

基于 Kubelka-Munk 理论的涂层表面多参量 偏振双向反射分布函数模型

杨敏^{1,2}, 方勇华^{1,2}, 吴军², 崔方晓², 李大成², 吴越², 王涛²

¹中国科学技术大学环境科学与光电技术学院, 安徽 合肥 230026;

²中国科学院安徽光学精密机械研究所通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031

摘要 为了表征涂层的表面散射偏振特性, 基于 Kubelka-Munk 理论, 综合考虑表面散射和体散射, 建立了一种多参量偏振双向反射分布函数(BRDF)模型; 该模型通过引入镜向系数来表征表面散射的贡献程度, 以改进传统的偏振 BRDF 模型, 使得含 5 个参量(复折射率的实部和虚部、表面粗糙度、相对漫反射率系数、镜向系数)的新偏振 BRDF 模型更符合实际的涂层表面散射偏振特性; 通过开展户外实验获得黑漆和绿漆涂层表面在不同观测几何时的偏振度, 利用遗传算法从实测数据中反演关键参量。结果表明, 对于不同的涂层表面, 该多参量偏振 BRDF 模型的仿真结果与实测数据均能较好地吻合, 引入镜向系数能够提高模型的准确性, 可为涂层目标偏振特征的提取和有效识别提供依据。

关键词 物理光学; 偏振特性; 双向反射分布函数; Kubelka-Munk 理论; 涂层表面; 偏振; 散射偏振

中图分类号 O436.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0126002

Multiple-Component Polarized Bidirectional Reflectance Distribution Function Model for Painted Surfaces Based on Kubelka-Munk Theory

Yang Min^{1,2}, Fang Yonghua^{1,2}, Wu Jun², Cui Fangxiao²,
Li Dacheng², Wu Yue², Wang Tao²

¹ School of Environment Science and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

² Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract To represent scattering polarization properties of painted surfaces, a multiple-component polarized bidirectional reflectance distribution function (BRDF) model is established on the basis of the Kubelka-Munk (KM) theory with the consideration of surface scattering and volume scattering. The model introduces the mirror parameter to characterize surface scattering contributions, and improves the traditional polarized BRDF model to make the new polarized BRDF model containing five parameters (real and imaginary parts of complex refractive index, surface roughness, relative diffuse reflectance coefficient, and mirror parameter) more consistent with the actual scattering polarization of painted surfaces. The degrees of polarization of black and green painted surfaces at different observation geometries are obtained by the outdoor experiment. The genetic algorithm is used to obtain key parameters based on measured data. The results show that the simulated results coincide with the experimental data for different painted surfaces, and the accuracy is improved by the introduction of mirror parameter. This work can be used as a basis for the extraction and effective identification of painted target polarization feature.

Key words physical optics; polarization characteristic; bidirectional reflectance distribution function; Kubelka-Munk theory; painted surface; polarization; scattering polarization

OCIS codes 260.5430; 290.1483; 290.5855

收稿日期: 2017-07-01; 收到修改稿日期: 2017-08-21

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(41505020)

作者简介: 杨敏(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事光电信息获取与处理技术方面的研究。E-mail: yamor12@126.com

导师简介: 方勇华(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事遥感与光谱图像分析和红外遥感、大气辐射校正等方面的研究。E-mail: yhfang@aiofm.ac.cn(通信联系人)

1 引 言

随着现代科学技术的发展,涂层目标越来越受到人们的关注。由于涂层目标具有不同的折射率和表面粗糙度等特征,因此其表面散射特性很复杂,采用传统的光强探测方法会严重影响涂层目标的识别效果。对于人造目标的识别,偏振探测能够提供更多区分目标的特征信息,相比于传统的光强探测,偏振探测具有明显的优势,可以提高目标的探测精度和识别准确度。在目标偏振探测过程中,通常采用偏振度(DoP)来描述目标偏振态的变化情况,DoP被广泛用于目标探测、大气遥感以及生物医学^[1]等领域。

