

基于六参量偏振 BRDF 模型的地物背景偏振反射特性研究

杨敏^{1,2}, 方勇华^{1,2}, 吴军², 崔方晓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 为研究地物背景的偏振反射特性,综合考虑了镜面反射、体散射和后向散射,建立了一种六参量偏振双向反射分布函数(pBRDF)模型。该模型利用 Kubelka-Munk(KM)理论模拟体散射分量,并引入呈高斯分布的后向散射分量,改进了传统的偏振 BRDF 模型。建立的六参量偏振 BRDF 模型更加符合地物背景的偏振反射特性。基于多角度偏振测量原理,获得草地和土壤在不同观测几何下的偏振光谱,分析了偏振反射分布特征,并从实测数据中反演了模型参量,将测量值与仿真值进行了对比。结果表明:所建立的六参量偏振 BRDF 模型的仿真结果与实测数据之间具有很好的吻合性,证实了该模型的准确性与有效性。

关键词 物理光学; 偏振; 后向散射; 双向反射分布函数; 地物背景

中图分类号 O436.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0526001

Polarized Reflectance Properties for Ground-Feature's Background Based on Six-Component pBRDF Model

Yang Min^{1,2}, Fang Yonghua^{1,2}, Wu Jun², Cui Fangxiao²

¹School of Environment Science and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230036, China;

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

Abstract To represent the polarized reflectance properties of ground-feature's background, we present a six-component polarized bidirectional reflectance distribution function (pBRDF) model that takes specular reflection, volume scattering and backscattering into account. The model uses the Kubelka-Munk(KM) theory to simulate the volume scattering component, and introduces a backscattering component of Gaussian distribution, which improves the traditional pBRDF model, and makes the new six-component pBRDF model more suitable to the polarized reflectance properties of ground-feature's background. The polarized spectra of grass and soil under the different observation geometries are obtained based on the theory of multi-angular polarization detection. The variation of the polarized spectral reflectance is also analyzed. The simulated polarization values from the six-component model are compared with the measured data. It is shown that a good agreement is obtained between polarization measurement data and simulated results. The accuracy and validity of model are confirmed.

Key words physical optics; polarization; backscattering; bidirectional reflectance distribution function; ground-feature's background

OCIS codes 260.5430; 290.1350; 290.1483

收稿日期: 2017-11-08; 收到修改稿日期: 2017-12-04

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(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,以及红外遥感、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

偏振是光的基本特征之一,位于地表的任何物体都存在一定的偏振现象^[1]。偏振探测作为光强探测的补充,同非偏振探测相比,能够提供更多区分目标的特征信息。偏振特性是目标所具有的较稳定的特性,不同性质目标之间的偏振特性差异较大,目标与背景之间的偏振特性差异较为明显^[2]。目标与背景的偏振特性研究在目标的探测、识别及分类等领域都发挥着重要的作用。自然地物是最典型的背景之一,研究其偏振反射特性,为自然背景下快速、准确地识别目标提供了保证。自然地物的偏振特性通常采用偏振反射率^[3]来表征,它是基于反射辐射的偏振分量所获得的反射率,与反射率相比,更能反映地物背景的物理特性,具有广阔的应用前景。

目前关于自然地物偏振特性研究都是对高空平台^[4-5]和地面测量^[6]获取的偏振信息进行分析。高空平台探测过程中自然地物所产生的偏振信息在传输过程中均受大气影响,所获得的偏振信息不完全是由自然地物所产生的。要想获得自然地物最真实的偏振信息,开展地物野外测量是必不可少的。在分析自然地物的偏振反射特性时,将实测的偏振信息与偏振模型相结合,对自然地物自身偏振反射特性的解释以及对自然背景下目标的准确识别具有非常重要的意义^[2,7-9]。国内外在利用地面测量的自然地物偏振数据进行偏振建模方面取得了一定进展。Shell^[6]在野外环境下测量了各种自然地物的反射率和偏振度,分别建立了相对应的经验模型。Diner等^[10]利用地物多角度光谱偏振成像系统测量了几种典型地物的偏振态,并建立了一种半经验偏振双向反射分布函数(BRDF)模型。赵云升等^[11-12]利用多角度偏振测量装置对土壤、植被等地物进行测量,研究了各地物的偏振反射率特性及相关应用。赵永强等^[13]利用最小二乘支持向量机的方法对土壤背景光谱偏振 BRDF 进行了建模分析。吕云峰等^[14]利用双向反射模型反演了土壤含水量。以上研究,对自然地物的建模研究不够深入,尤其是在模型中忽略了后向散射分量,并且不能描述体散射的产生过程。

