

doi: 10.7690/bgzdh.2024.09.002

## 基于图像显著性的空中光学伪装效果评估方法

张祥<sup>1,2</sup>, 沙建军<sup>1,2</sup>, 郭铭洋<sup>2</sup>, 黄倩<sup>2</sup>, 温远征<sup>3</sup>

(1. 哈尔滨工程大学智能科学与工程学院, 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨工程大学青岛创新发展基地, 青岛 266000;  
3. 哈尔滨工程大学信息与通信工程学院, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 针对传统伪装效果评估在大场景空中图像不适用问题, 提出一种基于图像显著性的空中光学伪装效果评估方法。采用频率调谐 (frequency-tuned, FT) 模型生成全局显著图和显著区域图, 使用残余谱 (spectrum residual, SR) 模型生成局部显著图; 根据显著图计算全局显著均值、显著区域占比和局部显著均值 3 个指标; 通过熵权法综合 3 个指标得到综合显著性评估系数来量化评估, 在林地和雪地背景下获取伪装目标空中光学图像进行实验验证。结果表明: 该方法能较好地体现不同伪装效果的差异, 优于目标背景相似度加权模型, 且可根据显著图优化伪装方案。

**关键词:** 图像显著性; 熵权法; 伪装评估; 空中光学图像

**中图分类号:** TP751 **文献标志码:** A

## Evaluation Method for Aerial Optical Camouflage Effect Based on Image Saliency

Zhang Xiang<sup>1,2</sup>, Sha Jianjun<sup>1,2</sup>, Guo Mingyang<sup>2</sup>, Huang Qian<sup>2</sup>, Wen Yuanzheng<sup>3</sup>

(1. College of Intelligent Systems Science and Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;  
2. Qingdao Innovation and Development Base, Harbin Engineering University, Qingdao 266000, China;  
3. College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract:** In response to the problem that traditional camouflage effect evaluation is not applicable to large-scale aerial images, a method for evaluating aerial optical camouflage effect based on image saliency is proposed. Using frequency tuned (FT) models to generate global saliency maps and saliency region maps, and using residual spectrum (SR) models to generate local saliency maps; Calculate three indicators: global significance mean, proportion of significant regions, and local significance mean based on saliency maps; By using the entropy weight method to synthesize three indicators, a comprehensive significance evaluation coefficient is obtained to quantify the evaluation. Optical images of disguised targets in the air are obtained under forest and snow backgrounds for experimental verification. The results show that this method can effectively reflect the differences in camouflage effects, outperform the target background similarity weighted model, and can optimize camouflage schemes based on saliency maps.

**Keywords:** image saliency; entropy weight method; camouflage evaluation; aerial optical image

### 0 引言

伪装是对抗军事侦察和精确制导捕获最常用的有效手段, 通过对配置在作战区域背景中的军事目标实施技术措施从而使其难以被发现识别, 进而对抗侦察或捕获系统的检测。伪装评估不仅可以检验目标的伪装设计和伪装手段实施在作战背景下的有效性, 而且可作为伪装设计优化和伪装手段运用改进的反馈, 继而提升目标的战场生存能力。由此可见, 伪装效果评估在军事目标战场运用中具有重要意义, 已经得到作战人员和研究人员的重视。

当前光学伪装效果评估方法主要有 2 大类:

1) 主观评估方法。以人工判读为基础, 组织多名专业人员在给定的观测距离上使用裸眼或观测器材观察目标本身或者目标图像, 经过判读统计得到目标

的发现概率。2) 客观评估方法。通过测量或计算目标背景的光电特性、目标背景图像特征相似度等指标参数, 评估伪装效果。

主观评估方法通常考虑目标的发现概率, 原则上反映了目标面临侦察的实际情况, 但是数据采集任务强度大、时间长。本质上, 评估结果是主观的, 受个体观察者影响较大。近年来, 采用图像特征的客观伪装评估方法已得到越来越多的研究并逐步开始应用。Bian 等<sup>[1]</sup>使用 HSV 空间中真实背景颜色直方图量化和匹配, 通过伪装图案与待评估的伪装目标图像 (简称伪装评估图像) 对比进行光学伪装效果评估。Huang 等<sup>[2]</sup>提出了一种基于归一化灰度聚合直方图的方法, 利用边缘的灰度空间分布来评估边缘在目标的伪装效果。许卫东等<sup>[3]</sup>利用 45° 搜索算法

