

文章编号: 0258-7025(2006)11-1557-05

全尺寸目标激光脉冲后向散射回波功率测定和建模

王明军^{1,2}, 吴振森¹, 李应乐², 邓 蓉³, 张小安²

(¹ 西安电子科技大学理学院, 陕西 西安 710071
² 咸阳师范学院物理系, 陕西 咸阳 712000; ³ 目标与环境特性国防科技重点实验室, 北京 100854)

摘要 运用粗糙面散射、激光脉冲散射理论, 结合复杂目标粗糙表面相关建模参数, 建立用于计算全尺寸复杂目标激光脉冲后向散射功率的理论模型。实验测量一种空中缩比目标模型后向散射激光脉冲回波功率, 获取该缩比目标激光脉冲后向散射功率随接受天顶角的变化曲线。比较理论建模与实验测量数据, 分析实验误差, 证明了该理论模型的正确性。将建立的理论模型进一步应用于计算非合作空间全尺寸目标的激光脉冲回波功率。计算结果能够预估空间目标的激光散射特征, 解决一些关于空间目标激光脉冲光学特征工程的应用问题。

关键词 激光技术; 目标与环境光学特征; 激光脉冲散射; 激光雷达; 回波特性

中图分类号 TN 958.98 **文献标识码** A

Modeling and Measuring the Pulse Laser Scattering Echo Power from Whole Dimension Target

WANG Ming-jun^{1,2}, WU Zhen-sen¹, LI Ying-le², DENG Rong³, ZHANG Xiao-an²

¹ School of Science, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China
² Department of Physics, Xianyang Normal College, Xianyang, Shaanxi 712000, China
³ Key Laboratory of Optical Features of Targets and Environment National Defence Science and Technology, Beijing 100854, China

Abstract A theoretical model is presented which computes the pulse laser scattering echo power from the whole dimension target by using the theory of rough surface scattering and of pulse laser scattering combined with the modeling parameter of complex rough surface. The directional figure of pulse laser backscattering echo power is given through the measurement of the pulse laser backscattering echo power of the aerial complex scale-model. An analysis of the experimental error by comparing the theoretical results with experimental data proves that this model is correct. Computational results of the pulse laser backscattering echo power from non-cooperative complex space target by the model can pre-estimate the laser scattering characteristic of space target and solve some problems of engineering application about the pulse laser scattering from space complex targets.

Key words laser technique; optical features of targets and environment; laser pulse scattering; laser radar; echo power signature

1 引 言

激光具有准直性好、抗干扰能力强等优点, 各种

精密光学系统如: 激光测距、测速、激光雷达一维、三维和微运动多普勒成像等^[1~5] 都利用激光这些特征, 作为目标探测识别的有效手段。为了使这些激

收稿日期: 2006-03-28; 收到修改稿日期: 2006-05-23

基金项目: 国家 973 主题和国防科技重点实验室基金资助项目。

作者简介: 王明军(1979—), 男, 陕西旬阳人, 西安电子科技大学博士研究生, 主要从事光散射辐射及其光信号处理的研究。E-mail: wmjxd@yahoo.com.cn

导师简介: 吴振森(1950—), 男, 湖北人, 西安电子科技大学教授, 博士生导师, 主要从事光散射研究。E-mail: wuzhs@mail.xidian.edu.cn

光武器系统能够抵抗各种随机干扰,准确地探测并识别目标,必须针对各种环境背景,进行目标与激光散射特性研究^[6,7],开展外场实验和理论计算^[8,9]。随着近年来军事航天技术的发展,各种运用脉冲激光探测和识别目标雷达的技术相继出现^[10,11]。激光脉冲与目标光散射特性理论建模和实验研究对目标光散射特性预估、识别都具有重要意义,开展激光脉冲和目标光散射特性研究显得尤为重要。

