

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

高 明 宋 冲* 巩 蕾

(西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021)

摘要 为了研究高斯粗糙面光散射偏振特性,基于微面元理论,建立偏振双向反射分布函数模型,推导出散射光的斯托克斯矢量。数值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情况,分析了入射角、方位角以及复折射率等因素对散射光偏振特性的影响。数值结果表明:椭圆度角和偏振度强烈依赖于入射角、方位角及复折射率,不同入射角和复折射率的椭圆度角曲线和偏振度曲线有相似的变化规律;不同方位角的椭圆度角曲线和偏振度曲线变化规律有较大区别,但方位角互补的两条偏振特性曲线关于散射角 $\theta_r=0$ 对称;椭圆度角在后向散射方向附近有极大值,偏振度在后向散射方向有极小值。

关键词 散射;粗糙面;偏振双向反射分布函数;斯托克斯矢量;偏振特性

中图分类号 O436.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1213002

Analysis of Polarization Characteristics about Rough Surface Light Scattering Based on Polarized Bidirectional Reflectance Distribution Function

Gao Ming Song Chong Gong Lei

(School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China)

Abstract To study the polarization characteristics about Gaussian rough surface light scattering, the Stokes vector of scattering light is derived based on microfacet theory and polarized bidirectional reflectance distribution function. The polarization characteristics of rough surface scattering light are numerically calculated for both elliptically polarized light incidence and natural light incidence. The effects of incident angle, azimuth angle and complex refractive index on polarization characteristics of scattering light are studied. The result shows that the incident angle, the complex refractive index and the azimuth angle have a great influence on the ellipticity angle and the degree of polarization. The change trends of the degree of polarization curves and the ellipticity angle curves with different incident angles or complex refractive indexes have a high similarity. The change trends of the degree of polarization curves and the ellipticity angle curves with different azimuth angles have a large difference, but the two curves with complementary azimuth angles are symmetric about scattering angle $\theta_r=0$. The maximum value of the ellipticity angle is obtained around the backscattering direction, and the minimum value of the degree of polarization is obtained in the backscattering direction.

Key words scattering; rough surface; polarized bidirectional reflectance distribution function; Stokes vector; polarization characteristics

OCIS codes 290.1485; 290.5880; 260.5430

收稿日期: 2013-06-04; 收到修改稿日期: 2013-07-15

基金项目: 国家自然科学基金(61308071)、陕西省自然科学基金(2012JM8008, 2013JQ8018)、陕西省教育厅自然科学专项资助项目(2013JK0633)

作者简介: 高 明(1964—),男,博士,教授,主要从事粗糙面光散射、激光大气传输理论等方面的研究。

E-mail: minggao1990@sohu.com

* 通信联系人。E-mail: songchong124@163.com

1 引 言

粗糙面光散射偏振特性的研究有助于提取更多的目标信息,提高目标识别准确度^[1]。目标在电磁散射过程中,会产生由目标本征属性决定的偏振信息。通过分析目标偏振信息,反演其本征属性,能够有效区分材质及目标表面的形貌特征,提高目标探测效率,识别传统光强无法探测的伪装目标^[2-3]。因此,光散射偏振特性的研究受到广泛关注^[4]。

国内外众多科研机构开展了目标光散射偏振特性的研究。Chenault 等^[5]通过研究目标散射的偏振成像特征,指出归一化的偏振度(DOP)参数能表征目标的表面状态信息并改善对比度。Vimal 等^[6]通过实验得出不同复折射率、入射角和散射角对目标偏振度的影响。Singh 等^[7]依据标量散射理论讨论了偏振光斜入射下的各向同性单层粗糙表面散射模型的偏振光散射问题。杨玉峰等^[8]根据粗糙面散射理论和目标表面的双向反射分布函数(BRDF),数值分析了目标光谱散射亮度分布特性。传统双向反射分布函数可以有效表征目标散射特性^[9],但不能描述目标的偏振散射特性。

在分析粗糙面偏振特性的工作中,获取粗糙面的偏振双向反射分布函数(pBRDF)是关键一步^[10]。本文基于微面元偏振双向反射分布函数模型,忽略微面元之间的多次反射和遮挡效应的情况下,把粗糙面分解为一系列小面元,通过散射光的斯托克斯矢量来考察粗糙面的散射偏振特性。数值计算了偏振特性随散射角变化情况,分析了入射角、方位角以及折射率等因素对散射光偏振特性的影响,并总结出偏振特性的变化规律。

