

doi: 10.3788/gzxb20174601.0116003

空间目标材料偏振光学特性研究

袁博^{1,2}, 高静¹, 杨凡超^{1,2}, 胡炳樑¹, 高晓惠¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所 光谱成像技术重点实验室, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 基于二向反射模型, 对碳纤维、渗碳膜、F46 和 OSR 四种典型的空间目标样本的偏振光谱数据进行测量; 通过测算样本 Stokes 参量获取样品多角度下的线偏振度与偏振角信息, 并对其进行统计. 结果表明, 样本线偏振度和线偏振角的均值、方差之间存在较大差异, 对比分析样本均值和方差之间的关系能有效提高目标的探测和识别性能, 可以解决传统光谱技术上产生的“同物异谱”和“同谱异物”问题; 所获取的偏振特性可为偏振遥感提供更多的光学信息.

关键词: 光谱偏振特性; Stokes 参量; 线偏振度; 线偏振角; 均值; 方差

中图分类号: O433

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)01-0116003-8

Research on Polarized Optical Properties of Space Target Material

YUAN Bo^{1,2}, GAO Jing¹, YANG Fan-chao^{1,2}, HU Bing-liang¹, GAO Xiao-hui¹

(1 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Science, Xi'an 710119, China)

(2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on the bidirectional reflectance model, the polarization characteristics and spectral radiositivities of four space target samples, such as carbon fiber, carburizing film, F46 and OSR, were measured. By calculating the Stokes parameters of the samples, the degrees of linear polarization and polarization orientations under multiple observing angles were obtained and recorded. The statistical results show that, the different samples have great differences in average and variance of the degree of linear polarization and Orientation. The analysis of the difference between the average and variance of samples can improve the effects in detecting and identifying simples efficiently and solve the “Same object with different spectrums” and “Foreign body in the same spectrum” problems occurred in spectroscopic techniques. The polarization property provides more optical information for remote sensing, which is an effective and reliable method for target recognition.

Key words: Spectral polarization characteristics; Stokes parameter; Degree of linear polarization; Orientation; Average value; Variance

OCIS Codes: 160.4670; 160.4760; 120.2130; 120.5410

0 引言

空间目标主要包括在轨运行的卫星、空间飞行器, 以及各种其他空间碎片等, 空间目标探测的主要任务是对重要的空间目标进行捕获、跟踪, 以获知其尺寸、轨道参量等目标特性^[1-2]. 光谱辐射度、线偏振度、偏振角作为研究空间目标的重要参量, 其影响因素主要为空间材料的材质和表面平整度等. 在多个波段观测目标的电测辐射和偏振面, 可以获取目标辐射中材质的偏振特性随波长变化的规律, 得到目标表面理化结构的精细描述, 即偏振光谱特性. 2000 年, 美国空军研究室的 D. H. Goldstein 等对 12 块涂有不同标准军用油漆的

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos. 11573058, 61405239, 11327303, 61501456), 国家国际科技合作专项 (No. 2015PFA10140) 资助

第一作者: 袁博 (1988—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为通信与信息系统. Email: BoY881211@126.com

通讯作者: 杨凡超 (1987—), 男, 助理研究员, 博士, 主要研究方向为高光谱数据处理. Email: frankyang1987@126.com

导师: 胡炳樑 (1973—), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为高光谱成像技术. Email: hbl@opt.ac.cn

收稿日期: 2016-04-12; **录用日期:** 2016-10-21

<http://www.photon.ac.cn>

铝板进行了光谱偏振特性研究^[3]. 1999年和2002年, 纽约大学的 W. G. Egan 对 C-130 型飞机、B-52 型飞机分别进行了偏振特性的实验研究^[4], 研究表明, 提取目标的光谱特性和偏振特性, 并加以结合利用, 更有助于提高目标探测与识别的准确度.

本文使用 Stokes 参量测量体系, 对渗碳膜、碳纤维、F46 和 OSR 四种不同材质和不同表面平整度的样本进行了偏振光谱二向反射建模, 得到了其光谱曲线、线偏振度和线偏振角数据, 并分析了材料和该数据之间的关系, 提出用数据的均值和方差作为判断标准的方法, 在样本光谱数据的基础上, 使用偏振数据解决了样本中出现的“同谱异物”问题.

