

激光与光电子学进展

典型卫星表面材料近红外偏振特性分析

陈宏毅^{1,2}, 李英超^{2*}

¹长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

²长春理工大学空间光电技术吉林省重点实验室, 吉林 长春 130022

摘要 为了表征典型卫星表面材料的近红外偏振特性,基于微面元模型并综合考虑镜面散射及漫散射来描述目标表面的反射特性,引入镜面系数及漫反射率来明确两种反射对偏振度的影响,并考虑实际粗糙材料表面存在的遮蔽效应,建立一种更完善的多参量偏振双向反射分布函数模型,进而推导出适用于粗糙材料表面的光学反射偏振度表达式。对典型卫星表面材料进行近红外偏振实验,采用遗传算法从实验数据中反演卫星表面材料的多参量数值,进而得到偏振信息仿真曲线。结果表明,该多参量偏振双向反射分布函数的仿真值与实验测试值能够较好的吻合,不同卫星表面材料的近红外偏振特性有较大分布差异。

关键词 散射; 双向反射分布函数; 散射偏振; 近红外反射偏振特性; 偏振度

中图分类号 O436.3

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1929001

Analysis of Near-Infrared Polarization Characteristics of Typical Satellite Surface Materials

Chen Hongyi^{1,2}, Li Yingchao^{2*}

¹School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

²Jilin Province Key Laboratory of Space Optoelectronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract In order to characterize the near-infrared polarization characteristics of typical satellite surface materials, the reflection characteristics of the target surfaces are described based on the microplane element model and considering the specular scattering and diffuse scattering comprehensively. The specular coefficient and diffuse reflectance are introduced to clarify the influence of the two kinds of reflection on the polarization degree, and the masking effect of the actual rough surface is considered. A more perfect model of multi-parameter polarization bidirectional reflection distribution function is established, and the expression of polarization degree of optical reflection suitable for rough material surface is deduced. The near-infrared polarization experiments of typical satellite surface materials are carried out, and the multi-parameter values of satellite surface materials are retrieved from the experimental data by using genetic algorithm, and then the polarization information simulation curve is obtained. The results show that the simulated values of the multi-parameter polarization bidirectional reflection distribution function are in good agreement with the experimental values, and the polarization characteristics of different satellite surface materials have great differences in distribution.

Key words scattering; bidirectional reflection distribution function; scattering polarization; near-infrared reflection polarization characteristics; degree of polarization

OCIS codes 290.5855; 260.5430; 290.1483; 110.5405

收稿日期: 2020-12-09; 修回日期: 2021-01-09; 录用日期: 2021-02-04

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0803806)、国家自然科学基金联合基金(U1731240)

通信作者: hsjlyc@126.com

1 引言

随着近些年国内外地基望远系统全天时探测技术的发展,近红外探测技术在白天观测条件下的优势日渐突出^[1]。相对于传统的近红外强度探测技术,近红外偏振探测技术能够在一些目标与背景的辐射对比度微弱的情况下显著提升对比度,这更加有利于白天观测条件下对空间目标的探测和识别。偏振探测技术不仅能够获取目标表面的光强信息,还能够获取目标的偏振信息,如偏振度和偏振角等信息,这大大增加了被探测目标的信息量,因此偏振探测技术作为一种新技术已被应用在地基光学探测系统中^[2]。

在偏振探测技术中,偏振度(DOP)是一个表示偏振态变化情况的重要指标。目前,偏振度的获取方式主要有实验测量和理论建模两种方式。其中实验测量是指通过实验方式来找出偏振度与观测几何角度和待测目标材质等因素之间的变化关系;理论建模是指通过基础理论来推导出偏振度与各参量之间的关系,并建立偏振双向反射分布函数(pBRDF)模型,该模型可计算任意参量下的偏振度值。由于偏振度受到观测几何条件的影响较大,显然对待测目标进行全方位各角度的测量是不现实的,因此若要明确各参量对偏振度的影响,建立pBRDF模型是十分必要的。国内外众多学者已经开展了关于pBRDF的研究与建模,Priest等^[3]基于微面元模型提出一种pBRDF模型,并对复折射率相差较大的两种材料进行实验测量,发现实测结果和模型计算结果有相同的趋势,该模型简单且考虑的参量较少,但并未进行定量分析。Thilak等^[4]基于微面元理论建立了pBRDF模型,并推导出了在入射光为自然光的条件下散射光的偏振度表达式,但忽略了漫反射的影响,所以理论计算的偏振度值与实测结果存在较大差异,而且该模型局限于非镜面反射材料。杨玉峰等^[5]采用Minnaert模型^[6]对漫反射部分进行建模,提出一种半经验的粗糙面六参数BRDF模型,该模型提高了数据拟合的精度,但并未对目标的复折射率等参量进行反演,另外该模型并未推导偏振化形式,使得该模型不具备反射光偏振特性分析的能力。

