

## 激光与光电子学进展

## 球形合作目标折射率对激光雷达散射截面影响研究

张鹏<sup>1\*</sup>, 刘传<sup>1</sup>, 董冰<sup>1</sup>, 张刚强<sup>2</sup>, 丁蕴丰<sup>1,3</sup>, 佟首峰<sup>1</sup><sup>1</sup>长春理工大学空间光电技术国家地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130022;<sup>2</sup>水声对抗技术重点实验室, 上海 201108;<sup>3</sup>海南师范大学物理与电子工程学院, 海南 海口 570100

**摘要** 将 Lambert-Beer 定律引入双向反射分布函数, 推导出一种适用于球形合作目标后向激光雷达散射截面的数学计算模型, 并以此为理论依据, 建立了用于测量微珠合作目标后向激光雷达散射截面的实验系统, 利用该实验系统, 开展了对不同材料球形合作目标回波信号相对强度的光谱数据测量, 同时采集 50 mW、80 mW 和 300 mW 这三个典型发射光功率所对应球形合作目标处的光斑图像。根据光谱数据分析, 计算得到不同材料微珠合作目标的后向激光雷达散射截面。研究结果表明, 折射率为 1.46、1.51、1.93 的球形合作目标的激光雷达散射截面均随着激光功率的增加而呈现出线性增长的趋势; 当激光功率一定时, 折射率为 1.93 的球形合作目标的激光雷达散射截面要明显大于折射率为 1.46 和 1.51 球形合作目标的激光雷达散射截面, 该研究结论为激光雷达散射截面的理论研究和实验测量提供一定的理论依据和数据参考。

**关键词** 激光光学; 合作目标; 激光雷达散射截面; 光谱数据分析

中图分类号 TN951

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0712002

## Refractive Index of Spherical Cooperative Target Effect on Laser Radar Cross Section

Zhang Peng<sup>1\*</sup>, Liu Chuan<sup>1</sup>, Dong Bing<sup>1</sup>, Zhang Gangqiang<sup>2</sup>,  
Ding Yunfeng<sup>1,3</sup>, Tong Shoufeng<sup>1</sup><sup>1</sup>*NUERC of Space Optoelectronics Technology, Changchun University of  
Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;*<sup>2</sup>*National Key Laboratory of Science and Technology on Underwater  
Acoustic Antagonizing, Shanghai, 201108, China;*<sup>3</sup>*College of Physics and Electronic Engineering, Hainan Normal University, Haikou, Hainan 570100, China*

**Abstract** In this paper, we introduce Lambert-Beer law into bidirectional reflectance distribution function in order to deduce a mathematical model for calculating the backscatter cross section of spherical cooperative target. And based on this theoretical basis, the experimental system that for measuring the backscatter cross section of spherical cooperative target is established. Using this test system, the relative intensity spectral data of echo signal of the spherical cooperative target with different materials was measured. At the same time, the spot images of spherical cooperative targets corresponding to the three typical emission power of 50 mW, 80 mW, and 300 mW are collected. According to the spectral data analysis, the backscattering cross sections of the cooperative targets with

收稿日期: 2021-05-31; 修回日期: 2021-06-03; 录用日期: 2021-06-21

基金项目: 国防科技重点实验室基金项目(201911XXX401)、国防基础科研计划稳定支持项目(JCKYS2020604SS-JS012)、吉林省教育厅科学技术研究重点项目(JJKH20210820KJ)

通信作者: zp@cust.edu.cn

different materials are calculated. The results show that the laser radar cross section of the spherical cooperative target with refractive index of 1.46, 1.51, and 1.93 increases linearly with the increase of laser power. When the laser power is constant, the laser radar cross section of the spherical cooperative target with refractive index of 1.93 is significantly larger than that of the spherical cooperative target with refractive index of 1.46 and 1.51. This research provides a theoretical basis and data reference for the theoretical research and experimental measurement of the laser radar cross section.