1 光谱偏振理论

1.1 光的偏振特性

光的偏振态分为非偏振光、部分偏振光、线偏振光、圆偏振光以及椭圆偏振光 5 种形式. G. G. Stokes 引入了 Stokes 参量来对光的偏振态进行描述^[6]. Stokes 参量的一般形式为 $\mathbf{S}=[S_0, S_1, S_2, S_3]^T$, 其中, S_0 描述总光强值, S_1, S_2 描述线偏振分量, S_3 描述圆偏振分量. 这 4 个参量都是光强的时间平均值, 所描述的信息可用各种成像设备直接或者间接测量到, 且测量方式容易实现. Stokes 参量测量系统如图 1^[8], 具有一定偏振态的入射光在经过线偏振器与相位延迟器后, 其光强值被探测器所接收.

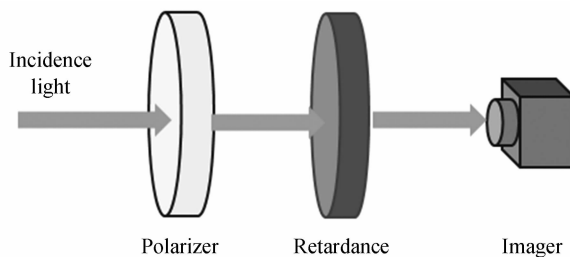


图 1 Stokes 参量获取系统
Fig. 1 Parameter acquired system

通过对线偏振器 (Polarizer) 的角度 θ 与相位延迟器 (Retarder) 的延迟量 φ 取不同的组合, 可以得到不同的光强值 $I_{\theta, \varphi}$. 根据 Stokes 参量的定义求得其 4 个参量^[8], 即

$$\begin{cases} S_0 = I_{0^\circ, 0} + I_{90^\circ, 0} \\ S_1 = I_{0^\circ, 0} - I_{90^\circ, 0} \\ S_2 = I_{45^\circ, 0} - I_{135^\circ, 0} \\ S_3 = I_{45^\circ, \pi/2} - I_{135^\circ, \pi/2} \end{cases} \quad (1)$$

大多数地物的圆偏振分量在仪器检测的范围内可以忽略, 故在多束成像偏振探测中取 $S_3 = 0$. 线偏振光, 线偏振度 (Degree of Linear Polarization, DoLP)、线偏振角 (Orientation) 分别定义为

$$D = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0} \quad (2)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{S_2}{S_1} \right) \quad (3)$$

根据式 (3) 求出偏振角, 其值表示线偏振方向与 x 轴之间的夹角, 取值区间为 $[0, 180^\circ]$. 通过 Stokes 参量求得线偏振度和线偏振角, 其值可以表征目标偏振特性能力, 线偏振度能够很好地表征目标的表面漫反射或折射程度等特征, 线偏振角能够表征目标表面的空间摆放程度、表面划痕等特征. 通过计算获取这两个参量, 结合目标的光谱特征信息, 能够实现更为强大的目标检测与识别.

1.2 偏振信息的均值和方差

在采集到的二维偏振图像中, 对一些非均匀样本, 仅使用某个点的偏振信息代替整张图像的偏振特性, 或者使用区域均值进行线偏振度和偏振角数据处理, 会在很大程度上丧失目标的细节信息, 无法准确观测到目标的纹理信息与表面粗糙程度, 从而导致判断失准^[9]. 因此, 针对区域内线偏振度和偏振角存在一定差异的非均匀观测样本, 引入偏振信息的均值和方差作为分析标准, 定义为

$$\begin{cases} D_{\text{ave}} = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{i=1, j=1}^{m, n} D_{i, j} \\ D_{\text{var}} = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{i=1, j=1}^{m, n} (D_{i, j} - D_{\text{ave}})^2 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \theta_{\text{ave}} = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{i=1, j=1}^{m, n} \theta_{i, j} \\ \theta_{\text{var}} = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{i=1, j=1}^{m, n} (\theta_{i, j} - \theta_{\text{ave}})^2 \end{cases} \quad (5)$$

式中, D_{ave} 与 D_{var} 分别表示线偏振度 D 的均值与方差, θ_{ave} 与 θ_{var} 分别表示偏振角 θ 的均值与方差, $D_{i, j}$ 与 $\theta_{i, j}$ 分别代表图像坐标 (i, j) 点上的线偏振度与偏振角的测量值。

2 偏振光谱二向反射建模

空间目标因其各自的用途不同, 在空间中被探测时处于不同的太阳天顶角下. 需要测量各种典型空间目标的多角度偏振信息, 建立其在 2π 空间内的偏振反射规律, 以更有效识别出光谱特征相近的空间目标, 通常用二向性反射分布函数 (Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF) 表示^[10]. 该函数描述了入射光线经过某个表面反射后如何在各个出射方向上分布, 本文通过测量偏振光谱的强度、线偏振度、偏振角 3 个分量来实现偏振光谱 BRDF 建模.