收稿日期: 2024-05-22; 修回日期: 2024-06-27

第一作者: 张祥 (1997—), 男, 安徽人, 硕士。

计算伪装目标的共生矩阵，进而采用纹理相似度测量方法来评估伪装的有效性。林伟等<sup>[4]</sup>利用人眼视觉和生理研究建立了 Gabor 小波纹理分析模型，用于模拟人眼的判读过程。

上述研究中伪装评估一般选择伪装目标周围的八邻域区域作为背景区域。在空中光学图像中，军事目标在背景中占比不大，仅选取目标邻域范围的背景进行伪装评估不能完全表征目标的伪装效果；所以，考虑军事目标所处背景中其他地物的显著性对其伪装效果优或劣的影响非常重要。由于目标所处背景复杂程度不同，被发现概率和时间也不同。经研究发现，图像的显著性能很好地衡量目标在大区域复杂背景中的伪装效果。Itti 等<sup>[5]</sup>于 1998 年提出显著性计算模型以来，已有大量图像显著性检测方法被提出并验证。Ma 等<sup>[6]</sup>通过计算像素与其邻域像素 CIELuv 颜色空间的欧氏距离得到显著性值。Achanta 等<sup>[7-8]</sup>以像素点为中心选取不同的内部窗口和外部窗口，并将 2 个窗口之间的平均颜色特征距离作为像素的显著值。

笔者在充分考虑背景中其他地物对目标伪装效果产生影响的情况下，通过显著性检测的方法对空中光学伪装图像进行评估。计算图像全局显著性和局部显著性，得出显著图；统计目标区域显著比、全局显著均值、局部显著均值；使用熵权法对目标的空中光学伪装效果进行综合评估。采用空中采集目标数据进行相关的实验验证。

### 1 基于图像显著性的伪装评估模型

根据心理物理学理论，当在大范围场景中对目标进行搜索和识别时，只有那些引人注意的区域才更容易被注意和观察<sup>[9]</sup>。这种人眼能迅速捕获场景中重点关注的区域称为显著区域，人眼在观察含有伪装目标的图像时，同样会重点观察某些具有高显著值的区域。根据上述原理，笔者综合利用图像的全局显著性和局部显著性进行空中光学伪装效果评估。

#### 1.1 全局显著性特征

全局显著性即通过全局对比度的显著性检测算法在伪装评估图像范围内衡量每个像素的奇异性。面对空中侦察手段，目标的光学伪装效果可能受背景其他地物的影响，故使用全局显著性代表伪装目标图像内部像素在整幅图像中的伪装效果。全局显著特征检测算法的基本原理和主要步骤如下：

1) 使用 DoG 滤波器对图像进行滤波，消除噪声和编码伪影：

$$\text{DoG}(x, y) = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{1}{\sigma_1^2} e^{-(x^2+y^2)/2\sigma_1^2} - \frac{1}{\sigma_2^2} e^{-(x^2+y^2)/2\sigma_2^2} \right] = G(x, y, \sigma_1) - G(x, y, \sigma_2) \tag{1}$$

式中  $\sigma_1$  和  $\sigma_2(\sigma_1 > \sigma_2)$  是高斯分布的标准差。

2) 由于人眼对于颜色和亮度信息较为敏感，所以对滤波后的图像进行 RGB 颜色空间到 CIELab 颜色空间的转换。

3) 计算颜色空间转换之后的伪装评估图像的  $L$ 、 $a$ 、 $b$  的平均值和图像中各个点的显著值  $S(x, y)$ 。

$$S(x, y) = \|I_\mu - I_{\omega_{hc}}(x, y)\| \tag{2}$$

式中： $I_\mu$  为图像平均特征向量； $I_{\omega_{hc}}$  为原始图像滤波后的像素向量。

4) 为方便量化全局显著性评估结果，使用下式进行归一化得到全局显著图  $S_f$ ：

$$S_f(x, y) = S(x, y) / \max(S(x, y)) \tag{3}$$

通常使用灰度图像对显著图进行可视化表示。灰度值代表显著值，物体的显著值越高代表其越容易引起观察者注意。对于伪装目标而言，显著值越大即越容易引起注意从而被发现和识别，伪装效果越差。

