

基于 GBVS 的假目标红外欺骗干扰效能评估

仇永佳^{1,2,3}, 程正东^{1,2,3*}, 赵大鹏^{1,2,3}, 杨华^{1,2,3}, 朱斌^{1,2,3}, 章沁钰^{1,2,3}¹国防科技大学电子对抗学院, 安徽 合肥 230037;²脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037;³红外与低温等离子体安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230037

摘要 针对假目标红外欺骗干扰效能缺乏规范评估体系的问题, 利用视觉显著性模型计算同一背景下真目标和假目标的显著性对比度, 从而定量评估假目标的红外欺骗干扰效能。量值越小, 说明假目标的红外欺骗干扰效果越好。实验结果表明, 该评估方法不仅能定量反映单一假目标的红外欺骗干扰效能, 还能区分不同类型假目标的红外欺骗干扰效能, 具有较强的普适性。

关键词 图像处理; 红外欺骗干扰效能; 定量评估; 视觉显著性; 假目标

中图分类号 TP391.41

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221557

Evaluation of Infrared Deception Jamming Effectiveness of False Targets Based on GBVS

Qiu Yongjia^{1,2,3}, Cheng Zhengdong^{1,2,3*}, Zhao Dapeng^{1,2,3}, Yang Hua^{1,2,3}, Zhu Bin^{1,2,3}, Zhang Qinyu^{1,2,3}¹College of Electronic Engineering, National University of Defense Technology, Hefei 230037, Anhui, China;²State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Hefei 230037, Anhui, China;³Infrared and Low Temperature Plasma Key Laboratory of Anhui Province, Hefei 230037, Anhui, China

Abstract Addressing the issue that there is no standard evaluation system for the effectiveness of infrared deception jamming against false targets, the visual saliency model is employed to determine the contrast between the real target and the false target under the same background, and quantitatively assess the effectiveness of infrared deception jamming against false targets. The effectiveness of the false target's infrared deception jamming effect increases with decreasing value. The experimental results demonstrate that the evaluation method can not only quantitatively reflect the infrared deception jamming effectiveness of a single false target, but also differentiate the infrared deception jamming effectiveness of various types of false targets, and has strong universality.

Key words image processing; infrared deception jamming effectiveness; quantitative evaluate; visual saliency; false target

1 引言

设置假目标作为对抗敌方军事侦察的有效手段, 一直是国防领域的研究热点。假目标的光电欺骗干扰效能评估是假目标设计、制造和应用的重要反馈机制, 能够有效提升假目标的战场性能。早期的假目标光电欺骗干扰效能评估多采用现地实验、人工判读的方式, 受观察员主观因素影响大。此后, 假目标光电欺骗干扰效能的评估方式主要包括: 基于人眼视觉特性建立

评估模型^[1], 这类方式局限性大且缺乏准确性; 利用特征分析进行数字图像处理的评估方式, 普遍存在评级指标单一的问题, 权威性较差^[2]; 融合多个特征指标的综合评估法, 这类方式的指标体系^[3-5]相对完善, 但指标赋权仍是技术难题; 利用神经网络进行真、假目标识别, 速度快, 准确率高, 但是可解释性不强, 并且假目标样本的获取限制了神经网络在军事领域的应用^[6]。

相较于可见光波段, 真、假目标通常在红外波段的差异更明显。文献[7-8]指出, 图像显著性能够作为评

收稿日期: 2022-05-10; 修回日期: 2022-05-22; 录用日期: 2022-06-20; 网络首发日期: 2022-06-30

基金项目: 国家自然科学基金(61405248)、安徽省自然科学基金(1705085MF137)

通信作者: *chengzdmaths@163.com

估目标可见光和红外伪装效果的可靠手段。设置假目标作为伪装的重要手段之一,其红外欺骗干扰效能评估同样可以从图像的显著性角度入手。文献[9]将显著性模型分为3类,分别是模拟生物体视觉注意机制法、纯数学计算法和融合前两类的方法。基于图论的视觉显著性(GBVS)模型^[10]就是利用纯数学方法来计算显著性的。该模型使用图论和马尔可夫链整合不同类型的特征,生成视觉显著图,计算结果准确且客观。当同一背景下假目标和真目标的显著性保持一致时,假目标的红外欺骗干扰效果达到最优。

