

长波红外高光谱偏振特性的伪装目标识别方法

徐文斌, 陈伟力, 李军伟

北京环境特性研究所光学辐射重点实验室, 北京 100854

摘要 光谱偏振探测可以综合获得目标的光谱、强度、偏振态等参数, 有利于改善对目标的探测和识别能力。本文介绍了基于红外高光谱偏振特性的伪装目标识别方法, 搭建了长波红外高光谱偏振测量系统, 开展了对两类伪装目标在不同温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: 两类伪装目标即使涂覆相同的表面涂料, 但受基底材料的热传导率影响, 在相同温度差异下红外偏振特性的提升量明显大于辐射亮度, 并有着温差越大偏振特性提升量差异越大的规律, 同时显示出波段选择性。利用两类伪装目标偏振特性提升量的差异, 有效解决相同温度下伪装目标无法识别的难题。

关键词 偏振; 高光谱; 伪装; 提升量; 识别

中图分类号: TP79; TP72

文献标识码: A

DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)01-0235-06

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、准确的区分真假目标, 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如度, 突出目标的细节特征, 有效增强目标识别效果。因此, 将红外高光谱成像和红外偏振相结合, 形成红外高光谱偏振成像技术, 可以综合获得目标的强度、偏振、光谱和图像等多维特征信息, 更全面、深入地了解目标的属性和行为, 实现复杂条件下的目标探测与识别。

目前, 利用高光谱偏振进行目标探测国内外已有较多研究报告。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]; 国内张养等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]; 孙仲秋等利用可见近红外(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]。在利用长波红外偏振技术进行目标探测方面, Timothy 等研究了军用涂料样品 7.5~12 μm 波段的偏振特性, 结果表明在长波红外偏振度图像中杂散的自然背景可以有效地被抑制掉^[9]; Göran Forssell 等对野外伪装遮盖目标 8~12 μm 的偏振特性进行了测量, 获得了很好的观测效果^[10]; Cooper 等进行了舰船目标和海面背景的成像试验, 结果表明目标与背景水平偏振度的对比在长波红外波段(8~12 μm)远强于中红外波段(3~5 μm)^[11]; 国内汪震等对车辆的长波红外偏振特性进行了实验研究, 结果表明长波红外偏振技术可以提高对伪装目标的识别能力^[12]。综合来看, 国际上的高光谱偏振研究主要集中在可见光至中波红外波段, 将高光谱偏振和长波偏振结合起来进行伪装目标识别的应用研究较少。

目标红外高光谱偏振辐射影响因素较多^[13], 包括目标温度、表面粗糙度、观测角度、传输介质等。本文从目标温度角度出发, 在实验室开展了伪装目标红外高光谱偏振测量方法研究, 利用搭建的长波红外高光谱偏振成像测量系统, 获取了两类伪装目标在三种不同温度下的长波红外高光谱偏

收稿日期: 2016-10-18, 修订日期: 2017-05-25

基金项目: 重点实验室基金项目(9140C610204150C61002)资助

作者简介: 徐文斌, 1986年生, 北京环境特性研究所光学辐射重点实验室工程师

e-mail: xwb2010@mail.ustc.edu.cn

振成像数据, 计算了相同温差下不同伪装目标的光谱偏振度提升量和差异, 研究成果将为伪装目标的有效识别提供了一条新的技术途径。

1 实验原理

基于红外高光谱偏振特性的伪装目标识别方法, 是依据红外高光谱偏振探测的原理, 采用红外高光谱成像仪、检偏器等搭建红外高光谱偏振测量系统, 通过固定在高光谱成像仪光学镜头前检偏器的旋转, 获取伪装目标在不同温度下四

个偏振方向的红外光谱偏振图像。经过定量处理、特征提取得到伪装目标红外光谱偏振度数据, 通过相同温差下不同伪装目标光谱偏振度提升量的比较, 判断伪装目标表面涂层下基底材质的种类, 从而识别出威胁目标。

