

## 光散射模型中遮蔽函数的参数反演

王安祥<sup>1</sup>, 吴振森<sup>2</sup>

- (1. 西安工程大学 理学院, 陕西 西安 710048;
2. 西安电子科技大学 理学院, 陕西 西安 710071)

**摘要:** 介绍了一种通过遗传模拟退火算法进行参数反演获取目标样片 BRDF 模型参数的方法。将 BRDF 五参数统计模型中遮蔽函数的四个参数作为未知参数, 利用在激光波长下目标样片的 BRDF 实验测量数据, 通过遗传模拟退火算法进行模型参数反演, 获得上述样片 BRDF 统计模型的九个模型参数, 结果表明, 与遮蔽函数四个参数取经验值情况相比较发现, 九参数 BRDF 统计模型的均方误差更小一些, 并且通过反演出的遮蔽函数四个参数, 得到上述样片在几种入射角情况下遮蔽函数随散射角的分布情况, 所反演的遮蔽函数四个参数能反映材料表面的粗糙程度。

**关键词:** 双向反射分布函数; 遮蔽函数; 光散射; 反演; 遗传模拟退火算法

**中图分类号:** O436.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)01-0332-06

## Parameter inversion of shadowing function in light scattering model

Wang Anxiang<sup>1</sup>, Wu Zhensen<sup>2</sup>

- (1. School of Science, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China;
2. School of Science, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** A method of acquiring parameters of the five-parameter BRDF statistic model in object sample using the genetic simulated annealing algorithm was introduced. using four parameters in the shadowing function as unknown parameters in BRDF model, a nine-parameter BRDF model was obtained when the genetic simulated annealing algorithm was applied to the parameter reversion of the BRDF statistic model of the object surface according to the BRDF experimental data at laser wavelength 1.06  $\mu\text{m}$ . The results show that, mean square errors of the nine-parameter BRDF model were small compared with that of five-parameter BRDF model. The distribution of shadowing function with scattering angle is obtained for different incident angles by retrieving the four parameters of shadowing function, which reflect the surface roughness of object sample.

**Key words:** bidirectional reflectance distribution function (BRDF); shadowing function; light scattering retrieval; genetic simulated annealing algorithm (GSAA)

收稿日期: 2013-05-10; 修订日期: 2013-06-22

基金项目: 国家自然科学基金(61172031); 陕西省自然科学基金(2012JM1011); 陕西省普通高校重点学科建设专项资金((2008)169)

作者简介: 王安祥(1974-), 男, 副教授, 硕士, 现主要从事目标光散射特性的研究及大学物理、大学物理实验的教学与科研工作。

Email: waxiang0921@126.com

## 0 引言

双向反射分布函数(BRDF)能够全面描述材料表面的空间散射特性,现已广泛应用于材料诊断、地物遥感、目标探测与跟踪识别、隐身等领域<sup>[1-3]</sup>。而材料表面的粗糙程度是影响其表面散射特性的重要因素,当表面粗糙程度较大时,入射到微观表面上的光有可能被截止,散射光有可能被截住,所以还要考虑遮蔽效应的影响。国内外学者对遮蔽效应做了大量的工作,提出了多种遮蔽函数,例如有 Cook-Torrance 遮蔽函数<sup>[4]</sup>,Smith 推出的遮蔽函数<sup>[5]</sup>和 Wagner 推出的遮蔽函数<sup>[6]</sup>等。我国学者在 Torrance-Sparrow 模型的基础上修正了菲涅耳反射函数和遮蔽函数获得了新的 BRDF 五参数模型<sup>[7]</sup>。其中遮蔽函数是根据条件概率得到的,该遮蔽函数含有四个经验参数,一般情况下它们可通过大量实验统计获取。在以往的建模过程中认为这些参数是不变的,这种近似具有一定优越性,适合一般的工程应用,但对于具有不同表面粗糙度的材料,这样做是不严密的,会带来较大的误差。因此针对具有不同表面粗糙度的材料,其遮蔽函数的四个参数需选用不同的参数值,参考文献[8]通过对目标样片表面 CCD 图像灰度图进行图像处理,然后利用遗传算法反演出 BRDF 模型中遮蔽函数的四个参数,但该方法计算过程非常复杂,且物理意义不是很清晰。文中将五参数 BRDF 统计模型中遮蔽函数的四个参数作为未知参数,使五参数 BRDF 统计模型转换为九参数 BRDF 模型,通过遗传模拟退火算法(GSAA)<sup>[9]</sup>反演出遮蔽函数的四个参数。

