

简易分时型长波红外偏振成像系统研究

陆高翔, 杨志勇, 宋俊辰

(火箭军工程大学 兵器发射理论与技术国家重点学科实验室, 陕西 西安 710025)

摘要: 为了开展红外偏振成像技术研究工作, 本文设计搭建了一个长波红外偏振成像系统, 实现了目标分时成像。提出了一种改进的基于单像素非均匀性差分图像校正方法去除冷反射, 基于 Sobel 边缘检测方法对图像进行配准, 并对目标场景的偏振特性进行了分析。结果表明, 设计搭建的系统能够获得目标场景的红外偏振信息, 预处理后的图像能够满足实验需要, 经过 Stokes 矢量方法得到的目标场景偏振图像边缘轮廓与细节信息更加丰富。为了进一步衡量实验系统的性能, 对强度图像和偏振度图像进行了融合, 融合后的图像与红外强度图像相比, 图像评估质量得到明显提升, 验证了实验系统的可行性。该技术在未来的复杂环境下提高目标探测效率具有应用价值。

关键词: 红外; 偏振成像; 图像增强

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 1001-8891(2021)08-0723-07

Simple Time-sharing Long Wave Infrared Polarization Imaging System

LU Gaoxiang, YANG Zhiyong, SONG Junchen

(State Key Laboratory of Ordnance Launch Theory and Technology, Rocket Force University of Engineering,
Xi'an 710025, China)

Abstract: To conduct research on infrared polarization imaging technology, this paper designs and builds a long-wave infrared polarization imaging system to achieve target time-sharing imaging. An improved differential image correction method based on single-pixel inhomogeneity was proposed to remove cold reflections; the image was registered using the Sobel edge detection method, and the polarization characteristics of the target scene were analyzed. The results demonstrate that the proposed system can obtain the infrared polarization information of the target scene, and the pre-processed image meets the requirements of the experiment. The edge contour and detailed information obtained by the Stokes vector method for the polarization image of the target scene are more abundant. To further measure the performance of the experimental system, the intensity and polarization degree images were fused. Compared with the infrared intensity image, the fused image has a significantly improved image evaluation quality, which verifies the feasibility of the experimental system. This technology can potentially improve target detection efficiency in complex environments in the future.

Key words: infrared, polarization imaging, image enhancement

0 引言

红外探测可以全天候且不受光照条件影响, 根据热辐射差异来区分目标和背景^[1]。但在一些复杂环境下, 红外图像存在目标与背景对比度较低、成像画面灰暗、信噪比不高、边缘模糊等缺点, 无法达到探测应用要求。偏振成像技术能够根据目标表面材料反射

或辐射的偏振特点, 成像后表征目标的偏振特性, 加强边缘轮廓特征, 在一定程度上能够弥补传统红外成像的不足。同时, 利用偏振信息可以拓展目标信息维度, 丰富被测目标细节信息。为此, 国内外学者开展了不同方向研究。

偏振成像在大气观测、目标检测与分类、医学诊

收稿日期: 2020-10-29; 修订日期: 2020-11-27.

作者简介: 陆高翔 (1996-), 男, 广东人, 硕士研究生, 研究红外偏振探测方向。E-mail: lu894118008@163.com。

通信作者: 杨志勇 (1983-), 男, 河北人, 副教授, 硕士生导师, 研究偏振光军事应用方向。E-mail: yangzhiyong121@126.com。