因此,本文利用GBVS算法计算真目标和假目标之间的显著性对比度,从而定量评估假目标的红外欺骗干扰效果。该评估方法的结果不仅客观全面,还能推动假目标性能的提升,极大程度保证了我军的战场主动权。

2 理论模型

图像的显著性体现了目标特征与周围环境特征之间的差异性,通常主显著值高的区域对应目标的主体,主显著值低的区域则对应目标周围的背景^[11-12]。在同一背景下,不同类型目标的显著性通常是有差异的。GBVS沿用了ITTI模型^[13]的特征提取方式,通过对比目标与背景视觉特征之间的差异,快速定位目标区域并计算真、假目标在同一背景下的主显著值,进而归一化显著值生成真、假目标显著图。最终通过真、假目标之间的显著性对比度来定量评估假目标的红外欺骗干扰效能。所提评估方法的具体步骤如图1所示。

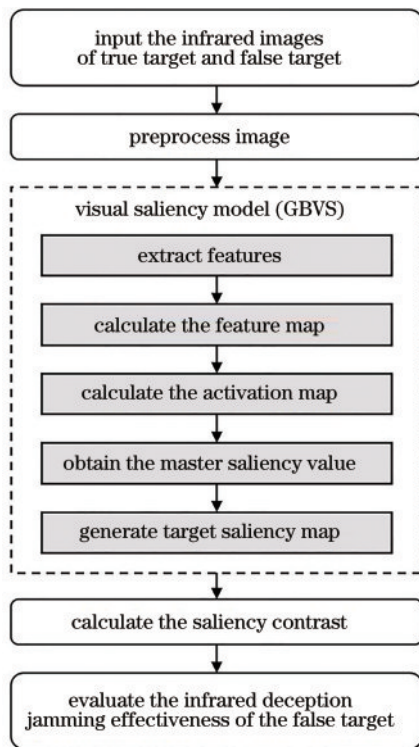


图1 假目标红外欺骗干扰效能评估方法步骤

Fig. 1 Steps of evaluation method of false target infrared deception jamming effectiveness

2.1 提取各特征通道的特征图

经典的ITTI显著性模型^[13]构建了图像颜色、亮度和方向的高斯金字塔,主要原因在于以上特征的鲁棒性较好,不会受到图像尺寸和角度等因素的影响。针对红外波段目标与背景的特性,结合前期对伪装效能评估方式的综合研究,所提方法构建了红外图像强度、亮度、梯度和方向的高斯金字塔。

输入目标红外图像并将其表示为9层高斯金字塔,其中,第0层为原始图像,第1~8层分别为利用高斯核函数进行滤波和采样后,大小为原始图像1/2~1/256的图像。对每一层图像分别提取强度、亮度、梯度和方向特征,从而形成强度金字塔、亮度金字塔、Sobel梯度金字塔和Gabor方向金字塔。

利用ITTI显著性模型提出的突出图像局部变化的中心环绕运算,计算各特征通道的特征图。以方向特征通道为例,Gabor方向特征图 $O(c, s, \theta)$ 就是对在不同尺度下的同一方向特征作差。

$$O(c, s, \theta) = |O(c, \theta) \ominus O(s, \theta)|, \quad (1)$$

式中: \ominus 表示不同尺度特征图之间的点对点作差过程; c 和 s 分别为中心和环绕特征图像素尺度, $c \in \{2, 3, 4\}$, $s = c + \delta, \delta \in \{3, 4\}$; $\theta \in [0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ]$ 。

2.2 各特征通道的特征响应图计算

利用马尔可夫链计算每个特征通道的特征响应图。假设输入图像的特征图 $M: [n^2] \rightarrow \mathbf{R}$,目标是计算相应的特征响应图 $A: [n^2] \rightarrow \mathbf{R}$ 。首先将特征图 M 中的每个像素点视为节点,那么尺度为 $n \times n$ 的特征图 M 中会存在 n^2 个节点。将这些节点两两连接,就能构造全连接有向图 G_A 。节点 (i, j) 和节点 (p, q) 的特征 $M(i, j)$ 和 $M(p, q)$ 之间的不相似性定义为 $d[(i, j) \parallel (p, q)]$ 。

$$d[(i, j) \parallel (p, q)] \triangleq \log \left| \frac{M(i, j)}{M(p, q)} \right|. \quad (2)$$

