

doi:10.3788/gzxb20144311.1122003

# 基于 TracePro 的空间目标光学散射特性建模与仿真

孙成明, 赵飞, 张泽

(中国科学院光电研究院, 北京 100094)

**摘 要:**为给空间目标光学探测与识别提供数据支持,建立了基于 TracePro 的空间目标光学散射特性计算模型.以空间目标天基红外系统为例,综合考虑目标的结构特性、材料特性、背景特性及轨道特性,通过 TracePro 中建立几何模型、设定材质、设定光源、计算光线路径等环节,对目标光学散射特性进行仿真分析.结果表明,目标的光谱辐照度曲线与太阳一致.镜反射时,目标的等效光谱反射率曲线与砷化镓电池片一致,随着目标旋转,目标的等效光谱反射率曲线趋向于与包覆材料一致,而后保持不变.为空间目标光学散射特性研究思路提供了借鉴.

**关键词:**空间光学;空间目标;散射特性;TracePro;建模与仿真

**中图分类号:**O432.1;O435.1

**文献标识码:**A

**文章编号:**1004-4213(2014)11-1122003-5

## Modeling and Simulation of Space Object Optical Scattering Characteristics Using TracePro

SUN Cheng-ming, ZHAO Fei, ZHANG Ze

(Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

**Abstract:**For supplying space object detection and recognition with reference data, space object optical scattering characteristics model is established using TracePro. Combining with structure, material, background and orbit, the optical scattering characteristics of the space-based infrared system is simulated by creating solid model, defining material, defining light source and tracing rays in TracePro. The simulation results show that the object spectral irradiance is coincident with that of the sun. The object equivalent reflectivity is coincident with that of the GaAs in specular direction. As the object rotates, the object equivalent reflectivity turns to agree with that of the cladding material, and then keeps stable. The research could provide reference idea for the next work.

**Key words:**Space optics;Space object;Scattering characteristics;TracePro;Modeling and simulation

**OCIS Codes:**220.4830;290.4210;290.1483;030.6600;300.6170

## 0 引言

随着空间技术的迅猛发展,空间目标的数量不断增加.目标结构的复杂性、材料的各异性、背景的时变性、轨道的多样性为目标探测与识别提出了新的挑战.空间目标光学特性作为光电探测系统感知的信息,是空间目标探测与识别的基础和依据.空间目标光学特性包括目标的辐射特性和散射特性.由于地基和天基空间目标光电探测系统主要集中在可见光波段,因此空间目标光学散射特性作为重点研究内容,正在受到

越来越多的关注<sup>[1]</sup>.

空间目标光学散射特性可通过目标反射背景辐射在探测器入瞳面上产生的辐照度分布来描述.研究方法总体上可分为解析法和蒙特卡罗光线追迹法(Monte Carlo Ray Tracing, MCRT)两类.解析法通过分析问题中各要素之间的关系,用语言或符号得出解决问题所需的表达式,然后设计程序求解问题.1967年,Lambert模型被建立起来用于模拟物体表面在光源直接照射下的漫反射光的分布.西安光学精密机械研究所<sup>[2]</sup>等应用Lambert理论研究了目标光学散射特性与目标尺寸、表面材料、观测角、观测距离之间的关