断、监视和三维目标重建等领域有广泛应用^[2]。2005年,为了提高侦察能力,以色列进行了长波红外偏振成像实验^[3],发现目标(军用卡车和军用帐篷)在复杂背景中偏振红外成像效果比传统红外成像在对比度和信杂比(signal-to-clutter ratio, SCR)指标上有很大提高。中科院安徽光机所^[4]利用三平行光路获取0°, 60°, 120°偏振方向的红外图像实现实时成像,且该系统可以通过步进电机控制偏振片旋转实现不同波段偏振探测,但该方法带来了图像偏移问题。胡冬梅等人^[5]搭建的可见光偏振成像系统在野外实验中发现:偏振 S_0 图像中目标与背景的对比度相对于正常强度图像有较大提高,且能够显示更多细节信息、有效探测低对比度条件下的目标,但其搭建的系统存在光强较弱时成像质量差、探测效果不理想等问题。为了解决分孔径、分振幅偏振成像出现的图像配准问题,杨敬钰^[6]、林威^[7]等人提出了多分辨率分光流算法、分光路图像的相似性度量函数等方法进行图像配准。王军等人^[8]开展了红外偏振成像研究,实验结果表明红外偏振成像获取的图像信息量会更加丰富,为探测识别红外隐身伪装目标提供了可能性。美国武器研究发展与工程中心更是对俄制2S3型自行榴弹炮进行持续7个月不间断的红外偏振探测^[9],获取多达81936幅有效长波红外偏振照片,对不同季节、不同时段、不同天气条件下的目标和背景构建偏振特性曲线,并且进行信息分析工作。

本文搭建了一种长波红外偏振成像系统,提出一种改进的基于单像元非均匀性差分图像校正方法和基于Sobel边缘检测的图像配准方法对图像进行预处理,并对场景目标偏振特性进行分析。实验结果表明,本文搭建的长波红外偏振成像系统能够丰富场景目标边缘轮廓信息和细节信息,一定程度上能够弥补传统红外成像的不足。

1 红外偏振探测机理

光波是横波,其电矢量振动面和传播方向互相垂直,电矢量振动方向相对于传播方向的不对称性为偏振^[10]。根据菲涅尔反射定律,当光线入射到物体光滑表面时会反射产生部分偏振光,且由能量守恒定律和基尔霍夫定律可知,非透明物体能够发出具有偏振特性的热辐射,这为实现红外偏振探测提供了理论依据。

在偏振探测领域,常采用Stokes矢量(S_0, S_1, S_2, S_3)来描述物体反射或辐射光的偏振态。其中, S_0 表示光的强度, S_1 表示水平方向上线偏振光的强度, S_2 表示对角方向上线偏振光的强度, S_3 表示圆偏振光的

强度。偏振镜片旋转至0°、45°、90°、135°方位角时,通过系统获取相对应 I_{0° 、 I_{45° 、 I_{90° 、 I_{135° 图像,在实际应用中圆偏振分量很小,常取 $S_3=0$ 。利用这些信息,可以计算出目标辐射的Stokes参数。

$$S = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{0^\circ} + I_{90^\circ} \\ I_{0^\circ} - I_{90^\circ} \\ I_{45^\circ} - I_{135^\circ} \\ I_{lr} - I_{cr} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: I_{lr} 、 I_{cr} 表示左旋和右旋偏振光。利用Stokes矢量能够计算出目标的偏振度(degree of polarization, DOLP)、偏振角(angle of polarization, AOP)。偏振度是一个介于0和1之间的标量值。根据Stokes参数偏振度、偏振角定义为:

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

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

2 长波红外偏振成像系统

2.1 系统搭建

为了能够稳定获取目标的偏振信息,实验装置采用长波红外成像器,并结合配套软件,自动调焦并且实时成像。长波红外偏振片的消光比为10000:1。系统各技术参数见表1。

表1 长波红外偏振成像系统参数

Table 1 Parameters of long-wave infrared polarization imaging system

Parameter	Value
Camera size/mm	224×179.5×430
Resolution ratio/pixel	640×512
Wavelength coverage/nm	7500-14000
Detection range/m	<8600
Polarizer size/mm	50×50
Extinction ratio	10000:1

通过工作台将成像仪和偏振片固定在同一平面,为保证电动旋转台稳定不动,采用硬质金属底板与螺栓固定。为防止杂光影响成像质量,采用可弯曲调整的相机消光罩。同时为了方便观察不同目标,工作台俯仰调节范围为60°。

