激光主动成像中的 BRDF 特性

孙华燕,郭惠超,范有臣,王 帅

(解放军装备学院,北京 101416)

摘 要:分析了常用的收发同路的 BRDF 函数模型,引入实折射率的函数描述介质特性进一步简化 SUN 模型,在传统的 BRDF 测试系统基础上,提出了一种基于图像分析的收发同路 BRDF 分析方法,采用激光主动成像实验系统照明目标样品板并成像,通过改变目标板与成像系统之间的夹角获得不同角度目标图像,进而利用图像灰度信息计算目标的 BRDF 值,最终得出 BRDF 曲线。针对不同材质进行了实验测量和仿真分析,结果表明:镜面反射目标在小角度范围内反射较强,漫反射目标较镜面反射目标有较大的可见角度范围,测试结果直接反映了成像性能,可体现不同目标材质的 BRDF 特性,为空间目标激光主动探测系统设计和系统成像性能分析提供数据和理论基础。

关键词:激光主动成像; BRDF; 图像分析; 漫反射

中图分类号:TP391 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201746.S106004

Analysis of BRDF character in active laser imaging

Sun Huayan, Guo Huichao, Fan Youchen, Wang Shuai

(Academy of Equipment, Beijing 101416, China)

Abstract: The commonly used BRDF function model in the active laser imaging system was analyzed in this paper. In order to further simplify the SUN model, real refractive index function was introduced to descript the characteristics of medium. On the basis of the traditional BRDF theory, a methed based on image analysis was proposed to analyze the BRDF values of targets in the active laser imaging system. Laser active imaging system was used to illuminate the target sample plate and image, and the target image was obtained by changing the angle between the target plate and the imaging system. The BRDF values of targets were calculated with the gray values of those images, and then the BRDF curves were obtained. Experimental measurement and simulation analysis were carried out for different materials. The results indicate that the reflection of specular reflection is stronger in the range of small angle, and the reflection of diffuse reflection targets can be detected within a larger angular range. The test results directly reflect the imaging performance, which can reflect the BRDF characteristics of different target materials. The results provide data and theoretical basis for the design of the laser active detection system of the space target and the performance analysis of the system.

Key words: active laser imaging; BRDF; image analysis; diffuse reflection

收稿日期:2017-06-07; **修订日期**:2017-07-17

基金项目:国家自然科学基金(61302183)

作者简介:孙华燕(1963-),女,教授,博士,主要从事光电信息处理与对抗方面的研究。Email:shy2215280@vip.sina.com

0 引 言

双向反射分布函数 (Bi-directional Reflectance Distribution Function, BRDF)是对空间目标激光散射特性的描述函数[1],描述目标表面特性的 BRDF 模型[2]有 Phong 模型、Torrance-Sparrow 模型、Cook-Torrance 模型、Nayar 模型、Yoder 模型[3]、五参数模型[4]、改进的 SUN 模型[5]、Davies 模型[6]、FOI 模型[7]、Sandford-Robertson 模型[8]等,这些模型有的从微观方面反映了目标的激光散射特性, 有的从实验数据出发拟合目标的 BRDF 值, 在一定范围内反映了目标散射特性。文中提出了一种基于图像分析的收发同路 BRDF 分析方法, 建立了图像灰度与 BRDF 值的关系, 通过测试实验系统对几种典型的材料进行了 BRDF 特性测试,验证了模型的正确性。

1 BRDF 模型

双向反射分布函数的表达式如下:

$$f_r(\theta_i,\phi_i;\theta_r,\phi_r)=\frac{\mathrm{d}L_r(\theta_i,\phi_i;\theta_r,\phi_r)}{\mathrm{d}E_i(\theta_i,\phi_i)} \tag{1}$$

式中:L_i 表示光源的辐射亮度;A_i 表示目标表面;$\mathrm{d}E_i$ 表示 $s(\theta_i,\phi_i)$方向上立体角 $\mathrm{d}\omega_i$ 内入射辐射照度;$\mathrm{d}L_r$ 表示 $r(\theta_r,\phi_r)$方向上 $\mathrm{d}\omega_r$ 立体角元反射光辐射亮度,其几何关系如图 1 所示。