本文依据激光雷达脉冲散射回波功率计算公式,结合激光脉冲散射、粗糙面散射理论建立全尺寸复杂目标激光散射回波功率理论计算模型。实验测量了一种空中缩比目标模型的后向激光脉冲散射回波功率,将理论和测量结果进行比较,给出缩比尺寸复杂目标激光脉冲散射回波功率随探测角度的变化情况,分析实验误差,证实了理论模型的正确性。并将建立的理论模型应用于计算两种非合作空间目标的激光脉冲回波功率。通过文中计算出来的目标激光脉冲散射回波功率,为精确制导系统设计接收机灵敏度等关键指标提供重要依据,有助于提高激光武器系统的性能。对激光雷达系统、光电制导武器设计,侦察、遥感卫星激光成像分析,目标光学特征信号提取都有重要的意义。

2 全尺寸复杂目标后向激光脉冲雷达方程

在计算目标激光脉冲后向散射回波功率时,冲击响应可以写成^[1]

$$G(t) = G_c(t) + G_f(t), \quad (1)$$

其中相干散射功率为

$$G_c(t) = \Gamma_{c0}(\omega_0) H_c(t), \quad (2)$$

$$\Gamma_{c0}(\omega_0) = \frac{k_0^2 \omega_0^4 \sigma_g}{16\pi\rho_0^4} |R(0)|^2 |\chi(-2k_0)|^2 \times \exp\left[-\frac{k_0^2 \omega_0^2 g_0(\mathbf{r}'_0)}{2\rho_0^2}\right], \quad (3)$$

$$H_c(t) = \frac{1}{2\pi} \int d\omega_d \exp\left[-\frac{\omega_0^2 g_0(\mathbf{r}'_0) \omega_d^2}{4\rho_0^2 c^2}\right] \times \exp(-2\omega_d^2 \sigma^2 / c^2) \exp(i\omega_d t') = \frac{1}{2\pi} \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}} \exp(-t'^2 / 4A), \quad (4)$$

其中

$$t' = t - 2\rho_0/c + 2\hat{k}_s \cdot \mathbf{r}'_0/c,$$

$$A = \omega_0^2 g_0(\mathbf{r}'_0) / 4\rho_0^2 c + 2\sigma^2 / c^2.$$

非相干散射功率为

$$G_f(t) = \frac{k_0^2 \omega_0^4}{16\pi\rho_0^4} \int dS' \exp\left[-\frac{k_0^2 \omega_0^2 g_0(\mathbf{r}')}{2\rho_0^2}\right] \times \sigma_p^0(\mathbf{r}') H_f(\mathbf{r}', t), \quad (5)$$

$$H_f(\mathbf{r}', t) = \frac{1}{2\pi} \int d\omega_d \exp\left[-\frac{\omega_0^2 g_0(\mathbf{r}') \omega_d^2}{4\rho_0^2 c^2}\right] \times \exp(-q'^2 \sigma^2 \omega_d^2 / 2c^2) \exp(i\omega_d t'') = \frac{1}{2\pi} \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{B}} \exp(-t''^2 / 4B), \quad (6)$$

其中 $q'_z = 2\hat{k}_s \cdot \hat{n}'(\mathbf{r}')$, $t'' = t - 2\rho_0/c + 2\hat{k}_s \cdot \mathbf{r}'/c$, $B = \omega_0^2 g_0(\mathbf{r}') / 4\rho_0^2 c + q'^2 \sigma^2 / 2c^2$ 。

假设输入到复杂目标激光脉冲信号的是幅度调制波,功率为 $P_i(t)$,脉冲宽度为 T_0 ,如图1所示,则散射回波功率为

$$P_s(t) = G_c(t) \otimes P_i(t) + G_f(t) \otimes P_i(t) = P_c(t) + P_f(t). \quad (7)$$