针对传统模型存在的不足,本文基于微面元模型并综合考虑镜面散射和漫散射来描述目标表面的反射特性,引入镜面系数及漫反射参量来明确各

种反射对偏振度的影响,并考虑粗糙材料表面导致的遮蔽效应,建立一种多参量pBRDF模型,进而推导出适用于粗糙材料表面的光学反射偏振度表达式。利用文献中的实验数据来反演材料的参量,验证pBRDF模型的准确性及有效性。对典型的卫星表面材料进行近红外偏振实验测试,采用遗传算法从实验数据中来反演卫星表面材料的多参量数值,从而得到偏振信息仿真曲线,进而得到不同卫星表面材料的偏振特性分布并对其进行分析。

2 理论基础

2.1 双向反射分布函数

BRDF由美国学者Nicodemus^[7]提出,定义为入射方向辐照度的微增量与其所引起的反射方向上辐射亮度增量之间的比值,单位为 sr^{-1} ,可用来表征材料的反射及散射特性,表达式为

$$F(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; \lambda) = \frac{dL(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; \lambda)}{dE(\theta_i, \varphi_i; \lambda)}, \quad (1)$$

式中: θ_i 和 φ_i 为入射方向的天顶角和方位角; θ_r 和 φ_r 为反射方向的天顶角和方位角; λ 为波长; $dE(\theta_i, \varphi_i; \lambda)$ 为沿着入射方向的辐照度; $dL(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; \lambda)$ 为沿着反射方向的辐射亮度。

图1为微面元内BRDF中各角度之间的关系,其中 \mathbf{k}_i 为入射光波矢, \mathbf{k}_r 为反射光波矢, \mathbf{n} 为微面元法线, $\Delta\varphi$ 为相对方位角, $\Delta\varphi = \varphi_i - \varphi_r$, α 为粗糙材料平均表面法线与微面元法线之间的夹角, β_i 和 β_r 为入射光和反射光与微面元法线之间的夹角。

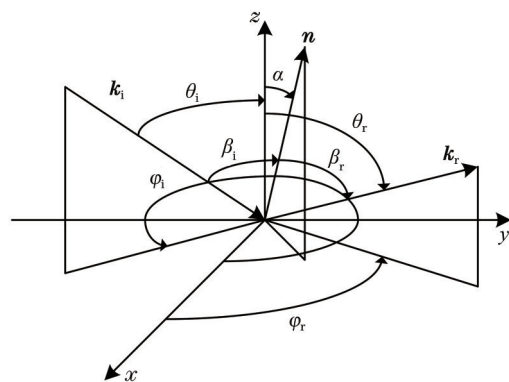


图1 微面元模型的角度关系

Fig. 1 Angular relationship of microfacet model

2.2 偏振双向反射分布函数

pBRDF是BRDF的延伸,采用Stokes矢量

$E(\theta_i, \varphi_i; \lambda)$ 和缪勒矩阵 $M(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; \lambda)$ 来描述光在传输过程中的偏振态变化, 表达式为

$$M(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; \lambda) = \frac{dL_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; \lambda)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i; \lambda)}. \quad (2)$$

实际测量过程中, 粗糙材料表面的反射光可看作由镜面散射 F_{sp} 及不同程度的漫散射 F_{dd} 两部分组

成, 其中镜面反射为材料表面的单次散射, 漫反射为发生在材料内部的多次散射, 材料的反射可表示为

$$F = k_s F_{sp} + F_{dd}, \quad (3)$$

式中: k_s 为相对方位角。镜面反射是材料表面的一次反射, 故基于上述微面元理论使用 Torrance-Sparrow(T-S) 函数模型^[8]来表征 pBRDF 镜面反射 F_{sp} , 表达式为

$$F_{sp,i,j} = \frac{1}{8\pi\sigma^2 \cos^4 \alpha} \frac{\exp(-\tan^2 \alpha / 2\sigma^2)}{\cos \theta_i \cos \theta_r} \cdot G(\theta_i, \theta_r, \Delta\varphi) \cdot M_{i,j}(\theta_i, \theta_r, \Delta\varphi; \eta), \quad (4)$$

