

采用长波红外高光谱偏振技术的目标探测实验

徐文斌, 陈伟力, 李军伟, 王广平, 武敬力

(北京环境特性研究所 光学辐射重点实验室, 北京 100854)

摘要: 偏振探测有利于改善对目标的探测和识别能力, 是当前国内外研究的重要内容之一。介绍了长波红外高光谱偏振测量的原理, 并通过搭建长波红外高光谱偏振测量系统, 开展了对涂漆目标和镀铝目标在不同温度、不同观测角度下的高光谱偏振成像实验, 获取了有效的实验数据并进行处理分析。结果表明: 温度和观测角度对目标的光谱偏振特性有较大影响, 目标表面的红外光谱偏振特性随辐射温度差值及探测角度差值的增大而增大, 并具有波段选择性。利用目标温度和观测角度的差异对目标光谱偏振特性的影响, 可以进行有效的探测与识别, 并为探测器的波段选择提供参考依据。

关键词: 红外; 高光谱; 偏振; 温度; 观测角度

中图分类号: TP72; TP79 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0504005

Experiment of target detection based on long-wave infrared hyperspectral polarization technology

Xu Wenbin, Chen Weili, Li Junwei, Wang Guangping, Wu Jingli

(Science and Technology on Optical Radiation Laboratory, Beijing Institute of Environmental Features, Beijing 100854, China)

Abstract: The technique of polarization detection helps improve the ability of detecting and identifying target, which is currently one of the important contents of the research at home and abroad. The measuring principle of infrared hyperspectral polarization was introduced. The measuring system of long wave infrared hyperspectral polarization was set up. The measuring experiments of polarization characteristic of paint-coating and aluminum-plating target at different temperatures and observing angles were carried out. The effective experimental data was obtained and analysed. The results show that: the spectral polarization characteristic of the target is influenced by temperature and observing angle; the more the difference of temperature and observing angle of the target is, the more the spectral degree of polarization is; the spectral degree of polarization has band selectivity. The effective detection and identification is developed based on the difference of temperature and observing angle of targets. The above results provide reference for band selectivity of the detector.

Key words: infrared; hyperspectral; polarization; temperature; observing angle

收稿日期: 2016-09-05; 修订日期: 2016-10-03

作者简介: 徐文斌(1986-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事红外高光谱与红外偏振测量及定量处理分析方面的研究。

Email: xwb2010@mail.ustc.edu.cn

0 引言

红外成像技术因具有抗干扰性好、作用距离远、穿透能力强、全天候工作等优点,在军事领域得到广泛的应用^[1]。目前,大部分应用都是基于目标与背景的红外辐射强度特征、温度特征、成像特征及运动特征等,实现对目标的探测、识别和跟踪。随着红外突防伪装技术的发展,现有手段难以快速、准确地区分真假目标,急需探索新的技术途径。

红外高光谱成像技术^[2]和红外偏振技术^[3-4]是近年来发展迅速的新型探测技术。红外高光谱成像技术能同时感知目标在空间域和光谱域的信息,构成高光谱图像立方体,从立方体的每个像元均可提取一条连续的光谱曲线,有效实现对目标物化属性的反演。红外偏振技术是利用目标表面辐射或反射的偏振度信息,提高目标与背景的对比度,突出目标的细节特征,有效增强目标识别效果。因此,将红外高光谱成像技术和红外偏振技术相结合,形成红外高光谱偏振成像技术,可以探测精细谱段上的偏振成像特性数据,通过计算和分析得到辐射值差异最大的偏振角度,以及偏振特性差异最大、能量最大的波段,以达到最佳目标识别效果。

目前,利用高光谱偏振技术进行目标探测国内外已有较多研究报道。法国国家航天航空研究中心利用研发的偏振高光谱反射计 Melopee 测量双向反射分布函数和方向半球反射率,可以在可见光至近红外范围(485~2 200 nm)内对土壤、液体和气体进行成像^[5];美国犹他州立大学空间动力学实验室研发的红外超光谱成像偏振计 HIP 工作波段范围为 2.5~3.5 μm,主要用来在 2.7 μm 水波段对来自云顶的反向散射太阳光进行高空间和高光谱分辨率的偏振测量^[6];国内中国科学院安徽光学精密机械研究所利用改装的中波红外(3~5 μm)偏振光谱仪对不同含水量的土壤表面进行了观测,验证了土壤表面的偏振度与土壤含水量存在单调递增关系^[7];东北师范大学利用可见近红外(340~1 100 nm)偏振光谱仪对不同浓度的盐水进行了测量,建立偏振度与液体密度之间的函数关系^[8]。综合来看,国际上的高光谱偏振研究大多集中在可见光至中波红外波段,且大多未同时考虑温度和观测角度的影响,对特征波段选择的研究也未见报道。

