

基于偏振双向反射分布函数的粗糙表面偏振特性

章延隽, 王霞, 贺思

光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京理工大学光电学院, 北京 100081

摘要 为了研究高斯粗糙表面偏振特性, 基于微面元理论, 综合考虑微面元的漫反射和镜面反射, 建立偏振双向反射分布函数模型。对由偏振双向反射分布函数得到的穆勒矩阵进行分解、变换等处理, 推导出表征粗糙表面二向色性、相位延迟和退偏的 3 个子矩阵及其对应的偏振特性表达式。针对典型的粗糙目标, 对偏振特性进行理论计算。分析入射角、方位角, 以及粗糙度对粗糙表面偏振特性的影响。结果表明: 粗糙表面二向色性在入射角变化范围内有极大值, 且随方位角的增大而增大; 相位延迟随入射角的增大而减小, 且在方位角变化范围内有极大值; 退偏能力在入射角范围内有极小值, 且随方位角的增大而减小; 粗糙度对除退偏能力以外的偏振特性影响较小。

关键词 散射; 偏振双向反射分布函数; 粗糙表面; 穆勒矩阵; 偏振特性

中图分类号 O436.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0329002

Polarization Properties of Rough Surfaces Based on Polarized Bi-Directional Reflectance Distribution Function

Zhang Yanjun, Wang Xia, He Si

Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System (Beijing Institute of Technology),
Ministry of Education, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract To study the polarization properties of rough surfaces, we build a polarized bidirectional reflectance distribution function model based on the micro-facet theory by considering both the diffuse reflection and mirror reflection of micro-facet. By decomposing and changing the form of Mueller matrix, based on polarized bi-directional reflectance distribution function, we get three sub-matrixes and corresponding expressions which characterize the dichroism, phase delay, and depolarization of rough surfaces. We calculate the polarization properties of typical rough surfaces, and analyze the impact of incidence angle, azimuth angle, and roughness on polarization properties of rough surfaces. The results show that, the dichroism of rough surfaces has the maximum in the range of incident angle, and increases with increase of azimuth angle. The phase delay has the maximum in the range of azimuth angle, and decreases with increase of incident angle. The depolarization has the minimum in the range of incident angle, and decreases with increase of azimuth angle. The roughness has little impact on these factors except for depolarization.

Key words scattering; polarized bi-directional reflectance distribution function (PBRDF); rough surfaces; Mueller matrix; polarization properties

OCIS codes 290.1485; 290.5880; 260.5430

1 引 言

随着偏振探测技术的发展, 粗糙表面偏振特性的研究逐渐受到广泛重视^[1]。基于微面元模型的偏振双向反射分布函数(PBRDF)作为粗糙表面散射

的典型模型, 在目标探测、材质分类等领域有广泛的研究前景^[2]。基于 PBRDF 可以得到表征物体偏振特性的穆勒矩阵, 分解穆勒矩阵可提取相应的偏振参数, 对研究粗糙表面的偏振特性有重要意义。

Vimal 等^[3]通过实验得出不同入射角、散射角

收稿日期: 2017-10-11; 收到修改稿日期: 2017-11-07

基金项目: 武器装备预研基金(9140A03031215BQ01031)、国家自然科学基金(61575023)

作者简介: 章延隽(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事偏振成像方面的研究。E-mail: zerozhang1993@sina.com

导师简介: 王霞(1972—), 女, 副教授, 博士生导师, 主要从事光电检测技术、微光与红外热成像技术方面的研究。

E-mail: angelniuniu@bit.edu.cn

和复折射率对目标偏振度的影响; Singh 等^[4]在偏振光束倾斜入射样本的情况下, 对各向同性单层粗糙表面散射模型的偏振光散射特性进行了研究; 高明等^[5]计算了椭圆偏振光和自然光经粗糙面散射后偏振特性随散射角变化的情况, 并分析了入射角、方位角、复折射率等因素对散射光偏振特性的影响。孙仲秋等^[6]分析了不同植被冠层的偏振反射特性, 得到 2 个地表偏振反射模型的模型参数, 并计算出一般植被冠层的偏振反射信息; 孙贤明等^[7]利用矩阵算法计算了整个海洋-大气系统对太阳辐射的偏振反射特性, 研究了整个海-气系统反射强度和偏振度对各种大气、海洋表面, 以及入射和观测几何条件的敏感性。由此可以看出, 国内外科研机构的研究重点主要集中在散射光偏振特性上, 而对粗糙面的偏振特性研究相对较少。

