

基于局部特征融合的烟幕干扰效能评估方法

丁佳麟¹, 张奇¹, 张远鹏¹, 李东方¹, 陈春生^{1,2}

(1. 军事科学院 防化研究院, 北京 102205; 2. 核生化灾害防护化学全国重点实验室, 北京 102205)

摘要:烟幕在对抗精确制导武器的应用中具有效费比高、施放简单的特点,是光电对抗最有效的无源干扰手段之一。针对现行烟幕干扰效能评估指标大多基于烟幕干扰材料自身干扰性能,少有考虑烟幕与其干扰对象间作用机理的现状。本文分析了烟幕对红外成像导引系统图像质量的影响情况,基于图像灰度特征与结构相似度特征,并结合烟幕对目标图像的局部遮挡特征,创新提出了局部遮挡特征加权的结构相似度(Local Feature Weighted Structural Similarity, LFWSIM)指标,并通过外场试验验证了指标的适用性。试验结果表明,LFWSIM克服了衰减率指标不适用于评估目标图像亮度发生突变场景的劣势,且相比于皮尔逊相关系数(Pearson Linear Correlation Coefficient, PLCC)、图像结构相似度(Structural Similarity, SSIM)、复小波结构相似度(Complex Wavelet Structural Similarity, CW-SSIM)指标相关度变化幅度更大,对烟幕干扰作用更加敏感,评价结果更加符合烟幕实际干扰效果;在烟幕完全遮蔽目标区域时,LFWSIM指标相关度数值标准差为0.053,具有更小的波动幅度,评价结果更符合人眼视觉特性。

关键词:烟幕干扰;效能评估;图像质量;红外末制导;光电对抗

中图分类号:TN976;TN219 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2026.02.018

Evaluation method of smoke jamming effectiveness based on local feature fusion

DING Jia-lin¹, ZHANG Qi¹, ZHANG Yuan-peng¹, LI Dong-fang¹, CHEN Chun-sheng^{1,2}

(1. Chemical Defense Institute, Academy of Military Sciences, Beijing 102205, China;

2. State Key Laboratory of Chemistry for NBC Hazards Protection, Beijing 102205, China)

Abstract: Smoke screen, characterized by its cost-effectiveness and ease of deployment, is one of the most efficient passive countermeasures in electro-optical for countering precision-guided weapons. However, existing evaluation indexes for smokescreen jamming efficiency are predominantly focus on the inherent jamming performance of the smoke-screen materials themselves, with limited consideration of the interaction mechanisms between smokescreen and their targets. To address this gap, an analysis is conducted on the impact of smokescreens on the image quality of infrared imaging guidance systems. Based on image grayscale features and structural similarity features, and incorporating the local occlusion characteristics of the smoke screen on target images, a Local Feature Weighted Structural Similarity (LFWSIM) index is innovatively proposed. And the applicability of the index is verified through field experiments. The experimental results demonstrate that LFWSIM overcomes the limitation that the attenuation rate is not suitable in scenarios where target area luminance abruptly changes before and after smokescreen deployment. Compared with the Pearson Linear Correlation Coefficient (PLCC), Structural Similarity (SSIM) and Complex Wavelet Structural Similarity (CW-SSIM) index, LFWSIM has a larger change in correlation degree, is more sensitive to the interference effect of smoke screen, and the evaluation results are more in line with human eye visual characteristics. When the smoke screen completely obscures the target area, the standard deviation of the correlation degree value of LFWSIM is 0.053, with a smaller fluctuation amplitude, and the evaluation results are more in line with human eye visual characteristics.

作者简介:丁佳麟(2000-),男,硕士研究生,研究方向为烟幕干扰效能评估技术。E-mail:1434465833@qq.com

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:2025-05-09;修订日期:2025-07-15

larity (CW-SSIM), the LFWSIM demonstrates greater sensitivity to smokescreen jamming, with greater amplitudes of numerical variations that are consistent with the actual smokescreen jamming effect. Moreover, when the target area is fully obscured by smokescreen, the LFWSIM correlation exhibits a standard deviation of 0.053, indicating superior stability and better consistency with human visual perception.

