

文章编号: 1672-8785(2024)05-0023-05

红外偏振探测器融合成像研究

程 雨 陈彦冠 邢艳蕾 喻松林

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 分析了红外偏振探测器对于探测识别红外伪装目标以及红外暗弱目标的重要应用意义。详细介绍了物体的红外偏振特性及其表示方法, 并阐述了红外偏振特性的影响因素。最后重点介绍了偏振成像融合算法。步骤分为数据预处理、红外偏振融合和融合图像再处理。本文对研究红外偏振探测器融合成像具有重要意义。

关键词: 红外偏振探测器; 融合成像; 红外伪装

中图分类号: TN251 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2024.05.003

Study of Fusion Imaging of Infrared Polarization Detectors

CHENG Yu, CHEN Yan-guan, XING Yan-lei, YU Song-lin

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: The important application significance of infrared polarization detectors for detecting and recognizing infrared camouflage targets and infrared dim targets is analyzed. The infrared polarization characteristics of objects and their representing methods are introduced in detail and the influencing factors of infrared polarization characteristics are expounded. Finally, the polarization fusion imaging algorithm is emphasized, which includes data preprocessing, infrared polarization fusion, and fusion image reprocessing. This article is of great significance for studying the fusion imaging of infrared polarization detectors.

Key words: infrared polarization detector; fusion imaging; infrared camouflage

0 引言

自第二次世界大战首次使用红外探测器以来, 红外探测技术已发展了近一个世纪。目前, 红外探测技术日益成熟, 在军事侦察和民生检测等诸多方面发挥着重要作用。由于红外光识别目标能力强, 且具有全天候工作的优势, 红外探测技术已成为现代化战争中必不可少的组成部分^[1]。

随着红外探测技术在军事领域广泛应用, 红外伪装技术也取得了很大进步, 并给传统红外探测技术带来了很大的挑战。传统红外探测技术本质上是通过识别辐射强度信息进行成像, 搜索目标时需要一定程度的辐射强度差才能有效地实现目标探测。因此, 对于经红外伪装的目标的识别, 比如与背景灰度差异较小的目标的识别、真假目标之间的识别等情形, 传

收稿日期: 2023-08-24

作者简介: 程雨(1989-), 女, 黑龙江大庆人, 硕士, 主要从事红外探测技术研究。

E-mail: chengyu0431@aliyun.com

统红外探测技术很难奏效。在复杂的军事环境下,仅依靠传统红外探测技术难以完成目标探测的军事任务^[2]。

偏振成像是通过采集光波中的偏振信息、计算目标偏振态并最终实现图像显示的新兴成像技术。任何物体在反射或者散射太阳光辐射的过程中,都会产生由其自身性质决定的偏振信息,且辐射强度差对偏振信息影响较小,因此从原理上偏振成像具有识别红外伪装目标的能力^[3]。

红外偏振成像技术可以同时获得辐射强度信息和偏振图像信息,并将两者优势互补,显著增强红外系统的探测能力,对于识别红外伪装目标以及红外暗弱目标具有重要的应用意义。本文从红外偏振特性和常用的表示方法讲起,进一步介绍了偏振特性的影响因素,最后详细阐述了常见的红外特性和偏振特性融合成像的方法。

1 红外偏振成像的原理

1.1 红外偏振特性简介

自然光在传播中如果受到反射、折射等外界作用,它的某一振动方向就会相对于其他方向占优势,进而形成了部分偏振光。部分偏振光可看作是线偏振光和自然光的组合^[4]。线偏振光的强度为处于优势方向的光矢量强度与处于劣势方向的光矢量强度之差。偏振度为线偏振光的强度与总光强的比值 P 。因此,部分偏振光的偏振度介于 0 与 1 之间。 P 越是接近于 1,则说明光的偏振特性越强。

自然物的红外辐射来自于其对环境辐射的反射以及其自身的辐射。周彦卿等人借助菲涅尔反射定律分析,物体反射辐射的偏振特性主要与自然光的入射角和自身折射率相关;借助基尔霍夫辐射理论和普朗克黑体辐射定律说明物体自身辐射的偏振特性与温度及波长等相关^[5]。此外,在自然界的实际条件下,红外偏振光的传输还会受到大气分子、气溶胶、水汽以及空气的自身辐射等因素的叠加影响,最终造成红外偏振特性的衰减。

1.2 偏振特性的表示方法

目前描述红外偏振特性的方法主要有斯托克斯矢量法、琼斯矢量法和穆勒矩阵三种。其中,斯托克斯矢量法的适用性较广,可以表征部分偏振光;琼斯矢量法只能表征完全偏振光^[6]。由于自然界中多为部分偏振光,本文采用斯托克斯矢量法对偏振态进行表征介绍。

