

文章编号: 0253-2239(2009)12-3357-05

基于双向反射分布函数模型的红外偏振仿真

马 帅 白廷柱 曹峰梅 李宏宁

(北京理工大学光电学院, 北京 100083)

摘要 将含有双参数的柯西分布替代常规高斯分布引入微面元双向反射分布函数(BRDF)模型,同时考虑了目标自身辐射强度的方向依赖性,在此基础上推导了长波红外偏振的数学模型,并在合理范围内对模型做简化与修正使之适用于仿真研究。对数学模型双参数(σ 和 q)的选择进行理论分析并验证了该模型的灵活性以及优势所在。整个仿真过程使用C语言编程实现,仿真流程主要包括目标及场景建模、模型文件处理及导入、仿真参数设定、偏振模型选择、热辐射计算、Gouraud算法表面绘制。偏振场景仿真结果较为理想,得到的目标红外偏振特性与实际图像基本吻合,表明采用的模型及算法适用于红外偏振的研究,对分析复杂目标长波红外偏振物理特性具有重要的理论意义。

关键词 图像处理;红外偏振;仿真;双向反射分布函数(BRDF);微面元理论;双参数柯西分布

中图分类号 TN219;O436.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092912.3357

Infrared Polarimetric Scene Simulation Based on Bidirectional Reflectance Distribution Function Model

Ma Shuai Bai Tingzhu Cao Fengmei Li Hongning

(School of Photoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100083, China)

Abstract The microfacet bidirectional reflectance distribution function (BRDF) model with the two-parameter Cauchy probability distribution, which substitutes for the model with general Gaussian distribution, is used. The directional dependence of emissivity of the object is also taken into account. On the basis, the deduction of mathematical model of long-wave infrared (LWIR) polarization is described. Reasonable simplification and correction for the model is made in order to make the model to be suitable for simulation. Then this paper analyses how to choose the two parameters (σ and q) of the mathematical model and gives the flexibility validation and advantages of the model. The whole process of simulation is done by using C language, the flow of which includes modeling, processing and importing the file into the system of simulation, setting the parameters of polarimetric model, computing the radiation transfer and rendering surface using Gouraud algorithm. The result of polarimetric scene simulation is desirable, which is basically in conformity with real imagers. It proves that the mathematical model and the algorithm in this paper are adequate for the research of LWIR polarization. The conclusion of this paper is significant basis for studying the LWIR polarimetric characteristic of complex objects.

Key words image processing; infrared polarization; simulation; bidirectional reflectance distribution function (BRDF); microfacet theory; the two-parameters Cauchy probability distribution

1 引 言

红外偏振信息是不同于红外热辐射的另一种表

征物体特征的信息,可利用偏振对比度成像,即两个物点之间没有温差也能成像。由于红外偏振技术具

收稿日期: 2009-01-01; **收到修改稿日期**: 2009-02-27

基金项目: 教育长江学者和创新团队发展计划(IRT0606)资助课题。

作者简介: 马 帅(1984—),女,博士研究生,主要从事光电成像仿真以及图像处理等方面的研究。

E-mail: jenny.ms@163.com

导师简介: 白廷柱(1955—),男,博士生导师,主要从事光电成像技术、光电检测技术和图像信息处理技术等方面的研究。

E-mail: bzhbai@bit.edu.cn

有突现目标轮廓和细节的能力,已经被广泛应用在红外隐身及反隐身等军事领域中。但是由于红外偏振依赖于目标特征、时间、背景分布情况等多种因素,使得红外偏振系统的设计难以仅凭理论分析和经验模型完成。为了精确研究各种目标以及背景的红外偏振特性、减小研究成本和研究周期,国外早在2002年就开始了对于红外偏振仿真的研究^[1,2],国内仅对双向反射函数理论^[3,4]和器件红外偏振特性^[5]做了初步研究,尚未涉足偏振成像仿真研究领域。本文将双参数柯西分布引入基于微面元理论的双向反射分布函数(BRDF)模型,以替代一般红外偏振研究中使用的高斯分布。针对复杂目标(置于简单背景中)的长红外偏振仿真进行了初步研究,推导出了红外偏振的数学模型,给出仿真过程及结果,并结合数学模型对仿真结果进行了理论分析。

