

典型卫星表面材料可见光偏振特性分析

陈伟力^{1*}, 李军伟¹, 孙仲秋², 王淑华¹, 王静¹, 陈艳¹, 邓蓉¹

¹北京环境特性研究所光学辐射重点实验室, 北京 100854;

²东北师范大学地理科学学院, 吉林 长春 130024

摘要 对典型卫星表面材料进行了可见光偏振测试, 基于测试数据完成了表面材料的可见光反射特性分析; 推导分析了基于偏振双向反射分布函数的可见光反射偏振传输模型, 并基于测试数据对模型的模拟计算精度进行了评价。结果表明: 模型计算的反射偏振度与实测结果有较好的一致性, 且在镜面反射情况下, 典型卫星表面常用的主体包覆材料偏振度最小, 但偏振角有最大值。即材质表面组成成份不同, 其可见光反射偏振特性有较大差异。结合考虑目标表面的偏振特性更有助于区分目标的物质组成, 研究成果可为改善典型卫星目标探测的有效性提供基础数据支撑。

关键词 可见光反射偏振特性; 典型卫星表面材料; 偏振双向反射分布函数; 偏振度; 偏振角

中图分类号 O436.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1026001

Analysis of Visible Polarization Characteristics of Typical Satellite Surface Materials

Chen Weili^{1*}, Li Junwei¹, Sun Zhongqiu², Wang Shuhua¹,
Wang Jing¹, Chen Yan¹, Deng Rong¹

¹Science and Technology on Optical Radiation Laboratory, Beijing Institute of Environmental Features, Beijing 100854, China;

²College of Geographical Sciences, Northeast Normal University, Changchun, Jilin 130024, China

Abstract We carry out a visible spectra polarization test to the typical satellite surface materials, and accomplish visible reflect characteristic test based on test data. Then, we deduce the visible reflect polarization transfer model which is based on the polarization bidirectional reflectance distribution function, and evaluate the simulated computation accuracy of the model based on measured data. The results show that the reflected polarization degree of the simulated model is in good agreement with the measured results. And the polarization degree of coating materials used for typical satellite surface is usually minimum at the condition of mirror reflection, but the angle of polarization has the maximum value. That is to say, if the surface compositions of materials are different, the polarization characteristics of the visible light reflection are quite different. It is more helpful to distinguish the material composition of the target by considering the polarization characteristics of the target surface. The research results can provide basic data support for improving the effectiveness of satellite detection.

Key words polarization characteristic of visible light reflection; material of typical satellite surface; polarization bidirectional reflectance distribution function; degree of polarization; angle of polarization

OCIS codes 260.5430; 240.5420; 040.1880

1 引 言

由于目标的偏振特性反映了材料的本征特性, 不同材质目标的偏振特性的差异可以为目标识别提供重要信息。为了达到探测和识别空间目标的目的, 偏振探测作为新技术也已被应用到地基光学观

测系统中^[1]。通过分析不同形状卫星的光学偏振观测结果, 国外相关科研人员发现偏振观测可以测试在轨目标状态, 判断目标材料和空间环境对目标光学特性的影响。铝质材料和太阳能板表面的卫星偏振特性与理论计算结果的不同, 表明卫星在太空运行过程中材料确实发生了变化^[2]。因此, 卫星目标

收稿日期: 2018-04-03; 修回日期: 2018-05-16; 录用日期: 2018-05-25

* E-mail: 64784181@qq.com

的偏振特性在目标光学探测中能发挥其独特的作用。

国内也有关于典型卫星可见光偏振特性的研究。中国科学院安徽光学精密机械研究所的李雅男等^[3]研制了一种空间目标光谱偏振探测实验装置,并对空间目标光谱偏振特性进行了测量和仿真分析,结果表明:空间目标的偏振特性与太阳能电池板的偏振特性接近,为基于偏振探测的太阳能电池板的姿态确定提供了可能。通常,目标表面的可见光偏振特性研究主要基于偏振探测实验及分析,基础材质的可见光偏振特性研究较少。为了研究典型卫星表面材料可见光偏振特性的差异,为典型卫星目标探测提供新特征和新方法,本文对几种常用的卫星目标包覆材料的可见光偏振特性进行了仿真分析。

首先通过测试典型卫星表面材料的可见光偏振双向反射分布函数(BRDF),分析研究了典型卫星表面材料的可见光偏振散射特性;其次,基于偏振BRDF建立了典型卫星表面材质的可见光散射偏振特性模型,结合实测数据完成了典型卫星表面材质的可见光偏振特性模型仿真数据的分析验证。研究表明:在镜面反射时,卫星主体包覆材质表面的可见光线偏振度为最小值,可见光偏振角为最大值,而其他材质表面的可见光反射偏振特性则没有这样的规律性。也就是说,利用典型卫星表面材质的镜面反射偏振特性可以提高卫星目标探测识别的有效性。

2 典型卫星表面材料可见光偏振双向反射分布特性测试

典型卫星表面常用的组成材料有金色聚酰亚胺薄膜(涂金 F46)、银色聚酰亚胺薄膜(涂银 F46)、铝板、太阳能电池板、白漆天线以及背板等。对三种典型卫星主体包覆材料(金色聚酰亚胺薄膜、银色聚酰亚胺薄膜及主体背面黑色背板材料)进行初步测试分析。卫星主体的包覆材料被太阳光照射,表现出不同的反射分布特性,被测材料如图 1 所示。由图 1 可知,金色、银色聚酰亚胺薄膜有不同程度的起伏表面,而黑色背板材料表面平整。