2.1 测量原理

当入射光以小角度入射时, 一般不存在镜面效应, 更多的表现为朗伯 (Lambert) 体特性; 但是当光线以大角度入射时, 明显存在镜面效应. 对于特定目标样本, 若入射光以大角度入射时, 其镜反射较强烈, 则该样本为镜反射与漫反射的合成体. 光波经过目标表面反射后产生的偏振特征由光波的入射角大小和目标的折射率决定. 不同的目标折射率也不相同, 其产生的反射光的偏振特征也随之发生变化^[11]. 线偏振角会随着光源在水平面 2π 空间内的入射角度不同而变化很大, 线偏振度在整个 2π 空间内相对稳定, 并不随入射角度的变化而剧烈变化. 因此, 在建立偏振光谱 BRDF 模型时, 线偏振度可以更有效地反映目标样本的特征参量. 实验装置如图 2.

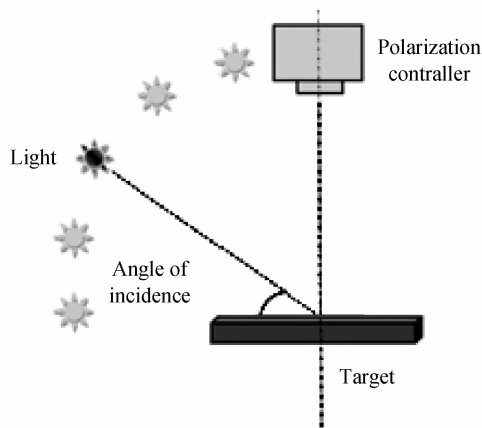


图 2 样本多角度测量实验装置

Fig. 2 Multi angle measurement experiment schematic diagram

实验中, 采用简化的 BRDF 模型进行样本的偏振特性测量时, 进行 5 组常用光源角度 (0° , 30° , 45° , 60° , 90°) 进行偏振数据采集. 将光源放置于 0° , 探测器之前放置偏振器, 转动偏振器使之垂直于样本表面, 采集 0° 、 45° 、 90° 、 135° 四个偏振方向图像, 计算出每组的整个样本的斯托克斯参量的线性部分 (S_0 , S_1 , S_2), 太阳高角 0° 时的线偏振度 DoLP 与偏振角 Orient 的面阵平均值和方差.

2.2 偏振数据测量

为了获取目标的 Stokes 参量, 需要对样本的 4 个特定角度的偏振图像进行采集^[12]. 偏振测量方法是: 使用偏振器结合可见光 CCD 探测器, 在 0° 、 45° 、 90° 、 135° 四个方向测量偏振图像格式, 计算出 Stokes 参量的线偏振分量 S_0 、 S_1 、 S_2 三个参量, 进而计算出样本的线偏振度与偏振角. 用西安光机所光谱成像技术国家重点

实验室的可见光偏振相机进行数据采集,如图 3.



图 3 可见光偏振相机

Fig. 3 Visible light polarization camera

探测器采用韩国 Vieworks 公司生产的可见光谱段 CCD 探测器 VH-4MG,其分辨率为 $2\,048 \times 2\,048$;偏振器用美国 MeadowLark 公司的可见光宽谱段型号线偏振片 DPM-100-VIS,该偏振片具有较宽谱段透过率和较好的偏振消光比,可见光区域工作谱段在 $380 \sim 710\text{ nm}$ 之间,其消光比在整个谱段不低于 $100:1$,从而可以保证为整个系统提供较精确的线偏振光强数据 I_{0° 、 I_{45° 、 I_{90° 、 I_{135° ,以及计算出的 DoLP 和 Orient 数据.

2.3 实验结果

由于 4 种样本在亮度与漫反射或镜面反射程度上差异较大,很难将 4 个样本在同一组同时测量,故将 4 个样本分为 2 组分别进行测量,见图 4、图 5. 图 4 为碳纤维与渗碳膜,图 5 为 OSR 与 F46. 表 1~4 分别是碳纤维、渗碳膜、OSR 和 F46 的线偏振度和偏振角的数据.