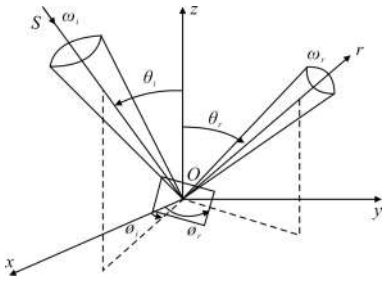


图 1 双向反射分布函数的几何关系

Fig.1 Geometrical relationship of BRDF

在激光主动成像系统中常用的经验 BRDF 模型是 FOI 模型,其表达式如下:

$$\mathrm{BRDF}(\mathrm{sr}^{-1})=A\cos^m(\theta)+\frac{B}{\cos^6(\theta)}\exp\left(-\frac{\tan^2(\theta)}{s^2}\right) \tag{2}$$

式中:A 表示漫反射幅度系数;m 表示漫反射系数;θ 表示入射角;FOI 模型是收发同路的模型,因此入射角等于反射角;B 表示镜面反射幅度系数;s 表示镜面反射系数。该模型需基于实验数据进行拟合,参数与目标材质特征参数没有直接对应关系, 不利于理论建模。

参考文献[9]建立的 SUN 模型基于统计分析的理论推导,可用于高斯和非高斯多种表面,并支持偏振、遮挡、传输、各向异性的散射分析,且表达式中各参数都具有对应的物理意义, 便于分析目标激光散射特性的各因素, 与考虑诸多因素的其他模型比具有相对简单的表达形式, 因此选择该模型进行空间目标激光散射特性分析。其表达式为:

$$\mathrm{BRDF}(\theta_i,\varphi_i;\theta_r,\varphi_r,\lambda)=\frac{s^2F(\theta_i,\lambda)\exp(-s^2\tan^2\theta_h/4)}{16\pi\cos\theta_i\cos\theta_r\cos^4\theta_h}V(\theta_i)V(\theta_r) \tag{3}$$

其中 $s=\frac{\tau}{\sigma}$,

$$\cos\theta_h=\frac{\cos\theta_i+\cos\theta_r}{\sqrt{2+2(\sin\theta_i\sin\theta_r\cos(\varphi_i-\varphi_r)+\cos\theta_i\cos\theta_r)}} \tag{4}$$

$$V(\theta)=\exp\left[-\frac{0.7\tan\theta}{s}\exp\left(-\frac{s^2}{4\tan^2\theta}\right)\right] \tag{5}$$

式中:θ_i 表示入射天顶角;θ_r 表示观测天顶角;τ 表示表面自相关长度;ρ 表示反射率;s 表示目标的光滑程度,s 越大表示目标越光滑, 对于理想光滑表面,$s\to\infty$;$F(\theta_i,\lambda)$为菲涅尔反射系数;φ_i 表示入射方位角;φ_r 表示观测方位角。

SUN 模型由于在推导过程中忽略了多次散射的影响,当 $s<2$ 时,目标自遮挡效应影响较大,此时模型与实际情况偏差较大, 但是仍可反映 BRDF 随角度的变化趋势。

由于 SUN 模型中采用参考文献[10]中给出的 $F(\theta_i,\lambda)$,采用复折射率描述介质特性,需确定目标消光系数 η 和折射指数 κ 两个参数, 形式复杂且参数值不易获得,为简化分析,文中采用参考文献[10]中的 $F(\theta_i,\lambda)$表达式:

$$F(\theta_i,\lambda)=\frac{1}{2}\frac{n_i^2(\lambda)\cos^2\theta_i+J(\lambda,\theta_i)-2n_i(\lambda)\cos\theta_i\sqrt{J(\lambda,\theta_i)}}{n_i^2(\lambda)\cos^2\theta_i+J(\lambda,\theta_i)+2n_i(\lambda)\cos\theta_i\sqrt{J(\lambda,\theta_i)}}+\frac{1}{2}\frac{n_r^2(\lambda)\cos^2\theta_i+n_{ir}^2(\lambda)J(\lambda,\theta_i)-2n_i(\lambda)\cos\theta_i\sqrt{J(\lambda,\theta_i)}}{n_r^2(\lambda)\cos^2\theta_i+n_{ir}^2(\lambda)J(\lambda,\theta_i)+2n_i(\lambda)\cos\theta_i\sqrt{J(\lambda,\theta_i)}} \tag{6}$$