对全连接有向图 G_A 中任意节点 (i, j) 到节点 (p, q) 的有向边赋权:

$$w[(i, j) \parallel (p, q)] \triangleq d[(i, j) \parallel (p, q)] \ominus F(i - p, i - q), \quad (3)$$

$$F(a, b) = \exp\left(-\frac{a^2 + b^2}{2\sigma^2}\right), \quad (4)$$

式中: σ 为自由参数,通常取图像宽度的1/10~1/5。两节点之间的反向权重相同,即

$$w[(i, j) \parallel (p, q)] = w[(p, q) \parallel (i, j)]. \quad (5)$$

归一化每个节点向外的权重,并在全连接有向图 G_A 上定义一个马尔可夫链。对马尔可夫状态转移矩阵 (1024×1024) 进行多次迭代,直到其分布平稳。平稳分布的马尔可夫链能够准确反映每个节点的质量累积。当节点与相邻节点之间的不相似性越大时,在该

节点积累的时间就越长,则该节点就越显著。

其中,平稳分布的马尔可夫矩阵的主特征值即为 GBVS 模型计算得到的目标主显著值 S ,主显著值越大,目标在图像中就越显著。主特征向量 (1024×1) 是该主特征值对应的向量,将其进行重新排列和

归一化 (32×32),就能得到该特征通道的特征响应图 A 。

按照上述方法计算每个特征通道的特征响应图 A_n ,再将各个特征响应图依次叠加,最终生成目标的显著图。GBVS 算法的基本流程如图 2 所示。

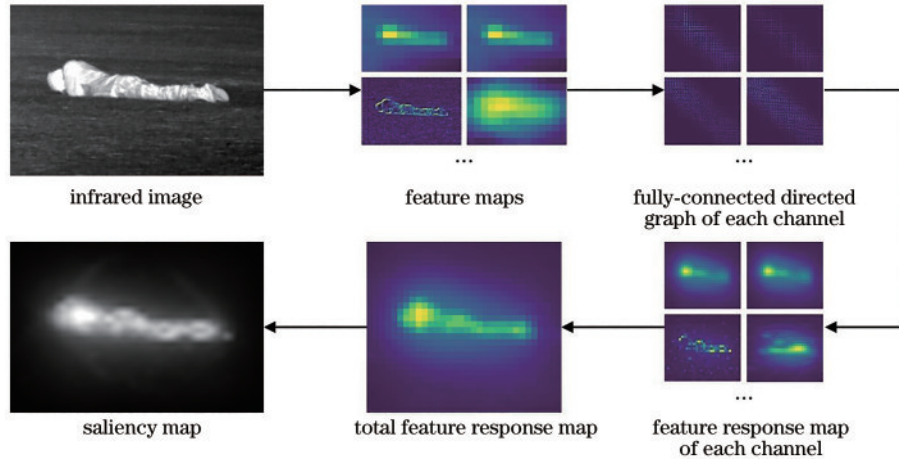


图 2 GBVS 算法基本流程
Fig. 2 Basic flow of GBVS algorithm

2.3 假目标红外欺骗干扰效能评估量值

输入同一背景下的真目标和假目标红外图像,利用第 2.1 节和第 2.2 节介绍的 GBVS 算法分别计算真目标和假目标在同一背景下的主显著值 S_{true} 和 S_{false} 。为了建立真、假目标显著性之间的联系,定义了显著性对比度 A_{false} ,当 A_{false} 越接近 0 时,说明真、假目标之间的显著性差异越小。将显著性对比度 A_{false} 作为定量评估假目标光电欺骗干扰效能的指标, A_{false} 值越小,真、假目标越相似,假目标的红外欺骗干扰效能越好。

$$A_{false} = \frac{|S_{true} - S_{false}|}{S_{true}}, \quad A_{false} \in [0, 1]。 \quad (6)$$

3 假人红外欺骗干扰效能评估实验

3.1 实验设置

假人是战场假目标的重要类型之一。实验以假人为研究对象,设置了两种类型的假人目标,分别为实作假人目标 T_{false1} 和充气假人目标 T_{false2} ,同时设置了真人目标 T_{true} ,以上 3 类人型目标皆为身高 180 cm 左右的中等体型。充气假人目标 T_{false2} 利用小型外置电源连接充气泵,不断向内部充入外界空气。由于充气假人的密封性不强,实验中该假人内部空气始终保持循环充入的状态,即实验中充气假人升温较慢。

