

文章编号: 1672-8785(2024)03-0029-11

烟幕干扰效果评估指标及计算方法

丁佳麟¹ 陈春生^{1,2*} 李庆伟¹ 张 奇¹

(1. 军事科学院防化研究院, 北京 102205;

2. 国民核生化灾害防护国家重点实验室, 北京 102205)

摘 要: 烟幕作为一种软防护性手段, 在现代光电制导武器的对抗中具有费效比高、研制方便的特点, 因此准确、可靠地评价烟幕的遮蔽效果成为烟幕领域的重要研究问题之一。针对目前评价指标多而杂的现状, 在对烟幕干扰作用机理进行阐述的基础上, 从干扰波段、烟幕释放前后图像质量变化、烟幕作战性能三个方面, 对现有烟幕干扰效果评估指标及方法进行了系统分析与总结, 指出了其优劣、适用场合及局限性, 为相关研究人员提供了思路和启发。为了更加适应实战复杂环境条件下烟幕的干扰效果评估, 指出应从图像质量变化以及烟幕作战性能的角度对烟幕遮蔽效果进行评估, 以期对发烟装备的作战使用与效能评估提供辅助策略。

关键词: 烟幕; 遮蔽能力; 光电对抗; 效果评估; 图像质量

中图分类号: TN972 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2024.03.005

Evaluation Indexes and Calculation Methods of Smoke Interference Effect

DING Jia-lin¹, CHEN Chun-sheng^{1,2*}, LI Qing-wei¹, ZHANG Qi¹

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

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

Abstract: As a kind of soft protective means, smoke screen has the characteristics of high cost-benefit ratio and convenient development in modern opto-electronic guided weapons. Therefore, accurate and reliable evaluation of the smoke screen shielding effect has become one of the important research issues in the field of smoke screens. In view of the current situation of multiple and complex evaluation indexes, based on the description of the mechanism of smoke screen interference, the existing evaluation indexes and methods of smoke screen interference effect are systematically analyzed and summarized from three aspects: interference band, image quality change before and after smoke screen release, as well as smoke screen operational performance. Their advantages and disadvantages, application occasions and limitations are pointed out, which provide ideas and inspiration for relevant researchers. In order to better adapt to the evaluation of smoke screen interference effect under the complex environment conditions in actual combat, it is pointed out that the smoke screen shielding effect should be evaluated from the perspective of image quality change and smoke screen performance

收稿日期: 2023-12-23

作者简介: 丁佳麟(2000-), 男, 陕西咸阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为烟幕干扰效能评估技术。

*通讯作者: E-mail: ccs113@126.com

in this paper, so as to provide auxiliary strategies for the operational use and effectiveness evaluation of smoke equipment.

Key words: smoke screen; masking effect; opto-electronic countermeasure; performance evaluation; image quality

0 引言

随着光电子技术的迅速发展,现代战争的模式已由传统的机械化战争转变为信息化战争,大量的光电制导武器被投入战场。光电制导武器因其打击精度高等优势,在近几十年来的现代化战争中表现优异,使得各国专家开始研究光电干扰技术^[1-3]。烟幕作为一种软防护性手段,在对抗光电制导武器中具有费效比高、研制方便等特点,因此各国大力发展新型烟幕。而如何客观评价烟幕的遮蔽效果,成为烟幕领域重要的研究问题之一。

目前国内外已有大量学者对烟幕干扰效果评估指标及方法进行了研究,但仍没有较为统一的定量评估方法。本文对烟幕干扰效应的基本评估指标及其计算方法进行总结,指出由于各类烟幕干扰效果评估方法各有优势,应针对不同测试条件择优选用。针对战场的复杂环境条件,对基本评价指标存在的优劣、使用场合以及局限性进行分析,并从图像质量变化以及烟幕作战性能的角度对烟幕干扰效果评价指标进行总结。该研究对发烟装备作战使用及定量、分级评估烟幕遮蔽能力具有借鉴作用。

1 烟幕干扰效果评估基本指标及方法

烟幕对精确制导武器的干扰通常是指对其导引头的干扰。常见的导引头光电信号制导波段包括可见光、红外、激光、毫米波等。针对不同波段,干扰原理存在差异。因此,评估烟幕干扰效果的基本指标也应从不同波段进行分析,故分别从可见光、红外、激光、毫米波四个波段对烟幕干扰效果基本指标及方法进行总结分析。

1.1 可见光波段

1.1.1 亮度对比度

烟幕对可见光产生干扰效应的机理是烟幕微粒对可见光的散射和吸收作用削弱了人眼接收到的能量^[4],同时烟幕的释放降低了目标与背景之间的亮度对比度^[5]。

以人眼为例,当目标与背景之间的亮度对比度大于人眼可分辨的亮度对比度时,人眼才能可靠识别目标。若目标亮度为 L_T ,背景亮度为 L_B ,目标与背景之间的视觉对比度为 D ,则人眼能识别物体必须满足^[6]:

$$D = \frac{L_T - L_B}{L_B} \geq D^* \quad (1)$$

式中, D^* 为0.0125,称为人眼的亮度对比度阈值。当目标与背景的对比度小于此值时,以人眼的分辨率无法观察目标;当目标与背景的对比度大于此值时,人眼可以观察到目标^[7]。 D^* 与视场内的平均亮度水平有关。随着视场亮度的逐渐降低,亮度对比阈值将逐渐提升。这就是人眼在夜间分辨目标要比白天困难的原因^[8]。

在目标与观察者之间存在烟幕时,烟幕会导致图像对比度降低。此时的对比度为

$$D_L = \frac{(L_T - L_B) \cdot e^{-\alpha l}}{L_B \cdot e^{-\alpha l} + G} \geq D^* \quad (2)$$