2.2 冷反射去除

冷反射现象是热成像系统所特有的一种图像异态^[11]。系统采用的长波红外成像仪为非制冷型热成像仪,当偏振片平行放置于非制冷型红外热像仪光学镜

头前时, 热像仪、红外偏振片及镜筒之间存在较大温差, 从而形成冷反射。偏振图像中视野中央出现白色亮斑, 如图1所示, 严重影响成像质量。



图1 长波红外偏振成像冷反射现象

Fig.1 Cold reflection phenomenon of long wave infrared polarization imaging

去除冷反射效应通常采用非均匀性校正方法或者偏振器件光轴与光学系统光轴形成约 11° 夹角的做法^[12-13]。传统非均匀性校正图像差分方法在冷反射高频部分去除不彻底, 而在低频部分去除过多。如图2所示, 传统方法去除冷反射效果不佳, 仍存在干扰视场的冷反射光圈。本文提出了一种改进的基于单像元非均匀性差分图像校正方法, 去除叠加在红外偏振图像上不可消除的渐晕效应信号。



图2 传统方法去除冷反射效果图

Fig.2 Renderings of traditional method to remove cold reflection

设定初始位置时偏振片为 0° , 在偏振片旋转到 0° 、 45° 、 90° 、 135° 位置分别采集带冷反射的目标场景图像和冷反射基准图像, 用 I_{base} 表示冷反射基准图像, 用 I_{offset} 表示冷反射校正图像。采集含冷反射的目标场景图像 I_0 、 I_{45} 、 I_{90} 、 I_{135} , 保持电动旋转台静止, 用黑色低温挡板遮挡进入偏振片的光线, 同时采集 0° 、 45° 、 90° 、 135° 位置的冷反射基准图像。将冷反射基准图像进行高低频分解, 分别进行单点非均匀性校正。

单点非均匀性校正公式如下:

$$\begin{cases} I_{\text{offset}}^{0^\circ}(i, j) = I_{\text{base}}^{0^\circ}(i, j) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m I_{\text{base}}^{0^\circ}(i, j) / (m \times n) \\ I_{\text{offset}}^{45^\circ}(i, j) = I_{\text{base}}^{45^\circ}(i, j) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m I_{\text{base}}^{45^\circ}(i, j) / (m \times n) \\ I_{\text{offset}}^{90^\circ}(i, j) = I_{\text{base}}^{90^\circ}(i, j) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m I_{\text{base}}^{90^\circ}(i, j) / (m \times n) \\ I_{\text{offset}}^{135^\circ}(i, j) = I_{\text{base}}^{135^\circ}(i, j) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m I_{\text{base}}^{135^\circ}(i, j) / (m \times n) \end{cases} \quad (4)$$

式中: n 、 m 表示探测器行和列像素个数; (i, j) 为成像图像中各位置的坐标。

将带冷反射的目标场景图像进行高低频分解, 然后分别对冷反射校正图像进行差分, 通过重构得到精确的线偏振图像。用 $I_{\text{objective}}$ 表示带冷反射的目标场景图像, I_{amend} 表示目标去除冷反射校正图像。其公式如下:

$$\begin{cases} I_{\text{amend}}^{0^\circ}(i, j) = I_{\text{objective}}^{0^\circ}(i, j) - I_{\text{offset}}^{0^\circ}(i, j) \\ I_{\text{amend}}^{45^\circ}(i, j) = I_{\text{objective}}^{45^\circ}(i, j) - I_{\text{offset}}^{45^\circ}(i, j) \\ I_{\text{amend}}^{90^\circ}(i, j) = I_{\text{objective}}^{90^\circ}(i, j) - I_{\text{offset}}^{90^\circ}(i, j) \\ I_{\text{amend}}^{135^\circ}(i, j) = I_{\text{objective}}^{135^\circ}(i, j) - I_{\text{offset}}^{135^\circ}(i, j) \end{cases} \quad (5)$$