**Key words** laser optics; cooperative targets; laser radar cross section; spectrum data analysis

## 1 引言

激光雷达在跟踪探测自由空间目标的过程中,由于激光在大气传输中光功率的衰减效应,给激光雷达系统实时接收到被跟踪目标完整的回波信号造成很大困扰。随着跟踪距离的增加,激光回波信号强度会呈现出雪崩式的递减趋势,导致系统所获得空间目标信息的缺失,降低激光雷达系统的信噪比,在条件恶劣的情况下,还会出现无法接收到目标回波信号的情况,直接影响激光雷达系统的工作性能<sup>[1-4]</sup>。

为了解决上述问题,通常采用在空间目标外表面合适的位置安装合作目标的方法来提高回波信号强度,这种装置具有定向反射的作用,在一定程度上能够抑制空间目标对激光信号的漫反射效应,使激光回波信号能够按照与光束入射相反的方向回传,大大提高了激光雷达对回波信号的探测概率<sup>[5-6]</sup>。由此可知,对于带有合作目标的空间目标来说,激光雷达接收到的回波信号主要来自合作目标的定向反射作用。换言之,可以用合作目标单元的后向激光雷达散射截面表征空间目标激光雷达后向散射截面。

后向激光雷达散射截面是激光雷达的重要参数之一,是表征目标产生与光学天线具有相同极化方向回波信号的有效作用面积。空间目标外表面材料构成复杂<sup>[7]</sup>,激光雷达散射截面受到大气衰减<sup>[8]</sup>、空间目标材料的光学散射特性<sup>[9]</sup>、外表面粗糙程度<sup>[10]</sup>以及入射光场和光束接收系统的极化形式<sup>[11]</sup>等多种因素影响。理论计算和实验验证均表明,即使同一目标的激光雷达散射截面在测量过程中也会出现不同的数值<sup>[12]</sup>。然而,诸多报道<sup>[13-16]</sup>为了便于理论分析和计算,往往只研究了构成空间目标主要部分的外表面材料的后向激光雷达散射截面,或者是将空间目标的外表面材料认定为单一成分,忽略了对合作目标后向激光雷达散射截面的测量。如果简单地认为空间目标的外表面材料是单一成分组成的,这样计算出来的激光雷达散射截面

无法准确表征空间目标整体的激光散射特性。因此,对合作目标激光雷达散射截面进行测量研究是十分必要的。

本文利用搭建的合作目标激光雷达散射截面的实验测量系统,测量了三种材料球形合作目标对 532 nm 激光回波信号相对强度的光谱数据,利用理论推导出的数学模型计算得到了三种材料球形合作目标在不同激光发射功率条件下的激光雷达散射截面。

## 2 基本原理

假设空间目标的反射光功率为  $P_r$ ,空间目标处的激光功率为  $P_t$ ,空间目标的激光雷达散射截面(LRCS)为  $S_c$ ,则

$$P_r = S_c P_t. \quad (1)$$

激光雷达系统接收到的回波信号光功率密度  $P_a$  可以表示为

$$P_a = \frac{P_r}{4\pi R^2}, \quad (2)$$

式中: $R$ 为空间目标距离激光雷达系统的距离。根据(1)式和(2)式得到空间目标的激光雷达散射截面  $S_c$ ,可表示为

$$S_c = 4\pi R^2 \left( \frac{P_a}{P_t} \right). \quad (3)$$

根据双向反射分布函数(BRDF)的理论定义<sup>[17]</sup>,可以推导出BRDF与LRCS的关系为

$$S_c = \iint_S 4\pi f_r \cos \theta_i \cos \theta_s dS, \quad (4)$$

式中: $S$ 为激光照射在空间目标上的总面积; $\theta_i$ 为入射角; $\theta_s$ 为散射角。 $f_r(\theta_i, \theta_s)$ 为BRDF,其数学定义为

$$f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_s, \varphi_s) = \frac{dL_s(\theta_i, \varphi_i; \theta_s, \varphi_s)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i)}, \quad (5)$$