目前,偏振度的获取方法有实验测量和理论建模2种。实验测量是指通过实验手段得到偏振度与观测几何、材料因素之间的变化关系,最常用的方法为斯托克斯(Stokes)矢量法^[2];而理论建模是指通过基本理论推导得到偏振度与各变量之间的关系,可以计算任意条件下的偏振度。由于偏振度受观测几何的影响很大,需要对目标进行每个角度及方位的测量,这显然是不切实际的,因此利用有限的实验测量值建立相关的模型是必要的^[3]。国内外学者对偏振度建模开展了相关研究。Thilak等^[4]基于微面元理论建立了偏振双向反射分布函数(BRDF)模型,利用该模型推导出了入射光为自然光条件下散射光的偏振度表达式。微面元偏振BRDF模型忽略了体散射对偏振散射光整体能量的影响,理论计算的偏振度值与实测结果存在较大误差,且该模型局限于非镜面反射材料。Hyde等^[5]在微面元偏振BRDF模型基础上引入方向半球反射率来表征体散射效应,该模型仅适用于理想的电导体表面,并且方向半球反射率是一个关于观测几何、表面粗糙度以及折射率的整个半球空间内的二重积分函数,形式较为复杂,计算量较大。巩蕾等^[6]提出了一种粗糙基底上不同涂层的偏振BRDF模型,通过对不同涂层的光学特性进行研究来反演基底的光学信息。冯巍巍等^[7]提出一种涂层表面的偏振BRDF模型,该模型着重考虑了涂层表面的体散射,并采用一个未知参数表示,但它不能描述体散射的产生以及入射光在涂层内部的吸收、散射过程。

针对以上问题,本文在微面元偏振BRDF模型的基础上引入体散射分量和镜向系数,并根据Kubelka-Munk(KM)理论^[8-9]对体散射分量进行建模,建立了一种多参量偏振BRDF模型,推导出了

散射偏振度关于表面粗糙度、复折射率实部和虚部、镜向系数、相对漫反射率系数这5个关键参数的表达式。针对典型的涂层样品,采用遗传算法从一部分训练集数据中反演出多参量偏振BRDF模型的关键参数,用另一部分测试集数据验证模型的准确性和可靠性,详细分析了镜向系数对散射偏振度的影响。

2 理论基础

2.1 BRDF

BRDF能够表征材料的散射特性和反射特性,它描述了某入射方向的光波经目标表面反射后,反射能量在上半球空间的分布情况^[10],即

$$f(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \lambda) = \frac{dL(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \lambda)}{dE(\theta_i, \phi_i; \lambda)}, \quad (1)$$

式中 θ_i, ϕ_i 为入射方向天顶角、方位角, θ_r, ϕ_r 为反射方向天顶角、方位角, λ 为波长, $dL(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \lambda)$ 为沿着反射方向的辐射亮度, $dE(\theta_i, \phi_i; \lambda)$ 为沿着入射方向的辐照度。图1所示为BRDF的几何角度关系,其中 α 为微面元法线与目标表面法线的夹角, β 为微面元法线与入射光、反射光之间的夹角, s 为微面元法线, η 为目标的复折射率, n 和 k 分别为复折射率的实部和虚部,不同波长时目标的复折射率是变化的。

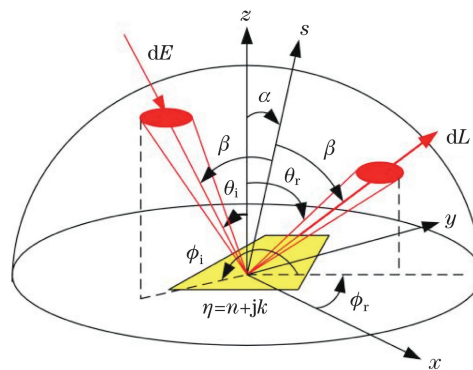


图1 BRDF的几何关系

Fig. 1 Geometrical relationship of BRDF

2.2 基于KM理论的多参量偏振BRDF模型

偏振BRDF是标量BRDF更为一般的形式,可以用穆勒矩阵 \mathbf{F} 建立入射场与散射场之间的联系,即

$$\mathbf{F}(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) = \frac{d\mathbf{L}_r(\theta_r, \phi_r)}{d\mathbf{E}_i(\theta_i, \phi_i)}, \quad (2)$$

式中 \mathbf{F} 为偏振BRDF穆勒矩阵, $d\mathbf{L}_r$ 为散射光Stokes矢量, $d\mathbf{E}_i$ 为入射光Stokes矢量。

一般情况下,偏振BRDF包含偏振的表面散射分量 \mathbf{F}^s ^[4]和非偏振的体散射^[9](漫散射^[11])分量

F^d ,且两者的贡献比是相等的。在实际测量时,涂层的表面散射能够产生较强的偏振效应,体散射因涂层内部的颜料、气孔等对光的随机散射而使其具有消偏振作用,且表面散射的贡献程度更加明显^[7,12]。本课题组在偏振 BRDF 模型的基础上进行改进,引入一个镜向系数 k_s 来表征表面散射分量的贡献程度,即

$$\mathbf{F} = k_s \mathbf{F}^s + \mathbf{F}^d. \quad (3)$$

根据微面元理论,可以得到表面散射分量 \mathbf{F}^s ,其表达式为

$$\mathbf{F}_{j,k}^s(\theta_i, \theta_r, \Delta\phi; \sigma; \eta) = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{4\sigma^2} \frac{1}{\cos^4 \alpha} \frac{\exp\left(-\frac{\tan^2 \alpha}{2\sigma^2}\right)}{\cos \theta_r \cos \theta_i} \cdot$$

$$G(\theta_i, \theta_r, \Delta\phi) \cdot \mathbf{M}_{j,k}(\theta_i, \theta_r, \Delta\phi; \eta), \quad (4)$$