2.3 图像配准

在红外偏振成像系统中, 由于电动旋转台在工作时不可避免产生微小振动, 成像系统平台易发生抖动和偏移, 以及传感器设备等特殊因素的干扰, 造成获取图像时易发生偏移, 给计算偏振信息和图像融合带来不必要的误差。计算场景目标偏振信息需要从一帧图像中提取出与正交偏振方向相对应的两幅图像, 要求提取的两幅图像在像素之间是一一对应关系, 这样它们才能够映射到同一场景。为进一步精确计算偏振图像信息, 对4幅初始偏振图像进行图像配准, 减少计算偏振信息和图像融合时像素偏移误差带来的性能损失。

由于电动旋转台工作造成图像发生刚性变换, 图像间发生物体位置平移, 在配准过程中图像内部的距离和角度保持不变, 图像整体内部形状不会发生变化。根据变换公式有:

$$I(x, y) = I(x + dx, y + dy) \quad (6)$$

式中: dx 、 dy 分别表示为 x 和 y 方向上平移量。

为精确获得 x 、 y 方向上的平移量, 采用 Sobel 边缘检测算法获取边缘方向信息。Sobel 算子根据像素点上下、左右邻点灰度加权差, 在边缘处达到极值这一现象检测边缘, 对噪声具有平滑作用, 提供精确的边缘方向信息。其公式如下:

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -2 & 0 & +2 \\ -1 & 0 & +1 \end{bmatrix} \times A \quad (7)$$

$$G_y = \begin{bmatrix} +1 & +2 & +1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \times A \quad (8)$$

式中： G_x 、 G_y 分别代表经横向及纵向边缘检测的图像灰度值； A 为原始图像。

对特征点进行提取，并根据特征点生成图像的特征向量，建立一个含野值的匹配对。由于变换图像和基准图像只相差数个像素位移，当两者位移差达到设定阈值即可判断为错误匹配点。为提高匹配精度，对匹配点位移差均值化，从而得到精确的位移量。从图3可以看出，目标在两幅图像之间存在位移偏差，利用原始的4幅图像计算场景的偏振状态，会产生比较大的误差。

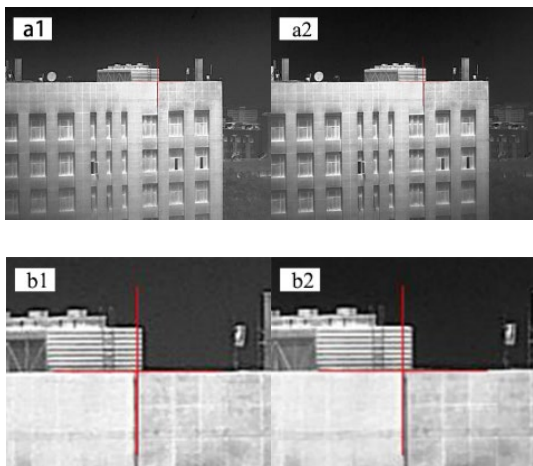


图3 不同偏振方向的红外图像: (a1)、(a2)分别为偏振方向为0°和135°的红外图像; (b1)、(b2)为相对应的细节放大图

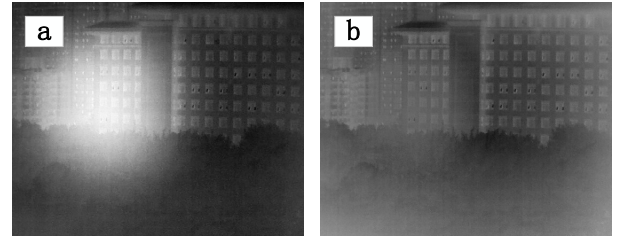
Fig.3 Infrared images of different polarization directions: (a1), (a2) are infrared images with polarization direction of 0° and 135° respectively; (b1) and (b2) are the enlarged images of corresponding details

3 图像预处理检验

3.1 冷反射效应去除检验

为检验本系统在实际应用中去除冷反射的效果，选择在晴朗天气条件对实验室外约300m远的高楼采集红外偏振图像并进行离线处理。图4是经过非均匀性校正后获得的4个偏振方向的室外场景图像，图(a)为红外图像，图(b)为去除冷反射后校正的红外偏振图像。通过对比分析，长波红外偏振成像系统获取的红

