

## 基于图像特征的烟幕干扰效能评估方法

刘书信<sup>1,3</sup>, 丁佳麟<sup>2</sup>, 赵 凤<sup>1</sup>, 陈春生<sup>2</sup>

(1. 西南技术物理研究所, 四川 成都 610041; 2. 军事科学院防化研究院, 北京 102205;  
3. 重庆大学 光电工程学院, 重庆 400044)

**摘要:** 烟幕以其施放方式简单、效费比高等优点成为了现代战场的主要干扰手段之一,但目前针对烟幕干扰效能评估的方法较少,且缺少定量评估手段。本文提出了基于图像特征的烟幕干扰效能评估方法(HD-EEMSSJ),通过外场试验获取了真实试验数据并对该方法评估效果进行测试。该方法从导引头跟踪机制出发,将图像的方向梯度直方图特征、深度特征、余弦相似度以及亮度特征进行加权融合,得出量化的评估结果 HD-EEMSSJ 指数,该指数能够更加准确且敏锐地体现出烟幕的动态干扰情况,为后期干扰效果的分级评定提供参考依据。经多组试验数据验证结果表明,HD-EEMSSJ 指数对比传统的图像质量评估方法 PSNR、RFSIM、SSIM 以及本文提出的 EEMSSJ 方法具有更好的评估效果,准确性分别提高了 533.15%、170.2%、26.4% 和 3.25%。

**关键词:** 图像特征; 烟幕干扰; 效能评估; 方向梯度直方图

中图分类号: TN976; TN219 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2025.04.019

## A method for evaluating the effectiveness of smokescreen jamming based on image features

LIU Shu-xin<sup>1,3</sup>, DING Jia-lin<sup>2</sup>, ZHAO Feng<sup>1</sup>, CHEN Chun-sheng<sup>2</sup>

(1. Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China;  
2. Chemical Defense Institute, Academy of Military Sciences, Beijing 102205, China;  
3. College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Smoke screen has become one of the main jamming methods in modern battlefields due to their advantages of a simple deployment method and a high cost-effectiveness ratio. However, there are fewer methods for assessing the jamming effectiveness of smoke screen and lack of quantitative assessment means. In this paper, a method for evaluating the effectiveness of smoke screen jamming based on image features (HD-EEMSSJ, HOG & Depth-Effectiveness evaluation of smoke screen jamming) is proposed, and real experimental data are obtained and the evaluation effect of the method is tested through the field test. Starting from the guide tracking mechanism, the direction gradient histogram features, depth features, cosine similarity and brightness features of the image are weighted and fused to obtain a quantitative evaluation result HD-EEMSSJ index, which can more accurately and keenly reflect the dynamic interference of the smoke screen, and provide a reference basis for the grading of the interference effect in the later stage. The results of multiple sets of experimental data verification show that the HD-EEMSSJ index provides better assessment than the

**作者简介:** 刘书信 (1982 -), 男, 硕士, 研究员, 主要研究方向为光电制导技术和试验与评价技术研究。

**通讯作者:** 陈春生 (1978 -), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为军事化学与烟火技术。E-mail: ccs113@126.com

**收稿日期:** 2024-06-06

traditional image quality assessment methods PSNR, RFSIM, SSIM and the EEMSSJ method proposed by the authors, with accuracy improvements of 533.15 %, 170.2 %, 26.4 % and 3.25 %, respectively.

**Keywords:** image feature; smoke screen jamming; effectiveness evaluation; directional gradient histogram

## 1 引言

随着光电子技术的发展,红外成像制导系统在现代作战武器中应用广泛。烟幕因具有效费比高、施放方式简单等优点<sup>[1]</sup>,在对抗红外成像制导武器的应用中广受各国军事专家青睐<sup>[2]</sup>。一种基于红外导引系统跟踪机制的烟幕干扰效能评估方法能够定量分析制导系统受干扰程度,为烟幕干扰技术的发展提供有力的理论支撑<sup>[3]</sup>,为烟幕干扰的分级评估提供量化标准。

红外成像质量的好坏取决于目标与背景之间的红外辐射差异大小<sup>[4]</sup>。烟幕遮蔽目标时,将大幅衰减红外探测设备接收到的红外辐射,减少目标与背景之间的红外对比度<sup>[5]</sup>,导致红外图像目标特征变得模糊难以分辨。在目标跟踪过程中,目标特征的清晰度极大地影响了跟踪算法的准确度。本文提出了一种基于图像特征的烟幕干扰效能评估方法 HD-EEMSSJ (HOG & Depth-Effectiveness Evaluation of smokescreen jamming),该方法依次对比原始图像和干扰图像目标区域的整体特征(如亮度特征)、局部特征(如边缘特征、纹理特征等),将得到的多种图像特征进行加权融合,得到归一化的评估指标。最后,通过设计外场试验获取烟幕干扰的真实图像数据,并基于该数据对本文提出的评估模型的性能进行比较分析。