式中: $L_s$ 是沿方向 $(\theta_s, \varphi_s)$ 在立体角 $\omega$ 内的散射光辐射照度; $E_i$ 是沿方向 $(\theta_i, \varphi_i)$ 在立体角 $\omega$ 内入射到空间目标总面积 $S$ 上的辐射照度。BRDF是相当复杂

的函数,难以表示成解析形式。因此,考虑到本文是通过采集回波信号光谱的相对强度的方法来计算 LRCS,可以通过光谱分析理论来建立一种新的计算 LRCS 的数学模型。

根据 Lambert-Beer 定律和光波动理论可知,

$$P_t = P_e \exp(-\mu R), \quad (6)$$

$$\nu = \frac{c}{\lambda}, \quad (7)$$

式中:  $P_e$  为激光发射功率;  $\nu$  为激光频率;  $c$  为光速,约等于  $2.998 \times 10^8$  m/s;  $\lambda$  为激光波长;  $\mu$  为大气衰减系数。常用的预测大气衰减系数的经验公式为

$$\mu = \frac{3.912}{V_b} \left( \frac{0.55}{\lambda} \right)^a, \quad (8)$$

式中:  $V_b$  为大气能见度;  $a$  为波长修正因子,且与能见度有关,在不同能见度情况下,  $a$  的取值为

$$a = \begin{cases} 0.585 V_b^{1/3}, & V_b \leq 6 \text{ km} \\ 1.3, & V_b = 10 - 12 \text{ km} \\ 1.6, & V_b = 23 \text{ km} \end{cases} \quad (9)$$

平均能见度一般情况,  $V_b$  取值 10~12 km,能见度良好情况,  $V_b$  一般取值 23 km<sup>[18]</sup>。根据光的粒子性理论可知,

$$E = nh\nu, \quad (10)$$

式中:  $E$  为光辐射能量;  $n$  为系统在单位时间内接收到回波信号的光子数;  $h$  为普朗克常量,其数值等于  $6.626 \times 10^{-34}$  J·s。将(7)式代入(10)式,则有,

$$E = \frac{nhc}{\lambda}. \quad (11)$$

根据光谱分析理论可知,光谱仪采集到的回波信号的相对强度就是回波信号中的光子激发产生电子数目。一般情况下,激发 1 个电子需要 20 个光子。根据回波信号的相对强度就可以计算出实验系统接收到的光子数,根据(11)式就可以计算出回波信号的能量,能量和功率有如下关系,

$$P_a = E/t, \quad (12)$$

式中:  $t$  是光谱仪采集回波信号的积分时间。

结合上述公式可推导出计算空间目标后向激光雷达散射截面的数学模型,

$$S_c = 4\pi R^2 \frac{nhc}{P_e \lambda t} \exp(\mu R). \quad (13)$$

根据(13)式以及实验数据,就可以计算出空间目标的后向激光雷达散射截面。

### 3 实验装置

测量微珠合作目标的后向激光雷达散射截面

实验系统如图 1 所示。该实验系统采用半导体泵浦全固态激光器作为激光发射光源,将半导体泵浦全固态激光器固定在可移动三维光学升降平台,激光器输出端带有光学系统对激光光束的发散角进行压缩,激光器工作模式为连续输出,最大输出功率为 300 mW,波长为 532 nm,使用照相机镜头作为光学接收天线接收回波信号,照相机镜头口径为 52 mm,在照相机镜头后放置一块由毛玻璃片制作而成的光斑接收板,便于回波信号光斑的接收,同时将光纤接收端固定于三维光学精密调整台上,三维光学精密调整台安装在照相机镜头背景板的后面,使用三维光学精密调整架的调节,可以使光纤光谱仪的光纤接收端接收到背景板上任何位置返回的回波信号,通过光纤传输,将回波信号传输至光谱仪,利用计算机内预装的光谱仪软件对回波信号的光谱数据进行处理和分析。

再入场飞行器经过大气层摩擦外表面会产生 1000 °C 以上的高温,为了防止再入场飞行器被高温损坏,一般会在航天飞行器温度最高的前端鼻锥的位置安装 1 块隔热瓦,在每个机翼前缘的位置安装隔热瓦。这种隔热瓦是将石墨和树脂纤维织成一种纺织品,然后将这种纺织品在高温和真空的环境下不断加热,可以耐 1700 °C 高温,被称为增强碳/碳(RCC)材料。

