

基于颜色空间融合与上下文显著性的 红外偏振图像目标增强

官剑*, 吕俊伟**, 刘亮***

海军航空大学航空作战勤务学院, 山东 烟台 264000

摘要 针对低对比度、岸岛背景、前景遮挡等复杂背景下前视红外图像在检测识别海面弱小目标困难的问题, 提出一种基于红外偏振图像的海面弱小目标增强方法。开发了一种符合人视觉系统感知色彩的改进色调-饱和度-强度(HSI)颜色空间融合算法, 融合海面图像中的红外偏振度信息与红外强度信息; 设计一种基于红外偏振图像的海面区域分割方法, 分割海面区域, 并将其作为候选目标增强区域; 利用上下文显著性算法计算海面 HSI 颜色空间融合图像的显著性, 根据显著图修正海面 HSI 颜色空间融合图像, 得到目标增强图像。采用目标与背景对比度和局部信噪比评价融合图像增强效果。结果表明, 与现有方法相比, 所提方法在不同场景下能增强目标并抑制背景干扰, 评价指标高于现有方法, 能够为海面舰船目标检测与识别提供支持。

关键词 大气光学; 红外偏振; 目标增强; 色调-饱和度-强度颜色空间融合; 海面区域分割; 上下文显著性

中图分类号 TP391.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1001002

Target Enhancement of Infrared Polarization Image Based on Color Space Fusion and Context-Aware Saliency

Gong Jian*, Lü Junwei**, Liu Liang***

College of Aviation Combat Service, Naval Aviation University, Yantai, Shandong 264000, China

Abstract It is difficult to detect and identify dim and small targets on the sea surface in complex backgrounds, such as low contrast, shore island background, and foreground occlusion. This study proposes a method based on infrared polarization images to detect dim and small targets on the sea surface. Herein, we propose an improved hue-saturation-intensity (HSI) color space fusion algorithm based on the perceived color of the human visual system, which combines infrared polarization information and infrared intensity information of sea surface image. We design a sea surface region segmentation method based on the infrared polarization image, and the sea surface region is segmented as a candidate target enhancement region. The context-aware saliency algorithm is used to calculate the saliency of the sea surface HSI color space fusion image. The sea surface HSI color space fusion image is corrected using the saliency map to obtain a dim and small target enhanced image. The contrast of target and background and the local signal-to-noise ratio are used to evaluate the features of the fusion enhanced image. Results obtained show that in comparison with the existing methods, the proposed method can enhance dim and small targets and suppress the background interference. The evaluation index of the proposed method is higher than that of other existing methods, which provides support for the detection and identification of surface ship targets.

Key words atmospheric optics; infrared polarization; target enhancement; hue-saturation-intensity color space fusion; sea surface region segmentation; context-aware saliency

OCIS codes 010.0280; 100.2980; 350.2660

1 引 言

在海面目标的军事侦察与导弹制导等领域, 前视红外成像发挥着重要作用^[1]。但是, 在较小的目

标背景温差、复杂天气及背景、远距离成像等因素影响下, 红外图像中存在目标尺寸较小、信号较弱、对比度低、检测弱小目标较困难的问题^[2]。红外偏振度信息是独立于强度信息的另一维度信息^[3], 利用

收稿日期: 2019-03-20; 修回日期: 2019-05-15; 录用日期: 2019-06-03

基金项目: 十三五装备预研项目(41415020106)

* E-mail: gongjian0811@outlook.com; ** E-mail: ljwei369@163.com; *** E-mail: liul513@126.com

目标与背景的红外偏振特征差异进行成像,突出目标边缘、轮廓等细节信息(多表现为高频特征),是对红外强度图像中低频信息的有利补充。融合红外辐射强度图像与红外偏振图像信息,有利于在增强目标的同时抑制噪声或背景^[4],提高融合图像对目标探测及识别的能力。

目前,针对图像融合增强的研究主要集中在如何最大限度地提取各自信道中的有利信息,从而融合得到高质量的图像。Zhang 等^[5-6]通过对红外图像及偏振图像的频域分析,根据非下采样剪切波变换(NSST)算法建立红外图像和偏振图像的高频低频系数映射函数,得到最终的融合图像。但是,文献^[5]在融合多源图像增强目标的同时增强了背景细节,不利于目标的检测和跟踪。易维等^[7]基于非下采样轮廓波变换(NSCT)方法融合合成孔径雷达图像和多光谱图像,通过 NSCT 分解保持细节信息,建立融合规则,得到融合图像。人眼对颜色的敏感度远高于对灰度的敏感度,基于颜色的图像融合也受到了广泛的关注。Zhao 等^[8]通过主成分分析将多光谱图像融合成一幅色调-饱和度-强度(HSI)颜色空间图像,将强度、偏振度、偏振角图像分别与多光谱 HSI 融合图像中的 I、S、H 成分进行融合,将三类融合图像分别映射到红、黄、蓝颜色空间。周浦城等^[9]将偏振图像映射到 HSI 颜色空间,通过北美电视系统 YIQ(Luminance, In-phase, Quadrature-phase)颜色空间进行颜色修正,最后通过模糊 C 均值聚类分割得到色调和饱和度,从而得到最终融合结果。

本文提出了一种海面背景复杂的前视红外偏振图像中弱小目标增强的方法,该方法能够在增强海面弱小目标的同时抑制复杂背景。基于 HSI 变换方法,将红外偏振图像和红外强度图像进行特征融合,得到 HSI 颜色空间融合图像;为避免非海面区域前景及背景等带来的干扰,提出海面区域分割方法;根据上下文显著性方法^[11]计算海面 HSI 融合图像弱小目标显著图,并对 HSI 颜色空间的色调 H 分量进行修正,得到最终的增强图像。

2 实验采集系统及图像分析

采用 8~12 μm 波段非制冷长波红外偏振系统采集海面舰船目标图像,红外系统的分辨率为 644 pixel \times 512 pixel,红外偏振图像采集系统如图 1 所示。由于长波波段偏振片口径较小,无法采用文献^[13]中的方法将偏振片直接置于光学系统前端。本文设计了一种后置偏振片红外偏振采集系统,即