图 1(a)为林地背景伪装评估图像，其中包含车辆伪装目标、建筑和铺设路面等；图 1(b)为对应的全局显著图，其中铺设路面和左上角建筑为图像中最显著对象，容易最先引起关注。



(a) 伪装评估图像



(b) 全局显著图

图 1 林地背景全局显著性

### 1.2 局部显著性特征

伪装场景图像中目标所在区域通常由于颜色、纹理、边缘等局部特征与周围背景存在差异，从而使得该区域成为显著区域，往往更易受到侦察人员的关注。采用局部显著性衡量目标区域在图像中的高频显著特征，并以此来检测伪装目标的纹理、边缘与背景的融合度。

局部显著性计算模型<sup>[10]</sup>可以通过分析输入对象的对数谱，进而在空间域快速构造关于图像的显著图。该模型具有高效率和高鲁棒性等特点，可以有效地检测伪装目标纹理和边缘信息。从信息论的角度，有效编码将图像信息  $H(\text{Image})$  分成 2 部分：

$$H(\text{Image})=H(\text{Innovation})+H(\text{PriorKnowledge})。 (4)$$

式中： $H(\text{Innovation})$  为图像显著部分； $H(\text{PriorKnowledge})$  为人眼不感兴趣的冗余信息。通过去除图像中的冗余部分得到最终的显著图像。

局部特征显著性特征检测算法原理和主要步骤如下：

对输入图像  $I(x)$  进行傅里叶变换得到频率域的图像。然后，计算图像幅度谱  $A(f)$  和相位谱  $P(f)$ ：

$$A(f)=R(F[I(x)]); (5)$$

$$P(f)=S(F[I(x)]). (6)$$

对于图像高频信息来说，相似就意味着冗余。通过对输入图像的相似性统计可以得出最小化冗余

的视觉信息，为保证采样点的均匀，取幅度谱的对数，得到图像的对数谱。根据式(7)得到谱残余，其中最主要的是对输入图像的对数谱进行均值滤波得到图像的先验信息。具体表达式如下：

$$L(f)=\log(A(f)); R(f)=L(f)-h_n(f)*L(f)。 (7)$$

式中  $h_n(f)$  为  $n \times n$  的矩阵，定义为：

$$h_n(f)=\frac{1}{n^2} \begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{pmatrix}。 (8)$$

谱残余信息包含的即为图像的区域显著信息。将谱残余和图像相位谱结合起来进行傅里叶逆变换，即在空间域构建输出图像。再对图像使用高斯滤波器  $G(x)(\sigma=8)$  进行平滑处理得到局部显著图：

$$S_s(x)=F^{-1}[\exp(R(f)+P(f))]^2; (9)$$

$$S_l(x)=G(x)*S_s(x)。 (10)$$

### 1.3 综合显著性计算

在计算出伪装目标的全局显著特征和局部显著特征后，对生成的显著图和伪装区域进行量化，从而得出评估系数。从全局显著图可以获得显著均值和显著占比，从伪装区域局部显著性可以获取局部显著均值。通过融合伪装目标的全局和局部显著特征可以实现对目标的综合光学伪装评估。具体流程如图 2 所示。