该方法的基本原理如下:

采用迈克尔逊干涉型红外高光谱成像仪, 结合金属线栅检偏器, 形成红外高光谱偏振测量系统, 成像原理如图 1 所示, 为防止探测器出现冷反射效应, 检偏器光轴与探测器光轴之间需形成约 11° 的夹角^[14]。

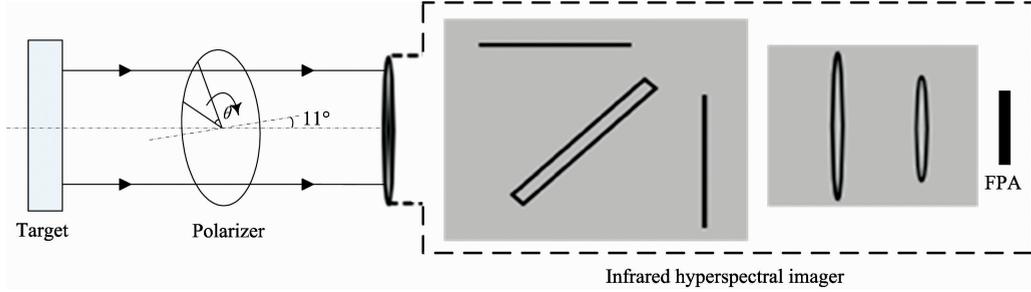


图 1 长波红外高光谱偏振测量系统光学成像原理图

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

测量时, 检偏器偏振片旋转四个偏振方向 $\theta(\theta=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ)$, 高光谱成像仪相应采集伪装目标第 j 通道 ($1 \leq j \leq K$, σ_j 为高光谱成像仪第 j 通道中心波长, K 为高光谱成像仪总通道数) 四个偏振方向的原始强度图像 $g_{\theta,j}$, 共采集 K 个通道。

对原始强度图像进行定量处理前, 采用两点定标法对红外高光谱偏振测量系统进行定标, 获得高光谱成像仪各通道的辐射定标系数。假设高光谱成像仪探测器响应为线性, 高温黑体、低温黑体温度分别为 T_H 和 T_L , 入射光谱辐亮度分别为 $L_{BB,H}(\sigma_j, T_H)$, $L_{BB,L}(\sigma_j, T_L)$, 输出信号分别为 $C_H(\sigma_j)$, $C_L(\sigma_j)$, 辐射增益为 $G(\sigma_j)$, 辐射偏置为 $O(\sigma_j)$, 则有

$$C_H(\sigma_j) = G(\sigma_j)[L_{BB,H}(\sigma_j, T_H) + O(\sigma_j)] \quad (1)$$

$$C_L(\sigma_j) = G(\sigma_j)[L_{BB,L}(\sigma_j, T_L) + O(\sigma_j)] \quad (2)$$

联立式(1)和式(2), 可得

$$G(\sigma_j) = \frac{C_H(\sigma_j) - C_L(\sigma_j)}{L_{BB,H}(\sigma_j, T_H) - L_{BB,L}(\sigma_j, T_L)} \quad (3)$$

$$O(\sigma_j) = \frac{C_L(\sigma_j)L_{BB,H}(\sigma_j, T_H) - C_H(\sigma_j)L_{BB,L}(\sigma_j, T_L)}{C_H(\sigma_j) - C_L(\sigma_j)} \quad (4)$$

利用两点定标法生成的辐射定标系数 $G(\sigma_j)$ 和 $O(\sigma_j)$ 对原始强度图像 $g_{\theta,j}(\theta=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ)$ 进行定量处理, 生成辐亮度光谱偏振图像 $R_{\theta,j}$, 见式(5)

$$R_{\theta,j} = \frac{g_{\theta,j}}{G(\sigma_j)} - O(\sigma_j) \quad (5)$$

偏振度 p (DOLP) 为表征偏振态的重要指标, $p=1$ 表示全偏振光, $0 < p < 1$ 表示部分偏振光, 辐亮度光谱偏振图像第 j 通道的偏振度 p_j 公式如式(6)

$$p_j = \sqrt{\frac{(R_{0,j} - R_{90,j})^2 + (R_{45,j} - R_{135,j})^2}{(R_{0,j} + R_{90,j})^2}} \quad (6)$$