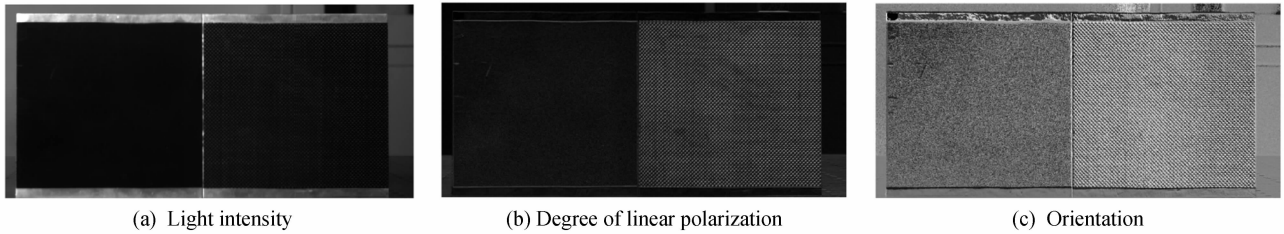


图 4 碳纤维和渗碳膜数据采集结果

Fig. 4 Data acquisition results of carbon fiber and carburizing film

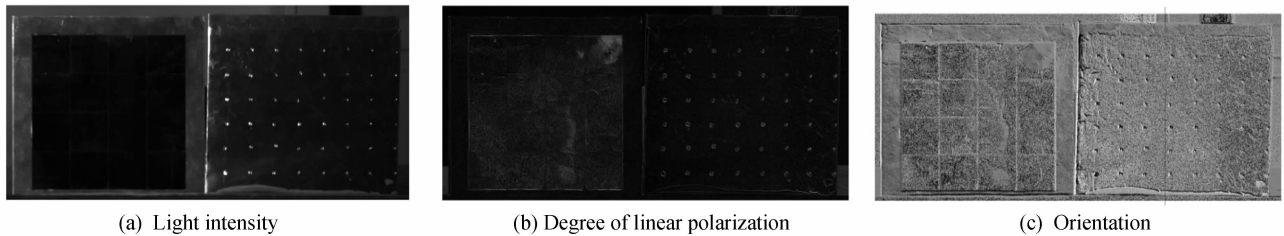


图 5 OSR 和 F46 数据采集结果

Fig. 5 Data acquisition results of OSR and F46

表 1 碳纤维多角度特性测量结果

Table 1 Multi angle characteristic of the carbon fiber

Observing angle/ $^\circ$	S_0	S_1	S_2	Average of D	Variance of D	Average of θ/rad	Variance of θ/rad
0	55.642 2	-9.779 2	0.521 5	0.200 9	3.2×10^{-5}	0.163 3	0.017 5
30	51.662 5	-12.304 6	0.264 8	0.2279	5.9×10^{-5}	0.031 3	0.011 9
45	30.164 0	-6.677 4	0.273 7	0.209 4	8.2×10^{-5}	0.1827	0.002 1
60	36.155 8	-2.507 3	0.626 2	0.234 4	7.1×10^{-5}	0.2607	0.031 1
90	25.644 6	2.286 1	0.165 4	0.286 3	3.0×10^{-4}	0.286 3	0.008 3

表 2 渗碳膜多角度特性测量结果

Table 2 Multi angle characteristic of the carburizing film

Observing angle/(°)	S_0	S_1	S_2	Average of D	Variance of D	Average of θ /rad	Variance of θ /rad
0	29.236 5	-0.798 0	-0.363 7	0.051 7	1.9×10^{-8}	0.067 2	0.004 4
30	25.407 1	-0.758 1	-0.992 0	0.065 6	9.1×10^{-9}	-0.454 2	0.002 7
45	17.528 5	-0.103 1	-0.564 8	0.067 7	2.7×10^{-8}	-0.189 7	0.001 5
60	24.109 6	0.386 9	-0.748 2	0.063 0	2.7×10^{-8}	-0.203 8	0.001 1
90	20.456 8	0.903 5	-0.108 8	0.077 9	1.1×10^{-6}	-0.030 6	9.4×10^{-4}