文中利用所搭建的长波红外高光谱偏振成像测量系统,获取了涂漆目标和镀铝目标在不同温度、不

同观测角度下的长波红外高光谱偏振成像数据,分析了两种目标光谱偏振特性随温度、观测角度的变化规律,研究结果为两种目标的识别提供了有效的技术途径,初步验证了这一新技术的原理可行性。通过查阅国内外相关文献,利用长波红外高光谱偏振成像技术进行目标探测实验在国内外尚属首次使用。

1 实验原理

长波红外高光谱偏振成像探测的基本原理是被测目标辐射的光波到达可旋转的线栅偏振片,通过偏振片的调制形成四个不同偏振方向的入射辐射,经过迈克尔逊干涉成像系统在焦平面上形成时间序列的干涉图,再对干涉图进行傅里叶变换,得到目标像元的偏振辐射光谱图,利用四个偏振方向的光谱图像进行计算,最终得到目标的光谱偏振度图像,光学成像原理如图 1 所示。详细原理如下。

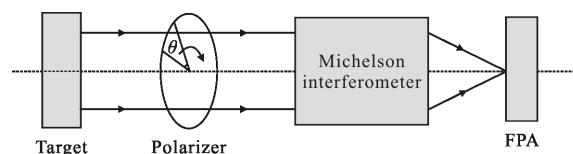


图 1 长波红外高光谱偏振测量光学成像原理图

Fig.1 Optical imaging schematic diagram of long-wave infrared hyperspectral polarization measurement

不同物体或同一物体的不同状态所辐射或反射的光波具有不同的偏振态,量化描述偏振态的方法有多种,通常采用斯托克斯(Stokes)矢量法^[9]来对光波的偏振态进行描述。Stokes 矢量可以表示为 $S=(S_0, S_1, S_2, S_3)^T$, S_0 代表入射光强, S_1 和 S_2 与两个方向的线偏振信息有关, S_3 与左右旋圆偏振信息有关,实际探测中认为圆偏光较小可以忽略不计,即 $S_3 \approx 0$ 。

图 1 中,被测目标发出的光波为部分偏振光,对于长波波段,探测器接收到的目标红外偏振辐射为:

$$S_{\text{surf } \lambda, \lambda+\Delta\lambda}^{\text{total}}(\theta_r, \varphi_r) = \int_{\lambda}^{\lambda+\Delta\lambda} S_{\text{surf}}^e(\theta_r, \varphi_r) d\lambda + \int_{\lambda}^{\lambda+\Delta\lambda} S_{\text{surf}}^r(\theta_r, \varphi_r) d\lambda \quad (1)$$

式中: $S_{\text{surf } \lambda, \lambda+\Delta\lambda}^{\text{total}}$ 为 λ 波段被测目标总的偏振辐射能量; S_{surf}^e 为 λ 波段被测目标自身的红外偏振辐射; S_{surf}^r 为 λ 波段背景经目标的反射红外偏振辐射; θ_r, φ_r 为探测器相对目标的观测天顶角和方位角。由于实验在室内完成,被测目标与光学探测系统间的大气程辐射可以忽略。被测目标自身的红外偏振辐射 S_{surf}^e

可分解为:

$$S_{\text{surf}}^e(\theta_r, \varphi_r) = L_{\text{surf}}^{\text{BB}} \varepsilon_{\text{surf}}(\theta_r, \varphi_r) \quad (2)$$

式中: $\varepsilon_{\text{surf}}(\theta_r, \varphi_r)$ 为被测目标表面材料的发射率, 与观测天顶角和方位角有关; $L_{\text{surf}}^{\text{BB}}$ 为同温度下黑体的辐亮度, 根据普朗克定律有:

$$L_{\text{surf}}^{\text{BB}} = \frac{c_1}{\pi \lambda^5 [\exp(c_2/\lambda T_{\text{surf}}) - 1]} \quad (3)$$