本文利用 Kubelka-Munk (KM)理论^[15-16]对体散射分量进行建模,并引入后向散射分量,建立一种六参量偏振 BRDF 模型。针对典型的地物背景,以草地和土壤为研究对象,开展多角度偏振特性测量,分析草地和土壤偏振信息的光谱特性以及半球空间

分布特征,结合实测数据,利用遗传算法反演出模型参量,验证模型的准确性和可靠性。该研究结果可以为地物背景的偏振研究提供参考。

2 理论基础

2.1 定义

目标表面反射光偏振态通常用 Stokes 矢量表示: $\mathbf{S}=[I \ Q \ U \ V]^T$,具体计算公式如下:

$$\begin{cases} I = \frac{2}{3}[I(0^\circ) + I(60^\circ) + I(120^\circ)], \\ Q = \frac{2}{3}[2I(0^\circ) - I(60^\circ) - I(120^\circ)], \\ U = \frac{2\sqrt{3}}{3}[I(60^\circ) - I(120^\circ)], \\ V = I_r - I_l, \end{cases} \quad (1)$$

式中: $I(\theta)$ ($\theta=0^\circ, 60^\circ, 120^\circ$)表示偏振片旋转 θ 角度时探测器获得的线偏振光强度; I_l, I_r 分别为左旋和右旋圆偏振光强度。在研究自然地物的偏振反射光过程中,圆偏振分量可忽略不计^[17]。参照双向反射比的定义^[18],本文主要测量地物背景的偏振反射比 R_{pol} ,可以定义为相同入射、反射条件下,目标的偏振反射光与理想朗伯体反射光之间的比值^[7],表示为

$$R_{pol} = \frac{I_{pol}}{L_{ref}} = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{L_{ref}}, \quad (2)$$

式中: I_{pol} 为地物背景的偏振反射辐射亮度; L_{ref} 为标准白板的反射辐射亮度。除了测量偏振反射比之外,还测量了地物背景的反射比 R ^[7,18],表示为

$$R = L_r / L_{ref}, \quad (3)$$

式中: L_r 为地物背景的反射辐射亮度。

2.2 六参量偏振 BRDF 模型

双向反射分布函数是一个基本的光学参数,描述了某一方向的入射光波,经目标表面反射后,其反射能量在上半球空间的分布情况^[19],其表达式为

$$f(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \lambda) = \frac{dL(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \lambda)}{dE(\theta_i, \phi_i; \lambda)}, \quad (4)$$

式中: λ 为波长; θ_i, ϕ_i 分别为入射方向天顶角、方位角; θ_r, ϕ_r 分别为反射方向天顶角、方位角; $dL(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \lambda)$ 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; $n = n_{re} + in_{im}$ 为目标的复折射率, n 随波长变化。

偏振 BRDF 是标量 BRDF 的一般形式,可以用

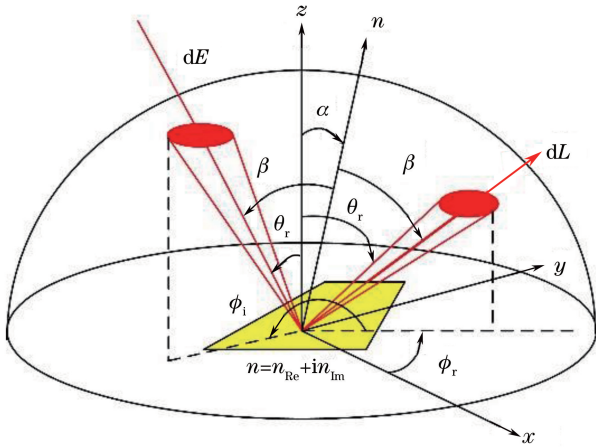


图 1 BRDF 几何关系

Fig. 1 Geometrical figure of BRDF

穆勒矩阵 \mathbf{F} 建立入射场和散射场之间的联系:

$$\mathbf{F}(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) = \frac{d\mathbf{L}_r(\theta_r, \phi_r)}{d\mathbf{E}_i(\theta_i, \phi_i)}, \quad (5)$$

