

空间目标表面材料光谱双向反射分布 函数测量与建模*

袁 艳 孙成明[†] 张修宝

(北京航空航天大学,精密光机电一体化技术教育部重点实验室,北京 100191)

(2009 年 6 月 27 日收到;2009 年 7 月 19 日收到修改稿)

介绍了双向反射分布函数(BRDF)的绝对测量原理和方法,选用光谱分辨率为 3 nm 的光谱辐射度计及精度为 0.01°的三维转角系统,搭建了 BRDF 自动测量平台,对空间目标表面包覆材料在 400—2500 nm 的光谱 BRDF 进行了测量.结果表明,BRDF 曲线极大值所对应的散射角度一般在镜反射方向左右,其余 BRDF 值随散射角变化很平缓,从中间向两边逐渐变小,近似成余弦分布.测量误差为 4.95%.应用模拟退火算法,结合 BRDF 五参量统计模型,获得了测量光谱范围内各波长对应的共 2101 组五参量值,通过对比参量计算结果和实验测量结果验证了光谱 BRDF 建模方法的可行性和可靠性.测量与建模结果可为空间目标的探测和识别提供数据参考.

关键词: 双向反射分布函数, 绝对测量, 误差分析, 参量模型

PACC: 7820, 7865, 0630M, 0620D

1. 引 言

双向反射分布函数(BRDF)是由美国学者 Nicodemus 最早于 1970 年提出的,是从辐射度学出发、在几何光学的基础上描述各种表面反射特性的物理量,在目标散射特性、辐射定标以及地物遥感等物理与工程领域有着广泛的应用^[1].空间目标样片光谱 BRDF 的测量与建模,对空间目标散射特性和光谱特征的研究,对空间目标的探测、跟踪、识别、特征提取等具有重要的应用价值.目前国内外众多科研机构,如芬兰技术研究中心、圣地亚哥表面光学公司、亚利桑那光学中心、西安电子科技大学等,在长期对 BRDF 测量和建模的研究过程中,形成了大量工程统计模型,如 Cook-Torrance 模型、Wolf 模型、Torrance-Sparrow 模型等^[2-13].但是,对粗糙目标样片 BRDF 的测量和建模研究大都集中于单波长的激光,对光谱 BRDF 的研究也主要着眼于地物地表的遥感探测,对粗糙目标样片光谱 BRDF 的测量和建模研究还比较少见.本文实验测量了空间目标表面包覆材料在 400—2500nm 内的光谱 BRDF 值.在

Torrance-Sparrow 模型的基础上,采用五参量统计模型,应用模拟退火算法,通过参量的迭代和优化,反演出测量光谱范围内各波长对应的共 2101 组五参量值,建立了空间目标样片的光谱 BRDF 模型公式.通过对比参量计算结果和实验测量结果验证了光谱 BRDF 五参量建模方法的可行性和可靠性.由光谱 BRDF 模型,不仅可以获得相应波长 BRDF 的空间分布,还可以获得任意入射角和散射角的光谱 BRDF 随波长的变化规律.和单纯的理论分析计算相比,参量模型描述粗糙表面 BRDF 形式更加简洁,计算更加快速方便,弥补了实验测量不能得到在任意入射和观测方向上 BRDF 的不足.

2. 样片光谱 BRDF 测量

2.1. 测量原理

BRDF 表示了不同入射角条件下物体表面在任意观测角的反射特性,是描述目标表面光反射特性的确定性函数. BRDF 定义为光辐射的反射辐亮度和入射辐照度的比值^[14].数学表达式为

* 国家自然科学基金(批准号:60532070),国家重点基础研究发展计划(973)项目(批准号:2009CB724005)和长江学者和创新团队发展计划(批准号:IRT0705)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: sunchengming2008@163.com

$$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) = \frac{dL_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i, \lambda)}, \quad (1)$$

式中, θ_i, φ_i 分别为入射光的入射角和方位角, θ_r, φ_r 分别为反射光的反射角和方位角, dL_r 为面元 dA 在 (θ_r, φ_r) 方向上的反射辐亮度, dE_i 为 (θ_i, φ_i) 方向上的入射辐照度.

