

文章编号: 0258-7025(2008)07-1001-04

# 目标反射特性对激光测距的影响

张雷洪 杨 艳 臧华国 胡善江 陈卫标 陆雨田

(中国科学院上海光学精密机械研究所先进激光与应用系统实验室, 上海 201800)

**摘要** 针对非合作小目标激光测距系统, 目标表面的反射特征对激光回波信号有很大的影响。建立测量表面双向反射分布函数(BRDF)的装置, 对常用的两种热控材料——白漆涂层和 F36 多包层, 测量了其在 1064 nm 波长下的双向反射分布函数。得出了白漆涂层镜面反射很小, 散射角较大, 利于各方向接收回波信号; 而 F36 多包层镜面反射很强, 散射角  $-2^{\circ} \sim 2^{\circ}$ , 不利于探测。通过由表面 BRDF 与由朗伯散射计算得到的最小接收功率的比较, 得出了入射角大于  $45^{\circ}$  入射白漆涂层时, 回波信号较小; 大于  $2^{\circ}$  入射 F36 多包层时, 没有回波信号。

**关键词** 激光技术; 激光测距; 双向反射分布函数; 朗伯体

**中图分类号** P 225.2      **文献标识码** A      doi: 10.3788/CJL20083507.1001

## Reflective Characteristics of Target in Laser Rangefinder

Zhang Leihong Yang Yan Zang Huaguo Hu Shanjiang Chen Weibiao Lu Yutian

(The Novel Laser Technique and Application System Laboratory,

Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** For a laser range finder to measure the smallest non-cooperative target, the reflective characteristics of the target surface are significant for echoed signal. A experimental setup to measure the bidirectional reflection distribution (BRDF) of the surface is developed. The BRDF functions of white-painting coating and F36 cladding heating reflective materials at 1064 nm are obtained. The results show that the white-painting coating has small specular reflection and large scattering angle, it is better for laser range finder. While, the specular reflection of F36 material is too magnitude, and the scattering angle is only  $-2^{\circ} \sim 2^{\circ}$ . The echoed signal of laser rangefinder will be great fluctuation with the incident angle. Through comparing the minimal receiving power obtained by BRDF and Lambertian diffuse reflection, the echoed signal is very small, when the incident angle is larger than  $45^{\circ}$  and  $2^{\circ}$  for white-painting coating and F36 cladding, respectively.

**Key words** laser technique; laser rangefinder; bidirectional reflection distribution function; Lambertian

## 1 引 言

星载激光高度计和星载激光雷达在地球科学和空间技术中得到了重要应用。对地观测的星载激光高度计, 一般将陆地假设成一个朗伯反射面进行系统的设计<sup>[1~7]</sup>。但对于空间的飞行小目标, 如果简单地将目标假设为朗伯反射面来设计系统参数, 对系统的性能指标将有很大的影响, 甚至造成失败。在空间交会对接应用中, 激光雷达的测量目标均为合作目标, 一般都安装了可增强反射率的角反射镜,

对系统探测灵敏度要求不高<sup>[8~11]</sup>。而非合作目标的飞行物, 对其进行激光测距, 就需要研究其表面材料的双向反射分布函数(BRDF), 并根据该参数来优化设计激光测距仪的系统参数。本文针对这一应用目标, 建立一套简易测量双向反射分布函数的装置, 从而分析和计算接收望远镜接收的回波功率的影响, 并与标准的朗伯反射面的目标进行对比。

## 2 原 理

对于非合作小目标的距离测量, 如果采用同轴

收稿日期: 2007-09-14; 收到修改稿日期: 2007-12-03

作者简介: 张雷洪(1981—), 男, 江苏人, 博士研究生, 主要从事空间激光跟踪技术方面的研究。

E-mail: zlh12345\_2004@sina.com.cn

导师简介: 陈卫标(1969—), 男, 上海人, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光遥感、遥测和激光雷达方面的研究。

