

基于各向异性 Gaussian 改进模型的卫星材料 BRDF 计算

黄超超^{1,2}, 吴晓迪^{1,2}, 杨 华^{1,2}, 蒋剑锋³

(1. 电子工程学院红外与低温等离子体安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230037;

2. 脉冲功率激光技术国家重点实验室(电子工程学院), 安徽 合肥 230037; 3. 解放军 73676 部队, 江苏 无锡 214063)

摘要:对目标表面双向反射分布函数(BRDF)进行研究,在各向异性 Gaussian 模型的基础上引入波长因子,提出了改进的 BRDF 各向异性 Gaussian 计算模型。运用该模型对卫星太阳能板及包裹多层隔热材料进行了 BRDF 计算,结果表明该模型参数物理意义明确、简洁高效,能够有效地计算物体表面材料 BRDF 数值。

关键词:双向反射分布函数;各向异性 Gaussian 改进模型;波长因子;卫星

中图分类号: O435 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2013.06.016

BRDF calculation of satellite's material based on modified anisotropic Gaussian model

HUANG Chao-chao^{1,2}, WU Xiao-di^{1,2}, YANG Hua^{1,2}, JIANG Jian-feng³

(1. Key Laboratory of Infrared and Low Temperature Plasma of Anhui Province, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China; 2. State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology (Electronic Engineering Institute), Hefei 230037, China; 3. 73676 PLA troops, Wuxi 214063, China)

Abstract: Object's surface Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) was studied, the wavelength factor was introduced on the basis of anisotropic Gaussian model, the modified Anisotropic Gaussian calculation model of BRDF with was put forward. The BRDF of satellite's solar panel and multilayer insulation was calculated by using this model. The numerical results indicate that the modified model has univocal parameters and high efficiency, which can calculate object's surface BRDF effectively.

Key words: bidirectional reflectance distribution function; modified anisotropic Gaussian model; wavelength factor; satellite

1 引言

双向反射分布函数(bidirectional reflectance distribution function, BRDF)的定义是由 Nicodemus 于 1970 年正式提出的。最初的理论是从光辐射角度定义并得到发展的,现已广泛应用于激光、红外和微波段的散射和辐射问题,并进一步延拓到遥感方面。双向反射分布函数表示一个基本的光学特性,对于某一入射方向的波,在表面上半球空间的反射能量的分布。它由表面粗糙度、介电常数、辐射波长、偏振等因素决定。要获得 BRDF 数据可以采用试验测量和理论建模两种方法,其中建模方法可以分为理论模型^[1-2]、辐射传输模型、几何光学模型和蒙特卡

洛模拟模型等^[3],目前国内运用较多的是五参数模型法^[4-6],而本文提出的是属于几何光学模型中的各向异性 Gaussian 改进模型。

2 BRDF 定义

如图 1 所示,表面小面元 dA 上,入射光源方向为 (θ_i, ϕ_i) ,探测器的观测方向为 (θ_r, ϕ_r) 。其中 θ , ϕ 分别代表天顶角和方位角, Z 代表粗糙表面平均平面的法线方向。

作者简介:黄超超(1979-),男,博士,研究方向为目标与背景光学特性。E-mail:jiuding@vip.sohu.net

收稿日期:2012-11-15

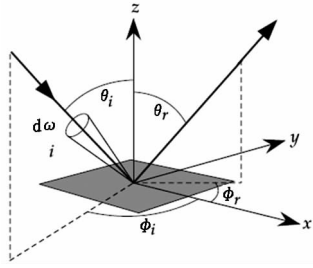


图1 BRDF 几何关系示意图

双向反射分布函数定义为沿 (θ_r, ϕ_r) 方向出射的辐射亮度 $dL_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r)$ 与沿 (θ_i, ϕ_i) 方向入射到被测表面的辐照度 $dE_i(\theta_i, \phi_i)$ 之比,公式如下:

$$f_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \frac{dL_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r)}{dE_i(\theta_i, \phi_i)} \quad (\text{sr}^{-1}) \quad (1)$$

辐射亮度定义为沿辐射方向单位面积、单位立体角的辐射通量 ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$):

$$L_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \frac{d\Phi_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r)}{dA \cos\theta_r d\omega_r} \quad (2)$$

辐射照度定义为单位面积的辐射通量 (W/m^2):

$$E(\theta_i, \phi_i) = \frac{d\Phi_i(\theta_i, \phi_i)}{dA} \quad (3)$$

$$f_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \frac{\rho_d}{\pi} + \rho_s \frac{1}{\sqrt{\cos\theta_i \cos\theta_r}} \frac{1}{4\pi (a_x/k\lambda) (a_y/k\lambda)} \exp \left[-2 \frac{\left(\frac{\hat{h} \cdot \hat{x}}{a_x/k\lambda} \right)^2 + \left(\frac{\hat{h} \cdot \hat{y}}{a_y/k\lambda} \right)^2}{1 + \hat{h} \cdot \hat{n}} \right] \quad (6)$$