BRDF 的测量方法可分为绝对测量与相对测量两种. 绝对测量是在不使用任何参考标准的情况下进行的测量, 相对测量则是利用已知反射比的参考标准与样品做比较的测量^[15]. 本文采用绝对测量法测量目标样片表面的光谱 BRDF. 即分别测量出入射光谱辐照度和反射光谱辐亮度, 将两者作比得到目标样片表面的光谱 BRDF.

2.2. 测量装置

BRDF 测量装置的主要组成为光源、探测器、转角装置以及数据处理系统, 如图 1 所示. 光源采用卤钨灯, 功率 1000W, 能发射出连续稳定的光谱. 光源发出的光由两块全反射平面镜反射至窄缝, 经透镜准直后入射到样片表面, 由样片反射至探测器. 探测器采用美国 ASD 公司的 FieldSpec@ Pro 型光谱辐射度计, 测量光谱范围 400—2500 nm. 电控转台由北京华维浩润仪器有限公司设计完成. 并且从程序上将光谱辐射度计的测量软件和电控转台的控制软件整合在一起, 通过计算机自动控制实验的整个测量过程, 使实验操作起来简便、快速、省时. 计算机每控制电机转动一个角度时, 自动记录下辐射度计采集到的样片的相应光谱数据, 等待数据记录完毕后, 计算机控制电机再次转动实现连续测量.

2.3. 测量结果及误差分析

实验分别测量了如图 2 所示的空间目标表面包覆材料在入射角为 $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$, 相应方位角为 0° ,

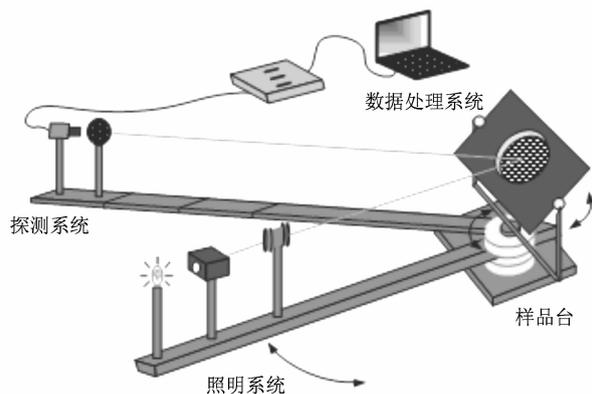


图 1 BRDF 测量装置示意图

$45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 时, 入射到样片表面的光谱辐照度及样片表面的反射光谱辐亮度数据. 在采集反射数据时, 每间隔 2° 采集一次, 并在镜像点附近进行了加密处理, 每间隔 1° 采集一次. 由于反射光的强度在镜像点附近变化较快, 而在离镜像点较远处变化缓慢, 这样既能保证测量精度又能加快实验速度^[16,17]. 由于实验转角装置自身的局限性, 扫描过程中某些角度的数据无法测量到. 其中入射角为 $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$, 方位角为 0° 时, 样片材料表面的光谱 BRDF 测量计算处理结果如图 3 所示.

可以看出, 无论入射角多大, 在曲线中都有一个极大值, 并且极大值所对应的散射角度一般在镜反射方向左右. 除极大值附近外, 其余 BRDF 值随散射角变化很平缓, 从中间向两边逐渐变小, 近似成余弦分布, 说明材料表面很平滑. BRDF 值随波长的变化, 主要由材料对不同波长的反射率决定.

测量误差对测量结果影响很大, 其来源是多方面的. 在实际测量过程中, 几乎所有因素都将引起测量误差^[18]. 在分析和计算误差时, 不可能也没有必要将所有因素及其引起的测量误差逐一考虑计算, 因