E-mail: wbchen@mail.shenc.ac.cn

方式收发的激光测距仪,探测器接收到的回波光功率可以用激光测距公式表示为<sup>[12,13]</sup>

$$P_R = \frac{P_T}{(\theta L)^2} \frac{\sigma}{4\pi L^2} A_R \eta_{\text{SYS}}, \quad (1)$$

式中  $P_T$  为激光发射功率,  $L$  为跟踪航天器和目标卫星的距离,  $\eta_{\text{SYS}}$  为接收和发射光学系统的传输效率,

$\theta$  为激光光束发散角,  $A_R = \frac{\pi}{4} D^2$  为接收望远镜的面积,  $D$  为接收望远镜口径,  $\sigma$  为激光雷达散射截面,  $\sigma = 4\pi f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) A_T \cos \theta_i \cos \theta_r$ ,  $A_T$  为卫星处在照明光束内的表面面积,  $f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$  为表面双向反射分布函数,  $\theta_i, \varphi_i$  分别为照明光束照射到目标表面的俯仰角和方位角,  $\theta_r, \varphi_r$  为激光测距系统的接收装置相对于目标表面的俯仰角和方位角。由于收发同轴,  $\theta_i = -\theta_r, \varphi_i = \varphi_r = 0$ 。对于标准朗伯反射体, 其  $\sigma = 4\rho A_T \cos \theta_i \cos \theta_r$ ,  $\rho$  为卫星表面总体反射率。

卫星表面双向反射分布函数是影响接收装置接收到回波光功率的主要因素之一, 对系统参数的设计非常重要, 如果简单按照朗伯反射体计算, 会造成系统设计的偏差。把目标表面材料的回波光功率  $P_{\text{RS}}$  与朗伯反射面<sup>[12]</sup> 计算得到的回波功率  $P_{\text{RL}}$  进行比较, 可以得到

$$\frac{P_{\text{RS}}}{P_{\text{RL}}} = \frac{4\pi f_{\text{rs}}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) A_T \cos \theta_i \cos \theta_r}{4\rho A_T \cos \theta_i \cos \theta_r} = \frac{\pi f_{\text{rs}}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)}{\rho}, \quad (2)$$

式中  $f_{\text{rs}}$  为目标表面材料的双向反射分布函数。

### 3 双向反射分布函数的测量方法和结果

双向反射分布函数实验测量时采用样本比值法<sup>[14,15]</sup>, 即在相同的几何条件和物理条件下, 测量被测样片与标准板的双向反射分布, 根据已知的标准板的双向反射分布函数, 换算得到被测样片的双向反射分布函数, 测量换算公式为

$$f_{\text{rs}}(\theta_i, 0, -\theta_i, 0) = f_{\text{tr}}(\theta_i, 0, -\theta_i, 0) \frac{V_s}{V_f}, \quad (3)$$

式中  $f_{\text{tr}}$  为与样片有相同入射角和散射角时标准板的双向反射分布函数,  $V_s$  和  $V_f$  分别为样片和标准板对应的测量电压值。

根据激光测距装置收发同轴的特性, 本文只测量收发同轴方向的卫星表面材料的 BRDF, 为此设计了一个收发同轴的测量装置<sup>[11]</sup>, 如图 1 所示。将样本安装在一个可以转动的旋转台上, 旋转轴线在测量装置收发轴线上, 旋转台最小分辨力为  $0.01^\circ$ 。