2.1 偏振双向反射分布函数测试系统

可见光偏振双向反射分布函数测试系统主要通过改造 BRDF 测量平台来实现测试,BRDF 测量平台是主要用于对样本材质进行不同角度测量的多角度偏振测量平台(Northeast Normal University

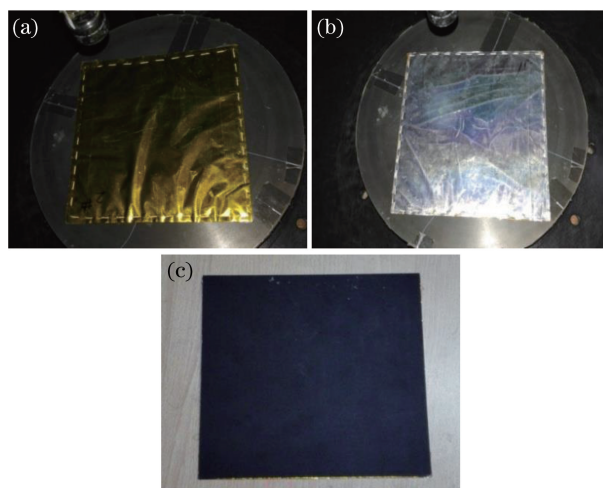


图 1 典型卫星主体表面包覆材料。(a)金色聚酰亚胺薄膜;(b)银色聚酰亚胺薄膜;(c)黑色背板

Fig. 1 Main body surface materials of typical satellite.

(a) Gold polyimide film; (b) silver polyimide film; (c) black back plate

Laboratory Goniospectrometer System)^[4-5]。测量平台包括入射光源、入射角框架、探测角测量系统、方位角测量系统和载物台,其中测量实验用到的是探测角测量系统、方位角测量系统和载物台。探测器为 ASD 可见/近红外光谱仪,探测器测量波长范围为 350~2500 nm。主要通过光谱仪光纤前端的偏振片(汤普森棱镜)实现对偏振双向反射分布函数的测试,偏振片的有效探测波长范围为 350~2300 nm。测量时,将被测样品放置在载物台上,通过调整载物台使样品达到与测量标准面相同高度。电机驱动控制系统连接探测角支架和水平方位角测量系统,可自由调节角度和方位,实现多角度、多方位测量。

2.2 典型卫星表面材料可见光反射特性分析

在测试典型卫星表面材料反射及偏振反射特性过程中,考虑前向与后向球面测试对称性,测试主要集中在入射主平面的前向散射方向,在入射角分别为 30°、40°、50°和 60°时对三种目标材质进行双向反射分布函数测量,探测角度为 0°~60°,间隔为 10°。

图 2 为三种目标材质在入射天顶角为 30°时,可见光反射分布特性示意图。由图可知:与金色、银色聚酰亚胺薄膜材质相比,黑色背板材质表面粗糙,镜面反射较弱,在前向球面散射方向,反射特性随着探测角度的增加而变强,同时其反射较弱,当探测角度较大时,单次散射起主要作用;金色、银色聚酰亚胺薄膜材质表面结构相对光滑,在探测角度 30°附近均出现镜面反射峰。

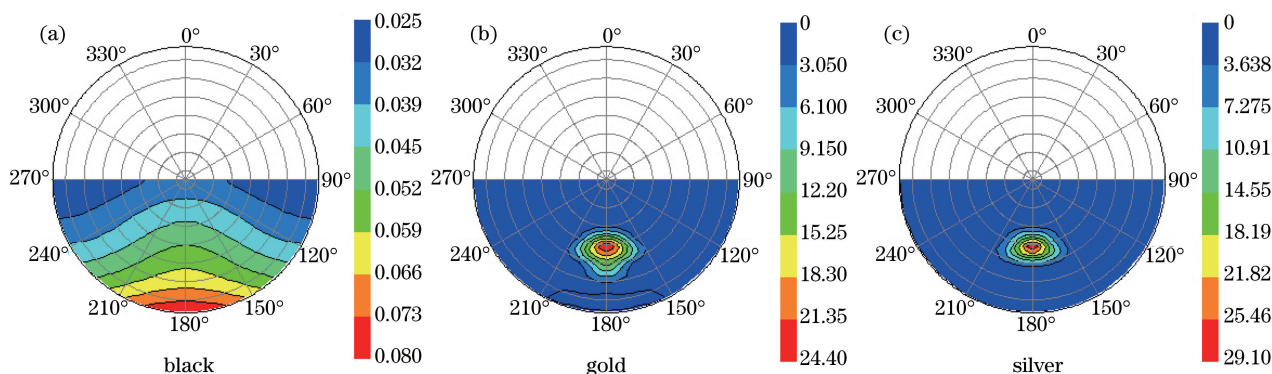


图 2 不同材质在入射角度为 30°时的反射分布特性。(a)黑色背板；(b)金色聚酰亚胺薄膜；(c)银色聚酰亚胺薄膜
Fig. 2 Reflection distribution characteristics of different materials at incidence angle of 30°. (a) Black back plate; (b) gold polyimide film; (c) silver polyimide film

图 3 为三种目标材质在入射天顶角为 40°时的反射分布特性示意图,从图中可以发现,三种目标材质的反射分布特性与入射角为 30°的反射分布特性相似。通过对比可发现,随着入射天顶角的增加,镜