表 3 OSR 多角度特性测量结果

Table 3 Multi angle characteristic of OSR

Observing angle/(°)	S_0	S_1	S_2	Average of D	Variance of D	Average of θ /rad	Variance of θ /rad
0	13.472 9	0.033 1	-0.229 3	0.104 5	9.2×10^{-6}	-0.061 5	0.016 7
30	15.547 7	0.002 3	-0.178 4	0.073 9	6.7×10^{-7}	-0.008 8	0.008 9
45	12.534 8	0.296 7	-0.076 6	0.085 7	1.0×10^{-6}	0.041 6	0.002 6
60	16.387 5	0.242 2	0.083 9	0.068 2	1.9×10^{-7}	0.095 5	0.003 9
90	18.830 8	1.241 6	0.659 2	0.065 0	3.4×10^{-6}	0.150 0	0.004 9

表 4 F46 多角度特性测量结果

Table 4 Multi angle characteristic of F46

Observing angle/(°)	S_0	S_1	S_2	Average of D	Variance of D	Average of θ /rad	Variance of θ /rad
0	32.590 5	0.007 7	0.373 7	0.051 8	8.0×10^{-7}	0.181 2	0.002 8
30	46.986 5	-0.041 6	0.519 0	0.039 8	8.6×10^{-7}	0.237 6	0.008 2
45	39.288 7	0.406 1	0.3488	0.044 3	8.2×10^{-7}	0.143 2	0.006 8
60	54.381 3	0.358 4	0.6355	0.040 2	6.7×10^{-7}	0.224 0	0.017 2
90	51.315 5	-0.089 1	1.0975	0.060 3	1.0×10^{-6}	0.351 7	0.013 5

3 实验数据对比与分析

由测量数据可以验证,各个目标的线偏振度(DoLP)在 2π 空间内随入射角的变化不大,说明线偏振度这个物理量在整个 2π 空间内相对稳定,故可以通过计算 DoLP 的均值和方差,作为区别不同目标偏振特性的一个标准.其中,DoLP 均值可以反映目标的平均偏振特性,而 DoLP 方差可以用来反映样本 DoLP 的均匀度(较大方差代表均匀度较差).

为了将样本的偏振数据与光谱数据一起进行对比,需要采集 4 个样本的光谱信息.这里使用 ASD 公司的辐射计分别对 4 个样本的可见光谱段的光谱辐射度数据进行了测量.根据得到的 DoLP 均值和方差,结合 4 种样本的图像特征和光谱辐射度曲线,可以对其进行鉴定与区分.

3.1 A 组碳纤维与渗碳膜对比

图 6 中碳纤维和渗碳膜的光谱辐射度曲线特征基本接近,通过其光谱特征仅能反应出两种样本的均由碳材质构成的特征,但无法进一步区分两种样本的信息.

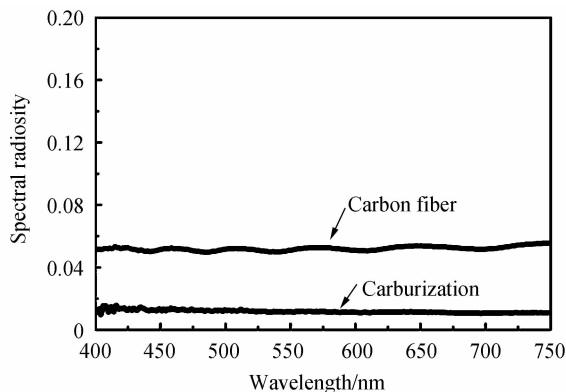


图 6 碳纤维与渗碳膜的光谱辐射度曲线

Fig. 6 Spectral radiosity curve of carbon fiber and carburizing film

图 7 为线偏振度和偏振角的均值曲线,碳纤维的线偏振度均值在 $[0.2, 0.28]$ 之间,渗碳膜的线偏振度均值在 $[0.05, 0.078]$ 之间,说明碳纤维材料的反射光偏振程度明显高于渗碳膜的.图 8 为碳纤维和渗碳膜的线偏振度和偏振角方差曲线,方差表征了样本表面平整度,碳纤维的编织结构造成样本整体 DoLP 非均匀性较大,根据数据统计,碳纤维的线偏振度方差高出渗碳膜 3 个数量级.碳纤维和渗碳膜的偏振角方差除了在 45° 处,在其他角度下存在巨大差异.通过两种材质对比可以看出,碳纤维拥有较高的偏振度特性与更差的表面平整度,而渗碳膜则具有较低的偏振度特性与较好的表面平整度,该信息可以作为偏振区分两种样本的标准.