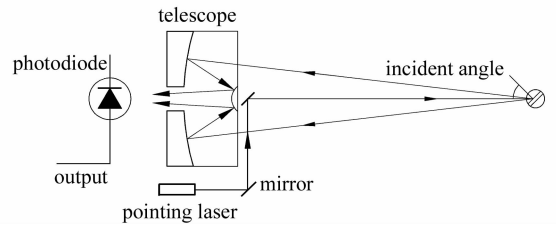


图 1 测量装置

Fig. 1 Measuring setup

采用雪崩光电二极管接收, 经过放大处理后, 由示波器读出光电转换电压。照明光束采用 1064 nm, 50 Hz 脉冲激光, 光斑直径 4 mm, 样片加工成 30 mm × 30 mm。样品旋转台轴线与光学收发端之间的距离为 3 m,  $\theta_i = -\theta_r, \varphi_i = \varphi_r = 0$ 。

利用图 1 装置, 对目前常用的两种热控材料(白漆涂层材料和 F36 多包层材料)进行测量, 测量材料的表面反射信号随不同入射角的关系, 入射角在  $0^\circ \sim 90^\circ$  之间变化。

为了验证材料对测量光波长的敏感性, 测量之前采用 Lambda-900 分光光度计, 对白漆涂层和 F36 包层在 900~1500 nm 波段的总体反射率光谱和漫反射率光谱进行了测量, 如图 2 所示。可见, 白漆涂层对 1064 nm 波长的光有很强的半球反射率, 为 89%, 其中镜面反射分量很小, 只占总反射率的 1%; F36 包层材料半球反射率为 91%, 漫反射率为

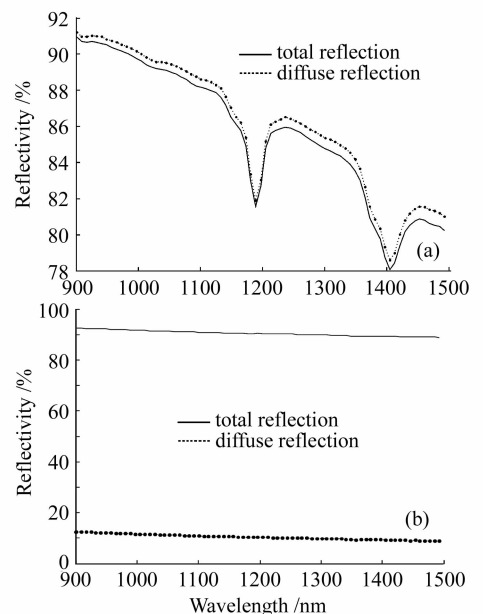


图 2 热控材料表面总体反射率和漫反射率

(a) 白漆涂层; (b) F36 包层

Fig. 2 Total reflectivity and diffuse reflectivity of thermal-controlling materials. (a) white-painting coating; (b) F36 cladding

11%，镜面反射很强，大部分光功率以镜面反射的形式反射出去；两种材料对 900~1500 nm 的光具有很强的反射率，对背景光有很强的反射率，利于保持卫星内部的温度，但 F36 包层表面较强的镜面反射不利于测距，而白漆涂层镜面反射很小对测距有利。

由测量装置测量得到的两种热控材料表面的 BRDF 如图 3 所示。可见，由于白漆涂层具有很大的表面粗糙度和材料各向同性，根据拟合曲线可知，白漆涂层表面的双向反射分布函数的散射近似于一个朗伯散射，具有一  $80^{\circ} \sim 80^{\circ}$  的散射角分布；随着照明光束入射角度的增大，逆入射角方向的反射越来越小；由于 F36 包层材料表面粗糙度较小，具有很强的镜面反射，散射角为  $-2^{\circ} \sim 2^{\circ}$ ，其他同轴接收方向基本接收不到信号。