其中 $J(\lambda,\theta_i)=n_r^2(\lambda)-n_i^2(\lambda)+n_i^2(\lambda)\cos^2\theta_i$。

这里 $F(\theta_i,\lambda)$是实折射率的函数,n_i 为入射光所在介质折射率,n_r 为目标表面材质折射率,对同种材料,介质折射率与波长有关。正入射情况下,垂直分

量和平行分量之间的区别消失，反射率 ρ 与折射率有如下关系[11]：

$$\rho=\left(\frac{n_i-n_r}{n_i+n_r}\right)^2 \tag{7}$$

一般测试获得的反射率参数都是在大气环境下得到的，取空气的折射率约为 1.003，可由反射率参数计算得出目标的折射率。这样处理，相比于折射指数和消光系数，反射率参数较易通过查阅文献或简单测试装置获得。

因是收发同路系统，这里 $\theta_i=\theta_r$，$\varphi_i=\varphi_r$，对 SUN 模型进行简化得到下式：

$$\mathrm{BRDF}(\theta,\lambda)=\frac{s^2F(\theta,\lambda)\exp(-s^2\tan^2\theta/4)}{16\pi\cos^6\theta}V^2 \tag{8}$$

式中：待定参数有目标折射率 $n_r(\lambda)$，表面高度均方根 σ 和自相关长度 τ。

2 系统构建

2.1 传统 BRDF 测试系统

目前 BRDF 模型建模的研究成果中一般只针对单次散射的情况，针对非常粗糙目标光散射中微观表面起伏的遮挡、多次散射等问题的理论建模还有待深入。

通过实验测量目标的 BRDF 特性比理论建模更具有说服力，可以弥补理论建模的不足，建立基于实验数据的典型目标特性数据库，可以为系统设计与分析提供支撑。

一般的 BRDF 测试系统如图 2 所示[12]，BRDF 测量系统一般包括光源、探测器、转角装置及数据处理系统，采用光束发射和探测分离的结构，一般采用光电倍增管或半导体光电二极管单元器件作为探测器，通过调整入射角和散射角测量各个方向的散射强度，最终得到全方向的 BRDF 特性。

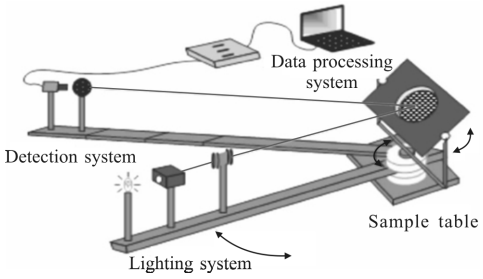


图 2 一般 BRDF 测试系统构成示意图

Fig.2 General BRDF experimental system

2.2 基于图像分析的收发同路 BRDF 测试方法原理

激光主动成像系统所成图像与目标 BRDF 特性直接相关，考虑到激光主动成像系统本身就具备激光发射和接收的功能，将图 2 中激光器和探测器用激光主动成像系统代替，用输出图像亮度取代单元探测器输出电压值即可以进行目标特性测量，同时还可以通过图像更直观地体现不同目标表面的成像效果。基于此，文中提出了一种基于图像分析的收发同路 BRDF 分析方法。

由激光主动成像原理可知，系统中目标亮度与入射辐照度和夹角余弦之积成正比、像面辐照度与目标亮度成正比、接收光能与图像灰度成正比的关系（工作于线性区），利用这些关系即可建立图像灰度与 BRDF 值的关系：

$$\mathrm{BRDF}=k\frac{\mathrm{Gray}}{\cos\theta} \tag{9}$$

式中：k 为比例系数；Gray 为图像平均灰度值；θ 为目标靶板法线与激光主动成像系统视轴的夹角。

采用激光主动成像实验系统照明目标样品板并成像，通过改变目标板与成像系统之间的夹角获得不同角度目标图像，进而利用图像灰度信息计算目标的 BRDF 值，最终得出 BRDF 曲线。利用标准漫反射板获得的 BRDF 值与其他材质的靶板测量值相比即可得到测量值。