**基金项目:**国家自然科学基金(No.61308101)和国家高技术研究发展计划(No.2012AA7892005)资助

**第一作者:**孙成明(1984-),男,助理研究员,博士,主要研究方向为空间目标光学探测与识别. Email: sunchengming2008@163.com

**收稿日期:**2014-03-25; **录用日期:**2014-05-09

<http://www.photon.ac.cn>

系. 随着研究工作的不断深入, 发现双向反射分布函数 (Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF) 能更形象、更精确地描述目标表面的光学散射特性. BRDF 由 Nicodemus<sup>[3]</sup> 于 1965 年提出, 是从辐射度学出发、在几何光学的基础上描述表面散射特性的物理量, 定义为光辐射的反射辐亮度和入射辐照度的比值. 法国图卢兹第三大学<sup>[4]</sup>、德国汉堡联邦国防军大学<sup>[5]</sup>、西安电子科技大学<sup>[6]</sup>、安徽光学精密机械研究所<sup>[6]</sup>、哈尔滨工业大学<sup>[7]</sup>、北京航空航天大学<sup>[8-10]</sup> 等测试和评估了多种材料的 BRDF 特性, 结合目标尺寸分析了目标在不同观测条件下的光学散射特性. 当前面临的问题是 BRDF 的建模与参量优化. 目前研究者采用不同的 BRDF 模型进行计算分析, 得到的结论各有不同, 不便于对研究成果进行比对和评判. 利用解析法分析目标光学散射特性, 表达直观易懂、物理意义清晰明确. 但分析过程中未考虑光线在目标各表面之间的多次反射问题, 这种简化分析方法对于实际应用还有一定的距离. 此外, 在程序设计及实现上存在一定的难度. MCRT 基本思路是将一个表面的辐射能看作是由大量独立的能束组成, 跟踪每束发射光线在系统内的传播, 当其到达某个表面时, 光线的吸收、反射、散射、折射也是随机过程, 若被该表面吸收, 则停止跟踪该束光线, 若被拦截表面反射、散射或折射, 则继续跟踪光线的传播, 直至被系统内表面吸收或进入空间环境. 芬兰赫尔辛基大学<sup>[11]</sup>、美国国家标准与技术研究院<sup>[12]</sup> 等基于随机粗糙表面微面元模型, 利用 MCRT 分析了散射光的传输问题. 利用 MCRT 分析目标光学散射特性, 概率模型适用于光线在多表面之间的传输. 此外, 在程序设计及实现上相对容易. 但缺乏表面具体物性支撑, 这种单纯分析方法对于实际应用同样存在一定的局限.

本文在综合考虑目标的结构特性、材料特性、背景特性及轨道特性的基础上, 利用 TracePro 对空间目标光学散射特性进行精确建模与仿真, 为空间目标光学探测与识别提供数据支持.

## 1 TracePro 光学仿真软件

TracePro 光学仿真软件继承和发扬了解析法和 MCRT 两种方法的优点. 其核心思想是具有表面具体物性支撑的 MCRT. TracePro 将 BRDF 引入到目标表面材料特性中, 利用 ABg 模型描述不同波长、不同角度的 BRDF 分布. 此外, TracePro 利用光线分裂 (Ray splitting) 和重点取样 (Importance sampling) 用于指定光线产生和传播的方向, 可使用户感兴趣的某个表面 (或多个表面) 的光线数增加, 但不改变实际结果. 其具体计算过程包括建立几何模型、设定材质、设定光源、计算光线路径等.

$$\text{BRDF} = \frac{A}{B + |\boldsymbol{\beta} - \boldsymbol{\beta}_0|^g} \quad (1)$$

式中:  $A$ 、 $B$ 、 $g$  为待定参数;  $\boldsymbol{\beta}$  为散射方向单位向量在目标表面投影向量;  $\boldsymbol{\beta}_0$  为镜反射方向单位向量在目标表面投影向量.

## 2 基于 TracePro 的空间目标光学散射特性分析

以空间目标天基红外系统 (Space-Based Infrared System, SBIRS) 为例, 综合考虑目标的结构特性、材料特性、背景特性及轨道特性, 通过 TracePro 中建立几何模型、设定材质、设定光源、计算光线路径等环节, 对目标光学散射特性进行仿真分析, 获取目标的光谱辐照度、等效光谱反射率分布.

### 2.1 建立几何模型

根据目标的结构、尺寸等, 利用 SolidWorks 建立目标的几何模型, 主要包括目标本体、太阳帆板及探测载荷等, 如图 1.