根据式(6)计算生成伪装目标光谱偏振度图像, 选择目标中心区域, 计算得到伪装目标的光谱偏振度 \bar{p}_j 。设伪装目标起始温度为 T_1 、光谱偏振度为 $\bar{p}_j(T_1)$, 利用温控装置对伪装目标进行加热, 加热后温度为 T_2 , 光谱偏振度为 $\bar{p}_j(T_2)$, 则有

$$\bar{p}_j(T_1) = \sqrt{\frac{[R_{0,j}(T_1) - R_{90,j}(T_1)]^2 + [R_{45,j}(T_1) - R_{135,j}(T_1)]^2}{[R_{0,j}(T_1) + R_{90,j}(T_1)]^2}} \quad (7)$$

$$\bar{p}_j(T_2) = \sqrt{\frac{[R_{0,j}(T_2) - R_{90,j}(T_2)]^2 + [R_{45,j}(T_2) - R_{135,j}(T_2)]^2}{[R_{0,j}(T_2) + R_{90,j}(T_2)]^2}} \quad (8)$$

在温差 $\Delta T = T_2 - T_1$ 条件下, 伪装目标第 j 通道偏振度的提升量 $M_{p,j}(\Delta T)$ 为

$$M_{p,j}(\Delta T) = \frac{\bar{p}_j(T_2) - \bar{p}_j(T_1)}{\bar{p}_j(T_1)} \quad (9)$$

设伪装目标 t_1 第 j 通道偏振度的提升量为 $M_{t_1,p,j}(\Delta T)$, 伪装目标 t_2 第 j 通道偏振度的提升量为 $M_{t_2,p,j}(\Delta T)$, $M_{t_1,p,j}(\Delta T) > M_{t_2,p,j}(\Delta T)$, 则伪装目标 t_1 和 t_2 第 j 通道偏振度提升量的差异 $\Delta M_{t_1-t_2,p,j}$ 为

$$\Delta M_{t_1-t_2,p,j} = M_{t_1,p,j}(\Delta T) - M_{t_2,p,j}(\Delta T) \quad (10)$$

当伪装目标 t_1 和 t_2 光谱范围内偏振度提升量的最大差异 $\Delta M_{t_1-t_2,p,\max}(\geq 3)$ 及平均差异 $\Delta M_{t_1-t_2,p,\text{avr}}(\geq 0.5)$ 两个条件同时满足时, 据此可识别真实威胁目标 t_1 , 阈值条件是根据大量试验结果计算得出的, 计算公式如下

$$\Delta M_{t_1-t_2,p,\max} = \max_{1 \leq j \leq K} (\Delta M_{t_1-t_2,p,j}) \quad (11)$$

$$\Delta M_{t_1-t_2,p,\text{avr}} = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K (\Delta M_{t_1-t_2,p,j}) \quad (12)$$

2 实验部分

研究的伪装目标以不锈钢、塑料、玻璃和铝四种材料为基底,可分为两类,一类以不锈钢为代表,另一类以塑料、玻璃和铝为代表。四种伪装目标大小和形状一致,表面涂覆相同厚度(发射率为 0.5)的红外伪装涂层,通过面源黑体辐射进行加热。