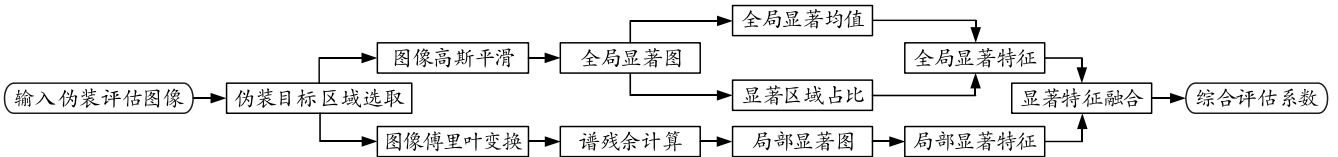


图 2 伪装评估流程

1) 输入伪装评估图像，在图像上选取伪装目标区域  $I_{cam}$ 。

2) 计算全局显著图  $S_r$ ，再通过  $I_{cam}$  在全局显著图上的映射得出显著均值  $S_m$ ，具体表达式如下：

$$S_m = \sum_{i=1}^x \sum_{j=1}^y S_m(x, y) / S_{I_{cam}}。 (11)$$

3) 对全局显著图进行二值化，获取显著区域图，计算显著区域占比。对二值图像的所有连通区域按照面积进行排序得到连通区域图像序列  $\{S_{r_1}, S_{r_2}, S_{r_3}, \dots, S_{r_n}\}$ ，选取前  $m$  个图像序列作为最终二值图像，即显著区域图。根据目标区域  $I_{cam}$  在显著区域图中的映射进而计算显著区域的占比  $S_r$ 。

4) 联合显著均值和显著区域占比表征全局显著程度，计算全局显著性评估系数：

$$S_1=c_1S_r+c_2S_m。 (12)$$

式中  $c_1$ 、 $c_2$  分别表示显著区域占比和全局显著均值的权重，本文中取  $c_1=0.5$ ， $c_2=0.5$ 。

5) 基于式(10)计算得出局部显著图  $S_l$ ，再通过  $I_{cam}$  在局部显著图上的映射可以计算局部显著系数  $S_2$ ：

$$S_2 = \sum_{i=1}^x \sum_{j=1}^y S_l(x, y) / S_{I_{cam}}。 (13)$$

6) 计算综合显著性评估系数  $S$ ：

$$S=1-(\omega_1S_1+\omega_2S_2)。 (14)$$

式中  $\omega_1$ 、 $\omega_2$  是通过熵权法<sup>[11]</sup>计算的局部显著性的权重和全局显著性的权重。通过表达式看到综合显著性评估系数与显著性呈负相关。 $S$  越大代表伪装区域越不显著，即目标伪装效果越好。

## 2 验证实验及结果

本次实验采集了青岛和赤峰等地多种背景下多种伪装目标不同角度的空中光学图像。主要选取林地和雪地背景下的多幅空中光学伪装图像进行相关试验。为验证综合显著性评估的有效性，展示部分传统的目标背景相似度加权模型和笔者提出的基于图像显著性评估模型对比结果。

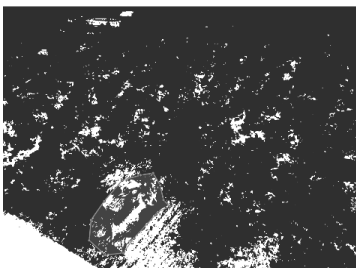
林地伪装评估图像、全局显著图、全局显著区域图如图 3 所示。目标区域通过在伪装评估图像中选取包含伪装区域和阴影区域，如图 3(a)所示。选取全局显著图和显著区域图中的目标区域，分别计算图 3(b)和图 3(c)全局显著均值与显著区域占比。最后，根据式(12)计算出全局显著特征  $S_1$ 。