2 偏振双向反射分布函数模型

偏振双向反射分布函数基于几何光学,由表面粗糙度参量、光学常数参量、方位角和散射角等多因素共同决定。目标的表面可视为由一系列微小面元组成,并且小面元反射遵循菲涅耳关系^[11],该模型能够很好地反演光学常量参量和粗糙度参量,对涂层表面状态的变化灵敏^[12]。研究表明,在 $0.2\lambda/\cos\theta_i < \sigma < 2l$ 范围内(λ, θ_i 分别为入射光波长和入射角, σ, l 分别为粗糙面均方根高度和相关长度),应用该模型可以得到满意的模拟结果^[13]。标量微面元 BRDF 模型可以表示为

$$f_r(\theta_i, \theta_r, \varphi) = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{4\sigma^2} \frac{1}{\cos^4 \alpha} \frac{\exp[-\tan^2 \alpha / (2\sigma^2)]}{\cos \theta_r \cos \theta_i} F(\gamma), \quad (1)$$

式中 σ^2 表示表面粗糙度的斜度方差; $F(\gamma)$ 表示菲涅耳反射系数; θ_i, φ_i 是入射角及入射方位角; θ_r, φ_r 是散射角及散射方位角, $\varphi = \varphi_r - \varphi_i$ 表示散射方位角与入射方位角的差值。图 1 为微面元各角度之间的关系。 z 轴是粗糙面平均表面的法线, \mathbf{n} 是微面元法线, α 表示微面元法线与粗糙面法线之间的夹角, γ 表示入射方向与微面元法线的夹角, \mathbf{k}_i 是入射波矢, \mathbf{k}_r 是散射(反射)波矢。

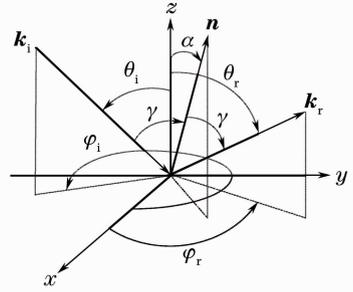


图 1 微面元模型的角度关系

Fig. 1 Angle relationship of microfacet model
微面元模型各角度满足

$$\cos(2\gamma) = \cos \theta_i \cos \theta_r + \sin \theta_i \sin \theta_r \cos \varphi, \quad (2)$$

$$\cos \alpha = \frac{\cos \theta_i + \cos \theta_r}{2 \cos \gamma}. \quad (3)$$

pBRDF 是从标量 BRDF 模型中演变出来的,散射光和入射光之间可以通过一个散射琼斯矩阵来建立联系,即

$$\begin{bmatrix} E_s^r \\ E_p^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{ss} & S_{ps} \\ S_{sp} & S_{pp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_s^i \\ E_p^i \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中下标 s 表示电场分量垂直于入射面(入射方向和法线构成的平面)或探测面(探测方向和法线构成的平面);下标 p 表示电场分量平行于入射面或探测面;上标 r 表示散射分量;上标 i 表示入射分量。针对上述微面元模型,引入四个参考平面,这四个参考平面分别为:入射方向分别与粗糙表面法线和微面元法线组成的平面,两面的夹角用 η_i 表示;散射方向分别与粗糙表面法线和微面元法线组成的平面,两面的夹角用 η_r 表示。那么,入射光和散射光可以表示为

$$\begin{bmatrix} E_s^r \\ E_p^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \eta_r & \sin \eta_r \\ -\sin \eta_r & \cos \eta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_s & 0 \\ 0 & r_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \eta_i & -\sin \eta_i \\ \sin \eta_i & \cos \eta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_s^i \\ E_p^i \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中

$$\cos \eta_i = [(\cos \theta_i + \cos \theta_r)/(2\cos \gamma) - \cos \theta_i \cos \gamma]/(\sin \theta_i \sin \gamma), \quad (6)$$

$$\cos \eta_r = [(\cos \theta_i + \cos \theta_r)/(2\cos \gamma) - \cos \theta_r \cos \gamma]/(\sin \theta_r \sin \gamma), \quad (7)$$