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。

对自然地物背景进行偏振 BRDF 建模时, 可以将其作为一种具有等效折射率材料^[10]。一般情况下, 偏振 BRDF 模型仅含有镜面反射分量 \mathbf{F}^s 和体散射分量 \mathbf{F}^d , 而忽略后向散射效应的影响。但很多自然地物都具有较强的后向散射(“热点”效应)^[2,4,7,10,13], 因此, 本文在传统偏振 BRDF 模型的基础上进行改进, 引入一个后向散射分量 \mathbf{F}^b , 其表达式为

$$\mathbf{F} = k_s \cdot \mathbf{F}^s + \mathbf{F}^d + \mathbf{F}^b, \quad (6)$$

式中: k_s 为镜向系数, 反映镜面反射分量的大小。根据微面元理论可以对镜面反射分量进行建模^[10,14,20], 如

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

$$\mathbf{M}_{j,k}(\theta_i, \theta_r, \Delta\phi) / (8\pi\sigma^2 \cos^4\alpha \cos\theta_i \cos\theta_r), \quad (7)$$

式中: $\Delta\phi = \phi_r - \phi_i$ 为相对方位角; G 为遮蔽因子函数, 文献[20]给出了具体表达式; σ 为目标表面的粗糙度; \mathbf{M} 为一个 4×4 的 Fresnel 反射穆勒矩阵, 描述物体表面偏振反射^[20], 可通过琼斯向量计算得到, 且与物体复折射率有关; j, k 表示矩阵的第 $j+1$

行和 $k+1$ 列, j, k 均从 0 开始计数。本文研究地物背景的偏振反射特性, 考虑到地物背景的复折射率随波长的变化很小, 参考其他研究者给出的结果^[3,7,10], 复折射率取固定值 $n = 1.5$ 。微面元法线与目标表面法线的夹角 α 与 $\theta_i, \theta_r, \Delta\phi$ 之间存在如下关系:

$$\cos\alpha = (\cos\theta_i + \cos\theta_r) / (2\cos\beta), \quad (8)$$

$$\cos(2\beta) = \cos\theta_i \cos\theta_r + \sin\theta_i \sin\theta_r \cos\Delta\phi. \quad (9)$$

KM 理论^[15] 被广泛应用于表征目标体散射的产生过程。Hors 等^[16] 在 KM 理论的基础上, 引入一个反射率参数 ρ_d 用来描述偏振 BRDF 中体散射分量的大小, 表达式为

$$\rho_d = k_d(1 - R_i) \frac{(1 - k_2)R_\infty}{1 - k_2R_\infty}, \quad (10)$$

式中: k_d 为自由拟合系数; R_i 为入射光从空气中照射到物体表面的 Fresnel 反射率^[14,20]; k_2 为物体表面与空气之间散射光的 Fresnel 反射率, 是一个与表面粗糙度、复折射率和反射角度有关的函数, 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, 将 R_∞ 作为一个未知参数。于是, pBRDF 中的体散射分量表示为

$$\mathbf{F}_{j,k}^d = \frac{\cos\theta_r}{\pi} \rho_d \mathbf{M}_{j,k}^d = \frac{\cos\theta_r}{\pi} \rho_d \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

式中: \mathbf{M}^d 为体散射的退偏矩阵。自然地物背景存在很强的后向散射, 且其值近似呈高斯分布^[4,7,21]。后向散射具有很强的退偏特性^[6,22], 表达式为

$$\mathbf{F}_{j,k}^b = k_b \exp\left(-\frac{\theta_r^2}{2\sigma_b^2}\right) \mathbf{M}_{j,k}^b = k_b \exp\left(-\frac{\theta_r^2}{2\sigma_b^2}\right) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

式中: k_b 反映后向散射分量的大小; σ_b 为自由拟合参数; \mathbf{M}^b 为后向散射的退偏矩阵。

结合 (7)、(11)、(12) 式, 六参量偏振 BRDF 模型为

$$\mathbf{F}_{j,k}(k_s, k_d, k_b, R_\infty, \sigma, \sigma_b) = k_s \frac{\exp\left(\frac{-\tan^2\alpha}{2\sigma^2}\right) \cdot G(\theta_i, \theta_r, \Delta\phi) \cdot \mathbf{M}_{j,k}(\theta_i, \theta_r, \Delta\phi)}{8\pi\sigma^2 \cos^4\alpha \cos\theta_i \cos\theta_r} + k_d \frac{\cos\theta_r}{\pi} (1 - R_i) \frac{(1 - k_2)R_\infty}{1 - k_2R_\infty} \mathbf{M}_{j,k}^d(\theta_i, \theta_r, \Delta\phi) + k_b \exp\left(-\frac{\theta_r^2}{2\sigma_b^2}\right) \mathbf{M}_{j,k}^b(\theta_i, \theta_r, \Delta\phi). \quad (13)$$