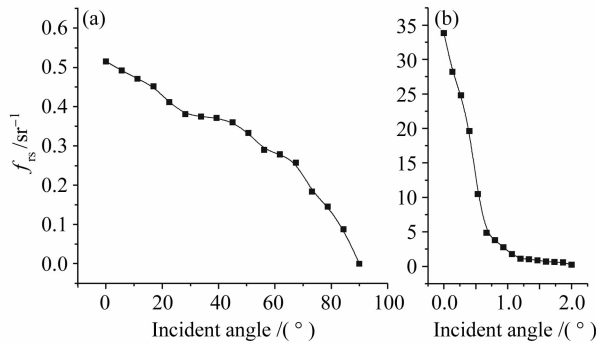


图 3 热控材料表面的 BRDF

(a) 白漆涂层；(b) F36 包层

Fig. 3 BRDF of thermal-controlling materials

(a) white-painting coating；(b) F36 cladding

#### 4 双向反射分布函数对测距回波的影响

根据(2)式，可以对比获得表面材料与假设朗伯反射面对激光测距的影响。图 4 为根据图 3 中的 BRDF 曲线计算得到的回波功率与朗伯反射计算得到的回波功率之比得到的接收回波功率比值与入射角的变化关系。

由图 4 可见，白漆涂层由于表面粗糙度较大，总体反射率为 89%，散射角很大，镜面反射很小，所以收发同轴的测距装置能够探测到以各种入射角入射的返回光信号；在入射角度小于  $45^{\circ}$  时，由白漆涂层表面 BRDF 计算得到的回波功率大于把卫星表面看成一个朗伯反射体计算得到的回波功率，而在入射角大于  $45^{\circ}$  时则相反；白漆涂层在大入射角度照明目标表面测量距离时，同轴收发装置很难探测到足够的信号，信噪比很小，从而影响测量精度；F36

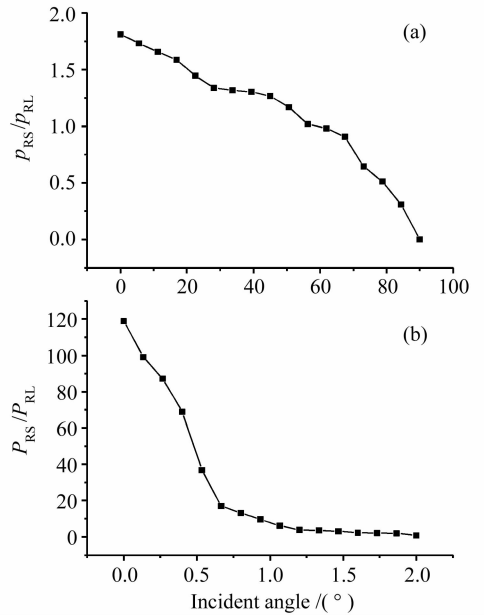


图 4 接收回波功率比值与入射角的关系

(a) 白漆涂层；(b) F36 包层

Fig. 4 Ratio of receiving echoed power versus incident angle. (a) white-painting coating；(b) F36 cladding

包层材料表面粗糙度很小，镜面反射很强，在入射角大于  $2^{\circ}$  时基本没有返回信号，而在正入射情况下，基本为镜面反射，回波信号为把卫星表面看成一个朗伯体计算得到的回波功率的 100 倍，所以需考虑这些材料可能导致探测器或者放大器过载。

由于被测目标可能是白漆涂层和 F36 包层材料的组合，因此系统设计时要考虑设计余量，将激光发射功率分成几个等级，激光测距时发射功率按由小到大逐步增加进行探测，消除大入射角度时回波较小造成的测量误差和减小目标表面镜面反射时回波较强对探测器的过载。如果能够事先获知目标的表面材料的双向反射分布函数，对激光测距非常关键。同时，如果通过获取目标姿态，调整激光入射与目标的夹角，可以充分利用回波信号。

#### 5 结论

对卫星表面后向散射回波的计算公式进行了推导，设计了一种测量表面 BRDF 的装置，对白漆涂层和 F36 多包层两种卫星表面材料的双向反射分布函数进行了测量。白漆涂层镜面反射很小，散射角较大，利于各方向接收回波信号；而 F36 多包层镜面反射很强，散射角  $-2^{\circ} \sim 2^{\circ}$ ，不利于探测。在分析两种卫星表面材料的反射分布的基础上，计算了最小接收光功率随卫星表面双向反射分布函数的变化量，并与把卫星表面看成一个朗伯散射计算得到