本文在传统的 PBRDF 模型基础上, 通过半球定向反射和能量守恒计算了粗糙表面微面元漫反射成分, 完善了 PBRDF 模型。利用穆勒矩阵的极化分解理论对包含粗糙表面偏振信息的穆勒矩阵进行分解变化, 得到表征粗糙表面偏振特性的相关表达式, 并对典型的粗糙表面进行偏振特性计算, 分析粗糙表面偏振特性随各参量的变化关系, 旨在为后续的粗糙表面偏振特性提取和目标分类识别工作提供一定的参考。

2 PBRDF 模型

2.1 双向反射分布函数(BRDF)

BRDF 是用于对粗糙表面散射特性进行建模研究的一种常用函数^[8], 其定义为光线沿 (θ_r, φ_r) 方向出射的辐亮度 $L_r(\theta_i, \theta_r, \Delta\varphi)$ 与沿 (θ_i, φ_i) 方向入射到目标表面的辐照度 $E_i(\theta_i, \varphi_i)$ 之比^[9]:

$$\rho(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) = L_r(\theta_i, \theta_r, \Delta\varphi) / E_i(\theta_i, \varphi_i), \quad (1)$$

式中, θ_i 和 φ_i 分别表示入射方向的天顶角和方位角; θ_r 和 φ_r 分别表示出射方向的天顶角和方位角; $\Delta\varphi = \varphi_r - \varphi_i$ 为相对方位角, 表示入射面与反射面之间的夹角; λ 为入射光的波长。各参数之间的位置关系如图 1 所示。目标表面的 BRDF 量化了不同入射方向和观测方向的辐射传输特性, 且 BRDF 具有互异性和能量守恒 2 个最基本的性质^[10]。

2.2 偏振双向反射分布函数

PBRDF 在 BRDF 的基础上发展而来, 表征了目标表面的偏振传输关系。根据微面元理论, 目标表面可视为由一系列满足高斯分布的微小面元所组

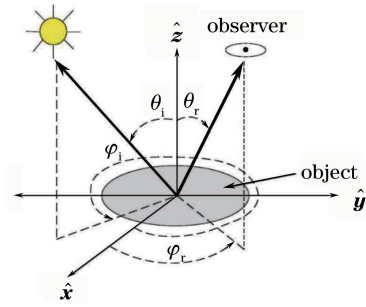


图 1 BRDF 几何关系示意图

Fig. 1 Geometrical illustration of BRDF

成的整体, 且每一个小面元的反射遵循菲涅耳反射公式^[11], 小面元的反射包含了镜面反射 f_s 和漫反射 f_d 两个部分, 且只有镜面反射具有偏振特性。

根据微面元理论, 可以得到 PBRDF 的镜面反射部分为

$$f_s = f_{s,jk}(\theta_i, \theta_r, \sigma, \Delta\varphi) = \frac{1}{\cos \theta_N \cos \theta_i \cos \theta_r} \times G(\theta_i, \theta_r, \Delta\varphi) M_{j,k}(\theta_i, \theta_r, \Delta\varphi), \quad (2)$$

式中, σ 为均方根高度, 表征目标表面的粗糙度; θ_N 为微面元法向与目标表面法向之间的夹角; $G(\theta_i, \theta_r, \Delta\varphi)$ 为遮蔽因子, 表示不同粗糙度表面的遮蔽效应, 目前典型的遮蔽模型认为相邻面元之间的结构呈 V 形, Torrance 等^[11]对不同粗糙表面的遮蔽效应给出了具体的数学描述; $M(\theta_i, \theta_r, \Delta\varphi)$ 为 4×4 的穆勒矩阵; $P_D(\sigma, \theta_N)$ 为微面元法向概率分布函数, 一般认为微面元服从高斯分布^[12], 因此有

$$P_D(\sigma, \theta_N) = \frac{\exp[-\tan^2 \theta_N / (2\sigma^2)]}{4\pi\sigma^2 \cos^3 \theta_N}. \quad (3)$$

由于 PBRDF 模型所描述的几何关系建立于宏观坐标系, 而整体的粗糙表面不满足菲涅耳反射公式, 因此需要在宏观坐标系和微面元坐标系之间建立其联系。对于微面元模型, 其各角度满足

$$\cos(2\beta) = \sin \theta_i \sin \theta_r \cos(\varphi_r - \varphi_i) + \cos \theta_i \cos \theta_r, \quad (4)$$