## 2 烟幕干扰对跟踪算法的影响

在实际应用中,红外导引头常用的跟踪算法包括对比度跟踪<sup>[6]</sup>和相关度跟踪<sup>[7]</sup>。对比度跟踪利用目标与背景的红外辐射对比度来识别、跟踪目标<sup>[8]</sup>。相关度跟踪是将待搜索图像中与目标模板通过某种函数进行相关性评估,将相关程度最高的子区域作为跟踪目标<sup>[9]</sup>。

图 1 为烟幕干扰对不同跟踪算法造成的影响。烟幕干扰前,图像成像质量较好,目标与背景灰度对比度较高,目标中心所在坐标为(65,65),如图 1(a)所示。当有较薄烟幕对目标进行遮蔽干扰时,导致目标区域与目标模板的灰度对比度下降,对比度跟踪算法无法精准定位目标,目标质心坐标偏移到(46,63),如图 1(b)所示;由于目标区域受烟幕遮

蔽作用明显,导致烟幕干扰前后目标区域相关性变差,相关跟踪算法获取的目标形心坐标偏移到(57,56),如图 1(c)所示。

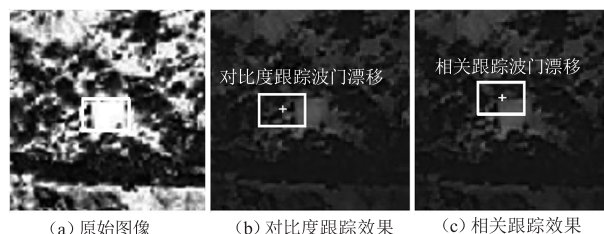


图 1 烟幕干扰对比度跟踪与相关跟踪算法影响效果  
Fig. 1 The impact of smokescreen jamming on contrast tracking and correlation tracking algorithms

## 3 基于图像特征的烟幕干扰效能评估方法

烟幕粒子通过散射、吸收作用,使得红外导引系统接收到的红外辐射减少,同时由于烟幕自身辐射遮挡目标辐射,使得红外对比度大幅下降,导致获取的目标图像边缘及结构等细节特征受损,难以准确捕获、跟踪目标<sup>[10]</sup>。鉴此,可以通过对烟幕干扰前后图像特征的变化角度评估烟幕干扰情况。本文提出了一种基于图像特征的烟幕干扰效能评估方法,从导引头制导机制出发,重点关注目标图像的边缘特征,提取方向梯度直方图特征(Histogram of Oriented Gradient, HOG),对提取的 HOG 特征进行里斯变换,引入相似矩阵(Similarity Matrix, MS)理论<sup>[11]</sup>获取图像特征梯度相似矩阵,加强图像的边缘特征。随后从向量相似度的角度求取 HOG 特征的余弦相似度<sup>[12]</sup>,结合图像的亮度相似度和深度特征,将图像的边缘特征、深度特征、余弦相似度和亮度四种特征加权融合得到归一化的评估指标 HD-EEMSSJ。该评估值的取值范围是[0,1],数值越大表示烟幕干扰越大,反之越小。

### 3.1 深度特征

卷积神经网络在计算机视觉领域应用广泛,这类网络通过接收各类图像作为输入,并利用自学习功能来获取图像的深度特征,不仅能够学习图像中的平移、旋转、尺度变化等具有鲁棒性的特征<sup>[13]</sup>,而且能够自学习到高度抽象的语义信息,获取的图像特征能更好地区别于传统特征,有效减少了不同背

景因素的影响,分类性能更优<sup>[14]</sup>。

本研究采用的是 VGG-16 (Visual Geometry Group Network) 卷积神经网络模型,其架构共包含 1 个输入层 (Input Layer)、5 个卷积层 (Convolution Layers)、5 个池化层 (Pool Layers)、3 个全连接层 (Full Connection Layers) 以及 1 个输出层 (Output Layers),如图 2 所示。其中输入层接收的红外图像尺寸为  $55 \times 50 \times 3$ 。卷积层中用作图像滤波的卷积核尺寸为  $3 \times 3$  像素,滑动步长设定为 1,并在图像边缘补零填充为 1 以维持图像维度。卷积完成后采用激活函数 ReLU 将像素信息变换为特征映射图。池化层采用最大池化 (MaxPooling) 策略,池化窗口

尺寸设定为  $2 \times 2$  像素,滑动步长设定为 2。为增强模型的非线性能力并加速训练过程,全连接层同样采用 ReLU 作为激活函数。同时,引入了 dropout 机制使丢弃率达到 50%,使得模型在每次迭代时都依赖于不同的神经元,以此达到降低过拟合的风险。输出层采用了 Softmax 函数,输出结果设定为烟幕干扰明显、干扰一般和无干扰 3 个类别。

VGG-16 网络架构中使用了多个  $3 \times 3$  像素的小卷积模版取代单一的大尺寸卷积模版,以保证在同样感知视野下,通过多层非线性层,进一步提高网络深度,提升网络的学习效果,有效提升模型的识别效果,并减少参数数量,避免大卷积核带来参数爆炸的问题。