式中 j, k 表示矩阵中的第 $j+1$ 行、 $k+1$ 列,它们的取值范围均为 $0 \sim 3$; $\Delta\phi$ 为相对方位角; G 为遮蔽因子函数,文献[5]给出了其具体表达式; σ 为表面粗糙度; \mathbf{M} 为 Fresnel 反射穆勒矩阵,描述了物体表面的散射偏振情况,与物体的复折射率有关,可以通过琼斯向量计算得到^[13]。在自然光条件下,地物的圆偏振分量极小,相对于仪器误差而言可以忽略^[14],则 \mathbf{F} 和 \mathbf{M} 变换为 3×3 阶矩阵。微面元法线与目标表面法线的夹角 α 与 $\theta_i, \theta_r, \Delta\phi$ 之间存在一定的关系:

$$\begin{cases} \cos \alpha = (\cos \theta_i + \cos \theta_r) / (2 \cos \beta) \\ \cos 2\beta = \cos \theta_i \cos \theta_r + \sin \theta_i \sin \theta_r \cos \Delta\phi \end{cases} \quad (5)$$

KM 理论被广泛应用于模拟材料表面的体散射情况,le Hors 等^[9]在 KM 理论的基础上,引入一个反射率参数 ρ_d 来描述偏振 BRDF 中体散射的影响, ρ_d 为物体表面体散射强度与朗伯体表面散射强度的比值,即

$$\rho_d = (1 - R_i) \frac{(1 - k_2)R_\infty}{1 - k_2 R_\infty}, \quad (6)$$

式中 R_i 为入射光从空气中照射到物体表面的 Fresnel 反射率^[11]; k_2 为物体表面与空气之间散射光的 Fresnel 反射率,它是一个与表面粗糙度、复折射率和散射角度有关的函数,通常情况下, $k_2 = R_i$; R_∞ 为物体表面无穷厚时的相对漫反射率系数,这里将 R_∞ 看成是一个未知参数。于是,偏振 BRDF 中的体散射分量 \mathbf{F}^d 可以表示为

$$\mathbf{F}_{j,k}^d(R_\infty) = \frac{\cos \theta_r}{\pi} \rho_d \mathbf{M}_{j,k}^d = \frac{\cos \theta_r}{\pi} \rho_d \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中 \mathbf{M}^d 为退偏矩阵。

结合(4)式和(7)式,多参量偏振 BRDF 模型可写为

$$\mathbf{F}_{j,k}(k_s, R_\infty, \sigma, \eta) = k_s \frac{1}{2\pi} \frac{1}{4\sigma^2} \frac{1}{\cos^4 \alpha} \frac{\exp\left(\frac{\tan^2 \alpha}{2\sigma^2}\right)}{\cos \theta_r \cos \theta_i} \cdot$$

$$G(\theta_i, \theta_r, \Delta\phi) \cdot \mathbf{M}_{j,k}(\theta_i, \theta_r, \Delta\phi; \eta) + \frac{\cos \theta_r}{\pi} \rho_d \mathbf{M}_{j,k}^d. \quad (8)$$

根据(2)式和(8)式可以得到入射、散射 Stokes 矢量与多参量偏振 BRDF 之间的关系为

$$\begin{bmatrix} L_0^r \\ L_1^r \\ L_2^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{00} & F_{01} & F_{02} \\ F_{10} & F_{11} & F_{12} \\ F_{20} & F_{21} & F_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_0^i \\ E_1^i \\ E_2^i \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中 L_0^r, L_1^r, L_2^r 为反射辐亮度 Stokes 矢量参数; $F_{00}, F_{01}, \dots, F_{22}$ 为偏振 BRDF 穆勒矩阵元素; E_0^i, E_1^i, E_2^i 为入射辐照度 Stokes 矢量参数。

假设入射到涂层表面的辐射是非偏的自然光,其 Stokes 矢量为 \mathbf{E}_i ,即 $\mathbf{E}_i = [1 \ 0 \ 0]^T$,那么散射光的线性偏振度(DoLP)表达式为

$$d_{\text{DoLP}} = \frac{\sqrt{F_{10}^2 + F_{20}^2}}{F_{00}} = \frac{\sqrt{(k_s F_{10}^s)^2 + (k_s F_{20}^s)^2}}{k_s F_{00}^s + F_{00}^d}, \quad (10)$$