伪装目标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、数据采集与处理系统及面源黑体四部分组成,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,有效工作波段范围为 $7.7 \sim 11.3 \mu\text{m}$,像元总数 320×256 ,最高光谱分辨率可达 0.25 cm^{-1} 。红外检偏器采用材料为 BaF_2 的金属线栅偏振片,有效通光口径为 50 mm ,栅网间距为 $0.25 \mu\text{m}$,平均透过率为 86% ,偏振度为 99.6% ,消光比为 $300:1$,由旋转支架支撑并置于高光谱成像仪光学镜头前,其光轴与探测器光轴之间形成约 11° 的夹角。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谱图像经过程序处理得到高光谱偏振度图像。面源黑体温度设置范围为 $30 \sim 200 \text{ }^\circ\text{C}$,辐射面尺寸为 $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$,控制精度可达 $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

实验选择在暗室进行,室内温度为 $30 \text{ }^\circ\text{C}$,四种伪装目标通过支架固定在面源黑体辐射面前,如图 2 所示,伪装目标序号 1 为塑料基底,序号 2 为玻璃基底,序号 3 为铝基底,序号 4 为不锈钢基底。长波光谱偏振测量系统放置在目标正前方 2 米处。通过调节面源黑体温度,对伪装目标进行加热,利用点温仪对温度进行测量,达到指定温度后,采集该温度下伪装目标偏振特性信息,实验中设置的两个加热温度分别为 40 和 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

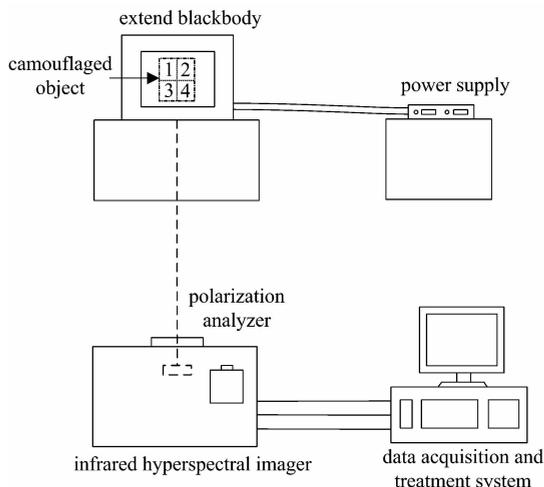


图 2 长波红外高光谱偏振测量系统示意图

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

3 结果与讨论

3.1 定量处理

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^[15]。

采用两点定标法计算高光谱成像仪各通道的辐射定标系数,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 和 $60 \text{ }^\circ\text{C}$,光谱仪的光谱分辨率设为 8 cm^{-1} ,积分时间设为 $70 \mu\text{s}$,待黑体温度稳定后,采集黑体图像数据,根据式(1)一式(4)得到辐射定标系数。利用辐射定标系数对原始灰度图进行定量处理得到辐亮度图像, $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 时四种伪装目标辐亮度图像如图 3 所示。

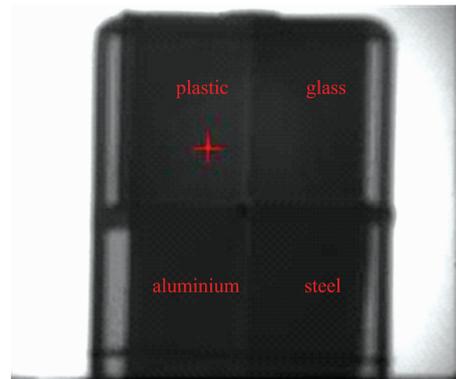


图 3 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 四种伪装目标辐亮度图像

Fig. 3 Radiance images of four camouflaged objects at $50 \text{ }^\circ\text{C}$

根据 $30, 40$ 和 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 下获得的四个偏振方向 ($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$) 的辐亮度图像,利用式(6)计算得到三种温度下四种伪装目标的偏振度光谱曲线,如图 4 所示。从图中可以看到,在相同温度条件下,四种伪装目标的偏振度在整个光谱范围内的差异小于 1% ,无法根据偏振度信息识别两类伪装目标。