式中: σ 为表面高度起伏均方根, 用来表征目标表面的粗糙程度; i, j 为缪勒矩阵的第 i 行和第 j 列; η 为光线分别与材料实际表面法线和微面元法线组成的两平面夹角; $G(\theta_i, \theta_r, \Delta\varphi)$ 为遮蔽函数, 用来描述微面元上的光在反射过程中遮蔽和掩饰现象所带来的影响^[9]。本文基于微面元几何模型可以最直观地表征遮蔽函数, 即使用微面元法线平面上的投影进行计算, 文献^[10]给出了具体的表达式。

实际生活中, 材料表面在微观条件下均为粗糙表面, 入射光经过表面反射后都会发生不同程度的漫散射, 而且目标材料在近红外波段相对于可见光波段具有更强的体散射, 因此对漫散射进行分析与建模是不容忽视的^[11]。目前, Kubelka-Munk 理论普遍用于描述目标散射光中的漫散射分量, 本文在此理论的基础上引入由 le Hors 等^[12]提出的反射率参数 ρ , 用来明确漫散射在反射光中对偏振态的影响, 进一步完善了漫反射分量 pBRDF 模型, 表达式为

$$F_{dd,i,j} = \frac{\cos \theta_r}{\pi} \rho \cdot M_{i,j}^d(\theta_i, \theta_r, \Delta\varphi; \eta), \quad (5)$$

其中

$$\rho = (1 - R_i) \frac{(1 - R_j) R_\infty}{1 - R_j \cdot R_\infty}, \quad (6)$$

$$R_i = \frac{r_s + r_p}{2}, \quad (7)$$

式中: $M_{i,j}^d(\theta_i, \theta_r, \Delta\varphi; \eta)$ 为漫反射作用的缪勒矩阵,

本文为简化模型, 假设漫反射 F_{ud} 类似非偏振态的朗伯体反射, 其只会对反射光的总光强产生影响, 故 $M_{i,j}^d(\theta_i, \theta_r, \Delta\varphi; \eta)$ 中的第一个元素 $M_{0,0}^d$ 为 1, 其他元素都为 0; R_i 为入射光从空气中入射到目标表面的 Fresnel 反射率, 可由反射光 s 分量和 p 分量的菲涅耳反射系数 r_s 和 r_p 算出; R_j 为入射光从空气中入射到目标表面漫反射光的 Fresnel 反射率, 通常情况下可认为 $R_i = R_j$; R_∞ 为目标表面近似无穷厚的 Fresnel 反射率^[13]。

综上所述, 可得到多参量 pBRDF 模型的表达式, 即

$$F_{i,j} = \frac{k_s}{8\pi\sigma^2 \cos^4 \alpha} \frac{\exp(-\tan^2 \alpha / 2\sigma^2)}{\cos \theta_i \cos \theta_r} G \times M_{i,j} + \frac{\cos \theta_r}{\pi} \rho \times M_{i,j}^d. \quad (8)$$

2.3 偏振度表达式

由于自然光中的圆偏振分量很少, 所以可以忽略不计^[14], 故自然光在入射过程中其 Stokes 矢量可以表示为 $E_i = [1 \ 0 \ 0]^T$, 则反射光的 Stokes 矢量为

$$L_r = \begin{bmatrix} F_{sp00} + F_{ud} & F_{sp01} & F_{sp02} \\ F_{sp10} & F_{sp11} & F_{sp12} \\ F_{sp20} & F_{sp21} & F_{sp22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{sp00} + F_{ud} \\ F_{sp10} \\ F_{sp20} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