式中 $F_{10}^s, F_{20}^s, F_{00}^s$ 为表面散射分量矩阵元素, F_{00}^d 为漫散射分量矩阵元素。

由(10)式可知,涂层表面的散射偏振度与 $n, k, \sigma, k_s, R_\infty$ (含在 F_{00}^d 表达式中)这 5 个参数有关,且都为待定的拟合系数。其中, n, k, σ 为目标的光学常数参量,根据这 5 个参数就可以确定涂层表面的散射偏振度。这 5 个关键参数是未知的,可以通过少量的测量数据反演求得。

3 实 验

3.1 偏振探测系统

图 2 所示为偏振 BRDF 探测系统原理示意图,该系统可以实现半球空间内目标样品的全方位测量。系统主要由偏振光谱仪、半球扫描机构和主控系统三部分组成。半球扫描机构由中国科学院安徽光学精密机械研究所研制^[15],可以实现 2π 空间内任意天顶角和方位角的探测。在垂直方向运动变化的角度为天顶角,角度变化范围为 $-60^\circ \sim 60^\circ$;在水平方向运动变化的角度为方位角,角度变化范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$;天顶角和方位角的精度均为 0.2° 。偏振光谱仪由便携式 SVC-HR1024 型地物光谱仪改造而成。由于在户外进行实验,因此为了避免自然环境变化对偏振测量结果的影响,通过设计实现自动测

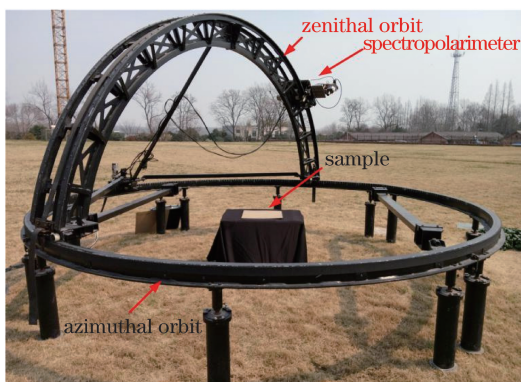


图 2 偏振 BRDF 测量原理图

Fig. 2 Image of polarized BRDF measurement

量,自动探测装置通过驱动步进电机带动偏振片旋转,实现目标样品在 0° 、 60° 、 120° 这 3 个偏振方向的起偏。主控系统作为偏振探测系统中的控制中心,主要实现半球扫描机构、偏振光谱仪之间的协调工作,测量数据的实时传输和存储,以及目标样品散射偏振度的全自动测量,最大限度地节省测量时间,减小太阳运动和天气变化带来的影响。

3.2 测量系统偏振定标

为了保证测量数据的精度和可靠性,需要对偏振光谱仪进行偏振定标。实验中采用高精度大动态范围可调偏振度参考光源 (VPOLS-II)^[16],其在 $0.46\sim 2.00\ \mu\text{m}$ 波段内的线性偏振度调节范围可达 $0\sim 0.72$ 。偏振光谱仪定标流程图如图 3 所示。选取卫星遥感的典型波长^[17] $1.06\ \mu\text{m}$ 来分析涂层表面散射偏振度特征,VPOLS-II 对偏振光谱仪的定标结果如图 4 所示。由图 4 可知,偏振光谱仪实际测量值与 VPOLS-II 的理论值存在较好的一致性,偏振测量精度在 2% 以内,可以满足实验需求。