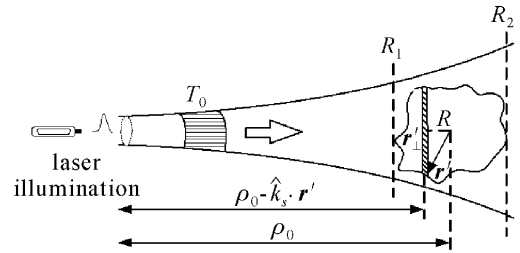


图1 激光脉冲与复杂目标散射示意图

Fig. 1 Scattering of pulse laser beam by object with complex target

工程上常用的激光脉冲宽度约为纳秒级,因此脉冲波束的冲击响应有效时间要比输入脉冲宽度小得多。卷积的结果就取决于输入脉冲的波形,将(4)和(6)式进行数学上的简化。考虑到探测器具有一定孔径,以及发射和接收系统的光学效率,收发路径上的衰减,探测目标几何尺寸的有限性,脉冲照射下单站激光雷达功率方程可表示为

$$P_c(t) = \frac{P_i T_{A1} \eta_t}{\pi \phi^2 \rho_0^2} \pi \omega_0^2 \exp\left[-\frac{2g_0(\mathbf{r}'_0)}{\phi^2 \rho_0^2}\right] \times |R(0)|^2 |\chi(-2k_0)|^2 \sigma_g \frac{T_{A2}}{4\pi\rho_0^2} \frac{\pi D^2 \eta_r}{4}, \quad (8)$$

$$P_f(t) = \int dS' \frac{P_i T_{A1} \eta_t}{\pi \phi^2 \rho_0^2} \pi \omega_0^2 \exp\left[-\frac{2g_0(\mathbf{r}')}{\phi^2 \rho_0^2}\right] \times \sigma_p^0(\mathbf{r}') \frac{T_{A2}}{4\pi\rho_0^2} \frac{\pi D^2 \eta_r}{4}, \quad (9)$$

其中 T_{A1} 为光源到目标的大气传输率; η_t 为发射系统光学效率; $\phi = 2/k_0 \omega_0$ 为波束宽度; T_{A2} 为目标到接收机的大气传输率,在空间环境中该项为零; η_r 为接收系统光学效率; D 为接收口径, $P_c(t)$ 表示激光脉冲后向相干散射功率, $P_f(t)$ 表示激光脉冲后向非

相干散射功率。为了符合雷达方程的惯用表述形式, 将(8)和(9)式合并成一个表达式, 即有

$$P(t) = \int dS' \frac{P_i T_{A1} \eta_t}{\pi \phi_0^2 \rho_0^2} \pi \omega_0^2 \exp\left[-\frac{2g_0(r')}{\phi_0^2 \rho_0^2}\right] \times \sigma(r') \frac{T_{A2}}{4\pi \rho_0^2} \frac{\pi D^2 \eta_r}{4}, \quad (10)$$

其中 $\sigma(r') = \sigma_c(r') + \sigma_p^0(r')$, $\sigma_c(r') = |R(0)|^2 \times |\chi(-2k_0)|^2 \sigma_g \delta(r' - r'_0)$ 。该式表明, 采用激光脉冲波束照射目标, 探测器接收的功率是目标照射区域内各点散射功率之和, 在镜像点处散射功率包含相干与非相干分量, 而在非镜像点则只有非相干散射功率。探测器接受到的功率与发射脉冲功率脉宽、目标几何形状、目标表面材料、传输路径上的大气状况, 以及发射与接收系统性能等众多因素有关。

表 1 外场测量仪器和环境相关参数

Table 1 Parameters of instrument and environment in outfield measuring

Pulse laser	Wavelength	Pulse energy	Peak value of power	Width of pulse	Responsibility spectrum
Surelite II	1.06 μm	650 mJ	10 mW	5~7 ns	
Detector	Sensitivity	Dynamic range	Available receiving aperture		
	0.11 ($\mu\text{A}/\mu\text{W}$)	57 dB	75 mm		
Weather parameter	Temperature	Humidity	Wind speed	Visibility	Atmosphere model
	2 $^{\circ}\text{C}$	40%	2 m/s	15 km	Country