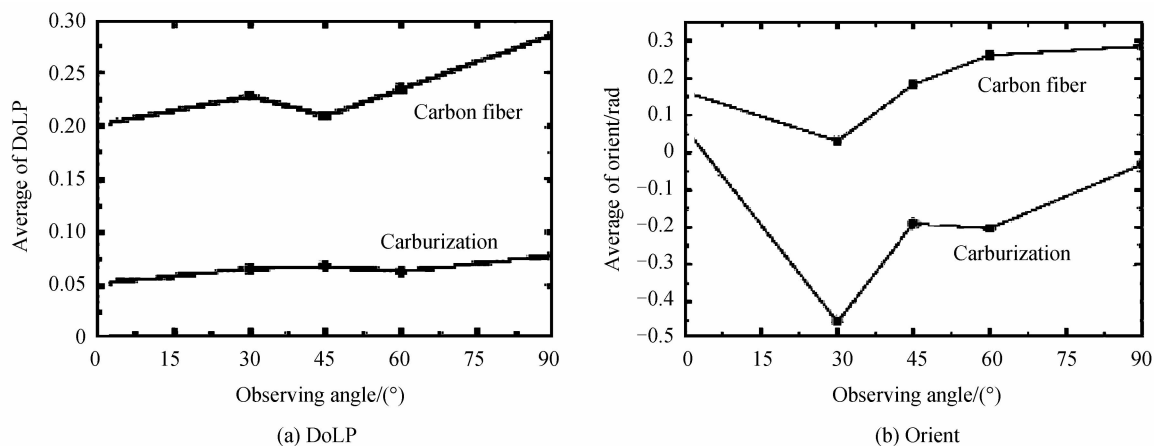


图 7 碳纤维和渗碳膜在多角度下 DoLP 和 Orient 均值

Fig. 7 Average values of DoLP and Orient of carbon fiber and carburizing film at multi angle

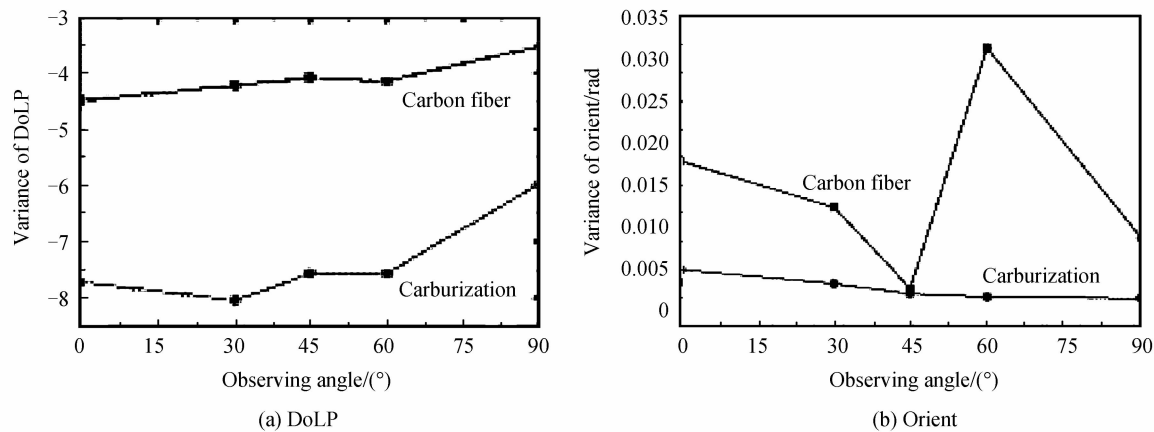


图 8 碳纤维和渗碳膜在多角度下 DoLP 和 Orient 方差

Fig. 8 Variance of DoLP (logarithm) and Orient of carbon fiber and carburizing film at multi angle

3.2 B 组 OSR 与 F46 对比

由图 9 可知, F46 和 OSR 的光谱辐射度曲线有明显的差异,但实际情况中,由于两种材料都具有较高镜面反射程度,其反射的光谱信息依赖入射光的光谱特征,因此其光谱特征通常不能直接反应材料本身的材质特征,但在反射率上进行一定的区分.

如图 10,线偏振度和偏振角的均值曲线存在一定差异,说明 OSR 材质的反射光偏振程度略高于 F46,在大小角度处具有更高的镜面反射,所以线偏振度和偏振角均值曲线的差异可以作为区分样本材料的一个标准.由图 11 可知,线偏振度和偏振角的方差在 0° 和 90° 存在较大差异,并且曲线特征存在较大差异,在大角度等下 OSR 具有更大的方差,即具有更差的平整度.