## 1 修正的 BRDF 五参数统计模型中的遮蔽函数

Torrance 和 Sparrow 推导出了粗糙表面的 BRDF 模型<sup>[10]</sup>。模型假设粗糙表面是由许多任意分布的微面元组成,每个微面元反射遵守反射定律。当表面高度均方根远远大于波长,Torrance 和 Sparrow 推出了 BRDF 公式如下:

$$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = gR(2\beta, \hat{n}) \frac{G(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)}{\cos\theta_r} \exp(-c^2 \alpha^2) + \frac{\rho_0}{\pi} \cos\theta_i \quad (1)$$

式中: $\theta_i, \theta_r$  分别是球坐标下的入射和反射天顶角; $\varphi_i, \varphi_r$  分别是球坐标下的入射和反射方位角,第一项是粗糙表面的镜面反射分量,第二项是漫反射分量。 $R(2\beta, \hat{n})$  为非涅耳反射函数, $G(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$  为遮蔽函数,指数项  $\exp(-c^2 \alpha^2)$  为小面元斜率分布函数。如果材料表面是各向同性,可以设  $\varphi_i=0, \varphi_r=\varphi_r, -\varphi_i=\varphi_r$ , 则双向反射分布函数可以降为关于  $\theta_i, \theta_r, \varphi_r$  的函数  $f_r(\theta_i, \theta_r, \varphi_r)$ 。

我国学者对上述模型进行了修正<sup>[7]</sup>,给出了双向反射分布函数的五参数半经验统计模型为:

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

式中: $k_b, k_d, k_r, a, b$  为待定参数。

模型中  $G(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$  就是考虑遮蔽和掩饰对散射带来的影响,其物理意义是观测方向上未被遮蔽和未被掩饰的面积与总面积的比值,遮蔽函数  $G(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$  由各相邻面元反射的遮蔽和掩饰概率决定。若入射到微面元上的光线被截止的现象称为遮蔽,在观测方向上反射光线被截住的现象则称为掩饰,反射微观平面的不平度特性决定了是否存在遮蔽和掩饰现象,遮蔽函数反映了不存在遮蔽和掩饰这两种事件所共同发生的概率。为了进一步简化公式,引入平面微观几何模型,如图 1 所示。 $\theta_p^i, \theta_p^r, \gamma_p$  分

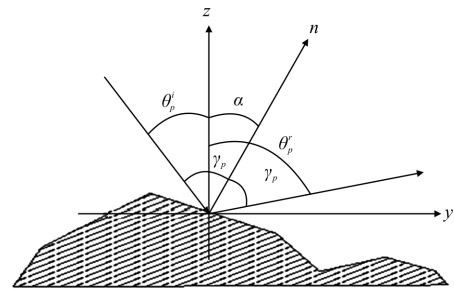


图 1 微观几何结构球面投影

Fig.1 Spherical projection of micro-geometry structure

别为  $\theta_i, \theta_r, \gamma$  的球面投影,代表小面元的入射角,在此基础上遮蔽函数使用逼近公式:

$$G(\theta_i, \theta_r, \varphi_r) = 1 + \frac{\omega_p |\tan\theta_p^i \tan\theta_p^r|}{1 + \sigma_r \tan\gamma_p}$$

$$\left/ \left[ (1 + \omega_p \tan^2 \theta_p^i)(1 + \omega_p \tan^2 \theta_p^r) \right] \right. \quad (3)$$