外图像出现明显的冷反射现象，视野中央呈现出显著遮挡目标物的白色光斑。从实验结果来看，红外目标场景出现的冷反射光斑几乎消除，说明本文提出改进的基于单像元非均匀性差分图像校正方法可以解决本系统非制冷型热成像器冷反射问题。



(a) 红外图像 (b) 为相对应的冷反射去除效果图
(a) Infrared images (b) The corresponding effect drawing of cold reflection removal

图4 红外偏振冷反射去除效果图

Fig.4 Effect of infrared polarization cold reflection removal

由图5可见，去除冷反射前图像灰度值主要集中在50附近，但受冷反射叠加的影响，存在大量曝光过度的区域。去除冷反射后图像灰度值总体增大，过暗或曝光过度的区域较少。叠加在图像上的冷反射去除后，原先被冷反射遮挡的区域得到还原，灰度值较小区域总体得到增大。分析冷反射去除前后图像灰度值像素个数变化图，可以认为本文系统所产生冷反射经非均匀性校正后效果较好，满足偏振信息分析的需求。

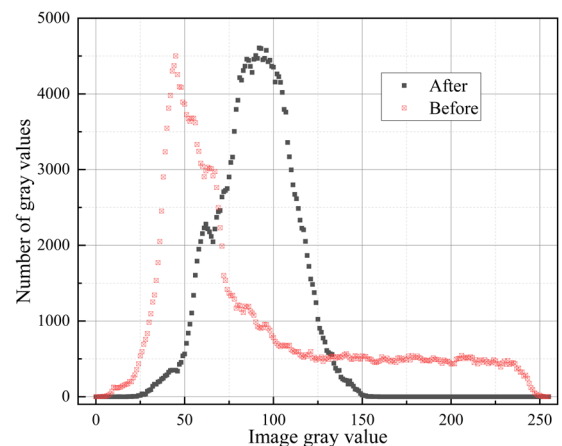


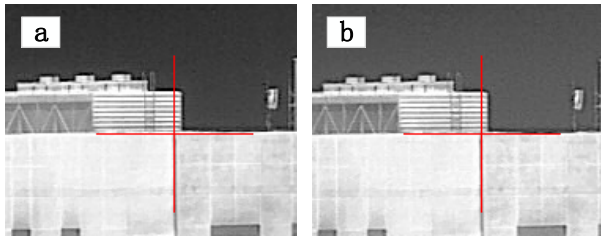
图5 冷反射去除前后灰度值像素个数变化图

Fig.5 Changes of the number of gray pixels before and after cold reflection removal

3.2 图像配准检验

图像配准结果如图6所示。图6(b)是经过基于Sobel边缘算法配准对齐后的结果。由图6可以观察到，Sobel边缘检测算法可以准确地将红外偏振图像对齐，且信息未增添或删减。不同偏振方向的红外图像存储了目标不同方向的信息，由图3可以看出由于

偏振片角度发生变化, 图像中某些位置发生光线变化。红外偏振成像系统将热成像仪固定在实验平台上, 红外偏振片固定在电动旋转台上, 电动旋转台固定在实验平台上, 工作时发出微小振动, 可能造成同一目标不同偏振方向上位置存在偏差, 经过图像配准处理后可以很好地消除振动造成的误差。



(a) 基准图像 (b) 图像配准校正后图像
(a) Baseline image (b) Image registration corrected image

图6 配准效果图

Fig.6 Registration effect diagram

4 实验及结果分析

为了验证所搭建系统的可行性, 在晴朗天气下采集了4幅复杂环境下的长波红外偏振图像, 图像预处理后求解 Stokes 矢量, 并对场景目标偏振特性进行分析, 流程如图7所示。