式中: T_{surf} 为被测目标的温度; c_1 、 c_2 分别为第一、第二辐射常数^[10]。由公式(2)、(3)可以看出, 因目标表面的发射率具有空间分布特性, 其再通过与辐射亮度 $L_{\text{surf}}^{\text{BB}}$ 的乘积, 对温度 T_{surf} 起到了调制的作用, 辐射的分布差异性将更丰富。

为了更详细阐述辐射温度对材料表面偏振度的影响, 此处通过基于微面元理论的红外辐射传输模型对目标表面自身辐射的 Stokes 矢量 $S^e(S_{\text{surf}}^e(\theta_r, \varphi_r))$ 进行说明:

根据参考文献[11]可知, 目标表面偏振辐射发射率的表达式为:

$$\varepsilon_{\text{surf}}(\theta_r, \varphi_r) = \left[1 - \int f(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cos(\theta_i) d\Omega_i \right] \cdot \varepsilon_0 = \begin{bmatrix} 1 - \int f_{00}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cos(\theta_i) d\Omega_i \\ - \int f_{10}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cos(\theta_i) d\Omega_i \\ - \int f_{20}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cos(\theta_i) d\Omega_i \\ - \int f_{30}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cos(\theta_i) d\Omega_i \end{bmatrix}$$

$$P_{\text{surf}, \lambda + \Delta\lambda}(\theta_r, \varphi_r) = \frac{\sqrt{(S_{1, \text{surf}, \lambda + \Delta\lambda}^{\text{total}}(\theta_r, \varphi_r))^2 + (S_{2, \text{surf}, \lambda + \Delta\lambda}^{\text{total}}(\theta_r, \varphi_r))^2 + (S_{3, \text{surf}, \lambda + \Delta\lambda}^{\text{total}}(\theta_r, \varphi_r))^2}}{S_{0, \text{surf}, \lambda + \Delta\lambda}^{\text{total}}(\theta_r, \varphi_r)} \quad (5)$$

2 测量系统与过程

2.1 测量系统与定标

文中搭建的长波红外高光谱偏振测量系统由长波红外高光谱成像仪、红外检偏器及数据采集与处理系统三部分组成, 如图 2 所示。长波红外高光谱成像仪采用斯特林制冷焦平面阵列探测器, 像元总数 320×256, 有效工作波段范围为 7.7~11.3 μm, 最高光谱分辨率可达 0.25 cm⁻¹, A/D 量化精度 14 bit。红外检偏器采用材料为 BaF₂ 的金属线栅偏振片, 有效通光口径为 50 mm, 栅网间距为 0.25 μm, 透过率为 86%, 偏振度为 99.6%, 消光比为 300:1, 由旋转支架

$$\begin{bmatrix} 1 - \int f_{00}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cos(\theta_i) d\Omega_i \\ - \int f_{10}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cos(\theta_i) d\Omega_i \\ - \int f_{20}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cos(\theta_i) d\Omega_i \\ - \int f_{30}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cos(\theta_i) d\Omega_i \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: ε_0 为黑体发射率; $f(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda)$ 为 BRDF 函数; θ_i 、 ϕ_i 为入射辐射的天顶角和方位角; Ω_i 、 Ω_r 为入射、反射方向的立体角, 目标表面自身辐射的 Stokes 矢量 S^e 可以表示为: $S^e = \varepsilon_{\text{surf}} \cdot I_{\text{obj}}$, 其中 I_{obj} 为目标的辐射强度。

综合公式(1)~(4)可以看出, 被测目标红外高光光谱偏振辐射不仅与目标温度、表面粗糙度、折射率、波长相关, 还和自身辐射的空间分布、观测角度、传输介质等多种因素相关, 将使目标特征更精细, 差异性更明显。根据目标表面自身辐射的 Stokes 矢量计算表达式可知: 目标表面辐射直接影响目标辐射 Stokes 矢量, 目标辐射温度的差异对目标表面红外偏振度特性会产生影响, 同时观测角度不同也会带来红外偏振特性的差异。

通过测量四个偏振方向的光谱偏振辐射可以计算出 $S_{0, \text{surf}, \lambda + \Delta\lambda}^{\text{total}}(\theta_r, \varphi_r)$ 、 $S_{1, \text{surf}, \lambda + \Delta\lambda}^{\text{total}}(\theta_r, \varphi_r)$ 、 $S_{2, \text{surf}, \lambda + \Delta\lambda}^{\text{total}}(\theta_r, \varphi_r)$ 、 $S_{3, \text{surf}, \lambda + \Delta\lambda}^{\text{total}}(\theta_r, \varphi_r)$, 从而得到高光光谱偏振度 $P_{\text{surf}, \lambda + \Delta\lambda}(\theta_r, \varphi_r)$ 为:

支撑并置于高光光谱成像仪光学镜头前, 光轴与光学镜头的光轴之间形成约 11° 的夹角^[12-13]。数据采集与处理系统采用长波红外高光谱成像仪配套的工控机系统, 不同偏振方向的原始高光光谱图像经过程序处理得到高光光谱偏振度图像。

对于长波红外高光谱偏振测量系统的定标, 考虑探测器在动态范围内的响应函数满足线性关系, 可以采用多点定标法求得定标系数。被测目标入射的辐射能量与光谱仪的响应值之间的关系为:

$$M(\nu, T, \theta) = G(\nu, \theta)L(\nu, T, \theta) + O(\nu, \theta) \quad (6)$$

式中: ν 为波数; T 为黑体温度; θ 为偏振方向角; $L(\nu, T, \theta)$ 为某一偏振方向上的入射辐射亮度; $M(\nu, T, \theta)$ 为光谱仪的响应值; $G(\nu, \theta)$ 和 $O(\nu, \theta)$ 为定标系数。根

据普朗克定律, 可以通过测量多个黑体的辐射进行线性回归, 求得定标系数。通过定标系数计算出被测目标入射辐亮度为:

$$L(v, T, \theta) = \frac{M(v, T, \theta) - O(v, \theta)}{G(v, \theta)} \quad (7)$$

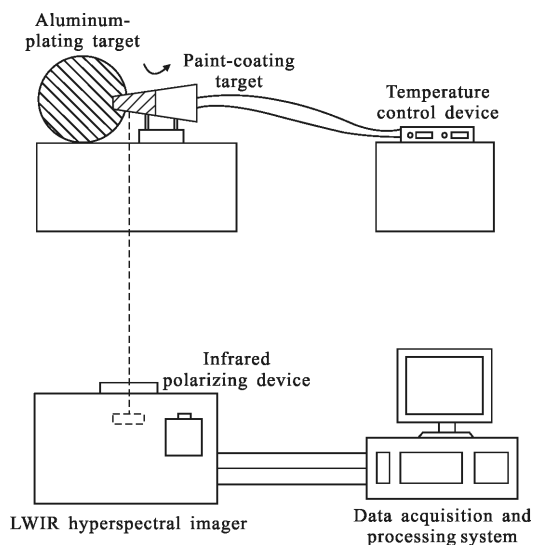


图 2 长波红外高光谱偏振测量系统原理图

Fig.2 Schematic diagram of long-wave infrared hyperspectral polarization measurement system

2.2 测量过程

实验中, 测量对象选用圆锥形涂漆金属目标和球形镀铝目标, 两种目标表面光滑程度相近。

实验选择在暗室进行, 控制室内温湿度, 将涂漆金属目标和镀铝目标放置在光学平台上, 长波高光谱偏振测量系统放置在目标正前方 5 m 处。涂漆金属目标内部带有升温装置, 通过外接电源对其头部区域进行加热, 利用点温仪对温度进行测量, 达到指定温度后, 保证输入功率不变, 即可实现该温度下目标偏振特性的测量, 实验中选择的加热温度分别为 38 °C 和 50 °C。

保证高光谱偏振测量系统位置不变, 在 38 °C 和 50 °C 条件下, 对涂漆金属目标进行逆时针旋转, 旋转角度依次为 0°(图 2 中正对方向)、30、45 和 60°, 同一观测角度下每个偏振方位角进行 3 次测量。图 2 中涂漆金属目标和镀铝目标阴影部分为测量关注区域。

3 结果分析

3.1 高光谱偏振图像的定量处理

文中使用的长波红外高光谱成像仪采用时间调

制型的干涉成像原理, 采集的干涉图需要经过预处理过程才能得到原始灰度图, 预处理过程包括去噪声、去直流、切趾、相位校正和光谱复原等环节^[14]。

获得原始灰度图后, 采用多点定标法处理得到辐亮度图像。实验中, 考虑高光谱成像仪的响应特性和黑体的温度精确性, 选择定标黑体温度为 20、32、44、56 °C, 光谱仪的光谱分辨率设为 8 cm⁻¹, 积分时间设为 70 μs, 待黑体温度稳定后, 采集黑体图像数据, 根据公式(6)进行线性回归得到定标系数。利用定标系数对常温下(26 °C)的目标图像进行定量处理, 得到的涂漆目标和镀铝目标的辐亮度光谱曲线, 如图 3 所示。从图中可以看到, 在相同温度条件下, 两种目标的辐亮度在整个谱段内的差异小于 0.5%, 无法根据辐亮度信息区分两种目标。