3.2 提升量比较

为了能够利用偏振信息进行伪装目标鉴别,需要对图 4 中的数据进一步处理,尝试从偏振度数据提升量的角度找到不同伪装目标的差异特征。采用式(9)对四种伪装目标辐亮度和偏振度提升量进行了计算,图 5 为 $\Delta 10 \text{ K}$ ($40 \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$) 温差下四种伪装目标长波红外辐亮度和偏振度提升量的比较,图 6 为 $\Delta 20 \text{ K}$ ($50 \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$) 温差下辐亮度和偏振度提升量的比较。

从图 5、图 6 可以看出,两类不同基底的伪装目标,在相同温度差异下红外偏振特性的提升量明显大于辐射亮度,这是由于两类伪装目标基底材料热传导率不同所致,同时光谱偏振度显示出波段选择性。对以塑料、玻璃和铝为基底的一类伪装目标光谱偏振度取平均后,根据式(10)一式(12)计算两类伪装目标偏振度提升量的最大差异和平均差异, $\Delta 10 \text{ K}$ 时最大差异为 3.5 ,平均差异为 0.72 , $\Delta 20 \text{ K}$ 时最大差异为

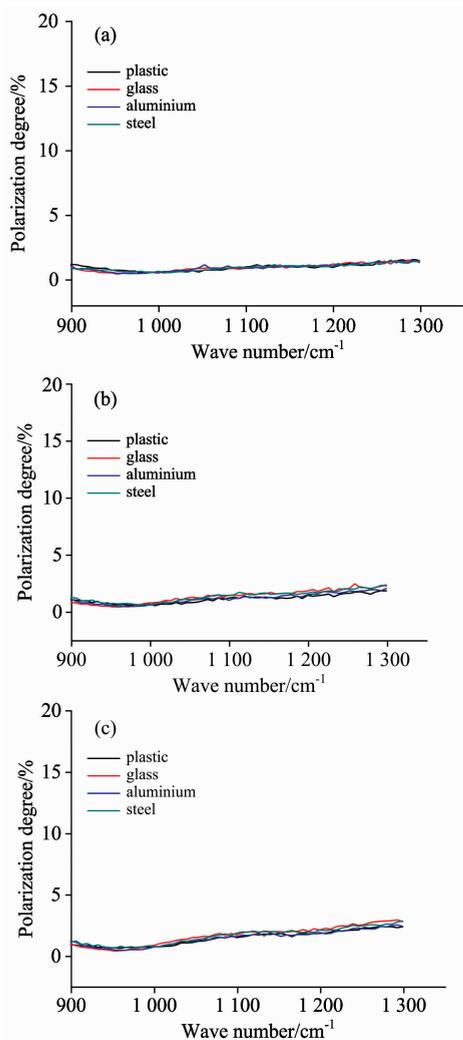


图 4 不同温度下四种伪装目标的光谱偏振度比较

Fig. 4 Comparison of spectral degree of polarization of four camouflaged objects at different temperatures

(a): 30 °C; (b): 40 °C; (c): 50 °C

7.6, 平均差异为 0.84, 可以看到, 两种温差下定量结果都满足伪装目标有效识别的阈值条件。因此, 对于这两类伪装目标, 通过 10 K 的升温操作, 即可利用偏振度信息实现目标识别。进一步推理可知, 在实际应用中, 即使威胁目标与诱饵目标涂覆相同的表面材料, 由于其基底材料不同, 偏振特性将比辐亮度值更具有明显的差异性, 有利于目标识别。

对图 5 与图 6 中的光谱偏振度提升量进行对比, 可以看出, 两类伪装目标温差越大, 光谱偏振度提升量越大, 但以不锈钢为基底的伪装目标提升效果更明显, 波段选择性更强, 与定量计算结果相一致, 当温度差异提升 1 倍, 偏振度最大差异的提升超过 1 倍。因此, 通过不断提升温度差异, 两类伪装目标的差异特征更加显著, 特征波段更加突出, 识别效果也更佳。进一步探索温度提升量与特征波长间的联系, 将为识别探测器波段的设计提供参考依据, 宽谱段和窄波段的综合运用, 对远距离的伪装目标识别具有重要意义。