将目标置于转台上, 台架高 2 m, 激光脉冲接收器在同一方向上以满足后向测试条件。转台旋转范围 $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 。文中测试的目标是缩比率为 1:8 的飞机模型。飞机的机头与激光脉冲入射角置于 0° 位置上, 启动转台顺时针旋转。脉冲激光器重复频率为 10 Hz, 每采集 10 个数据取一个平均值。当转台旋转 360° 时, 停止采集数据。在同样的测试条件下, 测量标准板的激光脉冲散射回波功率。

3.2 目标激光脉冲散射功率理论计算与实验测量数据的校模

在建立计算目标激光脉冲后向散射理论模型时, 激光脉冲采用高斯脉冲波束进行数学模拟, 而且在远场情况下高斯脉冲波束可以近似为平面波^[12], 通过计算复杂目标激光脉冲雷达散射截面(LRCS)^[8,9], 结合(10)式计算任意形状复杂目标的激光脉冲散射回波功率。有关飞机理论建模所涉及的如材料表面高度起伏、折射率等相关物理参数以及数据处理方法见参考文献[13]。图 2 为测量数据和理论建模数据的比较。其中激光脉冲波长为 $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$, 峰值功率为 10 mW, 计算脉冲波束因子和宽度 $\omega_0 = 30\lambda$, $\phi_1 = 5^{\circ}$, 发射源到目标以及目标

3 激光脉冲单站后向散射回波功率实验测量和理论校模

3.1 激光脉冲后向散射回波功率外场实验测量

为真实地反映激光脉冲系统实际使用条件, 激光器和接收机之间的距离足够远, 满足远场测试条件。激光器单模运行, 扩束后的激光脉冲波束呈高斯分布, 光斑均匀覆盖整个目标。由于目标笨重, 不宜频繁更换, 也为了防止在更换目标时破坏测量条件的一致性而引起实验误差, 采用单次参考测量法。激光器和目标之间的距离为 0.84 km, 测试中使用的标准板, 其方向-半球反射比为 $0.9778/\text{m}^2$ 。在大角度光入射的情况下, 该标准板对光的反射遵循朗伯反射定律。测量相关参数见表 1。

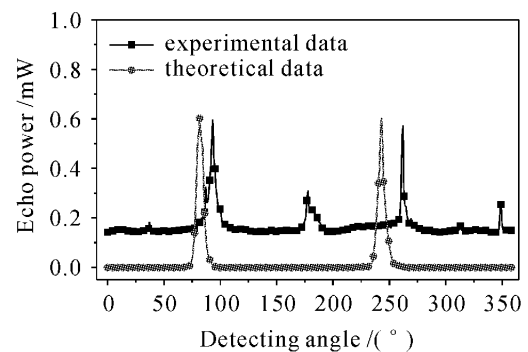


图 2 外场实验值和理论值的比较

Fig. 2 Comparing outfield experimental data with theoretical data

到探测器的大气传输率 $T_{A1} = T_{A2} = 1$; 发射系统和接收系统光学效率 $\eta_t = \eta_r = 0.8$; 接收口径 $D = 75 \text{ mm}$ 。

3.3 理论建模与实验数据比较及其误差分析

从图 2 的理论计算和实验测量结果来看, 0° 和 180° 分别对应飞机的机头和机尾, 90° 和 270° 分别对应飞机的两个侧面, 理论和实验测量值在两个最大峰值上的误差值为 0.004 mW 和 0.0292 mW。在入射波长不变的情况下, 如果原型与缩比模型介质材

料相同,即菲涅耳反射系数相同,忽略表面粗糙度的差别,则全尺寸目标后向激光雷达功率等于缩比模型后向激光雷达功率乘以几何缩比率的平方。可以验证,将缩比模型回溯到全尺寸目标时两个最大峰值上的相对误差值为0.0066和0.05。从数据曲线上来看,理论计算和实验测试数据没有完全重合,影响二者之间精度的主要有以下几个方面:1)激光器输出脉冲的均匀性;2)外场测试时其他杂波、背景和噪声的干扰;3)测量模型表面材料物理特性一致性以及模型机械加工工艺等。