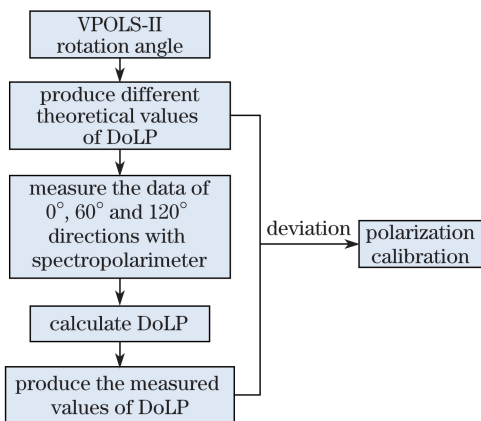


图 3 偏振定标流程图

Fig. 3 Flow chart of polarization calibration

3.3 实验测量

由于户外实验条件受自然因素的影响很大,因

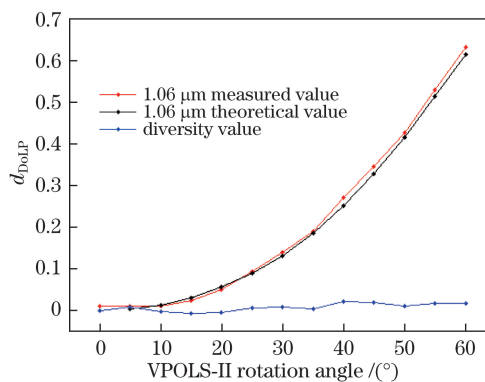


图 4 偏振光谱仪定标结果

Fig. 4 Calibration results of spectropolarimeter

此要求测量的时间越短越好,每种涂层样品的实际测量时间为 17 min,测得绿漆和黑漆涂层目标的太阳入射天顶角分别为 48.514° 和 41.476° ,测量示意图如图 5 所示,图中绿色点均为测量位置。

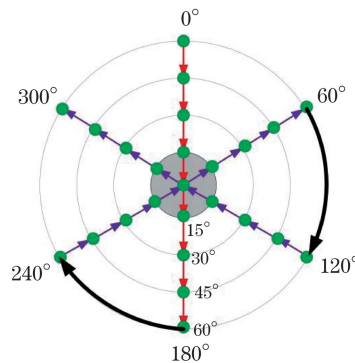


图 5 测量示意图

Fig. 5 Schematic for measurement

4 模型参数反演与分析

4.1 模型参数反演结果

为了研究所提多参量偏振 BRDF 模型的准确性,分别选取绿漆和黑漆涂层表面的散射偏振度进行分析。在该模型中共有 5 个未知参数,最佳模型参数选择的标准是模型仿真值与实验测量值的标准均方差最小,因此,构建优化目标函数为

$$\Delta \min E(n, k, \sigma, k_s, R_\infty) = \frac{\sum_{\theta_i} \sum_{\theta_r} [D(\theta_i, \theta_r, \Delta\phi) - D_m(\theta_i, \theta_r, \Delta\phi)]^2}{\sum_{\theta_i} \sum_{\theta_r} [D_m(\theta_i, \theta_r, \Delta\phi)]^2}, \quad (11)$$

式中 $D(\theta_i, \theta_r, \Delta\phi)$ 为模型仿真值, $D_m(\theta_i, \theta_r, \Delta\phi)$ 为实验测量值。由于该目标函数是非线性的,因此选择遗传算法进行参数反演。在户外条件下利用偏振探测系统分别测量黑漆和绿漆涂层表面在不同观测几何时的散射偏振度,每种涂层目标的散射偏振度

数据共有 25 组,从中选取 9 组数据(相对方位角为 0° 、 60° 和 300° 平面内的天顶角为 15° 、 30° 和 45°)作为训练样本进行多参量偏振 BRDF 模型参数反演,反演结果如表 1 所示。由表 1 可知,2 种涂层目标的镜向系数 k_s 存在很大差异,黑漆涂层表面的镜向系数 k_s 大于绿漆涂层表面,这与涂层表面

的反射率有关。黑漆涂层表面的反射率较小,吸收率较大,体散射在总的散射光中所占比例很小,则散射光的偏振度主要受表面散射的影响,使得黑漆涂层表面的镜向系数大于绿漆涂层表面。而相对漫反射率系数与镜向系数具有负相关性,也符合实际情况。

表 1 黑漆和绿漆涂层表面的参数反演结果

Table 1 Parameters inversion for black and green painted surfaces

Sample	n	k	σ	k_s	R_∞	Error / %
Green painted surface	1.335	0.201	0.211	1.259	0.451	3.56
Black painted surface	1.101	1.131	0.130	16.148	0.044	5.44

利用表 1 中的参数,根据(10)式可以计算出在整个半球空间内涂层表面散射 DoLP 的理论分布。这里仅给出相对方位角 $\Delta\phi$ 为 180° 和 120° 平面内绿漆和黑漆涂层表面散射偏振度的仿真值与实测值,并与文献[7]中的仿真结果进行对比,结果如图 6 所示。由图 6 可知,所提出的多参量偏振 BRDF 模型的仿真值与实测数据更加吻合,随着相对方位角减小, d_{DoLP} 整体呈减小的趋势。在相对方位角为 180°

的平面内,当观测天顶角为 60° 时,2 种涂层的仿真值比实验值略大,涂层表面的体散射作用使得此处有一定的去偏效果。在相对方位角为 120° 的平面内的观测结果大于仿真值,这主要是因为测量过程中,太阳的位置是变化的,其方位角逐渐增大,实际测量时的相对方位角大于理论的相对方位角,因此导致测量值大于仿真值;另一方面,观测结果大于仿真值也可能是测量过程中引入的误差导致的。