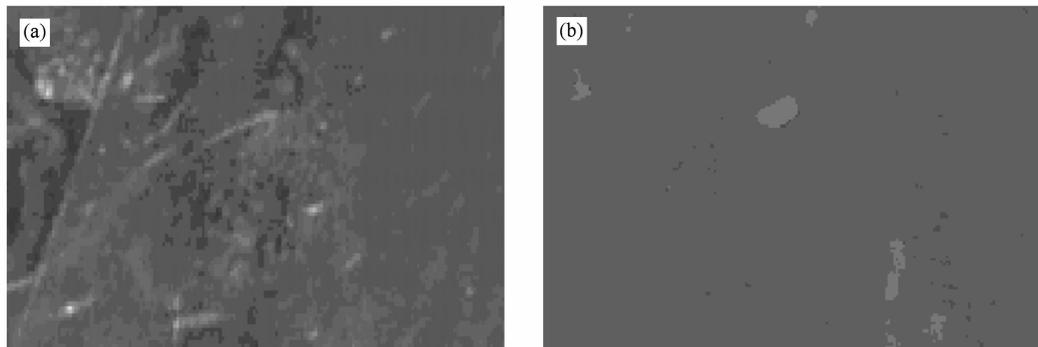


图 2 测试材料 (a) 黄色包覆材料; (b) 银色包覆材料

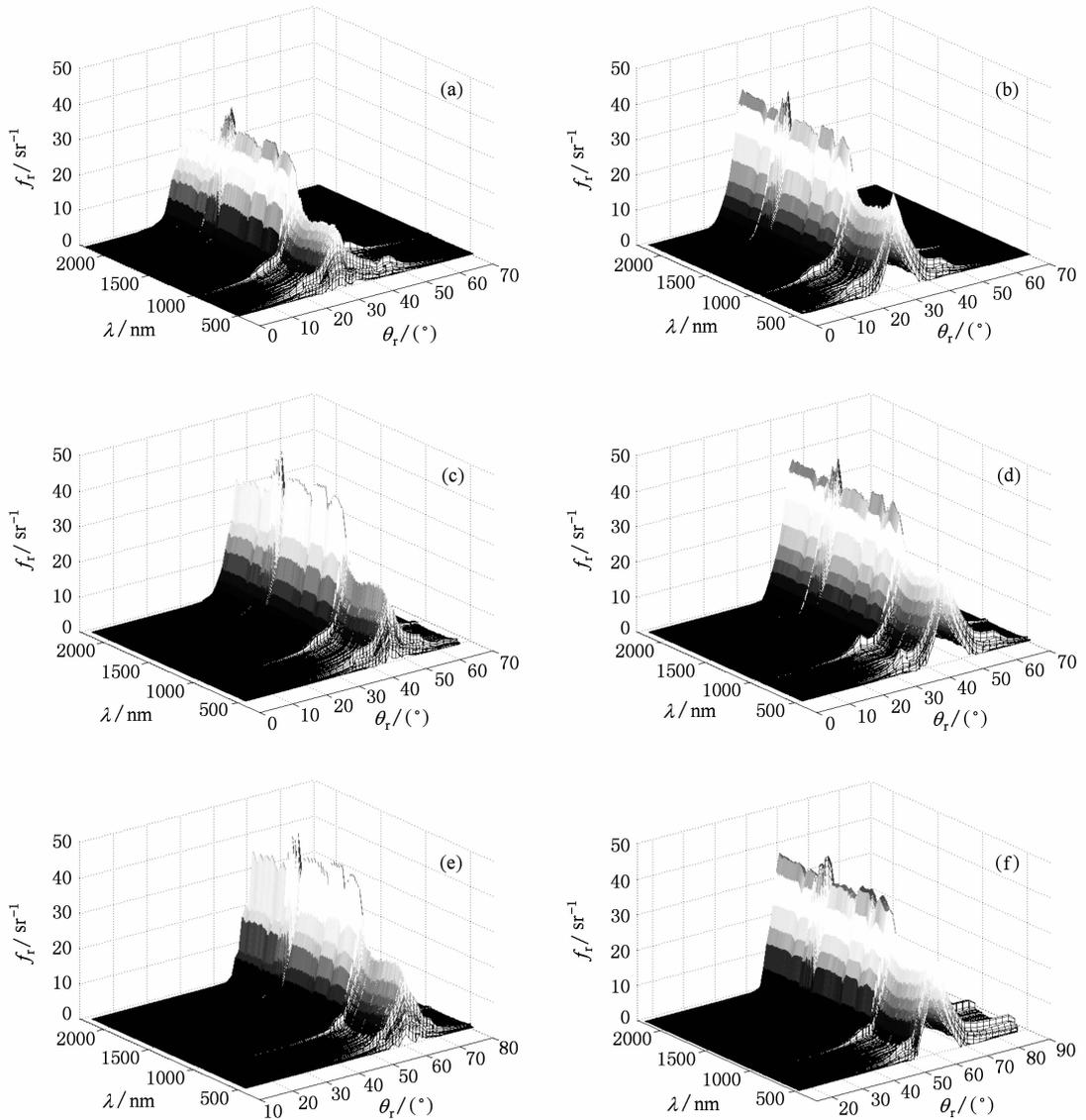


图3 测试材料 BRDF 值在不同入射角时与波长、反射角间的关系 (a) 黄色包覆材料、入射角 30°; (b) 银色包覆材料、入射角 30°; (c) 黄色包覆材料、入射角 45°; (d) 银色包覆材料、入射角 45°; (e) 黄色包覆材料、入射角 60°; (f) 银色包覆材料、入射角 60°

此在下文中着重分析了引起测量误差的主要因素。

本实验中的测量误差主要来源于机械系统、照明系统、探测系统以及操作人员的主观判断等, 测量误差 $\varepsilon_{\text{BRDF}}$ 具体可表示为

$$\varepsilon_{\text{BRDF}} = \sqrt{\varepsilon_{\text{ME}}^2 + \varepsilon_{\text{IE}}^2 + \varepsilon_{\text{DE}}^2 + \varepsilon_{\text{PE}}^2}, \quad (2)$$

式中, ε_{ME} 为机械系统误差分量; ε_{IE} 为照明系统误差分量; ε_{DE} 为探测系统误差分量; ε_{PE} 为人为误差分量。

2.3.1. 机械系统误差

机械系统误差通常可表示为

$$\varepsilon_{\text{ME}}^2 = \varepsilon_{\text{re}}^2 + \varepsilon_{\text{hc}}^2 + \varepsilon_{\text{dc}}^2, \quad (3)$$

式中, ε_{re} 为电控转台的旋转误差, 对华维浩润公司