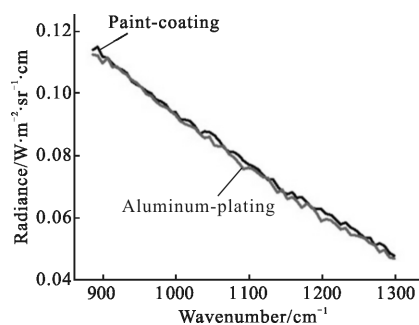


图 3 涂漆目标和镀铝目标辐亮度光谱曲线图

Fig.3 Spectral radiance of paint-coating and aluminum-plating target

3.2 不同温度偏振特性实验

在目标温度为 26 °C、观测角度为 0°的条件下, 对涂漆目标和镀铝目标的光谱偏振特性进行了测量, 对采集的高光谱偏振图像进行定量处理得到高光谱偏振度图, 偏振度光谱曲线如图 4 所示。可以看

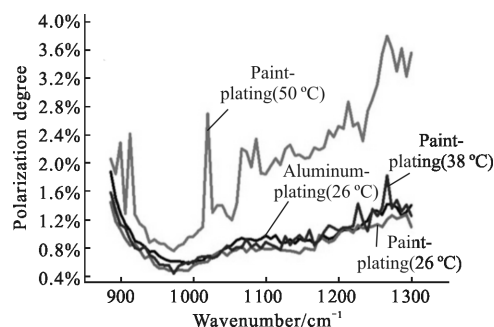


图 4 涂漆目标和镀铝目标不同温度下的偏振度光谱曲线

Fig.4 Spectral degree of polarization of paint-coating and aluminum-plating target at different temperatures

到:相同温度下,涂漆目标和镀铝目标的偏振度光谱曲线谱形特征基本一致,在 885~970 cm⁻¹ 范围内,偏振度随波数增加逐渐减少,在 970~1 300 cm⁻¹ 范围内,偏振度随波数增加逐渐增大;在整个谱段范围内,镀铝目标的偏振度光谱曲线略高于涂漆目标,这是由于镀铝目标表面的光谱发射率略高于涂漆材料^[10],偏振度最大差异不超过 0.2%,利用偏振度信息无法有效识别涂漆目标和镀铝目标。

保持镀铝目标温度不变(26 °C),将涂漆目标头部区域分别加热至 38 °C 和 50 °C,采集高光谱偏振图像定量处理得到高光谱偏振度图像,偏振度光谱曲线如图 4 所示。可以看到:加热后的涂漆目标偏振度光谱曲线与常温偏振度光谱曲线整体趋势上都以 970 cm⁻¹ 为分界点,970 cm⁻¹ 之前,偏振度随波数增加逐渐减少,970 cm⁻¹ 之后,偏振度随波数增加逐渐增加,但加热后的涂漆目标偏振度光谱曲线波动性明显增强,反映在光谱曲线上的尖峰,温度越高,波动越剧烈,尖峰越高,这是由于漆层的光谱发射率因温度变化而发生变化,根据公式(2)~(4),两种因素相互调制,形成不同波段偏振度差异显著的现象。

以涂漆目标 26 °C 光谱偏振度曲线为基准,计算 38 °C、50 °C 光谱偏振度相对 26 °C 的提升量,计算公式见公式(8)。

$$M_{P(\lambda)} = \frac{P_{\lambda}(T_2) - P_{\lambda}(T_1)}{P_{\lambda}(T_1)} \quad (8)$$

式中: $P_{\lambda}(T_1)$ 、 $P_{\lambda}(T_2)$ 分别是温度为 T_1 、 T_2 时目标的光谱偏振度, $M_{P(\lambda)}$ 为光谱偏振度的提升量。 $T_1=26$ °C, T_2 分别取 38 °C、50 °C,结果如图 5 所示,可以看到:涂