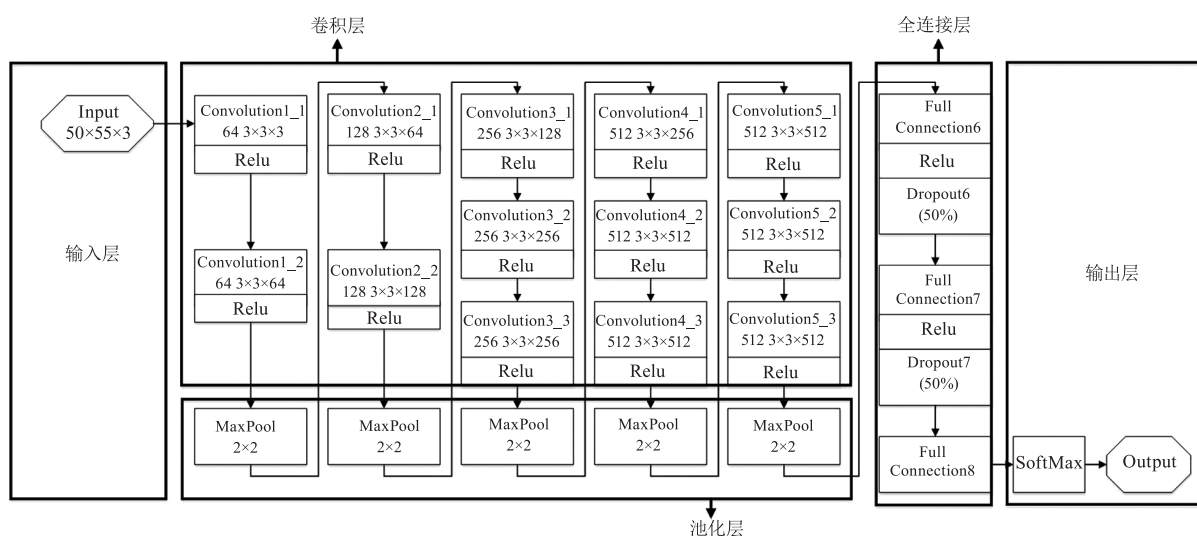


图 2 VGG-16 卷积神经网络

Fig. 2 VGG-16 convolutional neural network

网络层次较浅时,提取的图像特征主要包含目标的颜色、纹理、边缘、棱角等信息,有助于对目标进行精准定位。随着网络层次的加深,所提取的特征则会涵盖更丰富的语义信息,目标中部分像素不再受到外在因素的干扰,利于有效区分目标与背景等其他对象,保证跟踪过程中,目标信息不丢失。Deep-SRDCE<sup>[15]</sup>、DeepLMCF<sup>[16]</sup>等跟踪方法中,将结合深度特征的跟踪方法与使用简易特征的跟踪方法进行对比,发现结合深度特征的相关滤波方法能够更稳健的跟踪目标。

在选取 VGG-16 网络中的深度特征时,本方法参考 HCF<sup>[17]</sup>算法中的处理方式,选择了 Conv 3-3, Conv 4-3 和 Conv 5-3 三个卷积层的输出作为图像通道特征进行计算。由于在神经网络中使用了最大池化层,因此,空间分辨率会随着卷积层深度的增加而

逐渐下降。这导致在 VGG-16 卷积神经网络模型中池化层 5 的卷积特征图像素大小为  $4 \times 5 \times 512$ ,空间大小  $4 \times 5$ ,是输入图像大小  $45 \times 50$  的  $1/10$ ,而池化层 4 的卷积特征图大小和池化层 3 的卷积特征图大小分别为  $8 \times 10$  和  $16 \times 20$ 。

为解决这个问题,本文使用双线性插值法将每个特征映射大小调整为固定的更大尺寸,即统一将三个池化层输出大小固定为  $16 \times 20$ 。

设特征映射为  $h$ ,上采样的特征映射为  $x$ ,则第  $i$  个位置的特征向量为:

$$x_i = \sum_k a_{ik} h_k \quad (1)$$

式中,  $a_{ik}$  为插值权值,取值来自于  $i$  和  $k$  相邻特征向量的位置; $k$  为特征映射中的位置。

将  $X$  表示为大小为  $M \times N \times D$  的特征向量的第  $l$  层,其中  $M$ 、 $N$ 、 $D$  分别表示特性的宽度、高度和通

道数。将  $X^{(l)}$  简单地表示为  $X$ , 不考虑  $M$ 、 $N$  和  $D$  对层  $l$  的依赖关系。将高斯函数标记为:

$$y(m, n) = e^{-\frac{(m-M/2)^2 + (n-N/2)^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

式中,  $\sigma$  为核宽度。网络通过求解最小化问题来学习一个与  $x$  尺寸相同的相关滤波器  $W$ :

$$W^* = \operatorname{argmin}_W \sum_{m,n} \|W \cdot X_{m,n} - y(m, n)\|^2 + \lambda \|W\|_2^2 \quad (3)$$

