小,高斯系数越大;对于表面粗糙度在 $Ra_{25}\sim Ra_{6.3}$ 之间的目标,应以余弦反射模型建模,在 $Ra_{12.5}$ 附近能较好吻合,余弦系数在 $Ra_{12.5}$ 附近取得极大值1,表面粗糙度比 $Ra_{12.5}$ 低时,高斯系数取值升高,漫射系数取值减小,表面粗糙度比 $Ra_{12.5}$ 高时,主要以余弦系数和漫射系数决定反射特性;当表面粗糙度 $>Ra_{25}$ 以后,可当成均匀漫反射来进行阈值求解,漫射系数随表面粗糙度升高而趋近于1,同时镜面系数与余弦系数趋向于0。

在激光近程探测过程中应根据实际情况装定好触发阈值的取值,若阈值过低,则近程探测抗噪声及环境干扰的能力下降,早炸几率上升;若阈值过高,则当弹姿态改变小角度就会可能丢失目标,或者炸点延迟,造成晚炸,对于子母弹类型的弹药会对后续母弹的作用造成较大影响。

4 结论

通过不同粗糙度表面回波功率实验可以得出:原理样件工作可靠,电路输出激光束并能较好的接收并还原回波信号。实验数据绘制分布形状,与理论仿真模型较为吻合。在模型参数确定方面,当目标表面粗糙度 $<Ra_{6.3}$ 时,应该以高斯分布为模型建模,此时理论模型中高斯系数取值为主,且表面粗糙度越小,高斯系数越大;对于表面粗糙度在 $Ra_{25}\sim Ra_{6.3}$ 之间的目标,应以余弦反射模型建模,在 $Ra_{12.5}$ 附近能较好吻合,余弦系数在 $Ra_{12.5}$ 附近取得极大值1,表面粗糙度比 $Ra_{12.5}$ 低时,高斯系数取值升高,漫射系数取值减小;当表面粗糙度 $>Ra_{25}$ 以后,可当成均匀漫反射来进行回波信号强度的求解,漫射系数随表面粗糙度升高而趋近于1,同时镜面系数与余弦系数趋向于0。

参考文献:

- [1] Ma Baohua. The fuze in the era of network technology [J]. *Journal of Detection and Control*, 2006, 28(6): 1-6. (in Chinese)
- [2] Jiang Yiyang, Ni Bangfu, Qian Hongqing. The composite modeling and simulation of laser proximity fuze detection of ship target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(10): 1006001. (in Chinese)
- [3] Kou Tian, Wang Haiyan, Wang Fang, et al. The study of the pulse echo characteristics in the airborne laser detection of air target [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(4): 414001.
- [4] Yao Pingping, Tu Bihai, Wang Xiangjing, et al. The design and application of high precision laser proximity fuze threshold circuit [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(4): 1156-1161. (in Chinese)
- [5] Jerlow N G. *Marine Optics* [M]. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1976.
- [6] Wang Shaochuan. The reflection characteristics of laser [J]. *Laser Technology*, 1981(6): 9-24. (in Chinese)
- [7] Tong Guangde, Wang Zhanshan, Shen Zhengxiang. Measurement and analysis of laser scattering characteristic of sea surface under condition of super-low-altitude [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(2): 0206003. (in Chinese)
- [8] Wang Fengjie, Chen Huimin. The simulation of laser fuze cloud echo characteristic [C]//Optics and Precision Engineering Forum, 2015.
- [9] Barbaric Z P, Manojlovic L M. Optimization of optical receiver parameters for pulsed laser tracking systems [C]//TELSIKS 2003. 6th International Conference on IEEE, 2003: 192-201.
- [10] Chen Dahua, Cen Yin, Zheng Yiquan, et al. The research progress about the reflection properties of light reflecting polycarbonate [J]. *Polycarbonate Plastics Industry*, 2011, 39(8): 6-9. (in Chinese)
- [11] Li Shan. The design and preparation of 905 nm narrow-band filter [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- [12] (Japan) Lighting Society. *Lighting Handbook* [M]. Translated by Li Nong, Yang Yan. Beijing: Science Press, 2005: 242-244.
- [13] Hu Junxiong, Zhang Yan. The overview of laser fuze about anti-jamming technology [J]. *Guidance and Fuze*, 2009, 30(4): 6-18. (in Chinese)
- [14] Zhang Yue. The research of semi active laser proximity fuze target detection and signal processing technology [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)