A011, A012, A013 型系列电控转台, 其值分别为 0.25%, 0.125%, 0.125%; ε_{hc} 为光源与探测器光纤探头支架的高度误差, 本实验中为 0.5%; ε_{dc} 为探测器的位移误差, 即为探测器悬臂梁的机械加工精度误差, 其值为 0.5%。根据误差的定义可知, 机械系统误差为 0.77%。

2.3.2. 照明系统误差

照明系统误差通常可表示为

$$\varepsilon_{\text{IE}}^2 = \varepsilon_{\text{il}}^2 + \varepsilon_{\text{rl}}^2 + \varepsilon_{\text{sl}}^2, \quad (4)$$

式中, ε_{il} 为照明光源的稳定性误差, 通常是由于光源供电电压的改变引起入射光强变化而产生的, 本实验中为 0.8%; ε_{rl} 为反射亮度的时变误差, 是由于各

观测方向的反射亮度未在同一时刻测量引起的,本实验中为 0.8%; ε_{sl} 为杂散光带来的误差,本实验中杂散光被控制在 0.1%之内.考虑上述因素,照明系统误差为 1.14%.

2.3.3. 探测系统误差

探测系统误差通常可表示为

$$\varepsilon_{DE}^2 = \varepsilon_{snr}^2 + \varepsilon_{nl}^2 + \varepsilon_{slid}^2, \quad (5)$$

式中, ε_{snr} 为探测器信噪比误差,对入射与反射能量测量, ε_{snr} 为 2%; ε_{nl} 为探测器非线性误差,主要来自探测器阵列噪声、零漂、前置放大器中晶体管的低频电流噪声,本实验中为 0.4%; ε_{slid} 为接收立体角误差,是由于探测器观测方向偏离测试材料法线方向以及探测口径计算引起的,实际测量结果表明对不准误差为 2%,口径误差为 0.3%,即接收立体角误差为 2.02%,所以探测系统误差为 2.87%.