(a) 伪装评估图像



(b) 全局显著图



(c) 显著区域图

图 3 林地背景全局显著性

林地背景下伪装评估图像和局部显著图如图 4 所示。通过伪装区域在局部显著图中的映射计算局部显著系数  $S_2$ ，结合全局显著系数可以计算综合显著性系数。



(a) 伪装评估图像

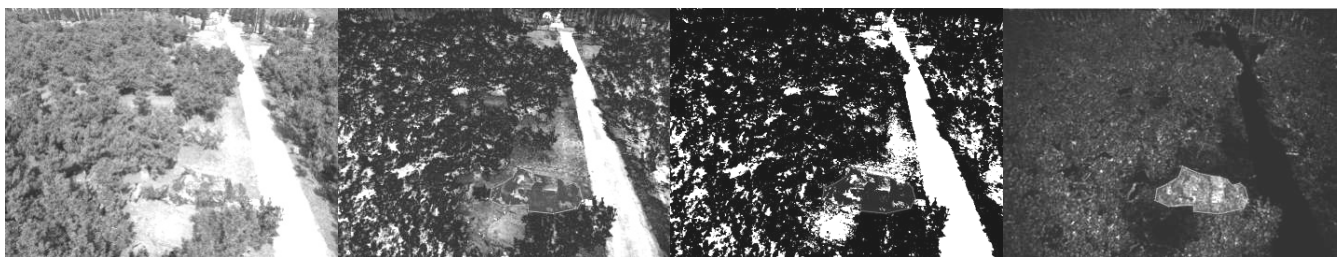


(b) 局部显著图

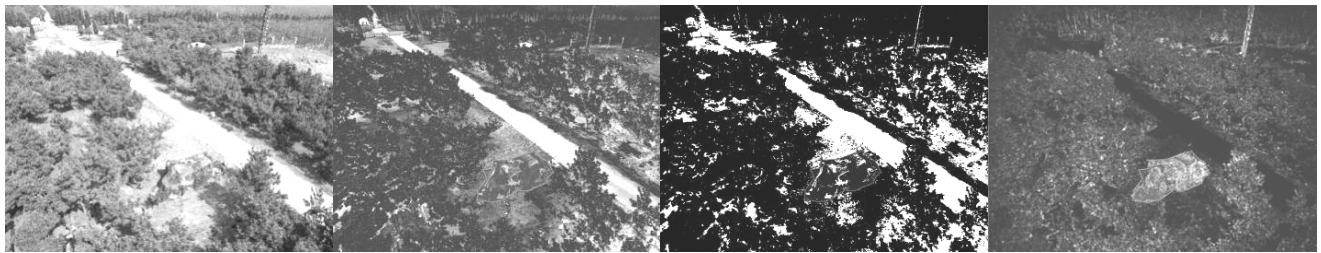
图 4 林地背景局部显著性

为验证本文中方法的有效性，将目标背景相似度加权模型<sup>[12]</sup>计算的目标区域综合评估系数和本文中方法计算的综合评估系数进行对比分析。

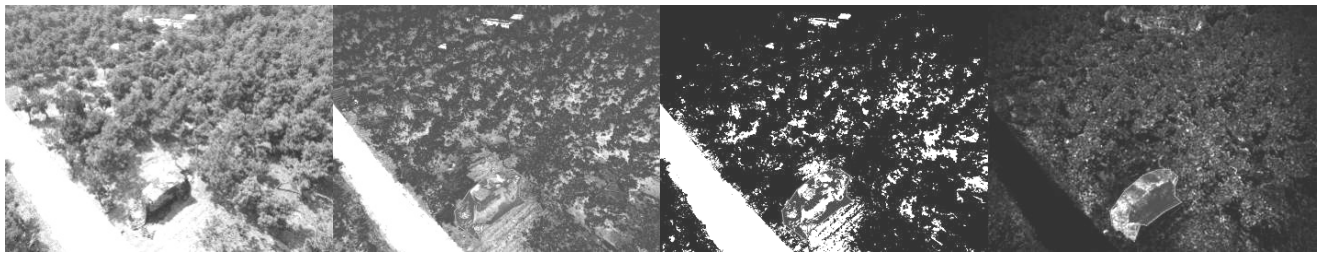
对图 5 的伪装图像进行评估，结果如表 1 所示。林地背景评估中，由于无人机拍摄角度不同，伪装目标和背景融合度有着明显的变化，图 5(b)观察角度伪装网架设良好，进行一定的变形，部分区域被树的阴影遮挡，伪装效果优于图 5(a)和图 5(c)。目标背景相似度加权模型的评估结果分别为 0.848、0.843、0.828，说明 3 个角度图像伪装目标与背景相似度基本一致，不能准确地体现不同评估角度的差异性。本文中方法评估结果分别为 0.758、0.833、0.762，说明图 5(b)、图 5(c)和图 5(a)3 个角度伪装效果依次变差，体现了由于观察角度不同引起的光照变化、其他地物和架设角度等因素产生的光学伪装效果的差异。