斯托克斯矢量有 4 个分量,分别是 S_0 、 S_1 、 S_2 和 S_3 。其中, S_0 表示总偏振光强,为 0° 偏振方向和 90° 方向的光强和; S_1 为这两个方向的光强差; S_2 为 45° 方向和 135° 方向的光强差; S_3 表示圆偏振分量。对于线偏振光,常利用式(1)和式(2)将斯托克斯矢量转变为线偏振度(Degree of Linear Polarization, DoLP)、偏振相角(Orient)等参数。

$$DoLP = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0} \quad (1)$$

$$Orient = \frac{1}{2} \tanh^{-1} \frac{S_2}{S_1} \quad (2)$$

式中, S_3 在仪器检测的范围内一般可忽略不计。遍历红外探测器面阵中的每个像元,可以获得偏振度图像和偏振角图像。在目标识别中,这两种图像技术的应用效果非常明显。由于目标的背景一般没有经过打磨(较粗糙),偏振特性较差。采用偏振度和偏振角去观察,会发现目标与背景的灰度相差较大,因此红外偏振图像显著提高了目标识别能力。

2 红外偏振成像的影响因素

2.1 入射角和折射率对红外偏振成像效果的影响

研究表明,偏振度随入射角 θ 增加的变化曲线可以用二次函数表示,偏振度存在最大值。对于非金属目标来说,最佳的偏振观测角为布儒斯特角 α ,此时偏振度为 1。对于金属目标来说,由于折射率存在消光分量,取得最佳的偏振观测角时,偏振度低于 1。偏振度越高,偏振成像效果越好。

非金属目标的线偏振度在满足相对折射率 $n = \tan \alpha$ 时,取得最大值 1。随着相对折射率

的增大, 布儒斯特角逐渐接近 90° , 即目标的折射率越高, 最佳观测角也越大; 入射角和折射率与偏振度之间是相互关联的。同理可知金属目标的折射率对偏振度的影响^[5]。

2.2 表面粗糙度对红外偏振成像效果的影响

自然界中的物体表面绝大多数介于光滑表面和理想漫反射面之间。因此, 物体的总光强可表示为镜面反射光强和漫反射光强的总和。漫反射不具备偏振性, 物体的偏振特性由镜面反射决定。因此, 物体表面越粗糙, 镜面反射光强越小, 漫反射光强越大, 偏振特性越差; 表面越光滑, 镜面反射光强越大, 偏振现象越明显^[7]。

2.3 波长对红外偏振成像效果的影响

在偏振技术的实际应用中, 最常见的环境条件是太阳光照。太阳表面的温度约为 6000 K, 辐射能量主要集中在可见光波段, 少量在近红外波段和紫外波段。在到达地面的太阳光辐射中, 中波辐射能量远高于长波辐射能量。由普朗克黑体辐射公式可知, 中波的自身辐射能量低于长波的自身辐射能量。但对于常温物体, 反射辐射的强度远高于自身辐射的强度。因此, 随着波长增大, 物体的总辐射量变少, 偏振现象也越弱。

此外, 环境光强对中波红外反射辐射的强度影响较大。环境辐射强度越弱, 目标对外表现出的辐射越小, 能观测到的偏振现象也越弱。

3 红外偏振成像融合算法

偏振度图像和偏振角图像包含了大量的物体信息, 同时也受到诸多因素的影响。因此, 从不同角度分析的偏振图像也就体现了物体在不同方面的特性。利用算法把偏振特性信息与红外辐射强度图像进行有机融合, 则可更全面地描述物体特征, 同时也达到了有效提高红外探测能力的目的。

3.1 红外偏振图像的预处理

由于红外强度图像和偏振信息图像表征的信息差异较大, 在两者融合前, 一般需要对图

像进行预处理。红外强度图像对比度低、强度高、噪点少, 而偏振度图像对比度高、强度低、细节少; 偏振角图像细节丰富、噪点较多。因此, 预处理主要分为滤波去噪和强度匹配^[8]。

滤波去噪的方法有两种: 一种是均值滤波, 另一种是中值滤波。均值滤波是计算出指定区域的像素均值, 将其替代该区域中心位置的像素值。经均值滤波处理后, 图像噪点明显减少, 但易造成细节丢失。中值滤波法是用指定区域的像素中间值替代该区域中心的像素值。与均值滤波相比, 中值滤波法保留了部分图像细节。目前, 研究人员主要采用加权中值滤波法, 突出了中心元素特性, 同时保留了图像细节, 并实现了去除噪点的目的。

强度匹配是为了将红外强度图像和偏振信息图像归一化处理, 使不同类型图像的强度处于同一水平。以像素灰度为 16bit 为例, 红外强度图像的取值范围为 $[0, 65535]$, 偏振度图像的取值范围为 $[0, 1]$, 偏振角图像的取值范围为 $[-\pi/4, \pi/4]$ 。3 幅图像的最大值差别较大, 直接相加会损失偏振图像的细节, 无法实现增强探测能力的目的。一般方式是将 3 幅图像拉伸, 获得相同取值范围的红外强度图像和偏振信息图像, 再进行融合。为了更科学地进行强度匹配, 研究表明, 利用参考图像的均值或者均值和最大值来计算强度匹配系数, 有利于使红外强度图像和偏振信息图像强度接近, 强度匹配效果更佳。