2.3.4. 人为误差

人为误差是由于实验人员操作过程中随机引入

的,根据对几种测试材料的实际测量,人为误差 ε_{PE} 为 3.78%.

综合上述分析,实验的总体测量误差 ε_{BRDF} 为

$$\begin{aligned} \varepsilon_{BRDF} &= \sqrt{\varepsilon_{ME}^2 + \varepsilon_{IE}^2 + \varepsilon_{DE}^2 + \varepsilon_{PE}^2} \\ &\approx 4.95\%. \end{aligned} \quad (6)$$

3. 样片光谱 BRDF 建模

3.1. 五参量模型

在样片光谱 BRDF 建模时,采用五参量模型来模拟样片在某单波长时的 BRDF,对测量光谱范围内每个波长(间隔 1nm)建模,分别获得不同波长对应的最优五参量值.用不同的波长对应不同的五参量值来模拟光谱 BRDF 随波长的变化^[19].五参量模型的表达式为

$$f_r(\theta_i, \theta_r, \varphi_r) = k_b \left[\frac{k_r^2 \cos \alpha}{1 + (k_r^2 - 1) \cos \alpha} \cdot \exp[b \cdot (1 - \cos \gamma)^a] \cdot \frac{G(\theta_i, \theta_r, \varphi_r)}{\cos \theta_i \cos \theta_r} \right] + \frac{k_d}{\cos \theta_i}, \quad (7)$$

其中

$$\begin{aligned} G(\theta_i, \theta_r, \varphi_r) &= \frac{1 + w_{sph} |\tan \theta_{sph}^i \tan \theta_{sph}^r| / (1 + \sigma_r \tan \gamma_{sph})}{(1 + w_{sph} \tan^2 \theta_{sph}^i)(1 + w_{sph} \tan^2 \theta_{sph}^r)}; \\ w_{sph}(\alpha) &= \sigma_{sph} \left[1 + \frac{u_{sph} \sin \alpha}{\sin \alpha + v_{sph} \cos \alpha} \right]; \\ \tan \theta_{sph}^i &= \tan \theta_i \frac{\sin \theta_i + \sin \theta_r \cos \varphi_r}{2 \sin \alpha \cos \gamma}; \\ \tan \theta_{sph}^r &= \tan \theta_r \frac{\sin \theta_r + \sin \theta_i \cos \varphi_r}{2 \sin \alpha \cos \gamma}; \\ \tan \gamma_{sph} &= \frac{|\cos \theta_i - \cos \gamma|}{2 \sin \alpha \cos \gamma}; \quad \cos \alpha = \frac{\cos \theta_i + \cos \theta_r}{2 \cos \gamma}; \\ \cos^2 \gamma &= \frac{1}{2} (\cos \theta_i \cos \theta_r + \sin \theta_i \sin \theta_r \cos \varphi_r + 1). \end{aligned}$$

在(7)式中,第一项表示样片表面 BRDF 的相干散射分量(镜反射分量),第二项表示非相干散射分量(漫反射分量). $k_r^2 \cos \alpha / [1 + (k_r^2 - 1) \cos \alpha]$ 是样片表面小面元法线的分布函数, $\exp[b \cdot (1 - \cos \gamma)^a]$ 是非涅耳反射函数的近似描述, $G(\theta_i, \theta_r, \varphi_r)$ 是遮蔽函数. k_b, k_r, b, a, k_d 为待定参量: k_b 和 k_d 分别反映相干和非相干散射分量的大小,与样片表面的粗糙度和反射率有关, k_r 反映样片表面

的斜率分布,与样片表面的粗糙度和纹理分布有关; b 和 a 反映样片表面的菲涅耳反射函数,与样片的折射率有关.其他参量在文献[19]中均有详细说明.