Keywords: smoke jamming; effectiveness evaluation; image quality; infrared terminal guidance; opto-electronic countermeasure

1 引言

随着光电技术的迅速发展,大量的光电侦察、制导武器被投入战场,这些光电设备不受亮度条件制约,可在夜间和低能见度环境下工作,一定程度上实现了全天时、全天候作战等优势^[1-3]。烟幕作为国防领域中一种软防护手段,在近几十年来的现代化战争中表现优异。实战证明,价格低廉的烟幕可使价值几十万甚至上百万美元的精确制导武器失效,具有高效费比,是光电对抗中最实用、最有效的手段之一。

世界主要军事强国十分重视烟幕在国防领域的重要地位,大力开展新型发烟剂与发烟装备研究^[4]。可见,烟幕干扰技术是随着精确制导技术的发展而发展,在对抗与反对抗的较量中,烟幕干扰技术必须要与精确制导技术的发展相匹配才能在战场上起到干扰作用^[5]。目前,烟幕技术领域相关学者大多基于烟幕干扰材料及发烟装备单装的干扰性能进行烟幕干扰效能评估,采用的评估指标主要包括烟幕衰减率^[6-8]、质量消光系数^[9]、遮蔽质量^[10]、烟幕遮蔽尺寸^[11]、烟幕形成时间^[12]等。但这些评估指标主要反映了烟幕干扰材料和发烟装备单装性能,与实际战术运用中的烟幕干扰效能评估的内涵不同。实际战术运用中,烟幕干扰效能是指在一定战术配置条件下,发烟器材对光电制导武器产生干扰和破坏、保护重要目标所能达到的程度,其与烟幕使用环境、对抗对象、战术战法息息相关。因此,现行烟幕干扰性能评价指标及方法与实战背景下烟幕干扰效能评估存在差异;同时,在外场烟幕干扰效能评估试验中,这些指标测试评价过程复杂,评估结果受气象条件影响较大,难以准确反映烟幕的干扰效果。

鉴此,为准确评估野外条件下烟幕对红外导引系统的干扰效能,本文首先分析了烟幕干扰对红外成像导引系统图像质量的影响,然后基于《GJB6742—2009 烟幕干扰效果评定准则》中的相似度准则,采用图像灰度与结构相似度特征描述烟幕干扰前后图像质量变化情况,同时结合外场烟幕

对目标遮蔽过程呈现隐时现、局部遮挡的特点,引入目标局部遮挡特征,最后构建了局部特征加权的结构相似度评估指标,并通过外场试验验证了指标的适用性。

2 烟幕对红外导引系统图像质量影响分析

红外成像导引系统是基于目标及其背景的红外热图像,实现对目标的识别与跟踪^[13]。烟幕对红外成像导引系统干扰过程可由图 1 所示。在目标探测阶段,烟幕干扰通过衰减红外探测系统接收的目标辐射,降低其工作距离,使其无法探测目标;在目标识别阶段,烟幕干扰衰减目标辐射,消弱目标特征,使红外导引系统无法探测或难以识别目标;在目标捕获跟踪阶段,烟幕干扰衰减目标辐射,削减目标特征,改变目标与背景对比度,使导引系统难以稳定捕获跟踪目标,无法将目标置于导弹有效杀伤范围内。

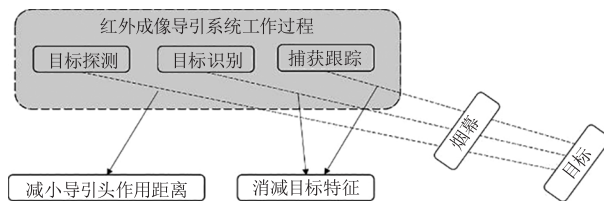


图 1 烟幕对红外成像导引系统干扰过程

Fig. 1 The jamming process of smoke on infrared imaging guidance system

综上所述,烟幕对红外导引系统的干扰主要体现在目标探测、目标识别以及捕获跟踪阶段,通过衰减红外探测器接收的目标红外辐射,改变目标图像灰度值,模糊边缘、结构特征,导致红外成像导引系统失效。因此,通过分析烟幕干扰前后成像质量变化情况,可以定量评估烟幕的干扰效能。

图 2 为烟幕干扰前后红外成像系统采集的目标图像。可知,烟幕对建筑目标成像质量的影响主要体现在:一是目标区域内图像灰度特征发生消弱,像素灰度值发生大幅下降;二是建筑目标与周围背景亮度对比度降低,导致建筑物边缘轮廓、结构特征模糊;三是对建筑目标造成局部遮挡,丢失部分细节特征。以上三个因素共同导致了图像质量的下降。鉴此,本文综合考虑图像灰度特征、结构相似度特征、