式中 r_s, r_p 为菲涅耳振幅反射系数, R_s, R_p 为菲涅耳振幅反射率, 两者之间的关系为 $R_s = |r_s|^2, R_p = |r_p|^2$ 。Shell^[14] 论文中给出振幅反射率表达式为

$$R_s(\gamma) = \frac{(A - \cos \gamma)^2 + B^2}{(A + \cos \gamma)^2 + B^2}, \quad (8)$$

$$R_p(\gamma) = R_s(\gamma) \frac{(A - \sin \gamma \tan \gamma)^2 + B^2}{(A + \sin \gamma \tan \gamma)^2 + B^2}, \quad (9)$$

A 和 B 的定义为

$$\begin{cases} A = \sqrt{\frac{\sqrt{C} + D}{2}} \\ B = \sqrt{\frac{\sqrt{C} - D}{2}} \\ C = 4n^2 k^2 + D^2 \\ D = n^2 - k^2 - \sin^2 \gamma \end{cases}, \quad (10)$$

式中 n 和 k 表示材料的光学常量, 复折射率 $N = n + ik$ 。由(4)、(5)式可以得出琼斯矩阵各项的表达式为

$$S_{ss} = \cos \eta_r \cos \eta_i \cdot |r_s| + \sin \eta_r \sin \eta_i \cdot |r_p|, \quad (11)$$

$$S_{ps} = -\cos \eta_r \sin \eta_i \cdot |r_s| + \sin \eta_r \cos \eta_i \cdot |r_p|, \quad (12)$$

$$S_{sp} = -\sin \eta_r \cos \eta_i \cdot |r_s| + \cos \eta_r \sin \eta_i \cdot |r_p|, \quad (13)$$

$$S_{pp} = \sin \eta_r \sin \eta_i \cdot |r_s| + \cos \eta_r \cos \eta_i \cdot |r_p|. \quad (14)$$

根据(11)~(14)式得到入射光和散射光之间的琼斯矩阵。Muller 矩阵各元素与琼斯矩阵元素之间存在着一定的关系^[15], 在实际应用中, 通常采用 Muller 矩阵的表征方法。通过一个四行四列的矩阵, 可以将标量微面元 BRDF 模型推广到偏振情况, 即

$$\begin{aligned} f_{j,k}(\theta_i, \theta_r, \varphi) &= \frac{1}{2\pi} \frac{1}{4\sigma^2} \frac{1}{\cos^4 \alpha} \cdot \\ &\frac{\exp[-\tan^2 \alpha / (2\sigma^2)]}{\cos \theta_r \cos \theta_i} \mathbf{M}_{j,k}(\theta_i, \theta_r, \varphi), \end{aligned} \quad (15)$$

式中 j, k 的取值范围是 $0 \sim 3$ 。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 $d\mathbf{L}_r(\theta_r, \varphi_r)$ 与沿 (θ_i, φ_i) 方向入射到被测表面的辐照度 $d\mathbf{E}_i(\theta_i, \varphi_i)$ 之比。偏振 BRDF 可以表示为

$$d\mathbf{L}_r(\theta_r, \varphi_r) = d\mathbf{E}_i(\theta_i, \varphi_i) \cdot \mathbf{f}_{j,k}(\theta_i, \theta_r, \varphi), \quad (16)$$

式中 \mathbf{L}_r 是反射光的斯托克斯矢量, \mathbf{E}_i 是入射光的斯

托克斯矢量。

3 光散射偏振特性模型的建立

3.1 自然光散射偏振特性模型

偏振度定义为全偏振分量的强度与该光波的总强度之比, 即

$$R_{\text{DOP}} = (S_1^2 + S_2^2 + S_3^2)^{1/2} / S_0. \quad (17)$$

自然光斯托克斯矢量为

$$\mathbf{E}_i = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (18)$$

散射光斯托克斯矢量为

$$\mathbf{E}_r = \mathbf{f}_{j,k} \cdot \mathbf{E}_i = \begin{bmatrix} f_{00} & f_{01} & f_{02} & f_{03} \\ f_{10} & f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{20} & f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{30} & f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{00} \\ f_{10} \\ f_{20} \\ f_{30} \end{bmatrix}. \quad (19)$$