根据(5)、(13)式,且对偏振 BRDF 进行降维处理,忽略圆偏振分量^[17],可得野外环境下地物背景的表面反射 Stokes 矢量^[6,10,13]为

$$\begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \end{bmatrix}_{\text{surf}} = E_s \begin{bmatrix} F_{00} \\ F_{10} \\ F_{20} \end{bmatrix} \cos \theta_i + \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \mathbf{F}(\theta_i, \theta_r, \phi') \times \mathbf{L}^{\text{diff}}(\theta_i, \theta_r, \phi') \cos \theta_i \sin \theta_r d\theta_r d\phi', \quad (14)$$

式中: E_s 为大气层顶太阳辐照度,非偏; F_{00}, F_{10}, F_{20} 为偏振 BRDF 穆勒矩阵元素; \mathbf{L}^{diff} 为天空漫散射光下行的 Stokes 矢量。在偏振遥感中,只能反演出偏振 BRDF 模型中的第 1 列元素^[2,13]。在极为晴朗的天气条件下,天空散射光相对于太阳直射光可以忽略^[9],结合 R_{pol} 的定义^[7,8,10,18],可推导出 R_{pol} 与偏振 BRDF 的关系^[10]:

$$R_{\text{pol}} = \frac{\pi I_{\text{pol}}}{E_s \cos \theta_i} = \pi \sqrt{F_{10}^2 + F_{20}^2}. \quad (15)$$

由(15)式可知,地物背景的 R_{pol} 与 $k_s, k_d, k_b, \sigma, \sigma_b, R_\infty$ 6 个参数有关,且都为待定的拟合系数,需要通过实测数据反演获得。

3 实验设计

野外测量时,所使用的设备有野外多角度测量装置、Spectra Vista 公司的 HR1024 地物光谱仪和自动偏振探头。野外多角度测量装置由天顶弧和方位圆轨道组成,方位圆轨道可以实现 360° 全方位旋转,而天顶弧轨道可以在任意方位实现 ±75° 天顶方向的测量,两者的测量精度均为 0.2°, 直径均为 2 m。测量地物背景的偏振信息时在探测器光纤前端增加自动偏振探头,该探头包括自动旋转装置、偏振片和消偏器。消偏器消除地物光谱仪的偏振效应^[7],自动旋转装置通过驱动步进电机带动偏振片旋转实现地物背景在 0°, 60° 和 120° 偏振方向上的起偏。野外测量需选择在晴朗天气下进行,尽可能地减少测量角度、节省测量时间,以减小太阳运动与天气变化带来的影响,因此探测天顶角每间隔 10° 测量、方位角每隔 30° 测量一次,并且假设地物背景的反射具有对称性^[4,7-8,11-12],如图 2 所示。一共获取 43 个方向的偏振信息和反射信息,草地和土壤测量时太阳入射天顶角分别在 43.5°~46.7° 和 50.3°~54.8° 之间变化,所有的测量点都是自动获取。

4 测量结果分析

4.1 不同地物背景的光谱反射特性

图 3 为草地和土壤在太阳主平面内不同观测天

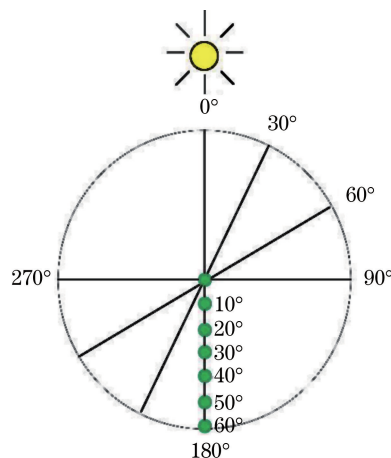


图 2 测量示意图

Fig. 2 Measurement schematic diagram

顶角下的反射光谱,图中“+”表示前向散射方向,“-”表示后向散射方向。可见,草地和土壤在后向散射方向的反射值大于前向散射方向,而草地在正向散射方向反射值随观测天顶角增加逐渐变大,两者反射光谱变化规律与以往的研究结果一致^[7,11]。

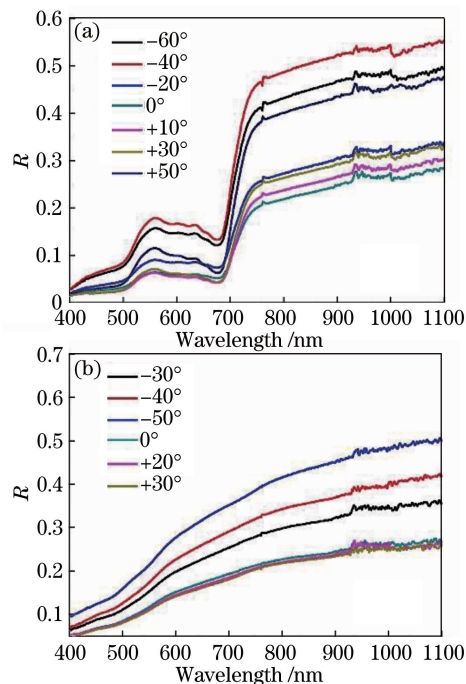


图 3 地物背景在不同观测天顶角下的反射光谱特性。(a)草地;(b)土壤

Fig. 3 Spectral reflectance of ground-feature's background at different viewing zenith angles. (a) Grass; (b) soil