局部遮挡特征构建烟幕干扰效能评估指标。



(a) 烟幕干扰前建筑目标 (b) 烟幕干扰后建筑目标

图2 烟幕干扰前后目标图像

Fig. 2 Target images before and after smoke screen jamming

3 局部遮挡特征加权的结构相似度指标

在烟幕实际运用中,图像灰度特征、图像结构相似度特征及局部遮挡特征共同导致图像质量的下降,仅从单一特征评估烟幕干扰对图像质量的影响将会造成图像部分细节特征的丢失,无法充分提取图像丰富的语义信息,评价结果显然是不全面的。同时,采用单一特征指标评价图像质量时,其相关度数值可能受目标区域尺寸影响存在波动,指标适用性有待验证^[14]。鉴于此,本文基于图像灰度与结构相似度评价指标,结合外场烟幕对目标遮蔽过程呈现隐时现、局部遮挡的特点,引入目标区域遮挡比描述目标局部特征,创新提出局部遮挡特征加权的图像结构相似度评价指标(Local Feature Weighted Structural Similarity, LFWSIM),该指标计算方法为:

$$LFWSIM = (1 - D)^\alpha \cdot PLCC^\beta \cdot SSIM^\gamma \quad (1)$$

式中, $(1 - D)$ 为烟幕干扰后目标区域未遮挡比例,用于描述烟幕干扰后目标图像局部遮挡特征,取值范围为 $0 \sim 1$ 之间,当 $(1 - D)$ 越接近 0 时,表示烟幕干扰对目标区域遮挡比例越大。PLCC 为皮尔逊相关系数,用于描述烟幕干扰前后目标图像灰度特征的相关程度;SSIM 为图像结构相似度,用于描述烟幕干扰前后目标图像结构特征的相关程度。 α, β, γ 是权重参数,用于调整三个评估指标的相对重要性,本文中 α, β, γ 分别取 1 。由式(1)可知,LFWSIM 的数值范围在 $0 \sim 1$ 之间,其值越小说明烟幕干扰前后目标区域差异越大,烟幕干扰效果越好。LFWSIM 指标只需分析烟幕干扰前后目标图像的相似程度,即可反映烟幕的干扰效果。因此,该指标测试评价过程具有可操作性强、评估结果更贴近于烟幕对红外成像设备实际干扰效果的优势。LFWSIM 中目标图像局部遮挡特征、灰度特征及图像结构相似度特征描述方法如下所述。

3.1 局部遮挡特征

目标区域遮挡比是基于烟幕衰减率测试评价方法提出的,衰减率计算方法认为只要目标某点的衰

减率达到 85% 时,烟幕就能实现有效遮蔽。但红外成像导引系统在寻找、锁定目标时,探测器所捕获的信息来源于整个目标区域,仅用目标某一点处的衰减率进行评价显然是不全面的。鉴此,本文在《GJB5323-2004 烟幕对红外热像仪的遮蔽干扰性能室内试验方法》中衰减率单点测试的基础上,提出将目标区域中每一像素点的衰减率进行计算,见公式(2),构建目标区域衰减率矩阵,见公式(3),将衰减率大于 85% 的像素点作为有效遮挡点,如图3所示。统计目标区域中有效遮挡点的个数,将其与目标区域总像素点数之比作为目标区域遮挡比。通过比较目标区域遮挡比的变化可体现烟幕对目标图像的局部遮挡情况,从而反映烟幕的干扰效能。

$$\tau_{s(i,j)} = 1 - \frac{L_{T_4(i,j)} - L_{T_3}}{L_{T_2(i,j)} - L_{T_1}} \times 100\% \quad (2)$$

式中, $\tau_{s(i,j)}$ 为目标区域内第 i 行 j 列像素点的衰减率, $L_{T_2(i,j)}$ 与 $L_{T_4(i,j)}$ 分别为烟幕干扰前后目标区域第 i 行 j 列像素点灰度值。 L_{T_1} 与 L_{T_3} 分别为烟幕干扰前后背景区域灰度均值。

$$M = \begin{bmatrix} \tau_{s(1,1)} & \cdots & \tau_{s(1,j)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \tau_{s(i,1)} & \cdots & \tau_{s(i,j)} \end{bmatrix} \quad (3)$$