其中,  $\lambda$  ( $\lambda \geq 0$ ) 为正则化参数, 内积由希尔伯特空间中的线性核诱导, 其中:

$$W \cdot X_{m,n} = \sum_{d=1}^D W_{m,n,d}^T X_{m,n,d} \quad (4)$$

在频域的  $d$ -th ( $d \in \{1, \dots, D\}$ ) 通道可以写成:

$$W^d = \frac{Y \odot \bar{X}^d}{\sum_{i=1}^D X^i \odot \bar{X}^i + \lambda} \quad (5)$$

$$y = \{y(m, n) \mid (m, n) \in \{0, 1, \dots, M-1\} \times \{0, 1, \dots, N-1\}\} \quad (6)$$

$Y$  是由式(6)作傅里叶变换得到的, “ $\bar{\cdot}$ ”表示复数共轭, 算子  $\odot$  是哈达玛(Hadamard)积。给定下一帧的图像补丁, 并用  $Z$  表示第  $l$  层的特征向量, 其大小为  $M \times N \times D$ 。通过下式计算第  $l$  层的相关响应图:

$$f_l = F^{-1} \left( \sum_{d=1}^D W^d \odot \bar{Z}^d \right) \quad (7)$$

其中, 算子  $F^{-1}$  表示傅里叶逆变换。该公式将不同的输出层特征进行相加运算, 最后得到一个  $16 \times 20$  大小的综合深度特征。

在基于图像特征的跟踪算法中, 目标的定位一般是计算相关响应图中的最大值, 所以本文将该响应图作为深度特征进行变换后得到的最终特征值带入选算法进行计算。

### 3.2 烟幕干扰效能评估方法

HD-EEMSSJ 烟幕干扰效果评估方法如图 3 所示, 设参考图像为  $R$ , 干扰图像为  $D$ 。首先对图像  $R$ 、 $D$  分别求方向梯度直方图特征得到  $Hog_R, Hog_D$ , 对其作里斯变换得到  $[R, R_1, R_2]$  和  $[D, D_1, D_2]$ , 利用局部特征的相似函数(局部振幅  $A$ 、局部相位  $\phi$  和局部方向  $\theta$ ), 得到了  $MS$  相似矩阵  $S_M(R, D)$ 。同时, 对 HOG 特征  $Hog_R, Hog_D$  作余弦相似度变换, 得到余弦相似矩阵  $CosSim(R, D)$ 。对图像  $R, D$  分别求深度特征值  $Depth(R, D)$  和亮度  $L(R, D)$ , 最后将四个参数进行加权融合得到最终的干扰效能评估指标 HD-EEMSSJ。

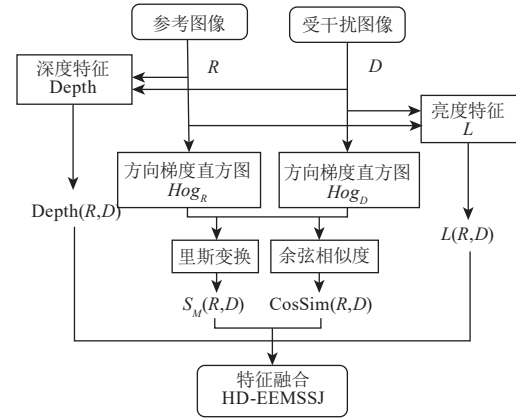


图 3 烟幕干扰效能评估方案流程图

Fig. 3 Flow chart of smoke screen jamming effectiveness evaluation scheme

算法的具体计算步骤为:

(1) 求图像  $R$  和  $D$  的亮度对比度  $L(R, D)$ :

$$L(R, D) = \frac{2l_R(x, y)l_D(x, y) + C_1}{l_R^2(x, y) + l_D^2(x, y) + C_1} \quad (8)$$

式中,  $R, D$  为干扰前后的图像信号;  $l_R, l_D$  分别为参考图像和干扰图像的亮度值;  $C_1$  为很小的正数, 以防止分母接近零造成亮度对比度函数的不稳定。图像的亮度  $l$  定义为:

$$l(x, y) = \log p(x, y) \quad (9)$$

其中,  $p(x, y)$  为单像素的灰度值。

(2) 对参考图像  $R$  和干扰图像  $D$  进行方向梯度直方图特征提取, 得到特征  $Hog_R, Hog_D$ , 方向梯度直方图的提取过程见作者提出的 EEMSSJ<sup>[18]</sup> 评估方法。