那么偏振度的表达式为

$$D_{Dolp} = \frac{\sqrt{(k_s F_{sp10})^2 + (k_s F_{sp20})^2}}{k_s F_{sp00} + F_{ud}} = \frac{\frac{k_s}{16\pi\sigma^2 \cos^4 \alpha} \frac{\exp(-\tan^2 \alpha / 2\sigma^2)}{\cos \theta_i \cos \theta_r} \cdot G(r_s - r_p)}{\frac{k_s}{16\pi\sigma^2 \cos^4 \alpha} \frac{\exp(-\tan^2 \alpha / 2\sigma^2)}{\cos \theta_i \cos \theta_r} \cdot G(r_s + r_p) + \frac{\cos \theta_r}{\pi} \rho}. \quad (10)$$

3 模型准确度验证

为了验证理论模型的可靠性, 本文利用文

献^[5]的偏振度测量值对铝和黑漆材料的复折射率 N 、镜向系数 k_s 及漫反射系数 ρ 等参量进行反演, 得到反演结果后与参考文献模型的反演结果及真实的

复折射率值进行对比,可以得到误差值。

其中材料的复折射率 $N=n+ik$, 其中 n 为折射率, k 为吸收系数, 均与波长有关^[15]。由于多参量模型为非线性模型, 因此本文选用一种借鉴生物在自然界中“优胜劣汰”的进化法则而衍生出来的随机优化算法, 即遗传算法对其进行反演, 其适应度函数是关于仿真偏振度 P' 与实验测得偏振度 P 的标准均方差函数^[16], 表达式为

$$f(n, k, \sigma, k_s, \rho) = \frac{\sum_{\theta_i} (P' - P)^2}{\sum_{\theta_i} P^2} \quad (11)$$

遗传算法运算后, 各材料的反演结果如表 1 所示。从表 1 可以看到, 本文模型反演出的复折射率结果相比于参考文献更接近真实值。

为了更直接地体现本文多参量模型的准确度, 进一步将反演出的各材料参量分别代入本文多参

表 1 铝及黑漆材料的复折射率反演比较结果

Table 1 Comparison results of complex refractive index inversion for aluminum and black paint materials

Material	Truth		Reference		Estimation	
	n	k	n	k	n	k
Aluminum	1.240	6.6000	1.370	3.9700	1.231	6.5740
Black paint	1.405	0.2289	1.460	1.3200	1.429	0.2398

量模型和 T-S 模型中, 可以得到两种模型下各材料的反射光偏振度随光源入射天顶角度变化的仿真曲线, 并与实验数据进行对比, 对比结果如图 2 所示。从图 2 可以看到, 实际材料表面并非绝对光滑, 光在材料表面反射的过程中并不只是理想的镜面反射, 均存在一定的漫反射现象, 而且漫反射表现为退偏效应, 从而使各材料仿真出来的偏振度值整体较低, 因此本文多参量模型的仿真曲线与实验结果更加吻合, 较 T-S 模型更精准。

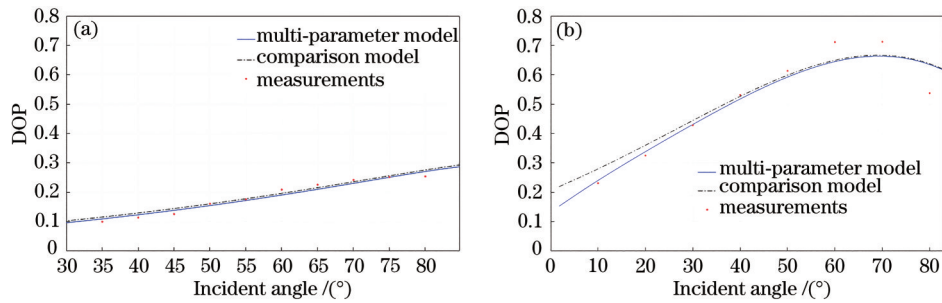


图 2 不同材料下 DOP 的仿真对比曲线。(a) 铝; (b) 黑漆

Fig. 2 Simulation comparison curves of DOP under different materials. (a) Aluminium; (b) black paint

4 实验

4.1 实验条件的选定及进行

实验装置如图 3 所示, 其主要由波长为 1550 nm 的非相干 LED 光源、非球面准直透镜、角度测量旋转装置、近红外偏振片及近红外探测器组成。实验选取卫星通讯及遥感技术所用的典型波段, 即 1550 nm 波段^[17]。典型的卫星表面材料选取铝板、太阳能电池板、聚酰亚胺薄膜及 #54 黑色背板, 实验前使用 600# 砂纸对铝板进行均匀打磨, 用来去除铝板表面的氧化膜以减少对实验的影响, 使用 PSGA-101-A 型号的偏振测量仪对实验条件进行定标。角度测量旋转装置由三角架改装而成, 使用陀螺仪来测量入射天顶角及反射天顶角, 水平方位角的测量采用激光准线的方法来实现。通过旋转近红外偏振片的方式来实现 0°、45°、90° 和 135° 4 个偏振方向的起偏, 使用 Xenics-Bobcat-640-GigE 型号的近红外探测器进