3.2 红外偏振融合

目前存在两类红外强度图像和偏振信息图像的融合途径: 一种是红外强度图像与偏振度或者偏振角的两幅图像融合, 另一种是红外强度图像、偏振度和偏振角的三幅图像融合。

在第一种融合途径中, 可以选取小波变换、拉普拉斯金字塔或者方向拉普拉斯金字塔三种常用分解方法, 以小区域的相邻位置的平均梯度为判断依据, 对红外强度图像和偏振信息图像进行融合。以基于拉普拉斯金字塔的红

外偏振图像融合方法为例,首先运用拉普拉斯金字塔分解方法将红外强度图像和偏振信息图像分解到不同数据层上,再采用不同的融合系数对不同数据层上的图像进行融合;最后通过拉普拉斯金字塔逆变换进行图像重建,将红外强度图像和偏振信息图像的重要特征融合在一起。根据对融合图像的效果和运算速度等的分析,确定最终的融合算法^[1]。

在第二种融合途径中,可以采用常见的基于色彩空间的融合算法。以基于色调、饱和度、亮度(Hue, Saturation, Value, HSV)色彩空间的融合算法为例, H 表示色调,是色彩空间的最重要属性,权重最高; S 表示饱和度,是次要权重; V 表示亮度,权重最低。色彩空间的3个分量权重不同,但又相互独立,使基于HSV色彩空间的融合算法能够有效突出某个图像的特征。为了在红外应用中有效区分红外伪装目标和红外暗弱物体,通常期望获得较大的目标与背景之间的对比度,再期望获得丰富的图像细节和较高的图像强度。根据3幅图像的特点,常常将偏振度图像、偏振角图像和红外强度图像分别对应到色彩空间的 H 、 S 和 V 。基于HSV色彩空间的融合算法还可将权重不同的3个分量自由对应不同的红外信息图像,从而突出不同图像的特征,实现不同的融合效果,有利于增强红外探测能力^[5]。

3.3 融合图像再处理

融合图像再处理是在初步获得的融合图像的基础上,加大各图像间的差异,使图像细节得到放大,进一步加强融合图像的特点。

目前文献中常提到的融合图像评价参数主要有图像灰度范围、灰度梯度、背景与目标的对比度、信息熵等。根据图像评价结果以及实际应用需求,进行融合图像再处理。处理方法主要分为两种:一种是选择单调函数作为系数,调制并拉伸图像信息,再进行图像预处理和融合,获得某些图像更多的细节;另一种是依据融合图像评价参数,调整各图像的融合权重,再利用预设的融合算法进行图像融合,获

得信息量更全面的融合图像。

经过科技发展,国外研究机构已经在偏振探测技术领域取得了重大成果。美国华盛顿大学在可见光探测器芯片上集成了消光参数很高的偏振滤光结构。该探测器的像元规模为 $1k \times 1k$,成像效果很好,是目前阵列规模最大的偏振光栅集成探测器。国内关于偏振探测技术的研究起步较晚,开展相关研究的单位有中国科学院上海技术物理研究所、华北光电技术研究所、昆明物理研究所以及部分大学。其中,中国科学院上海技术物理研究所近年来陆续有时间分割型偏振成像研究和分焦平面偏振同时成像研究的文献报道,但是成像效果受限于器件偏振滤波结构的制造工艺,且偏重研究后期图像处理和图片参数评价。华北光电技术研究所国家重点项目的支持下,研制了中波 640×512 阵列规模的分焦平面偏振探测器,并不断优化器件的偏振滤波结构;滤光结构的消光参数较高,目前尚处于项目进展的中后期,相关研究将在后续论文中加以介绍。

4 结束语

红外偏振探测器融合成像技术是一种获取目标光谱中的红外强度信息和偏振信息融合成像的新型成像技术,是偏振成像技术在红外波段的拓展。在原理上红外偏振融合成像技术具备探测识别红外伪装目标和红外暗弱目标的能力。本文从应用的角度全面阐述了红外强度信息和偏振信息的融合过程,并结合文献总结了优化融合成像效果的方法,对红外偏振探测器融合成像研究及探测识别能力提升具有重要意义。

参考文献

- [1] 岳振. 实时红外偏振融合关键技术研究[D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2015.
- [2] 李京辉. 基于FPGA的红外偏振与光强融合实现技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [3] 赵永强, 潘泉, 张洪才. 自适应多波段偏振图像融合研究[J]. 光子学报, 2007, 36(7): 1356–

- 1359.
- [4] 王晓娟, 赵宝奇, 兰卫华, 等. 中长波红外偏振成像对比试验研究 [J]. 电光与控制, 2014, **21**(6): 35-42.
- [5] 周彦卿. 红外偏振成像的影响因素与融合算法研究 [D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2014.
- [6] 徐参军, 赵劲松, 蔡毅, 等. 红外偏振成像的几种技术方案 [J]. 红外技术, 2009, **31**(5): 262-266.
- [7] 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.
- [8] 柳继勇, 张聘义, 肖仁鑫, 等. 一种偏振红外图像的像素级融合算法 [J]. 红外与激光工程, 2007, **36**(S2): 286-289.