式中, α 为烟幕消光系数; c 为烟幕浓度; l 为烟幕厚度; L_T 为目标亮度或色度; L_B 为背景亮度或色度; G 为烟幕自身辐射亮度。对式(2)分析后可知,烟幕降低了目标与背景的亮度,同时减小了目标与背景的对比度,产生了遮蔽作用。通常将1.25%作为烟幕对可见光形成完全遮蔽时的透过率阈值,此时人眼无法识别目标。

1.1.2 全遮蔽能力

全遮蔽能力(Total Obscuring Power, TOP)是定量表征烟幕干扰效果的评估指标之

一, 其定义为烟幕的透射比 $I/I_0 = 0.0125$ 时单位质量发烟剂所形成的遮蔽面积^[9]。早期的 TOP 测试方法是目视法, 即观察者站在烟箱窗口的一侧, 对侧放置标准电灯泡, 用来提供目标光源。释放烟幕后, 改变发烟剂的质量以及人眼至灯泡的距离, 直至人眼刚好无法观察灯泡发出的光时, 就认为烟幕对人眼实现了全遮蔽^[10]。用 TOP 值进行表征, 按照式(3)计算:

$$TOP = \frac{1}{C_0 L} \quad (3)$$

式中, TOP 为单位光程下单位质量发烟剂生成的烟幕刚好遮蔽人眼时所形成的成烟面积, 单位为 m^2/kg ; C_0 为烟幕箱中单位体积发烟剂的质量, 单位为 kg/m^3 ; L 为人眼与灯泡的距离, 单位为 m 。

利用 TOP 值作为定量表征烟幕干扰效果的指标, 只需测定发烟剂质量与烟幕箱体积之比 C_0 以及光程 L , 而无需测量成烟后的烟幕浓度。因此, 该指标具有原理简单、测试方便的特点, 可作为室内烟幕箱测量法评估烟幕干扰效果的指标。文献[10]已给出具体计算过程。

1.2 红外波段

1.2.1 质量消光系数

烟幕对目标辐射源发射的红外辐射进行吸收、散射的过程称为消光^[11]。根据 Lambert-Beer 定律, 烟幕的透过率可以表示为

$$\tau = \frac{I}{I_0} = \exp(-\alpha C_m L_0) \quad (4)$$

式中, τ 为烟幕透过率, 无量纲; I 为烟幕干扰下透过的辐射强度, 单位为 W/cm^2 ; I_0 为无烟幕干扰下透过的辐射强度, 单位为 W/cm^2 ; α 为烟幕的质量消光系数, 单位为 m^2/g , 且 $\alpha = \alpha_{\text{abs}} + \alpha_{\text{sca}}$, 其中 α_{abs} 与 α_{sca} 分别为吸收系数与散射系数; C_m 为烟幕的质量浓度, 单位为 g/m^3 ; L_0 为红外辐射在烟幕中的传播距离, 单位为 m 。式(4)表明, 当烟幕质量浓度与光程确定时, 透过率仅由消光系数决定。因此,

消光系数可以在一定程度上表征烟幕遮蔽效果。根据式(4), 可推导出质量消光系数的表达式:

$$\alpha = \frac{1}{C_m L_0} \ln \frac{1}{\tau} \quad (5)$$

由式(5)可知, 测量质量消光系数需要求得烟幕质量浓度以及光程。

质量消光系数这一指标来源于发烟剂干扰性能烟箱测试评价, 是发烟剂材料研发及装备论证研制的重要依据。在外场烟幕干扰效果评价中, 由于烟幕常呈现出分层、断续的状态, 烟幕质量浓度及有效光程的测量难度极大, 因此质量消光系数指标在外场测试中不具有普遍适用性。

1.2.2 红外透过率

依据传统透过率定义, 在烟幕干扰前后, 透过的辐射强度的比值称为烟幕透过率, 其表达式为

$$\tau = \frac{I}{I_0} \times 100\% \quad (6)$$

式中, τ 为烟幕透过率, 无量纲; I 为烟幕干扰下透过的辐射强度, 单位为 W/cm^2 ; I_0 为无烟幕干扰条件下透过的辐射强度, 单位为 W/cm^2 。

如图 1 所示, 有烟幕干扰条件下, 红外热像仪所接收的总辐射来源主要有目标黑体辐射、背景辐射、烟幕自身辐射、大气辐射以及探测器内部辐射。当黑体与烟幕存在时, 红外热像仪接收的总辐射出射度可由式(7)计算得

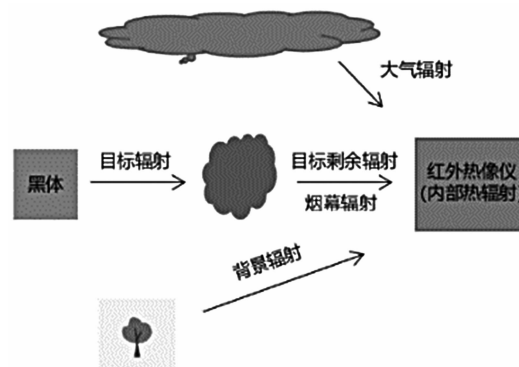


图 1 红外热像仪接收辐射来源

到^[12]:

$$M_{T_4} = \tau_0 [\tau_a \tau_s (\epsilon_{T_b} M_{T_b} + \epsilon_b M_{T_b}) + \epsilon_a M_{T_b} + \epsilon_s M_{T_b}] + \epsilon_d M_{T_b} \quad (7)$$

式中, τ_0 为红外热像仪镜头的光谱透过率; τ_a 为大气光谱透过率; τ_s 为烟幕透过率; ϵ_{T_b} 为黑体光谱发射率; ϵ_b 为背景光谱发射率; ϵ_a 为大气光谱发射率; ϵ_s 为烟幕光谱发射率; ϵ_d 为热像仪内部辐射发射率; M_{T_b} 为 T_b 温度下的标准黑体辐射出射度。