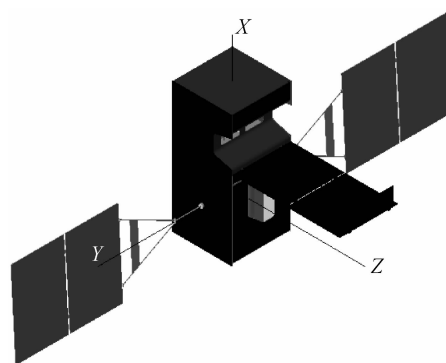


图 1 SBIRS 几何模型

Fig. 1 Solid model of SBIRS

### 2.2 设定材质

对典型空间目标表面材料 (灰色包覆材料、砷化镓电池片等) 光谱 BRDF 进行实验测量. 测量装置如图 2. 波长范围为 300~1 000 nm, 分辨率为 10 nm. 其中, 灰色包覆材料在波长 630 nm 时的 BRDF 测量结果如图 3. 不同的曲线代表不同的入射天顶角  $\theta_i$ . 反射天顶角为正值, 表示该类角度的  $\varphi_r - \varphi_i = 0^\circ$  (与入射天顶角

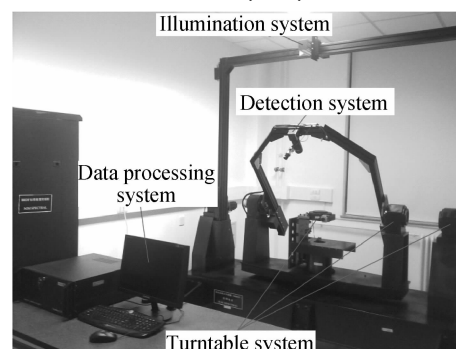


图 2 BRDF 测量装置

Fig. 2 BRDF measurement device

在同一象限),反射天顶角为负值,表示该类角度的  $\varphi_r - \varphi_i = 180^\circ$  (与入射天顶角在相对象限). 砷化镓电池片在波长 630 nm 时的 BRDF 测量结果如表 1.

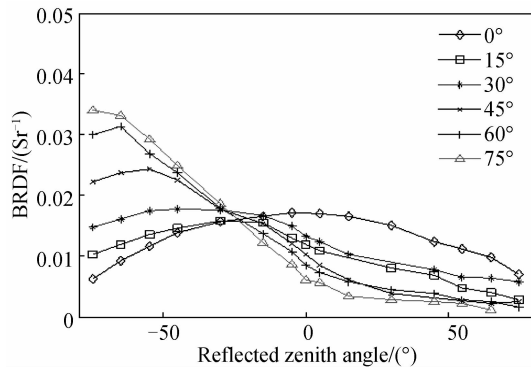


图 3 灰色包覆材料 BRDF 测量结果

Fig. 3 BRDF measurement results of gray cladding material

表 1 砷化镓电池片 BRDF 测量结果

Table 1 BRDF measurement results of GaAs solar cell

$\theta_i / (^\circ)$	$\theta_r / (^\circ)$	$\varphi_r - \varphi_i / (^\circ)$	BRDF / (Sr <sup>-1</sup> )
0	5	180	1.212
0	10	180	0.001
15	10	180	0.002
15	15	180	1.225
15	20	180	0.002
30	25	180	0.002
30	30	180	1.719
30	35	180	0.002
45	40	180	0.003
45	45	180	2.798
45	50	180	0.003
60	55	180	0.004
60	60	180	5.236
60	65	180	0.005
75	70	180	0.005
75	75	180	11.237
75	80	180	0.006

从测量结果可以看出, BRDF 极大值对应的探测角在镜反射方向左右. 对于灰色包覆材料, BRDF 值随探测角变化平缓, 近似成余弦分布, 说明材料表面漫反射特性较强. 而对于砷化镓电池片, BRDF 值随探测角变化剧烈, 在偏离镜反射方向之后迅速减小, 说明材料表面镜反射特性较强.

将测量得到的离散 BRDF 数据导入到 TracePro BRDF Converter 中, 通过 ABg 模型曲线拟合, 获取不同波长、不同角度相应的 A, B, g 值, 以文本形式输出之后定义为目标表面材料特性. 受篇幅限制, 本文这里仅给出砷化镓电池片部分典型波长、典型角度的 A, B, g 拟合结果, 如表 2. TracePro 通过表单的延伸和内插功能, 实现 BRDF 连续分布.

