

基于偏振信息融合的背景抑制方法评价

张晓杰^{1,2}, 刘莎^{1,2}, 刘翔^{1,2}

(1.中国航天科技集团有限公司 红外探测技术研发中心,上海 201109; 2.上海航天控制技术研究所,上海 201109)

摘要:与红外强度图像相比,单一的偏振度或偏振角图像在提升图像信杂比方面并无明显优势。为综合利用偏振图像的多维信息进一步提升图像信杂比,在分析典型背景下目标偏振度与偏振角联合分布特性的基础上,以偏振度作为偏振角信息的权值参考,提出了一种基于偏振信息融合的红外图像背景抑制方法,并将其应用于复杂云层或海面背景下的红外目标检测,给出了相应的算法流程。实验结果表明:与红外强度图像相比,所提出的基于偏振信息融合的背景抑制方法能大幅提升图像信杂比。该方法简单有效,易于实现,可应用于基于红外偏振成像的目标探测或精确制导领域。

关键词:偏振成像; 斯托克斯矢量; 偏振信息融合; 背景抑制; 目标检测

中图分类号: TN 911.73

文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2019.01.004

Evaluation of Background Suppression Method Based on Polarization Information Fusion

ZHANG Xiaojie^{1,2}, LIU Sha^{1,2}, LIU Xiang^{1,2}

(1.Research Center of Infrared Detection Technology, China Aerospace Science and Technology Corporation, Shanghai 201109, China; 2.Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: Compared to the infrared intensity image, the single polarization degree or angle image has no obvious advantage in improving image signal-to-clutter ratio. To further improve image signal-to-clutter ratio by use of multidimensional information of the polarized image, the joint distribution of polarization degree and polarization angle in the typical background is analyzed first. Then, by taking polarization degree as the weight of the polarization angle, a background suppression method based on polarization information fusion is proposed. The background suppression method can be used for infrared target detection in the complex background of clouds or sea surfaces. The corresponding algorithm flow is given. The experimental results show that compared to the infrared intensity image, the signal-to-clutter ratio of the image obtained by the proposed method is improved significantly. This method is simple, effective and easy to implement. It can be applied to the field of target detection or precision guidance.

Keywords: polarization imaging; Stokes vector; polarization information fusion; background suppression; target detection

0 引言

实现复杂环境下的背景抑制是红外目标检测的关键步骤与难点之一,国内外学者对此进行了广泛研究^[1-2]。对空中或海面红外目标图像而言,由于目标及其周围环境存在热交换,加之空气对热辐射的散射和吸收作用,目标信号受自然背景(如云层、海浪)的干扰较大,因此在红外图像中,目标和背景的

对比度较差,且目标边缘模糊,这给红外目标的检测带来了较大困难。

近年来,作为一种新型探测技术,红外偏振成像技术在目标探测与识别领域得到越来越多的关注^[3-5]。不同于红外强度信息,偏振信息作为目标的一种本征信息,由目标自身的物理特性所决定。研究表明:相比于自然背景,人造目标通常具有更强的

偏振特性,在某些特定场景下,通过红外偏振成像有望获得更高对比度的图像^[6-9]。实际应用中,通过计算目标的 Stokes 矢量,可进一步得出目标的偏振度和偏振角信息。偏振度和偏振角两者共同构成了对目标偏振特性的完整描述。

然而,与红外强度图像相比,单一的偏振度或偏振角图像在提升图像信杂比方面并无明显优势,这不利于复杂背景下红外目标检测的实现。在红外偏振信息处理方面,文献[10-11]通过对多幅偏振参量图像进行融合或伪彩色再现,虽在一定程度上增加了图像的信息量,增强了图像的视觉效果,但无法达到抑制图像背景噪声的目的。因此,本文针对复杂海空背景下的红外偏振图像,提出一种综合利用偏振度和偏振角信息来最大化目标与背景差异的方法,以期达到抑制背景、提升图像信杂比的目的。