将偏振片置于光学系统与长波非制冷红外相机之间,由图像采集卡(image capture)采集 14 位数字图像并将其传输至计算机(PC),采用不间断电源(UPS)为系统供电。偏振片(Thorlabs, ZnSe)的消光比为 300:1。在采集偏振图像时,偏振片旋转至 0°,45°,90°,135°,分别采集这 4 个偏振方向上的图像。为采集同场景下的红外强度图像,且考虑到移出偏振片对光学系统的影响,设计了与偏振片材质和厚度相同的红外补偿片,移出偏振片的同时移入红外补偿片即可采集红外强度图像。

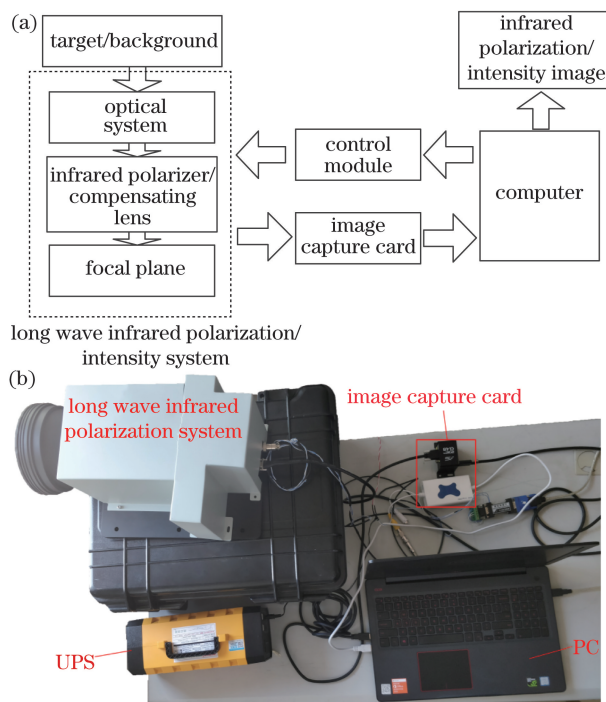


图 1 红外偏振/强度图像采集系统。

(a)原理图;(b)实物图

Fig. 1 Infrared polarization/intensity image acquisition system.

(a) Schematic diagram; (b) photo of system

图 2 为三个场景的复杂背景红外强度/偏振图像。其中,图 2(a)~(c)为三个场景的红外强度图像,图 2(d)~(f)为三个场景的红外偏振图像,图 2(g)~(i)为三个场景的红外强度三维图,图 2(j)~(l)为三个场景的红外偏振三维图。由图 2 分析可知:1)场景一[图 2(a)]中,红外强度图像受到复杂天气因素影响导致目标与背景对比度降低;2)场景二[图 2(b)]和场景三[图 2(c)]中的复杂岸岛背景及遮挡导致的前景干扰给海天线及目标检测带来较大难度;3)在图 2(j)~(l)的红外偏振图像中,海面区域与非海面背景偏振特性差异明显,红外偏振三维图像中呈现出“阶梯”状,利用红外偏振特征易于分割自然背景与海面^[12]。

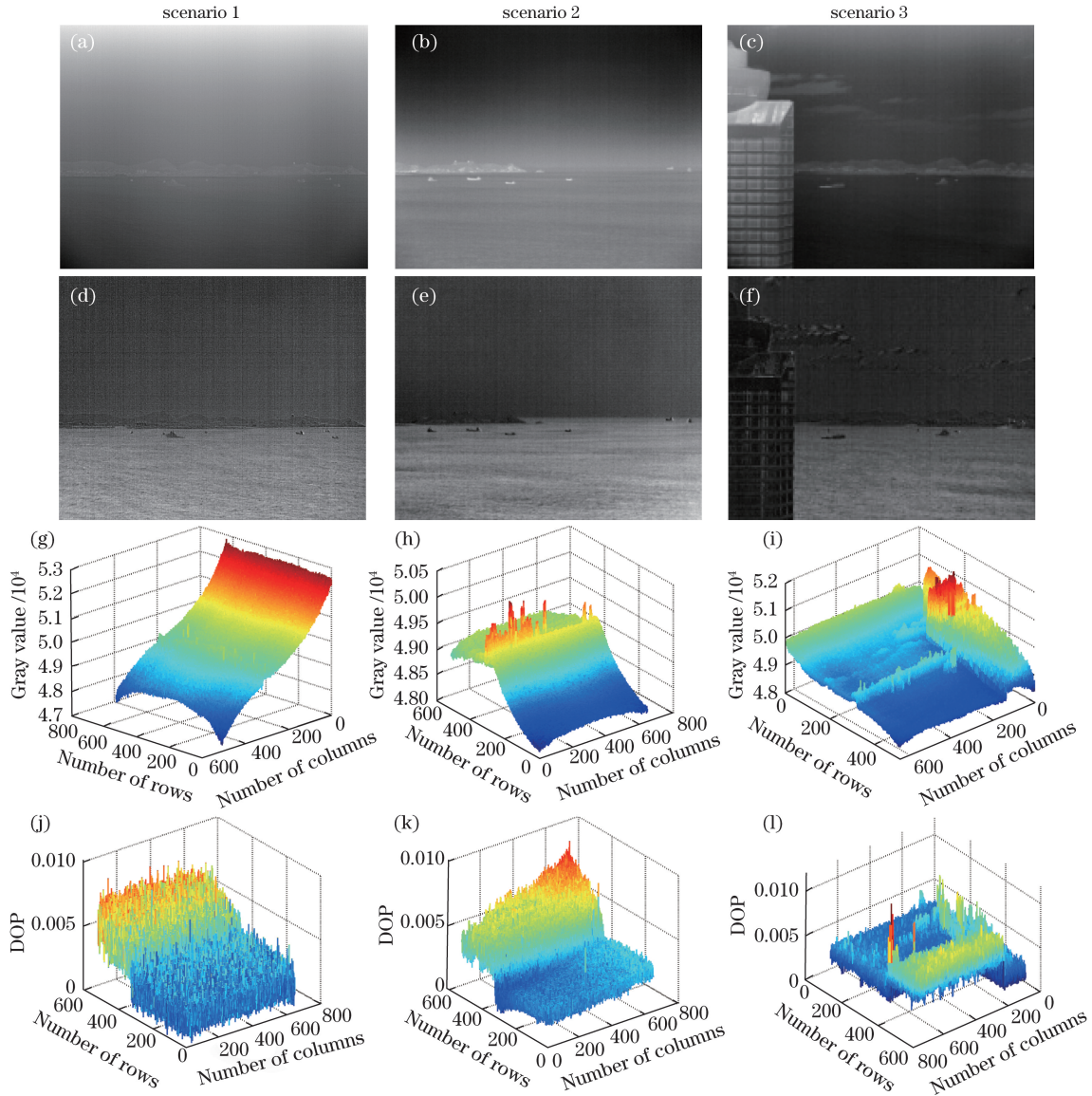


图 2 不同场景下的红外强度/偏振度图像。(a)~(c)红外强度图像;(d)~(f)红外偏振度图像;
(g)~(i)红外强度三维图;(j)~(l)红外偏振度三维图