文中在测量时标准漫反射板还在定制过程中，采用计算的方法确定 k 值，虽存在误差但可以验证该方法用于测量 BRDF 特性是可行的。所涉及参数计算流程如图 3 所示，系统中目标入射辐照度可由

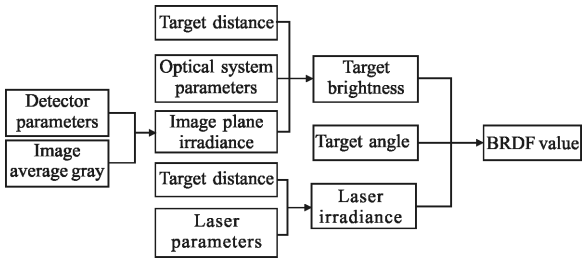


图 3 基于成像性能的 BRDF 参数计算流程图

Fig.3 Algorithm flowchart of measuring BRDF based on imaging performance

激光功率、发散角、距离确定；夹角由转台控制部分设定；像面辐照度与目标亮度的关系可由几何光学的像面辐照度计算公式获得[13]：

$$E(x,y)=\frac{1}{4}\pi L(x,y)\tau_{opt}\left(\frac{D}{d_i}\right)^2 / \left[1+\frac{1}{4}\left(\frac{D}{d_i}\right)^2\right]\approx$$

$$\frac{1}{4}\pi L\tau_{opt}\left(\frac{D}{f}\right)^2 / \left[1+\frac{1}{4}\left(\frac{D}{f}\right)^2\right] \tag{10}$$

式中：D 为光学系统口径；d_i 为像距；f 为光学系统焦距；τ_{opt} 为光学系统透过率；$L(x,y)$为目标面元辐亮度；接收光能与图像灰度之间的关系可由成像器件特性分析或测量获得。图像中存在噪声，为减小其影响采用 50 帧图像平均的方式去噪。

2.3 BRDF 特性测量实验系统构建

建立如图 4 所示的直接利用激光主动成像系统进行 BRDF 特性测量的实验系统，其中目标板为平板，覆以不同材质，置于电动转台上，目标相对于成像系统的转角可由计算机 2 设定，激光主动成像系统由激光发射、接收成像、同步控制、图像采集等构成，由计算机 1 控制。

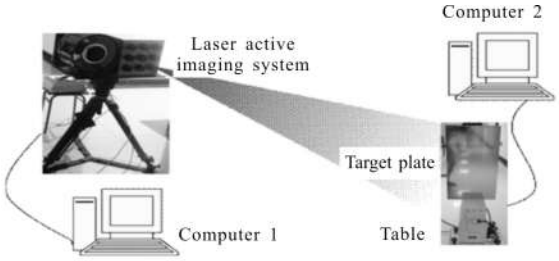


图 4 基于成像性能的 BRDF 特性测量实验系统

Fig.4 Experimental system of BRDF character measuring which based on imaging performance

3 仿真与实验分析

3.1 实验结果

以太阳能电池裸片为例，如图 5 所示为目标在不同转角时所成图像，每一位置获取 50 幅图像进行叠加平均，图像下面数字为对应角度(单位(°))，通过图像处理的方法抠取太阳能电池板上一部分区域进行图像灰度均值计算，得出角度与图像灰度值的关系曲线，而后根据公式(9)获得 BRDF 特性曲线。