表 2 砷化镓电池片 A, B, g 拟合结果

Table 2 A, B, g fitting results of GaAs solar cell

Wavelength/nm	$\theta_i / (^\circ)$	A	B	g
300	0	0.002 775	0.001 364	2.811 172
300	30	0.000 431	0.000 460	2.447 138
300	60	0.000 443	0.000 101	2.486 630
370	0	0.010 514	0.004 211	2.303 279
370	30	0.000 968	0.000 748	2.207 146
370	60	0.001 090	0.000 172	2.378 966
470	0	0.000 706	0.000 425	2.934 169
470	30	0.000 115	0.000 192	2.638 376
470	60	0.000 122	0.000 044	2.720 911
510	0	0.001 186	0.000 591	3.069 990
510	30	0.000 188	0.000 206	2.735 316
510	60	0.000 180	0.000 042	2.669 469
580	0	0.001 239	0.000 600	3.051 993
580	30	0.000 188	0.000 195	2.657 009
580	60	0.000 195	0.000 043	2.709 140
660	0	0.001 638	0.000 668	3.007 806
660	30	0.000 272	0.000 207	2.742 076
660	60	0.000 260	0.000 042	2.675 072
860	0	0.001 295	0.000 609	3.034 293
860	30	0.000 198	0.000 194	2.650 541
860	60	0.000 201	0.000 042	2.669 410
1 000	0	0.001 488	0.000 642	3.012 260
1 000	30	0.000 236	0.000 198	2.676 331
1 000	60	0.000 233	0.000 041	2.658 557

### 2.3 设定光源

太阳辐射近似于 5 900 K 的黑体, 由普朗克黑体辐射定律, 太阳光谱辐射出射度为

$$M(\lambda) = \frac{c_1}{\lambda^5 [\exp(c_2/\lambda T) - 1]} \quad (2)$$

式中:  $M(\lambda)$  为太阳光谱辐射出射度 ( $W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$ );  $T$  为热力学温度,  $T = 5900K$ ;  $c_1$  为第一黑体辐射常数,  $c_1 = 3.741 844 \times 10^{20} (W \cdot nm^4 \cdot m^{-2})$ ;  $c_2$  为第二黑体辐射常数,  $c_2 = 1.4388 \times 10^7 (nm \cdot K)$ .

地球表面太阳光谱辐照度为

$$E(\lambda) = \frac{R_s^2}{R_{s-e}^2} M(\lambda) \quad (3)$$

式中:  $R_s$  为太阳半径,  $R_s = 6.96 \times 10^5 km$ ;  $R_{s-e}$  为日地平均距离,  $R_{s-e} = 1.49 \times 10^8 km$ .

此外, 若获取目标的等效光谱反射率, 则设定光源为光谱均一光源.

### 2.4 计算光线路径

SBIRS 为 GEO 目标, 天基观测 GEO 目标的典型位置为目标进出地球阴影前后, 因此设定光线以  $8^\circ$  入射角的方向入射到目标表面, 探测器在  $8^\circ$  反射角的方向接收, 获取目标在镜反射时的光谱辐照度及等效光谱反射率. 此外, 在保持相位角  $16^\circ$  不变的条件下, 以  $5^\circ$  角间隔旋转目标, 获取目标在各旋转角度下相应的等

效光谱反射率. 光线路径如图 4.

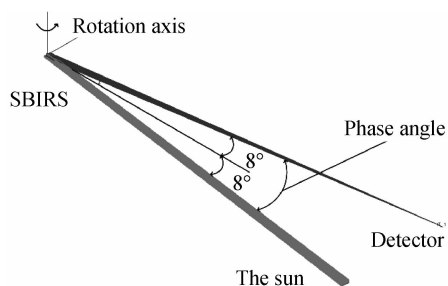


图 4 光线路径  
Fig. 4 Ray tracing

## 2.5 分析模拟结果

目标在镜反射时的光谱辐照度、等效光谱反射率及在各旋转角度下相应的等效光谱反射率仿真结果分别如图 5、6.