Fig. 2 Infrared intensity and polarization degree images in different scenarios. (a)-(c) Infrared images; (d)-(f) infrared polarization degree images; (g)-(i) 3D images of infrared intensity; (j)-(l) 3D images of infrared polarization degree

3 海面弱小目标增强方法

提出一种海面背景复杂的前视红外偏振图像中弱小目标增强方法,研究内容主要包含基于红外和红外偏振图像的 HSI 颜色空间融合,海面区域分割和基于上下文显著性的目标增强三个部分。图 3 给出海面弱小目标增强的总体流程。

3.1 HSI 颜色空间融合

3.1.1 预处理

由于舰船目标偏振特征远低于海面,因此偏振度图像中表现为目标灰度较低而海面背景灰度较高。红外图像与偏振度图像中目标和海面背景

的灰度特征相反,目标温度高于海水温度,因此表现为海面灰度低而目标灰度高。为了统一目标灰度特征,将红外图像灰度反转,并进行灰度拉伸,即

$$I = \left[1 - \frac{I_{\text{original}} - \min(I_{\text{original}})}{\max(I_{\text{original}}) - \min(I_{\text{original}})} \right] \times 255, \quad (1)$$

式中: I_{original} 为原始红外图像; I 为经灰度拉伸、反转的红外图像。

根据图 2,偏振度图像中的偏振度值较小,为了增加偏振度图像的对比度,需要对偏振度图像进行灰度拉伸,可表示为

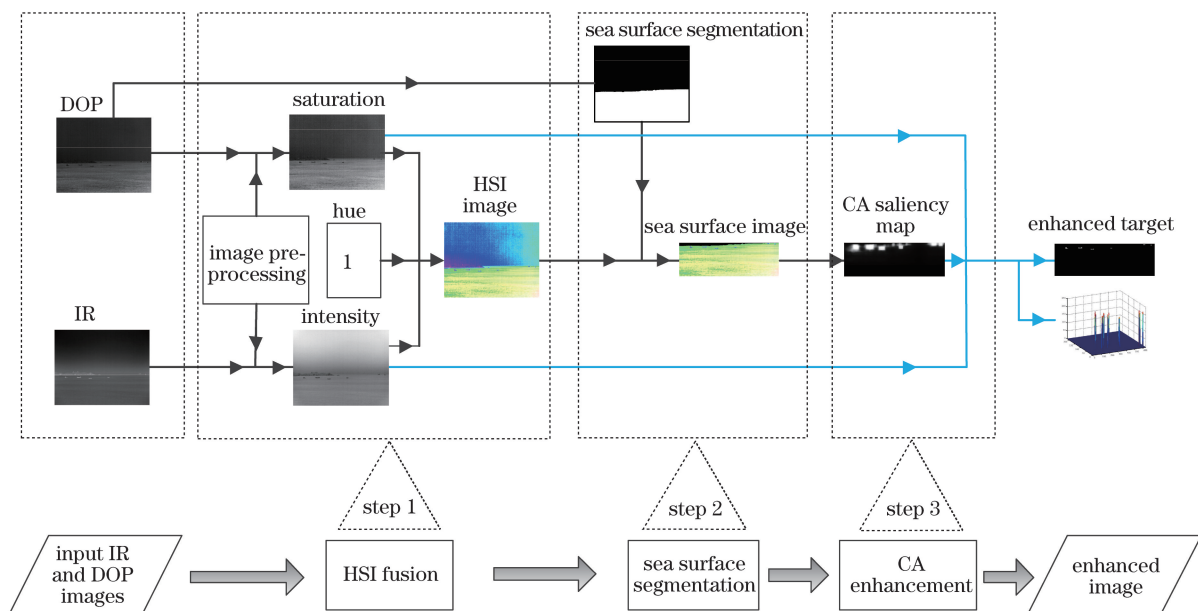


图 3 海面弱小目标增强流程图

Fig. 3 Flow chart of enhancement of dim and small target

$$P = \frac{P_{original} - \min(P_{original})}{\max(P_{original}) - \min(P_{original})} \times 255, \quad (2)$$

式中： $P_{original}$ 为原始偏振度图像； P 为经灰度拉伸后的图像。

3.1.2 改进的 HSI 颜色空间融合

HSI 颜色空间反映了人的视觉系统感知色彩的方式，以 H、S 和 I 三种基本特征量来感知颜色。

Zhao 等^[8] 将偏振度信息和强度信息映射到 HSI 颜色空间。在复杂背景条件下，由于偏振角信息包含较多噪声，因此该方法的目标增强效果较差。故本文提出一种改进的 HSI 颜色空间融合方法，将上下文显著性信息、偏振度信息、强度与偏振共有信息映射到 H、S 和 I 分量中，映射关系如图 4 所示。