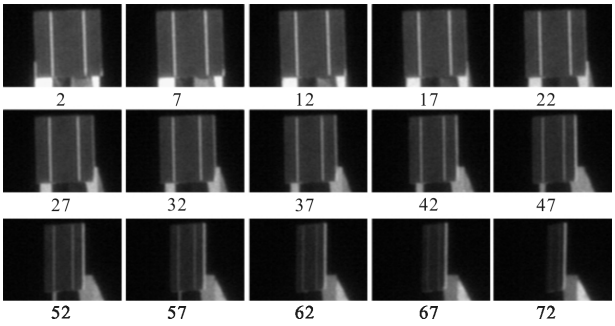
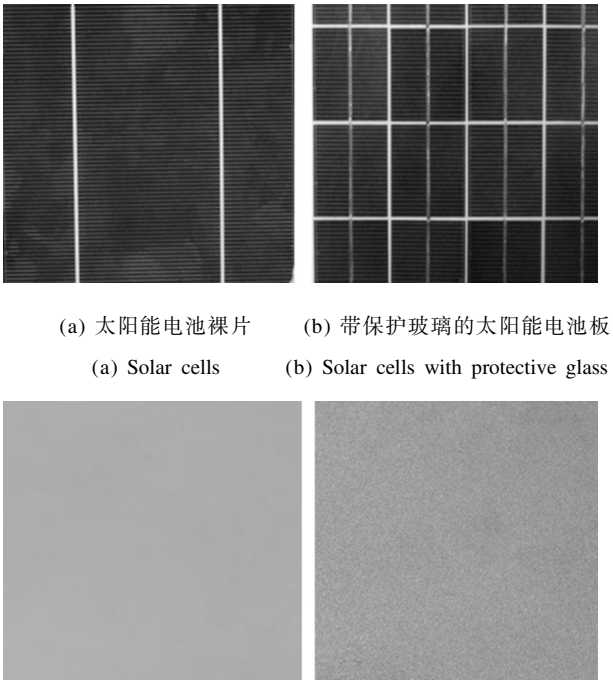


图 5 太阳电池裸片作为测试目标的成像结果

Fig.5 Images of solar cells

选择了几种不同材料进行了 BRDF 特性测量实验。镜面反射为主的目标有：金色薄膜、银色薄膜、带有保护玻璃的太阳能电池片；漫反射为主的目标有：氧化处理的铝板、太阳能电池裸片、白色石膏板、白色塑料贴膜，如图 6 所示。