因此得出自然光的偏振度表达式为

$$R_{\text{DOP}} = (f_{10}^2 + f_{20}^2 + f_{30}^2)^{1/2} / f_{00}. \quad (20)$$

3.2 偏振光散射偏振特性模型

入射偏振光归一化斯托克斯矢量可以表示为

$$\mathbf{E}_i = \begin{bmatrix} 1 \\ S_1/S_0 \\ S_2/S_0 \\ S_3/S_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ \cos 2\beta \cos 2\theta \\ \cos 2\beta \sin 2\theta \\ \sin 2\beta \end{bmatrix}, \quad (21)$$

式中椭圆度角 β (又称椭圆率) 即椭圆偏振光短轴与长轴之比的正切值, 用来表征椭圆偏振光的形状; 偏振方位角 θ 即椭圆偏振光长轴与 x 轴之间的夹角, 用来表征椭圆偏振光的取向。入射偏振光的偏振态可以用上面两个量来表征, 即

$$\sin 2\beta = \frac{S_3}{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}, \quad -\frac{\pi}{4} \leq \beta \leq \frac{\pi}{4}, \quad (22)$$

$$\tan 2\theta = \frac{S_2}{S_1}, \quad 0 \leq \theta \leq \pi. \quad (23)$$

$\beta = 0$ 时, 入射光为线偏振光; $\beta = \pm \pi/4$ 时, 入射光为圆偏振光; β 为其他值时, 入射光为椭圆偏振光。散射光的斯托克斯矢量为

$$\mathbf{E}_r = \mathbf{f}_{j,k} \cdot \mathbf{E}_i = \begin{bmatrix} f_{00} & f_{01} & f_{02} & f_{03} \\ f_{10} & f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{20} & f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{30} & f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \cos 2\beta \cos 2\theta \\ \cos 2\beta \sin 2\theta \\ \sin 2\beta \end{bmatrix}. \quad (24)$$

整理可得散射光斯托克斯矢量表达式为

$$\mathbf{E}_r = \begin{bmatrix} S'_0 \\ S'_1 \\ S'_2 \\ S'_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{00} + f_{01} \cos 2\beta \cos 2\theta + f_{02} \cos 2\beta \sin 2\theta + f_{03} \sin 2\beta \\ f_{10} + f_{11} \cos 2\beta \cos 2\theta + f_{12} \cos 2\beta \sin 2\theta + f_{13} \sin 2\beta \\ f_{20} + f_{21} \cos 2\beta \cos 2\theta + f_{22} \cos 2\beta \sin 2\theta + f_{23} \sin 2\beta \\ f_{30} + f_{31} \cos 2\beta \cos 2\theta + f_{32} \cos 2\beta \sin 2\theta + f_{33} \sin 2\beta \end{bmatrix}. \quad (25)$$

取不同的椭圆度角 β 和偏振方位角 θ 可得出不同入射偏振光下的散射光斯托克斯矢量, 由(22)、(25)式可得出散射光椭圆度角表达式为

$$\beta_r = \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{S'_3}{\sqrt{S'^2_1 + S'^2_2 + S'^2_3}} \right). \quad (26)$$

4 数值计算与分析

取入射光波长 $\lambda = 633 \text{ nm}$, 满足高斯分布的黑漆涂层复折射率 $N = 1.46 + 1.32i$, 相干长度 $l = 1 \text{ }\mu\text{m}$, 均方根高度 $\sigma = 0.2 \text{ }\mu\text{m}$. 为了验证方法的正确性, 将数值计算得出的偏振特性曲线与文献[6]的实验结果对比, 如图2所示, 横坐标表示入射角的角度, 纵坐标表示偏振度。可以看出, 利用文中方法得出的计算结果与实验数据吻合得较好, 误差是由目标表面的黑漆涂层并非理想高斯分布造成的。

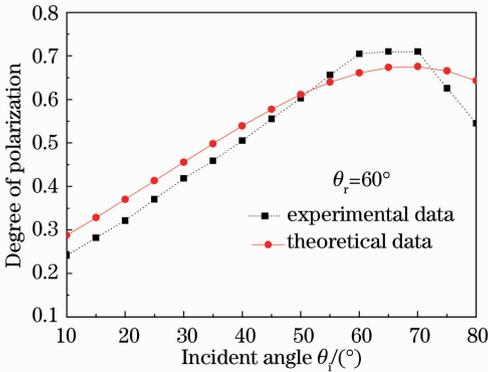


图2 偏振特性实验与数值计算结果对比

Fig. 2 Contrast of experimental and theoretical results of polarization characteristics