其中,  $\omega_p(\alpha) = \sigma_p \left( 1 + \frac{u_p \sin \alpha}{\sin \alpha + v_p \cos \alpha} \right)$ , 式中  $\sigma_p, \sigma_r, u_p, v_p$  为经验参数, 与表面粗糙度参数密切相关。通常这四个参数可由大量实验来确定<sup>[4]</sup>, 在实际应用中一般采用以下经验值:  $\sigma_p = 0.0136, \sigma_r = 0.0136, u_p = 9.0, v_p = 1.0$ 。根据球面三角学公式, 遮蔽函数中各参量  $\theta_p^i, \theta_p^r, \gamma_p$  的三角函数表达式为:

$$\tan \theta_p^i = \tan \theta_i \frac{\sin \theta_i + \sin \theta_r \cos \varphi_r}{2 \sin \alpha \cos \gamma}$$

$$\tan \theta_p^r = \tan \theta_r \frac{\sin \theta_r + \sin \theta_i \cos \varphi_r}{2 \sin \alpha \cos \gamma}$$

$$\tan \gamma_p = \frac{|\cos \theta_i - \cos \gamma|}{2 \sin \alpha \cos \gamma}$$

图 2 为  $0^\circ$  入射时遮蔽函数随其四个参数变化的函数曲线分布情况, 当纵坐标值等于 1 时表示不存在遮蔽衰减效应, 纵坐标值为 0 时表示遮蔽衰减最

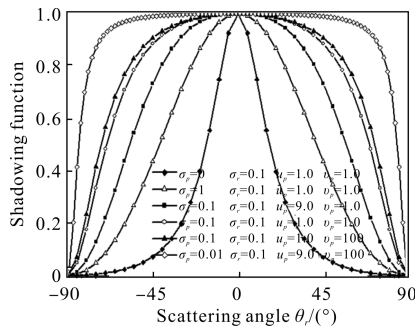


图 2 随粗糙度参数变化的遮蔽函数

Fig.2 Variation of shadowing function with roughness parameters

强。横坐标代表反射天顶角, 当反射天顶角为  $0^\circ$  时, 它对应的纵坐标值为 1, 即不存在遮蔽; 随着反射天顶角的增大, 遮蔽函数值显著减小, 起到了衰减效应, 当反射天顶角为  $90^\circ$  时, 实际上是理想情形, 此时遮蔽效应最强烈。遮蔽函数曲线分布受参量  $\sigma_p$  影响较大, 且随着  $\sigma_p$  增大函数曲线将变得窄而尖, 此时对应于大粗糙度的情形。同样, 遮蔽函数曲线形状也受参量  $u_p$  的影响。另外两个参量  $\sigma_r$  和  $v_p$  对曲线的形状影响极小, 特别是改变  $\sigma_r$  曲线形状几乎不发生变化。图 3 所示的遮蔽函数曲线是表示随入射角度不同的遮蔽函数, 四个参数取为经验值。从图中可以看到, 随入射角增大, 遮蔽函数明显降低, 起到了

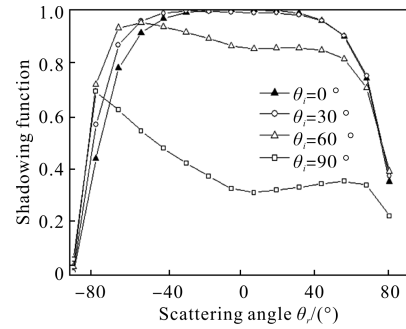


图 3 随入射角度变化的遮蔽函数

Fig.3 Variation of shadowing function with incident angles

衰减的作用。另外, 在镜向方向上有一个镜反射峰值; 而在后向也有一个略低于镜向峰值的突起, 因此, 这种遮蔽函数可以预测具有后向增强效应的反射曲线。

一般情况下, 取这些参数为经验值时, 这种做法符合一定的工程要求, 但对不同粗糙度的材料表面不够精确, 还会引起一定的误差, 并且缺乏理论支持, 因此, 针对不同粗糙度的材料表面, 应选用其相应的参数值。下面将遮蔽函数的四个参数也作为需要反演的未知参数, 这样五参数 BRDF 统计模型就成为九参数 BRDF 统计模型, 根据样片的 BRDF 实验测量数据, 通过遗传模拟退火算法就可反演出九参数 BRDF 模型的所有参量。

实验所测样片均由中国科学院安徽光学精密机械研究所双向反射分布函数实验测量系统测得, 该测量系统的原理和实验测量方法在许多文献中都进行了详细的论述<sup>[11-13]</sup>, 并且模型参量选取的标准采用参考文献[11]的计算公式, 这里都不再重复了。