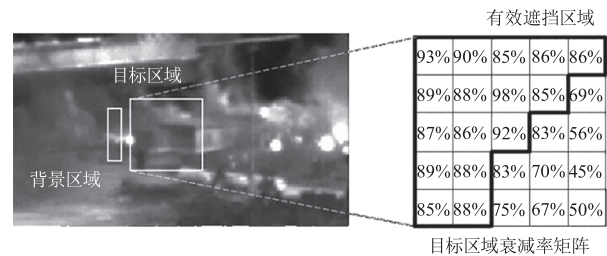


图3 目标衰减率矩阵及有效遮挡区域示意图

Fig. 3 Attenuation rate matrix and effective occlusion area

计算试验图像目标区域中有效遮挡点的数量,将目标区域内有效遮挡点的个数与目标区域的总像素个数之比作为目标区域遮挡比,见式:

$$D = \frac{S}{S_0} \quad (4)$$

式中, S 为目标区域内有效遮挡点的像素个数, S_0 为目标区域的总像素数。

3.2 图像灰度特征

灰度特征是红外图像的基本特征,图像像素灰度值直接体现了物体对应位置的热辐射强度。因此,通过分析烟幕干扰前后图像像素灰度特征的相关程度,可以直观反映烟幕干扰效果。皮尔逊相关系数^[15] (Pearson Linear Correlation Coefficient, PL-

CC)常用于评价两幅图像灰度特征的相似程度,其评价原理如式:

$$PLCC = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} (f(i,j) - \bar{f}(i,j)) \cdot (f_s(i,j) - \bar{f}_s(i,j))}{\sqrt{\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} (f(i,j) - \bar{f}(i,j))^2 \cdot \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} (f_s(i,j) - \bar{f}_s(i,j))^2}} \quad (5)$$

式中: $f(i,j)$ 与 $f_s(i,j)$ 分别为烟幕干扰前后图像第*i*行*j*列像素点的灰度值, $\bar{f}(i,j)$ 与 $\bar{f}_s(i,j)$ 分别为烟幕干扰前后图像的平均灰度值。PLCC数值均介于0和1之间,其数值的大小反映了烟幕干扰效果的强弱,其值越小,说明干扰前后的图像相关程度越低,烟幕干扰效果越好。

3.3 结构相似度特征

图像结构相似度(Structural Similarity, SSIM)指标是利用图像像素亮度、对比度及结构信息来表征两幅图像的相似性^[16-18],其表达式:

$$SSIM = L(x,y) \cdot C(x,y) \cdot S(x,y) \quad (6)$$

该指标采用烟幕干扰前后图像灰度均值 μ_x 、 μ_y 评估亮度相似性 $L(x,y)$;烟幕干扰前后图像标准差 σ_x 、 σ_y 评估对比度相似性 $C(x,y)$;烟幕干扰前后图像协方差 σ_{xy} 评估结构相似度 $S(x,y)$,计算原理如式(7)~(9)。

$$L(x,y) = \frac{2\mu_x\mu_y + Z_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + Z_1} \quad (7)$$

$$C(x,y) = \frac{2\sigma_x\sigma_y + Z_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + Z_2} \quad (8)$$

$$S(x,y) = \frac{\sigma_{xy} + Z_3}{\sigma_x\sigma_y + Z_3} \quad (9)$$

式中: Z_1 、 Z_2 、 Z_3 为常数,通常:

$$\begin{aligned} Z_1 &= (K_1 \cdot L)^2 \\ Z_2 &= (K_2 \cdot L)^2 \\ Z_3 &= Z_2/2 \end{aligned} \quad (10)$$

一般地, $K_1 = 0.01$, $K_2 = 0.03$, L 为像素的动态范围,红外图像中 $L = 255$ 。在图像质量评价时,SSIM的数值范围在0~1之间,其值越大,说明烟幕干扰前后的图像越相似,烟幕干扰效果越差。当SSIM为1时,说明烟幕干扰前后图像完全一样,此时没有干扰效果;当SSIM为0时,说明两幅图像完全不一样,此时干扰效果最好。

4 试验测试方法

试验地点位于某水库岸边,共架设2个观测点。其中,1号观测点位于距目标距离约为1800 m,海拔

高度为220 m处的山坡。2号观测点位于距目标距离约为8000 m,海拔高度为275 m的山坡。试验主导风向为西南风。图4为烟幕干扰效能评估试验场地布设图。测试点、目标及发烟点的相对位置及试验主导风向如图4中所标注。

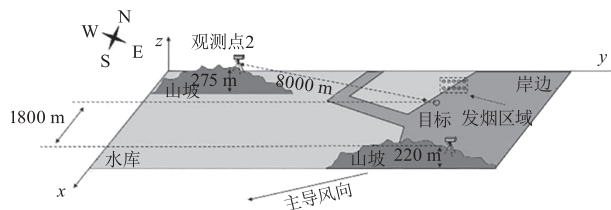


图4 烟幕干扰效能评估试验场地布设图

Fig. 4 Smoke jamming effectiveness evaluation test site map

高度为220 m处的山坡。2号观测点位于距目标距离约为8000 m,海拔高度为275 m的山坡。试验主导风向为西南风。图4为烟幕干扰效能评估试验场地布设图。测试点、目标及发烟点的相对位置及试验主导风向如图4中所标注。