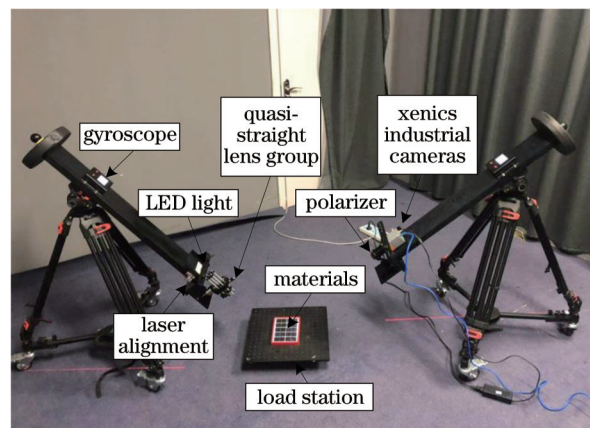


图 3 实验装置

Fig. 3 Experimental setup

行图像采集, 可计算出 Stokes 三个线偏振分量 S_0 、 S_1 和 S_2 , 进而计算出待测目标的偏振度等信息。

在选定实验条件后, 对典型卫星表面材料的偏振信息进行分析。为了避免环境中杂散光的影响, 实验

是在暗室中进行的。旋转三角架平台的俯仰角来控制入射天顶角 θ_i 分别为 30° 、 45° 和 60° 以及相对方位角 k_s ，观测天顶角在 $20^\circ \sim 80^\circ$ 之间以 5° 为变化间隔，用来对各材料在不同观测天顶角下的偏振图像进行采集。为了减小测量实验误差，对各观测天顶角度下的偏振图像均进行多次采集，计算偏振信息的过程中保证每个数据结果是同一条件下 10 组数据的平均值。

4.2 偏振探测系统的定标

为了确保旋转偏振片的方式所获取的偏振信息的准确性，需对 Xenics 型近红外探测器及偏振片所组成的偏振成像系统进行定标。使用偏振态测量仪对偏振片和检偏器的检偏方向以及波长为 1550 nm 光源的无偏性进行标定后，可开展成像系统定标实验。偏振态测量仪中的采集装置如图 4 所示。

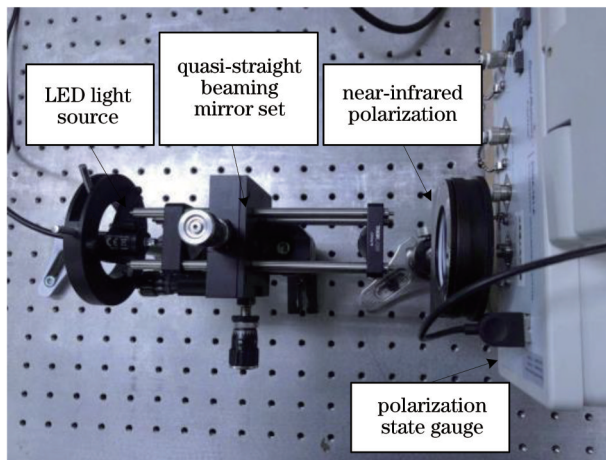


图 4 偏振态测量仪中的采集装置

Fig. 4 Acquisition device in polarization state measuring instrument

标定后，具有 1% 的偏振度且波长为 1550 nm 的准直光束首先经过两片作为起偏器与检偏器的近红外偏振片，接着采用在 0° 到 90° 之间以 5° 为间隔旋转起偏器以产生不同偏振态的偏振光。多次旋转检偏器来实现成像系统对各种偏振光的采集，均

值计算后绘制出偏振度随起偏器旋转角度的变化曲线，如图 5 所示。最终与偏振态测量仪测量得到的曲线进行对比，可得出偏振成像系统的误差。从图 5 可以看到，偏振成像系统的偏振度测量误差均值为 2.32% ，精度足以满足实验需求。