面反射比值增大,这是由入射光的余弦定理决定的。

研究表明:黑色背板材质由于表面粗糙度均匀,表面反射特性随探测角度增加而更加明显;金色、银色聚酰亚胺薄膜由于表面平整,镜面反射较强。

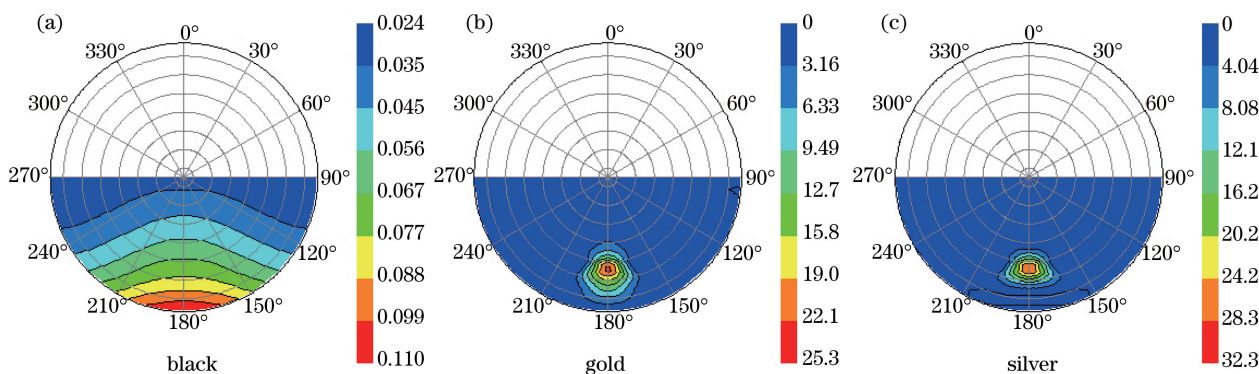


图 3 不同材质在入射角为 40°时的反射分布特性。(a)黑色背板；(b)金色聚酰亚胺薄膜；(c)银色聚酰亚胺薄膜
Fig. 3 Reflection distribution characteristics of different materials at incidence angle of 40°. (a) Black back plate; (b) gold polyimide film; (c) silver polyimide film

3 卫星主体表面材料可见光偏振反射特性模型研究

目标的可见光偏振特性主要为反射偏振特性,对于自然表面和人工目标,反射辐射的偏振特性取决于目标表面的固有属性,如结构特征、粗糙度、观察角及辐照度等。目前,目标可见光偏振反射特性研究主要包括基于实验数据的分析及对可见光偏振反射传输模型仿真分析。典型卫星主体表面覆盖材料表面镜向反射较强,通过查阅参考文献[6-9]可知:根据微面元理论建立的偏振双向反射分布模型可以很好地反演光学参量和粗糙度参量,首先通过基于微面元理论的偏振双向反射分布函数建立目标表面的可见光偏振反射传输模型,然后再通过模型仿真分析典型卫星表面材料的可见光反射光谱偏振

特性,进而分析讨论目标材质表面的反射偏振特性与表面折射率、入射角、反射角及粗糙度等因素之间的关系,并对可见光反射偏振传输模型有效性进行验证分析,研究成果对偏振成像技术的深入研究具有理论指导意义。

3.1 基于微面元理论的可见光偏振反射传输模型

假设入射到偏振器件前的 Stokes 矢量记为 S^{in} ,经过偏振器件后的 Stokes 矢量记为 S^{out} ,则对于可见光偏振成像系统,两者之间存在线性的转换关系,表示为

$$S^{out} = M \cdot S^{in}, \quad (1)$$

式中, M 表示偏振器件的 Muller 矩阵。在偏振成像实验中,通过偏振成像系统获取并计算所得的 Stokes 矢量就是 S^{in} 。对于可见光偏振成像系统,目标材质表面的 Stokes 矢量 S^{in} 可表示为对太阳及天空背景的

反射 Stokes 矢量 \mathbf{S}^r , 主要通过 BRDF 来求解^[10-11]。

因为典型卫星主体包覆材料镜面反射较强, 故所用的 BRDF 为 Torrance-Sparrow (T-S) 函数模型, 该模型是基于镜面反射的微面元理论提出的, 用高斯分布作为微面元的概率分布函数。表征微面元理论的 T-S 函数的 BRDF 表达式为^[12]

$$f(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{4\sigma^2} \frac{1}{\cos^4\theta} \frac{\exp\{-\tan^2[\theta/(2\sigma^2)]\}}{\cos\theta_i \cdot \cos\theta_r}, \quad (2)$$

式中: σ 表示物体表面的粗糙程度, 其值越小表示物体表面越光滑; θ_i 为入射天顶角; θ_r 为反射天顶角; φ_i 为入射方位角; φ_r 为反射方位角; λ 为波长; θ 为微面元法线与材质表面法线的夹角。