(a) 太阳能电池裸片 (b) 带保护玻璃的太阳能电池板

(a) Solar cells (b) Solar cells with protective glass

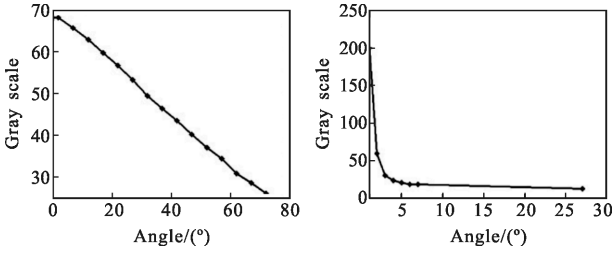
(c) 白色薄膜 (d) 白色石膏板

(c) White thin film (d) White plasterboard

图 6 测试所用目标实物图

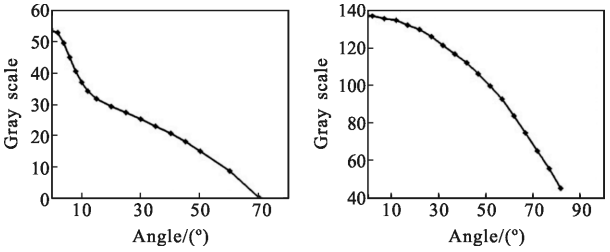
Fig.6 Targets used in experiment

图 7 给出了针对不同材质测量时获得的角度与目标图像灰度值关系曲线，图 8 给出了在此基础上得出的 BRDF 值。



(a) 太阳能电池裸片 (b) 带保护玻璃的太阳能电池板

(a) Solar cells (b) Solar cells with glass

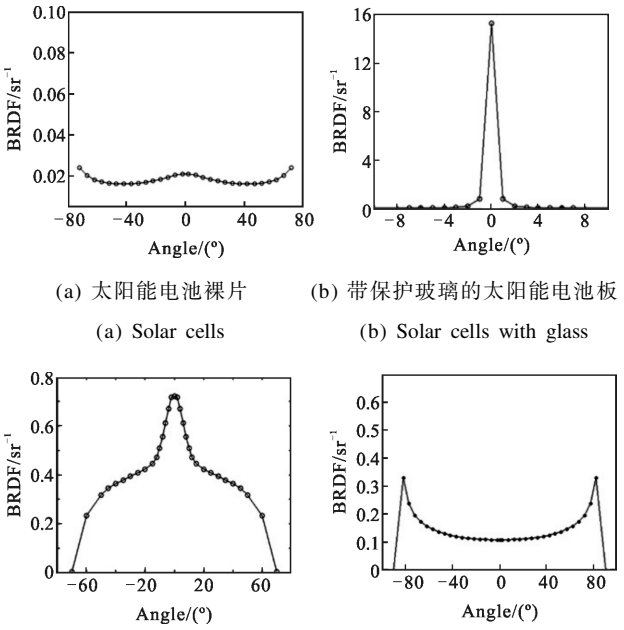


(c) 白色薄膜 (d) 白色石膏板

(c) White thin film (d) White plasterboard

图 7 角度与图像灰度值关系

Fig.7 Relationships between angles and gray values



(a) 太阳能电池裸片 (b) 带保护玻璃的太阳能电池板

(a) Solar cells (b) Solar cells with glass

(c) 白色薄膜 (d) 白色石膏板

(c) White thin film (d) White plasterboard

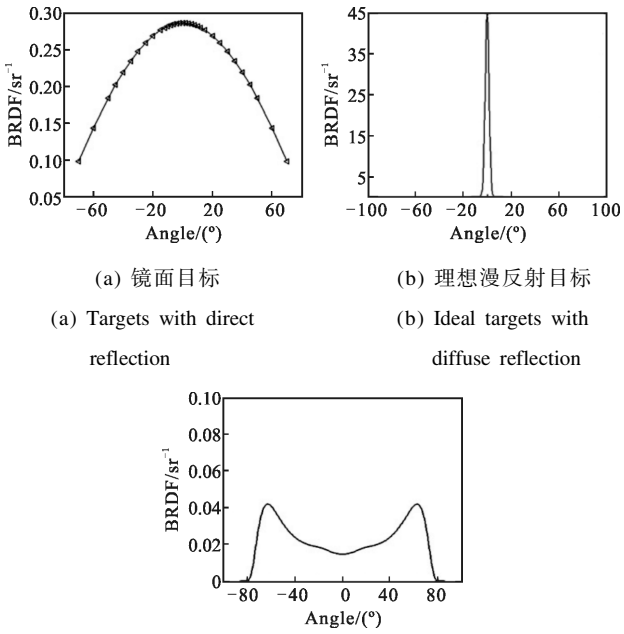
图 8 不同材质目标 BRDF 特性测试结果

Fig.8 Results of BRDF with different targets

从以上测试得到的数据来看，镜面反射目标在小角度范围内反射较强，漫反射目标较镜面反射目标有较大的可见角度范围，测试结果直接反映了成像性能，可体现不同目标材质的 BRDF 特性。由于未使用标准漫反射板，测试结果存在一定误差，但验证了这种测试分析方法是可行的。

3.2 与理论模型对比

与理论模型相比：对于趋近于镜面反射的带保护玻璃的太阳能电池板(见图 9(b))，测试得到的 BRDF 曲线在很小的角度内存在尖峰，与理论模型仿真曲线特征吻合较好，说明主动成像时目标与视轴的夹角将显著影响目标可见性；对于既有镜面反射也有漫反射的白色塑料薄膜，其 BRDF 曲线在小角度内存在尖峰但角度增大后变化趋势与理想漫反射 BRDF 曲线特征(见图 9(c))接近，SUN 模型难以描述这种情况；对于趋近于漫反射的白色石膏板，其 BRDF 曲线呈现出随角度增大逐渐增大而后减小的趋势，这与 SUN 模型描述的漫反射目标 BRDF 特性(见图 9(d))变化趋势相同，但 SUN 模型理论值与实测值相差较大，通过添加修正系数项可将 SUN 模型用于描述漫反射目标，在用于下文的分析时取修正系数为 10。



(a) 镜面目标 (b) 理想漫反射目标

(a) Targets with direct reflection (b) Ideal targets with diffuse reflection

(c) 粗糙表面目标

(c) Targets with rough surface

图 9 SUN 模型典型目标 BRDF 特性曲线

Fig.9 BRDF curves of typical targets with SUN model

占空间目标表面比例最大的材料主要为太阳能电池板和卫星主体外壳涂层材料，太阳能电池板的反射特性接近于镜面反射和漫反射，而主体外壳涂层材料接近于漫反射。其反射率介于 0.1~0.9 之间，由于太阳能电池板一般面积较大，而主体相对较小，按照面积比 3:1 计算，整体平均反射率为 0.3，该值也是目前学界普遍认可的数值。