依据黑体辐射斯蒂芬-玻尔兹曼定律, 有

$$M_T = \int_0^\infty M_{\lambda T} d\lambda = \int_0^\infty \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{c_2/\lambda T} - 1)} d\lambda = \sigma T^4 \quad (8)$$

式中, M_T 为黑体辐射出射度; $\sigma = 5.6697 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数。

利用斯蒂芬-玻尔兹曼定律即可求得 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 下所对应的黑体辐射出射度 M_{T_1} 、 M_{T_2} 、 M_{T_3} 、 M_{T_4} 。推导出烟幕的红外透过率表达式:

$$\tau_s = \frac{M_{T_1} - M_{T_2}}{M_{T_3} - M_{T_2}} \times 100\% \quad (9)$$

式中, M_{T_1} 为无烟幕条件下的背景辐射; M_{T_2} 为无烟幕条件下的目标与背景辐射; M_{T_3} 为有烟幕条件下的背景辐射; M_{T_4} 为有烟幕条件下的目标与背景辐射。

由以上烟幕透过率计算方法可以去除干扰辐射的影响, 得到较为准确的烟幕透过率。将其与人为设定的透过率阈值进行比较, 即可定量描述烟幕的干扰效果。若烟幕透过率大于预先设定的阈值, 则干扰无效; 若小于预先设定的阈值, 则干扰有效。目前评价烟幕遮蔽性能大多采用该方法。

在传统烟幕透过率评价方法中, 当烟幕对目标的辐射衰减率大于 85% ($1 - \tau_s \geq 85\%$) 时, 认定为有效干扰。基于战场环境特点, 由于地形、气象环境复杂, 烟幕常呈现分层、断续的状态, 导致烟幕各点衰减率不一, 测试结果随时间变化较为剧烈, 不具有普适性。同时, 由于衰减率测试大多采用单点测量方式, 只能评价烟幕中某一点处的干扰性能。这与实战中基

于图像跟踪的导引头制导机制是脱节的。

1.2.3 红外对比度

烟幕对红外导引头干扰作用的一个重要途径是利用烟幕自身辐射遮挡目标辐射或降低目标与周围背景的对比度, 导致导引头无法探测到目标方位, 使导引头失去原有作用效果。鉴于此, 可将烟幕干扰下的目标背景对比度作为评估烟幕干扰效果的指标之一。根据红外探测器输出的图像, 可以引入对比度的概念。对比度可表示为

$$C = \frac{L - L'}{L'} \quad (10)$$

式中, L 为目标的辐射亮度; L' 为背景的辐射亮度。

根据斯蒂芬-玻尔兹曼定律可知, 烟幕自身辐射出射度为^[13]

$$W_s = \epsilon_s \times \sigma \times T_s^4 \quad (11)$$

式中, ϵ_s 为烟幕等效黑体发射率; T_s 为烟幕温度。同理可得目标辐射出射度:

$$W_o = \epsilon_o \times \sigma \times T_o^4 \quad (12)$$

式中, ϵ_o 为目标等效黑体发射率; T_o 为目标温度。

参考对比度定义, 可以得出烟幕干扰条件下的目标与背景辐射对比度^[14]:

$$\begin{aligned} C_{\text{smoke}} &= \frac{W_1 - W_2}{W_2} \\ &= \frac{W_o \times \tau \times \tau_s - W_s \times \tau}{W_s \times \tau} \\ &= \frac{W_o \times \tau_s - W_s}{W_s} \end{aligned} \quad (13)$$

式中, W_1 为导引头接收的目标辐射出射度; W_2 为导引头接收的烟幕背景辐射出射度; τ 为大气透过率; τ_s 为烟幕透过率。

通过分析式(13)可知, 将烟幕干扰下目标与背景辐射对比度与红外探测器成像最小灰度分辨率进行对比, 可以定量评价红外导引头的成像质量。

当目标与背景的辐射差异小于光学探测器最小灰度分辨率时, 导引头无法识别目标, 烟幕干扰取得预期效果; 当目标辐射与背景辐射

的差异大于光学探测器最小灰度分辨率时, 导引头可以提取目标特征, 从而对目标进行识别, 烟幕干扰无效。

1.2.4 信噪比

信噪比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR) 是红外导引系统中的关键参数。不同的导引系统具有不同的 SNR 阈值^[15]。在烟幕干扰条件下, 导引头接收到的光电信号来自于目标与背景。要使导引头探测到目标, 必须使光学探测器接收到的目标信号大于探测器特性所确定的最小噪声值, 因此导引头 SNR 可以作为烟幕对导引头干扰效果的评估指标^[16]。红外成像制导导引头接收到信号的 SNR 可按式(14)计算:

$$SNR = E_R / NEFD \quad (14)$$

式中, E_R 为目标在导引头处的光谱辐射出射度; $NEFD$ 为噪声等效通量密度, 即红外探测器能够探测到的最小温差。 E_R 可表示为^[17]

$$E_R = \frac{I \tau_a \tau_s}{R^2} \quad (15)$$

式中, I 为烟幕释放前目标发出的辐射强度; τ_a 为大气透过率; τ_s 为烟幕透过率; R 为目标到红外探测器的距离。其中, τ_s 按式(4)进行计算。在外场试验中, 环境影响较大。在透过率计算中, 烟幕质量浓度较难计算, 可以采用莱赫特曼建立的扩散理论进行计算。在空间中 t 时刻点 (x, y, z) 处的烟幕浓度的计算公式^[17] 为

$$C_m(x, y, z, t) = \{Q_0 K_a \cdot \exp[-((x - u_1 t)^2 + y^2) \div (4K_0 t + r_0^2) - z^n / (K_1 n^2 z_1^{n-2} t + h_0^n)]\} \div \pi(4K_0 t + r_0^2)(K_1 n^2 z_1^{n-2} t + h_0^n)^{1/n} \Gamma(1 + 1/n) \quad (16)$$