其中, β 为入射光线在微面元上的入射角, 而 θ_N 可由 β 求得:

$$\cos \theta_N = \cos \theta_i + \cos \theta_r / (2 \cos \beta). \quad (5)$$

η_i 和 η_r 表示入射方向分别与粗糙表面法线和微面元法线组成的平面的夹角, 满足

$$\begin{cases} \cos \eta_i = \frac{\cos \theta_N - \cos \theta_i \cos \beta}{\sin \theta_i \sin \beta} \\ \cos \eta_r = \frac{\cos \theta_N - \cos \theta_r \cos \beta}{\sin \theta_r \sin \beta} \end{cases} \quad (6)$$

通过琼斯矩阵表示入射光和散射光 s, p 振动方向上的电场矢量传输关系^[13]:

$$\begin{bmatrix} E_r^s \\ E_r^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \eta_r & \sin \eta_r \\ -\sin \eta_r & \cos \eta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_s & 0 \\ 0 & r_p \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \eta_i & -\sin \eta_i \\ \sin \eta_i & \cos \eta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_i^s \\ E_i^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{ss} & T_{ps} \\ T_{sp} & T_{pp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_i^s \\ E_i^p \end{bmatrix}. \quad (7)$$

式中, r_s 和 r_p 分别表示 s 分量与 p 分量的菲涅耳反射系数, 数值大小与粗糙表面的复折射率 $\tilde{n} = n - ik$ 有关, 其计算方法在文献[13]中给出了具体的描述; T_{ss} 、 T_{sp} 、 T_{ps} 、 T_{pp} 为琼斯矩阵元。由(7)式可知, 在微面元坐标系中利用菲涅耳反射公式计算微面元的反射后, 通过琼斯矩阵与穆勒矩阵的转换关系可建立微面元坐标系和宏观坐标系之间的联系, 从而得到偏振 PBRDF 的镜面反射部分。

2.3 偏振双向反射部分函数漫反射成分

在微面元模型中, 虽然认为漫反射部分 f_d 不具有偏振特性, 但漫反射是反射总能量中重要的组成部分, 因此仅通过镜面反射部分描述目标的偏振传输特性是不准确的。通过半球定向反射概念(HDR)和能量守恒可以计算得到 PBRDF 中的漫反射成分^[14]。

HDR 定义为 BRDF 在目标表面上半球空间的积分效果, 同时认为目标表面具有旋转对称性, 其表

达式为

$$\rho_{\text{HDR}}(\theta_i) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \rho(\theta_i, \theta_r, \Delta\varphi) \times \cos \theta_r \sin \theta_r d\theta_r d\Delta\varphi. \quad (8)$$

对于理想的镜面反射, 镜面反射比为

$$\rho_{\text{HDR}}^s(\theta_i) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} f_{00}^s(\theta_i, \theta_r, \Delta\varphi) \times \cos \theta_r \sin \theta_r d\theta_r d\Delta\varphi = 1. \quad (9)$$

对于粗糙表面, 在理想情况下, 漫反射和镜面反射满足能量守恒

$$\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} f_{00}^s \cos \theta_r \sin \theta_r d\theta_r d\Delta\varphi + \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} f_{00}^d \cos \theta_r \sin \theta_r d\theta_r d\Delta\varphi = 1. \quad (10)$$

若认为漫反射满足朗伯定律, 可以得到

$$f_{00}^d(\theta_i, \sigma) = \frac{1}{\pi} \left(1 - \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} f_{00}^s \cos \theta_r \sin \theta_r d\theta_r d\Delta\varphi \right) = \frac{1}{\pi} [1 - \rho_{\text{HDR}}^s(\theta_i, \sigma)]. \quad (11)$$

对于非理想情况, 考虑粗糙表面对能量的吸收, 漫反射用 $f_{00}^d(\theta_i, \sigma)M_{00}$ 表示^[15], 其中 M_{00} 表示穆勒矩阵强度矩阵元。确定了 PBRDF 中的漫反射成分后, 如果用 Stokes 矢量描述入射光和反射光的偏振特性, 则 PBRDF 可表示为 4×4 的矩阵形式:

$$L^r(\theta_r, \varphi_r) = \begin{bmatrix} L_0^r \\ L_1^r \\ L_2^r \\ L_3^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{00}^s + f_{00}^d M_{00} & f_{01}^s & f_{02}^s & f_{03}^s \\ f_{10}^s & f_{11}^s & f_{12}^s & f_{13}^s \\ f_{20}^s & f_{21}^s & f_{22}^s & f_{23}^s \\ f_{30}^s & f_{31}^s & f_{32}^s & f_{33}^s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_0^i \\ E_1^i \\ E_2^i \\ E_3^i \end{bmatrix}, \quad (12)$$