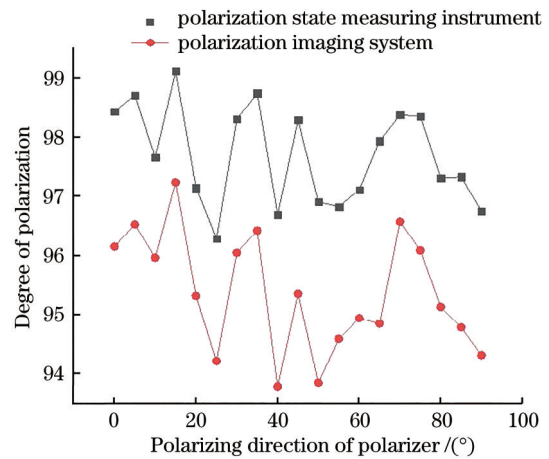


图 5 不同系统的偏振度测量曲线

Fig. 5 Polarization measurement curves of different systems

4.3 典型卫星表面材料的近红外偏振特性分析

为了得到多参量模型下各表面材料的偏振分布，首先基于实验数据采用遗传算法对各参量进行反演，反演结果如表 2 所示。从表 2 可以看到，反演的适应度函数值较小，均值只有 3.69% ，仿真与实测的偏振度值能够较好的吻合。选取实验材料的过程中，铝、太阳能电池板及聚酰亚胺薄膜的镜面系数 k_s 大于各材料的漫反射率参量 ρ ，#54 黑色背板的漫反射率参量 ρ 略大于 k_s 。这与材料的反射率与吸收系数有关，#54 黑色背板的反射率相对较小，吸收系数相对较大，多次散射光大多被材料吸收，因此材料表面的散射光中镜面单次散射光的所占比例较大。总体来看各材料的镜面系数与漫反射率参量呈负相关，而且与材料的吸收系数也呈负相关，均符合物理理论概念与实验现象。

表 2 典型卫星表面材料的参量反演结果

Table 2 Parametric inversion results of typical satellite surface materials

Material	σ	n	k	k_s	ρ	Adaptability / %
Aluminum	0.207	1.5814	15.569	5.139	0.115	2.44
Solar panel	0.102	3.4687	0.002	1.206	0.186	3.68
Polyimide	0.081	1.6098	0.001	1.903	0.232	3.72
#54 black back plate	0.667	1.6010	2.168	12.473	0.034	4.91