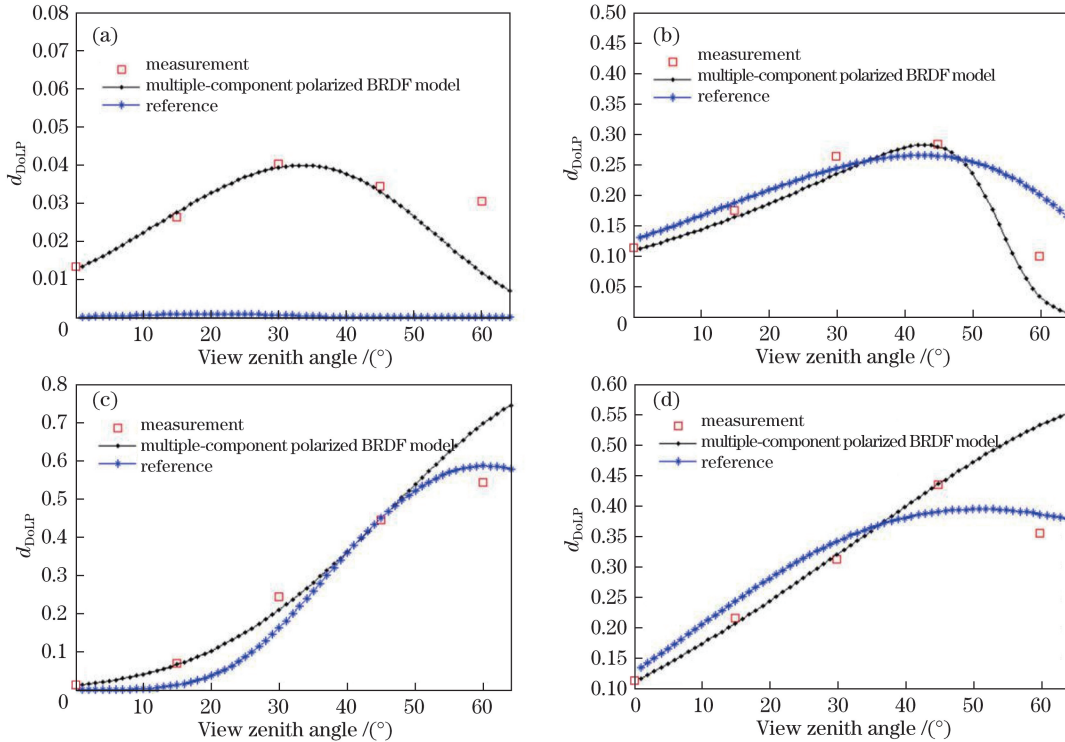


图 6 不同相对方位角时 DoLP 仿真结果与实测数据的比较。(a)绿漆涂层, $\Delta\phi = 120^\circ$; (b)黑漆涂层, $\Delta\phi = 120^\circ$; (c)绿漆涂层, $\Delta\phi = 180^\circ$; (d)黑漆涂层, $\Delta\phi = 180^\circ$

Fig. 6 Comparison between simulated and measured degree of linear polarization at different relative azimuth angles.

- (a) Green painted surface, $\Delta\phi = 120^\circ$; (b) black painted surface, $\Delta\phi = 120^\circ$;
- (c) green painted surface, $\Delta\phi = 180^\circ$; (d) black painted surface, $\Delta\phi = 180^\circ$

4.2 镜向系数对仿真结果的影响

通过以上分析可知,不同涂层表面的镜向系数存在很大差异,且在基于 KM 理论的多参量偏振 BRDF 模型中,镜向系数对模型的仿真结果影响很大。图 7 所示为绿漆和黑漆涂层表面散射偏振度在不同相对方位角时,含有镜向系数 k_s 和不含镜向系数 k_s 的仿真结果的对比。由图 7 可知,增加镜向系数使得仿真结果与实测数据更加吻合,提高了仿真

精度,这在相对方位角为 120° 的平面内更为明显。当相对方位角为 180° 时,黑漆涂层含有镜向系数与不含镜向系数的仿真结果相差不大,原因是黑漆涂层的相对漫反射系数很小,导致体散射的贡献非常小,在镜向系数 k_s 为 1 时,散射偏振度已趋于饱和,但是对很小的观测天顶角的情况还是有一定影响的。整体上,镜向系数对黑漆涂层表面散射偏振度的影响大于对绿漆涂层表面散射偏振度的影响。