为了进一步研究草地和土壤反射比的分布情况,给出了 865 nm 波段处的半球空间分布图,如图 4 所示。其中 0° 为后向散射,180° 为前向散射。从图中可以看出,草地和土壤的反射都具有明显的各向异性,在太阳主平面内,都出现了后向散射峰

值,即“热点”效应,该变化规律与前人的研究结果相同^[7,11]。这主要是因为在后向散射方向探测时,观测天顶角逐渐接近入射方向时,草地和土壤本身会遮挡其产生的阴影,从而使反射信息增加;在前向散射方向探测时,两者自身产生的阴影进入探测器,反射降低^[7]。

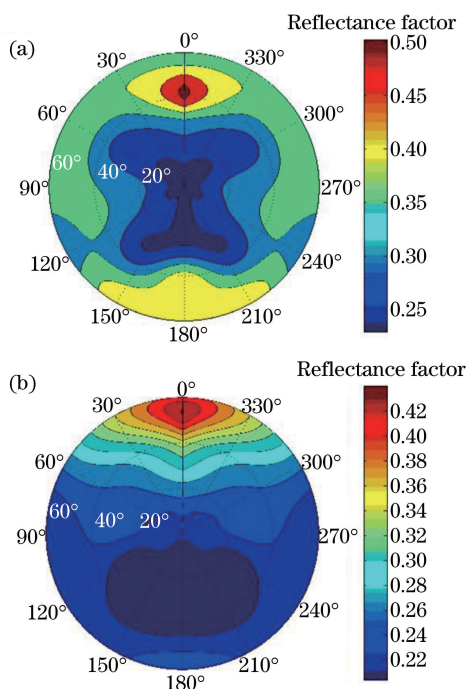


图 4 地物背景的反射比在 865 nm 处的半球空间分布特征。(a)草地;(b)土壤

Fig. 4 Hemispherical distributions of reflectance factor for ground-feature's background at 865 nm. (a) Grass; (b) soil

4.2 不同地物背景的偏振光谱特性

按照(2)式的方法可以得到地物背景的偏振反射比,图 5 给出了草地和土壤在太阳主平面内前向散射方向不同观测天顶角下的偏振光谱反射特性。由图 5 可见,随着观测天顶角增大,草地和土壤的偏振反射比逐渐增大,偏振反射比随波长的变化很小。这是因为偏振信息是由镜面反射产生的,可以将所有波段的能量按照相同的比例反射出去,所以偏振反射比不随波长变化^[8]。

对偏振反射比半球空间分布特征的研究主要集中在 865 nm 波段,这是由于 AirMSPI^[5,10] 和 RSP^[8] 均可以在该波段获取地表偏振信息。图 6 为草地和土壤的偏振反射比半球空间分布图。从图中可见,草地和土壤的偏振反射比也存在各向异性特征,都在前向散射方向出现最大值,随着观测天顶角增大逐渐增大,且随着相对方位角的变化逐渐减小,但与反射分布特征相反,这是由于偏振信息是由镜

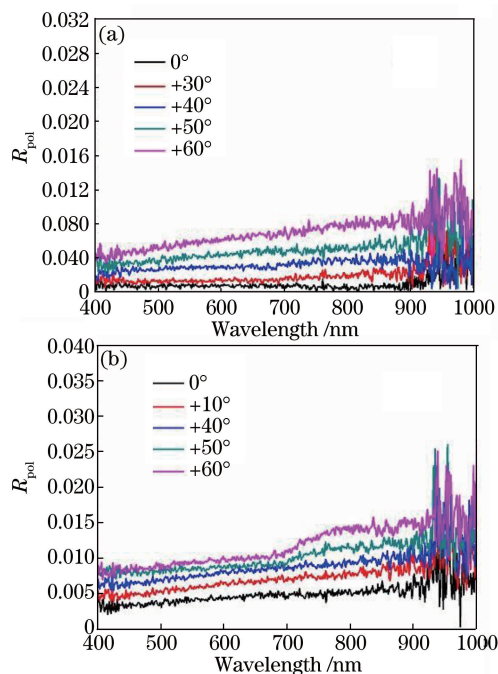


图 5 地物背景的偏振反射光谱曲线。(a)草地;(b)土壤
Fig. 5 Polarized reflectance spectra of ground-feature's background. (a) Grass; (b) soil