其中:

$$\begin{cases} \hat{h} \cdot \hat{x} = \frac{\sin\theta_r \cos\phi_r + \sin\theta_i \cos\phi_i}{\|\vec{h}\|} \\ \hat{h} \cdot \hat{y} = \frac{\sin\theta_r \sin\phi_r + \sin\theta_i \sin\phi_i}{\|\vec{h}\|} \\ \hat{h} \cdot \hat{n} = \frac{\cos\theta_r + \cos\theta_i}{\|\vec{h}\|} \\ \|\vec{h}\| = \sqrt{2 + 2\sin\theta_r \sin\theta_i (\cos\phi_r \cos\phi_i + \sin\phi_r \sin\phi_i) + 2\cos\theta_r \cos\theta_i} \end{cases}$$

式中, $f_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r)$ 为双向反射分布函数,等式右边第一项为朗伯分量(漫反射分量),第二项为相干分量(镜面反射分量), ρ_d 为漫反射系数, ρ_s 为镜面反射系数, a_x 为 \hat{x} 方向上的表面斜率均方根, a_y 为 \hat{y} 方向上的表面斜率均方根, k 为本文提出的与波长相关的比例系数,用于对改变波长而产生的数值影响的修正, λ 为波长。

4 卫星表面材料 BRDF 计算

假设卫星表面由太阳能板、包裹材料构成。根据实测数据及参考文献资料^[4-6],太阳能板的漫反射系数、镜面反射系数、 \hat{x} 方向上的表面斜率均方根, \hat{y} 方向上的表面斜率均方根分别设为:0.17, 0.7, 0.12, 0.12, 计算波长为 $10.6 \mu\text{m}$, 比例系数 k

入射辐射照度还可以表示为对半球空间的入射亮度进行积分的形式:

$$E_i = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} L_i \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi \quad (4)$$

把 BRDF 的概念用于粗糙而电磁波的散射,对于均匀扩展面元,利用照射到单位面积上的入射功率只与散射功率截,则 BRDF 公式可以重写为:

$$f_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \frac{dP_s}{P_i \cos\theta_r d\Omega} \quad (5)$$

3 各向异性 Gaussian 改进模型

本文根据 Gregory J. Ward 在 Measuring and Modeling Anisotropic Reflection 一文中提出的各向异性 Gaussian 模型^[7],并结合 Y. J. Shen 在 Bidirectional Reflectance Distribution Function of Rough Silicon Wafers 中的波长因子^[8],提出改进的各向异性 Gaussian 模型来计算物体表面的 BRDF,该模型属于几何光学模型,相对其他模型具有以下特点:

- 模型结构合理,参数物理意义明确;
- 能够很好地拟合实际测量得到的数据;
- 计算速度快,适合计算机仿真;

各向异性 Gaussian 改进模型表达如下:

设为 0.14。图 2 为太阳能板材质在相对角为零时,不同入射角计算得到的 BRDF 二维曲线;图 3 则显示了不同入射角的情况下,太阳能板材质 BRDF 计算数值的三维空间分布。

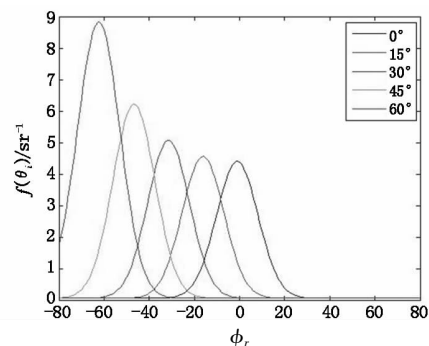


图2 相对角为零,不同入射角计算得到的 BRDF

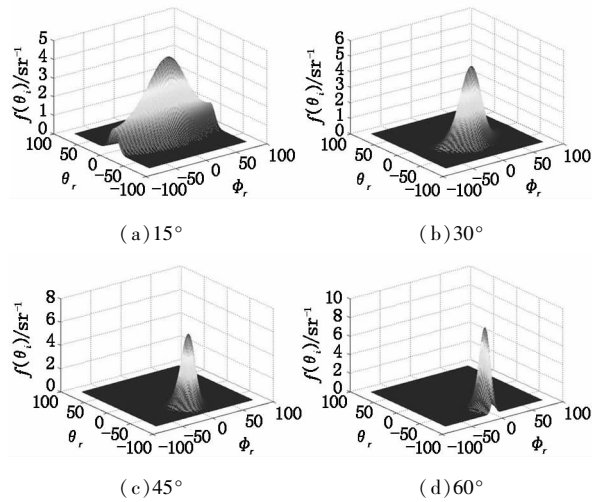


图3 不同入射角计算得到的 BRDF 空间分布

根据实测数据及参考文献资料,包裹材料的漫反射系数、镜面反射系数、 \hat{x} 方向上的表面斜率均方根, \hat{y} 方向上的表面斜率均方根分别设为: 0.1, 0.75, 0.06, 0.06, 计算波长和比例系数同上。图4、图5显示了包裹材料材质在不同入射角情况下计算得到的 BRDF 二维曲线和三维空间分布;对照图2、图3可知包裹材料相较于太阳能板而言镜面反射部分更为明显,且 BRDF 最大值达到相同条件下的太阳能板的4倍左右。