BRDF 的偏振化是通过将标量的 BRDF 模型与 4×4 的非涅耳反射 Muller 矩阵作用获得的, 具体的求解过程可参见文献[13]。基于偏振 BRDF 的表达式以及方向半球反射率(DHR)的定义^[13]可以计算得出反射的 Stokes 矢量 \mathbf{S}^r 为

$$\begin{bmatrix} S_0^r \\ S_1^r \\ S_2^r \\ S_3^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \int f_{00} \cos\theta_r d\Omega_r & \int f_{01} \cos\theta_r d\Omega_r & \int f_{02} \cos\theta_r d\Omega_r & \int f_{03} \cos\theta_r d\Omega_r \\ \int f_{10} \cos\theta_r d\Omega_r & \int f_{11} \cos\theta_r d\Omega_r & \int f_{12} \cos\theta_r d\Omega_r & \int f_{13} \cos\theta_r d\Omega_r \\ \int f_{20} \cos\theta_r d\Omega_r & \int f_{21} \cos\theta_r d\Omega_r & \int f_{22} \cos\theta_r d\Omega_r & \int f_{23} \cos\theta_r d\Omega_r \\ \int f_{30} \cos\theta_r d\Omega_r & \int f_{31} \cos\theta_r d\Omega_r & \int f_{32} \cos\theta_r d\Omega_r & \int f_{33} \cos\theta_r d\Omega_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_0^i \\ S_1^i \\ S_2^i \\ S_3^i \end{bmatrix}. \quad (3)$$

由此可知, 可见光偏振反射传输模型的 Stokes 矢量 \mathbf{S}^{in} 可表示为

$$\mathbf{S}^{\text{in}} = \mathbf{S}^r = \int f(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) \cos\theta_r d\Omega_r \cdot \mathbf{S}^i, \quad (4)$$

式中, \mathbf{S}^i 为入射光 Stokes 矢量, 通常情况下认为被动成像系统中入射光为自然光, 故 \mathbf{S}^i 的表达式为 $\mathbf{S}^i = [I_{\text{bg}} \ 0 \ 0 \ 0]^T$ 。那么 \mathbf{S}^{in} 可表示为

$$\mathbf{S}^{\text{in}} = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \int f(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) \cos\theta_r d\Omega_r \cdot \begin{bmatrix} I_{\text{bg}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中: I 与入射光强有关; Q 与 0° 和 90° 方向的线偏振信息有关; U 与 45° 和 135° 方向的线偏振信息有关; V 与左/右旋的圆偏振信息有关; I_{bg} 为背景辐射强度。由(5)式可知, 目标材质表面的 Stokes 矢量 \mathbf{S}^{in} 与 f_{00} 、 f_{10} 、 f_{20} 密切相关, f_{00} 、 f_{10} 、 f_{20} 可由菲涅耳反射 Muller 矩阵 $\mathbf{M}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$ 中的 m_{00} 、 m_{10} 、 m_{20} 计算得出^[13], 将其代入(5)式可得

$$\begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{8\pi\sigma^2} \int \frac{1}{\cos^4\theta} \frac{\exp\{-\tan^2[\theta/(2\sigma^2)]\}}{\cos\theta_i} (R_s + R_p) d\Omega_r \cdot I_{\text{bg}} \\ \frac{1}{8\pi\sigma^2} \int \frac{1}{\cos^4\theta} \frac{\exp\{-\tan^2[\theta/(2\sigma^2)]\}}{\cos\theta_i} \cos(2\eta_i) (R_s - R_p) d\Omega_r \cdot I_{\text{bg}} \\ \frac{1}{8\pi\sigma^2} \int \frac{1}{\cos^4\theta} \frac{\exp\{-\tan^2[\theta/(2\sigma^2)]\}}{\cos\theta_i} \sin(2\eta_i) (R_p - R_s) d\Omega_r \cdot I_{\text{bg}} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中, R_s 为菲涅耳反射率的垂直分量, R_p 为菲涅耳反射率的平行分量, η_i 为参考平面之间变换的旋转角。由(6)式可知, 目标表面的偏振状态与表面折射率、入射角、反射角及粗糙度等因素相关, 同时也与目标背景的背景强度密切相关^[13]。

由(6)式及偏振度、偏振角的定义推导出的基于微面元理论的可见光偏振反射传输模型的偏振度及偏振角计算表达式分别为

$$p = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} = \frac{\int \frac{1}{\cos^4\theta} \frac{\exp\{-\tan^2[\theta/(2\sigma^2)]\}}{\cos\theta_i} |R_s - R_p| d\Omega_r}{\int \frac{1}{\cos^4\theta} \frac{\exp\{-\tan^2[\theta/(2\sigma^2)]\}}{\cos\theta_i} (R_s + R_p) d\Omega_r}, \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{U}{Q}\right) = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\frac{1}{\cos^4 \theta} \frac{\exp\{-\tan^2[\theta/(2\sigma^2)]\}}{\cos \theta_i} \sin(2\eta_i) (R_s - R_p) d\Omega_r}{\frac{1}{\cos^4 \theta} \frac{\exp\{-\tan^2[\theta/(2\sigma^2)]\}}{\cos \theta_i} \cos(2\eta_i) (R_p - R_s) d\Omega_r} \right\}. \quad (8)$$

3.2 卫星主体表面材料可见光偏振反射比分布特性分析

在测量目标的反射特性时,通常遵循反射系数(又称作反射率因子)的定义。反射系数是目标表面的反射辐射通量与在相同入射、探测几何条件下及相同照射条件下理想朗伯反射标准面(对入射辐射无损耗的朗伯面)的反射辐射通量的比值。入射光束几何的变化与反射辐射通量结合就可以表示不同的反射系数。