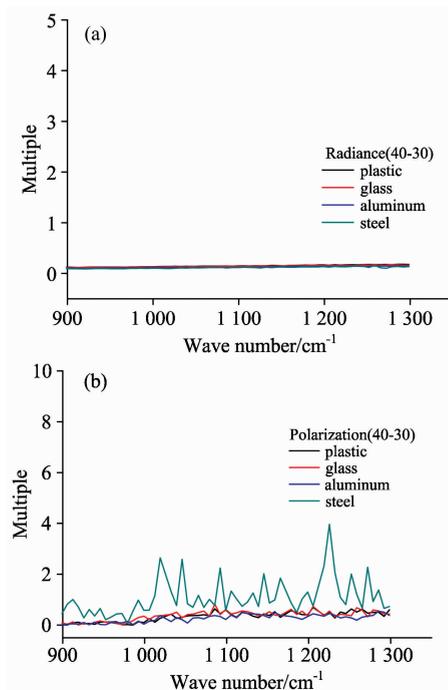


图 5 10 °C (40~30 °C) 温差下四种伪装目标长波红外光谱辐亮度 (a) 和偏振度 (b) 提升量的比较

Fig. 5 Improvement comparison of long wave infrared spectral radiance (a) and degree of polarization (b) of four camouflaged objects at $\Delta 10$ K temperature difference

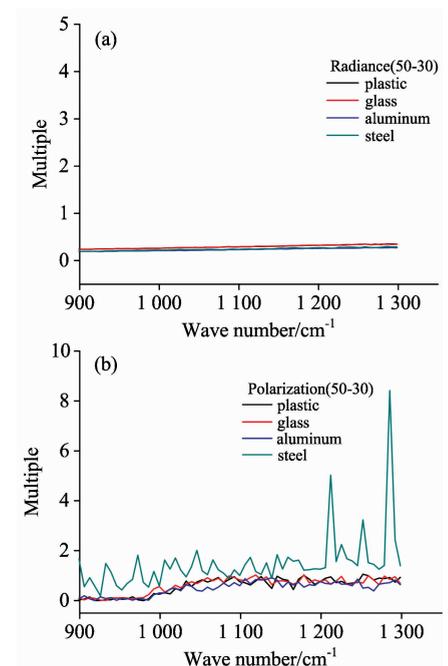


图 6 20 °C (50~30 °C) 温差下四种伪装目标长波红外光谱辐亮度 (a) 和偏振度 (b) 提升量的比较

Fig. 6 Improvement comparison of long wave infrared spectral radiance (a) and degree of polarization (b) of four camouflaged objects at $\Delta 20$ K temperature difference

3.3 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,可以采用如下一些限制方法:

(1)红外检偏器无法同时完成 4 个偏振方向的测量,对每个偏振方向进行 3 次测量,采取 3 次测量求平均的方法以减少误差,提高信噪比;

(2)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,同时测量波段受大气影响较小,因此,环境影响可以忽略;

(3)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。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。非均匀噪声采用多点分段校正法处理,可有效去除干涉图像的亮斑和条纹^[17];

(4)测量前后,对高光谱偏振系统进行细致的定标,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

基于红外高光谱偏振特性的伪装目标识别方法,在实验室条件下,选取两类伪装目标,一类以不锈钢材料为基底,另一类以塑料、玻璃和铝材料为基底,开展了长波红外高光谱偏振成像试验,获取了两类伪装目标在三种不同温度下的长波红外高光谱偏振成像数据,计算了相同温差下不同伪装目标光谱辐亮度和偏振度的提升量和差异,研究结果表明:两类伪装目标即使涂覆相同的表面涂料,但受基底材料的热传导率影响,在相同温度差异下红外偏振特性的提升量明显大于辐射亮度,并显示出波段选择性;随着温度差异的增大,红外偏振特性的提升量差异也不断增大。利用伪装目标偏振特性提升量的差异,为伪装目标的有效识别提供了一条新的技术途径。