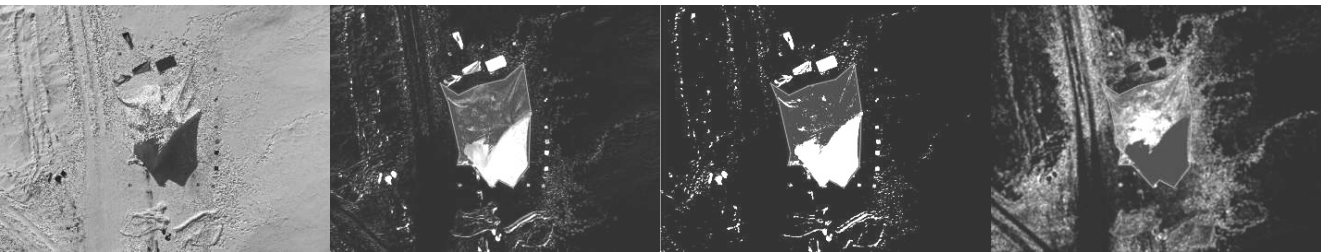
(a) 林地伪装评估图像



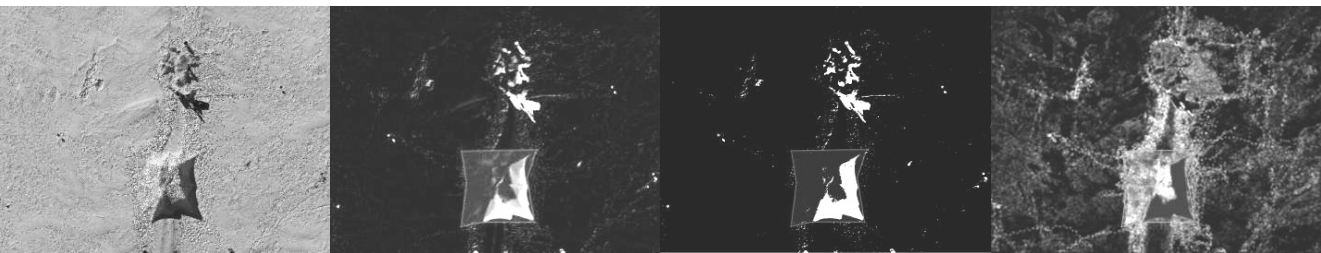
(b) 林地伪装评估图像



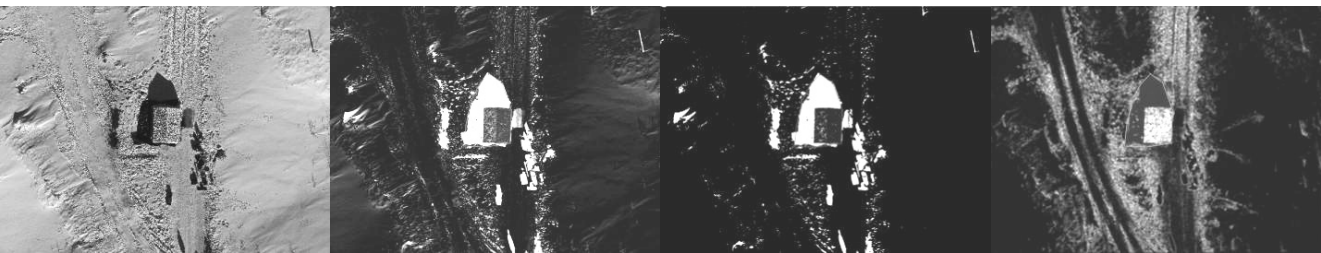
(c) 林地伪装评估图像



(d) 雪地伪装评估图像



(e) 雪地伪装评估图像



(f) 雪地伪装评估图像

图 5 林地和雪地背景伪装图像 (从左到右依次为原图、全局显著图、显著区域图、局部显著图)

表 1 目标背景相似度加权模型和本文中方法计算得到的综合评估系数

伪装图像	图像编号	目标背景相似度 加权模型	本文中方法
林地背景	图 5(a)	0.848	0.758
	图 5(b)	0.843	0.833
	图 5(c)	0.828	0.762
雪地背景	图 5(d)	0.875	0.726
	图 5(e)	0.916	0.753
	图 5(f)	0.897	0.718

在雪地背景评估中，由于雪地型伪装网的颜色和雪地颜色一致性较强。目标背景相似度加权模型的评估结果分别达到了 0.875、0.916、0.897，但是雪地伪装评估图像中由于缺少其他显著目标对伪装目标的评估产生影响，连续规则的阴影等明显暴露特征与目标背景相似度加权模型评估结果不符。本文中方法对于雪地伪装评估图像评估结果分别为 0.726、0.753、0.718。从全局显著图和显著区域图