式中, L_i^r 表示反射辐亮度的 Stokes 矢量参数, E_i^i 表示入射辐照度的 Stokes 矢量参数。根据穆勒矩阵的定义^[16], PBRDF 模型求得的 4×4 穆勒矩阵反映了特定情况下光入射和反射的偏振态变化情况。通过对利用 PBRDF 模型所求得的穆勒矩阵进行相关处理, 可以得到粗糙表面偏振信息的有效表征方法。

3 穆勒矩阵的分解与偏振信息的提取

穆勒矩阵包含了目标丰富的偏振信息, 然而穆勒矩阵的 16 个阵元代表的物理意义并不明确, 因此从穆勒矩阵中分离提取偏振参数具有重要意义。穆勒矩阵的分解是指通过数学运算的方法, 将穆勒矩阵转化为具有明确物理意义的参数, 从而更直观地表征物体的偏振信息。目前应用最广泛的穆勒矩阵分解方法是 1996 年由 Lu 等^[17]提出的极化分解法,

根据二向色性(与偏振有关的强度衰减性质)、相位延迟(与偏振有关的相位改变性质)和散射退偏(偏振光转化为非偏振光的性质), 将穆勒矩阵分解为 3 个子矩阵的乘积, 通过子矩阵可以独立体现目标的不同偏振特性^[18]。

$$M = M_{\Delta} M_R M_D, \quad (13)$$

$$M_{\Delta} = \begin{pmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{0}^T \\ \mathbf{P}_{\Delta} & m_{\Delta} \end{pmatrix}, \quad (14)$$

$$M_R = \begin{pmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{0}^T \\ \mathbf{0} & m_R \end{pmatrix}, \quad (15)$$

$$M_D = \begin{pmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{D}^T \\ \mathbf{D} & m_D \end{pmatrix}, \quad (16)$$

$$\mathbf{P}_{\Delta} = \frac{\mathbf{P} - m\mathbf{D}}{1 - D^2}, \quad (17)$$

式中, M 表示物体的穆勒矩阵, M_{Δ} 表示目标对于入

射光的退偏振矩阵, \mathbf{M}_R 表示目标对于入射光的相位延迟矩阵, \mathbf{M}_D 表示目标对入射光的振幅双向衰减矩阵, \mathbf{m}_Δ 、 \mathbf{m}_R 、 \mathbf{m}_D 分别表示为对应的 3×3 子矩阵, \mathbf{D} 为双向衰减矢量, \mathbf{P} 为偏振矢量, \mathbf{m} 为归一化穆勒矩阵 \mathbf{M} 的 3×3 阶子矩阵。

建立 PBRDF 模型, 并对穆勒矩阵进行极化分解, 求得表征粗糙表面相位延迟、二向色性和退偏振特性的 3 个子矩阵 \mathbf{M}_Δ 、 \mathbf{M}_R 和 \mathbf{M}_D 。通过对子矩阵进行数学运算, 可提取对应的偏振参数, 其中, 目标的退偏能力 Δ 表示为

$$\Delta = 1 - \frac{|\text{tr}(\mathbf{M}_\Delta) - 1|}{3}, 0 \leq \Delta \leq 1. \quad (18)$$

目标的总相位延迟 R (线性双折射和旋光的叠加) 可由分解出的相位延迟矩阵 \mathbf{M}_R 计算得到:

$$R = \arccos[\text{tr}(\mathbf{M}_R)/2 - 1]. \quad (19)$$

目标的二向色性 D 表示为

$$D = \sqrt{m_{01}^2 + m_{02}^2 + m_{03}^2}, 0 \leq D \leq 1, \quad (20)$$

式中, m_{01} 、 m_{02} 和 m_{03} 分别表示穆勒矩阵第 1 行第 2、3、4 列矩阵元。

4 数值计算与分析

为了验证 PBRDF 模型的正确性, 根据(12)式推导出自然光散射偏振度表达式, 并将数值计算结果与文献[3]的实验数据进行对比。偏振度定义为全偏振分量的强度与该光波的总强度之比:

$$R_{\text{DOP}} = \frac{[(f_{10}^s)^2 + (f_{20}^s)^2 + (f_{30}^s)^2]^{1/2}}{(f_{00}^s + f_{00}^d M_{00})}. \quad (21)$$