在微珠合作目标测量实验过程中需要制作大量以 RCC 为基底的微珠合作目标装置,但由于实验室缺少 RCC 材料,为了进行模拟,就需要找到一种能够替代 RCC 材料的基底材料。本文的主要研究内容是微珠测量合作目标的 LRCS,忽略材料的耐高温特性,所以只要替代的基底材料的光学特性与 RCC 材料相同或者相似即可。

综合考虑,最后决定选择了一种直径为 60 mm,厚度约为 0.2 mm 的黑色铝片,通过实验测量发现这种黑色铝片对 532 nm 激光的回波信号相对强度与 RCC 材料对 532 nm 激光的回波信号相对强度相近,而且这种材料制作简便。因此,选择这种黑色铝片作为微珠合作目标的基底,两种材料对 532 nm 激光回波信号的相对强度谱线如图 2 所示。

在黑色铝片的一面完全粘贴上强力的双面胶,将黑色圆形铝片带有双面胶的一面垂直放在大量不同材质的微珠上,因为微珠直径大都在 20~50 μm 之间,质量很轻,通过轻轻地挤压黑色圆形铝片,结合双面胶的粘附力,使带有双面胶的一面与

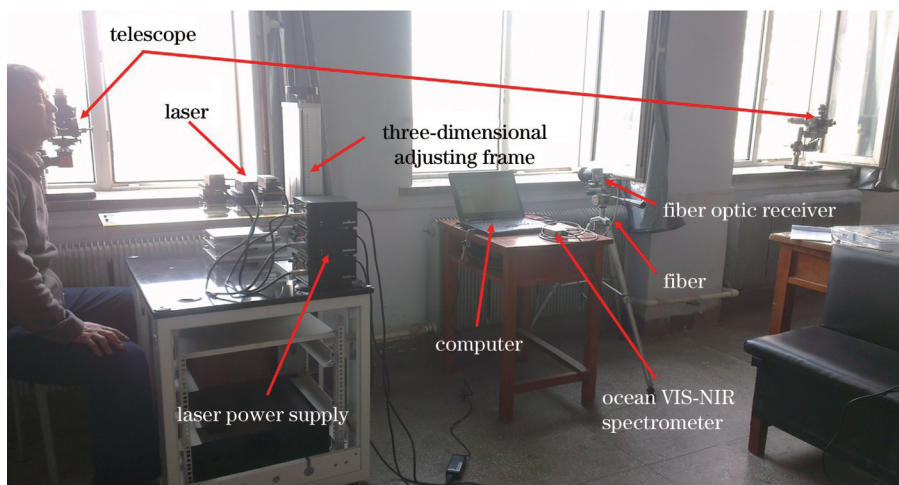
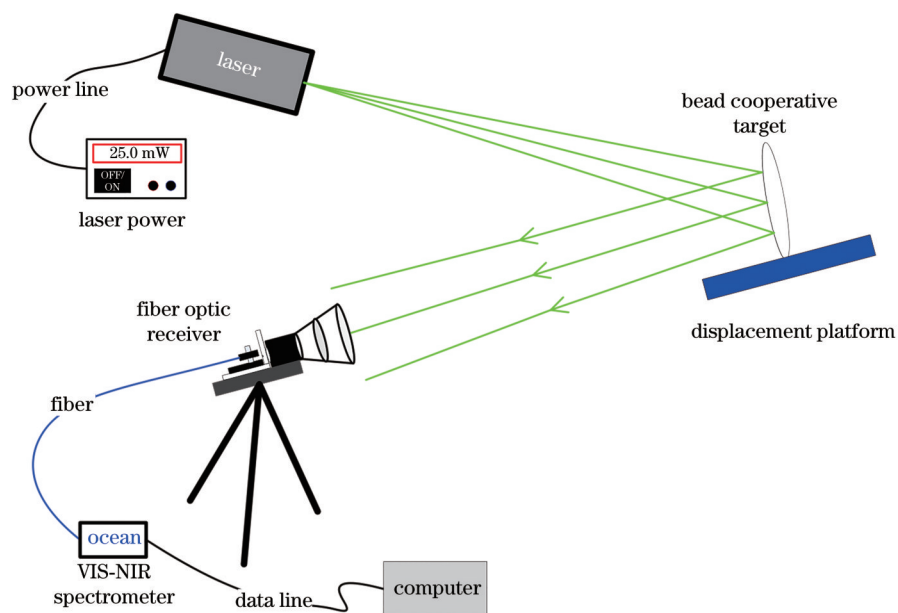