2 红外偏振的数学模型

材料表面(例如喷涂层)对入射辐射通量的反射和材料内部对于透射辐射的散射是构成辐射反射的两个机制。这使得材料的反射系数具有强烈的角度依赖性,因此需引入双向反射分布函数(BRDF)来描述方向性反射系数。描述反射的微面元理论^[6]由几何光学理论推导出来。简单表述为:如果样品表面粗糙度大于或等于入射辐射波长,则其可以被看作是由一组微面元组成的。微面元的法线分布满足某种概率分布,对于每个微面元其反射特性可以近似看作是镜面反射。

反射理论中普遍应用 Torrance-Sparrow BRDF 模型(T-S 模型)^[7],该模型使用高斯分布作为微面元的概率分布函数。其他常用的 BRDF 模型类似于 T-S 模型,使用带有单一参数(表面粗糙度 σ)的高斯分布作为微面元法线方向的近似概率分布。这些分布存在的问题是,在样品表面粗糙度大的情况下,单一参数概率分布模型没有足够的灵活性来描述非镜面的宽角度反射。因此,本文引入带有双参数(σ, q)的柯西分布替代高斯分布,推导出适用于红外偏振的 BRDF 模型。

2.1 反射偏振模型

图 1 给出了在世界坐标系中定义微面元模型坐标关系。 z_n 为微面元 n 的法线方向, θ 为 z_n 与样品表面法线 z 的夹角, β 为入射方向与微面元法线间的夹角。 $\theta, \theta_i, \theta_r, \phi_i, \phi_r$ 之间的关系满足:

$$\cos \theta = \frac{(\cos \theta_i + \cos \theta_r)}{2 \cos \beta}, \quad (1)$$

$$\cos 2\beta = \cos \theta_i \cos \theta_r + \sin \theta_i \sin \theta_r \cos(\phi_i - \phi_r), \quad (2)$$

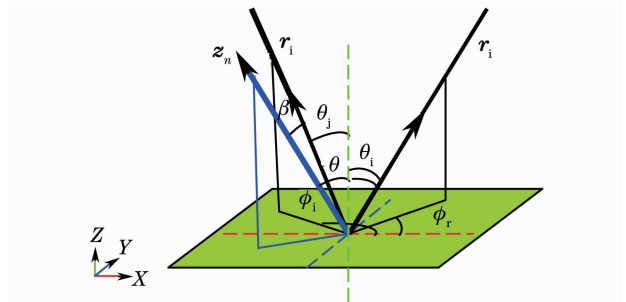


图 1 微面元模型坐标系

Fig. 1 Coordinate system of the microfacet model

参照图 1 给出的关系,表征微面元法线分布的双参数柯西概率分布函数为^[8]

$$p(\sigma, q) = \frac{(q-1)(\sqrt{2}\sigma)^{2q-2}}{\pi \cos^3(\theta) [\tan^2(\theta) + (\sqrt{2}\sigma)^2]^q}, \quad (3)$$

式中 σ 为材质粗糙度参数, q 为与材质特性有关的常量, q 的引入增强了微面元模型的灵活性。

根据基于微面元模型的理想标量 BRDF 公式,结合(1)式~(3)式可以推得双参数柯西分布标量 BRDF 的表达式:

$$f_r(r_i, \phi_i, r_r, \phi_r) = \frac{(q-1)}{\cos \theta_i \cos \theta_r} \cdot \frac{(\sqrt{2}\sigma)^{2q-2}}{[\tan^2(\theta) + (\sqrt{2}\sigma)^2]^q} \cdot \frac{g(k_{np})}{4\pi \cos^4 \theta}, \quad (4)$$