由双向反射系数的定义和 2.1 节可见光反射偏振传输模型推导可知:根据目标表面折射率、入射角、反射角及粗糙度等参数可仿真计算得出目标表面的可见光反射偏振传输 Stokes 分量,如(6)式所示。偏振反射比表示的是目标表面反射过程中产生的偏振信息部分,可见光偏振反射比

可表示为

$$R(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{\pi L'_{id}(\theta_r, \varphi_r)}, \quad (9)$$

式中, L'_{id} 表示标准参考漫射板的辐射量度。图 4 表示在 40° 入射条件下不同目标材质的偏振反射比分布图,由图可知,黑色背板材质表面偏振反射比值随着探测角度的增加而增加,在前向散射方向最为明显,这与偏振反射系数随相角的变化规律有较好的一致性;而金色和银色聚酰亚胺薄膜材质的偏振反射比值在探测角与入射角相等时取得最大值。这表明:金色与银色聚酰亚胺薄膜材质由于表面平整光滑,会产生较强的镜面反射,镜面反射是产生偏振信息的主要原因。需要注意的是,虽然偏振反射比值的分布特性与双向反射系数相似,但是它们的值却不在一个等级范围之内。

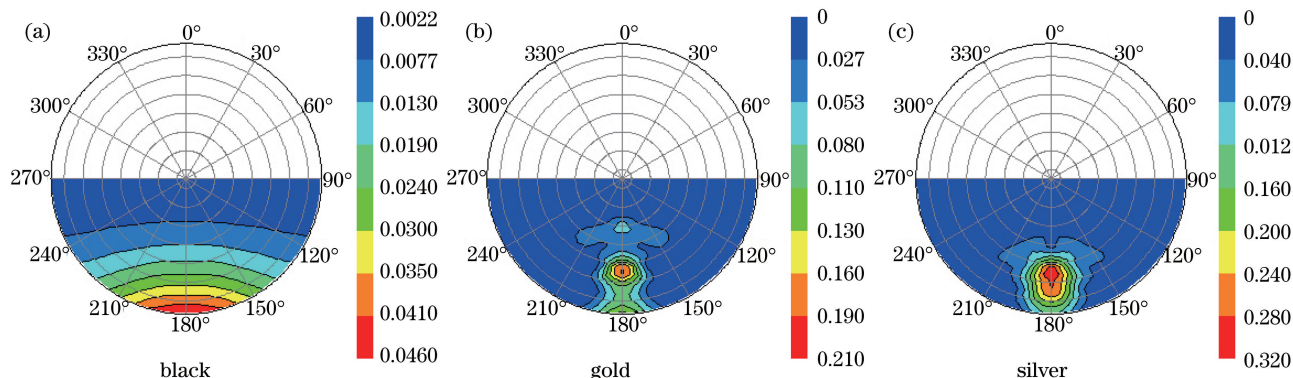


图 4 不同目标在入射角为 40° 的偏振反射比分布特性。(a)黑色背板;(b)金色聚酰亚胺薄膜;(c)银色聚酰亚胺薄膜

Fig. 4 Polarization reflection rate distribution characteristics of different materials at incidence angle of 40° .

(a) Black back plate; (b) gold polyimide film; (c) silver polyimide film

与图 2、图 3 对应,图 5 与图 6 分别为黑色背板材质及金色聚酰亚胺薄膜材质的偏振反射比分布特性测量值与计算值对比结果图。由图 5、图 6 可知,黑色背板材质及金色聚酰亚胺薄膜材质的基于可见光偏振反射传输模型的偏振反射比的仿真计算值与测量值有较好的一致性,这表明基于微面元理论的可见光偏振反射传输模型适用于散射光强呈典型高斯分布的可见光偏振特性分析。需要注意的是,在计算过程中,金色聚酰亚胺薄膜材质的偏振反射比模型以镜面反射部分为基准拟合最大值,故其模拟值在镜面反射的精度最高,在其余方向则会产生差异,这是后续研究将要解决的主要问题。

3.3 典型卫星表面材料可见光偏振特性分析

根据偏振度计算公式[(6)式],可以计算得出金色、银色聚酰亚胺薄膜及主体背面黑色背板材料的偏振度分布特性。图 7 为不同目标在入射角为 50° 时的偏振度分布特性示意图。从图中可以看出,黑色涂层的偏振度最大,且随着探测角度的增加而变大。这表明:在反射过程中,黑色背板材质单次散射光所占的比例较大,且随着探测角度的增加而增大,偏振度也随之增大;金色和银色聚酰亚胺薄膜材质的偏振度由于镜面反射较强,在布儒斯特角附近取得较大偏振度,且偏振度值不随探测角度的变化而改变。这是因为金色和银色聚酰亚胺薄膜为高反射率

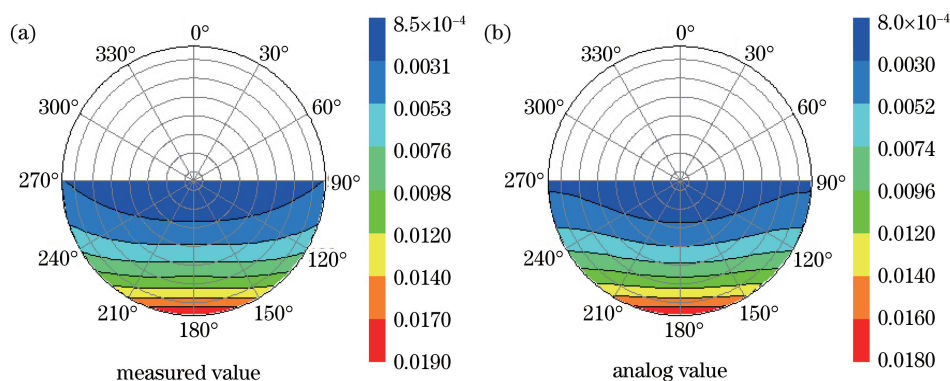


图 5 入射角为 30° ，黑色背板材质偏振反射比分布特性测量值(a)以及模拟值(b)对比图
 Fig. 5 Comparison of the measured values (a) and the simulated values (b) of polarization reflection rate distribution characteristics of black back plate material at incidence angle of 30°