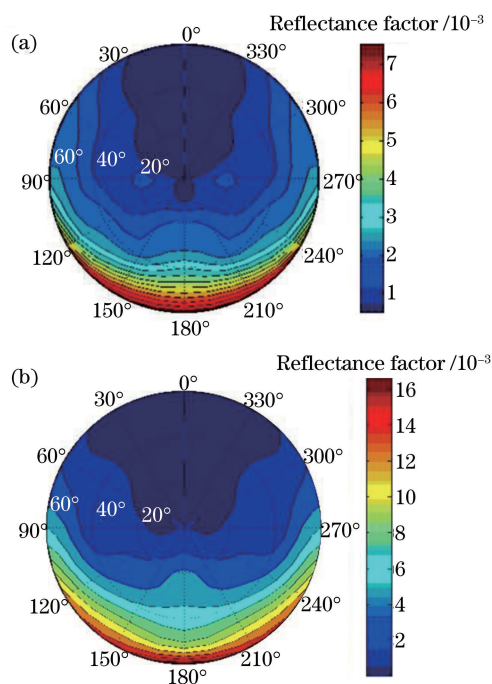


图 6 地物背景的偏振反射比测量值在 865 nm 处的半球空间分布特征。(a)草地;(b)土壤

Fig. 6 Hemispherical distributions of polarized reflectance factor for ground-feature's background at 865 nm.

(a) Grass; (b) soil

面反射产生的,因此在前向散射方向偏振反射比最大,而在后向散射方向由于相对方位角变小,导致入射光与反射光之间的夹角变小,产生较小的偏振反

射比,本文提出的偏振 BRDF 模型可以很好地解释这一现象。

5 仿真与测量结果对比

5.1 模型参量反演

六参量偏振 BRDF 模型含有 6 个未知参数,需要根据实际测量数据进行参数反演,模型参数选择的最佳标准是模型仿真值与实测值的标准均方差最小。构建优化目标函数为

$$\min E(k_s, k_d, k_b, \sigma, R_\infty) = \sum_{\theta_i} \sum_{\theta_r} [F(\theta_i, \theta_r, \Delta\phi) - F_m(\theta_i, \theta_r, \Delta\phi)]^2 / \left\{ \sum_{\theta_i} \sum_{\theta_r} [F_m(\theta_i, \theta_r, \Delta\phi)]^2 \right\}, \quad (16)$$

式中: $F(\theta_i, \theta_r, \Delta\phi)$ 为模型仿真值; $F_m(\theta_i, \theta_r, \Delta\phi)$ 为实验测量值。由于该目标函数是非线性的,本文选择遗传算法进行参数反演,选择所有前向散射方向的偏振反射比作为反演的数据。表 1 为模型参数反演结果,由表可知,草地和土壤都存在较大的后向散射比 k_b ,而镜向系数 k_s 较小,使草地和土壤产生较小的偏振反射比,这都与实际的测量结果相吻合。

表 1 草地和土壤偏振 BRDF 模型拟合参数值

Table 1 Best fitted parameters of pBRDF model for grass and soil

Target	k_s	σ	k_d	R_∞	k_b	σ_b	Error
Grass	0.223	0.792	0.611	0.469	0.667	0.589	0.00586
Soil	0.273	0.683	0.041	0.376	0.54	0.406	0.00715

5.2 测量与模型结果对比

为了检验六参量偏振 BRDF 模型的有效性与合理性,利用表 1 反演得到的参数,再根据 (16) 式可以计算出整个半球空间内地物背景偏振反射比的理论分布。图 7 为草地和土壤偏振反射比仿真值的半球空间分布图。与图 6 的对比结果可以发现,模型仿真的偏振反射比值与实际测量结果的变化规律一致,均是在前向散射方向出现偏振反射比最大值,在后向散射方向出现最小偏振反射比值,模型仿真值与实际测量值吻合良好。因此,六参量偏振 BRDF 模型可以作为地物背景偏振反射研究的理论参考依据。

为更加清楚地比较模型仿真值与实验测量值之间的吻合度,分别给出了没有参与模型参数反演的相对方位角为 60° 和 90° 时草地和土壤偏振反射比仿真值与测量值随观测天顶角的变化情况,如图 8 所示。从图 8 可见,模型仿真值与测量值整体趋势