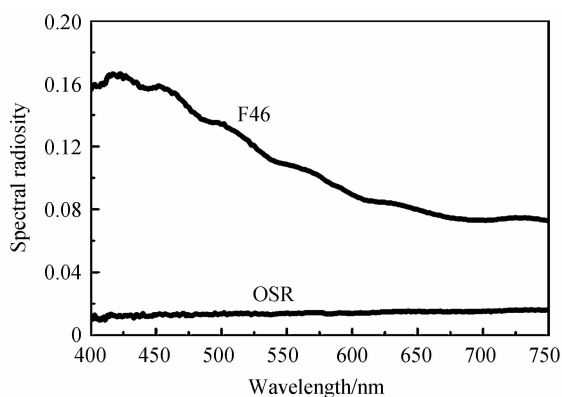


图9 OSR与F46光谱辐射度曲线
Fig. 9 Spectral radiosity curve of OSR and F46

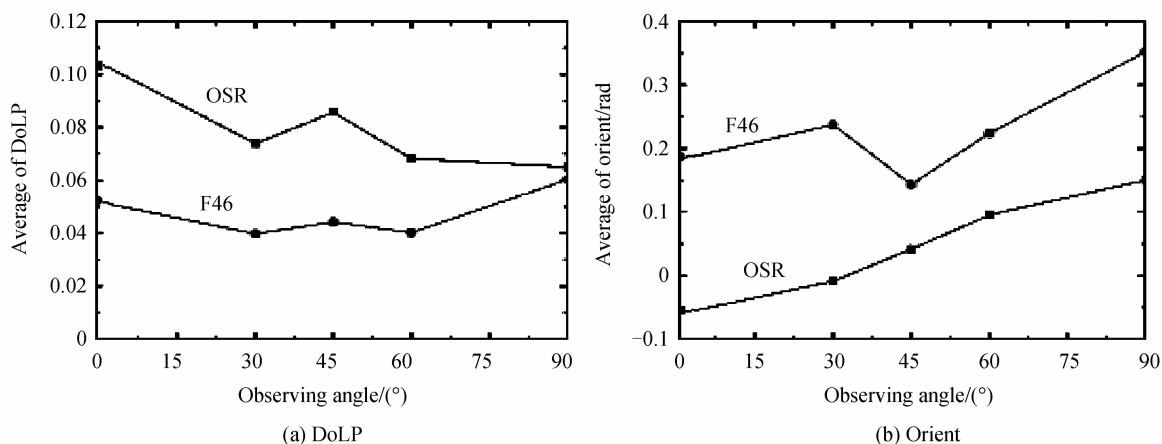


图10 OSR和F46在多角度下DoLP和Orient的均值

Fig. 10 Average values of DoLP and Orient at of carbon fiber and carburizing film multi angle

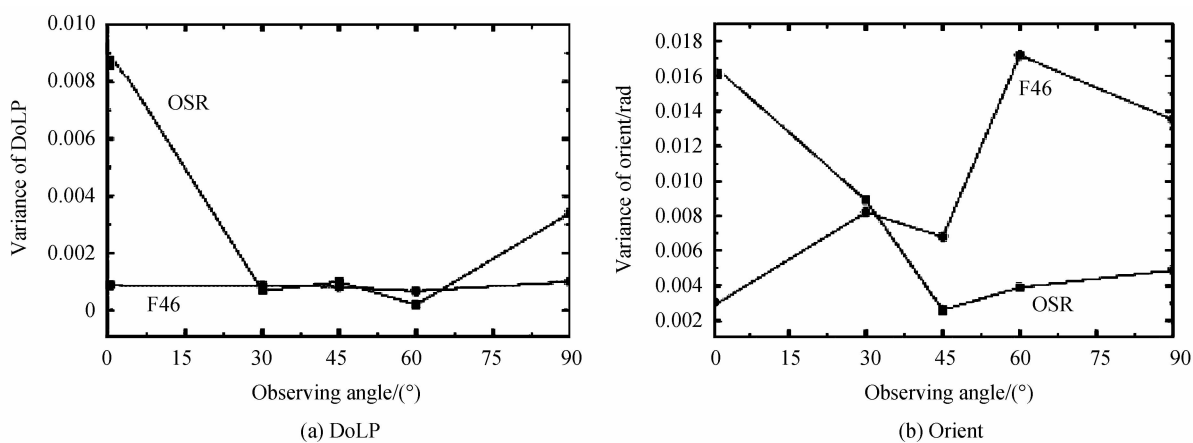


图11 OSR和F46在多角度下DoLP和Orient的方差

Fig. 11 Variance of DoLP and Orient of carbon fiber and carburizing film at multi angle

结合两种样本的光谱特征与偏振特征,在多角度的模拟光源情况下,OSR 具有较低的反射率与较强的偏振特征,而 F46 则具有较强的反射率与较弱的偏振特征.因此,结合光谱反射率特征与偏振特征,在一定程度上可以作为区分两种样本的标准.