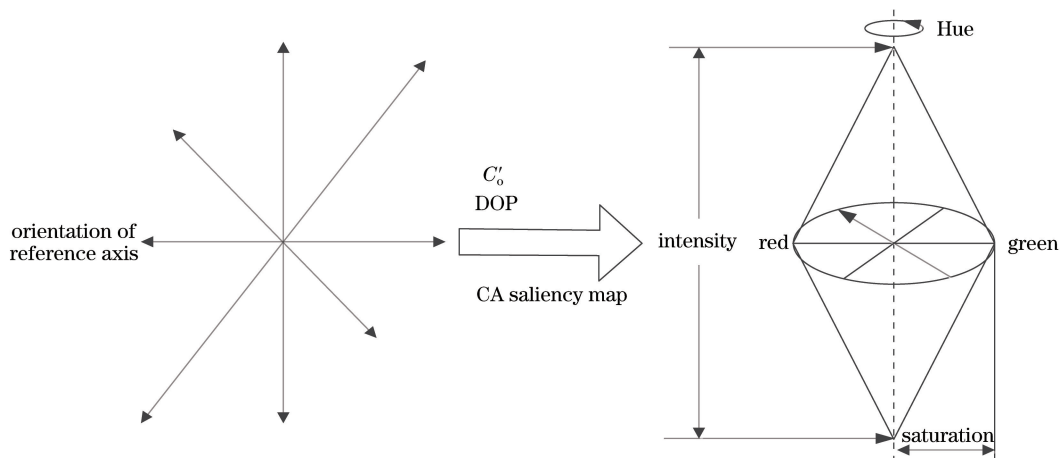


图 4 改进 HSI 颜色空间融合映射关系

Fig. 4 Mapping relationship of improved HSI color space fusion

偏振是光的一般物理特性^[13]，它可以携带物体表面的附加信息，从而提供更丰富的场景描述。根据对图 2 中红外强度与偏振图像的分析，偏振度信息体现了高偏振特征的海面(目标)与低偏振特征的非海面(背景)的差异，强度信息反映低温特征的海面与高温特征的目标与背景间的差异。改进的 HSI

颜色空间融合方法的具体步骤如下：

1) 文献[8]中利用融合算法提取红外信息、偏振度信息和偏振角信息作为共有信息，通过提取场景中的不同特征来增强图像中目标与背景的对对比度。由于海浪形态较复杂，对偏振角信息干扰较大，有利信息较少，本文提取反转红外图像 I 和偏振度

图像 P 的共有信息 C_o , 该信息融合了高灰度值的海面场景与低灰度值的非海面场景, 将 C_o 赋值为 HSI 分量中的强度 I 分量, 可表示为

$$C_o(i, j) = \min[I(i, j), P(i, j)], \quad (3)$$

式中: (i, j) 表示图像像素坐标。归一化并进行灰度反转, 即

$$C'_o(i, j) = \left\{ C_o - \frac{C_o(i, j) - \min[C_o(i, j)]}{\max[C_o(i, j)] - \min[C_o(i, j)]} \right\} \times 255. \quad (4)$$

2) 计算图像偏振度 (D_{OP}), 将 D_{OP} 赋值为 HSI 中的饱和度 S 分量, 表示为

$$D_{OP} = \frac{\sqrt{U^2 + Q^2}}{I}, \quad (5)$$

式中: Q 代表水平和垂直线性偏振成分; U 代表 $+45^\circ$ 和 -45° 偏振成分。

3) 色调 H 分量初始赋值为 1, 得到上下文显著图后对色调 H 分量进行修正。

3.2 海面区域分割

海面背景分割不仅可以排除岸岛或天空背景的

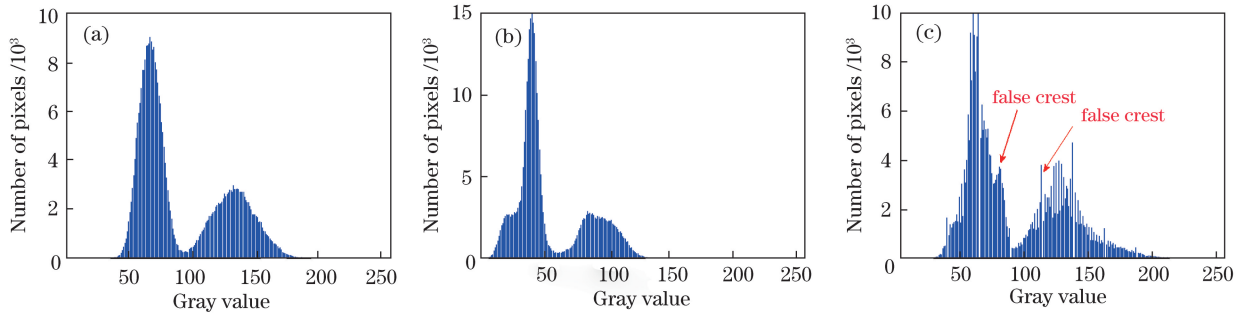


图 5 不同场景下的红外偏振度图像直方图。(a) 场景一; (b) 场景二; (c) 场景三

Fig. 5 Infrared polarization degree image histograms in different scenarios.

(a) Scenario 1; (b) scenario 2; (c) scenario 3

3) 图 5 直方图中有较多局部极值, 如图 5(c) 中红色箭头所示, 严重干扰波峰波谷的阈值搜索。为此, 对直方图应用高斯滤波, 搜索滤波后的直方图双峰间的波谷点作为阈值。

4) 为分割得到包含舰船目标的整个海面区域, 使用形态学重构填补二值图像中舰船目标的空缺, 然后进行一次形态学闭运算, 去除非海面区域干扰。

5) 以步骤 4) 得到的区域为海面模板, 分割海面作为目标候选区域。

3.3 上下文显著性增强

视觉显著性方法利用人视觉特点提取图像中的显著区域, 利用上下文显著性理论计算海面区域 HSI 增强图像显著图, 并修正 HSI 颜色空间中的 H

干扰, 还缩小了目标范围, 提高了检测速度与精度。文献[14]提出一种基于图像边缘相位编码的海天线检测方法, 有效克服了复杂海空背景中的云层、海杂波等因素的干扰。文献[15]中根据海天梯度显著性增强了海天特征并抑制了云层、海杂波等干扰因素, 采取区域生长算法实现了海天检测。目前, 前视图像海天检测主要是基于直线特征检测, 针对复杂岸岛背景和前景遮挡情况下不规则海天线、海岸线的检测研究较少, 本节根据红外偏振图像海面背景与其他背景偏振特性差异提出一种海面背景分割方法, 具体步骤如下:

1) 为防止红外传感器盲元和噪声对图像带来的不利影响, 对红外偏振图像应用 5×5 模板的中值滤波器进行预处理。

2) 分析图 2 中不同场景下的红外偏振图像及其直方图可知, 海面背景与其他背景及舰船目标相比, 偏振特征差异较大, 直方图中显示出“双峰”特征, 通过双峰阈值分割可以有效分割出海面, 从而得到海天线。图 5 为不同场景下红外偏振度图像直方图。