式中, Q_0 为发烟剂的质量; K_a 为烟幕的质量分数; t 为烟幕持续的时间; z_1 与 u_1 分别为参考点的高度和风速; r_0 为烟幕的起始半径; h_0 为烟幕的高度; K_0 和 K_1 分别为水平扩散系数和 z_1 高度处的垂直扩散系数, 有

$$K_0 = 13.5^{2-n} K_1 \quad (17)$$

在等温时, K_1 表达式为

$$K_1 = u_1 \kappa^2 z_1 / [\ln(z_1 / z_{00})] \quad (18)$$

在非等温时, K_1 表达式为

$$K_1 = [u_1 \kappa^2 (n-1) z_0^{2(n-1)} z_1^{2-n}] \div [(z_1^{n-1} - z_0^{n-1})(2-n)^2] \quad (19)$$

式中, κ 为卡门系数; z_{00} 为等温时的地面粗糙度, z_0 为逆温时的地面粗糙度。

将测得的 SNR 与预先设定的 SNR 阈值进行比较。若接收到的 SNR 大于阈值, 则烟幕干扰失效, 制导系统仍能稳定跟踪目标; 若接收到的 SNR 小于阈值, 则烟幕干扰成功, 红外成像系统无有效信息的输出。利用 SNR 可定量分析烟幕对导引头的干扰程度, 并确定烟幕的有效干扰范围。

1.3 激光波段

1.3.1 激光透过率

针对激光而言, 透过率仍然作为评估烟幕干扰性能的指标之一^[18], 其表达式为

$$\tau = \frac{I_\tau}{I_0} \quad (20)$$

式中, I_τ 为均匀烟幕下激光功率计接收到的能量数值; I_0 为无烟时激光功率计接收到的能量数值。随着烟幕浓度的增加, 激光透过率将逐渐减小, 烟幕干扰效果逐渐变好。

1.3.2 激光消光系数

根据 Lambert-Beer 定律可知, 激光消光系数的表达式为

$$\alpha = -\frac{1}{C_m L} \ln \tau \quad (21)$$

式中, C_m 为烟幕的质量浓度, 单位为 kg/m^3 ; L 为光程, 即激光在烟幕中传播的距离, 单位为 m ; τ 为激光透过率。

以上基于激光透过率与激光消光系数的干扰指标, 通常在已知光程且温湿度可调节的烟箱中进行测试。激光器的常见波段为 $0.6328 \mu\text{m}$ 、 $1.06 \mu\text{m}$ 和 $10.6 \mu\text{m}$ 。在实际作战中, 激光发射至目标后产生的回波信号返回至寻的器, 往返两次穿过烟幕, 因而在烟幕中传播的路径是光程的 2 倍^[19]。所以激光通过战场烟幕的双程透过率可表示为

$$\tau_{2L} = e^{(-2\alpha C_m L)} = \tau^2 \quad (22)$$

若激光单程透过率为 0.15, 那么双程透过率仅为 0.0225。可见, 在战场环境下, 烟幕对激光的衰减效果很好。

1.4 毫米波波段

1.4.1 毫米波透过率

烟幕对毫米波随时间变化的透过率计算公式为

$$\tau_t = \frac{U_t}{U_0} \times 100\% \quad (23)$$

式中, τ_t 为烟幕对毫米波随时间变化的透过率; U_t 为烟幕释放后接收机接收到的随时间变化的信号电压值, 单位为 V; U_0 为释放烟幕前接收到的信号电压值, 单位为 V。

烟幕对毫米波随时间变化的衰减分贝值计算公式为

$$E_t = -20 \lg \tau_t \quad (24)$$

式中, E_t 为烟幕对毫米波随时间变化的衰减分贝值, 单位为 dB; τ_t 为烟幕对毫米波随时间变化的透过率。目前, 将短切碳纤维与膨胀石墨作为发烟剂的烟幕在对抗毫米波时具有优异的衰减性能^[20-21]。

2 基于图像质量的烟幕干扰评价指标

在战场环境下, 通过施放烟幕来干扰光学成像设备, 使得目标的成像质量下降。成像质量决定了光学系统能否成功对目标进行识别与跟踪, 图像质量的优劣直接反映了烟幕干扰性能。在一定条件下, 图像质量越差, 烟幕干扰能力越强。鉴于此, 以光学导引头识别跟踪算

法为基础的基于图像质量的相关评价指标近年来被用于烟幕干扰性能评价^[22]。

2.1 图像相关性评价

二维图像相关性评价的原理如图 2 所示。烟幕干扰前, 在图像 $f(x, y)$ 中选取一个以点 (x_0, y_0) 为中心、尺寸为 $N \times N$ 像素大小的参考图像子区域, 然后通过某种方法在烟幕干扰后的图像中找到与参考图像子区域相关程度最高的目标图像子区域。

由上述原理可知, 在寻找相关程度最高的目标图像子区域时, 需要通过某种函数来对变形前后的图像子区域进行评价。目前直观描述两幅图像相关性的函数有均方误差 (Mean Squared Error, MSE)^[23]、峰值信噪比 (Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR)^[24]、相关系数^[25]等。

2.1.1 MSE

MSE 在信号处理领域具有重要地位, 同时也是判断图像质量最常用的算法之一, 反映的是两幅图像之间的差异^[23]。对于原始图像 X 与干扰图像 Y , 两者的 MSE 可以表示为

$$MSE(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [X(i, j) - Y(i, j)]^2}{M \times N} \quad (25)$$