式中 $g(k_{np})$ 表示镜面微面元被入射辐射照射的百分比^[8],即微面元对反射辐射场的贡献因子。

下面将标量 BRDF 偏振化。文献[2]中采用的偏振化方法过于简单,其偏振模型仅给出了对于斯托克斯几个参量的简单表示,即仅仅是 ρ 和 I (温度 T 下的黑体辐射)的简单的加和乘积关系,因此仅适用其试验中仿真的简单目标。而本文讨论复杂目标的红外偏振特性,故采用缪勒(Mueller)矩阵作用辐射场的方法, Mueller 矩阵反映辐射能量传递变化关系。

由电磁场理论可知,入射辐射电场矢量 E_s^i, E_p^i 通过 2×2 的琼斯(Jones)矩阵^[6]可以得到散射辐射电场分量 E_s^r, E_p^r ,角标 p 和 s 分别代表电场分量平行和垂直于探测面。为了表征该过程中的电场分量,引入 4 个参考平面,分别为:入射方向与 z 组成的平面、探测方向与 z 组成的平面、入射方向与 z_n 组成的平面、探测方向与 z_n 组成的平面(图 1 所示), η_i, η_r 为参考平面之间变换的旋转角。得到琼斯矩阵表达式:

$$\begin{bmatrix} J_{SS} & J_{SP} \\ J_{PS} & J_{PP} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\gamma_r) & \sin(\gamma_r) \\ -\sin(\gamma_r) & \cos(\gamma_r) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_p \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\gamma_i) & -\sin(\gamma_i) \\ \sin(\gamma_i) & \cos(\gamma_i) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中 R_s, R_p 为辐射反射率, 可以通过菲涅耳公式求得, 它是复折射率 N 的函数。同时为了表征红外偏振与探测天顶角的关系, 通过已给出的表征入射、探测方向的若干角度即可以得到探测天顶角与 s, p 偏振分量的关系:

$$\mathbf{p}_i = \mathbf{r}_i \times \mathbf{s}_i, \quad \mathbf{p}_r = \mathbf{r}_r \times \mathbf{s}_r. \quad (6)$$

将标量 BRDF 函数与 4×4 的 Mueller 矩阵 \mathbf{M} 作用后得到偏振化 BRDF 模型。 \mathbf{M} 各分量 $M_{j,l}$ 由琼斯矩阵分量推出, 文献[6] 给出了 $M_{j,l}$ 的推导过程和结果。这样得到偏振化 BRDF 模型表达式:

$$f_{j,l}(\mathbf{r}_i, \phi_i, \mathbf{r}_r, \phi_r) = \frac{g(\mathbf{k}_{np})}{4\pi \cos^4 \theta} \cdot \frac{(q-1)}{\cos \theta_i \cos \theta_r} \cdot \frac{(\sqrt{2}\sigma)^{2q-2}}{[\tan^2(\theta) + (\sqrt{2}\sigma)^2]^q} \cdot M_{j,l}(\theta_i, \theta_r, \phi_r - \phi_i) + f_{np}, \quad (j, l = 0, 1, 2, 3) \quad (7)$$

式中 f_{np} 是非偏振体散射函数, 在初步的仿真研究中, 取 f_{np} 为仅与入射方向有关的常量。需要说明的是, 由于 \mathbf{M} 是通过 Jones 矩阵推导出来的, 故 $f_{j,l}(\mathbf{r}_i, \phi_i, \mathbf{r}_r, \phi_r)$ 同样是复折射率 N 的函数。

2.2 热发射的偏振模型

辐射能入射到物体表面会产生吸收、反射和透射过程。根据基尔霍夫定律并忽略透射过程后, 反射与发射是相关的。文献[9]对此关系进行了验证, 为将热发射率推广到偏振情况提供了理论依据。基于微面元模型对材料进行研究, 由于微面元几何分布的影响, 材料各个方向上的热发射并不相同, 因此发射率矩阵 $\boldsymbol{\varepsilon}_{DE}$ 也具有角度依赖性, $\boldsymbol{\varepsilon}_{DE} = \boldsymbol{\varepsilon}(\theta, \varphi, \lambda)$ [9]。