4.1 自然光散射偏振特性结果分析

图3描述了方位角 $\varphi = \pi$ 时, 不同入射角下偏振度随散射角的变化曲线, 由图可知, 偏振度在后向散射方向 ($\theta_r = -\theta_i$) 有极小值; 散射角在 $(-\theta_i, \pi/2)$ 范围内, 偏振度随着散射角的增大而增大; 散射角在 $(-\pi/2, -\theta_i)$ 范围内, 偏振度随着散射角的增大而

减小。

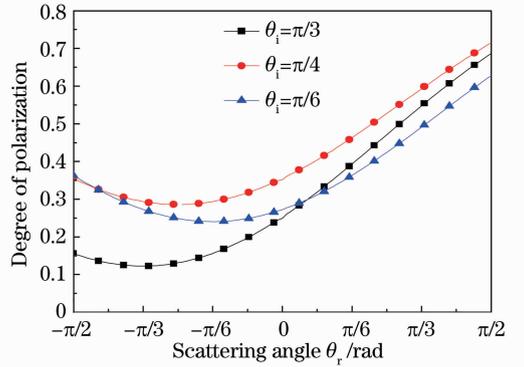


图3 不同入射角下偏振度随散射角变化情况
Fig. 3 Degree of polarization versus scattering angle with different incident angles

图4是入射角 $\theta_i = \pi/4$ 时, 不同方位角下偏振度随散射角的变化曲线。由图可知, 不同方位角的偏振度曲线有很大区别, 但方位角互补的两条偏振度曲线关于 $\theta_r = 0$ 对称, 例如, 方位角 $\varphi = \pi/4$ 的偏振度曲线和方位角 $\varphi = 3\pi/4$ 的偏振度曲线对称, 方位角 $\varphi = 0$ 的偏振度曲线和方位角 $\varphi = \pi$ 的偏振度曲线互相对称。方位角对偏振度影响很大, 因此, 研究不同方位角的偏振度有利于实现对伪装目标的准确探测。

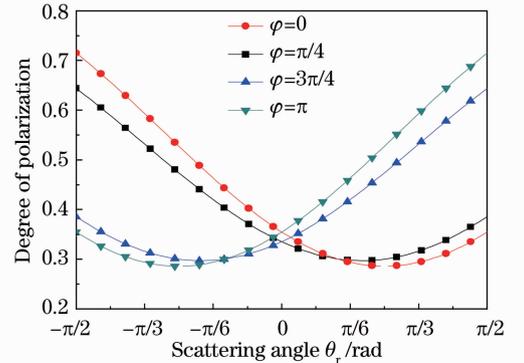


图4 不同方位角下偏振度随散射角变化情况
Fig. 4 Degree of polarization versus scattering angle with different azimuth angles

图5中对比了入射角 $\theta_i = \pi/4$, 方位角 $\varphi = \pi$ 时, 不同复折射率下偏振度随散射角的变化曲线, 其中, 绿漆涂层复折射率 $N = 1.39 + 0.41i$, 黑漆涂层复折射率 $N = 1.46 + 1.32i$, 硅涂层复折射率 $N = 3.88 + 0.02i$ 。由图可知, 不同复折射率曲线偏振度极小值都是在后向散射方向 ($\theta_r = -\pi/4$); 在散射角为 $(-\pi/4, \pi/2)$ 范围内, 偏振度随着散射角的增大而增大; 在散射角为 $(-\pi/2, -\pi/4)$ 范围内, 偏振度随着散射角的增大而减小。

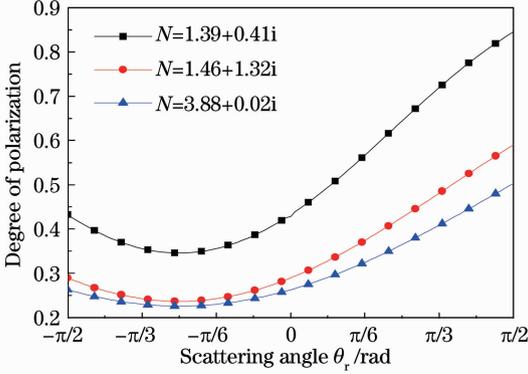


图5 不同复折射率下偏振度随散射角变化情况
Fig. 5 Degree of polarization versus scattering angle with different complex refractive indexes