光谱 BRDF 建模过程是应用最优化算法求解不同波长时五参量模型最优参量值的过程.模型参量选择的最佳标准是模拟实验数据的标准均方误差最小.最小均方误差可按式计算:

$$E(x) = \frac{\sum_{\theta_i} \sum_{\theta_r} g_1(\theta_i) g_2(\theta_r) [f_r(\theta_i, \theta_r, \varphi_r) \cos\theta_r - f_r^0(\theta_i, \theta_r, \varphi_r) \cos\theta_r]^2}{\sum_{\theta_i} \sum_{\theta_r} g_1(\theta_i) g_2(\theta_r) [f_r^0(\theta_i, \theta_r, \varphi_r) \cos\theta_r]^2}, \quad (8)$$

式中, $x = [k_b, k_r, b, a, k_d]^T$ 为模型参量的列向量, f_r^0 为 BRDF 实验测量数据, $g_1(\theta_i)$ 和 $g_2(\theta_r)$ 为加权函数, 在测量间距不均匀时调整各项误差对总误差的影响, 取决于建模的目的和不等距测量的精度. 选取合适的加权函数可以在重要的入射或观测角区域获得更精确的参量值, 这里将其取为 1. 五参量模型函数复杂, 且目标函数本身具有函数沟壑和非线性性质, 对其求解的计算量较大^[20].

3.2. 模拟退火算法

模拟退火(simulated annealing, SA)算法是将物理退火过程与组合优化相结合的一种随机迭代寻优算法^[21,22]. SA 算法的思想最早是由 N. Metropolis 于 1953 年提出的, 把它用于组合优化和 VLSI 设计是在 1983 年由 S. Kirkpatrick 和 V. Cerny 分别提出的. SA 算法将组合优化问题与统计力学中的热平衡问题类比, 另辟了求解组合优化问题的新途径. 通过

模拟退火过程, 找到全局最优解. SA 算法是基于 Monte Carlo 迭代求解法的一种随机搜索算法. SA 算法用于解决组合优化问题的出发点是基于物理中固体物质退火过程与一般组合优化问题间的相似性. 组合优化问题解空间中每一点都代表一个解, 不同的解有着不同的目标函数值. 所谓优化, 就是在解空间中寻找目标函数的最小(或最大)解.

3.3. 拟合结果分析

表 1 所示的为目标表面黄色包覆材料的建模结果, 其中 k_b, k_r, b, a, k_d 是五参量模型的五个参量, $E(x)$ 是(8)式表示的误差, 其值在 0.36% 和 3.62% 之间, 建模精度高. 从表 1 可以看出, 相邻波长的参量值之间变化很小, 波长 λ_i 处的参量值可以在波长 λ_{i-1} 处的参量值附近找到, 这正是模拟退火算法改进的基础. 根据表 1 所示的五参量模型数据, 由(7)式可以计算不同波长时样片的 BRDF.

表 1 目标表面黄色包覆材料建模结果

λ/nm	k_b	k_r	b	a	k_d	$E(x)$
400	5.13018	0.71736	-51.9766	0.83104	0.06471	0.02645
401	5.90822	0.71793	-53.6265	0.85138	0.06786	0.02384
...
...
2499	24.1498	2.17484	-519.301	0.92652	0.09471	0.01322
2500	24.5367	2.18136	-521.647	0.93001	0.09534	0.01481