1 目标偏振成像原理

1.1 偏振信息表征

由菲涅尔反射定律可知,光从光滑介质表面反射会产生偏振效应。因此,目标辐射除携带强度信息外,还携带与目标特性(如材料介电常数、表面粗糙度、含水量)相关的偏振信息,同时,大气散射会改变环境和目标的偏振特性。根据基尔霍夫辐射定律,热辐射也表现出偏振效应。红外偏振信息可对目标在像素级、特征级进行更细腻的刻画与表述。

偏振态可采用 Stokes 矢量来描述。Stokes 矢量是用于描述非相干光偏振状态的四元素向量,包含4个参量,分别用 I, Q, U, V 来表示,对于确定量的入射的非相干辐射,有

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

式中: I 为成像系统接收的总辐射强度; Q 为水平和垂直偏振方向辐射强度之差; U 为对角线方向辐射强度之差; V 为左、右旋圆偏振光强度之差。Stokes 矢量的4个参量均是光强的时间平均值,具有强度的量纲,可直接被探测器探测。

实际应用中,圆偏振分量通常很小,相对于仪器误差而言可忽略不计。因此,通常假定 $V=0$ 。

偏振态可用线偏振度 D 和偏振角 A 这2个参

数来表征,即

$$D = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \quad (2)$$

$$A = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{U}{Q}\right) \quad (3)$$

式中: D 是范围为 $[0, 1]$ 的无量纲数, $D=0$ 表示非偏振光, $D=1$ 表示完全偏振光,其他情况为部分偏振光; A 为入射光的偏振方向相对于参考方向的夹角,对于部分偏振光,则是能量最大的偏振方向与参考方向的夹角。

1.2 偏振成像信息解算

用 Mueller 矩阵 $\mathbf{M}$ 来描述光波偏振态的传输特性。对于任意线性光学系统,假设其入射光的 Stokes 矢量为 $\mathbf{S}_{\text{in}}$,出射光的 Stokes 矢量为 $\mathbf{S}_{\text{out}}$,当光束通过该线性系统后,该线性系统对光的作用可以一个 4×4 的 Mueller 矩阵表示,即

$$\mathbf{S}_{\text{out}} = \begin{bmatrix} S'_0 \\ S'_1 \\ S'_2 \\ S'_3 \end{bmatrix} = \mathbf{M} \times \mathbf{S}_{\text{in}} = \begin{bmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} & m_{03} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{30} & m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

与参考方向成 α 角的理想线偏振片的 Mueller 矩阵可表示为

$$\mathbf{M}_p = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\alpha & \sin 2\alpha & 0 \\ \cos 2\alpha & \cos^2 2\alpha & \sin 2\alpha \cos 2\alpha & 0 \\ \sin 2\alpha & \sin 2\alpha \cos 2\alpha & \sin^2 2\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

则出射光强是 α 的函数,用 I, Q, U 可表示为

$$I(\alpha) = \frac{1}{2}(I + Q \cos 2\alpha + U \sin 2\alpha) \quad (6)$$

因此,通过多次改变线偏振片的角度 α ,构建多元方程,即可反解得到 Stokes 矢量参数,将其进一步代入式(2),(3),可得到目标场景的偏振度和偏振角信息。

2 偏振信息融合的背景抑制

2.1 偏振度和偏振角联合特性分析

完全偏振光的偏振度为1,而自然界中的光通常是部分偏振光,可被看作自然光和线偏振光的混合,表现为椭圆偏振光。此时,偏振度的值介于 $0 \sim 1$,偏

振角 α 则表示能量最大的偏振方向与参考方向的夹角。实际场景中偏振度和偏振角信息分别代表偏振程度的大小和方向,两者共同描述了目标的完整偏振特性,如图 1 所示。图中: a 表示偏振椭圆中偏振能量最大的方向; b 表示偏振椭圆中偏振能量最小的方向。

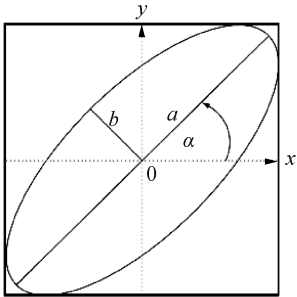


图 1 椭圆偏振光示意

Fig. 1 Schematic diagram of elliptically polarized light

通常认为人造目标与自然背景的偏振特性存在一定差异,偏振度和偏振角参数可用于表征目标和背景的状态特性。以典型天空背景下的无人机目标为例,其红外强度图像、偏振度图像与偏振角图像如图 2 所示。由图可见:相比于红外强度图像,偏振度图像与偏振角图像中的云背景噪声得到了更好的抑制,图像信杂比均有一定提升,但背景噪声的影响仍难以忽略。