构造发射率矩阵 $\boldsymbol{\varepsilon}_{DE}$, 通过 $\boldsymbol{\varepsilon}_{DE}$ 的作用使得物体自身发射的辐亮度转换为类似于斯托克斯矩阵的矢量。理想黑体辐射可以看作是非偏振化的, 其方向发射率可以表示成 $\boldsymbol{\varepsilon}_{DE-BB} = [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ 。材料处于热平衡状态时可以看做其能量达到守恒, 即吸收和发射相等。为了简化, 本文模型暂不考虑透射情况, 且假定仿真过程中使用的材质为各向同性, 以忽略方位角变量 ϕ 的影响。发射率矩阵 $\boldsymbol{\varepsilon}_{DE}$ 如下:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{DE}(\theta_i, \lambda) = [1 - f_{pDHR}(\theta_i, \lambda)] \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_{DE-BB}, \quad (8)$$

式中 f_{pDHR} 是对 BRDF 矩阵各个分量在 2π 半球空间积分得到单位方向半球反射率, 它是一个 4×4 矩阵。显然对于实际情况中具有非理想反射特性的粗糙表面该积分小于 1, 这就保证了(8)式总有意义。

向(8)式中带入 BRDF 各分量的积分形式, 得到 4×1 的矢量, 即为物体偏振热发射率:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{DE} = \begin{bmatrix} 1 - \int_{\Omega_i} f_{00} \cos \theta_i d\Omega_i \\ - \int_{\Omega_i} f_{10} \cos \theta_i d\Omega_i \\ - \int_{\Omega_i} f_{20} \cos \theta_i d\Omega_i \\ - \int_{\Omega_i} f_{30} \cos \theta_i d\Omega_i \end{bmatrix}. \quad (9)$$

2.3 红外偏振仿真的数学模型

红外辐射的偏振状态可以用斯托克斯矢量 $\mathbf{S} = [S_0 \ S_1 \ S_2 \ S_3]^T$ 表示 [10], 其中 S_0 表示总辐射, S_1, S_2 表示线偏振辐射值, S_3 表示圆偏振辐射值。根据红外辐射的经验测量值, 圆偏辐射分量通常很小可以忽略, 故本文对 S_3 不做讨论。

综合(7)式和(9)式可以得到偏振斯托克斯矢量 \mathbf{S}_j 的表达式:

$$\mathbf{S}_j = f_{j,l}(\mathbf{r}_i, \phi_i, \mathbf{r}_r, \phi_r) \cdot \mathbf{S}_L + \boldsymbol{\varepsilon}_{DE} \cdot \mathbf{L} \quad (j, l = 0, 1, 2, 3), \quad (10)$$

式中 \mathbf{S}_L 为反射辐射的斯托克斯矢量, \mathbf{L} 为自身热发射的辐亮度。

3 理论模型分析

双参数柯西分布具有足够的灵活性, 其优势在于可以根据仿真表面的材质特性的不同调整 q 的取值, 使得微面元模型与物体实际表面反射特性曲线更加吻合。用于验证理论模型的试验数据采用 SOC (Surface Optics Corp) 提供的实测数据 [6, 11]。图 2 为 $\sigma=0.1$ 时 f_{00} 曲线分布, 仿真波长 $9.925 \mu\text{m}$ 、入射方向天顶角为 60° 、材质复折射率 $N=1.2+0.2i$ 的情况 (仿真参数设定与文献[6, 11]给出的采集情况相同),