试验观测设备采用中波红外热像仪 I、中波红外热像仪 II,试验发烟器材烟幕剂为炭黑。1号观测点(中波红外热像仪 I)与2号观测点(中波红外热像仪 II)对目标进行观测。试验发烟器材、目标及其基本参数见表1。

表1 试验参试设备及基本参数

Tab. 1 Test equipment and basic parameters

试验器材与设备	基本参数	数量
中波红外热像仪 I (观测点1)	探测阵列:640 pixel × 512 pixel 视场角:11° × 8.8° 焦距:25 mm	1
中波红外热像仪 II (观测点2)	探测阵列:640 pixel × 512 pixel 视场角:4° × 6°	1
发烟器材	烟幕剂:炭黑	20
建筑物	尺寸:35 m × 12 m × 6 m	1

5 试验结果及讨论

为验证 LFWSIM 指标适用性,采用 PLCC、SSIM、复小波结构相似度^[19](Complex Wavelet Structural Similarity, CW-SSIM)指标与本文提出的 LFWSIM 指标分析烟幕干扰前后图像相关度变化情况;采用现行烟幕干扰效能评估指标中的衰减率指标(τ_x)对烟幕干扰效果进行评估,对比分析 PLCC、SSIM、CW-SSIM、LFWSIM 以及衰减率指标评估效果。如图5所示,1号观测点视场选取尺寸为78 pixel × 48 pixel 的建筑背面作为目标,2号观测点视场选取尺寸为32 pixel × 20 pixel 的建筑正面作为目标。图6与图7分别为典型帧下建筑背面与正面烟幕干扰序列图像。

如图6所示,烟幕于第23帧进入目标区域,此时建筑结构特征清晰,第83帧时,目标区域烟幕浓度较低,人眼仍可分辨目标。在第252帧时,目标区

域烟幕浓度增加,建筑边缘特征模糊,人眼无法分辨目标。第 437 帧时,随着烟幕消散,建筑目标轮廓逐渐清晰。

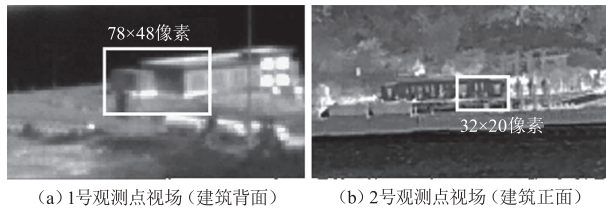


图 5 烟幕干扰效能评估试验场景

Fig. 5 Smoke jamming effectiveness evaluation test scenario

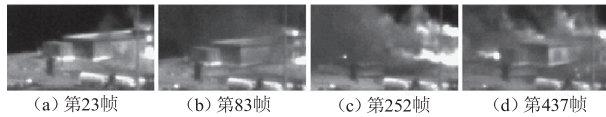


图 6 典型帧下建筑背面烟幕干扰图像

Fig. 6 Smokescreen jamming images of the back of the building under typical frames

如图 7 所示,烟幕干扰过程与图 6 相似。第 136 ~ 255 帧时,可以观察到烟幕受气象条件影响,建筑目标呈现时隐时现的状态。第 255 帧时,由于发烟器材布设点位与建筑目标距离十分接近,烟幕形成的瞬间,烟幕粒子温度较高,烟幕对建筑目标的干扰作用主要体现在烟幕自身辐射遮蔽。

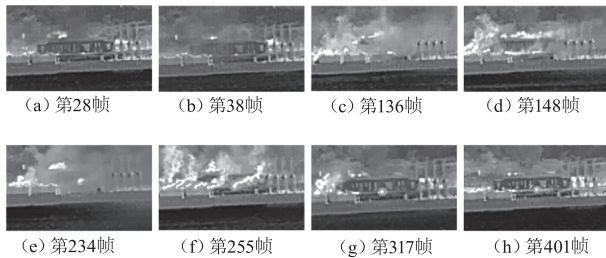


图 7 典型帧下建筑正面烟幕干扰图像

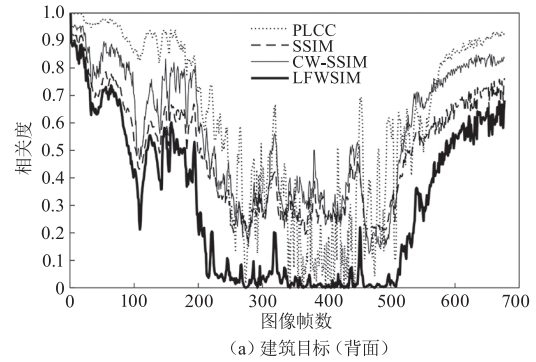
Fig. 7 Smokescreen jamming images of the building façade under typical frames