式中, M 和 N 分别表示图像 X 、 Y 长度和宽度上的像素点数; $X(i, j)$ 和 $Y(i, j)$ 分别表示原始图像和干扰图像在点 (i, j) 处的灰度值。MSE 值越小, 图像的质量越好, 即干扰前后两幅图像的差别越小, 干扰越不明显。该指标

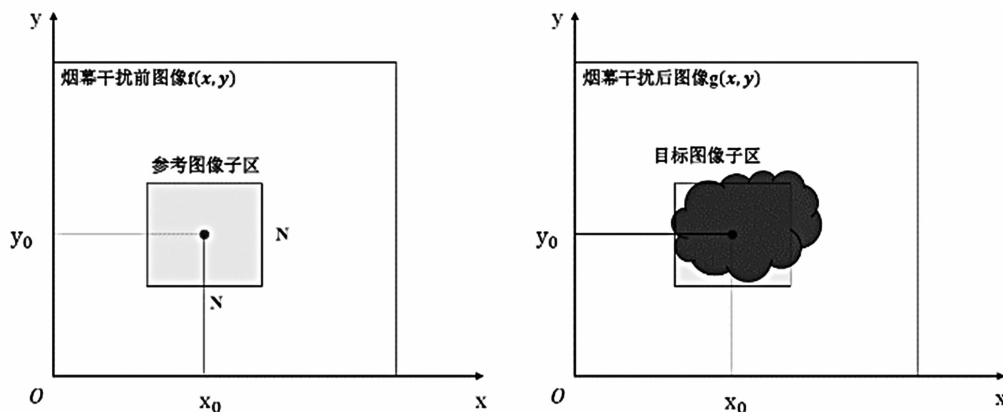


图 2 图像相关性算法原理图

在图像处理领域应用较广, 但评价效果不好, 会出现以下情况: 尽管干扰前后图像呈现出明显不同的视觉质量, 但 MSE 值却十分相近。

2.1.2 PSNR

在图像处理相关文献中, MSE 通常被转换为 PSNR 进行测量。PSNR 的表达式为

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{L^2}{MSE} \quad (26)$$

$$PCC = \frac{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [f(x, y) - f_m] \times [g(x', y') - g_m]}{\sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [f(x, y) - f_m]^2} \sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [g(x', y') - g_m]^2}} \quad (27)$$

式中, $f(x, y)$ 、 $g(x', y')$ 分别代表参考图像子区点 (x, y) 和目标图像子区点 (x', y') 的灰度值。 f_m 、 g_m 分别代表参考图像子区和目标图像子区的平均灰度, 其表达式为

$$f_m = \frac{1}{(2M+1)^2} \sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [f(x, y)]^2 \quad (28)$$

$$g_m = \frac{1}{(2M+1)^2} \sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [f(x', y')]^2 \quad (29)$$

PCC 的取值范围为 $[0, 1]$ 。取值越大表示参考图像与目标图像之间的相关性越大。取值为 0 表示两图像之间毫无相关性; 取值为 1 表示两图像之间相关性最大。

2.2 图像结构尺度相似度评价

烟雾干扰图像质量评价原理是依据干扰前后图像之间的差异来进行质量评价。2002 年, 相关学者首次从图像结构信息的角度提出图像失真的三种模型(即亮度、对比度以及结构相似度), 并提出图像通用质量指标(Universal Quality Index, UQI)模型^[27]。该模型首次提取图像的失真特征(包括亮度失真、对比度失真、图像结构信息失真), 同时也克服了 MSE 以及 PSNR 算法中存在的问题。对 UQI 进行持续改进后, 提出了图像结构尺度相似度(Structural Similarity, SSIM)模型。该模型将参考图像与失真图像的亮度、对比度、结构信息进行比较并量化结合在一起, 产生 SSIM 函数。

SSIM 分别由亮度、对比度以及结构相似

式中, L 为图像像素的动态范围。对于 8 bit 的灰度图像, $L = 255$ 。与 MSE 不同, PSNR 值越大, 图像质量越好, 即烟雾干扰前后两幅图像质量变化不大, 干扰效果不明显。

2.1.3 相关系数

图像相关性可以采用互相关系数进行评价。较为常用的是皮尔逊相关系数(Pearson Correlation Coefficient, PCC)^[26], 其表达式为

度三模块函数进行描述^[28]:

(1) 将图像像素的平均灰度作为亮度的度量函数, 计算公式如下:

$$l(x, y) = \frac{2\mu_x\mu_y + C_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1} \quad (30)$$

式中, μ_x 为图像 x 的平均灰度, 其表达式为

$$\mu_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (31)$$

μ_y 为图像 y 的平均灰度, 其表达式与 μ_x 类似; 常数 C_1 是为了避免分母接近 0 而造成亮度度量函数的不稳定, 通常设为 0。

(2) 将图像灰度的标准差作为对比度的度量函数, 即

$$c(x, y) = \frac{2\sigma_x\sigma_y + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2} \quad (32)$$

式中, 方差 σ_x 为图像 x 灰度的标准差, 其表达式为

$$\sigma_x = \left(\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)^2 \right)^{1/2} \quad (33)$$

σ_y 为图像 y 灰度的标准差, 其表达式与 σ_x 类似; 常数 C_2 通常设为 0。

(3) 结构相似度估算值采用图像灰度标准差与协方差作为度量, 计算公式如下:

$$s(x, y) = \frac{\sigma_{xy} + C_3}{\sigma_x\sigma_y + C_3} \quad (34)$$

式中, σ_{xy} 为图像 x 和图像 y 的灰度协方差, 表示图像 x 与图像 y 像素之间的相关性, 表达式为

$$\sigma_{xy} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y) \quad (35)$$

常数 C_3 通常设为 0。将以上亮度、对比度、结构相似度函数进行组合,便得到结构相似模型指标:

$$SSIM(x, y) = \frac{[l(x, y)]^\alpha + [c(x, y)]^\beta + [s(x, y)]^\gamma}{3} \quad (36)$$