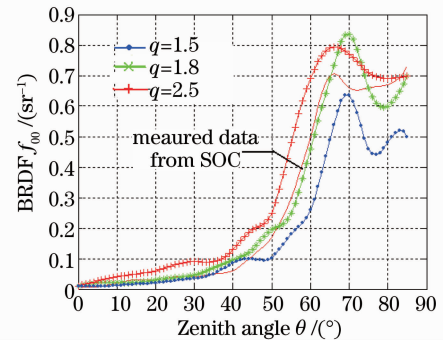


图 2 不同 q 值下的探测天顶角与 BRDF f_{00} 关系曲线
Fig. 2 Plot of zenith-BRDF f_{00} with different q

分别取 $q=1.5, 1.8, 2.5$, 横坐标为探测方向天顶角。可以看出, 当 $q=1.8$ 时 BRDF f_{00} 曲线与实测数据^[6,11] 分布最为吻合, 而 q 过大或者过小都会使得微面元法线分布偏离实际。

表面粗糙度参数 σ 对 BRDF 的特性有很大影响。图 3 为观察方向在入射面内 (即 $\phi_i - \phi_r = \pm 180^\circ$) 的 f_{00} 曲线, 仿真波长 $9.925 \mu\text{m}$ 、入射方向天顶角为 60° 、材质复折射率 $N=1.2+0.2i$ 的情况, 分别取粗糙度 σ 为 $0.1, 0.2, 0.3$, q 取图 2 中分析得到的最优值 1.8 。图 3 显示了 σ 对 BRDF 曲线形状以及峰值位置的影响。随着粗糙度的增加, BRDF 模型表现出越来越小的镜面反射特性, 曲线的峰值降低、所跨横坐标的宽度增加, 曲线峰值对应的反射方向天顶角具有增大的趋势。 σ 的增大引起峰值偏离镜面反射方向。由该曲线分布可知, 物体表面越光滑其红外偏振特性越强, 这个结论与以往对于红外偏振的理论分析^[1] 是一致的。

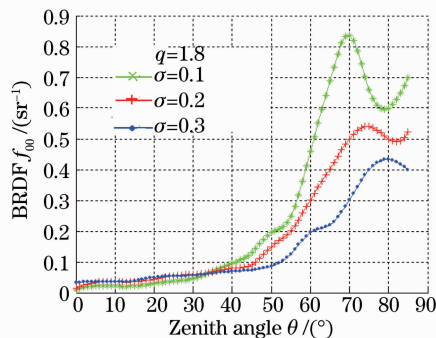


图 3 σ 对 BRDF f_{00} 曲线形状以及峰值位置的影响
Fig. 3 Plot of zenith-BRDF f_{00} with different σ

4 仿真过程及结果

仿真红外偏振的算法以及渲染过程在红外仿真研究系统上进行, 整个系统框架以及模型的渲染使用 C 语言编程进行。模型并不追求与目标实物精确一致, 只要可以说明问题即可。由于模型使用网格逼近曲面, 使用一般的绘制方法可能出现相邻多边形灰度值的突变, 故仿真的表面绘制模块采用 Gouraud 渲染算法^[12], 基本上消除了网格间光强度不连续的现象。在温度模块中, 对模型不同组成部分 (如车窗、车头发动机等) 通过顶点温度插值得到模型整体温度网格, 其精度可以达到对每个像素对应点的温度求解。仿真流程如图 4 所示。