晴朗的下午,在足球场草坪上设置目标并开展实验,实验中目标 T_{true} 、 T_{false1} 和 T_{false2} 统一穿着同一材质和款式的衣服。为了尽可能获取简单的草地背景,并方便全面观察目标特性,首先对俯趴姿势的真、假人开展实验。3 个目标分别设置在地面的固定位置,如图 3 所示。静置 0.5 h 后,采用红外热像仪从同一距离和角度获取目

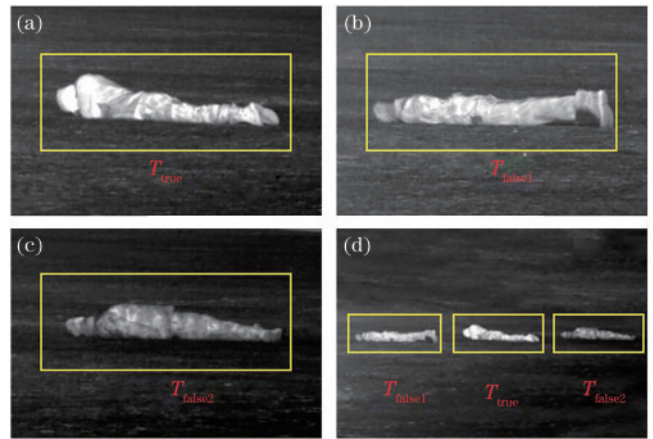


图 3 目标的红外图像。(a) T_{true} ; (b) T_{false1} ; (c) T_{false2} ; (d) 3 类目标并列放置

Fig. 3 Infrared images of targets. (a) T_{true} ; (b) T_{false1} ; (c) T_{false2} ; (d) three targets placed in parallel

标的红外图像,从而确保目标在红外图像中尺寸比例和姿态保持一致。同时还将 3 个目标并列放置并拍摄红外图像,以方便后续对比不同假人的红外欺骗干扰效能。

3.2 实验结果与分析

3.2.1 直接观察法

通过人眼直接观察 3 类目标的红外图像 [图 3(a)~(c)] 能够发现, T_{true} 在草地背景中较为突出, T_{false1} 略差,而 T_{false2} 却部分融入了背景之中。因此,能够初步判别 T_{false1} 和 T_{false2} 的红外欺骗干扰效能为 $T_{false1} > T_{false2}$ 。图 3(d) 更明显地体现了 3 类目标在同一环境下的红外特性差异,证实了 T_{false1} 的红外欺骗干扰效能好于 T_{false2} 。

3.2.2 GBVS 视觉显著性模型

对 3 类目标的红外图像进行预处理后,利用 GBVS 模型计算 3 类目标在同一草地背景下的主显著值,并生成相应的显著图,如图 4(a)~(c)所示。利用马尔可夫链计算得到 T_{true} 、 T_{false1} 和 T_{false2} 的主显著值,分别为 0.8205、0.6557 和 0.5438。主显著值越大,目标的显著性越强,因此 3 类目标的显著性排序为: $T_{true} > T_{false1} > T_{false2}$,从图 4(d)也能够直观得到 3 类目标在同一环境下的显著性排序。

为了观察 3 类目标在草地背景上的显著性分布情况,在生成显著图的基础上,图 5 进一步展示了显著图中各像素的显著值分布情况。从图 5(a)~(c)中能够看出:草地背景相对于人型目标主体而言,显著值较低;3 类人型目标都是头部区域像素的显著值较高,其中, T_{false1} 和 T_{false2} 的显著值从头部往下半身方向整体呈降低趋势, T_{true} 除头部外的身体遮蔽部分的显著值几乎保持不变。

经分析可知,真人 T_{true} 的平均温度最高,而充气假人 T_{false2} 由于内部空气的循环充入,导致其升温速度较慢,因此 T_{true} 的平均温度最高, T_{false1} 次之, T_{false2} 最小。