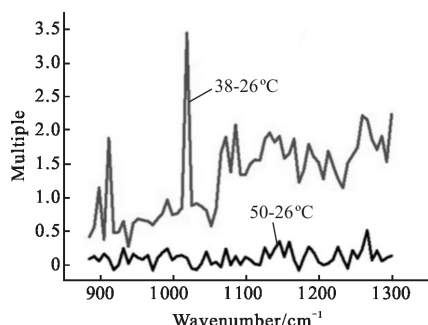


图 5 涂漆目标不同温差偏振度提升量对比曲线

Fig.5 Comparison of degree of polarization increment of paint-coating target at different temperature difference

漆目标由 26 °C 升温到 38 °C 时,光谱偏振度提升量曲线整体上变化比较平缓,1 265 cm⁻¹ 波段处的提升量

最高,提升倍数为 0.51,对应偏振度值差异为 0.6%;涂漆目标由 26 °C 升温到 50 °C 时,光谱偏振度提升量显著增加,并且有着波数越大增幅越大的趋势,在 1 018 cm⁻¹ 波段处的提升量最高,提升倍数为 3.44,对应偏振度值差异为 2.1%。可见,涂漆目标与镀铝目标温差越大,其偏振特性差异越大;光谱偏振度提升量曲线显示出波段选择性,并且温差越大,波段选择性越明显,以 50~26 °C 光谱偏振度提升量曲线为例,912、1 018、1 085 和 1 258 cm⁻¹ 等为可选的特征波段。

3.3 不同观测角度偏振特性实验

涂漆目标头部区域温度分别为 38 °C 和 50 °C 时,在不同观测角度下对涂漆目标进行测量,四个角度测量图像经定量处理得到的偏振度光谱曲线如图 6 所示,给出 50 °C 时部分观测角度的偏振度图像,如图 7 所示。从图 6 可以看出,当温度为 38 °C 时,涂漆目标偏振度光谱整体趋势是随着观测角度的增大而增大,观测角度越大,偏振度光谱曲线的波动性越大,反映在光谱曲线上的尖峰,这是由于漆层的光谱发射率具有方向特性,见公式(1)~(4)。

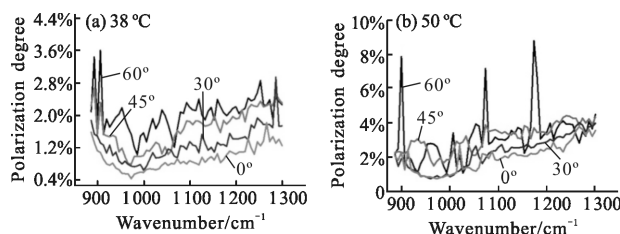


图 6 涂漆目标不同观测角度下的偏振度光谱曲线

Fig.6 Spectral degree of polarization of paint-coating target at different observing angles

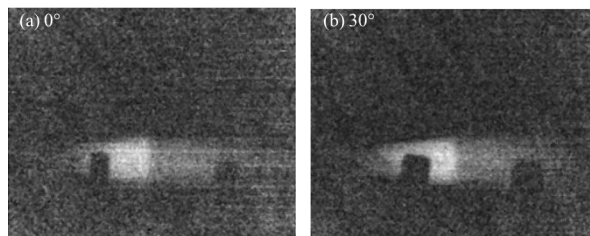


图 7 涂漆目标 50 °C 时不同观测角度下的某一通道偏振度图像

Fig.7 Polarization degree image of 50 °C paint-coating target at different observing angles

以 38 °C 状态下 0° 光谱偏振度曲线为基准,计算 30、45 和 60° 光谱偏振度相对 0° 的提升量,计算公式见公式(9)。

$$M_{P(\lambda)} = \frac{P_{\lambda}(\theta_2) - P_{\lambda}(\theta_1)}{P_{\lambda}(\theta_1)} \quad (9)$$

式中： $P_{\lambda}(\theta_1)$ 、 $P_{\lambda}(\theta_2)$ 分别是观测角度为 θ_1 、 θ_2 时目标的光谱偏振度。 $\theta_1=0^\circ$ ， θ_2 分别取 30° 、 45° 和 60° ，结果见图 8(a)，可以看到：观测角度由 0° 增加到 30° 时，光谱偏振度提升量曲线整体上变化比较平缓， 972 cm^{-1} 波段处的提升量最高，提升倍数为 0.70，对应偏振度值差异为 0.3%；观测角度由 0° 增加到 60° 时，光谱偏振度提升量显著增加，在 952 cm^{-1} 波段处的提升量最高，提升倍数为 2.87，对应偏振度值差异为 1.63%，可见，涂漆目标与镀铝目标观测角度相差越大，其偏振特性差异越大；光谱偏振度提升量曲线显示出波段选择性，并且观测角度相差越大，波段选择性越明显，以 $60^\circ\sim 0^\circ$ 光谱偏振度提升量曲线为例， 905 、 952 、 1038 和 1118 cm^{-1} 等为可选的特征波段。