图 1 微珠合作目标激光雷达散射截面测量工作原理及实验现场

Fig. 1 Working principle diagram and physical device of laser radar cross section of cooperative target with microspheres

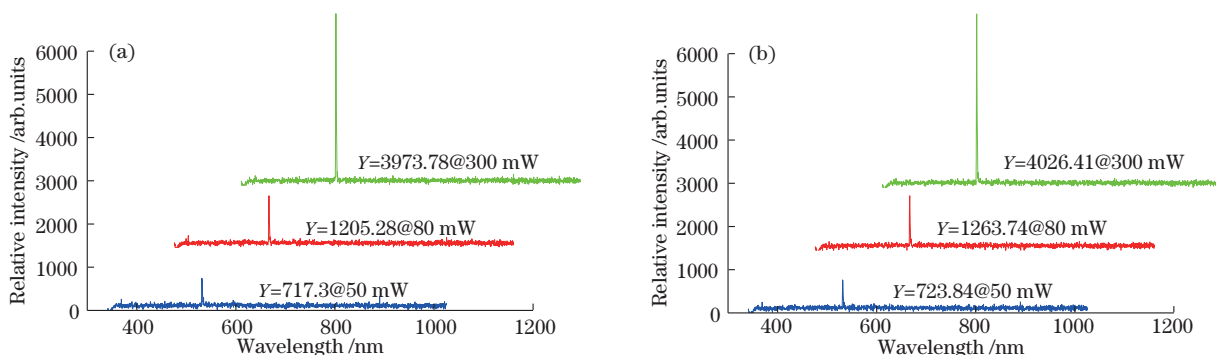


图 2 不同发射功率材料对 532 nm 激光回波信号相对强度光谱。(a)RCC 材料;(b)黑色圆形铝片

Fig. 2 Echo signal relative intensity spectra of 532 nm laser with different emission power materials. (a) RCC material; (b) black aluminum sheet

微珠充分接触,使用镊子将黑色圆形铝片轻轻夹起,拿住黑色圆形铝片两端轻轻晃动,利用微珠自身的重力,将黑色圆形铝片表面粘附不牢固的微珠

抖落,尽可能地使黑色圆形铝片表面几乎只有一层球形合作目标,以防止微珠叠加造成入射激光产生更为复杂的光学散射。

### 4 分析与讨论

为了避免自然光背景对微珠合作目标回波信号的干扰,选择大气能见度良好的夜晚,利用实验系统测量了三种不同材料的合作目标的激光雷达散射回波信号强度如图 3 所示。在实验过程中,(13)式中的  $P_e$  选择 50 mW、80 mW 和 300 mW 三个典型数值,光子数  $n$  等于回波信号强度(电子数)乘以 20。大气能见度良好,  $V_b$  取值 23 km,波长修正因子  $a$  取值 1.6,激光输出波长实际测量为 531.79 nm,则激光光束通过大气传输单位长度的

衰减系数  $\mu$  可以通过大气衰减系数的经验公式 [(8)式] 计算得到数值为  $0.1794 \text{ km}^{-1}$ ,光谱仪采集回波信号的积分时间  $t$  为 100 ms,空间目标与激光器的距离  $R$  为 200 m,根据上述实验条件及数据,通过(13)式计算得出的不同材料激光合作目标回波信号功率与激光发射功率的关系曲线如图 4 所示。