3.4 空间目标激光脉冲后向散射回波功率的理论计算

通过理论计算和实验数据的校模,可以把理论模型应用于解决空间目标激光脉冲后向散射功率的计算问题上。采用德国 SENTECH Instruments 公司的 M-2000UI 型椭偏仪,测量建模用的相关参数见表 2,包括铝质材料(Aluminum),包层材料(wrappage material),太阳能帆板(solar energy board)。材料表面的高度起伏 δ (μm)可以通过镜向反射光强法^[14]计算。

表 2 实验测量和计算出的用于理论建模的相关参数

Table 2 Theoretical modeling parameters from measuring and computing

Target type	Material	Laser wavelength / μm	Optical constant	δ / μm	l / μm
Space target	Aluminum	1.06	$2.43+i10.7$	0.2	5.89
	Wrappage material		$1.5073+i0.0178$	0.04	10.7
	Solar energy board		$1.5073+i0.01779$	0.08	6.23

两种空间目标的几何结构如下:目标一,主体是一个六面体,主体两侧分别装有长4.3 m的太阳能帆板;目标二,主体呈圆柱体,直径4.5 m,总长度15 m,抛物型合成孔径雷达天线的口径为10 m,太阳能帆板总长度为13.72 m。计算的结果见图 3。由计算结果可以看出,由于目标一主体四个面对激光

脉冲的散射,在后向接收器上探测到如图 3(a)所示的四个散射峰值,两个没有太阳能帆板的面最大峰值为6.2 mW,具有帆板的两个反射面最大峰值为8.1 mW。可见太阳能帆板对激光脉冲的散射在接收器上有贡献但贡献不十分显著。图 3(b)所示为目标二对激光脉冲后向散射功率随接收天顶角的变化曲线,有两个散射峰值3 mW和8.1 mW,分别由目标主体(圆柱体)底面和抛物型合成孔径雷达天线对激光脉冲散射形成。太阳能板面与接收器平行,目标主体顶端由于是近似圆锥型整流罩,因此它们在接收方向上没有贡献。

4 结 论

目标后向激光脉冲散射功率主要与目标几何形状、照射激光脉冲波长、目标表面粗糙度、材料介电常数以及目标表面机械加工特性等因数有关。文中建立了计算目标后向激光脉冲散射功率理论模型,通过一种空中缩比目标理论与实验数据的校模,分析误差。数据结果表明在目标主要散射方向上理论与实验基本吻合,说明理论建模方法的正确性。将理论模型应用于计算空间目标的激光脉冲散射回波功率,获取一些非合作空间目标激光后向脉冲散射功率,根据激光后向散射功率简单判断目标形状,实现对目标激光散射特性进行预估,解决了一些关于空间目标激光脉冲光学特征工程应用问题。

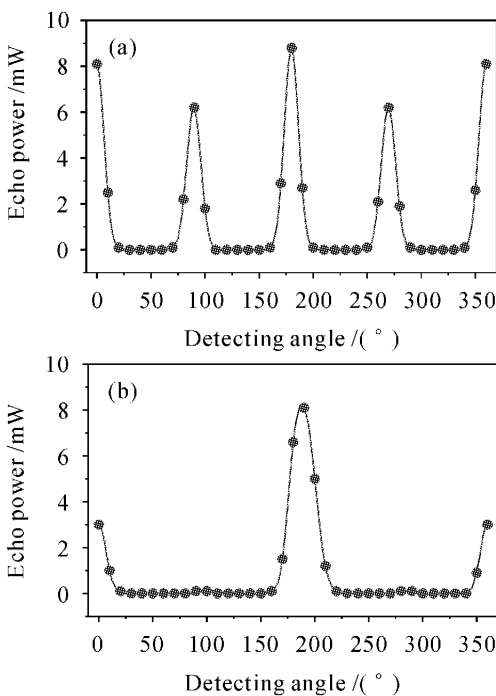


图 3 空间目标一(a)和空间目标二(b)的激光脉冲后向散射回波功率

Fig. 3 Pulse laser back scattering echo powers of No. 1 (a) and No. 2 (b) complex space targets