当温度为 50°C 时，偏振度光谱曲线的波动变化随着观测角度的增大更加剧烈，由于温度和方向性的叠加影响，偏振度光谱变化的规律性没有 38°C 时明显。按上面方法计算得到 30° 、 45° 相对 0° 的光谱偏振度提升量，见图 8(b)，可以看出，观测角度由 0° 增加到 30° 时，光谱偏振度提升量曲线整体上变化比较平缓；观测角度由 0° 增加到 45° 时，光谱偏振度提升量显著增加，在 945 cm^{-1} 波段处的提升量最高，提升倍数为 2.2，对应偏振度值差异为 2.0%， 945 、 1012 、 1092 和 1231 cm^{-1} 等为可选的特征波段。

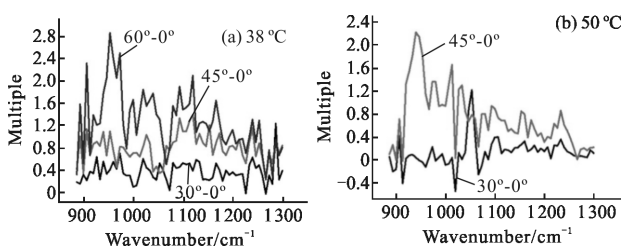


图 8 涂漆目标不同观测角度偏振度提升量对比曲线
Fig.8 Comparison of polarization degree increment of paint-coating target at different observing angles

3.4 测量精度分析

在实验过程中，环境干扰和系统误差都会对测量结果造成影响，采用了一些方法限制相关因素的影响，具体如下：

(1) 对涂漆目标和镀铝目标进行了表面工艺处理，两种目标的表面的光滑程度接近(表面粗糙度

$Ra0.05\ \mu\text{m}$)，减少了粗糙度因素对偏振特性的影响；

(2) 红外检偏器无法同时完成四个偏振方向的测量，对每个偏振方向进行三次测量，采取三次测量求平均的方法以减少误差，提高信噪比；

(3) 由于实验在暗室内进行，对室内温度和湿度进行了控制，测量环境保持稳定，被测目标与光学探测系统间的距离只有 5 m ，大气影响可以忽略；

(4) 长波红外高光谱成像仪焦平面阵列探测器噪声包括暗电流噪声和非均匀噪声。通过采用斯特林制冷方法，制冷温度控制在 75 K ，可有效抑制暗电流噪声影响。非均匀噪声采用多点分段校正法进行处理，可有效去除干涉图像上的亮斑和条纹^[15]；

(5) 在测量前后，对高光谱偏振测量系统都进行了细致的定标，将测量前后定标系数的平均值作为定量处理用的定标系数。

4 结论

文中利用长波红外高光谱偏振成像测量系统获取了涂漆金属目标和镀铝目标在不同温度、不同探测角度下的长波红外高光谱偏振成像数据并进行处理分析，结果表明：

(1) 涂漆目标的光谱偏振特性同时受温度和探测角度的影响，并显示出波段选择性。温度增加使漆层的光谱发射率发生变化，两种因素相互调制，形成偏振分布的波段差异。漆层光谱发射率具有方向性，使得不同探测角度下的偏振特性也存在差异。

(2) 在相同温度(26°C)条件下，两种目标的光谱辐亮度信息几乎相同，光谱偏振度信息也差异较小，最大差异仅为 0.2%，难以有效区分两种目标。随着涂漆目标的升温(38°C 、 50°C)，其光谱偏振度逐渐增大且波动性不断增强，两种目标温差越大，光谱偏振度提升量越大，并显示出波段选择性。当涂漆目标温度为 50°C 时，在 1018 cm^{-1} 波段处的提升量最高，提升倍数为 3.44，对应偏振度值差异为 2.1%。

(3) 在 38°C 和 50°C 温度下，对涂漆目标进行多角度偏振测量，其光谱偏振度随探测角度的增大逐渐增大且波动性不断增强，两种目标探测角度差异越大，光谱偏振度提升量越大，并显示出波段选择性。但温度越高，温度和方向性共同作用，光谱偏振度波动性也更强，导致不同温度下上述规律适用的角度范围不同。 38°C 条件下，观测角度为 60° 时，在