从图 4 中可以看出,三种材料微珠合作目标的后向激光雷达散射截面都随着激光发射功率的增加而增大,在激光发射功率相同时,折射率大的微珠激光合作目标的回波信号相对强度也大,随着激

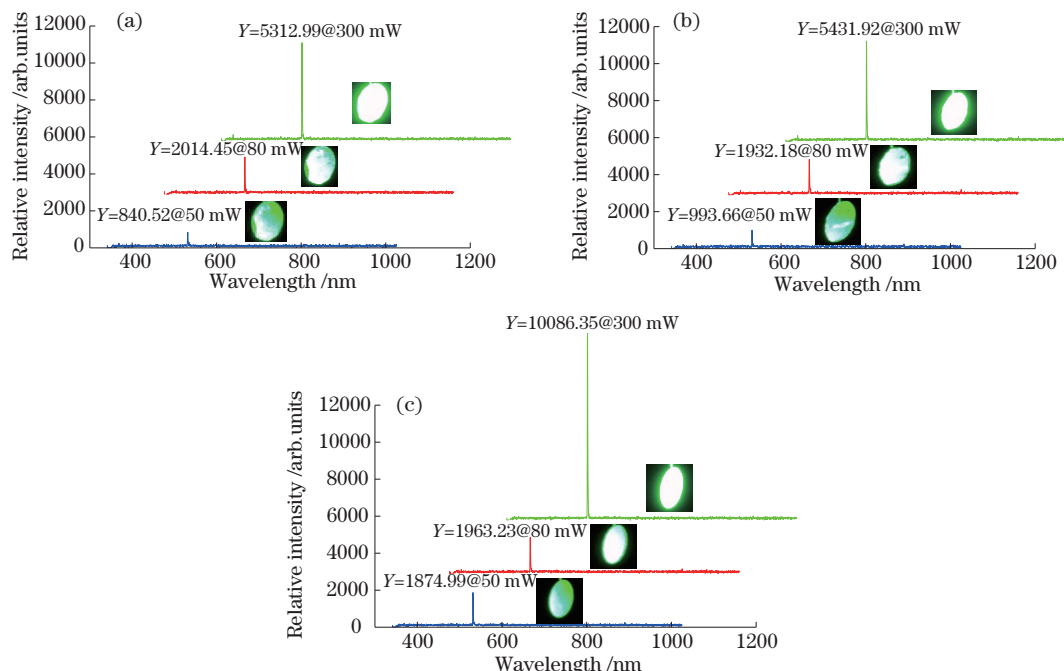


图 3 不同发射功率条件下三种材料微珠合作目标对于 532 nm 激光回波信号相对强度谱线。(a) SiO<sub>2</sub>; (b) K9 玻璃; (c) TiO<sub>2</sub>-BaO-SiO<sub>2</sub>

Fig. 3 Relative intensity spectral lines of three kinds of material cooperative targets with microspheres are relative to 532 nm laser under different transmit powers. (a) SiO<sub>2</sub>; (b) K9 glass; (c) TiO<sub>2</sub>-BaO-SiO<sub>2</sub>

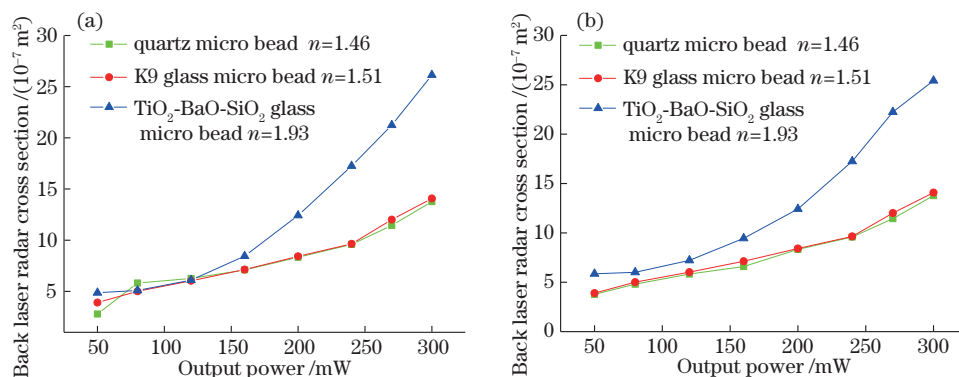


图 4 不同材料微珠合作目标的后向激光雷达散射截面与激光发射功率的关系曲线。(a)第一批材料;(b)第二批材料

Fig. 4 Relationship curves between back laser radar cross section of different materials cooperative target with microspheres and transmit power of laser. (a) First material; (b) second material