5.1 图像质量评价指标对比分析

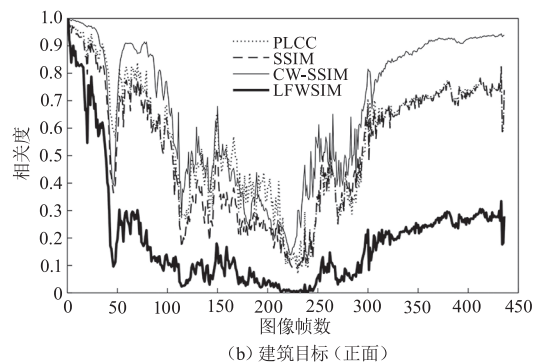
为分析 LFWSIM 指标对图像相关度变化敏感程度,采用 PLCC、SSIM、CW-SSIM(分解层数 level = 2,方向数 ori = 16)、LFWSIM 指标对烟幕干扰前后目标图像进行相关度评价,对比分析 PLCC、SSIM、CW-SSIM、LFWSIM 指标相关度数值变化情况,验证 LFWSIM 指标评估效果。图 8 为 PLCC、SSIM、CW-SSIM、LFWSIM 相关度随图像帧数变化曲线。

由图 8 可知,PLCC、SSIM、CW-SSIM、LFWSIM 相关度数值随图像帧数的增加,呈现先减小后增大的趋势,符合外场烟幕干扰特点。其中,CW-SSIM 与 SSIM 指标相关度曲线变化趋势较为接近,且

CW-SSIM 相关度数值均略大于 SSIM。这是由于 CW-SSIM 基于复小波变换,可以从多个尺度和方向分解图像,更加精准地捕捉烟幕干扰前后目标图像的纹理、边缘等特征。LFWSIM 指标由于融合了目标区域局部遮挡特征,其相关度数值相比于 PLCC、SSIM、CW-SSIM 指标变化幅度更大,对烟幕干扰作用更加敏感。



(a) 建筑目标 (背面)



(b) 建筑目标 (正面)







图 8 PLCC、SSIM、CW-SSIM、LFWSIM 指标烟幕干扰效能评估结果

Fig. 8 Evaluation results of smokescreen effectiveness for PLCC, SSIM, CW-SSIM, LFWSIM

由试验图像可知,图 8(a)第 200 ~ 500 帧时目标区域烟幕浓度较高,为进一步研究该干扰过程中各指标评估效果,对该时段内典型帧下各指标评估数值及其目标区域干扰图像进行统计,如表 2 所示。由表 2 第 258 及 265 帧可知,此时烟幕对目标图像遮蔽效果相近,但 PLCC 相关度分别为 0.129 和 0.588,其数值与目标图像遮蔽效果存在差异;而 SSIM、CW-SSIM、LFWSIM 在这两帧下其相关度数值较为接近,与目标图像烟幕遮蔽效果一致,可较好反映烟幕的干扰效能。为对比分析各评估指标相关度数值在烟幕遮蔽效果较好时(如第 200 ~ 500 帧)的波动情况,计算该时段内各评估指标的标准差,如表 2 所示。可知,LFWSIM 的相关度标准差均小于 SSIM、PLCC、CW-SSIM,其数值波动较小,评估结果与人眼视觉特性一致。

表 2 特定帧数下目标区域图像与评估结果

Tab. 2 Images of the target area and evaluation results under specific frames

帧号	50	200	258	265	274	500	200 ~ 500 标准差
目标图像							/
PLCC	0.979	0.709	0.129	0.588	0.016	0.578	0.207
SSIM	0.738	0.484	0.236	0.281	0.225	0.313	0.075
CW-SSIM ^[19]	0.842	0.569	0.273	0.277	0.217	0.282	0.110
LFWSIM	0.696	0.218	0.014	0.041	0.001	0.018	0.053