分量, 得到最终增强图像。

3.3.1 局部-全局单一尺度显著性

若像素特征是唯一的, 则判定该像素是显著的。但像素并非独立存在, 而是与周围区域相互联系。对于每个像素, 考虑尺度为 r 的区域, 如果以像素 i 为中心的区域 p_i 的特征相对于图像其他区域是唯一的, 则判定像素 i 是显著的。亮度-颜色对立 (CIE LAB) 色彩空间以数字化方式来描述人的视觉感应, 为了定量计算不同区域的色差, 上下文显著性方法采用 CIE LAB 色彩空间。 $d_{color}(p_i, p_j)$ 表示基于人对颜色的感觉中区域 p_i 和 p_j 之间的欧氏距离, 将其归一化到 $[0, 1]$ 。对 $\forall j, d_{color}(p_i, p_j)$ 的值较大时, 则判定像素 i 是显著的。

评价区域的唯一性,无需通过遍历图像全部区域计算相似性,在此考虑 K 个最相似的区域 $\{p_j\}_{j=1}^K$,对于每个区域 p_i ,搜索图像中最相似的区域,对于 $\forall j \in [1, K]$, $d_{\text{color}}(p_i, p_j)$ 较大时,则判定像素 i 是显著的。

区域之间的位置距离也是影响区域显著性的重要因素。图像中的背景区域可能存在相似区域,当区域间距离较小时,叠加区域 p_i 是显著的,而当区域很远时显著性较小。定义 $d_{\text{position}}(p_i, p_j)$ 是区域 p_i 和 p_j 位置之间的欧氏距离,将两个区域之间的相异度量定义为

$$d(p_i, p_j) = \frac{d_{\text{color}}(p_i, p_j)}{1 + c \cdot d_{\text{position}}(p_i, p_j)}, \quad (6)$$

式中: c 为比例系数。该不相似度量与外观差异成正比,与位置距离成反比。

对于 $\forall j \in [1, K]$, $d(p_i, p_j)$ 较大时,则像素 i 是显著的。因此,像素 i 在尺度 r 的单一尺度显著性值定义为

$$S_i^{(r)} = 1 - \exp\left[-\frac{1}{K} \sum_{j=1}^K d(p_i^{(r)}, p_j^{(r)})\right]. \quad (7)$$

3.3.2 多尺度显著性增强

背景区域可能在多个尺度上具有类似的区域。这与更显著的像素形成鲜明对比,这些像素可能在几个尺度上具有相似的区域。因此,结合多个尺度来进一步降低背景区域的显著性有利于改善显著区域和非显著区域之间的对比度。

利用多尺度图像中一组以像素为中心的多尺度图像区域表示每个像素,从而实现多尺度化。如果像素与多个尺度中的其他像素始终不同,则认为该像素是显著的。区域全局显著性计算方法为:如果多尺度区域中 K 个最相似的区域与该像素不同,则认为像素是显著的。

对于尺度为 r 的区域 p_i ,将图像中的所有区域视为候选邻域,其多尺度表示为 $R = \left\{r, \frac{1}{2}r, \frac{1}{4}r\right\}$ 。在所有这些区域中,找到了根据(6)式得到的 K 个最相似的区域并用于计算显著性。因此,(7)式可以改写为

$$S_i^{(r)} = \left\{1 - \exp\left[-\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K d(p_i^{(r)}, p_k^{(r_k)})\right]\right\}, \quad (8)$$

式中: $r_k \in R$,其中 r_k 为第 k 个最相似区域的尺度,其中 $k=1, 2, \dots, K$ 。将每个尺度的显著图 $S_i^{(r)}$ 归一化到范围 $[0, 1]$ 并通过插值回到原始图像大小。

利用多尺度图像区域中心来表示每个像素。令

$L = \{r_1, \dots, r_M\}$,表示要考虑用于像素 i 的区域大小的集合,其中 $r_m (m=1, 2, \dots, M)$ 表示 M 个不同区域。像素 i 的显著性表示为其在不同尺度上的显著性的平均值,即

$$\bar{S}_i = \frac{1}{M} \sum_{r \in L} S_i^{(r)}, \quad (9)$$

\bar{S}_i 越大,像素 i 越显著,与其他区域的差异性越大。

3.3.3 包含临近区域的上下文显著性

与远距离区域相比,计算上下文显著性时应该着重搜索与注意力焦点相近的区域。当焦点周围的区域表示背景时,该区域引起注意,因此是显著的。分两步模拟这种视觉上下文效果:在(8)式产生的显著性图中提取每个尺度上最受关注的局部区域,如果像素的显著值超过某个阈值,对于区域外每个像素,根据与之最近的区域内像素的欧氏距离进行加权。令 $d_{\text{foci}}^r(i)$ 是像素 i 与尺度 r 处的最近关注像素焦点之间的欧几里德距离,归一化到范围 $[0, 1]$ 。像素 i 的显著性被重新定义为

$$\hat{S}_i = \frac{1}{M} \sum_{r \in R} S_i^{(r)} [1 - d_{\text{foci}}^r(i)]. \quad (10)$$

由(10)式得到图像上下文显著图,为增加目标与海面背景的对比度,根据(11)式对显著图进行灰度变换,即

$$g(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{8}f(x, y), & 0 \leq f(x, y) < 80 \\ \frac{47}{20}[f(x, y) - 80] + 10, & 80 \leq f(x, y) < 180, \\ \frac{2}{15}[f(x, y) - 180] + 245, & 180 \leq f(x, y) < 255 \end{cases} \quad (11)$$

式中: (x, y) 为图像坐标; $f(x, y)$ 表示变换前灰度值; $g(x, y)$ 表示变换后的灰度值。

将灰度变换后的显著图进行归一化,修正 HSI 颜色空间中的色调 H 分量,得到目标增强图像。为了便于显示和后续处理,将修正 HSI 颜色空间融合图像转换到 RGB 颜色空间。通过对实验图像分析可得, RGB 颜色空间融合图像中绿色分量 G 为海面区域,蓝色分量 B 或紫色(蓝色分量 B 和红色分量 R 的混合)表示舰船目标。为增强目标并抑制背景,提取增强目标图像绿色 G 分量作为最终结果。