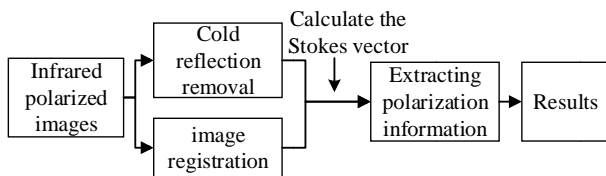
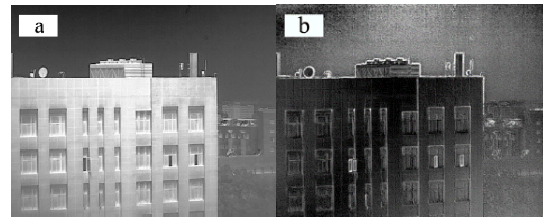


图7 红外偏振信息计算流程图

Fig.7 Flow chart of infrared polarization information calculation

观测目标为实验室外一幢高楼, 背景为晴朗天空和远处民居。利用长波红外成像仪探测场景目标, 通过式(1)计算得到 S_0 图像, 并通过式(2)计算出偏振度 (DOLP)。

由图8(a)可知, 高楼的明暗关系由自身发出红外热辐射强弱决定。大楼表层的反射很强, 天空背景和大楼旁的树木反射较弱, 通过仔细观察发现大楼有3扇窗户呈打开状态; 而在图8(b)红外偏振图像中根据偏振度不同区分目标与背景, 因大楼表层所用材料一致, 虽有微小温度差异, 但偏振度图像能够克服温度差异带来的影响, 发现大楼主体除窗户外用料一样, 且大楼的边缘轮廓特性好, 可以很明显分辨出3扇打开的窗户。

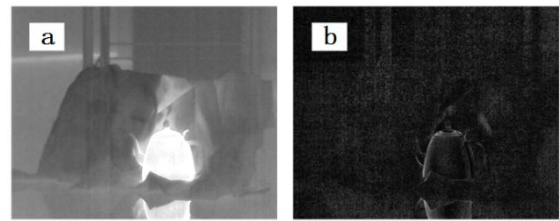


(a) 红外强度图像 (S_0) (b) 偏振度图像
(a) Infrared image (S_0) (b) Polarization image

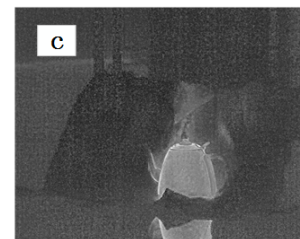
图8 办公楼图像

Fig.8 Office building.

为进一步验证实验系统具有提高目标与背景的对比度和增加目标信息量等特性, 在上衣前放置一个加热到 60° 的热水壶, 目标与成像仪距离 6m, 实验时处于完全黑暗情况。从图9(a)可以看出, 热水壶热辐射较强, 且在地板上形成倒影, 但不能看出明亮处具体细节, 背景与热水壶细节处不清晰; 图9(b)红外偏振度图像中灰度值总体较暗, 但目标与背景区分明显, 且水壶的细节例如手柄与水壶连接处的塑胶清晰可见, 水壶的棱线分明, 较好呈现水壶的大体轮廓。



(a) 红外强度图像 (S_0) (b) 偏振度图像
(a) Infrared image (S_0) (b) Polarization image



(c) 融合图像
(c) Fusion image

图9 水壶偏振特性图

Fig.9 Polarization characteristics of the kettle

红外偏振特性图像和强度图像之间具有信息冗余性和互补性。图9(c)为图9(a)、9(b)采用一种基于最大系数的算法融合而成, 并对目标(水壶)处计算信息熵、标准差和平均梯度。信息熵是一种图像特征的统计形式, 熵值越大, 从一定程度上说明融合图像的信息量越大; 标准偏差反映图像像素值和整体像素均值的差异、体现图像整体的对比度; 平均梯度表征图像相对清晰程度, 梯度值越大说明图像细节信息越