仿真数据与实验数据的对比如图 2 所示, 其中反射角(即上文出射方向的天顶角) $\theta_r = 60^\circ$, 相对方位角 $\Delta\varphi = 180^\circ$ 。横坐标为入射角(即上文入射方向的天顶角)的角度, 纵坐标为反射光偏振度。图 2(a) 为绿漆表面反射光偏振度计算与实测曲线对比, 其复折射率为 $\tilde{n} = 1.47 - 0.47i$, 表面粗糙度 $\sigma = 0.1$; 图 2(b) 为黑漆表面反射光偏振度计算与实测曲线对比, 其复折射率为 $\tilde{n} = 1.46 - 1.28i$, 表面粗糙度 $\sigma = 0.2$ 。

从图 2 的对比中可以看出, 利用本文方法, 综合考虑微面元的镜面反射和漫反射, 计算得到的反射偏振度与实验数据吻合较好, 存在的小部分误差是由于目标表面涂层并非理想的高斯分布所致。在验证 PBRDF 模型后, 以复折射率 $\tilde{n} = 1.46 - 1.28i$ 、表面粗糙度 $\sigma = 0.2$ 的黑漆涂层表面为仿真对象, 通过(12)式的极化分解法和(18)~(20)式计算得到粗糙表面的偏振参数, 并对其变化规律进行计算机仿真研究。

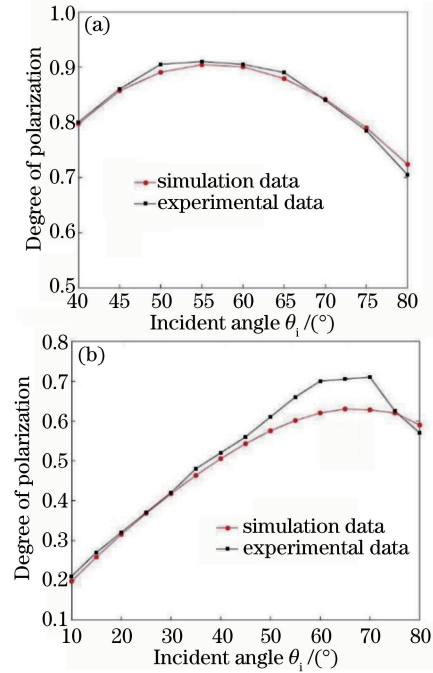


图 2 偏振特性实验与数值计算结果对比。

(a) 绿漆表面; (b) 黑漆表面

Fig. 2 Contrast of experimental and simulation results of polarization characteristics. (a) Green paint surface;

(b) black paint surface

4.1 入射角对粗糙表面偏振特性的影响

取方位角 $\Delta\varphi = \pi$, 图 3 描述了不同散射角下粗糙表面二向色性 D 随入射角的变化曲线。入射角在 $\theta_i \in (0, \pi/2)$ 范围内, 二向色性有极大值; 在 $\theta_i \in (0, \pi/3)$ 范围内, 二向色性随着入射角的增大而增大。对于散射角不同的情况, 散射角越大, 粗糙表面整体表现出的二向色性越强。

图 4 为不同散射角下粗糙表面相位延迟 R 随入射角的变化曲线。可以看出, 入射角 $\theta_i \in (0, \pi/2)$ 范围内, 对于不同的散射角, 相位延迟随着入射角的

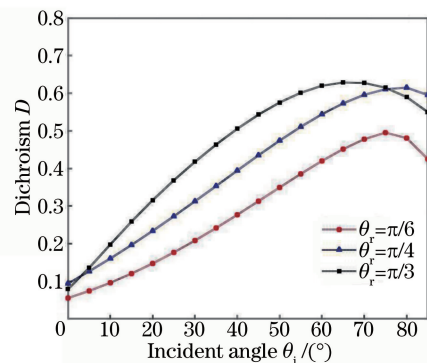


图 3 不同散射角下二向色性随入射角变化情况

Fig. 3 Dichroism versus incident angle with different scattering angles

增大而减小;在其余条件不变的情况下,散射角越大,粗糙表面整体的相位延迟越大。

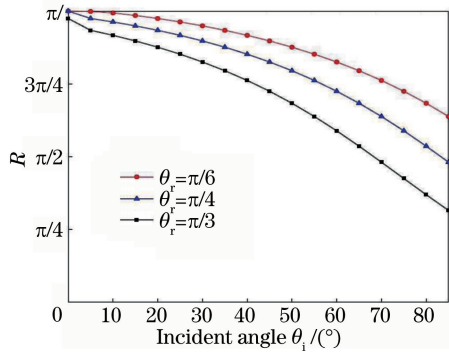


图 4 不同散射角下相位延迟随入射角变化情况
Fig. 4 Phase delay versus incident angle with different scattering angles