4 实验分析

实验是在 Intel(R) Core(TM) i5-8300H CPU

2.3 GHz 处理器以及 8G 内存的计算机上使用 MATLAB R2014a 进行的。

4.1 本文方法实验分析

分别对图 2 中三个场景红外偏振图像与红外强度图像按照文中所提出的改进 HSI 颜色空间融合方法进行融合,图 6 为本文方法融合结果。根据图 6,本文所提出的改进 HSI 颜色空间融合方法有

效地融合了红外偏振度信息和红外强度信息,将目标与背景间的灰度差异转换为颜色差异,有效增加了弱小目标与海面背景显著性差异,为目标增强打下基础。但是,非海面区域存在较多干扰,如图 6(a)和(c)中的天空背景噪点,以及图 6(b)中的楼房和岸岛背景中高偏特征的金属屋顶^[16],这对弱小目标增强产生不利影响。

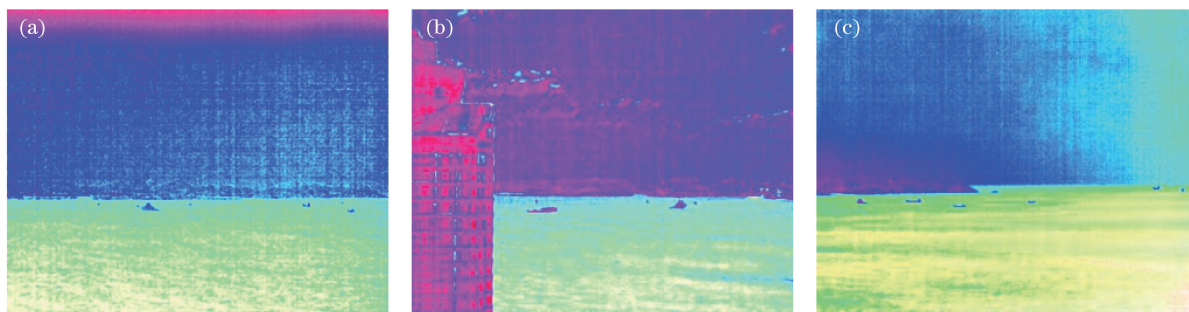


图 6 改进 HSI 颜色空间融合方法实验图。(a)场景一;(b)场景二;(c)场景三

Fig. 6 Experimental results of improved HSI color space fusion. (a) Scenario 1; (b) scenario 2; (c) scenario 3

根据海面与非海面区域偏振特性差异,提出海面区域分割方法,图 7 为海面区域阈值分割直方图。从图 7 可以看出,虽然直方图整体体现出双峰的形状,但是由于局部极值会对波谷阈值搜索带来影响,文中设计的高斯滤波器有效地消除了局部极值,能够准确

搜索波谷阈值。传统方法通过计算海天线梯度特征,拟合后得到海天线。由于复杂背景中海天线可能是不规则的,因此本文利用形态学处理得到海面区域模板,分割得到海面区域图像。图 8 为对图 6 中 HSI 颜色空间融合图进行海面区域分割所得到的结果。

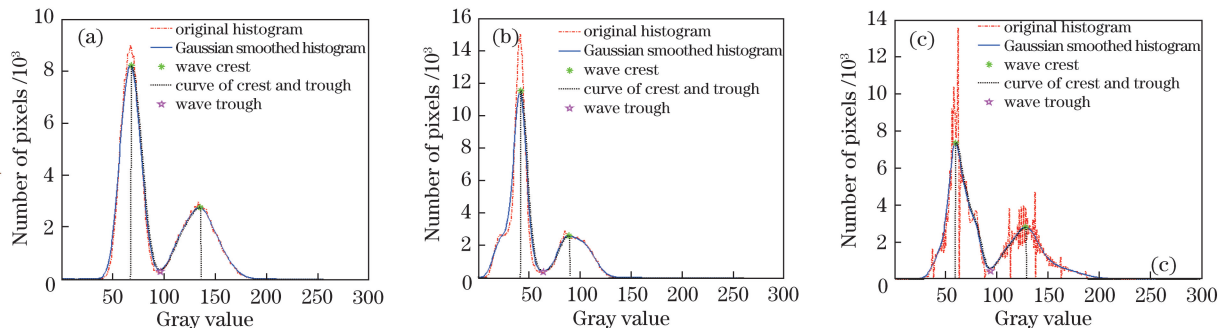


图 7 海面区域阈值分割直方图。(a)场景一;(b)场景二;(c)场景三

Fig. 7 Threshold segmentation histograms of sea area. (a) Scenario 1; (b) scenario 2; (c) scenario 3

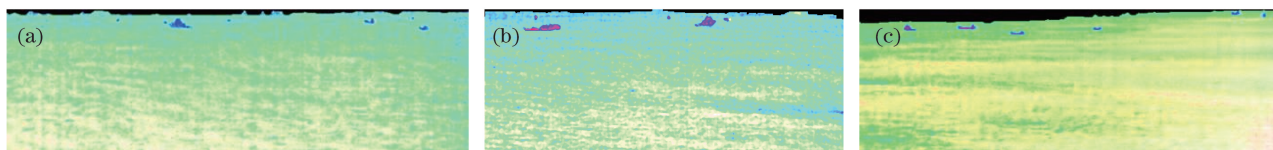


图 8 海面区域 HSI 颜色空间融合图。(a)场景一;(b)场景二;(c)场景三

Fig. 8 HSI color space fusion images of sea area. (a) Scenario 1; (b) scenario 2; (c) scenario 3

通过对比图 6 与图 8 可以看出,本文提出的海面区域分割算法能够有效分离海面和非海面区域,并分割得到海面区域 HSI 颜色空间图像。由三个场景下分割得到的海面区域 HSI 颜色空间融合图像可以看到:1)由于背景不规则,分割图像包

含一部分背景,图像中为均匀黑色,根据上下文显著性分析,均匀背景显著性较低;2)弱小目标与海面背景颜色空间差异明显,符合显著性条件;3)海面区域有海杂波纹理,需要对海面背景进行抑制的同时增强目标。图 9 为三个场景下灰度变换前