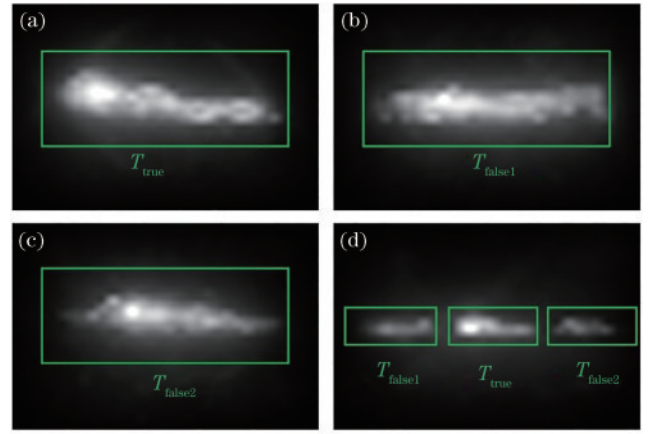


图 4 目标显著图。(a) T_{true} ; (b) T_{false1} ; (c) T_{false2} ; (d) 3 类目标并列放置

Fig. 4 Saliency maps of targets. (a) T_{true} ; (b) T_{false1} ; (c) T_{false2} ; (d) three targets placed in parallel

又由于假人 T_{false1} 和 T_{false2} 在搭建和搬运过程中保持站立状态,且阳光直射导致假人裸露在外的头部温度高,遮蔽的身体区域温度逐渐降低。而真人 T_{true} 裸露在外的头部温度高,遮蔽的身体区域温度能够始终保持恒