图 5 对比了不同散射角所对应的散射退偏 Δ 随入射角变化的情况。在入射角 $\theta_i \in (0, \pi/2)$ 范围内,粗糙表面散射退偏 Δ 有极小值,对于不同的散射角, Δ 均表现出了先减小后增大的趋势。在入射角 $\theta_i \in (0, \pi/4)$ 时,散射角越大,粗糙表面整体的退偏能力越强。

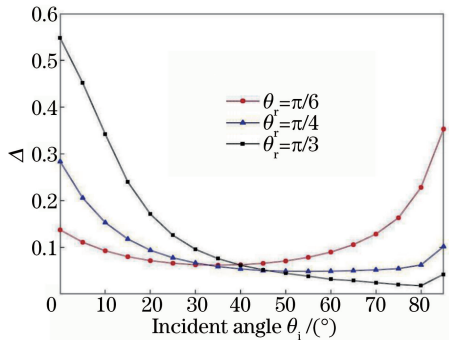


图 5 不同散射角下散射退偏随入射角变化情况
Fig. 5 Depolarization versus incident angle with different scattering angles

4.2 方位角对粗糙表面偏振特性的影响

取入射角 $\theta_i = \pi/3$ 。图 6 为不同散射角下粗糙表面二向色性 D 随方位角的变化曲线。方位角在 $(0, \pi)$ 范围内,二向色性随着方位角的增大而增大,方位角在 $\pi/2$ 附近时二向色性增幅较大。对于不同的散射角,散射角越大,二向色性在方位角 $(0, \pi)$ 范围内的增幅越大。方位角较小时,散射角越大,二向色性越小;方位角较大时,散射角越大,二向色性越大。

图 7 对比了不同散射角下相位延迟 R 随方位角变化的情况。可以看出,对于不同散射角,相位延迟 R 总体呈先增大后减小的趋势,在方位角 $\Delta\varphi \in$

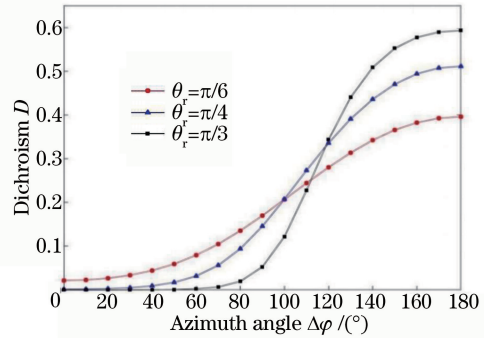


图 6 不同散射角下二向色性随方位角变化情况
Fig. 6 Dichroism versus azimuth angle with different scattering angles

$(0, \pi)$ 范围内,相位延迟有极大值。其余条件不变时,散射角越大,对应相位延迟的衰减幅度越大,粗糙表面整体相位延迟越小。

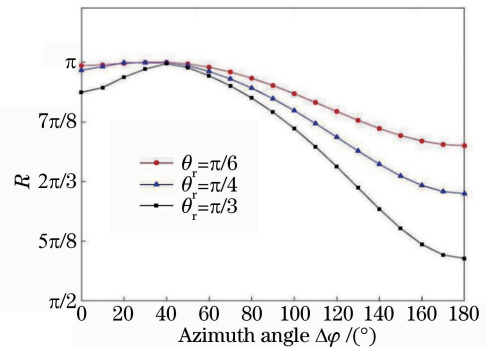


图 7 不同散射角下相位延迟随方位角变化情况
Fig. 7 Phase delay versus azimuth angle with different scattering angles

图 8 描述了不同散射角下散射退偏 Δ 随方位角变化的曲线。对于不同大小的散射角,在方位角 $\Delta\varphi \in (0, \pi)$ 的范围内,粗糙表面的散射退偏特性随着方位角的增大而减小,散射角越大,退偏特性随入射角增大,衰减幅度变大;在入射角相同且方位角较大的情况下,不同散射角所对应的粗糙表面退偏能

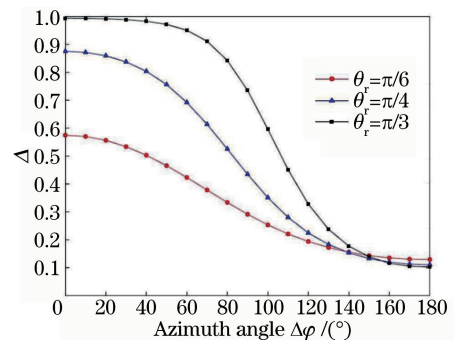


图 8 不同散射角下散射退偏随方位角变化情况
Fig. 8 Depolarization versus azimuth angle with different scattering angles