对红外目标检测而言,如何有效地融合偏振度和偏振角信息,进一步提升图像信杂比,是后续目标提取与分割的关键。现有偏振信息处理方法直接在像素级对偏振图像与强度图像进行融合或伪彩色再现,在一定程度上提升了图像的视觉效果,但由于未考虑偏振度和偏振角信息的内在联系,融合后的图像难以获得满意的信杂比提升效果。

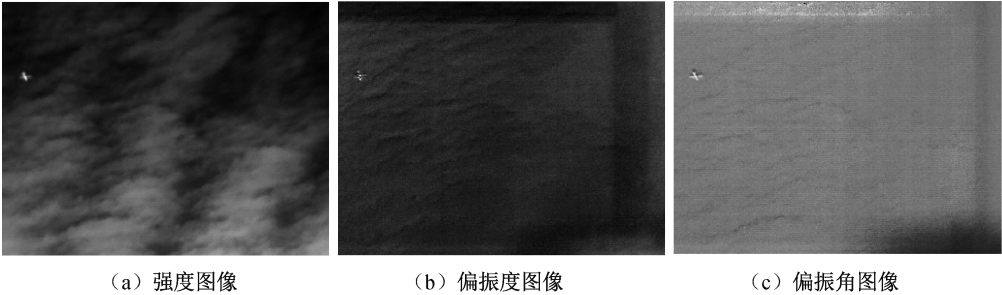


图 2 天空背景下无人机红外偏振图像

Fig. 2 Infrared polarization image of UAV against sky background

将图 2 中图像各像素点的偏振度和偏振角信息在极坐标系中同时表示出来,各点的分布情况如图 3 所示。图中:极坐标系的半径代表偏振度;方向代表偏振角。其中:绿色区域积聚了大量的背景像素,其偏振度约在 $0\sim0.035$;目标点的分布相对孤立,其偏振度约在 $0.02\sim0.07$;目标与背景的偏振角覆盖范围较广,在 $-300^{\circ}\sim60^{\circ}$ 。单一的偏振度或偏振角图像中,目标与背景仍存在一定的数值重合区域,这给目标检测过程中目标与背景的分类带来困难。因此,需基于偏振度与偏振角的联合分布特征,寻找合适的特征提取方法,进一步扩大目标与背景的差异,抑制图像中复杂环境背景的影响,达到增强图像信杂比的目的。

2.2 偏振信息融合背景抑制方法

考虑目标偏振度和偏振角信息的联合分布特

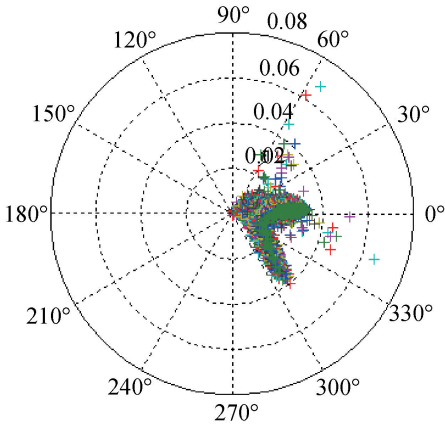


图 3 偏振度与偏振角的极坐标系联合分布

Fig. 3 Joint distribution of polarization degree and angels in polar coordinate system

征,提出如下基于偏振信息融合的背景抑制方法,即

$$I_H = I_D \times (I_A - u_A) \times (I_A - u_A) \quad (7)$$

式中: I_H 为偏振度和偏振角合成之后的图像; I_D 为偏振度图像; I_A 为偏振角图像; u_A 为偏振角图像的均值。

研究结果表明: 偏振角参数图像能较好地描述物体不同的表面取向, 是一种能较好地从自然背景中凸现人工目标特征的表征手段。对海空背景红外偏振图像而言, 因其背景较为单一, 为大面积的云层或海水, 故其偏振特性的分布相对均匀。为更好地抑制目标图像中的背景杂波信号, 可以均值 u_A 作为背景偏振角信息的估计值, 用偏振角减去其均值。由于相减所得残量图像中可能存在负值, 因此将其平方后取其幅度信息。