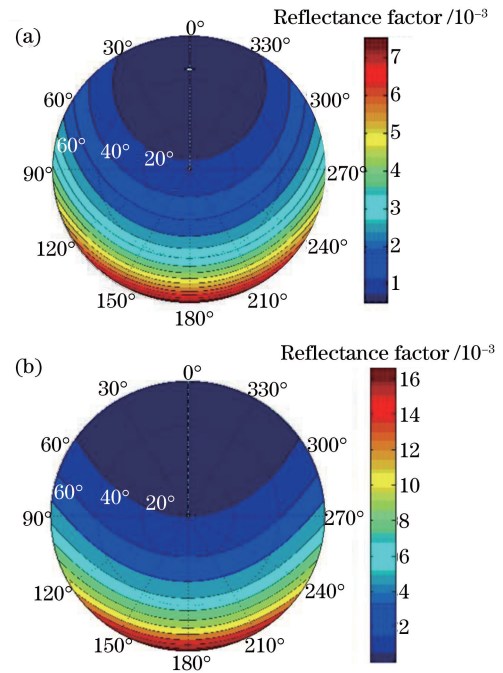


图 7 六参量偏振 BRDF 模型仿真地物背景的偏振反射比半球空间分布图。(a)草地;(b)土壤

Fig. 7 Hemispherical distributions of polarized reflectance factor modeled by six-component pBRDF for ground-feature's background. (a) Grass; (b) soil

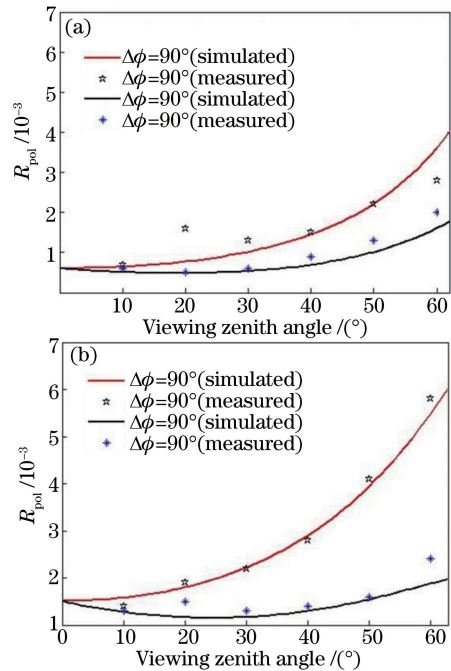


图 8 不同相对方位角下模型仿真值与测量值对比图。(a)草地;(b)土壤

Fig. 8 Comparison of simulated and measured values at different relative azimuth angles. (a) Grass; (b) soil 一致,吻合较好,但也存在一定的误差,产生误差的原因是由草地和土壤的表面粗糙因素及分布不均匀

所致。另外在后向散射方向,草地和土壤的偏振反射比本身就很小,仿真值与测量值之间的微小差异就会引起较大的偏差,但计算出的两者均方根误差是很小的,分别为 0.00082 和 0.00014,说明在后向散射方向即使仿真值与测量值存在较大偏差点,这种六参量偏振 BRDF 模型也可以很好地模拟地物背景的偏振反射特性,证实了模型的有效性。

6 结 论

本文提出了一种新的六参量偏振 BRDF 模型,用于表征自然地物背景的偏振反射特性。该模型利用 KM 理论来描述体散射分量,并引入呈高斯分布的后向散射分量,改进了传统的偏振 BRDF 模型。以草地和土壤为例验证了模型的准确性,并研究了两者的偏振反射分布特征。研究表明,草地和土壤的偏振反射比具有明显的各向异性特征,且与反射比呈现相反的规律。本文提出的六参量偏振 BRDF 模型可以很好地解释这一现象,并且六参量偏振 BRDF 模型仿真值与测量值吻合得很好,具有很高的精度。因此,基于新的六参量偏振 BRDF 模型可以准确地描述自然地物背景的偏振反射特性。要获取更为精准的偏振 BRDF 模型,需结合利用实际测量数据拟合得到的不同地物背景之间的模型参量存在的差异。本文在分析地物背景的偏振 BRDF 模型过程中只选取了两种自然地物背景,在未来的研究中将增加自然地物背景的种类以及考虑更多的影响因素。