式中, α 、 β 、 γ 被称为权重参数,用于调整 3 个函数之间的相对重要性。通常取 $\alpha = \beta = \gamma = 1$, $l(x, y)$ 与 $c(x, y)$ 的取值范围为 $[0, 1]$, 结构相似度 $s(x, y)$ 的取值范围为 $[-1, 1]$, 因此 $SSIM(x, y)$ 的取值范围为 $[-1, 1]$ 。其绝对值越接近 1, 图像 x 、 y 的亮度、对比度以及结构越相似, 相关度越高, 图像质量越好。针对烟幕干扰条件下的模板图像与干扰图像而言, $SSIM(x, y)$ 指标的绝对值越接近 1, 干扰效果越差, 烟幕未起到遮蔽作用; 若 $SSIM(x, y)$ 指标接近于 0, 则干扰前后图像质量变化剧烈, 烟幕起到遮蔽效果。

3 烟幕作战使用中的干扰评估指标及方法

在战场环境下, 作战人员更加注重烟幕在战斗中的实际使用效果。比如, 发烟装备多久能够形成有效遮蔽范围的烟幕, 形成的烟幕尺寸是否满足被保护目标的尺寸, 烟幕是否能够满足所需的遮蔽时间等。因此, 本文总结了在实际战斗中评估烟幕干扰性能的指标及方法: 烟幕有效遮蔽面积^[12]、烟幕形成时间及烟幕持续时间、脱靶量^[29]、命中概率^[30]与杀伤概率^[31]。

3.1 烟幕有效遮蔽面积

烟幕遮蔽面积是指发烟装备在作战行动中为了达到某种烟幕保障目的, 施放的烟幕在各光学波段能够达到的干扰尺寸范围。由于烟幕占据三维立体空间, 其遮蔽面积的大小取决于观瞄方向, 不同观瞄方向上烟幕的遮蔽面积是不同的。

根据烟幕作战使用的一般规则, 烟幕的遮蔽面积一般为被保护目标的 3~5 倍, 同时应

该保证被保护目标不处于烟幕中心位置。通过试验获得各种发烟装备在不同编组、不同布设方式、不同气象条件下的遮蔽面积数据, 对烟幕作战保障行动具有指导意义。

考虑到烟幕在空中不断扩散, 且扩散边界形状不一, 在各点的密度、透过率均不一致, 因此表征烟幕有效遮蔽面积较为困难。刘颖等人^[31]提出将目标光源按照一定几何关系呈面阵布放, 然后将烟幕细分为若干小面元, 利用探测器对烟幕各个面源的透过率进行测量, 并将其与预先设定的透过率阈值进行比较, 再利用数理统计的方法评估各个面源的遮蔽情况, 最后通过对有效遮蔽面源进行求和来统计烟幕有效遮蔽面积。李一^[12]在采用黑体阵列的基础上, 通过双线性插值法对烟幕遮蔽面积进行划分, 从而合理划分小面元的数量。

计算每个小面元的透过率, 并将其与预先设定阈值进行比较, 统计有效遮蔽的面源总个数 N , 随后通过物像关系计算单个小面元的实际成像面积:

$$s = s' \left(\frac{l}{f} \right)^2 \quad (37)$$

式中, s' 为小面元面积, l 为烟幕距探测器的距离, f 为探测设备光学系统的焦距, 则有效遮蔽面积 S 为

$$S = Ns \quad (38)$$

3.2 烟幕形成时间及烟幕持续时间

通常, 将发烟装备开始发烟(发烟罐点火、发烟弹爆炸或发烟车启动发烟)时刻至烟幕干扰效果达到战术要求的时间间隔定义为烟幕的形成时间。它也可以是遮蔽长度或高度达到战术要求所需的时长。烟幕形成时间主要取决于烟幕自身的性质、施放装置以及所遮蔽目标的体积大小。成烟时间短的烟幕弹能够快速遮蔽目标, 达到保护己方目标或遮蔽敌方人员、探测设备的目的。因此, 烟幕形成时间可以作为评价烟幕干扰效果的指标之一。

烟幕形成时间对于烟幕作战使用中作战时机的把握、作战方案的制定具有重要参考意

义。一般情况下, 发烟弹适用于预警时间短、时间窗口窄的烟幕保障行动, 发烟罐和发烟车适用于预警时间足够、需要长时间与大面积烟幕保障的作战行动。

烟幕持续时间是指一次发烟行动中, 从对目标实施有效干扰开始到烟幕干扰结束的时间间隔。烟幕持续时间对于制定烟幕保障行动方案具有参考意义。一般情况下, 如果发烟装备一次发烟的持续时间不能满足烟幕保障要求, 则可制定接续发烟的行动方案。同时, 掌握烟幕持续时间可以为后续突击冲锋、阵地转移等战术战法争取行动时间。

3.3 脱靶量

脱靶量是指靶平面内的制导误差或导弹实际命中点与理想命中点(目标)之间的偏差^[32], 如图 3 所示。

利用烟幕对导弹实施干扰, 主要是对导弹中的导引头实施干扰。其干扰效果直观反映在靶平面的脱靶量变化上。因此, 可以依照烟幕干扰前后导弹脱靶量的变化情况评估烟幕的干扰效果^[33]。设靶平面上目标的位置矢量为 $\vec{r}_0$, 导弹着弹点的位置矢量为 $\vec{r}_i (i=1, 2, \dots, n)$, n 为有效打靶数目, 则脱靶矢量可以表示为^[34]

$$\delta \vec{r} = \vec{r}_i - \vec{r}_0 \quad (39)$$

若已知导弹的制导精度, 则通常将 3 倍的制导精度(即 $3S_0$)作为界限来判断烟幕干扰后导弹脱靶量是否超出正常制导精度的允许范

围^[35]。假设干扰后的脱靶量为 δr , 则按照以下准则判断干扰是否有效: (1) 干扰有效, 即 $\delta r > 3S_0$; (2) 干扰无效, 即 $\delta r \leq 3S_0$ 。