4 结论

本文从物体的偏振特性出发,在可见光谱段对碳纤维、OSR(光学太阳反射镜面)、F46、渗碳膜样本共 4 种空间典型目标进行了偏振光学特性理论分析及室外测试试验,根据偏振光谱测量原理,测量了 4 种目标的

光强、光谱辐射度曲线、线偏振度和偏振角,并完成了典型空间目标偏振光学特性建模分析。通过测量分析可知,不同目标具有各自不同的光强、光谱特征、线偏振度和偏振角信息。将目标的图像与偏振信息、光谱特征信息相结合,能够得到更多的目标特征信息,目标样本均值和方差存在着巨大差异。相比传统的单一光谱数据,偏振数据可以有效地辨别“同物异谱”和“同谱异物”的目标。

参考文献

- [1] WANG Hai-yan, YANG Ting-wu, AN YU-ying. The usage of polarity character of underwater laser beam in target image detection[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(1): 9-12.
- [2] WANG Wei-bing, WANG Ting-feng, GUO Jin. Orbit determination for space target based on opto-electrical imaging, tracking and ranging on satellite[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(2): 528-539.
王卫兵,王挺峰,郭劲. 基于星载光电成像跟踪测距的空间目标定轨[J]. *光学精密工程*, 2015, **23**(3): 528-539.
- [3] GOLDSTEIN D H. Polarimetric characterization of federal standard paints[C]. SPIE, 2000, **41133**: 112-123.
- [4] EGAN W G, DUGGIN M J. Optical enhancement of aircraft detection using polarization[C]. International Symposium on Optical Science and Technology, 2000:172-178.
- [5] EGAN W G, DUGGIN M J. Synthesis of optical polarization signatures of military aircraft[C]. International Symposium on Optical Science and Technology. International Society for Optics and Photonics, 2002: 188-194.
- [6] LI J, DING C. Generalized stokes parameters of random electromagnetic vortex beams propagating through atmospheric turbulence[J]. *Applied Physics*, 2011, **103**(1): 245-255.
- [7] ZHAO Yong-qiang, PAN Quan, ZHANG Hong-cai. Method of stokes images calculation based on adaptive unsubsampling lifting scheme [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(8): 1270-1273.
赵永强,潘泉,张洪才. 基于自适应无下采样提升框架的 Stokes 图像获取方法[J]. *光子学报*, 2005, 34(8):1270-1273.
- [8] FAN Qiao-yun, LI Xiao-juan. Selection of optical-system parameters for an all-day used star sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(11): 254-260.
樊巧云,李小娟. 全天时星敏感器光学系统设计参量选择[J]. *光学学报*, 2011, 31(11):254-260.
- [9] KANSERI B, KAMDPAL H C. Experimental determination of electric cross-spectral density matrix and generalized Stokes parameters for a laser beam[J]. *Optics Communications*, 2008, 281(24): 5968-5972.
- [10] YUAN Yan, SUN Cheng-ming, ZHANG Xiu-bao. Measuring and modeling the spectral bidirectional reflection distribution function of space target's surface material[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(3): 2097-2103.
袁艳,孙成明,张修宝. 空间目标表面材料光谱双向反射分布函数测量与建模[J]. *物理学报*, 2010, 59(3):2097-2103.
- [11] LIAO Y B. Polarization optical[M]. Beijing Science Press, 2003: 19-32.
廖延彪. 偏振光学[M]. 北京:科学出版社,2003: 19-32.
- [12] ZHAO Y, ZHANG L, ZHAO D, *et al.* Object separation by polarimetric and spectral imagery fusion[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2009, 113: 855-866.
- [13] WEI Pei-feng, ZHAO Yong-qiang, LIANG Yang, *et al.* Monte Carlo simulations of polarized light transport in multi-layered scattering media[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 38(10): 2634-2639.
卫沛锋,赵永强,梁彦,等. 偏振光在多层散射介质中传输的蒙特卡罗模拟研究[J]. *光子学报*, 2009, 38(10): 2634-2639.