此外, 实际物体的偏振特性影响因素复杂, 通常为部分偏振。偏振度是一个介于 0~1 的无量纲数, 用于反映部分偏振光的偏振程度, 偏振角则表示部分偏振光中能量最大的偏振方向与参考方向的夹角。当物体的偏振度过小时, 偏振椭圆接近于圆, 此时偏振角的意义并不大, 也即在表征物体偏振特性的差异时, 偏振度越大, 偏振角的物理意义越明显。因此, 式(7)中将偏振度作为偏振角信息的加权系数, 可进一步抑制背景的干扰。

3 基于红外偏振成像的目标检测算法

基于以上分析, 将偏振度和偏振角信息相结合, 进一步给出如下基于红外偏振信息融合的目标检测算法步骤。

1) 空间配准。针对获取的多角度偏振图像, 以 $0^\circ, 60^\circ, 120^\circ$ 为例, 完成基于互信息的空间配准。

将图像 A 和 B 的互信息 F_{AB} 定义为

$$F_{AB} = \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} p_{AB}(i, j) \ln \frac{p_{AB}(i, j)}{p_A(i) p_B(j)} \quad (8)$$

式中: p_A, p_B 分别为图像 A 和 B 的灰度直方图; $p_{AB}(i, j)$ 为图像 A 和 B 的联合灰度直方图; L 为图像的灰度等级。

根据图像互信息的定义计算 3 幅多角度偏振图像两两之间的区域互信息, 调整变换参数, 使互信息最大, 即得到配准参数, 再根据配准参数校正待配准图像。

2) 偏振信息解算。按式(9)计算目标场景的 Stokes 参量 I, Q, U , 将结果进一步代入式(2), (3), 得到偏振度图像和偏振角图像。

$$\begin{cases} I = \frac{2}{3} [I(0^\circ) + I(60^\circ) + I(120^\circ)] \\ Q = \frac{2}{3} [2 \times I(0^\circ) - I(60^\circ) - I(120^\circ)] \\ U = \frac{2}{\sqrt{3}} [I(60^\circ) - I(120^\circ)] \end{cases} \quad (9)$$

3) 针对偏振度图像与偏振角图像, 进行基于偏振信息合成的背景抑制。背景抑制后的图像由式(7)计算得出。

4) 进行图像阈值分割, 完成目标提取。

4 实验结果与分析

为验证所提出的基于偏振信息融合的背景抑制方法的有效性, 针对大量海面与天空背景下的典型目标进行实验。天空和海面背景下无人机与船只图像的算法分析结果如图 4~7 所示。由图可见: 单一的偏振度或偏振角图像的背景抑制效果随场景的变换而有所不同, 而偏振信息融合结果则相对稳定, 取得了较好的背景抑制效果。图 4 和图 5 分别对应空中无人机由近及远所成的 2 组图像。红外强度图像中, 天空云层背景噪声较强。利用所提出的偏振信息融合方法, 在综合考虑目标与背景的偏振度与偏振角信息后, 偏振信息融合图像中的云层背景得到大幅抑制。图 6 和图 7 分别对应海面船只由近及远所成的 2 组图像。红外强度图像中, 目标船只与海面背景的灰度差异不大, 边缘相对模糊。经偏振信息融合处理后, 海面背景分量得到很好的抑制, 目标船只得到凸显, 边缘清晰, 图像整体对比度得到大幅提升。

为进一步定量分析本文方法的有效性, 选用信杂比(R_{SN})和信杂比增益(G_{SNR})作为评价依据, 其定义分别为

$$\begin{cases} R_{SN} = (G_t - G_b) / \sigma_b \\ G_{SNR} = R_{SNO} / R_{SNI} \end{cases} \quad (10)$$

式中: G_t 为图像中目标的平均灰度值; G_b 为背景的平均灰度值; σ_b 为背景的灰度标准差; R_{SNO} 为经偏振信息融合处理后的图像信杂比; R_{SNI} 为强度图像的信杂比。