清晰。表2为对图9图像的融合评价结果。

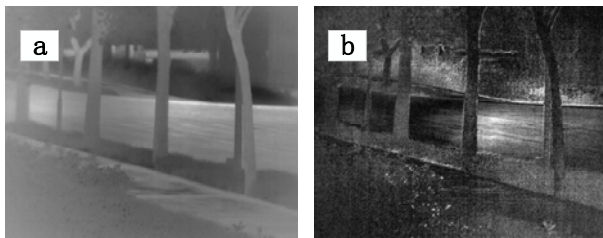
表2 图9图像评估结果

Table 2 Evaluation results of image in Fig.9

	Information entropy	Standard deviation	Average gradient
S_0	5.8460	59.2586	3.0030
DOLP	5.9859	20.4295	7.2133
Fusion	7.0347	35.9071	7.5963
Rate/%	20.3%	-39.4%	152.9%

从图像融合前后可以看出,融合后的图像视觉效果更好,过曝光处边缘信息和轮廓信息也明显被凸显出来。融合后图像的信息熵提高了20.3%,平均梯度提高了152.9%,标准差略有下降,跟偏振度图像标准差较低有较大关系,这表明融合后的图像能提高清晰度,增强目标轮廓特征,丰富细节信息,但由于偏振度图像对比度低,融合后图像灰度值总体较暗。

图10(a)是晴朗天气情况下树林的红外强度图像,图10(a)、(b)分别为偏振度图像和融合图像。从图10(a)~(b)可以看出树木的红外图像和偏振度图像特征互补,在红外图像中树和公路的边缘轮廓不清晰,而在偏振度图像中这一特征得到提升。融合后的图像综合了两幅图像的细节信息,例如树干的形状和纹理特征,整体视觉效果更好。此外,融合图像把公路和植物明显区分开来,层次感更强。



(a) 红外强度图像 (S_0) (b) 偏振度图像
(a) Infrared image(S_0) (b) Polarization image



(c) 融合图像
(c) Fusion image

图10 树林偏振特性图

Fig. 10 Polarization characteristics of trees

从表3可以看出,相对于 S_0 图像,融合图像的信息熵、标准差、平均梯度得到显著提升,其中信息熵

提升了7.7%,标准差提升了41.1%,平均梯度提升了217.1%,这充分说明本实验系统在提升成像质量、复杂环境下获取偏振信息具有可行性。

表3 图10图像评估结果

Table 3 Evaluation results of image in Fig.10

	Information entropy	Standard deviation	Average gradient
S_0	6.6782	23.7797	3.3628
DOLP	7.0173	35.7427	10.7731
Fusion	7.1894	37.7977	10.6651
Rate/%	7.7%	41.1%	217.1%

5 结语

本文搭建的长波红外偏振成像系统,由长波红外成像器、长波红外偏振片、电控旋转台、仪器固定平台组成,提出改进的基于单像元非均匀性差分图像校正方法去除非制冷型热成像器在偏振片形成的冷反射,利用基于Sobel边缘检测的图像配准方法对不同偏振方向的红外图像对齐,最后利用Stokes矢量公式求解红外偏振信息。实验结果表明,本系统可以根据目标场景辐射或反射红外偏振特性的不同,在系统中表征不同的偏振信息,加强边缘轮廓特征,能够对传统红外图像信息不足等缺陷进行补充,融合图像实验证明本文提出的系统具有可行性。

参考文献:

- [1] 刘智嘉,贾鹏,夏寅辉,等. 基于红外与可见光图像融合技术发展与性能评价[J]. 激光与红外, 2019, 49(5): 123-130.
LIU Zhijia, JIA Peng, XIA Yin-hui, et al. Development and performance evaluation of infrared and visible image fusion technology[J]. *Laser and Infrared*, 2019, 49(5): 123-130.
- [2] 赵永强,马位民,李磊磊. 红外偏振成像进展[J]. 飞控与探测, 2019, 2(3): 77-84.
ZHAO Yongqiang, MA Weimin, LI Leilei. Progress in infrared polarization imaging[J]. *Flight Control and Detection*, 2019, 2(3): 77-84.
- [3] Aron Y, Gonau Y. Polarization in the LWIR: a method to improve target acquisition[C]//*Proceedings of SPIE*, 2005: (DOI:10.1117/12.605316).
- [4] 杨之文,高胜钢,王培纲. 几种地物反射光的偏振特性[J]. 光学学报, 2005, 25(2): 241-245.
YANG Zhiwen, GAO Shenggang, WANG Peigang. Polarization characteristics of reflected light of several ground objects[J]. *Journal of Optics*, 2005, 25(2): 241-245.
- [5] 胡冬梅,刘泉,牛国成. 可见光偏振成像系统对低对比度目标的探测[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(6): 61101.
HU Dongmei, LIU Quan, NIU Guocheng. Detection of low contrast

objects by visible light polarization imaging system[J]. *Advances in Laser and Optoelectronics*, 2017, **54**(6): 61101.