由理论模型和实验数据的比对可知：虽然 SUN 模型不能用于描述镜面散射和漫反射都较强的目标，但在描述接近镜面反射的目标时是适用的，在描述近似漫反射目标时添加修正系数项也适用，这样 SUN 模型可以用于描述空间目标两类主要的表面材

料散射特性。

4 结 论

文中分析了空间目标表面激光散射特性 BRDF，在改进 SUN 模型的基础上对典型空间目标材质收发同路 BRDF 特性进行了理论仿真分析和实验验证，提出了一种基于图像分析的收发同路 BRDF 特性分析方法，建立了测试实验系统，对几种典型的材料进行了 BRDF 特性测试，结果表明：该分析方法既可以用于分析目标属性，又可以直观地反映目标的成像特性，可为成像性能分析、系统设计等提供支撑。

参考文献：

[1] Ren Hu. The theoretical model building and reflectance distribution function of polytype surfaces[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006. (in Chinese)
任虎. 多种表面双向反射分布函数的理论建模与实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.

[2] Li Bo, Zhao Huaici, Hua Haiyang. Infrared multispectral image simulation method [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2014, 43(6): 1972-1976. (in Chinese)
李波, 赵怀慈, 花海洋. 红外多光谱图像仿真方法研究[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(6): 1972-1976.

[3] Rastislav Telgarsky, Michael C Cates, Carolyn Thompson, et al. High fidelity ladar simulation [C]//SPIE, 2004, 5412: 194-207.

[4] Yuan Yan, Sun Chengming, Zhang Xiubao. Measuring and modeling the spectral bidirectional reflection distribution function of space target's surface material [J]. ***Acta Physica Sinica***, 2010, 59(3): 2097-2103. (in Chinese)
袁艳, 孙成明, 张修宝. 空间目标表面材料光谱双向反射分布函数测量与建模[J]. 物理学报, 2010, 59(3): 2097-2103.

[5] Wang Fugang, Zhang Wei, Wang Hongyuan. Reflection characteristics of on-orbit satellite based on bidirectional reflectance distribution function [J]. ***Guangdian Gongcheng/ Opto-Electronic Engineering***, 2011, 38(9): 6-12. (in Chinese)
王付刚, 张伟, 汪洪源. 基于 BRDF 的在轨卫星反射特性[J]. 光电工程, 2011, 38(9): 6-12.

[6] Liu Jianbin. Researches on the light scattering properties of satellite based on the bidirectional reflectance distribution function[J]. ***Journal of Light Scattering***, 2011, 23(3): 206-212. (in Chinese)
刘建斌. 基于双向反射分布函数的卫星表面光散射研究[J]. 光散射学, 2011, 23(3): 206-212.

[7] Paleologue. Active infrared systems: possible roles in ballistic missile defense[C]//SPIE, 2006, 6214: 621401.

[8] Jin Xiaofeng, Sun Jianfeng, Yan Yi, et al. Filters effects for different objects surfaces in reflective tomographylaser radar [C]//SPIE, 2010, 7780: 778016.

[9] Sun Yinlong. statistical ray method for deriving reflection models of rough surfaces [J]. ***Optical Society of American***, 2007, 24(3): 724-744.

[10] Elli Angelopoulou, Sofya Poger. Specular highlights of plastic surfaces and the Fresnel coefficient [C]//SPIE, 2004, 5578: 465-475.

[11] Born M, Wolf E. Principles of Optics [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2009. (in Chinese)
马克斯·波恩, 埃米尔·沃尔夫. 光学原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.

[12] Wang Anxiang, Li Ping, Zeng Zhenchao. Experiment measurements on scattering characteristic of solar panels for satellite [J]. ***Basic Sciences Journal of Textile Universities***, 2007, 20(3): 294-297. (in Chinese)
王安祥, 李萍, 曾震超. 卫星太阳能电池板光散射特性的实验测试[J]. 防治高校基础科学学报, 2007, 20(3): 294-297.

[13] Huang Chen, Liang Xiaohu, Gao Xin, et al. Modeling and simulation of space based UV detection imaging plane irradiance for the of ballistic missile boost phase[J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2013, 42(6): 1404-1409. (in Chinese)
黄晨, 梁小虎, 高昕, 等. 导弹主动段天基紫外探测像面照度建模与仿真[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(6): 1404-1409.