由图 5 可以看出, 目标的光谱辐照度曲线与太阳一致, 主要是由于目标本身不发光, 目标光谱辐照度是目标光谱反射特性和太阳光谱辐照度综合作用的结果, 即目标光谱辐照度是目标光谱反射特性对太阳光谱辐照度的“调制”.

由图 6 可以看出, 镜反射时, 目标的等效光谱反射率曲线与砷化镓电池片一致, 主要是由于砷化镓电池片较包覆材料镜反射强且“可视”面积大的原故. 随着

目标旋转, 目标等效光谱反射率在数值和趋势上均发生变化, 当旋转角度达到  $20^\circ$  时, 目标等效光谱反射率下降了 2 个量级, 趋势开始趋向于与包覆材料一致, 而后保持不变, 主要是由于偏离了镜反射方向, 砷化镓电池片对目标等效光谱反射率的贡献逐渐减少而包覆材料对目标等效光谱反射率的贡献逐渐增加的原故.

仿真结果准确性受 BRDF 测量波长间隔、角度间隔及测量精度影响, 间隔越小, 精度越高, 仿真结果越准确. 此外, 受光源光线数影响, 光线数越多, 仿真结果越准确.

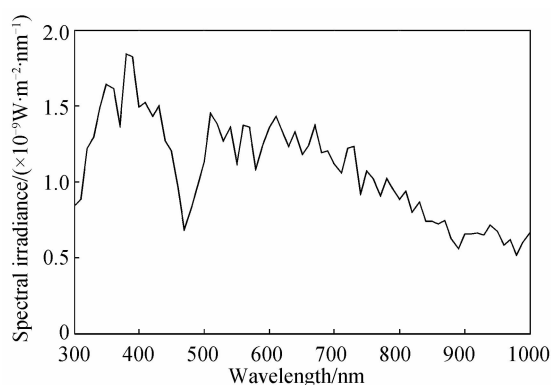
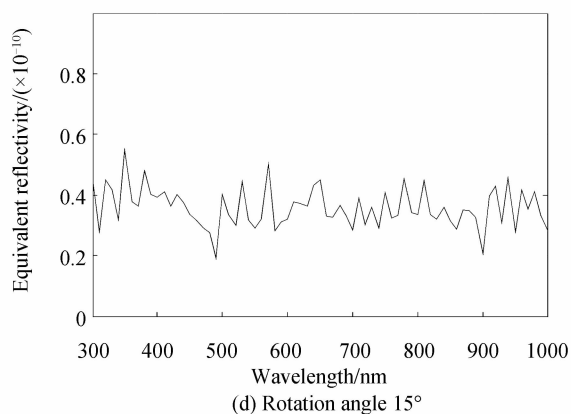
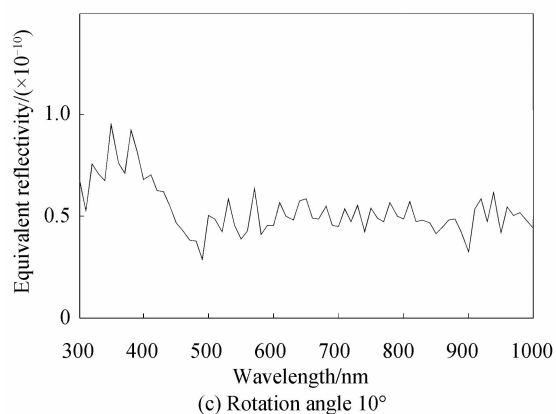
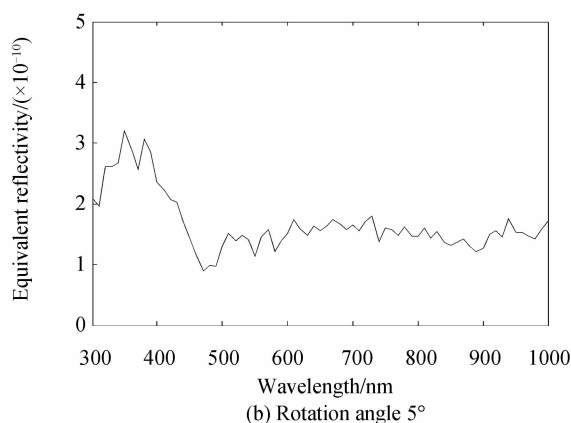
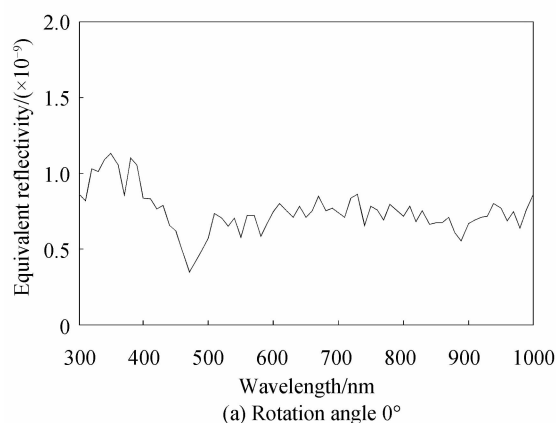