图 4~7 中各图像的信杂比和融合图像相对于红外强度图像的信杂比增益见表 1。由表可知: 利用本文提出的偏振信息融合方法能较好地抑制背景与噪声, 平均信杂比增益可达 3~29 倍, 更有利于后续的目标分割与提取。

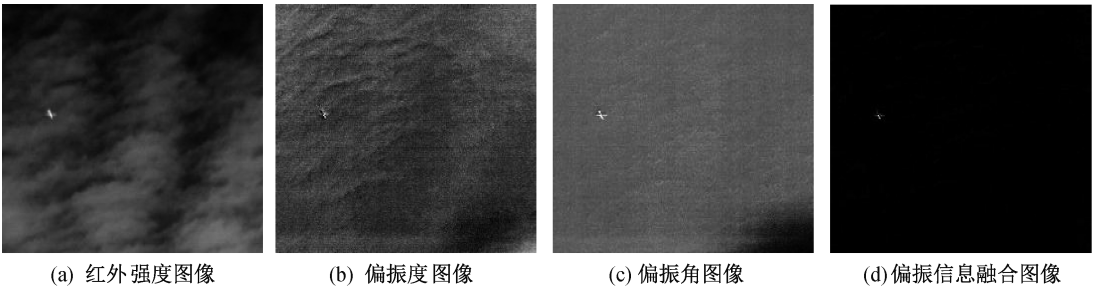


图 4 近距离天空背景下无人机偏振图像比较

Fig. 4 Comparison of close-range UAV polarimetric images against sky background

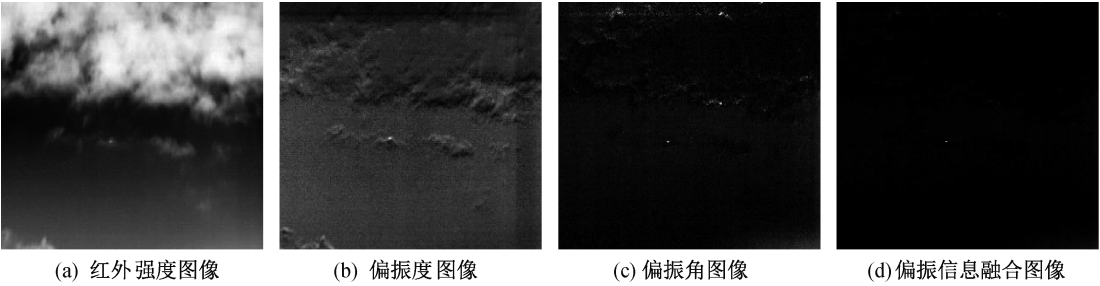


图 5 远距离天空背景下无人机偏振图像比较

Fig. 5 Comparison of far-range UAV polarimetric images against sky background

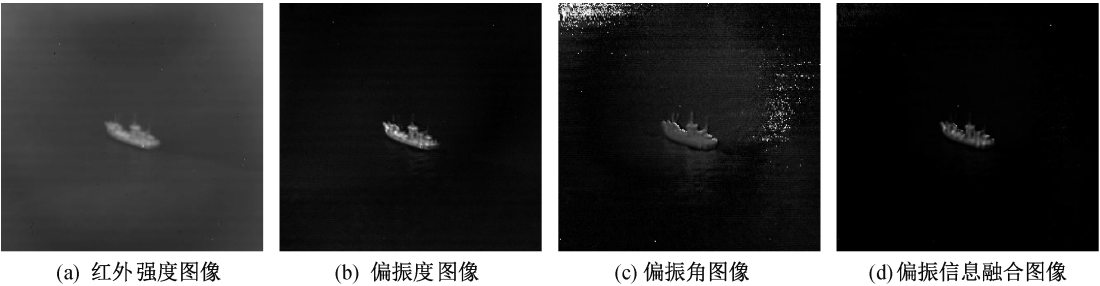


图 6 近距离海面背景下船只偏振图像比较

Fig. 6 Comparison of close-range ship polarimetric images against sea background

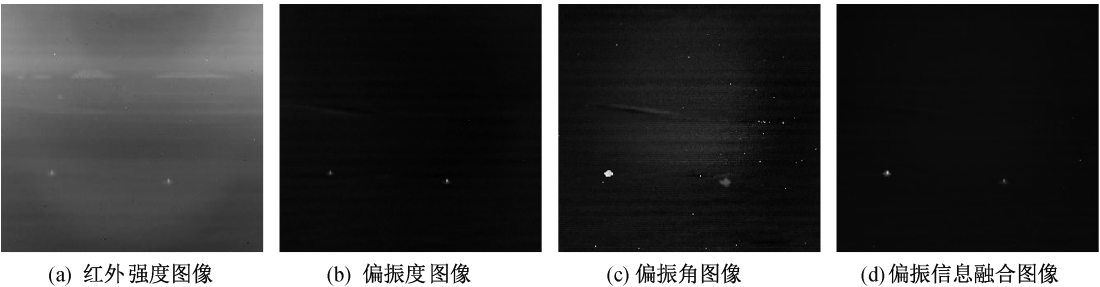


图 7 远距离海面背景下船只偏振图像比较

Fig. 7 Comparison of far-range ship polarimetric images against sea background

表 1 图像信杂比定量比较

Tab. 1 Quantitative comparison of image signal-to-clutter ratios					
目标图像	强度图像 信杂比	偏振度图 像信杂比	偏振角图像 信杂比	融合图像 信杂比	信杂比 增益
图 4	5.1	4.9	11.3	73.6	14.4
图 5	6.5	11.2	35.1	194.1	29.8
图 6	7.1	15.2	9.8	25.2	3.5
图 7	4.2	21.3	14.3	98.4	23.4

5 结束语

本文提出了一种基于偏振度和偏振角信息融合的背景抑制方法,利用目标与背景的偏振特性差异大幅提升了目标图像的信杂比,更有利于后续对红外目标的分割与提取。相比于传统红外图像背景抑制方法,该方法的背景抑制性能不依赖于目标的大小、形状或运动信息。该方法适应性强,易于实现,为复杂云层或海面背景下的目标检测与跟踪提供了一条技术途径。后续可深入挖掘目标多维偏振信息的内在关联,优化融合框架,进一步提升算法的背景抑制性能。