## 2 遮蔽函数的参数反演举例

### 2.1 $1.06 \mu\text{m}$ 下金属蒙皮

根据金属蒙皮在入射天顶角  $\theta_i$  分别为  $0^\circ, 10^\circ, 30^\circ, 50^\circ$ , 相对方位角都是  $0^\circ$  的条件下的实验数据, 在遮蔽函数的四个参数取经验值情况下, 通过 GSAA 的参数反演, 可得五参数 BRDF 模型的各个参数和误差为:  $k_b = 0.117, k_r = 0.321, b = -24.589, a = 0.905, k_d = 0.051, E = 2.397\%$ 。然后将遮蔽函数的四个参数也作为需要反演的未知参数, 通过 GSAA 的参数反演, 可得九参数 BRDF 模型的各个参数和标准均方误差分别为:  $k_b = 0.117, k_r = 1.901, b = -17.733, a =$

0.915,  $k_d=0.045$ ,  $\sigma_r=0.0036$ ,  $\sigma_p=0.9369$ ,  $u_p=17.0645$ ,  $v_p=5.5292$ ,  $E=1.54\%$ 。图 4 是  $1.06 \mu\text{m}$  波长下金属蒙皮 BRDF 实验数据和将上述 BRDF 九参数统计模型所反演出的模型参数代入公式(2)计算的曲线, 依据优化出来的模型表达式, 可以获得该样片的三维 BRDF 分布, 如图 5 所示。

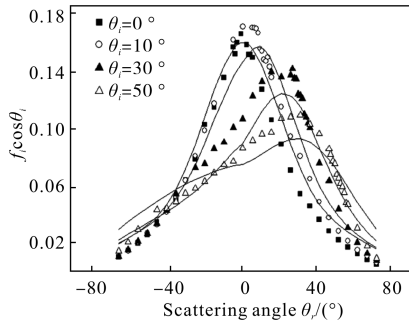


图 4 金属蒙皮表面 BRDF 实验数据和模型计算值  
Fig.4 Experimental data (point lines) and simulative value (solid lines) of BRDF for metal skin

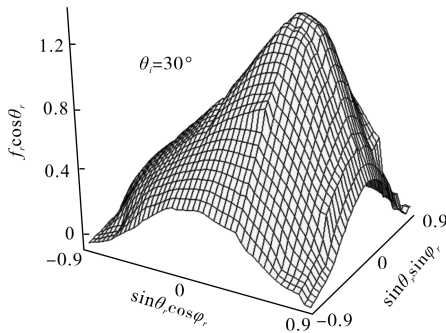


图 5 金属蒙皮表面 BRDF 三维分布图  
Fig.5 Three-dimension BRDF distribution of metal skin

### 2.2 1.06 μm 下涂漆钢板

根据涂漆钢板样片在入射天顶角  $\theta_i$  分别为  $0^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $50^\circ$ , 相对方位角都是的条件下的实验数据, 在遮蔽函数的四个参数取经验值情况下, 通过 GSAA 的参数反演, 可得五参数 BRDF 模型的各个参数和误差为:  $k_b=0.153$ ,  $k_r=0.456$ ,  $b=-26.998$ ,  $a=0.667$ ,  $k_d=0.015$ ,  $E=2.859\%$ 。然后将遮蔽函数的四个参数也作为需要反演的未知参数, 经过 GSAA 的参数反演, 获得九参数 BRDF 模型的各个参数和误差为:  $k_b=0.168$ ,  $k_r=1.784$ ,  $b=-27.825$ ,  $a=0.663$ ,  $k_d=0.0165$ ,  $\sigma_r=0.5695$ ,  $\sigma_p=0.6669$ ,  $u_p=18.1386$ ,  $v_p=3.5056$ ,  $E=1.30\%$ 。图 6 是  $1.06 \mu\text{m}$  波长下涂漆钢板 BRDF 实验数据和将上述 BRDF 九参数模型所反演出的模

型参数代入公式(7)计算的曲线, 依据优化出来的模型表达式, 可以获得该样片的三维 BRDF 分布, 如图 7 所示。

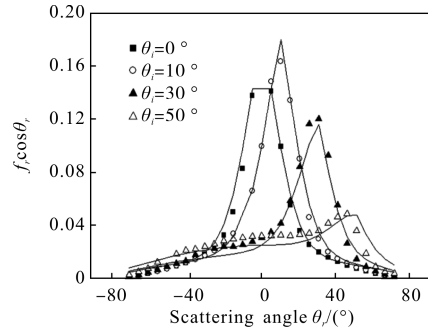


图 6 涂漆钢板表面 BRDF 实验数据和模型计算值  
Fig.6 Experimental data (point lines) and simulative value (solid lines) of BRDF for painted armor plate