4.2 偏振光散射偏振特性结果分析

偏振光取具有普遍意义的椭圆偏振光, 椭圆度角 $\beta = \pi/6$, 偏振方位角 $\theta = 0$ 。

图6描述了方位角 $\varphi = \pi$ 时, 不同入射角所对应的椭圆度角随散射角变化的曲线。由图可知, 在散射角为 $(0, \pi/2)$ 范围内, 随着散射角的增大, 椭圆度角逐渐变小; 椭圆度角在后向散射方向 ($\theta_r = -\theta_i$) 附近有极大值。

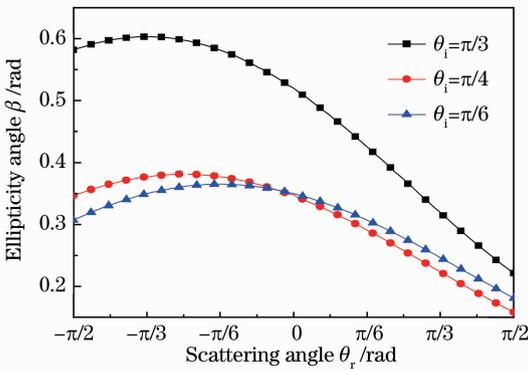


图6 不同入射角下椭圆度角随散射角变化情况
Fig. 6 Ellipticity angle versus scattering angle with different incident angles

图7是入射角 $\theta_i = \pi/4$ 时, 不同方位角下椭圆度角随散射角变化的曲线。由图可知, 不同方位角

的椭圆度角曲线有很大区别, 但方位角互补的两条椭圆度角曲线关于 $\theta_r = 0$ 对称。例如, 方位角 $\varphi = \pi/4$ 的椭圆度角曲线和方位角 $\varphi = 3\pi/4$ 的椭圆度角曲线对称, 方位角 $\varphi = 0$ 的椭圆度角曲线和方位角 $\varphi = \pi$ 的椭圆度角曲线互相对称。

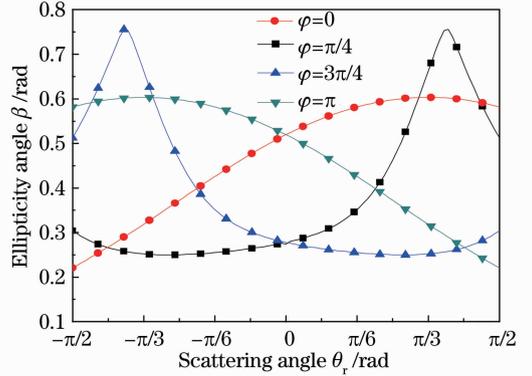


图7 不同方位角下椭圆度角随散射角变化情况
Fig. 7 Ellipticity angle versus scattering angle with different azimuth angles

图8中对比了入射角 $\theta_i = \pi/4$, 方位角 $\varphi = \pi$ 时, 不同复折射率下椭圆度角随散射角变化的曲线。由图可知, 在散射角为 $(0, \pi/2)$ 范围内, 椭圆度角随着散射角的增大而减小; 不同复折射率的椭圆度角极大值都是在后向散射方向 ($\theta_r = -\pi/4$) 附近。

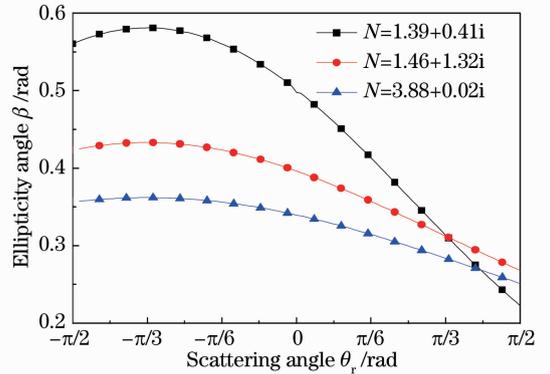


图8 不同复折射率下椭圆度角随散射角变化情况
Fig. 8 Ellipticity angle versus scattering angle with different complex refractive indexes