图 5 光谱辐照度  
Fig. 5 Spectral irradiance



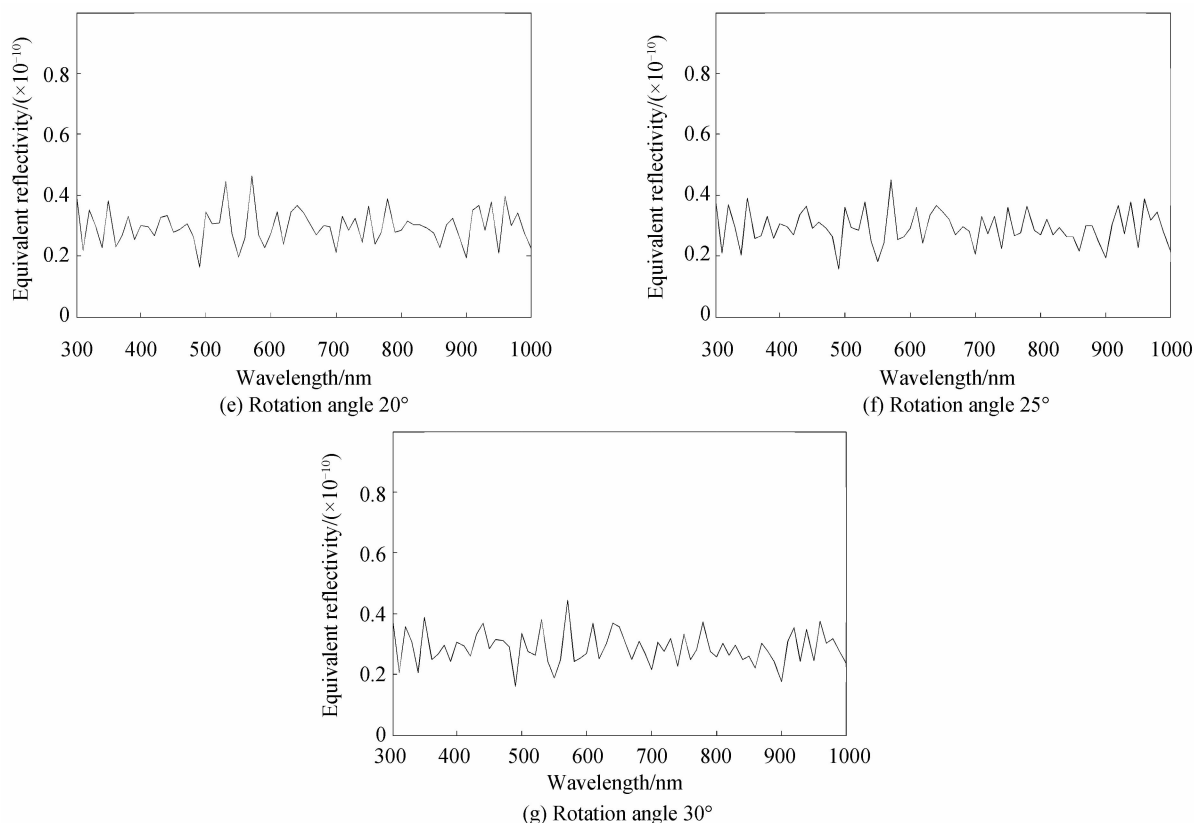


图6 等效光谱反射率

Fig. 6 Equivalent reflectivity

### 3 结论

空间目标光学散射特性研究在空间目标光学探测与识别中具有重要的应用价值。本文概述了解析法和 MCRT 等两类空间目标光学散射特性研究方法,利用 TracePro 对空间目标光学散射特性进行了精确建模与仿真,仿真结果验证了建模方法的正确性。

#### 参考文献

- [1] HAN Yi, SUN Hua-yan. Advances in space target optical scattering character research [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, **42**(3): 758-766.  
韩意,孙华燕.空间目标光学散射特性研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2013, **42**(3): 758-766.
- [2] CHEN Rong-li, HAN Le, CHE Chi-cheng. Research on un-illuminant space target visual detection technique [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(9): 1438-1440.  
陈荣利,韩乐,车驰骋.非自发光空间目标的可见光探测技术研究[J]. *光子学报*, 2005, **34**(9): 1438-1440.
- [3] NICODEMUS F. Directional reflectance and emissivity of an opaque surface [J]. *Applied Optics*, 1965, **4**(4): 767-773.
- [4] CLAUSTRES L, BOUCHER Y, PAULIN M. Wavelet-based modeling of spectral bidirectional reflectance distribution function data [J]. *Optical Engineering*, 2004, **43**(10): 2327-2339.
- [5] HAHLEWEG C, ROTHE H. Classification of optical surface properties and material recognition using multi-spectral BRDF data measured with a semi-hemispherical spectro-radiometer [C]. SPIE, 2005, **5965**: 59650G.
- [6] CAO Yun-hua, WU Zhen-sen, ZHANG Han-lu, et al. Research on visible light scattering of spatial targets based on spectral BRDF of target samples [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(11): 2264-2268.  