参 考 文 献

- 1 Cai Xiping, Qiao Lijie, Liu Libao *et al.*. State of the art of CO₂ imaging laser radar [J]. *Laser and Infrared*, 1999, **29**(6):327~329
蔡喜平, 乔立杰, 刘立宝 等. CO₂ 激光成像雷达技术的进展 [J]. *激光与红外*, 1999, **29**(6):327~329
- 2 Ni Shuxin, Li Yifei. Trend of laser radar for military [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, **32**(4):111~114
倪树新, 李一飞. 军用激光雷达的发展趋势 [J]. *激光与红外工程*, 2003, **32**(4):111~114
- 3 S. Fisher, K. Schultz. Preliminary Analysis of LACE Vibrations as Observed with Doppler Laser Radar [R]. AIAA Paper, 92-1365, 1992
- 4 Leslie H. Gesell, Richard E. Feinleib, Terry M. Turpin. An acousto-optic processor to generate laser radar range-Doppler images [C]. *SPIE*, 1990, **1296**:189~200
- 5 Lu Zukang, Zang Kan, Li Peiyong *et al.*. Study of 3D imaging laser radar [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 1999, **33**(4):418~421
陆祖康, 臧侃, 李培勇 等. 激光雷达三维成像系统研究 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 1999, **33**(4):418~421
- 6 Wang Mingjun, Wu Zhensen, Li Yingle *et al.*. Compute the laser scattering echo energy from whole dimension target under complex environment [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, **35**(1):71~75
王明军, 吴振森, 李应乐 等. 复杂背景下大尺寸目标激光散射回波能量的计算 [J]. *激光与红外工程*, 2005, **35**(1):71~75
- 7 Wu Zhensen, You Jinguang, Yang Ruike. Study on laser attenuation character in sand and dust storms [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(9):1075~1081
吴振森, 由金光, 杨瑞科. 激光在沙尘暴中的衰减特性研究 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(9):1075~1081
- 8 Li Liangchao, Wu Zhensen, Deng Rong. Comparison of the back laser radar cross-section calculation of complex object with the measurement of scale model [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(6):770~774
李良超, 吴振森, 邓蓉. 复杂目标后向激光雷达散射截面计算与缩比模型测量比较 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(6):770~774
- 9 Wu Zhensen. IR laser backscattering by arbitrarily shaped dielectric object with rough face [J]. *Journal of Electron.*, 1993, **10**(4):298~306
- 10 Douglas G. Youmans, Rodney Robertson. Modelocked-Laser Laser Radar Performance in Detection of TMD and NMD Targets [R]. AIAA Paper, 97-0912118, 1997
- 11 Monica L. Minden, Alan Kost, Hans W. Buesselbach *et al.*. A range-resolved Doppler imaging sensor based on fiber lasers [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1997, **3**(4):1080~1086
- 12 Chen Hui. Scattering of Gaussian Beam by Object with Rough Surface and Its Application on Laser One-dimensional Range Profile [D]. Xi'an: Xidian University, Dec. 2004
陈辉. 粗糙物体高斯波束散射及在激光一维距离成像中的应用 [D]. 西安电子科技大学博士论文, 2004 年 12 月
- 13 Wang Mingjun. Research on Measuring Light Scattering of Space Target and Engineering Computation [D]. Xi'an, Xidian University, Jan. 2004
王明军. 空间目标光散射测量与工程计算研究 [D]. 西安电子科技大学硕士论文, 2004 年 1 月
- 14 Wang Mingjun, Dong Yanbing, Wu Zhensen *et al.*. Research on light scattering characteristics of rough surface and optical constants deduction [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, **33**(5):549~552
王明军, 董雁冰, 吴振森 等. 粗糙表面光散射特性研究和光学常数反演 [J]. *红外与激光工程*, 2004, **33**(5):549~552