力相差较小。

4.3 粗糙度对粗糙表面偏振特性的影响

取散射角 $\theta_r = \pi/6$ 、方位角 $\Delta\varphi = \pi$ 。图 9 对比了不同粗糙度下粗糙表面二向色性 D 随入射角变化的情况,可以看出,对于不同粗糙度的黑漆表面,其表面二向色性随入射角的变化趋势相同,均为先增大后减小。在入射角 $\theta_i \in (0, \pi/2)$ 范围内,二向色性均有极大值,表面粗糙度越大,其二向色性的极大值也越大。在入射角度较小,且粗糙度变化范围较小的情况下,二向色性的变化也非常小。

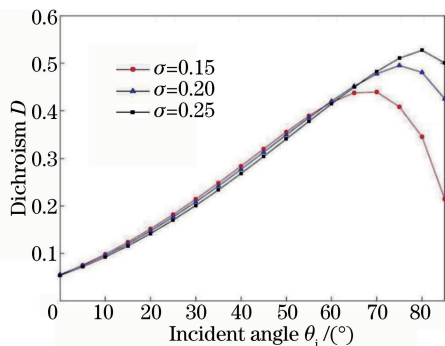


图 9 不同粗糙度下二向色性随入射角变化情况
Fig. 9 Dichroism versus incident angle with different roughnesses

图 10 描述了粗糙度 σ 分别为 0.2、0.5、0.7 的情况下,相位延迟 R 随入射角变化的情况。对于不同的粗糙度,在粗糙度变化范围不大的情况下,粗糙表面相位延迟随入射角的数值变化与粗糙度大小无关。

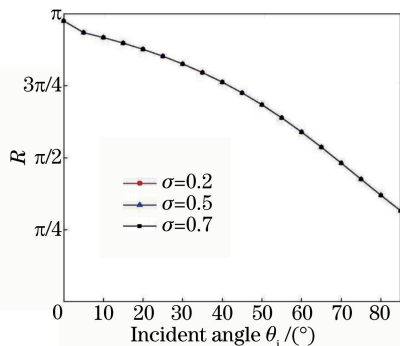


图 10 不同粗糙度下相位延迟随入射角变化情况
Fig. 10 Phase delay versus incident angle with different roughnesses

图 11 为不同粗糙度下粗糙表面散射退偏 Δ 随入射角变化的曲线。在粗糙度不同的情况下,粗糙表面退偏特性随入射角变化的趋势基本相同。在入射角 $\theta_i \in (0, \pi/2)$ 范围内,退偏参量 Δ 有极小值,且随入射角的增加呈先减小后增大的变化趋势;在入射角 $\theta_i \in (\pi/4, \pi/2)$ 的范围内,表面粗糙度越大,退

偏能力的增幅越小。

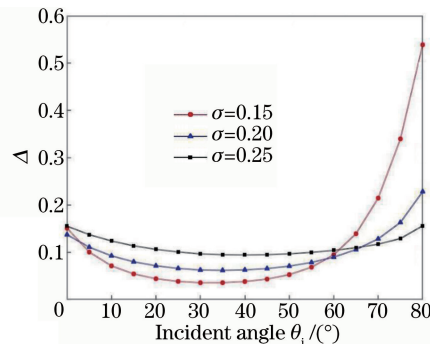


图 11 不同粗糙度下散射退偏随入射角变化情况
Fig. 11 Depolarization versus incident angle with different roughnesses

5 结 论

在微面元理论的基础上,综合考虑微面元的镜面反射和漫反射,通过 PBRDF 模型推导出表征粗糙表面偏振特性的穆勒矩阵,利用极化分解法和相关数学运算,从穆勒矩阵中提取出表征粗糙表面二向色性、相位延迟和散射退偏的偏振特性参数,并给出各偏振参数随入射角、方位角和粗糙度的变化关系。通过分析和比较发现,入射角和方位角的变化对粗糙表面偏振特性影响较大:粗糙表面二向色性在入射角变化范围内有极大值,且随方位角的增大而增大;相位延迟随入射角的增大而减小,且在方位角变化范围内有极大值;退偏能力在入射角范围内有极小值,且随方位角的增大而减小。粗糙表面偏振特性随入射角和方位角变化时,不同的散射角具有相同的变化趋势。粗糙度对粗糙表面除退偏能力以外的偏振特性影响较小,但在入射角较大时对粗糙表面的散射退偏特性影响较大。通过研究不同入射角和方位角对粗糙表面偏振特性的影响,有利于实现对伪装目标的准确探测,可以为进一步了解粗糙面偏振特性的变化规律提供理论依据。但需要指出的是,本文工作未考虑粗糙表面多次散射和后向散射的情况,有关粗糙表面偏振特性的变化规律还有待在今后的研究工作中做进一步的实验验证和总结。