参考文献

[1] 张世锋,黄心汉,王敏. 红外背景抑制与小目标检测算法[J]. 中国图象图形学报, 2016, 21(8): 1039-1047.

[2] 朱斌,樊祥,程正东,等. 一种基于稀疏化核方法的红外强杂波背景抑制算法[J]. 电子学报, 2015, 43

(4): 716-721.

[3] PUST N J, SHAW J A. Dual-field imaging polarimeter for studying the effect of clouds on sky and target polarization[C]//Proceedings of SPIE. 2005: 295-303.

[4] ARON Y, GRONAU Y. Polarization in the LWIR: a method to improve target acquisition[C]//Proceedings of SPIE. 2005: 653-661.

[5] GOUDAIL F. Noise minimization and equalization for Stokes polarimeters in the presence of signal-dependent Poisson shot noise[J]. Optics Letters, 2009, 34(5): 647-649.

[6] 孙晓兵,洪津,乔延利. 一种基于偏振角参数图像的特征提取方法研究[J]. 遥感技术与应用, 2005, 20(2): 256-260.

[7] 薛模根,刘晓诚,刘晓,等. 荒漠背景下红外偏振弱小目标检测方法研究[J]. 光子学报, 2014, 43(10): 124-130.

[8] 赵永强,潘泉,陈玉春,等. 基于偏振成像技术和图像融合理论杂乱背景压缩[J]. 电子学报, 2005, 33(3): 433-435.

[9] 汪震,乔延利,洪津,等. 利用热红外偏振成像技术识别伪装目标[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(6): 853-856.

[10] 李世维,黄丹飞,刘辉,等. 基于多尺度边缘表示的偏振图像二次融合算法[J]. 激光与红外, 2018, 48(1): 113-118.

[11] 周彦卿,张卫,顾静良,等. 基于 HSV 空间的红外偏振图像改进融合算法[J]. 激光与红外, 2014, 44(12): 1379-1383.

(本文编辑:李栋颢)