[图 9(a)]和变换后[图 9(b)]的海面区域 HSI 颜色空间融合图像的上下文显著图,其中参数设置为 $S_i = 0.8, c = 2, K = 16$ 。利用模拟人视觉搜索

兴趣点的上下文显著性方法有效地检测出了弱小舰船目标,通过灰度变换抑制海杂波干扰的同时增强了目标背景对比度。

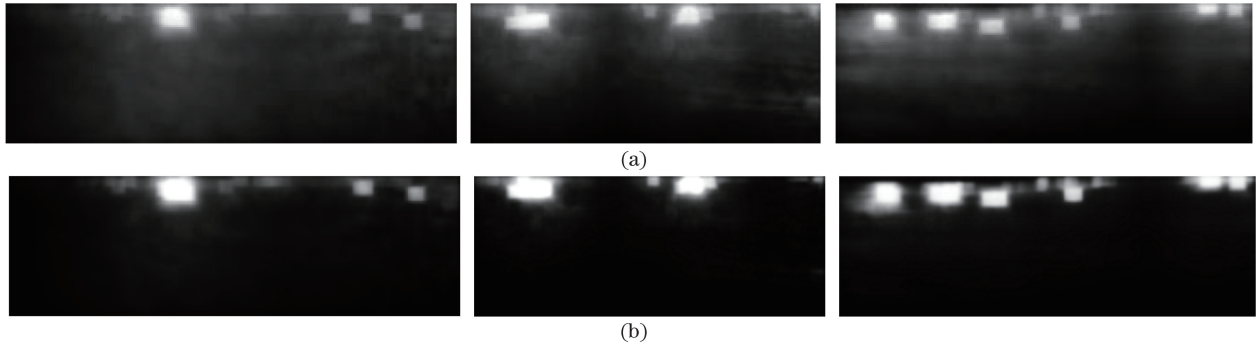


图 9 不同场景上下文显著图。(a)灰度变换前;(b)灰度变换后

Fig. 9 Context-aware saliency maps in different scenarios. (a) Before grayscale transformation; (b) after grayscale transformation

对灰度变换后的海面 HSI 颜色空间融合图像中的色调 H 分量进行归一化修正,提取修正 HSI 融合图像 RGB 颜色空间中的 G 分量得到海面弱小目标增强结果,如图 10 所示,其中图 10(a)为灰

度图,图 10(b)为三维图。对比图 8 和图 10,根据本文提出的上下文显著性方法修正 HSI 融合图像后,海面弱小目标得到有效增强,同时抑制了海杂波的影响。

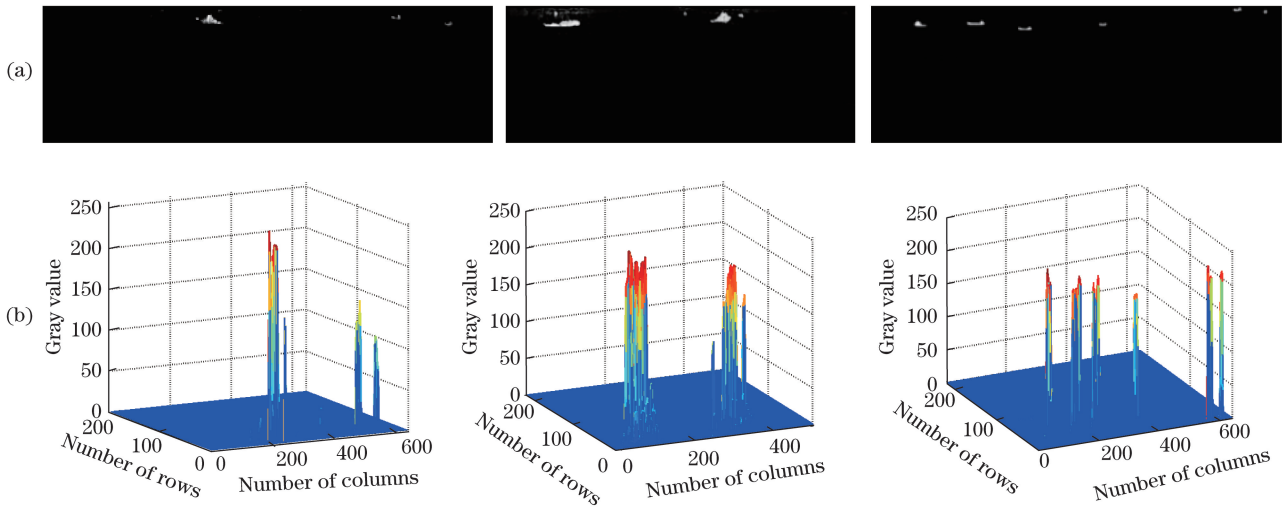


图 10 海面弱小目标增强图像。(a)增强图像;(b)增强三维图

Fig. 10 Enhanced images of sea-surface dim and small targets. (a) Enhanced images; (b) enhanced 3D images

4.2 现有方法实验对比

为定量评价本文方法与现有方法的性能,应用目标与背景对比度 C 和局部信噪比 L_{SCR} 两个评价指标来评价算法的目标增强效果^[5]。 C 和 L_{SCR} 定义为

$$C = \left| \frac{\mu_T - \mu_B}{\mu_T + \mu_B} \right|, \quad (12)$$

$$L_{SCR} = \left| \frac{\mu_T - \mu_B}{\sigma_B} \right|, \quad (13)$$

式中: μ_T 为目标区域灰度均值; μ_B 为背景区域灰度均值; σ_B 为背景区域灰度标准差。本文方法与文

献[6]、[8]算法性能对比见表 1。

根据本文提出的方法及现有方法在三个场景下的 C 和 L_{SCR} 的评价指标,可以得到:1)与红外强度图像及红外偏振图像相比,该方法比文献[8]的评价指标 C 分别提高 199.6%和 20.9%,而文献[6]中融合了高频和低频信息,导致其评价指标 C 介于红外强度图像及红外偏振图像 C 值之间;2)文献[6]中的 L_{SCR} 评价指标高于文献[8],但都低于红外强度图像和红外偏振图像,这说明两种方法增加了海面背景信息;3)与红外强度图像、红外偏振图像以及文献[6,8]方法中评价指标 C 和 L_{SCR} 的最大值相