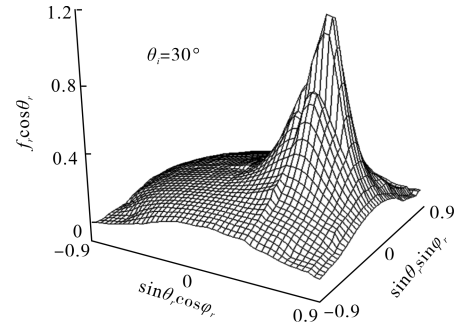


图 7 涂漆钢板表面 BRDF 三维分布图  
Fig.7 Three-dimension BRDF distribution of painted armor plate

### 2.3 结果及分析

根据九参数 BRDF 模型参数反演所获得的遮蔽函数的四个参数, 得到上述样片在不同入射角情况下遮蔽函数的分布情况, 如图 8、9、10、11 所示。从图中可以看出, 当入射角度为  $0^\circ$  时, 在散射角为  $0^\circ$  附近处两者的遮蔽值接近于 1, 这表明遮蔽效应作用较弱, 随着散射角度的增加, 遮蔽值也要减小, 说明遮蔽效应作用变得越明显, 当散射角度接近于  $90^\circ$  时, 遮蔽值迅速减小, 这是因为在接近于水平观测(即大观测角)情形下的遮蔽效应最为明显, 从图 8、9、10、11 中可以看出, 在上述几种入射角度情况下, 在散射角为  $90^\circ$  处, 两者的遮蔽值显然都为 0。在不同的入射角度下, 遮蔽函数值变化剧烈, 随着入射角度的增大, 两种样片的遮蔽值都下降得很快, 这是由于在大入射角度情况下, 粗糙表面的小面元分布存在着强烈的遮蔽和掩饰, 当入射角度为  $80^\circ$  时, 可近似为水平

入射,此时遮蔽效应最明显。图8、9、10、11表明金属蒙皮和涂漆钢板的遮蔽值随散射角的变化关系曲线非常接近,说明两种样片表面的粗糙程度基本相同。而经验值下的遮蔽函数随散射角的变化关系曲线比上述两种样片都要大,也进一步说明经验值情况下的遮蔽函数适合中等粗糙程度的情况,显然上述两种样片的表面粗糙程度是比较大的。

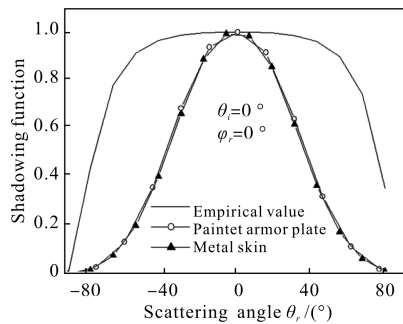


图 8 金属蒙皮和涂漆钢板在  $\theta_i=0^\circ$  的遮蔽函数分布曲线

Fig.8 Distribution curves of shadowing function of metal skin and painted armor plate under incident angle  $\theta_i=0^\circ$

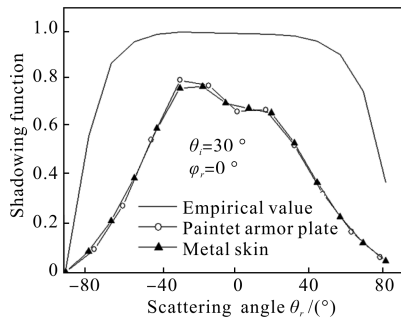


图 9 金属蒙皮和涂漆钢板在  $\theta_i=30^\circ$  的遮蔽函数分布曲线

Fig.9 Distribution curves of shadowing function of metal skin and painted armor plate under incident angle  $\theta_i=30^\circ$