若采用多发导弹进行试验或数值仿真, 获得大量样本数据后则可进一步采用效率准则进行干扰效果评估。将干扰成功的导弹数记为 n_e , 试验所用导弹总数记为 n , 则干扰成功率

$$\eta = \frac{n_e}{n} \times 100\% \quad (40)$$

在实际应用中, 可以依据干扰成功率的大小, 将烟幕的干扰效果进行分级: (1) 当 $70\% \leq \eta \leq 100\%$ 时, 为三级干扰; (2) 当 $50\% \leq \eta < 70\%$ 时, 为二级干扰; (3) 当 $20\% \leq \eta < 50\%$ 时, 为一级干扰; (4) 当 $0\% \leq \eta < 20\%$ 时, 为零级干扰。

在作战使用中, 烟幕干扰效果受气象、地形等因素的影响较大, 被遮蔽目标常呈现出时隐时现的状态。随着光电制导设备的不断发展, 在导弹丢失目标后进行二次捕获目标的能力不断增强。鉴于此, 为了提高评估烟幕干扰效果的适用性, 本文提出可采用遮蔽概率来评价单次试验效果, 其数据处理方法如下: 若在规定的烟幕有效持续时间内, 导弹导引头输出的脱靶量 $\delta \vec{r}_i > 3S_0$ 或者不能正常输出跟踪误差信号, 且持续时间 $t > t_m$ (t_m 为导弹导引头记忆跟踪的时间阈值), 则干扰有效, 根据干扰有效时间与烟幕有效持续时间的比例来计算有效遮蔽概率。

3.4 命中概率

目标在导弹战斗部的毁伤半径范围内, 即称为命中目标^[34]。命中概率用于表征导弹命中目标可能性的大小。对导弹实施烟幕干扰, 将会导致导弹的脱靶量增加, 使得导弹命中概率下降。因此可将导弹的命中概率作为评估烟幕干扰效果的指标之一。为了提高试验的经济性与安全性并获得大量试验样本数据, 可以采用仿真法^[36]进行足够多的导弹模拟飞行试验, 计算导弹着弹点位置, 从而统计导弹在无干扰

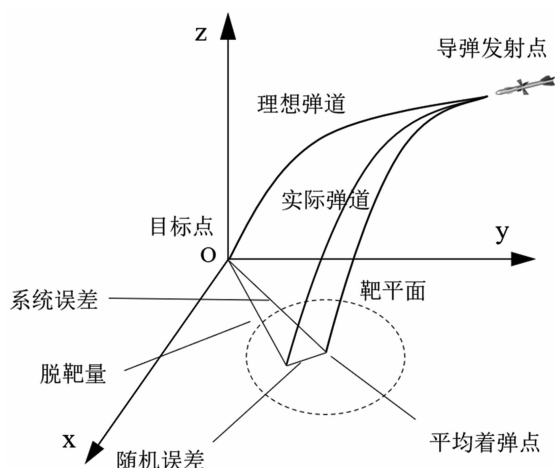


图 3 空对地导弹制导误差和脱靶量示意图

时的命中概率(记为 P_0)。在有烟幕干扰的条件下, 同样重复进行多次导弹飞行干扰试验, 计算导弹在干扰情况下的着弹点位置, 从而统计导弹在有干扰时的命中概率(记为 P)。定义 ξ 为有无干扰时导弹命中概率之比:

$$\xi = \frac{P}{P_0} \quad (41)$$

可以看出, $0 \leq \xi \leq 1$, 且 ξ 值越小, 烟幕干扰效果越好。因此可利用 ξ 值的大小来判断烟幕干扰效果的强弱。

3.5 杀伤概率

导弹的基本任务是杀伤指定目标。杀伤是指将目标击毁或致伤, 使敌方丧失完成预定作战任务的能力^[37]。杀伤概率可表示为^[37]

$$P_k = k \int_{-\infty}^{\infty} f(y, z) \Phi(x, y, z) G(x, y, z) dx dy dz \quad (42)$$

式中, $f(y, z)$ 为导弹在靶平面的制导误差 (y, z) 的概率密度; $\Phi(x, y, z)$ 为导弹引信引爆位置分布概率密度; $G(x, y, z)$ 为导弹战斗部坐标杀伤概率密度。可以看出, 导弹杀伤概率取决于导引头制导误差分布规律、导弹引信启爆点规律、导弹战斗部杀伤规律三方面^[34]。通常来说, 烟幕对导弹的干扰主要是对导引头的干扰, 不会对引信和战斗部产生影响, 所以一般不会影响引信启爆点规律以及战斗部杀伤规律。

正常情况下, 导弹的杀伤概率 P_{k0} 一般在 0.7~0.85 范围内。可将 P_{k0} 作为判定的界限, 将受到烟幕干扰后导弹的杀伤概率 P_{kj} 与 P_{k0} 进行比较后划分以下等级^[37]: (1) 当 $P_{kj} > 0.7$ 时, 为零级干扰; (2) 当 $0.2 \leq P_{kj} \leq 0.7$ 时, 为一级干扰; (3) 当 $P_{kj} < 0.2$ 时, 为二级干扰。