表 1 算法性能对比

Table 1 Performance comparison of different algorithms

Evaluation index	IR	DOP	Method in Ref. [8]	Method in Ref. [6]	Proposed method
C (scenario 1)	0.0701	0.4331	0.8044	0.2721	0.9934
L_{SCR} (scenario 1)	2.7899	5.2996	3.8637	3.8222	25.5557
C (scenario 2)	0.1281	0.5334	0.8765	0.3172	0.9825
L_{SCR} (scenario 2)	6.7699	7.2247	7.1867	4.6906	31.0078
C (scenario 3)	0.4845	0.7258	0.3646	0.4273	0.9854
L_{SCR} (scenario 3)	14.2620	8.4687	6.0687	8.9735	31.1225
\bar{C}	0.2276	0.5641	0.6818	0.3389	0.9871
\bar{L}_{SCR}	7.9406	6.9977	5.7064	5.8288	29.2287

Notes: \bar{C} represents average value of C of scenario 1, scenario 2, and scenario 3; \bar{L}_{SCR} represents average value of LSCR of scenario 1, scenario 2, and scenario 3.

比,本文方法分别提高 44.8%和 268.1%,本文方法能够在增强目标的同时抑制海面背景。

5 结 论

对复杂背景条件下前视红外偏振图像弱小舰船目标增强进行了研究。分析了红外偏振图像偏振特征,提出一种融合红外强度信息和红外偏振度信息的 HSI 颜色空间融合方法,基于目标背景的偏振特性对海面区域进行分割,将分割后的区域作为目标区域,应用上下文显著性方法修正 HSI 颜色空间融合图像得到目标增强图像。分别应用现有方法和本文方法进行实验,结果表明:与现有方法相比,本文方法在不同复杂背景条件下均能有效增强海面中的舰船目标并抑制复杂背景,局部对比度和局部信噪比更高,增强效果更好,对目标检测与识别有重要意义。

参 考 文 献

- [1] Chen S W, Zhang S X, Yang X G, *et al.* Contour extraction method of FLIR ground standby target[J]. Systems Engineering and Electronics, 2017, 39(7): 1647-1652.
陈世伟, 张胜修, 杨小冈, 等. 前视红外地面待机目标轮廓提取方法[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(7): 1647-1652.
- [2] Zhang S, An B W, Pan S D. Infrared dim target detection based on temporal-spatial non-local similarity[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(11): 1110001.
张素, 安博文, 潘胜达. 基于时空非局部相似性的海上红外弱小目标检测[J]. 光子学报, 2018, 47(11): 1110001.
- [3] Chen W L, Sun Q J, Wang S H, *et al.* Gesture analysis based on the polarization characteristics for the target edge contour[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2016, 35(6): 758-765.
陈伟力, 孙秋菊, 王淑华, 等. 基于目标边缘轮廓偏振特征的姿态分析初探[J]. 红外与毫米波学报, 2016, 35(6): 758-765.
- [4] Liu J, Zhang J X, Dai Y. Image enhancement based on multi-guided filtering[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(23): 238701.
刘杰, 张建勋, 代煜. 基于多引导滤波的图像增强算法[J]. 物理学报, 2018, 67(23): 238701.
- [5] Zhang J H, Zhang Y, Shi Z G. Enhancement of dim targets in a sea background based on long-wave infrared polarisation features[J]. IET Image Processing, 2018, 12(11): 2042-2050.
- [6] Zhang J H, Zhang Y, Shi Z G. Long-wave infrared polarization feature extraction and image fusion based on the orthogonality difference method[J]. Journal of Electronic Imaging, 2018, 27(2): 023021.
- [7] Yi W, Zeng Y, Yuan Z. Fusion of GF-3 SAR and optical images based on the nonsubsampling contourlet transform[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(11): 1110002.
易维, 曾湧, 原征. 基于 NSCT 变换的高分三号 SAR 与光学图像融合[J]. 光学学报, 2018, 38(11): 1110002.
- [8] Zhao Y, Zhang L, Zhang D, *et al.* Object separation by polarimetric and spectral imagery fusion[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2009, 113(8): 855-866.
- [9] Zhou P C, Zhang H K, Xue M G. Polarization image fusion method using color transfer and clustering-based segmentation[J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(1): 149-153.

- 周浦城, 张洪坤, 薛模根. 基于颜色迁移和聚类分割的偏振图像融合方法[J]. 光子学报, 2011, 40(1): 149-153.
- [10] Goferman S, Zelnik-Manor L, Tal A. Context-aware saliency detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2012, 34(10): 1915-1926.
- [11] Li S, Jin W Q, Xia R Q, *et al.* Radiation correction method for infrared polarization imaging system with front-mounted polarizer[J]. Optics Express, 2016, 24(23): 26414-26430.
- [12] Wang X, Liang J N, Long H B, *et al.* Experimental study on long wave infrared polarization imaging of typical background and objectives[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(7): 0704002.
王霞, 梁建安, 龙华宝, 等. 典型背景和目标的长波红外偏振成像实验研究[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(7): 0704002.
- [13] Xu J, Ge B Z. Simulation and analysis of polarization properties of single particle light scattering[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(4): 0429001.
徐捷, 葛宝臻. 单颗粒光散射偏振特性的模拟和分
析[J]. 光学学报, 2019, 39(4): 0429001.
- [14] Sun X W, Xu Q S, Cai Y, *et al.* Sea sky line detection based on edge phase encoding in complicated background[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(11): 1110002.
孙熊伟, 徐青山, 蔡熠, 等. 基于边缘相位编码的复杂背景下海天检测[J]. 光学学报, 2017, 37(11): 1110002.
- [15] Wang B, Su Y M, Wan L, *et al.* Sea sky line detection method of unmanned surface vehicle based on gradient saliency[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(5): 0511002.
王博, 苏玉民, 万磊, 等. 基于梯度显著性的水面无人艇的海天线检测方法[J]. 光学学报, 2016, 36(5): 0511002.
- [16] Xu W B, Chen W L, Li J W. Identification method of camouflaged objects based on long-wave infrared hyperspectral polarization characteristic[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(1): 235-240.
徐文斌, 陈伟力, 李军伟. 长波红外高光谱偏振特性的伪装目标识别方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(1): 235-240.