5.2 LFWSIM 与衰减率指标对比分析

为进一步验证 LFWSIM 指标的适用性,采用现行烟幕干扰效能评估指标中的衰减率分析试验图像,对比分析 LFWSIM 与衰减率指标的评估结果。为利于比较衰减率(τ_x)与 LFWSIM 变化趋势,采用透过率($1 - \tau_x$)进行分析。图 9 为 LFWSIM 与透过率($1 - \tau_x$)指标相关度数值随图像帧数变化曲线。由图 9(a)可知, $1 - \tau_x$ 随图像帧数的增加,其数值波动剧烈,尤其是在第 200 ~ 500 帧时,难以确定其数值变化趋势,无法准确评估烟幕的干扰效能;由图 9(b)所示,

$1 - \tau_x$ 随图像帧数的增加,数值波动十分剧烈且在较多帧数下其数值大于 1,这与透过率的定义是矛盾的。由于目标区域内发烟器材燃烧产生的火光,导致透过率指标无法准确评估烟幕干扰效能。而 LFWSIM 相关度数值始终处于 0 ~ 1 之间,评估结果不受火光的影响。

由上述分析可知,LFWSIM 指标可以克服衰减率指标不适用于评估烟幕干扰前后目标区域亮度发生突变场景的劣势。综上所述,LFWSIM 指标适用于评估野外条件下烟幕的干扰效能。

6 结论

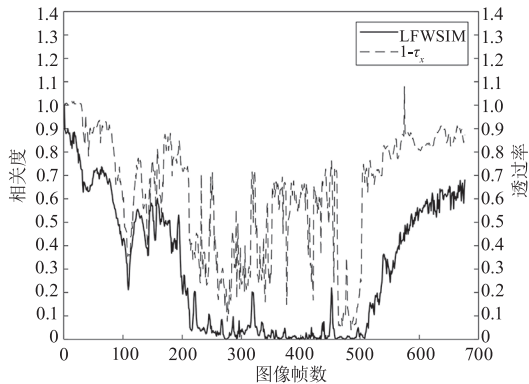
本文通过分析烟幕对红外成像导引系统干扰机理,基于图像灰度、结构相似度特征,并结合外场烟幕对目标遮蔽过程呈现隐时现、局部遮挡的特点,提出采用目标区域遮挡比描述局部遮挡特征,创新构建了局部遮挡特征加权的结构相似度指标。经外场试验验证:

(1) LFWSIM 克服了衰减率指标不适用于评估目标图像出现亮度突变场景的劣势,且相比于 PLCC、SSIM、CW-SSIM 指标对烟幕干扰作用更加敏感。

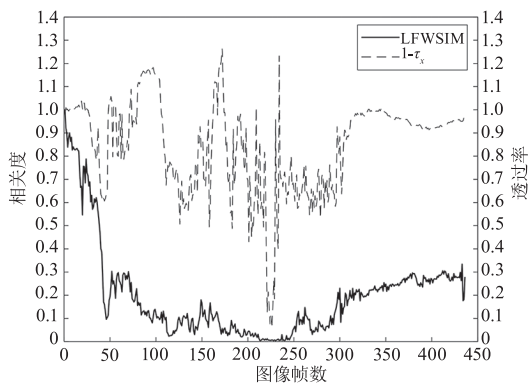
(2) 在烟幕完全遮蔽目标区域时,LFWSIM 指标相关度的标准差为 0.053,均低于 PLCC、SSIM、CW-SSIM 指标,该时段内 LFWSIM 指标相关度数值具有更小的波动幅度,可较好反映烟幕遮蔽效果,评估结果更加符合人眼视觉特性。

参考文献:

- [1] Wang H L, Ning F, Liu J L. Development of aviation electro-optical reconnaissance technology[J]. Journal of Applied Optics, 2022, 43(5): 825 - 832. (in Chinese)
王惠林, 宁飞, 刘吉龙. 航空光电侦察技术发展研究[J]. 应用光学, 2022, 43(5): 825 - 832.
- [2] Wang H L, Du Y L, Ning F, et al. Development of advanced airborne optoelectronic equipment and technology abroad[J]. National Defense Technology, 2023, 44(6):



(a) 建筑目标(背面)



(b) 建筑目标(正面)

图 9 LFWSIM 与衰减率指标烟幕干扰评估结果

Fig. 9 Evaluation results of smokescreen jamming effectiveness for LFWSIM and the attenuation rate