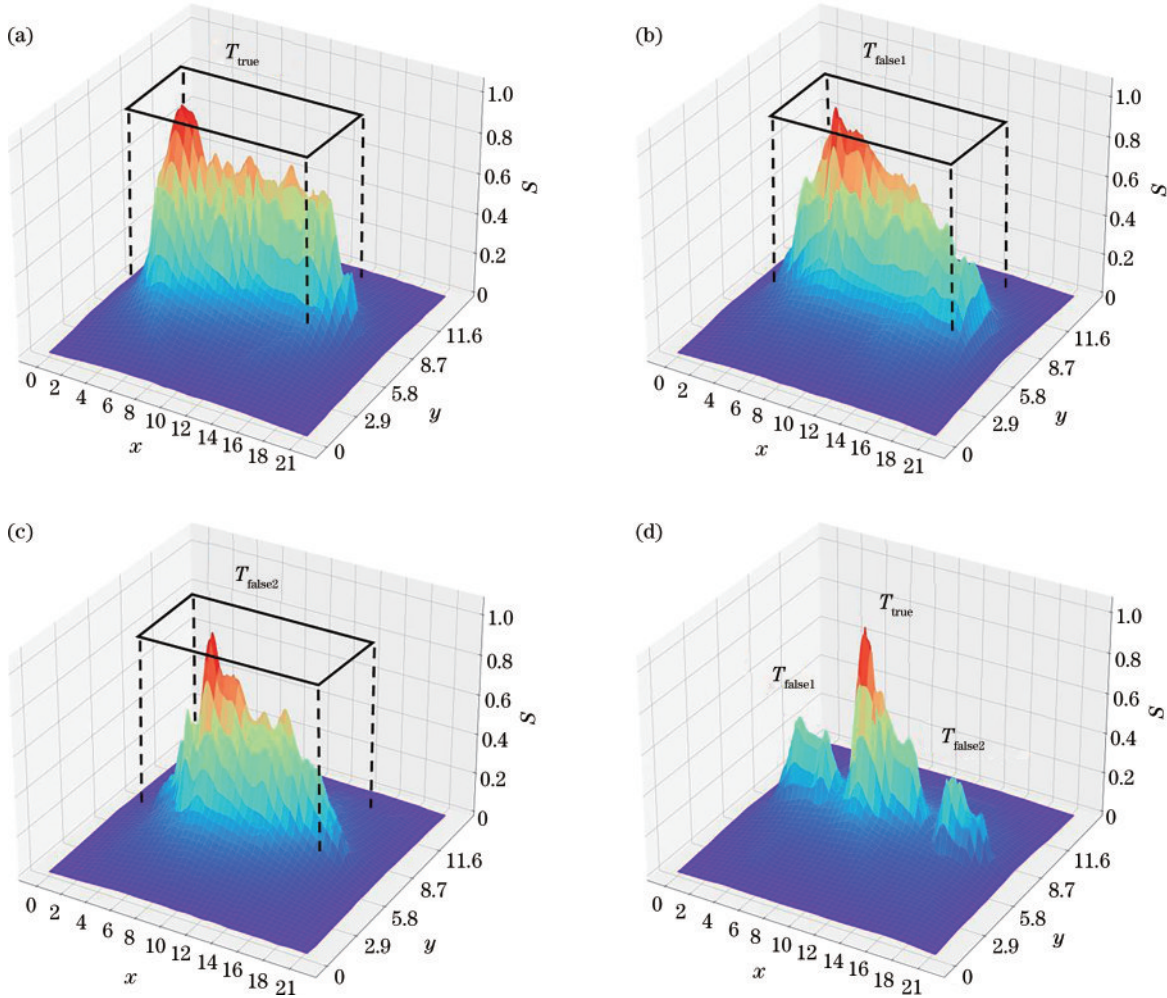


图 5 像素显著值分布图。(a) T_{true} ; (b) T_{false1} ; (c) T_{false2} ; (d) 3 类目标并列放置

Fig. 5 Significant value distribution of pixels. (a) T_{true} ; (b) T_{false1} ; (c) T_{false2} ; (d) three targets placed in parallel

温。因此,目标显著图中各像素的显著值与温度有关,通常情况下温度越高的区域红外特性越明显,显著值就越高,该区域显著性就越强。从图 5(d)能够看出, T_{false1} 与 T_{true} 的像素显著值分布更相似。

根据式(6)计算得到的 T_{true} 和 T_{false1} 、 T_{true} 和 T_{false2} 之间的显著性对比度分别为 0.2008 和 0.3371。因此,当人型目标保持俯卧姿势时,实木假人目标 T_{false1} 的红外欺骗干扰效能 A_{false1} 为 0.2008,充气假人目标 T_{false2} 的红外欺骗干扰效能 A_{false2} 为 0.3371。值越小,红外欺骗干扰效能越好,因此俯卧姿势实木假人目标的红外欺骗干扰效能大于充气假人目标。



图 6 不同姿态和不同拍摄角度的目标红外图像。(a)(b)(c) 0°、45°和 90°方向拍摄的目标俯卧姿态图像;(d)(e)(f) 0°、45°和 90°方向拍摄的目标站立姿态图像

Fig. 6 Target infrared images with different postures and different shooting angles. (a) (b) (c) Target prone posture images taken at 0°, 45°, and 90°; (d) (e) (f) target standing posture images taken at 0°, 45°, and 90°

利用 GBVS 视觉显著性模型分别计算上述图像中各类目标的主显著值,从而得到不同姿态和不同拍

3.2.3 对比测试不同姿态和不同拍摄角度的目标图像

实验不仅研究了俯卧姿态的人形目标,还研究了站立姿态的人形目标。当人型目标保持俯卧姿态时,拟定图 3 中的拍摄角度为 0°,顺时针每间隔 45°进行一组数据记录,共采集了拍摄角度为 0°、45°和 90°时的目标图像。当人形目标保持站立姿态时,拟定人形目标正前方角度为 0°,同样按照上述要求采集拍摄角度为 0°、45°和 90°时的目标图像。实验采集的不同姿态和拍摄角度的 3 类目标并列放置图像如图 6 所示。

摄角度的各类假人红外欺骗干扰效能评估量值,具体数值如表 1 所示。

表 1 红外欺骗干扰效能评估量值

Table 1 Evaluation values of infrared deception jamming effectiveness

Target posture	Shooting angle	Master saliency value			Infrared deception jamming effectiveness	
		S_{true}	S_{false1}	S_{false2}	A_{false1}	A_{false2}
Prone posture	0°	0.8205	0.6557	0.5438	0.2008	0.3371
	45°	0.5637	0.3997	0.3766	0.2911	0.3318
	90°	0.5718	0.2743	0.2175	0.5203	0.6196
Standing posture	0°	0.8183	0.5841	0.4791	0.2862	0.4146
	45°	0.7020	0.4444	0.3098	0.3670	0.5588
	90°	0.7244	0.4903	0.4315	0.3232	0.4043