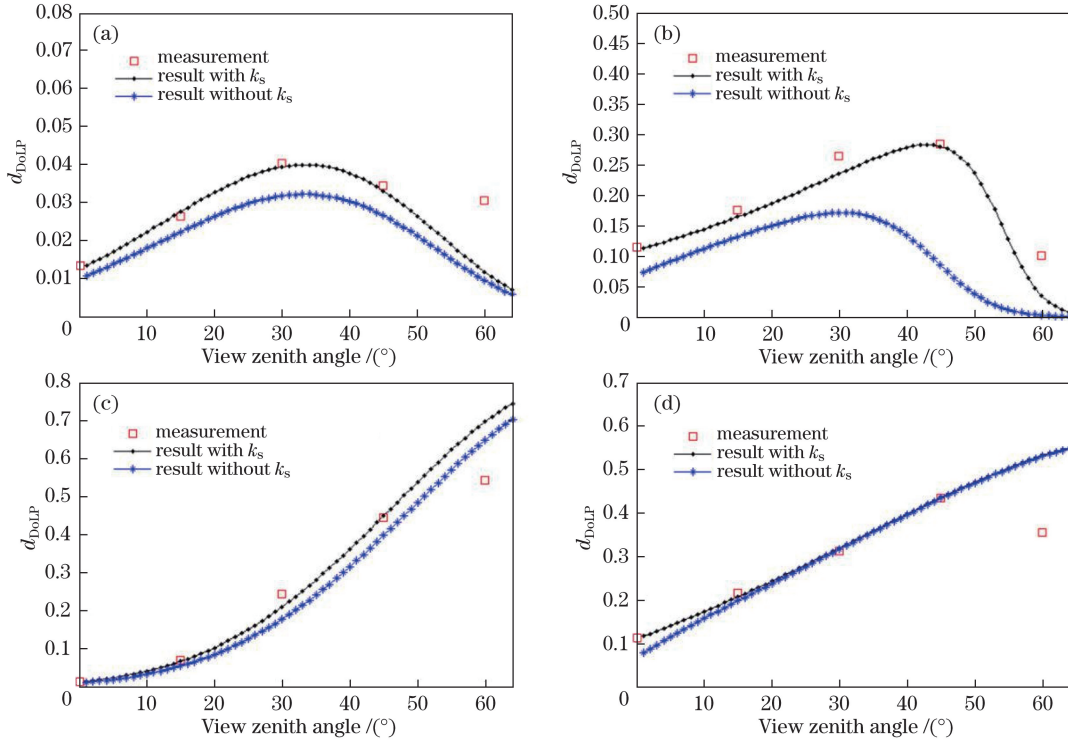


图 7 含有镜向系数 k_s 与不含镜向系数 k_s 时 DoLP 仿真结果对比。(a)绿漆涂层, $\Delta\phi = 120^\circ$;
 (b)黑漆涂层, $\Delta\phi = 120^\circ$;(c)绿漆涂层, $\Delta\phi = 180^\circ$;(d)黑漆涂层, $\Delta\phi = 180^\circ$

Fig. 7 Comparison on simulated degree of linear polarization with and without mirror parameter k_s .

(a) Green painted surface, $\Delta\phi = 120^\circ$; (b) black painted surface, $\Delta\phi = 120^\circ$;
 (c) green painted surface, $\Delta\phi = 180^\circ$; (d) black painted surface, $\Delta\phi = 180^\circ$

为了更加直观地反映 k_s 的影响,采用均方根误差(RMSE)来评估 DoLP 的仿真精度,结果如表 2 所示,其中, x_{RMSE1} 为含有镜向系数时仿真与实测 DoLP 的均方根误差, x_{RMSE2} 为不含有镜向系数时仿真与实测 DoLP 的均方根误差。由表 2 可知,引入

镜向系数使得绿漆和黑漆涂层表面的散射 DoLP 在相对方位角为 180° 平面内的最小均方根误差分别减小了 4% 和 3%,在相对方位角为 120° 平面内的最小均方根误差分别减小了 20% 和 70%,与实测数据更加吻合,提高了仿真精度。

表 2 不同涂层表面的 2 种 DoLP 均方根误差

Table 2 Root-mean-square error of two degree of linear polarization for different painted surfaces

Sample	Azimuth angle / (°)	x_{RMSE1}	x_{RMSE2}	Decreased rate / %
Green painted surface	120	0.0094	0.0123	23.58
	180	0.0638	0.0671	4.92
Black painted surface	120	0.0364	0.1227	70.30
	180	0.0788	0.0816	3.43