952 cm^{-1} 波段处的提升量最高, 提升倍数为 2.87, 对应偏振度值差异为 1.63%。50 $^{\circ}\text{C}$ 条件下, 观测角度为 45 $^{\circ}$ 时, 在 945 cm^{-1} 波段处的提升量最高, 提升倍数为 2.2, 对应偏振度值差异为 2.0%。

此次实验表明, 在两种目标温度和探测角度存在差异的情况下, 利用红外高光谱偏振成像技术可以进行有效的探测与识别, 初步验证了这一新技术的原理可行性, 也为探测器的波段选择设计提供了参考依据。

参考文献:

- [1] Ni Guoqiang, Qin Qingwang, Xiao Manjun, et al. Development of infrared imaging technology in China [J]. *Science & Technology Review*, 2008, 26(22): 88–93. (in Chinese)
倪国强, 秦庆旺, 肖蔓君, 等. 中国红外成像技术发展的若干思考[J]. 科技导报, 2008, 26(22): 88–93.
- [2] Tong Qingxi, Zhang Bing, Zheng Lanfang. Hyperspectral Remote Sensing[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 1–65. (in Chinese)
童庆禧, 张兵, 郑兰芳. 高光谱遥感 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 1–65.
- [3] Ben-Dor B. Polarization properties of targets and backgrounds in the infrared[C]//SPIE, 1992, 1971: 68–76.
- [4] Yang Wei, Gu Guohua, Chen Qian, et al. Method of target detection for infrared polarization image [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2747–2751. (in Chinese)
杨蔚, 顾国华, 陈钱, 等. 红外偏振图像的目标检测方法 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(8): 2747–2751.
- [5] Ceolato R, Rivière N, Hespel L, et al. Supercontinuum laser-based instrument to measure hyperspectral polarized BRDF [C]//SPIE Security+Defence, 2011: 818913.
- [6] Joss J C, Stair A T. SWIR Measurements of the Polarization of backscattered sunlight from water, ice, and mixed-phase clouds [R]. Burlington: Visidyne Corporation Internal Document, 1997.
- [7] Zhang Qiao, Sun Xiaobing, Hong Jin, et al. Polarization spectral characteristics of soil surface moisture in the mid-wave infrared range [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2013, 32(6): 502–507. (in Chinese)
张乔, 孙晓兵, 洪津, 等. 中波红外土壤含水量的光谱偏振特性[J]. 红外与毫米波学报, 2013, 32(6): 502–507.
- [8] Sun Zhongqiu, Zhao Yunsheng, Yan Guoqian. Inverting the best bands of briny density by using hyperspectral multi-angle and polarization information [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2010, 29(3): 201–205. (in Chinese)
孙仲秋, 赵云升, 阎国倩. 高光谱多角度偏振信息反演盐水密度最佳波段[J]. 红外与毫米波学报, 2010, 29(3): 201–205.
- [9] Born M, Wolf E. Principles of Optics [M]. London: Cambridge University Press, 1999.
- [10] Zhang Jianqi. Infrared Physics[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2013. (in Chinese)
张建奇. 红外物理 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2013.
- [11] Chen Weili, Wang Shuhua, Jin Weiqi, et al. Research of infrared polarization characteristics based on polarization micro-surface theory [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2014, 33(5): 507–514. (in Chinese)
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.
- [12] Forssell G, Hallberg T. Calibrated sensitive polarization measurements methods in the region 3–5 μm and 8–12 μm corrected for contributions to the detector signal from the polarizer[C]//SPIE, 2002, 4481: 257–269.
- [13] Chen Weili, Wang Xia, Jin Weiqi, et al. Experiment of target detection based on medium infrared polarization imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(1): 7–11. (in Chinese)
陈伟力, 王霞, 金伟其, 等. 采用中波红外偏振成像的目标探测实验[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(1): 7–11.
- [14] Zhang Chunmin. Interference Image Spectrum Technology[M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese)
张淳民. 干涉成像光谱技术[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [15] Yang Zhongdong, Li Junwei. Infrared Hyperspectral Imaging Principle and Data Processing[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015. (in Chinese)
杨忠东, 李军伟. 红外高光谱成像原理及数据处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.