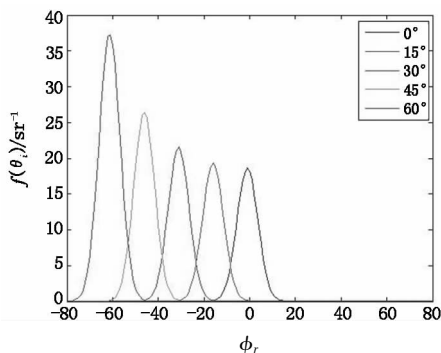


图4 相对角为零,不同入射角计算得到的 BRDF

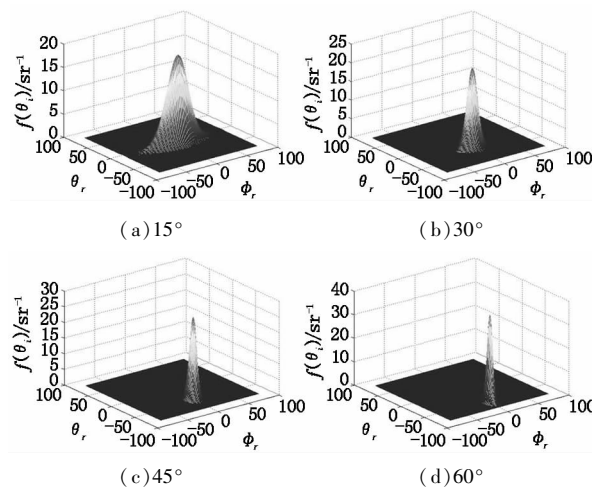


图5 不同入射角计算得到的 BRDF 空间分布

5 结论

本文对构成卫星表面材料的太阳能板和包裹材料的 BRDF 数值采用各向异性 Gaussian 改进模型数据进行仿真计算。计算结果表明,该模型参数物理意义明确,计算快速高效,能够得到较为真实的仿真数据。

参考文献:

- [1] Xiao D He, Kenneth E Torrance, et al. A comprehensive physical model for light reflection [J]. Computer Graphics, 1991, 25(4): 175 - 186.
- [2] Cai Lei, Yao Dongsheng, Guan Xiaowei, et al. Target reflection section in 1.319 μm laser-illuminated condition [J]. Laser & Infrared, 2010, 40(5): 463 - 466. (in Chinese)
- [3] 蔡雷,姚东升,关小伟,等. 1.319 μm 激光照明条件下目标特性的实验研究[J]. 激光与红外, 2010, 40(5): 463 - 466.
- [4] Liu Jianfeng. The BRDF modeling technology of light scattering characteristics of targets and earth surface [D]. Xi'an: Xidian University, 2005. (in Chinese)
- [5] 刘剑锋. 目标与地物光散射特性的 BRDF 模化技术 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2005.
- [6] Li Tie, Wang Hangyu, Wang Hongjun. Application of genetic simulated annealing algorithm in BRDF statistical modeling [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2008, 25(4): 489 - 492. (in Chinese)
- [7] 李铁,王航宇,王宏军. 目标表面 BRDF 统计建模中的遗传模拟退火算法 [J]. 量子电子学报, 2008, 25(4): 489 - 492.
- [8] Zhang Baishun, Liu Wenqing, Wei Qingnong, et al. Experiment measurements and validating with the model of typical goal's BRDF [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2006, 23(4): 533 - 536. (in Chinese)
- [9] 张百顺,刘文清,魏庆农,等. 典型目标的 BRDF 实验室测量与模型验证 [J]. 量子电子学报, 2006, 23(4): 533 - 536.
- [10] Wu Zhensen, Xie Donghui, et al. Modeling reflectance function from rough surface and algorithms [J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(8): 897 - 901.
- [11] Gregory J Ward. Measuring and modeling anisotropic reflection [J]. Computer Graphics, 1992, 26(2): 265 - 272.
- [12] Y J Shen, Z M Zhang, B K Tsai, et al. Bidirectional reflectance distribution function of rough silicon wafers [J]. International Journal of Thermophysics, 2001, 22(4): 1311 - 1326.