5 结 论

提出了一种基于 KM 理论的多参量偏振 BRDF 模型,用于表征涂层表面的散射偏振特性。该模型利用 KM 理论来描述体散射分量,并引入镜向系数来反映表面散射分量的贡献程度,从而改进了传统的偏振 BRDF 模型,使其更加准确、合理。通过对比模型仿真和实测数据后发现,引入镜向系数使得模型的仿真值与实测值吻合得更好,提高了仿真精度,在相对方位角为 120° 的平面内,效果更明显。可见,基于 KM 理论的多参量偏振 BRDF 模型可以准确地描述涂层表面的散射偏振特征。需要指出的是,基于半经验的偏振 BRDF 模型可用于描述目标表面的散射偏振特性,若要获取更精确的偏振 BRDF 模型,需要考虑不同材料之间的模型参量存在的差异(可利用实际测量数据拟合得到)。另外,对于自然地物的偏振 BRDF 模型还需要考虑后向散射效应的影响,这是本课题组后续研究的方向。

参 考 文 献

- [1] Tyo J S, Goldstein D L, Chenault D B, *et al.* Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(22): 5453-5469.
- [2] Schaefer B, Collett E, Smyth R, *et al.* Measuring the Stokes polarization parameters[J]. *American Journal of Physics*, 2007, 75(2): 163-168.
- [3] Chen C, Zhao Y Q, Luo L, *et al.* Model and analysis of spectropolarimetric BRDF of painted target based on GA-LM method [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(3): 729-734.
陈超, 赵永强, 罗丽, 等. 基于遗传 LM 算法的涂层目标光谱偏振 BRDF 建模分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(3): 729-734.
- [4] Thilak V, Voelz D G, Creusere C D. Polarization-based index of refraction and reflection angle estimation for remote sensing applications[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(30): 7527-7536.
- [5] 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.
- [6] Gong L, Wu Z S. Different films influence on polarized light scattering of slightly rough substrate[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(10): 1029001.
巩蕾, 吴振森. 不同涂层对微粗糙基底的极化光散射影响[J]. *光学学报*, 2011, 31(10): 1029001.
- [7] Feng W W, Wei Q N, Wang S M, *et al.* 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模型的模型研究[J]. *光学学报*, 2008, 28(2): 290-294.
- [8] Murphy A B. Modified Kubelka-Munk model for calculation of the reflectance of coatings with optically-rough surfaces[J]. *Journal of Physics D*, 2006, 39(16): 3571-3581.
- [9] le Hors L, Hartemann P, Dolfi D, *et al.* Phenomenological model of paints for multispectral polarimetric imaging[C]. *SPIE*, 2001, 4370: 94-105.
- [10] Nicodemus F E, Richmond J C, Hsia J J, *et al.* Geometrical considerations and nomenclature for reflectance[M]. Washington, D.C.: National Bureau of Standards, 1977: 1-7.
- [11] Zhan H Y, Voelz D G. Modified polarimetric bidirectional reflectance distribution function with diffuse scattering: surface parameter estimation[J]. *Optical Engineering*, 2016, 55(12): 123103.
- [12] Zhang Z Y, Cheng H F, Chen Z H, *et al.* Study of bi-directional polarimetric scattering of camouflage coatings[J]. *Optical Technique*, 2009, 35(1): 117-119.
张朝阳, 程海峰, 陈朝辉, 等. 伪装涂层材料的二向偏振散射研究[J]. *光学技术*, 2009, 35(1): 117-119.
- [13] Priest R G, Germer T A. Polarimetric BRDF in the microfacet model: theory and measurement[C]. *Proceedings of the Meeting of the Military Sensing Symposia Specialty Group on Passive Sensors*, 2000, 1: 169-181.
- [14] Wang Q C, Wang J C, Zhao D P, *et al.* Research on the detection of camouflage net with spectral polarization detection system[J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(11): 1260-1264.
王启超, 汪家春, 赵大鹏, 等. 光谱偏振探测对伪装网的识别研究[J]. *激光与红外*, 2013, 43(11): 1260-1264.
- [15] Li X. Development and application of VNIR-SWIR bidirectional reflectance distribution function (BRDF) measurement system[D]. Hefei: Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, 2008.
李新. 可见-短波红外双向反射分布函数测量系统的研制与应用[D]. 合肥: 中国科学院合肥物质科学研究院, 2008.

[16] Kang Q, Li J J, Chen L G, *et al.* Test and uncertainty analysis of reference source with variable polarization degree and large dynamic range[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 0412003.

康晴, 李健军, 陈立刚, 等. 大动态范围可调线性偏振度参考光源检测与不确定度分析[J]. 光学学报, 2015, 35(4): 0412003.

[17] Sun X J, Li H, Tang L P. Study on atmosphere volume scattering polarization degree characteristics in visible and infrared band[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(5): 0501001.

孙学金, 李浩, 唐丽萍. 可见光和红外波段大气体散射偏振度特性研究[J]. 光学学报, 2011, 31(5): 0501001.