或采用干扰前后杀伤概率的衰减程度来评估烟幕的干扰效果。将干扰前后杀伤概率的衰减率定义为

$$\zeta = \frac{P_{k0} - P_{kj}}{P_{k0}} \times 100\% \quad (43)$$

由式(43)可知, $0 \leq \zeta \leq 1$, 且 ζ 值越大表明导弹在干扰前后杀伤概率的衰减率越大, 干扰效

果越显著。利用干扰前后杀伤概率衰减率的变化可为定量评估烟幕对导弹的干扰效果提供借鉴意义。

4 结束语

在当前现代化战争的背景下, 发展烟幕技术来对抗光电制导武器具有重要意义, 评估烟幕的干扰效果成为重要研究方向。本文在阐述烟幕干扰作用机理的基础上, 从干扰波段、烟幕释放前后图像质量变化、烟幕作战性能三个方面, 对现有烟幕干扰效果评估指标及方法进行了总结, 并对其适用条件以及优劣进行了分析。针对不同的试验场景, 应选用适合的评估指标及方法。在发烟装备研发阶段, 可以采用基本指标对其干扰性能进行评估。而在装备阶段, 考虑面对复杂的环境条件, 采用基本指标进行评估具有局限性, 难以准确、可靠地评估烟幕遮蔽效果。因此应从图像质量与战场烟幕性能指标入手进行评估, 以期对发烟装备的作战使用与效能评估提供辅助策略。

参考文献

- [1] 庄振明. 科索沃战争中光电武器装备使用和光电对抗情况简述 [J]. 飞航导弹, 2000, 30(8): 59-61.
- [2] 胡启明. 光电对抗技术及其在军事上的应用 [J]. 光电子技术, 1999, 19(3): 236-237.
- [3] 邹振宁, 冷锋, 周芸. 光电对抗技术和装备现状评析 [J]. 电光与控制, 2004, 35(3): 30-34.
- [4] 白小叶, 张建宇. 国外光电对抗技术的发展动向与分析 [J]. 舰船电子工程, 2020, 40(6): 13-17.
- [5] 赵宝珠. 烟幕对微光夜视器材影响的研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- [6] 季卓莺, 邵红, 林燕丹. 暗适应时间、背景亮度和眩光对人眼对比度阈值影响的探讨 [J]. 照明工程学报, 2006, 15(4): 1-4.
- [7] 薄郢. 面向目标识别的红外成像干扰仿真与分级方法研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [8] 潘功配, 杨硕. 烟火学 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1997.

- [9] 王英立. 烟幕全遮蔽能力的理论与实验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [10] 李澄俊. 统一表征发烟剂对可见光和红外的遮蔽能力 [J]. *火工品*, 2001, **23**(2): 8–10.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 宋贵才, 全薇, 宦克为, 等. *红外物理学* [M]. 北京: 清华大学出版社, 2018.
- [14] 代敏. 烟幕干扰下的地面目标识别算法研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- [15] 白玉栋, 吴涛. 烟幕干扰下红外成像制导导弹的作战效能分析 [J]. *红外*, 2013, **34**(5): 39–41.
- [16] 邱继进, 赵晓哲. 红外烟幕干扰效果的计算与模拟 [J]. *电光与控制*, 2006, **37**(4): 31–33.
- [17] 余宁, 李俊山, 王新增, 等. 红外烟幕干扰效果的评估仿真 [J]. *传感器与微系统*, 2012, **31**(1): 23–25.
- [18] 常项项. 有源和烟幕干扰下激光制导的性能参数分析 [D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
- [19] 张敏. 烟幕建模仿真及其对探测器的影响分析 [D]. 长春: 长春理工大学, 2011.
- [20] 刘志龙, 王玄玉, 董文杰, 等. 短切碳纤维云团对毫米波/红外复合干扰性能影响 [J]. *含能材料*, 2016, **24**(12): 1219–1224.
- [21] 梁莹娜. 用于红外/毫米波干扰材料的可膨胀石墨制备及性能研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
- [22] 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.
- [23] Wang Z, Bovik A C. Mean squared error: Love it or leave it? A new look at signal fidelity measures [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2009, **26**(1): 98–117.
- [24] 艾达, 白岩松, 于可欣, 等. 全景图像质量评价方法最新进展 [J]. *计算机工程与应用*, 2022, **58**(24): 1–11.
- [25] Mahajan P, Jakhetiya V, Abrol P, et al. Perceptual quality evaluation of hazy natural images [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, **17**(12): 8046–8056.
- [26] 邱小霞. 基于深度学习的自适应光学图像质量评价 [D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2022.
- [27] Wang Z, Bovik A C. A universal image quality index [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2002, **9**(3): 81–84.
- [28] Wang Z, Bovik A C, Sheikh H R, et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity [J]. *IEEE Trans Image Process*, 2004, **13**(4): 600–612.
- [29] 陈国际. 空空作战效能评估软件系统的研制与开发 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- [30] 赵俊阳, 刘湘伟, 姜林. 烟幕干扰条件下光电制导导弹命中概率计算方法 [J]. *探测与控制学报*, 2019, **41**(1): 102–105.
- [31] 刘颖, 周建忠. 烟幕有效面积测试方法探讨 [J]. *水雷战与舰船防护*, 2004, **12**(2): 31–33.
- [32] 吴畏. 箔条干扰条件下舰空导弹单发杀伤概率计算 [J]. *现代防御技术*, 2013, **41**(3): 180–184.
- [33] 高卫. 烟幕干扰效果评估方法研究 [J]. *兵工学报*, 2006, **28**(4): 681–684.
- [34] 张求知, 刘建业. 空地电视制导导弹武器系统精度和性能研究 [J]. *光学技术*, 2007, **33**(S1): 92–94.
- [35] 高卫. 对光电成像系统干扰效果的评估方法 [J]. *光电工程*, 2006, **33**(2): 5–8.
- [36] 严晓芳, 李磊, 任晓冰, 等. 烟幕对抗红外成像制导导弹的仿真建模 [J]. *系统仿真学报*, 2008, **20**(10): 2697–2700.
- [37] 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.