5 结论

在不考虑遮蔽以及多次散射的情况下, 基于偏振双向反射分布函数推导出散射光的斯托克斯矢量, 对不同入射角、方位角和复折射率下粗糙面的偏振特性进行数值计算。研究表明: 入射角和复折射率对椭圆度角和偏振度影响很大, 但曲线变化趋势有很高的相似性。椭圆度角在后向散射方向 ($\theta_r = -\theta_i$) 附近有极大值, 偏振度在后向散射方向

($\theta_r = -\theta_i$)有极小值;不同方位角下椭圆度角曲线和偏振度曲线变化趋势有很大区别,但方位角互补的两条椭圆度曲线或偏振度曲线关于 $\theta_r = 0$ 对称。以上结论可以为进一步了解粗糙面偏振特性的变化规律提供强有力的理论依据。

参 考 文 献

- 1 M W Hyde, J D Schmidt, M J Havrilla. A geometrical optic polarimetric bidirectional reflectance distribution function for dielectric and metallic surfaces[J]. *Opt Express*, 2009, 17(24): 22138–22153.
- 2 Zhang Chaoyang, Cheng Haifeng, Zhang Chaohui, *et al.*. Application of polarization remote sensing in camouflage detection and method of polarization stealth[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(4): 553–556.
张朝阳, 程海峰, 张朝辉, 等. 偏振遥感在伪装目标识别上的应用及对抗措施[J]. *强激光与粒子束*, 2008, 20(4): 553–556.
- 3 Songxin Tan, Ram M Narayanan, Dennis L Helder. Polarimetric reflectance and depolarization ratio from several tree species using a multiwavelength polarimetric lidar[C]. *SPIE*, 2005, 5888: 5888M.
- 4 F Goudail, P Terrier, Y Takakura, *et al.*. Target detection with a liquid-crystal-based passive Stokes polarimeter[J]. *Appl Opt*, 2004, 43(2): 274–282.
- 5 Chenault David B, Larry P J. Polarization imaging through scattering media[C]. *SPIE*, 2000, 4133: 124–133.
- 6 Vimal Thilak, David G Voelz, Charles D Creusere. Polarization-based index of refraction and reflection angle estimation for remote sensing applications[J]. *Appl Opt*, 2007, 46(30): 7527–7536.
- 7 Singh U, Kapoor A. Single layer homogeneous model for surface roughness by polarized light scattering[J]. *Optics & Laser Technology*, 2008, 40(2): 315–324.
- 8 Yang Yufeng, Wu Zhensen, Cao Yunhua. Research on the spectral scattering of target based on three dimensional reconstruction theory[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(9): 0929001.
杨玉峰, 吴振森, 曹运华. 基于三维重建理论的目标光谱散射特性分析[J]. *光学学报*, 2012, 32(9): 0929001.
- 9 P Jan, J M Chen, N Tiit. Estimation of vegetation clumping index using MODIS BRDF data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, 32(9): 2645–2657.
- 10 Yang Yufeng, Wu Zhensen, Cao Yunhua. Practical six-parameter bidirectional reflectance distribution function model for rough surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 0229001.
杨玉峰, 吴振森, 曹运华. 一种实用型粗糙面六参数双向反射分布函数模型[J]. *光学学报*, 2012, 32(2): 0229001.
- 11 K E Torrance, E M Sparrow. Theory for off-specular reflection from roughened surfaces[J]. *J Opt Soc Am*, 1967, 57(9): 1105–1112.
- 12 Ling Jun, Zhang Shuanqin, Wu Jianye, *et al.*. Measurement and experimental study of laser reflectance characteristics of camouflage coat[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(3): 0308005.
凌 军, 张控勤, 吴坚业, 等. 伪装涂层激光反射特性检测与实验研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(3): 0308005.
- 13 K Tang, R A Dimenna, R O Buckius. Regions of validity of the geometric optics approximation for angular scattering from very rough surfaces[J]. *Internat J Heat and Mass Transfer*, 1996, 40(1): 49–59.
- 14 J R Shell. *Polarimetric Remote Sensing in the Visible to Near Infrared*[D]. Rochester: Rochester Institute of Technology, 2005. 10–14.
- 15 G P Richard, R M Steven. Polarimetric microfacet scattering theory with applications to absorptive and reflective surfaces[J]. *Opt Eng*, 2002, 41(5): 988–993.

栏目编辑:史 敏