进一步将表 2 数据代入 (10) 式，可以计算出任意光源的入射天顶角及相对方位角在半球空间内

的偏振分布特性。在 30° 光源入射天顶角的条件下，材料的偏振分布特性如图 6 所示。

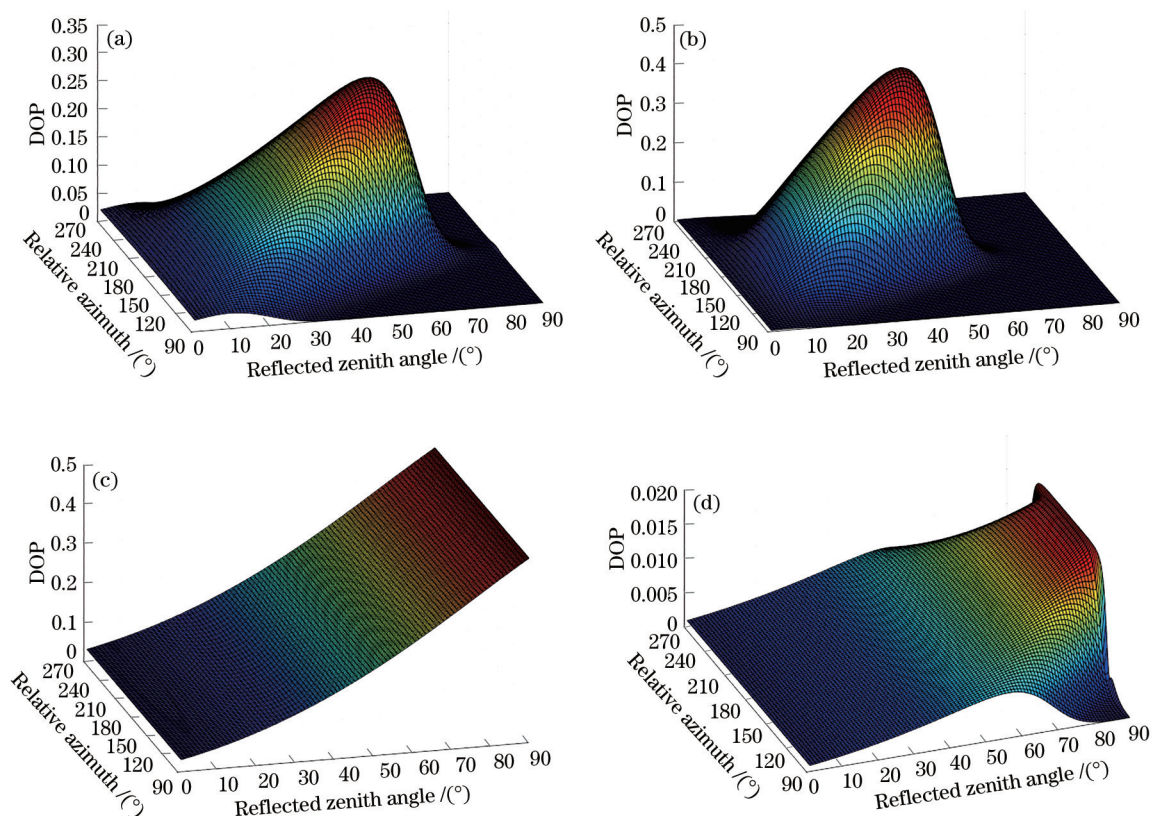


图6 各材料在 30° 入射天顶角条件下的偏振分布特性。(a)太阳能电池板;(b)聚酰亚胺薄膜;(c)#54黑色背板;(d)铝板
Fig. 6 Polarization distribution characteristics of each material at 30° zenith angle. (a) Solar panel; (b) polyimide; (c) #54 black back plate; (d) aluminum

#54黑色背板的偏振度不受相对方位角的影响,各水平探测方向下的变化大致相同,而且随着探测天顶角的增大而增大。这是由于#54黑色背板的反射率较低且吸收系数相对较大,进入材料内部的多次散射光较大部分被吸收,所以造成退偏效应的多次散射光较少,因此其表面散射光中产生偏振信息的镜面单次散射光总占比较大,而且由材料表面粗糙度较大引起镜面散射峰值变宽,最终使偏振度随着探测天顶角的增大而增大。

太阳能电池板的偏振度分布与聚酰亚胺薄膜类似,因都具有较高的反射率以及较小的粗糙度,从而导致材料表面在反射过程中的散射光较少,又因其吸收系数均极低,反射过程中存在一定退偏效应的多次散射光,使具有偏振度信息的镜面单次散射光总占比较小。偏振度值有所降低,而且存在明显的镜面散射峰值及漫散射坡。偏振度在探测天顶角与光源入射天顶角度近似相等的情况下取得峰值,而且随着探测天顶角的进一步增加,多次散射导致的退偏效应立即明显,故偏振度值迅速下降。

铝板具有极高的反射率,光在其表面反射的过程中产生的散射光很少,因吸收系数过大而导致材料对散射光又有很大程度的吸收,使具有偏振度信息的镜面单次散射光占比很小,从而导致铝板的偏振度值整体很低。

5 结 论

本文基于微面元模型并综合考虑镜面散射及漫散射来描述目标表面的反射特性,建立一种更完善的多参量偏振双向反射分布函数(pBRDF)模型,并推导出适用于粗糙材料表面的光学反射偏振度表达式。利用文献中的实测数据对材料参量进行反演,本文模型的反演结果较文献中的模型更为准确,而且仿真出的偏振度曲线与实测数据基本一致。对典型的卫星表面材料进行近红外偏振实验测试,采用遗传算法从实验数据中反演卫星表面材料的多参量数值,进而得到偏振信息仿真曲线。仿真结果表明,不同卫星表面材料的近红外偏振特性有较大差异。聚酰亚胺薄膜及太阳能电池板的偏振度呈明显的镜面散射峰和漫散射坡;#54黑色背