参 考 文 献

[1] Hyde M W, Schmidt J D, Havrilla M J. A geometrical optics polarimetric bidirectional reflectance distribution function for dielectric and metallic surfaces[J]. Optics Express, 2009, 17(24): 22138-22153.

- [2] Yang T H, Zhao Y Q, Pan Q, *et al.* A new measurement method of polarimetric spectral bidirectional reflectance distribution function[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(12): 2520-2524.
杨铁恒, 赵永强, 潘泉, 等. 一种新的偏振光谱二向反射测量方法[J]. *光子学报*, 2008, 37(12): 2520-2524.
- [3] Vimal T, David G V, Charles D C. Polarization-based index of refraction and reflection angle estimation for remote sensing applications[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(30): 7527-7537.
- [4] Singh U, Kapoor A. Single layer homogeneous model for surface roughness by polarized light scattering [J]. *Optics & Laser Technology*, 2008, 40(2): 315-324.
- [5] Gao M, Song C, Gong L. Analysis of polarization characteristics about Rough Surface light scattering based on polarized bidirectional reflectance distribution function [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(12): 1213002.
高明, 宋冲, 巩蕾. 基于偏振双向反射分布函数的粗糙面光散射偏振特性研究 [J]. *中国激光*, 2013, 40(12): 1213002.
- [6] Sun Z Q, Zhao Y S. The investigation of polarized reflectance of vegetation canopies basing on polarized reflectance mode[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(10): 102802.
孙仲秋, 赵云升. 基于地表偏振反射模型的植被冠层偏振反射特性研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(10): 102802.
- [7] Sun X M, Wang H H, Shen J, *et al.* Study on polarized light scattering by aerosol over ocean [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(4): 040101.
孙贤明, 王海华, 申晋, 等. 海洋背景下气溶胶的偏振光散射特性研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(4): 040101.
- [8] Wang X, Zou X F, Jin W Q. Study of polarization properties of radiation reflected by roughness objects [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2011, 31(11): 1327-1331.
王霞, 邹晓风, 金伟其. 粗糙表面反射辐射偏振特性研究 [J]. *北京理工大学学报*, 2011, 31(11): 1327-1331.
- [9] Gartley M G. Polarimetric modeling of remotely sensed scenes in the thermal infrared[D]. Rochester: Rochester Institute of Technology, 2007.
- [10] Pharr M, Humphreys G. Physically based rendering from theory to implementation [M]. San Francisco: Morgan Kaufmann, Publishers Inc, 2004.
- [11] 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.
- [12] Pamba A, Thilak V, Voelz D G, *et al.* Estimation of incidence and reflection angles from passive polarimetric imagery: extension to out-of-plane scattering [C]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6682: 66820O.
- [13] 廖延彪. 偏振光学 [M]. 北京: 科学出版社, 2003: 40-63.
- [14] Priest R G, Meier S R. Polarimetric microfacet scattering theory with applications to absorptive and reflective surfaces [J]. *Optical Engineering*, 2002, 41(5): 988-993.
- [15] Wellems D, Ortega S, Bowers D, *et al.* Long wave infrared polarimetric model: theory, measurements and parameters [J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2006, 8(10): 914-925.
- [16] Mueller H. The foundation of optics [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1948, 38: 661.
- [17] Lu S Y, Chipman R A. Interpretation of Mueller matrices based on polar decomposition [J]. *Journal of the Optical Society of America A: Optics Image Science and Vision*, 1996, 13(5): 1106-1113.
- [18] Wang Y, He H H, Zeng N, *et al.* Polarized light microscopy based on Mueller matrix and its applications on biomedical studies [J]. *World Journal of Complex Medicine*, 2015, 1(1): 74-78.
王晔, 何宏辉, 曾楠, 等. 基于穆勒矩阵的偏振显微镜及其在生物医学领域的应用 [J]. *世界复合医学*, 2015, 1(1): 74-78.