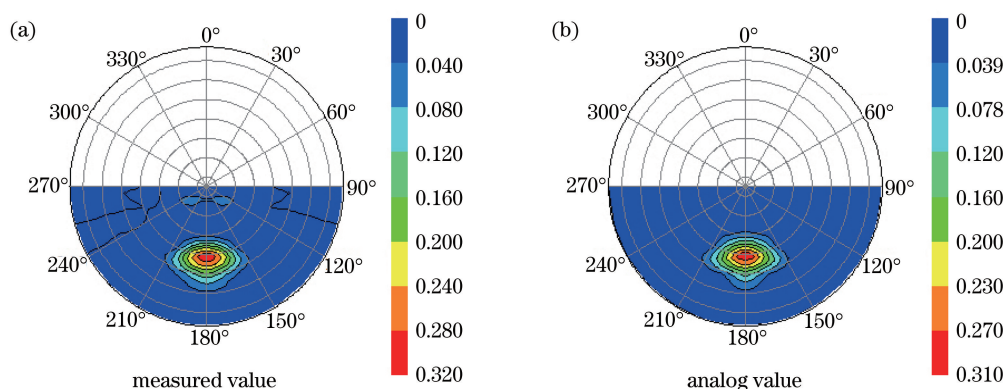


图 6 入射角为 30° ，金色聚酰亚胺薄膜材质偏振反射比分布特性测量值(a)以及模拟值(b)对比图
 Fig. 6 Comparison of the measured values (a) and the simulated values (b) of polarization rate reflection distribution characteristics of gold polyimide film material at incidence angle of 30°

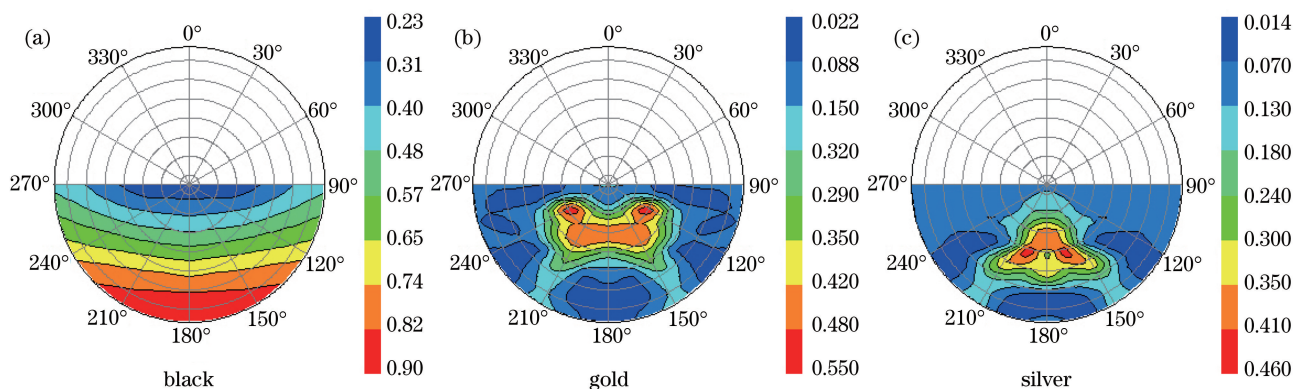


图 7 不同目标在入射角为 50° 时的偏振度分布特性。(a)黑色背板；(b)金色聚酰亚胺薄膜；(c)银色聚酰亚胺薄膜
 Fig. 7 Polarization degree distribution characteristics of different materials at incidence angle of 50° .

(a) Black back plate; (b) gold polyimide film; (c) silver polyimide film

材质，表面反射光主要为一次散射，所以偏振度较低。

同时也对不同材质的偏振角分布特性进行分析计算，结果如图 8 所示。从图中可以发现，黑色背板材质的偏振角在入射主平面最小，这说明偏振光与直角坐标当中的 x 轴(与子午面垂直的方向)之间的夹角较小，且反射光以垂直偏振分量为主。金色和银色

聚酰亚胺薄膜材质的偏振角也呈现相似的规律，但在入射角度等于探测角度时，金色和银色聚酰亚胺薄膜材质的偏振角却变大，且远大于主平面其他探测方位的偏振角。这表明在镜面反射方向，高反射率材质表面的偏振角远离 x 轴，导致垂直分量小于平行分量，两个分量的值却比较相似。