(3) 再将方向梯度直方图特征分别作里斯变换, 结合相似矩阵理论, 得到  $MS$  矩阵。

图 4 显示了里斯变换空间在三维欧氏空间中的球坐标系,  $R, R_1, R_2$  是球坐标系中点在三个轴<sup>[19]</sup>上的投影。

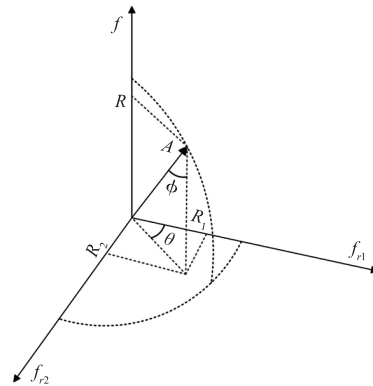


图 4 里斯变换空间图

Fig. 4 Riesz transformation space diagram

在这个空间域内,局部振幅  $A$ 、局部方向  $\theta$  和局部相位  $\psi$  可表示为:

$$\begin{cases} A_R(x,y) = \sqrt{R(x,y)^2 + R_1(x,y)^2 + R_2(x,y)^2} \\ \theta_R(x,y) = \tan^{-1}(-R_2(x,y)/R_1(x,y)) \\ \psi_R(x,y) = \tan^{-1}(-R_{12}(x,y)/R(x,y)) \end{cases} \quad (10)$$

其中,  $R_{12}(x,y) = \sqrt{R_1(x,y)^2 + R_2(x,y)^2}$ ,  $\theta_R(x,y) \in [0, \pi]$ ,  $\psi_R(x,y) \in [0, \pi]$ 。

图像  $R$  和  $D$  在像素点  $(x,y)$  的 MS 相似度为:

$$\begin{cases} S_A(x,y) = \frac{2A_R A_D + C_1}{(A_R)^2 + (A_D)^2 + C_1} \\ S_\theta(x,y) = \exp(-|\tan(\theta_R - \theta_D)|) = \exp\left(-\left|\frac{R_1 D_2 - R_2 D_1}{R_1 D_1 + R_2 D_2}\right|\right) \\ S_\psi(x,y) = \exp(-|\tan(\psi_R - \psi_D)|) = \exp\left(-\left|\frac{R D_{12} - R_{12} D}{R D + R_{12} D_{12}}\right|\right) \end{cases} \quad (11)$$

构造参数  $S_M$  作为 MS 相似矩阵:

$$S_M = S_A \cdot S_\theta \cdot S_\psi \quad (12)$$

(4) 将方向梯度直方图特征  $Hog_R, Hog_D$  分别转换为  $1 \times (M \times N)$  大小的一维数组  $H_R, H_D$ , 图像  $R$  和  $D$  的余弦相似度为:

$$\cos(R,D) = \frac{\sum_{k=0}^{M \times N - 1} H_R H_D}{\sqrt{\sum_{k=0}^{M \times N - 1} H_R^2} \sqrt{\sum_{k=0}^{M \times N - 1} H_D^2}} \quad (13)$$

(5) 计算图像  $R$  和  $D$  的深度特征, 并对其作相关性运算得到深度特征相似矩阵值  $Depth(R,D)$ 。

(6) 最后, 将以上参数进行加权融合得到 HD-EEMSSJ 指数, 取值范围为  $[0, 1]$ :

$$HD-EEMSSJ = 1 - L(R,D)^\alpha \cdot S_M(R,D)^\beta \cdot \cos(R,D)^\tau \cdot Depth(R,D)^\gamma \quad (14)$$

其中,  $\alpha, \beta, \tau, \gamma$  是四种特征的融合权重值, 设置  $\alpha = \beta = \tau = \gamma = 1$ 。

HD-EEMSSJ 由亮度对比函数  $L(R,D)$ , 边缘相似度函数  $S_M(R,D)$ , 余弦相似度函数  $\cos(R,D)$  和深度特征相似度函数  $Depth(R,D)$  组成, 分别体现了烟幕施放前后图像的亮度对比度、边缘结构相似度、HOG 特征余弦相似度以及深度特征的变化程度。由于跟踪算法的性能取决于干扰前后图像质量的相关程度, 鉴此, 可以通过 HD-EEMSSJ 指标对烟幕干扰前后的图像质量及红外导引系统跟踪状态评估烟幕干扰效能, HD-EEMSSJ 值越大,

说明图像质量越差, 烟幕干扰使得图像细节特征损失严重, 跟踪效果越差; 反之, HD-EEMSSJ 值越小, 说明图像质量受烟幕干扰作用不明显, 获取的图像仍然保留了较多有效特征, 烟幕干扰对跟踪性能的影响较小。

#### 4 试验结果与分析

为了验证本文方法评估烟幕干扰效能的有效性, 本文设计了外场试验, 使用某型号发烟罐, 用红外导引系统采集了烟幕对目标的动态干扰过程, 如图 5 所示。利用 HD-EEMSSJ 对烟幕动态遮蔽过程进行评估。