板的偏振度较大,而且随着探测天顶角的增加而增大;铝板的偏振度整体偏低,但随着探测天顶角的增加有略微增大的趋势,但均与实验测量数据可以较好的吻合。本文实验结果可为判断卫星目标的材料组成及飞行姿态提供数据参考,而且偏振度可有效凸显目标细节及轮廓特征,在扩展传统探测技术信息维度的同时极大地提高空间目标的探测效率。下一步工作将对天空近红外偏振度展开仿真及实验,对空间目标与天空背景的近红外偏振特性的差异进行分析总结,以验证近红外偏振技术应用于地基空间目标的探测效果。

参 考 文 献

- [1] Huang Z G, Wang J L, Wang H J, et al. Analysis and verification of infrared K band daytime detection ability[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(8): 0804001.
黄智国, 王建立, 王昊京, 等. 红外 K 波段白天探测能力分析验证[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(8): 0804001.
- [2] Kissell K E. Polarization effects in the observation of artificial satellites[M]//Gehrels T. Planets, stars and nebulae studied with photopolarimetry. Tucson: University of Arizona Press, 1974: 371-380.
- [3] 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.
- [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] Yang Y F, Wu Z S, Cao Y H. 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.
- [6] Minnaert M. The reciprocity principle in lunar photometry[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 1941, 93: 403-410.
- [7] Nicodemus F E. Reflectance nomenclature and directional reflectance and emissivity[J]. *Applied Optics*, 1970, 9(6): 1474-1475.
- [8] Chen W L, Li J W, Sun Z Q, et al. Analysis of visible polarization characteristics of typical satellite surface materials[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(10): 1026001.
陈伟力, 李军伟, 孙仲秋, 等. 典型卫星表面材料可见光偏振特性分析[J]. *光学学报*, 2018, 38(10): 1026001.
- [9] Ma S, Bai T Z, Cao F M, et al. Infrared polarimetric scene simulation based on bidirectional reflectance distribution function model[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(12): 3357.
马帅, 白廷柱, 曹峰梅, 等. 基于双向反射分布函数模型的红外偏振仿真[J]. *光学学报*, 2009, 29(12): 3357.
- [10] Liu Y, Shi H D, Jiang H L, et al. Infrared polarization properties of targets with rough surface[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(3): 459-471.
柳祎, 史浩东, 姜会林, 等. 粗糙目标表面红外偏振特性研究[J]. *中国光学*, 2020, 13(3): 459-471.
- [11] Yang M, Fang Y H, Wu J, et al. Multiple-component polarized bidirectional reflectance distribution function model for painted surfaces based on Kubelka-Munk theory[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(1): 0126002.
杨敏, 方勇华, 吴军, 等. 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[J]. *光学学报*, 2018, 38(1): 0126002.
- [12] le Hors L, Hartemann P, Dolfi D, et al. Phenomenological model of paints for multispectral polarimetric imaging[J]. *Proceedings of SPIE*, 2001, 4370: 94-105.
- [13] Wang J J, Yang J, Li S, et al. Measurement error analysis of bidirectional reflectance distribution functions[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(3): 0312004.
汪杰君, 杨杰, 李双, 等. 偏振双向反射分布函数测量误差分析[J]. *光学学报*, 2016, 36(3): 0312004.
- [14] Zhu D R, Feng K K, Wang F B, et al. Six-parameter polarized bidirectional reflectance distribution function model for rough surfaces[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(9): 092601.
朱达荣, 冯康康, 汪方斌, 等. 粗糙表面六参量偏振双向反射分布函数模型[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(9): 092601.
- [15] Zhang Q Z, Luo T S, Xie T G. A measurement method of complex refractive index for absorbing medium[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(11): 1104002.
张秋长, 罗天舒, 谢廷贵. 吸收介质复折射率的一种测量方法[J]. *中国激光*, 2017, 44(11): 1104002.

- [16] Yuan Y, Jin D, Su L J. Optimization modeling and verification of bidirectional reflectance distribution function for rough surfaces[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(5): 052901.
袁艳, 金鼎, 苏丽娟. 粗糙表面双向反射分布函数优化建模与验证[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(5): 052901.
- [17] Li B, Tong S F, Zhang L, et al. Influence of horizontal atmospheric visibility on deep-space laser communication rate[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(10): 1006003.
李勃, 佟首峰, 张雷, 等. 水平大气能见度对深空激光通信速率的影响[J]. *光学学报*, 2017, 37(10): 1006003.