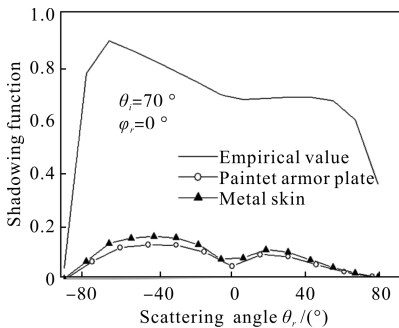


图 10 金属蒙皮和涂漆钢板在  $\theta_i=60^\circ$  的遮蔽函数分布曲线

Fig.10 Distribution curves of shadowing function of metal skin and painted armor plate under incident angle  $\theta_i=60^\circ$

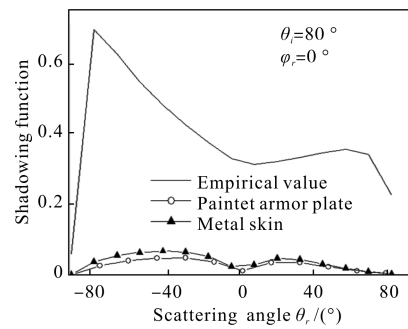


图 11 金属蒙皮和涂漆钢板在  $\theta_i=80^\circ$  的遮蔽函数分布曲线

Fig.11 Distribution curves of shadowing function of metal skin and painted armor plate under incident angle  $\theta_i=80^\circ$

图 12 和图 13、14 分别给出了遮蔽函数的四个参数取经验值时和金属蒙皮的遮蔽函数取参数反演值时的遮蔽函数的 3D 分布。

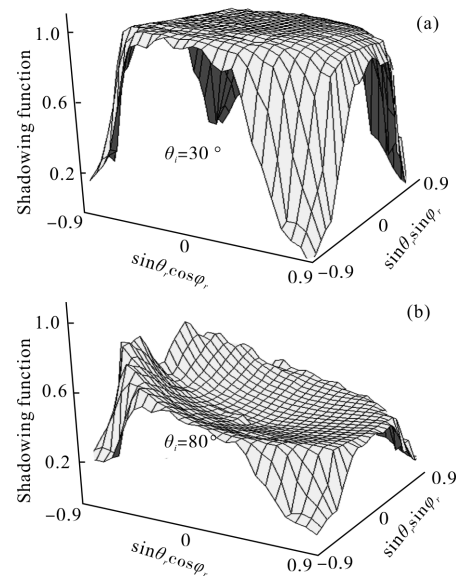


图 12 经验值情况下遮蔽函数的 3D 分布

Fig.12 Three-dimensional distribution of shadowing function under the empirical value of painted armor plate

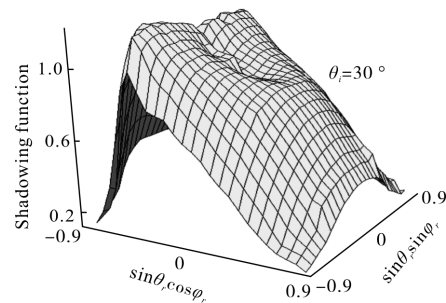


图 13 金属蒙皮在  $\theta_i=30^\circ$  的遮蔽函数 3D 分布

Fig.13 Three-dimensional distribution of shadowing function of metal skin under incident angle  $\theta_i=30^\circ$

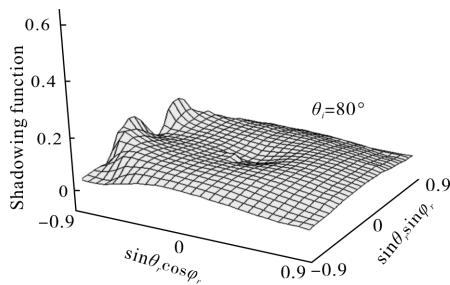


图 14 金属蒙皮遮蔽函数在  $\theta_i=80^\circ$  的 3D 分布

Fig.14 Three-dimension distribution of shadowing function of metal skin under incident angle  $\theta_i=80^\circ$