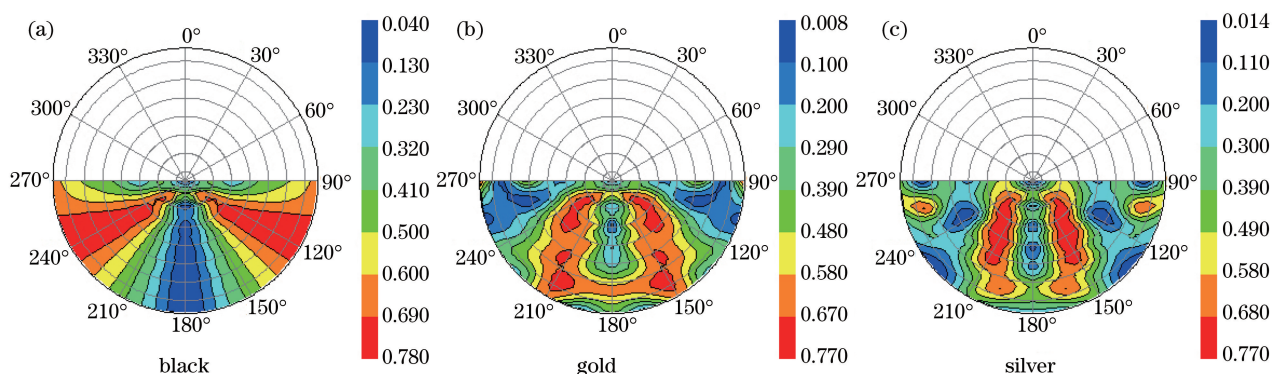


图 8 不同目标在入射角为 50°时的偏振角分布特性(以弧度为单位)。

(a)黑色背板; (b)金色聚酰亚胺薄膜; (c)银色聚酰亚胺薄膜

Fig. 8 Polarization angle distribution characteristics of different materials at incidence angle of 50° (unit: radian).

(a) Black back plate; (b) gold polyimide film; (c) silver polyimide film

综上可得初步结论:在入射主平面内,卫星表面高反射率材质表面的偏振度在镜面反射会出现较小的值,但其偏振角却会出现最大值,这不只在本研究中是一个固有特性,也适用于其他高反射率材质。也就是说,结合考虑目标表面的偏振特性更有助于区分卫星表面材质组成及反射率特性。

3.4 基于实测数据的可见光偏振传输模型验证分析

为了验证可见光传输模型的计算准确性,对三种

目标材质的可见光偏振度进行了实际测量分析,表 1 为金色聚酰亚胺薄膜、银色聚酰亚胺薄膜及主体背面黑色背板材料的实测以及基于可见光偏振传输模型计算得到的偏振度值的比较表。选用了入射角分别为 30°、50°,探测方位角为 20°时的不同目标实测与模拟计算偏振度值进行比较,可以看出基于可见光偏振传输模型的材质表面偏振度计算值与实测得到的偏振度结果有较好的一致性。

表 1 不同目标的偏振度比较

Table 1 Comparison of polarization degree of different targets

Sample class	Degree of polarization (measured value)	Degree of polarization (simulated calculation)
Black	Angle of incident 30°	0.3428
	Angle of incident 50°	0.1921
Gold	Angle of incident 30°	0.1365
	Angle of incident 50°	0.3118
Silver	Angle of incident 30°	0.1206
	Angle of incident 50°	0.3264

4 典型卫星表面材料可见光光谱偏振特性分析

在以往的研究中发现,反射光谱信息与偏振度光谱信息呈反比关系。图 9 为不同材质在可见光波段的反射比及偏振度曲线示意图,测试条件相同,入射天顶角为 30°,探测方位角为 20°。由图可知:黑色背板材质的偏振度大于金色、银色聚酰亚胺薄膜材质;金色聚酰亚胺薄膜材质的偏振度随波长变化最为明显,在 400~450 nm 范围的偏振度最大,在 450~500 nm 范围骤降,到 500 nm 之后偏振度值较稳定,这与金色聚酰亚胺薄膜材质的反射比光谱曲线变化规律相反;图中金色聚酰亚胺薄膜材质的反

射比在 400~900 nm 波段均低于银色聚酰亚胺薄膜材质的反射比,偏振度却在 500 nm 之后才低于银色聚酰亚胺薄膜材质的偏振度,这是因为金色聚酰亚胺薄膜材质表面相对不光滑,粗糙度较大,使得反射过程中的单次散射光被直接探测的几率降低,导致偏振度值较低。

5 结 论

卫星表面材料可见光偏振探测属较新的研究领域,通过多角度偏振测量系统平台对典型卫星表面材料的高光谱反射偏振信息进行了测量;建立了基于偏振双向反射分布函数的偏振反射模型,并基于实测数据验证分析了模型的计算有效性。得出典型卫星表面材料偏振特性研究的初步结论:

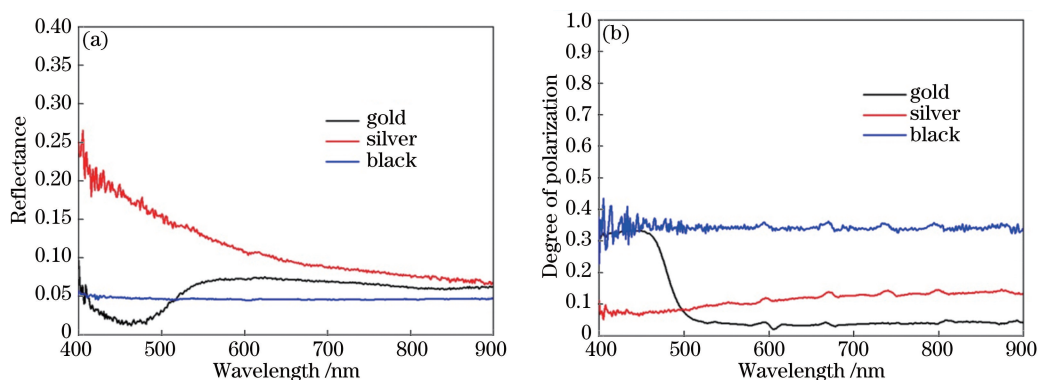


图9 不同材质在400~900 nm的反射比及偏振度曲线。(a)反射比光谱曲线；(b)偏振度光谱曲线
Fig. 9 Spectrum curves of reflectance and degree of polarization of different materials in 400-900 nm.