仿真的关键是对双参数柯西分布中参数 q 的确定。对于每种需仿真的材质, q 选取的正确与否直接关系到模型的精确度。对于本文所做的单一目标

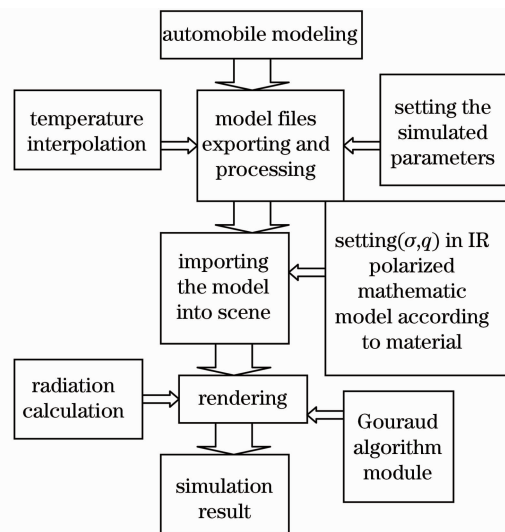


图 4 建模及仿真流程图

Fig. 4 Flow chart of the modeling and simulation

的仿真, 采用已有的对类似材质仿真所用的汽车模型使用网格建模表示偏振辐射测量的试验数据, 结合给出的模型分析的方法, 选取不同 q 值对数据进行曲线拟合。在仿真流程中“模型导入场景”的“偏振模型选择”模块中计算给出 q 的最优值。模型假定已知了材料的复折射率, 实际上复折射率是很难精确测量的参数, 所以一般在仿真研究中对复折射率做经验性估计。仿真场景的参数为: 秋季下午, 室外平均气温 10°C , 天气晴。由于本文着重讨论汽车目标红外偏振特性, 故选择几何模型较为复杂的汽车模型作为目标, 置于简单背景中渲染, 目的是为了清楚地观察仿真目标的红外偏振特性, 为后续对目标红外偏振的研究奠定基础。

图 5(a)~(c) 分别为仿真得到的汽车的红外偏振图像 S_0, S_1, S_2 。 S_1 和 S_2 图像中包含了很强的偏振对比度信息。汽车 S_1 偏振图像像最强的偏振信息在大约与摄像机方向成 30° 的方向上, 模型的部分表面没有偏振信号的原因是背景反射的辐射抵消掉了这些面的热发射辐射。 S_2 图像的最强的偏振信息在车顶棚处。车体与车窗玻璃所使用的材质粗糙度等特性不同, σ_{bodywork} 较大。根据上节中得到的偏振特性曲线分布, σ 较大的材质其 BRDF 反射曲线较宽, 则对于入射辐射的非镜面反射的几率越大。将该仿真结果与实际拍摄 (用于对比的实测图像使用罗切斯特理工学院的试验结果^[13], 该试验使用非制冷焦平面长波红外热像仪, 工作波段 $8\sim 14 \mu\text{m}$; 偏振片采用 ZnSe 金属线栅偏振片, 直径 75 mm , 分别置于 $0, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 拍摄; 天气条件与仿真场景参数一致) 的偏振 S_0, S_1, S_2 图像 [图 6(a)~(c)] 中的目标

比对,可见本文采用的仿真模型以及算法优于文献[13]中给出的仿真结果,可以更好地与实际情况相吻合。依据仿真得到的结果可以预见,若将该目标置于温度分布复杂的背景中,利用 S_1 或 S_2 偏振信息识别出目标的概率更大。

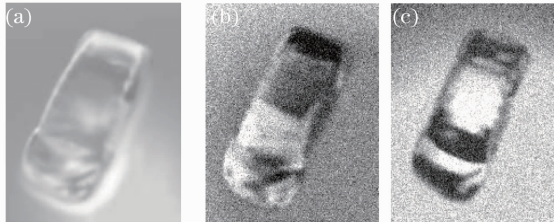


图 5 仿真红外偏振图像 S_0, S_1, S_2

Fig. 5 Simulated IR images S_0, S_1, S_2

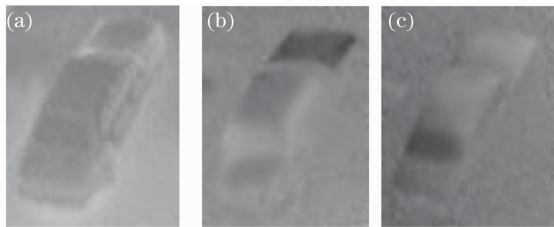


图 6 文献[13]实际拍摄的红外偏振图像 S_0, S_1, S_2

Fig. 6 Measured of reference [13] IR images S_0, S_1, S_2

5 结 论

研究了复杂目标的长波红外偏振仿真。采用基于双参数柯西分布的微面 BRDF 模型,同时考虑了目标自身辐射对方向的依赖性,结合这两方面推导出红外偏振的数学模型;对数学模型的双参数选择进行理论分析,验证了该模型的优势所在。得到的仿真结果较为理想,目标的红外偏振物理特性理论分析以及实际情况基本吻合,证明模型基本适用于红外偏振的研究。