对比实木假人目标和充气假人目标的红外欺骗干扰效能评估量值 A_{false1} 和 A_{false2} 能够发现,当真、假人保持不同姿态,并从不同拍摄角度进行图像采集时, A_{false1} 总是小于 A_{false2} ,说明实木假人目标红外欺骗干扰效能大于充气假人目标。该结果与人眼直接观察结果相符,与上述分析结论相吻合,因此所提基于 GBVS 的假目标红外欺骗干扰效能评估方法,即使目标姿态和拍摄角度发生变化时,仍然能够适用于假目标的红外欺骗干扰效能评估。

4 结 论

结合 GBVS 视觉显著性模型,通过同一背景下真

目标和假目标的显著性对比度,量化评估假目标的红外欺骗干扰效能。实验结果表明,无论目标姿态和拍摄角度是否发生变化,该方法总能定量反映单一假目标的红外欺骗干扰效能并区分不同类型假目标的红外欺骗干扰效能。因此,该方法能够作为假目标红外欺骗干扰效能的定量评估方法之一,从而有效检测和提升假目标的各方面性能,达到假目标预期的战术目的。

参 考 文 献

- [1] Lin C J, Chang C C, Lee Y H. Evaluating camouflage design using eye movement data[J]. Applied Ergonomics, 2014, 45(3): 714-723.

- [2] Yang H F, Yin J P. A digital camouflage generation algorithm using color similarity[J]. International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering, 2015, 10(6): 159-164.
- [3] 赵晓枫, 魏银鹏, 杨佳星, 等. 综合相似性在红外目标隐身效果评估中的应用[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(1): 0104004.
Zhao X F, Wei Y P, Yang J X, et al. Application of comprehensive similarity in the evaluation of infrared target stealth effect[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(1): 0104004.
- [4] 郭彤, 华文深, 刘恂, 等. 一种基于高光谱的光学伪装效果综合评价方法[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(10): 101002.
Guo T, Hua W S, Liu X, et al. Comprehensive evaluation of optical camouflage effect based on hyperspectra[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(10): 101002.
- [5] 商立丽, 王慧琴, 王可, 等. 基于Hu矩和TF-KSURF的多测度青铜器铭文相似性度量方法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(8): 0810009.
Shang L L, Wang H Q, Wang K, et al. Multi-measure similarity method for interpreting bronze inscriptions based on Hu moment and TF-KSURF[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(8): 0810009.
- [6] Mondal A, Ghosh S, Ghosh A. Partially camouflaged object tracking using modified probabilistic neural network and fuzzy energy based active contour[J]. International Journal of Computer Vision, 2017, 122(1): 116-148.
- [7] Xue F, Yong C X, Xu S, et al. Camouflage performance analysis and evaluation framework based on features fusion[J]. Multimedia Tools and Applications, 2016, 75(7): 4065-4082.
- [8] Cheng X P, Zhao D P, Yu Z J, et al. Effectiveness evaluation of infrared camouflage using image saliency[J]. Infrared Physics & Technology, 2018, 95: 213-221.
- [9] 丁荣莉, 韩传钊, 谢宝蓉, 等. 红外遥感图像舰船目标检测[J]. 红外技术, 2019, 41(2): 127-133.
Ding R L, Han C Z, Xie B R, et al. Ship target detection in infrared remote-sensing image[J]. Infrared Technology, 2019, 41(2): 127-133.
- [10] Harel J, Koch C, Perona P. Graph-based visual saliency [M]//Schölkopf B, Platt J, Hofmann T. Advances in neural information processing systems 19. Cambridge: The MIT Press, 2007.
- [11] 邱森森, 柴雄力, 邵枫. 一种立体全景图像显著性检测模型[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(8): 0810002.
Qiu M M, Chai X L, Shao F. Saliency detection model for stereoscopic panoramic images[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(8): 0810002.
- [12] 赵鹏鹏, 李庶中, 李迅, 等. 融合视觉显著性和局部熵的红外弱小目标检测[J]. 中国光学, 2022, 15(2): 267-275.
Zhao P P, Li S Z, Li X, et al. Infrared dim small target detection based on visual saliency and local entropy[J]. Chinese Optics, 2022, 15(2): 267-275.
- [13] 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.