的最小接收功率进行了比较,提出设计系统激光发射功率时必须考虑设计余量。

### 参 考 文 献

- 1 Lei Linjun, Yang Yan, Chen Weibiao. High-accuracy time-interval-unit for spaceborne laser range finder [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(10):1422~1426  
雷琳君,杨燕,陈卫标. 星载激光测距仪的高精度时间间隔测量单元[J]. *中国激光*, 2007, **34**(10):1422~1426
- 2 Stefania, M. Rosaria Santovito, Antonio Mocaia. A new rangefinder system for microsatellite [C]. *SPIE*, 2003, **4028**: 235~240
- 3 Li Song. Recent progress of spaceborne laser altimeter system [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2004, **2**(6):4~6  
李松. 星载激光测高仪发展现状综述[J]. *光学与光电技术*, 2004, **2**(6):4~6
- 4 C. S. Gardner. Target signatures for laser altimeters: an analysis [J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(3):448~453
- 5 J. B. Abshire, Xiaoli Sun, R. S. Afzal. Mars orbiter laser altimeter: receiver model and performance analysis [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(1):15~20
- 6 Timothy D. Cole. NEAR laser rangefinder: a tool for the mapping and topologic study of asteroid 433 eros [J]. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 1998, **19**(2):142~151
- 7 J. B. Abshire, Xiaoli Sun, H. Riris *et al.*. Geoscience laser altimeter system (GLAS) on the icesat mission: pre-launch and on-orbit measurement performance [C]. *Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS'03, Proceedings 2003 IEEE International*, 2003. 1534~1536
- 8 Li Liangchao, Wu Zhensen, Deng Rong. Comparison of the back laser rader 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 Wang Mingjun, Wu Zhensen, Li Yingle *et al.*. Modeling and measuring the pulse laser scattering echo power from whole dimension target [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(11):1557~1561  
王明军,吴振森,李应乐等. 全尺寸目标激光脉冲后向散射回波功率测定和建模[J]. *中国激光*, 2006, **33**(11):1557~1561
- 10 Wang Guangchang, Zhang Shu. Recent progress on spaceborne lidar [J]. *Optoelectronic Technology & Information*, 1996, **10**(5):1~6  
王广昌,张曙. 星载激光雷达发展概况[J]. *光电子技术与信息*, 1996, **10**(5):1~6
- 11 Yang Chunping, Wu Jian, He Yi. Application of laser lidar in space rendezvous and docking [J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 1999, **28**(4):447~448  
杨春平,吴健,何毅. 激光雷达在空间交会对接中的应用[J]. *电子科技大学学报*, 1999, **28**(4):447~448
- 12 Leihong Zhang, Xiuhua Ma, Weibiao Chen *et al.*. Factors affecting laser power received in system of tracking, acquisition and pointing in space [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(Suppl.): S264~S267
- 13 Dai Yongjiang. Principles of Lidar [M]. Beijing: Natiinal Defence Industey Press, 2002. 6  
戴永江. 激光雷达原理[M]. 北京:国防工业出版社, 2002. 6
- 14 Yin Wangbao, Wang Lirong, Zhao Yanting *et al.*. BRDF measurements of selected surface materials under condition of simulation in situ circumstance [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(4):473~476  
尹王保,汪丽蓉,赵延霆等. 靶材料 BRDF 现场模拟测量[J]. *光子学报*, 2003, **32**(4):473~476
- 15 Wu Zhensen, Han Xiangge, Zhang Xiangdong *et al.*. Experimental study on bidirectional reflectance distribution function of laser scattering from various rough surfaces [J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(3):262~268  
吴振森,韩香娥,张向东等. 不同表面激光双向反射分布函数的实验研究[J]. *光学学报*, 1996, **16**(3):262~268