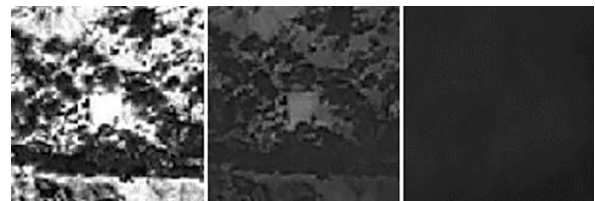


图 5 烟幕干扰过程

Fig. 5 The process of smoke screen interferences

##### 4.1 评估结果分析

将本文提出的 HD-EEMSSJ 评估方法与峰值信噪比<sup>[19]</sup> (PSNR)、多尺度结构相似度<sup>[20]</sup> (SSIM)、RFSIM<sup>[21]</sup> 以及作者提出的基于传统特征的 EEMSSJ 评估方法对两组数据进行对比, 对比结果如图 6 所示。

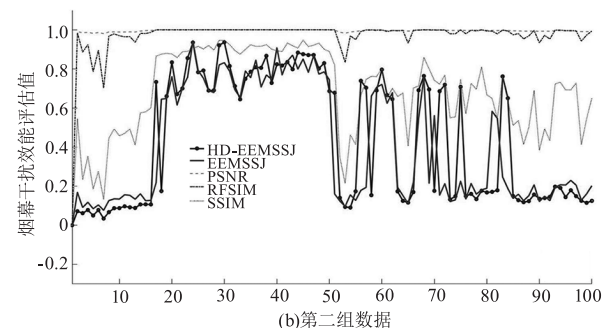
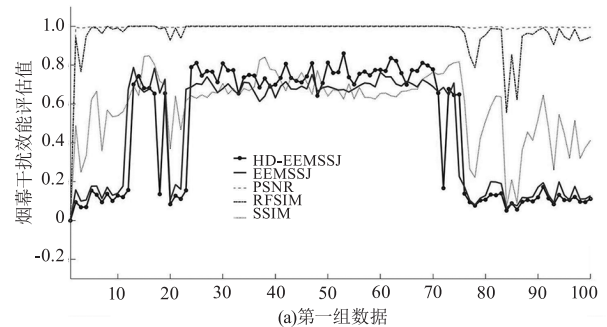


图 6 评估方法对比结果

Fig. 6 Comparison results of evaluation methods

随着烟幕干扰程度的变化,5种评估方法的评估值都有不同程度的响应波动,不同的是各种评估方法对干扰程度的响应结果有细微的差别。如图5(a)和5(b)所示,PSNR和RFSIM几乎没有对烟幕干扰做出具有参考价值的评估结果,曲线全程没有明显波动。SSIM随着烟幕的浓度变化曲线有着明显的波动,但是在烟幕来临前时,曲线已经开始小幅度上升,而在烟幕变化后期,如图5(a)的第80~100帧、图5(b)的第53~100帧,烟幕受风速影响,浓度有不规则的变化直至完全消失,SSIM曲线仍然保持较高的水平且在烟幕消失后波动明显,不能十分准确地评估烟幕干扰红外制导系统的全过程。相比之下,EEMSSJ和HD-EEMSSJ能够较好地表现出烟幕干扰的全过程,在前期烟幕没有对目标造成有效

干扰时,曲线没有明显波动,而烟幕对目标造成有效干扰时,曲线保持在比较高的水平。当烟幕受到气象条件(如风速)影响时,这两种评估方法仍能较为灵敏、准确地评估烟幕干扰效能。本文提出的结合了深度学习网络的HD-EEMSSJ算法对比EEMSSJ对烟幕浓度多个变化点的评估结果更加地准确。

将以上五种评估方法与主观评分<sup>[22]</sup>结果进行对比,求取相关性如表1所示,HD-EEMSSJ的评估结果更符合主观评估,准确性更高,EEMSSJ次之;PSNR和RFSIM的相关性极低,SSIM基本能表示烟幕干扰的大致过程,但准确性不足,符合图5表现的结果。表1两组数据中HD-EEMSSJ均值较EEMSSJ、PSNR、RFSIM和SSIM分别提高了3.25%、533.15%、170.2%和26.4%。

表1 五种评估方法与主观评估的对比

Tab.1 Comparison between five assessment methods and subjective assessment

数据组	评估方法				
	HD-EEMSSJ	EEMSSJ	PSNR	RFSIM	SSIM
1	<b>0.9393</b>	0.9006/↑4.3%	0.1329/↑606.7%	0.3618/↑159.6%	0.6426/↑46.2%
2	<b>0.8288</b>	0.8110/↑2.2%	0.1481/↑459.6%	0.2952/↑180.8%	0.7814/↑6.6%

#### 4.2 评估结果与跟踪效果对比

分别用形心跟踪和相关跟踪算法对烟幕干扰下的目标进行跟踪,将跟踪结果与本文评估结果进行对比,如图7所示,图中左侧纵坐标是烟幕干扰效能评估值,右侧坐标表示跟踪算法输出的跟踪状态,1表示是跟踪状态,0是跟踪失败。