(a) Reflectance spectrum curves; (b) degree of polarization spectrum curves

1)不同目标的双向反射分布特性不同,典型卫星主体覆盖材质——金色、银色聚酰亚胺薄膜材质具有明显的镜面反射特征,在主平面内,卫星主体的黑色背板材质的反射特性随探测角度的增加而更加明显。

2)不同目标的高光谱偏振度特性与反射比变化趋势相反,即高反射对应低偏振度,低反射对应高偏振度。

3)以可见光全色波段来分析,典型卫星主体表面材料的偏振度与反射分布特性相似,金色和银色聚酰亚胺薄膜材质具有明显的镜面反射特征,但是,高反射率材质在反射过程中垂直于平行偏振分量与 x 轴的夹角(偏振角)变大,导致在入射角度等于探测角度时,偏振度最小,而偏振角出现峰值。

通过对典型卫星常用的三种覆盖材料的可见光反射特性进行分析可知:金色、银色聚酰亚胺薄膜材质作为典型卫星主体表面覆盖材料,其表面具有明显的镜面反射特征,且在入射角度等于探测角度时,偏振角出现峰值。另,由于偏振度及偏振角可以凸显目标细节信息,卫星表面材质的可见光偏振特性可作为判断典型卫星目标的形状和姿态的新方法。研究成果有利于提取目标轮廓特征,提高目标识别效率,可应用于空间探测及材料特性研究等领域。同时,全色波段覆盖的波段范围宽,获取的能量强,不仅便于偏振探测,而且会增加信噪比,使得探测结果更精确。

目前,关于典型卫星表面材料尚未形成完整的偏振特性数据库或数据集。为了检验典型卫星表面材料偏振特性的稳定性,后续将会继续开展典型卫星表面材料的偏振光谱测试研究,将目标材料表面反射信息与偏振信息结合,提高卫星目标探测的有

效性。另外,也将开展典型空间背景的偏振特性分析,通过与典型空间背景的偏振特性进行对比,探寻容易区分卫星目标与空间背景的可探测波段,为偏振成像探测器研发提供科学依据。

参 考 文 献

- [1] Kissell K E. Polarization effects in the observation of artificial satellites[C]//Proceeding of IAU Colloquium 23: Plants, Stars and Nebulae (Studied with Photopolarimetry), November 15-17, 1972, Tucson. Tucson: University of Arizona Press, 1974: 371-380.
- [2] Stead R P. An investigation of polarization produced by space objects[D]. Dayton: Air Force Institute of Technology, 1967.
- [3] Li Y N, Sun X B, Mao Y N, *et al.* Spectral polarization characteristic of space target[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 205-210.
李雅男, 孙晓兵, 毛永娜, 等. 空间目标光谱偏振特性[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(1): 205-210.
- [4] Sun Z Q. The study of the polarized factors of snow surfaces and its relationship with snow properties [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2013: 25-39.
孙仲秋. 积雪表面偏振特性及其与积雪性质之间关系研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2013: 25-39.
- [5] Zhang X. Quantitative analysis of influencing factors and interactions of thermal radiation polarization of water[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2014: 15-20.
张霞. 水的热辐射偏振影响因素及其交互作用[D]. 长春: 东北师范大学, 2014: 15-20.
- [6] Hess M, Priest R. Comparison of polarization bidirectional reflectance distribution function (BRDF) models[C]//1999 IEEE Aerospace Conference. Proceedings (Cat. No. 99TH8403), March 7, 1999, Colorado, USA. New York: IEEE, 2002, 4: 95-

- 102.
- [7] Resnick A, Persons C, Lindquist G. Polarized emissivity and Kirchhoff's law [J]. *Applied optics*, 1999, 38(8): 1384-1387.
- [8] 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.
- [9] Conant J A, Iannarilli F J. Development of a combined bidirectional reflectance and directional emittance model for polarization modeling[J]. *Proceeding of SPIE*, 2002, 4481: 206-215.
- [10] Priest R G, Germer T A . Polarimetric BRDF in the microfacet model: theory and measurements [C] // *Proceedings of the 2000 Military Sensing Symposia Specialty Group on Passive Sensors*, March 21-23, 2000, Ann Arbor. Infrared Information Analysis Center, 2000, 1: 169-181.
- [11] Gartley M G. Polarimetric modeling of remotely sensed scenes in the thermal infrared[D]. Rochester: Rochester Institute of Technology, 2007: 55-61.
- [12] 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): 3357-3361.
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): 3357-3361.
- [13] Chen W L, Wang S H, Jin W Q, *et al.* Research of infrared polarization characteristics based on polarization micro-surface theory[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2014, 33(5): 507-514.
陈伟力, 王淑华, 金伟其, 等. 基于偏振微面元理论的红外偏振特性研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2014, 33(5): 507-514.