[6] 杨敬钰, 徐吉, 李坤, 等. 简易偏振成像系统及应用[J]. *天津大学学报*, 2020, **53**(3): 237-242.
YANG Jingyu, XU Ji, LI Kun, et al. Simple polarization imaging system and its application[J]. *Journal of Tianjin University*, 2020, **53**(3): 237-242.

[7] 林威. 分振幅式偏振探测系统的图像配准研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
LIN Wei. Study on Image Registration of Fractional Amplitude Polarization Detection System[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.

[8] 王军, 高教波, 丁娜, 等. 红外偏振成像对伪装目标的探测识别研究[J]. *应用光学*, 2012, **33**(3): 441-445.
WANG Jun, GAO Jiaobo, DING Na, et al. Detection and identification of camouflaged targets by infrared polarization imaging[J]. *Applied Optics*, 2012, **33**(3): 441-445.

[9] Woolley M, Michalson J, Roamno J. Observations on the polarimetric imagery collection experiment database[C]//*Proc of SPIE*, 2011, **8160**(22): 81600P.

[10] 郭忠义, 汪信洋, 李德奎, 等. 偏振信息传输理论及应用进展[J]. *红外与激光工程*, 2020(6): 16-34.
GUO Zhongyi, WANG Xingyang, LI Dekui, et al. Progress of polarization information transmission theory and application[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020(6):16-34.

[11] 谢洪波, 孟庆斌, 杨磊, 等. 中波红外光学系统无热化设计和冷反射抑制[J]. *应用光学*, 2017, **38**(3): 352-357.
XIE Hongbo, MENG Qingbin, YANG Lei, et al. Heat-free design and cold reflection suppression of medium wave infrared optical system[J]. *Applied Optics*, 2017, **38**(3): 352-357.

[12] 张良. 凝视型红外光学系统中的冷反射现象[J]. *红外与激光工程*, 2006, **35**(S2): 214-216.
ZHANG Liang. Cold reflection in staring infrared optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(S2): 214-216.

[13] 杨敏, 徐文斌, 田禹泽, 等. 面向运动目标探测的分时型红外偏振成像系统[J]. *光学学报*, 2020, **40**(15): 1511001.
YANG Min, XU Wenbin, TIAN Yuze, et al. Time-sharing infrared polarization imaging system for moving target detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, **40**(15): 1511001.

《红外技术》第八届编辑委员会名单

荣誉主编: 褚君浩 姜会林 曾毅 曾桂林

主 编: 苏君红

执行主编: 姚立斌

副 主 编: 刘逸平 唐 剑 李 凯 朱颖峰 陈 钱

蔡毅 何力 金伟其 郑云峰(常务)

编 委 (以姓氏笔画为序)

马文坡 王双保 王 霞 石 峰 卢 进 史衍丽 白廷柱 白 瑜

朱颖峰 刘逸平 麦绿波 苏君红 巫广华 李云红 李 凯 李晓峰

杨 宇 吴一冈 吴晗平 何 力 邹继鑫 汪岳峰 张长泉 张若岚

张建奇 陆 卫 陈 钱 陈效双 陈福胜 金伟其 郑云峰 郑 凯

赵勋杰 赵 俊 胡伟达 施加林 姚立斌 顾国华 凌福日 郭 杰

唐利斌 唐良瑞 唐 剑 姬荣斌 常本康 葛宝臻 蒋亚东 曾 宇

蔡毅 熊 平