曹运华,吴振森,张涵璐,等.基于粗糙样片光谱 BRDF 的空间目标可见光散射研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(11): 2264-2268.
- [7] ZHANG Wei, WANG Hong-yuan, WANG Zhi-le, et al. Modeling method for visible scattering properties of space target [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(12): 2462-2467.  
张伟,汪洪源,王治乐,等.空间目标可见光散射特性建模方法研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(12): 2462-2467.
- [8] YUAN Yan, SUN Cheng-ming, ZHANG Xiu-bao. Measuring and modeling the spectral bidirectional reflection distribution function of space target's surface material [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **59**(3): 2097-2103.  
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*, 2009, **59**(3): 2097-2103.
- [9] SUN C M, YUAN Y, ZHANG X B. Application of BRDF for modeling on the optical scattering characteristics of space target [C]. SPIE, 2009, **7383**: 738338.
- [10] YUAN Yan, SUN Cheng-ming, ZHANG Xiu-bao, et al. Analysis of influence of attitude variation on visible characteristics of space target [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2748-2752.  
袁艳,孙成明,张修宝,等.姿态变化对空间目标可见光特性的影响分析[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2748-2752.
- [11] GREEN K, LAMBERG L, LUMME K. Stochastic modeling of paper structure and Monte Carlo simulation of light scattering [J]. *Applied Optics*, 2000, **39**(25): 4669-4683.
- [12] PROKHOROV V, HANSEN L. Algorithmic model of microfacet BRDF for Monte Carlo calculation of optical radiation transfer [C]. SPIE, 2003, **5192**: 141-157.