从图7可以看到,当烟幕干扰导致跟踪算法无法稳定跟踪目标时,HD-EEMSSJ评估值都比较高,此时烟幕浓度较大,对目标的遮挡比较明显。在图7(a)的第12~74帧和图7(b)的第17~51帧,HD-EEMSSJ评估值比较高,对应跟踪算法丢失目标状态;在图7(a)的第13~17帧和图7(b)的第51~95帧,HD-EEMSSJ评估值波动程度较大,对应跟踪算法的跟踪结果一直不稳定,时而跟踪上时而丢失目标。由此可见,HD-EEMSSJ评估结果与跟踪输出结果基本一致,甚至在后期烟幕浓度变化区间依旧保持明显波动,能够较好地评估烟幕的干扰效能。

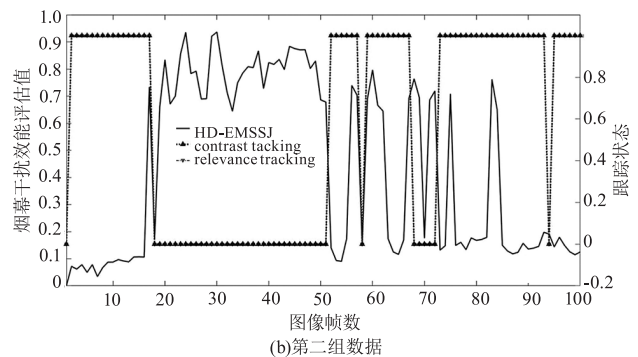
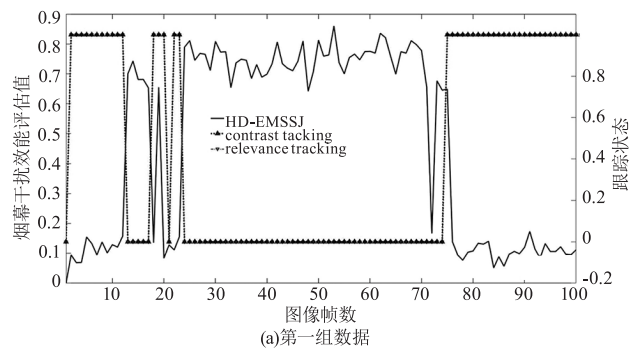


图7 HD-EEMSSJ与跟踪对比

Fig.7 HD-EEMSSJ and tracking comparison

## 5 结 论

本文提出了一种融合方向梯度直方图特征和深度特征的烟幕干扰效能评估方法 HD-EEMSSJ。HD-EEMSSJ 秉持从跟踪角度出发的初心,在传统特征的基础上加入了深度特征,能够更加精准地对烟幕干扰效能进行评估。同时,本文设计并开展外场试验,利用烟幕干扰效能评估方法对试验数据进行评价,试验结果表明,HD-EEMSSJ 指数对比 PSNR、RF-SIM、SSIM 以及 EEMSSJ 方法准确性分别提高了 533.15%、170.2%、26.4% 和 3.25%。

通过与两种跟踪算法的跟踪结果对比得出,HD-EEMSSJ 评估方法不仅能够定量评估烟幕对目标跟踪算法的干扰,并且在烟幕没有有效干扰到跟踪算法时,依旧持续输出波动的评估值以评估烟幕的干扰程度,为后期烟幕干扰效果等级的划分提供有效的理论基础和判断依据。