为了检验建模结果是否能正确模拟样片表面的光谱 BRDF, 分别给出了 30° 入射角时波长为

600 nm, 1200 nm, 1800 nm 的 BRDF 模型计算结果与实验测量结果, 如图 4 所示. 由比较结果可以看

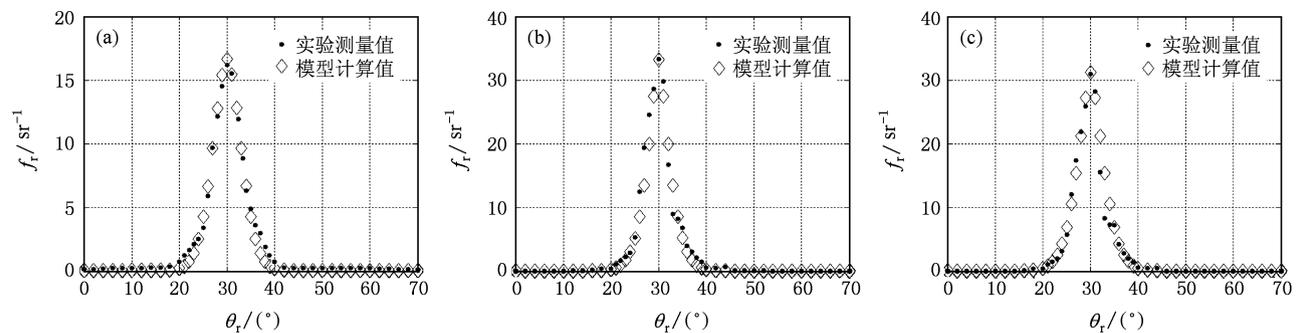


图 4 BRDF 模型计算值与实验测量值 (a) $\lambda = 600 \text{ nm}$; (b) $\lambda = 1200 \text{ nm}$; (c) $\lambda = 1800 \text{ nm}$

出, BRDF 模型计算结果与实验测量结果符合良好.

4. 结 论

实验测量了空间目标表面包覆材料在 400—2500 nm 内的光谱 BRDF, 分析了光谱 BRDF 随波长及散射角的变化趋势与目标样片光学特性的关系. 从机械系统、照明系统、探测系统以及操作人员的主观判断等方面阐述了产生误差的原因, 使用均方根误差计算方法, 对影响系统测量精度的误差因素进行了定量分析, 提供了一种 BRDF 测量系统评估的新思路. 从涂层材料 BRDF 的参量理论出发, 针对目

标样片光谱 BRDF 建模中相邻波长 BRDF 五参量模型的最优参量值渐变的特点, 在优化建模时, 对模拟退火算法初值的选取作了优化, 大大提高了建模速度. 利用建立的目标样片光谱 BRDF 模型, 计算了 30° 入射角时波长为 600 nm, 1200 nm, 1800 nm 的 BRDF 值, 并与实验测量数据相比较, 最小均方误差在 0.36% 和 3.62% 之间, 两者符合良好, 验证了建模方法的可行性和可靠性. 随着科学技术和测试方法的不断进步, 高精度、多波长 BRDF 测试系统将会更广泛地应用于各种光学和航天热控材料的空间反射特性研究中.