References

- [1] NI Guo-qiang, QIN Qing-wang, XIAO Man-jun, et al(倪国强,秦庆旺,肖蔓君,等). Science & Technology Review(科技导报), 2008, 26(22): 88.
- [2] TONG Qing-xi, ZHANG Bing, ZHENG Lan-fang(童庆禧,张兵,郑兰芳). Hyperspectral Remote Sensing(高光谱遥感—原理、技术与应用). Beijing: Higher Education Press(北京:高等教育出版社), 2006. 1.
- [3] Ben-Dor B. Proc. SPIE, 1992, 1971: 68.
- [4] Shaw J A. Proc. SPIE, 2002, 4819: 129.
- [5] Ceolato R, Rivière N, Hespel L, et al. Proc. SPIE, 2011, 8189: 818913.
- [6] Joss J C, Stair A T. SWIR Measurements of the Polarization of Backscattered Sunlight from Water, Ice, and Mixed-Phase Clouds. Burlington, Visidyne Corporation Internal Document, 1997.
- [7] ZHANG Qiao, SUN Xiao-bing, HONG Jin, et al(张荞,孙晓兵,洪津,等). J. Infrared Millim. Waves(红外与毫米波学报), 2013, 32(6): 502.
- [8] SUN Zhong-qiu, ZHAO Yun-sheng, YAN Guo-qian(孙仲秋,赵云升,阎国倩). J. Infrared Millim. Waves(红外与毫米波学报), 2010, 29(3): 201.
- [9] Timothy J. Rogne. Proc. SPIE, 1990, 1317: 242.
- [10] Göran Forssell. Proc. SPIE, 2004, 5432: 63.
- [11] Alfred W. Cooper. Proc. SPIE, 2002, 2826: 85.
- [12] WANG Zheng, QIAO Yan-li, HONG Jing, et al(汪震,乔延利,洪津,等). Optical Technique(光学技术), 2007, 33(2): 196.
- [13] CHEN Wei-li, WANG Shu-hua, JIN Wei-qi, et al(陈伟力,王淑华,金伟其,等). J. Infrared Millim. Waves(红外与毫米波学报), 2014, 33(5): 507.
- [14] Forssell G, Hallberg T. Proc. SPIE, 2002, 4481: 257.
- [15] ZHANG Chun-min(张淳民). Interference Image Spectrum Technology(干涉成像光谱技术). Beijing: Science Press(北京:科学出版社), 2010. 17.

Identification Method of Camouflaged Objects Based on Long-Wave Infrared Hyperspectral Polarization Characteristic

XU Wen-bin, CHEN Wei-li, LI Jun-wei

Science and Technology on Optical Radiation Laboratory, Beijing Institute of Environmental Characteristics, Beijing 100854, China

Abstract Spectral polarization detection can obtain rich target parameters including spectrum, radiant intensity, polarization state and so on, which is beneficial to improving the ability of target detection and identification. Identification method of camouflaged objects based on long wave infrared hyperspectral polarization characteristic was introduced in this paper. The measuring system of long wave infrared hyperspectral polarization was set up. The measuring experiments of polarization characteristic of two types of camouflaged objects at different temperatures were carried out. Effective experimental data were obtained and analyzed. The results showed that: due to the influence of basal material thermal conductivity, the upgrade of spectral degree of polarization of two types of camouflaged objects with the same coating is significantly greater than spectral radiance at the same difference of temperature. As the difference of temperature increases, the upgrade difference of spectral degree of polarization increases. The band selectivity rule is also showed. The identification problem will be effectively solved by use of the upgrade difference of spectral degree of polarization of two types of camouflaged objects.

Keywords Polarization; Hyperspectral; Camouflaged; Upgrade; Identification

(Received Oct. 18, 2016; accepted May 25, 2017)