中可以分析得知, 由于雪地背景地势平坦, 无明显阴影, 目标伪装遮障布设产生规则连续的阴影, 形成明显的阴影暴露特征。图 5 (f) 伪装评估图像中, 由于目标采用伪装网贴合披挂方式进行伪装, 形状暴露特征明显, 本文中方法对其评估结果为 0.718, 符合实际伪装效果。

通过试验可见, 本文中方法更符合人眼观察机制, 能够体现相同伪装不同观测角度、不同伪装方式之间的差异, 从而达到伪装评估的目的, 指导伪装措施的改进。在试验结果中的林地伪装中, 虽然目标和背景融合度较高, 但是由于伪装网架设方法不当导致出现明显的褶皱, 目标阴影形状规则等暴露特征; 因此, 可以通过靠近一侧树林, 将伪装网固定于树干部位, 使之能够更好的融入背景, 树木的阴影也能消除目标的阴影暴露特征。在雪地伪装中, 目标颜色与背景融合度非常高, 但是阴影与背景差异明显, 产生明显的边界, 需要减小伪装网架设的倾角, 减少规则阴影区域的出现。

### 3 结论

笔者使用图像显著性作为伪装目标效果评估的关键指标, 通过计算全局显著图来表征伪装评估图像全局显著特征, 计算显著均值和显著区域占比作为全局显著特征的评估系数, 使用局部显著系数表征伪装目标的局部显著性, 综合考虑伪装区域的图像显著特征得到综合评估系数作为量化指标。对林地和雪地背景下伪装目标及背景的空光学图像进行采集, 选取 2 种背景下的 6 张伪装评估图像, 计算综合伪装系数并和目标背景相似度加权模型进行比较。实验结果表明: 本文中方法能够客观且有效地进行伪装评估, 并可通过评估结果制定伪装措施的改进方案。

综上所述, 笔者基于图像显著度的伪装评估模型能够适用于空中光学伪装效果评估, 综合评估系数不仅表现目标和背景的融合度, 显著图还直观描述了目标自身暴露特征、背景区域其他物体对目标伪装效果的影响, 依据伪装目标显著区域生成改进

方案可大大减少伪装人员的操作时间。

### 参考文献:

- [1] BIAN P, JIN Y, ZHANG N. Fuzzy c-means clustering based digitalcamouflagepattern design and its evaluation[C]// IEEE 10th International Conference on Signal Processing Proceedings. IEEE, 2010: 1017-1020.
- [2] HUANG Y, WU W, GONG Y, et al. A new method of edge camouflage evaluation based on the gray polymerization histogram[J]. Optical technique, 2011, 37(5): 601-606.
- [3] 许卫东, 吕绪良, 陈兵, 等. 一种基于纹理分析的伪装器材效果评价模型[J]. 兵工学报, 2002(3): 329-331.
- [4] 林伟, 陈玉华, 高洪生, 等. 基于 Gabor 小波纹理分析模型的伪装效果评价方法[J]. 兵工学报, 2007(10): 1191-1194.
- [5] ITTI L, KOCH C, NIEBUR E. A model of saliency-based visual attention for rapid scene analysis[J]. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, 1998, 20(11): 1254-1259.
- [6] MA Y F, ZHANG H J. Contrast-based image attention analysis by using fuzzy growing[C]// Proceedings of the eleventh ACM international conference on Multimedia. ACM, 2003: 374-381.
- [7] ACHANTA R, ESTRADA F, WILS P, et al. Salient region detection and segmentation[C]// International conference on computer vision systems. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008: 66-75.
- [8] ACHANTA R, HEMAMI S, ESTRADA F, et al. Frequency-tuned salient region detection[C]// 2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2009: 1597-1604.
- [9] 贾其, 吕绪良, 吴超, 等. 人眼视觉注意机制用于伪装效果评价[J]. 应用科学学报, 2011, 29(3): 294-298.
- [10] HOU X, ZHANG L. Saliency Detection: A Spectral Residual Approach[C]//2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE, 2007: 1-8.
- [11] ZHU Y, TIAN D, YAN F. Effectiveness of entropy weight method in decision-making[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020(1): 1-5.
- [12] WANG J, YAGI Y. Integrating color and shape-texture features for adaptive real-time object tracking[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2008, 17(2): 235-240.