## 参考文献:

- [1] Li Nan. Impact of smoke jamming on the probability of seeker hit by infrared imaging [J]. *Laser & Infrared*, 2021, 51(3): 358–362. (in Chinese)  
李楠. 烟幕干扰对红外成像导引头命中概率影响[J]. *激光与红外*, 2021, 51(3): 358–362.
- [2] Chen Liuying, Li Xiaoxia, Wang Xiaonong, et al. Assessment methods of smoke screening and interference effect [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(22): 2200004. (in Chinese)  
陈柳莹, 李晓霞, 王晓农, 等. 烟幕遮蔽和干扰效果评价方法研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(22): 2200004.
- [3] Zhao Feng, Liu Shuxin, Jiang Huhai, et al. Comparative study on effectiveness of image features in assessing smokescreen interference [J]. *Laser & Infrared*, 2023, 53(6): 919–926. (in Chinese)  
赵凤, 刘书信, 姜湖海, 等. 图像特征对烟幕干扰的效能评估对比研究[J]. *激光与红外*, 2023, 53(6): 919–926.
- [4] Li Yong, Jiang Ping, Zhao Feiyu. Research on pyrotechnic jamming technology for infrared imaging guidance [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2018, 33(6): 19–23, 28. (in Chinese)  
李永, 姜萍, 赵非玉. 红外成像制导的烟火干扰技术研究[J]. *光电技术应用*, 2018, 33(6): 19–23, 28.
- [5] Hua Chao, Liao Shouyi, Zhang Zuoyu, et al. Simulation research on jamming efficiency about the smoke screen against infrared seeker [J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49(2): 217–221. (in Chinese)  
花超, 廖守亿, 张作宇, 等. 烟幕对红外导引头干扰效果仿真研究[J]. *激光与红外*, 2019, 49(2): 217–221.
- [6] Li Linyuan, Jia Ruchun, Huagn Dejun. Design and research of multi-model target detection and tracking based on SRIO (SerialRapidIO) [J]. *Automation and Instrumentation*, 2019, 39(5): 84–88. (in Chinese)  
李林原, 贾如春, 黄德军. 基于 SRIO (SerialRapidIO) 多模型目标检测跟踪系统设计与研究[J]. *自动化与仪器仪表*, 2019, 39(5): 84–88.
- [7] Ye Qiudi, Yuan Liang, Lü Kai. Kernelized correlation tracking algorithm with scale adapting and feature fusion [J]. *Computer Engineering and Design*, 2022, 43(2): 420–426. (in Chinese)  
叶秋笛, 袁亮, 吕凯. 特征融合的尺度自适应核相关跟踪算法[J]. *计算机工程与设计*, 2022, 43(2): 420–426.
- [8] Wang Siyuan, Yao Zhijun. A fast and stable contrast tracking method [J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2017, 40(5): 81–83, 108. (in Chinese)  
王思远, 姚志均. 一种快速稳定的对比度跟踪方法[J]. *舰船电子对抗*, 2017, 40(5): 81–83, 108.
- [9] Lu Yulong, Li Chenglong, Tang Jin, et al. Selecting reliable correlation filter for real-time multimodal tracking [J]. *Journal of Anhui University: Natural Science Edition*, 2019, 43(3): 33–38. (in Chinese)  
鲁玉龙, 李成龙, 汤进, 等. 基于可靠相关度的实时多模态目标跟踪方法[J]. *安徽大学学报: 自然科学版*, 2019, 43(3): 33–38.
- [10] Xue Peng, Dong Wenfeng, Luo Wei. Research on the jamming effects of smoke screen on target identification capability of photoelectric guidance [J]. *Laser & Infrared*, 2018, 48(3): 374–378. (in Chinese)  
薛鹏, 董文锋, 罗威. 烟幕对光电制导目标识别能力干扰效果研究[J]. *激光与红外*, 2018, 48(3): 374–378.
- [11] ZHANG L, ZHANG L, MOU XQ, et al. FSIM: a feature similarity index for image quality assessment [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2011, 20(8): 2378–2386.
- [12] Zhao Baogui, Zhao Dehui, Dong Zongge, et al. Evaluation and analysis of optical camouflage efficiency based on cosine similarity [J]. *Laser Technology*, 2022, 46(2): 260–266. (in Chinese)  
赵保贵, 赵德辉, 董宗戈, 等. 基于余弦相似度的光学

- 伪装效能评估分析[J]. 激光技术, 2022, 46(2): 260-266.
- [13] Luo Huilan. Adaptive weighted object tracking algorithm with continuous convolution operator[J]. Journal of Image and Graphics, 2019, 24(7): 1106-1115. (in Chinese)  
罗会兰. 结合连续卷积算子的自适应加权目标跟踪算法[J]. 中国图象图形学报, 2019, 24(7): 1106-1115.
- [14] YAO AB, LIN XG, WANG GJ, et al. A compact association of particle filtering and kernel based object tracking [J]. Pattern Recognition, 2012, 45(7): 2584-2597.
- [15] Wibowo S A, Lee H, Kim E Y, et al. Collaborative learning based on convolutional features and correlation filter for visual tracking[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2018, 16(1): 335-349.
- [16] WANG MM, LIU Y, HUANG ZY. Large margin object tracking with circulant feature maps[J]. 30th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Honolulu: IEEE, 2017: 4800-4808.
- [17] ZHANG Fan, CHANG Shuo. Hierarchical convolutional features fusion for visual tracking[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1651(1): 012134.
- [18] LIU Shuxin, ZHAO Feng, JIANG Huhai, et al. A novel effectiveness evaluation method of smokescreen jamming based on the fusion of directional gradients and local texture features[J]. AIP Advances, 2022, 12(11): 115107.
- [19] Xiao Xiangyuan, Jing Wenbo, Zhao Haili. An improved image enhancement algorithm based on the peak-signal to noise ratio[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2017, 40(4): 83-86, 92. (in Chinese)  
肖祥元, 景文博, 赵海丽. 基于峰值信噪比改进的图像增强算法[J]. 长春理工大学学报: 自然科学版, 2017, 40(4): 83-86, 92.
- [20] YAO Juncai, SHEN Jing, YAO Congying. Image quality assessment based on the perceived structural similarity index of an image[J]. Math Biosci Eng, 2023, 20(5): 9385-9409.
- [21] ZHANG Lin, ZHANG Lei, MOU Xuanqin. RFSIM: a feature based image quality assessment metric using Riesz transforms[C]//IEEE International Conference on Image Processing. Hong Kong: IEEE, 2010: 321-324.
- [22] Gao Wei. Test and evaluation of electronic jamming effect on precision guided weapon systems[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2018. (in Chinese)  
高卫. 精确制导武器系统电子干扰效果试验与评估[M]. 北京: 国防工业出版社, 2018.