-
- [1] Wu Z S, Dou Y H 2003 *Acta Optica Sinica* **23** 1250 (in Chinese) [吴振森、窦玉红 2003 光学学报 **23** 1250]
- [2] Zhang S Q, Shi Y L, Lu Y L 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2768 (in Chinese) [张拴勤、石云龙、卢言利 2009 物理学报 **58** 2768]
- [3] Wang A X, Zhang X J, Zhang H L, Feng J 2008 *Laser & Infrared* **38** 519 (in Chinese) [王安祥、张晓军、张涵璐、冯 健 2008 激光与红外 **38** 519]
- [4] Li C, Wang Y M, Zhang Z M 2008 *Spectroscopy and Spectral Analysis* **28** 865 (in Chinese) [李 聪、王咏梅、张仲谋 2008 光谱学与光谱分析 **28** 865]
- [5] Cheng J L, Shi Z, Li H Y 2008 *Spectroscopy and Spectral Analysis* **28** 1007 (in Chinese) [程街亮、史 舟、李洪义 2008 光谱学与光谱分析 **28** 1007]
- [6] Peng Y J, Zhang S P, Wang Y H, Yang Y Q 2008 *Chin. Phys. B* **17** 3505
- [7] Qiao Y B, Da N, Chen D P, Qiu J R 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 7023 (in Chinese) [乔延波、达 宁、陈丹平、邱建荣 2007 物理学报 **56** 7023]
- [8] Ding J, Yang Q H, Tang Z F, Xu J, Su L B 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2207 (in Chinese) [丁 君、杨秋红、唐在峰、徐 军、苏良碧 2007 物理学报 **56** 2207]
- [9] Zhang B S, Liu W Q, Wei Q N, Wu Z S, Zhao J F 2006 *Chin. J. Quant. Electron* **23** 533 (in Chinese) [张百顺、刘文清、魏庆农、吴振森、赵剑锋 2006 量子电子学报 **23** 533]
- [10] Jia H, Li F T 2004 *Acta Optica Sinica* **24** 230 (in Chinese) [贾 辉、李福田 2004 光学学报 **24** 230]
- [11] Wolff L B 1994 *J. Opt. Soc. Am. A* **11** 2956
- [12] Zhan Y L, Wang L 1990 *Acta Phys. Sin.* **39** 4 (in Chinese) [战元龄、王 立 1990 物理学报 **39** 4]
- [13] Cook R L, Torrance K E 1982 *ACM Transactions on Graphics* **1** 7
- [14] Nicodemus F E 1970 *Applied Optics* **9** 1474
- [15] Wei Q N, Liu J G, Jiang R X 1996 *Acta Optica Sinica* **16** 1425 (in Chinese) [魏庆农、刘建国、江荣熙 1996 光学学报 **16** 1425]
- [16] Zhang S Q, Shi Y L, Huang C G, Lian C C 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5508 (in Chinese) [张拴勤、石云龙、黄长庚、连长春 2007 物理学报 **56** 5508]
- [17] Qi C, Yang M H, Sun X G, Dai J M 2003 *Chinese Journal of Lasers* **30** 146 (in Chinese) [齐 超、杨茂华、孙晓刚、戴景民 2003 中国激光 **30** 146]
- [18] Zhao Z Y, Dai J M, Li Y 2007 *Infrared Technology* **29** 579 (in Chinese) [赵忠义、戴景民、李 颖 2007 红外技术 **29** 579]
- [19] Wu Z S, Xie D H, Xie P H, Wei Q N 2002 *Acta Optica Sinica* **22** 897 (in Chinese) [吴振森、谢东辉、谢品华、魏庆农 2002 光学学报 **22** 897]
- [20] Cao Y H, Wu Z S, Zhang H L, Wei Q N, Wang S M 2008 *Acta Optica Sinica* **28** 792 (in Chinese) [曹运华、吴振森、张涵璐、魏庆农、汪世美 2008 光学学报 **28** 792]
- [21] Vicente J D, Lanchares J, Hermida R 2003 *Physics Letters A* **317** 415
- [22] Li S Y, Du Z H, Wu M Y, Zhu J, Li S L 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1260 (in Chinese) [李树有、都志辉、吴梦月、朱 静、李三立 2001 物理学报 **50** 1260]

Measuring and modeling the spectral bidirectional reflection distribution function of space target's surface material*

Yuan Yan Sun Cheng-Ming[†] Zhang Xiu-Bao

(Key Laboratory of Precision Opto-mechatronics Technology, Ministry of Education, Beijing University of Aeronautics & Astronautics, Beijing 100191, China)

(Received 27 June 2009; revised manuscript received 19 July 2009)

Abstract

An absolute measuring principle and method of bidirectional reflection distribution function (BRDF) is presented. A spectral radiation meter with 3 nm spectral resolution and a three-dimensional rotating system with 0.01° accuracy are utilized to establish the automatic measuring platform. The spectral BRDF of typical space target's surface materials (yellow and silver tinfoil) is measured in the range of 400—2500 nm. Measured results show that the scattering angle, which corresponds to the maximum value of BRDF curve, is generally in the specular reflection direction; the other BRDF values change slowly as scattering angle varies, declining from middle to both sides and approximately following the cosine distribution. A BRDF error analysis method is introduced by using the RMS error calculation, which provides a new way for the BRDF measurement system evaluation. The measurement error is 4.95%. With five-parameter model of BRDF and the simulated annealing (SA) algorithm, the optimum parameters of the model at each wavelength in the measured spectrum are retrieved at intervals of 1 nm. A comparison of the data calculated by the parametric model with the data measured originally verifies the feasibility and reliability of the modeling. The measuring and modeling results can provide reference data for space target detection and identification.

Keywords: bidirectional reflection distribution function (BRDF), absolute measurement, error analysis, parametric model

PACC: 7820, 7865, 0630M, 0620D

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60532070), the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2009CB724005) and the Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University (Grant No. IRT0705).

[†] Corresponding author. E-mail: sunchengming2008@163.com