光发射光功率的逐渐增加,折射率为 1.93 的球形合作目标的后向激光雷达散射截面也逐渐增加,且增幅要远大于折射率为 1.46 和 1.51 这两种球形合作目标,这种现象说明折射率为 1.93 的球形合作目标的定向反射效果要明显优于折射率为 1.46 和 1.51 的球形合作目标,这一实验结果与理论分析结果相一致。

此外,在发射光功率较低时,折射率为 1.46、1.51 和 1.93 的球形合作目标的回波信号相对强度相差不大,而且还会出现反常现象,即当激光发射功率为 80 mW 时,折射率为 1.51 和 1.93 的球形合作目标的回波信号强度反而小于折射率为 1.46 的球形合作目标。出现这种情况的主要原因是激光合作目标装置在制作过程中,微珠不均匀地粘附在黑色圆形铝片上,导致激光光束在入射激光合作目标装置后产生了更为复杂光学散射现象,需要开展进一步研究。

为此,重新制作了一批合作目标,在不改变上述实验条件的基础上,重新对三种折射率微珠合作目标的激光雷达散射截面进行了测量计算,测量结果如图 4(b)所示。从图中可以看出,新一批微珠合作目标的激光雷达散射截面随着微珠合作目标折射率的增加而依次增大,说明微珠合作目标折射率与激光雷达散射截面呈现出一定的线性递增规律关系,而之前那批折射率为 1.46 的微珠合作目标出现反常规律,主要有两方面原因,一方面是因为微珠合作目标制作过程中产生的误差,导致部分情况微珠合作目标的回光反射效应增强,另一方面是因为接收装置的指向误差和光线耦合效率导致回波信号强度有所偏差,因此,折射率大的微珠合作目标,激光雷达散射截面反而小,这些问题都在图 4(b)中所对应的实验中得以修正。

## 5 结 论

本文利用激光雷达散射截面定义公式和光谱分析相关理论建立了球形合作目标后向激光雷达散射截面的数学模型。搭建了用于外场球形合作目标后向激光雷达散射截面的实验系统,在大气能见度良好的夜晚,利用该系统对三种材料球形合作目标回波信号的相对强度进行测量,利用所建立的数学模型可以计算三种材料球形合作目标的后向激光雷达散射截面,并给出了不同激光发射功率下三种材料球形合作目标的后向激光雷达散射截面。

对于同种材料的球形合作目标,激光发射功率越大,后向激光雷达散射截面越大,而在激光发射功率相同的情况下,微珠材料的折射率越大,后向激光雷达散射截面越大。对于不同材料的微珠合作目标,材料相对入射激光波长的折射率越大,激光雷达散射截面也越大;对于同一种材料的微珠合作目标,则发射激光功率越大,激光雷达的散射截面也越大。该研究结果对带有合作目标装置的空间目标激光雷达散射截面理论具有一定的补充和完善的作用,有助于主动式激光跟踪雷达系统的设计和优化。