### 3 结 论

将修正的 BRDF 五参数统计模型中遮蔽函数的四个参数作为未知参数,通过遗传模拟退火算法对样片在激光波长下的 BRDF 实验测量数据进行模型参数反演,获得上述样片 BRDF 统计模型的九个模型参数,结果表明,与遮蔽函数四个参数取经验值情况相比较发现,九参数 BRDF 统计模型的均方误差更小,精度更高。并且通过反演出的遮蔽函数四个参数,得到上述样片在不同入射情况下遮蔽函数随散射角的分布情况,这种分布情况与材料表面实际情况是相符合的,因此九参数 BRDF 统计模型所反演的遮蔽函数四个参数能反映材料表面的粗糙程度。

#### 参考文献:

- [1] Sun Pengju, Gao Wei, Wang Yuefeng. Calculation and application of laser radar cross section for targets[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(5): 597-607. (in Chinese)  
孙鹏举,高卫,汪岳峰.目标激光雷达截面的计算方法及应用研究[J].*红外与激光工程*,2006,35(5):597-607.
- [2] Gong Lei, Wu Zhensen. Polarized bidirectional reflectance distribution function for film upon rough substrate [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41 (1): 200-204. (in Chinese)  
巩蕾,吴振森.粗糙基底上涂层的极化双向反射分布函数[J].*红外与激光工程*,2012,41(1):200-204.
- [3] Wang Mingjun, Dong Yanbing, Wu Zhensen, et al. Research on light scattering characteristics of rough surface and optical constants deduction [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(5): 549-552. (in Chinese)  
王明军,董雁冰,吴振森,等.粗糙表面光散射特性研究与光学常数反演[J].*红外与激光工程*,2004,33(5):549-552.
- [4] Cook R, Torrance K. A reflectance model for computer Graphics [J]. *Computer Graphics*, 1981, 15(4): 187-196.
- [5] Smith Bruce G. Geometrical shadowing of a random rough surface [J]. *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, 1997, 15(5): 3-21.
- [6] Wagner, R J. Shadowing of randomly rough surfaces [R]. TRW Systems Report, 7401-6012-R0000, 1966.
- [7] Wu Zhensen, Xie Donghui, Xie Pinhua, et al. Modeling reflectance function from rough surface and algorithms [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(8): 897-901. (in Chinese)  
吴振森,谢东辉,谢品华,等.粗糙表面激光散射统计建模的遗传算法[J].*光学学报*,2002,22(8):897-901.
- [8] Huang Chaojun, Liu Yafeng, Yin Jiwu, et al. Inversion parameters of shadowing function and optimization of BRDF statistical modeling on target surface [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(5): 883-886. (in Chinese)  
黄朝军,刘亚锋,尹继武,等.目标表面遮蔽函数参数的反演与 BRDF 统计建模的优化[J].*红外与激光工程*,2010,39(5):883-886.
- [9] Feng Weiwei, Wei Qingnong, Wang Shimei, et al. Optimized modeling of polarized BRDF based on hybrid genetic algorithm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(4): 743-747. (in Chinese)  
冯巍巍,魏庆农,汪世美,等.基于混合遗传算法的偏振双向反射分布函数优化建模 [J].*红外与激光工程*,2008,37(4):743-747.
- [10] Torrance K E, Sparrow E M. Theory for off-specular reflection from roughened surfaces [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1967, 57(9): 1105-1114.
- [11] Wang Anxiang, Zhang Hanlu, Wu Zhensen, et al. Experiment measurements and optimal modeling of goal surface's visible spectrum BRDF[J]. *Optical Technique*, 2008, 34(5): 655-658. (in Chinese)  
王安祥,张涵璐,吴振森,等.目标表面可见光谱 BRDF 的实验测量及优化建模[J].*光学技术*,2008,34(5):655-658.
- [12] Cao Yunhua, Wu Zhensen, Zhang Hanlu, et al. Experimental measurement and statistical modeling of spectral bidirectional reflectance distribution function of rough target sample[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(4): 792-798. (in Chinese)  
曹运华,吴振森,张涵璐,等.粗糙目标样片光谱双向反射分布函数的实验测量及其建模[J].*光学学报*,2008,28(4):792-798.
- [13] Zhao Zhongyi, Wang Zijun, Dai Jingmin. Application of genetic algorithms based on the parameters optimization of BRDF model[J]. *Infrared Technology*, 2006, 28(7): 391-394. (in Chinese)  
赵忠义,汪子君,戴景民.遗传算法在双向反射分布函数模型参数优化中的应用[J].*红外技术*,2006,28(7):391-394.