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] Zhao Y Q, Zhang G H, Jie F R, *et al.* Unsupervised classification of spectropolarimetric data by region-based evidence fusion [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(4): 755-759.
- [3] Xiang K S, Cheng T H, Gu X F, *et al.* Polarized properties of typical surface types over China based on the multi-angular polarized remote sensing measurements [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64 (22): 227801.
相坤生, 程天海, 顾行发, 等. 基于多角度偏振载荷数据的中国典型地物偏振特性研究 [J]. *物理学报*, 2015, 64(22): 227801.
- [4] Litvinov P, Hasekamp O, Cairns B, *et al.* Reflection models for soil and vegetation surfaces from multiple-viewing angle photopolarimetric measurements [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2010, 111(4): 529-539.
- [5] Wang X Q, Jiao J N, Yang B, *et al.* Research on ground feature's polarized properties with multi-spectral and multi-angle AirMSPI data [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(12): 4094-4099.
王雪琪, 焦健楠, 杨彬, 等. 基于 AirMSPI 多光谱多角度传感器的地物偏振特性研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(12): 4094-4099.
- [6] Shell J R. *Polarimetric remote sensing in the visible to near infrared* [D]. Rochester: Imaging Science Rochester Institute of Technology, 2005.
- [7] Sun Z Q, Wu D, Lu Y F, *et al.* Polarized reflectance factors of vegetation covers from laboratory and field: A comparison with modeled results [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, 122(2): 1042-1065.
- [8] Litvinov P, Hasekamp O, Cairns B. Models for surface reflection of radiance and polarized radiance: Comparison with airborne multi-angle photopolarimetric measurements and implications for modeling top-of-atmosphere measurement [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 115(2): 781-792.
- [9] Huang X, Bai L, Wu Z S. BRDF model of bare surface over rugged terrain [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(1): 0129001.
黄珣, 白璐, 吴振森. 裸露起伏地表的 BRDF 模型 [J]. *光学学报*, 2016, 36(1): 0129001.
- [10] Diner D J, Xu F, Martonchik J V, *et al.* Exploration of a polarized surface bidirectional reflectance model using the ground-based multiangle spectropolarimetric imager [J]. *Atmosphere*, 2012, 3(4): 591-619.
- [11] Zhao Y S, Jin L, Zhang H B, *et al.* Studys on the polarized reflectance characteristics of soil [J]. *Journal of Northeast Normal University*, 2000, 32 (4): 93-97.
赵云升, 金伦, 张洪波, 等. 土壤的偏振反射特征研究 [J]. *东北师范大学报自然科学版*, 2000, 32(4): 93-97.
- [12] Sun Z Q, Zhao Y S. Polarized reflectance characteristics of vegetation canopies based on polarization reflection model [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.
- [13] Zhao Y Q, Liu D, Chen C, *et al.* Spectropolarimetric bidirectional reflectance distribution modeling for

- background based on LS-SVM regression [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(10): 1494-1499.
- 赵永强, 柳丹, 陈超, 等. 基于最小二乘支持向量机回归的背景偏振光谱二向反射分布建模分析[J]. *光子学报*, 2011, 40(10): 1494-1499.
- [14] Lü Y F, Sun Z Q, Zhao Y S. Study on inverting soil moisture content based on the field bidirectional reflectance information with the reflectance model [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3): 0328001.
- 吕云峰, 孙仲秋, 赵云升. 基于野外双向反射信息利用反射模型反演土壤含水量研究 [J]. *光学学报*, 2015, 35(3): 0328001.
- [15] Murphy A B. Modified Kubelka-Munk model for calculation of the reflectance of coatings with optically-rough surfaces [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2006, 39(16), 3571-3581.
- [16] Hors L L, Hartemann P, Dolfi D, *et al.* A phenomenological model of paints for multispectral polarimetric imaging [C]. *SPIE*, 2001, 4370: 94-105.
- [17] Talmage D A, Curran P J. Remote sensing using partially polarized light [J]. *Internal Journal of Remote Sensing*, 1986, 7(1):47-64.
- [18] Schaepman-Strub G, Schaepman M E, Painter T H, *et al.* Reflectance quantities in optical remote sensing-definitions and case studies [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 103(1): 27-42.
- [19] Nicoemus F E, Richmond J C. Geometrical considerations and nomenclature for reflectance [D]. Washington D C: National Bureau of Standards, 1977: 1-7.
- [20] Hyde IV 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.
- [21] Kim C C, Thai B, Yamaoka N, *et al.* Hemispherical reflectance model for passive images in an outdoor environment [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2015, 32(5): 1003-1011.
- [22] Wang K, Zhu J P, Liu H. Degree of polarization based on the three-component pBRDF model for metallic materials [J]. *Chinese Physics B*, 2017, 26(2): 024210.