存在的问题是:本文没有考虑大气以及传感器的复杂衰减,而且由于自然场景是比较复杂的,处于自然环境中物体的材质会受到例如灰尘污染、湿度变化等因素的影响而使得辐射率和反射率都会跟理想环境下同种材质的特性有差异,这些复杂的影响在本文的数学建模过程中没有加以考虑,因此得到仿真图像的信噪比高于实拍图像; q 值选择方法的不足。在多目标的复杂场景仿真中,对各种目标

材质的外场试验数据进行拟合寻找最优的 q 值并不现实,也缺乏效率。在后续研究中,要提高模型的自适应性(参数选择的自适应性),拟采用遗传算法从一定量的试验数据中自适应反演生成 q 值。同时仿真将目标置于户外杂乱背景中的复杂场景,对人造目标和自然背景的红外偏振特性进行模拟和分析,为研究利用红外偏振信息对目标的探测以及红外隐身技术提供理论依据。

参 考 文 献

- 1 Jason P. Meyers, John R. Schott. Incorporation of polarization into the DIRSIG synthetic image generation model[C]. *SPIE*, 2002, **4816**: 132~143
- 2 Frank Cremer, Wim de Jong, Klammer Schutte *et al.*. Surface mine signature modeling for passive polarimetric IR[C]. *SPIE*, 2002, **4742**: 1~12
- 3 Cao Yunhua, Wu Zhensen, Zhang Hanlu. Experimental measurement and statistical modeling of spectral bidirectional reflectance distribution function of rough target samples [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 792~798
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
- 4 Feng Weiwei, Wei Qingnong, Wang Shimei. Study of polarized bidirectional reflectance distribution function model for painted surfaces[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 290~294
冯巍巍, 魏庆农, 汪世美等. 涂层表面偏振双向反射分布函数的模型研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 290~294
- 5 Zhang Liang, Li Chengfang. Polarization effect of 150 nm subwavelength aluminum wire grating in near infrared [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(4): 164~174
张亮, 李承芳. 150 nm 亚波长铝光栅的近红外偏振特性[J]. *中国激光*, 2006, **33**(4): 164~174
- 6 Richard G. Priest, Thomas A. Germer. Polarimetric BRDF in the microfacet model: theory and measurements[C]. Proceedings of the 2000 Meeting of the Military Sensing Symposia Specialty Group on Passive Sensors, 2000, **1**: 169~181
- 7 K. E. Torrance, E. M. Sparrow. Theory for off-specular reflection from roughened surfaces[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1967, **57**(9): 1105~1114
- 8 David Wellems1, Steve Ortega. Long wave infrared polarimetric model: theory, measurements and parameters[J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2006, **8**: 914~925
- 9 Andrew Resnick, Chris Persons, George Lindquist. Polarized emissivity and Kirchhoff's law[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(8): 1384~1387
- 10 David S. Flynn, Cliff Alexander. Polarized surface scattering expressed in terms of a bidirectional reflectance distribution function matrix [J]. *Opt. Eng.*, 1995, **34**: 1646~1650
- 11 Surface Optics Corp. <http://www.surfaceoptics.com>
- 12 H. Gouraud. Continuous shading of curved surfaces [J]. *IEEE Trans. Comput.*, 1971, **C-20**(6): 87~93
- 13 M. G. Gartley, S. D. Brown, A. D. Goodenough. Polarimetric scene modeling in the thermal infrared[C]. *SPIE, Polarization Science and Remote Sensing*, 2007, **6682**: 66820C