## 参 考 文 献

- [1] Steinvall O. Effects of target shape and reflection on laser radar cross sections[J]. Applied Optics, 2000, 39(24): 4381-4391.
- [2] Bao X Z, Gao W. Method of laser radar cross section measuring with atmosphere condition changing[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(2): 414-417.  
包学志, 高卫. 大气条件变化时的激光雷达散射截面测量方法[J]. 光子学报, 2009, 38(2): 414-417.
- [3] Dai Y J. Laser radar technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics industry, 2010: 444-445.  
戴永江. 激光雷达技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 444-445.
- [4] Zhou P, Liu Z J, Xu X J, et al. Influence of turbulent atmosphere on the far-field coherent combined beam quality[J]. Chinese Optics Letters, 2008, 6(9): 625-627.
- [5] Zhang H F, Cheng Z E, Li P, et al. Design of lidar cooperative target and its application to space rendezvous and docking[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(9): 2556-2561.  
张海峰, 程志恩, 李朴, 等. 激光雷达合作目标设计及其在空间交会对接中的应用[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(9): 2556-2561.
- [6] Zhang P, Tian C L, Ding Y F, et al. Measurement of reflective properties of laser cooperation target applied in high temperature[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(3): 031204.  
张鹏, 田春林, 丁蕴丰, 等. 适用于高温环境的激光合作目标反射性能测量[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(3): 031204.
- [7] Wu D F, Wang Y W, Pu Y, et al. Thermal modal test of composite wing structure in high-temperature environments up to 1100 °C for hypersonic flight

- vehicles[J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 2015, 32(2): 323-331.
- 吴大方, 王岳武, 蒲颖, 等. 高超声速飞行器复合材料翼面结构 1100 °C 高温环境下的热模态实验[J]. *复合材料学报*, 2015, 32(2): 323-331.
- [8] Liu K X, Xu R G, Wu Z S, et al. Measurement and analysis of the outfield target's laser scattering characteristics[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(2): 206-212.
- 刘科祥, 许荣国, 吴振森, 等. 外场目标激光散射特性测量及分析[J]. *中国激光*, 2006, 33(2): 206-212.
- [9] Zhang L H, Yang Y, Zang H G, et al. Reflective characteristics of target in laser rangefinder[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(7): 1001-1004.
- 张雷洪, 杨艳, 臧华国, 等. 目标反射特性对激光测距的影响[J]. *中国激光*, 2008, 35(7): 1001-1004.
- [10] Zu S, Hu P P, Pan Q. Extraction method of artificial landmark center based on lidar echo intensity[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(8): 0810001.
- 祖爽, 胡攀攀, 潘奇. 基于激光雷达回波强度的人工路标中心提取方法[J]. *中国激光*, 2020, 47(8): 0810001.
- [11] Shen Z M, Lan T, Ni G Q, et al. Analysis of influencing factors of airborne full-waveform lidar echoes[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(S2): 284-290.
- 沈振民, 蓝天, 倪国强, 等. 机载全波激光雷达波形影响因素分析(英文)[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(S2): 284-290.
- [12] Han Y, Sun H Y, Li Y C, 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.
- [13] Obein G, Leroux T R, Vienot F. Bidirectional reflectance distribution factor and gloss scales[J]. *Proceedings of SPIE*, 2001, 4299: 279-290.
- [14] Villanueva Y, Veenstra C, Steenbergen W. Measuring absorption coefficient of scattering liquids using a tube inside an integrating sphere[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(11): 3030-3038.
- [15] Wenmaekers R H C, Hak C C J M, Hornikx M C J. The effective air absorption coefficient for predicting reverberation time in full octave bands[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2014, 136(6): 3063-3071.
- [16] Al Naboulsi M C, Sizun H, de Fornel F. Fog attenuation prediction for optical and infrared waves[J]. *Optical Engineering*, 2004, 43(2): 319-329.
- [17] Wang F B, Yi L, Wang F, et al. Polarization bidirectional reflection distribution function of metal surface based on diffuse reflection optimization[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(11): 1129002.
- 汪方斌, 伊龙, 王峰, 等. 基于漫反射优化的金属表面偏振双向反射分布函数[J]. *光学学报*, 2021, 41(11): 1129002.
- [18] Liu T, Zhu C, Sun C Y, et al. Influences of different weather conditions on performance of free-space quantum communication system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(2): 0227001.
- 刘涛, 朱聪, 孙春阳, 等. 不同天气条件对自由空间量子通信系统性能的影响[J]. *光学学报*, 2020, 40(2): 0227001.