- 44 – 50. (in Chinese)
王惠林, 杜言鲁, 宁飞, 等. 国外先进航空光电装备与技术发展[J]. 国防科技, 2023, 44(6): 44 – 50.
- [3] Guan Z C, Gao X B, Li T P. Research progress of multi-spectrum jammers [J]. *Modern Defense Technology*, 2024, 52(5): 80 – 92. (in Chinese)
管智超, 高欣宝, 李天鹏. 多频谱干扰剂研究进展[J]. 现代防御技术, 2024, 52(5): 80 – 92.
- [4] Ding J L, Chen C S, Li Q W, et al. Evaluation indexes and calculation methods of smoke interference effect [J]. *Infrared*, 2024, 45(3): 29 – 39. (in Chinese)
丁佳麟, 陈春生, 李庆伟, 等. 烟幕干扰效果评估指标及计算方法[J]. 红外, 2024, 45(3): 29 – 39.
- [5] Guo A Q, Gao X B, Li T P. Current situation of smoke screen jamming effectiveness evaluation on guided munitions [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2021, 42(12): 64 – 71. (in Chinese)
郭爱强, 高欣宝, 李天鹏. 烟幕弹对制导弹药的干扰效能评估现状[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(12): 64 – 71.
- [6] Jiang Y, Li W, Song W W, et al. Calculating the transmission rate of electromagnetic wave along any light-path in smoke diffusion model [J]. *Laser & Infrared*, 2021, 51(1): 95 – 99. (in Chinese)
蒋云, 李伟, 宋伟伟, 等. 烟幕扩散模型中任意光路电磁波透过率的计算[J]. 激光与红外, 2021, 51(1): 95 – 99.
- [7] Li N. 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.
- [8] Tang R Z, Zhang T L, Wei X B, et al. An efficient numerical approach for field infrared smoke transmittance based on grayscale images [J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(1): 40.
- [9] Quang S D, Van T N, Trung T N. Obscurant and radiation characteristics of infrared-screening smoke composition based on red phosphorus [J]. *Defence Science Journal*, 2022, 72(3): 353 – 358.
- [10] Wang X Y, Chen H P, Tang H Z. Defining and determining of smoke screening mass [J]. *Journal of Chemical Defence*, 2000, 9(1): 19 – 23. (in Chinese)
王玄玉, 陈海平, 唐宏志. 烟幕遮蔽质量及其实验测定[J]. 防化学报, 2000, 9(1): 19 – 23.
- [11] Li Y. Research on test method of infrared smoke screen shielding effect [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)
李一. 红外烟幕遮蔽效应测试方法研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2020.
- [12] Li X N, Li T P, Zhang K C, et al. Structural design and shielding performance of multi-spectral interfering smoke module [J]. *Acta Armamentarii*, 2023, 44(3): 910 – 918. (in Chinese)
李笑楠, 李天鹏, 张开创, 等. 多频谱发烟组件结构与遮蔽性能[J]. 兵工学报, 2023, 44(3): 910 – 918.
- [13] Gao W, Sun Y F, Wei Y L. Test and evaluation of electronic jamming effect on precision guided weapon systems [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2018. (in Chinese)
高卫, 孙奕帆, 危艳玲. 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.
- [14] Ding J L, Liu S X, Zhang Q, et al. Experimental study on evaluation of smoke interference effectiveness based on image quality [J]. *Laser & Infrared*, 2025, 55(2): 266 – 274. (in Chinese)
丁佳麟, 刘书信, 张奇, 等. 基于图像质量的烟幕干扰效能评估试验研究[J]. 激光与红外, 2025, 55(2): 266 – 274.
- [15] Hui Z W, He K, Feng B, et al. Image quality assessment based on visual characteristics [J]. *Computer Engineering*, 2023, 49(7): 189 – 195. (in Chinese)
惠子薇, 何坤, 冯彝, 等. 基于视觉特性的图像质量评价[J]. 计算机工程, 2023, 49(7): 189 – 195.
- [16] Yao J C, Shen J, Yao C Y. Image quality assessment based on the perceived structural similarity index of an image [J]. *Mathematical Biosciences and Engineering*, 2023, 20(5): 9385 – 9409.
- [17] Dohmen M, Klemens M A, Baltruschat I M, et al. Similarity and quality metrics for MR image-to-image translation [J]. *Scientific Reports*, 2025, 15(1): 3853.
- [18] Paraskevoulakos C, Ghosh S, Andriollo T, et al. Sensitivity study using synthetic 3D image datasets to investigate the effect of noise artefacts on digital volume correlation [J]. *Experimental Mechanics*, 2024, 64(5): 595 – 624.
- [19] Sampat M P, Wang Z, Gupta S, et al. Complex wavelet structural similarity: a new image similarity index [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2009, 18(11): 2385 – 2401.