

## 烟幕遮蔽和干扰效果评价方法研究

陈柳莹<sup>1</sup>, 李晓霞<sup>1,2,3\*</sup>, 王晓农<sup>1,2,3</sup>, 解博<sup>1,3</sup><sup>1</sup>国防科技大学电子对抗学院脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037;<sup>2</sup>先进激光技术安徽省实验室, 安徽 合肥 230037;<sup>3</sup>红外与低温等离子体安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230037

**摘要** 烟幕是一种应用较为广泛的无源干扰手段,在对抗各类光电侦察和光电制导装置方面发挥着重要作用。烟幕遮蔽和干扰效果评价是评估光电对抗效果、进行战术部署的重要依据,是烟幕技术的重要研究内容。针对目前评价方法杂、评价方法选用无据可依的现状,在综述当前烟幕遮蔽和干扰效果评价研究现状的基础上,从烟幕本身的遮蔽性能、被干扰对象工作性能、烟幕干扰前后图像质量受影响的角度,系统归纳了能较好地描述烟幕遮蔽和干扰效果的主要评价指标及其测试方法,指出了方法的优缺点、适用场合与局限性,并对下一步研究工作和发展方向进行了展望。

**关键词** 烟幕遮蔽; 干扰效果评价; 透过率; 光电导引头; 图像质量

中图分类号 TN972

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230725

## Assessment Methods of Smoke Screening and Interference Effect

Chen Liuying<sup>1</sup>, Li Xiaoxia<sup>1,2,3\*</sup>, Wang Xiaonong<sup>1,2,3</sup>, Xie Bo<sup>1,3</sup><sup>1</sup>State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, College of Electronic Engineering, National University of Defense Technology, Hefei 230037, Anhui, China;<sup>2</sup>Laboratory of Advanced Laser Technology of Anhui Province, Hefei 230037, Anhui, China;<sup>3</sup>Infrared and Low Temperature Plasma Key Laboratory of Anhui Province, Hefei 230037, Anhui, China

**Abstract** Smoke screening is an effective passive interference countermeasure that is extensively used to counter various types of electro-optical reconnaissance and guided weapons. Evaluating smoke screening and its interference effects is crucial for assessing photoelectric countermeasures and tactical deployment, which constitutes the main focus of research within the context of smoke screen technology. Current evaluation methods are complex and lack a solid foundation; therefore, we proposed evaluation methods to better describe the smoke screening and interfering effects, based on a review of existing evaluation methodologies. These methods focus on the shielding performance of the smoke screening, the operational states of the interfered targets, and the changes in the image quality before and after smoke screening. Moreover, we discussed the proposed method's advantages and disadvantages, application occasions, and limitations. Finally, this paper outlines future research directions and emerging trends concerning the effects of smoke screening.

**Key words** smoke screening; interfering effect evaluation; transmittance; photoelectric seeker; image quality

## 1 引言

烟幕是一种由分散相(固体和液体微粒)与分散介质(大气)共同组成的气溶胶<sup>[1-2]</sup>。它主要依靠烟幕粒子对入射电磁波的吸收和散射以及烟幕自身热辐射,干扰光辐射的正常传输和光电系统的目标探测<sup>[3-5]</sup>。围绕烟幕干扰方面的研究的最终目的是提高战场烟幕干扰效果。开展烟幕遮蔽和干扰效能评价,可以为烟

幕材料研制、施放手段设计、战术使用部署、训练和作战效果评估等提供重要依据。

目前国外模拟烟幕评价的方法<sup>[6]</sup>中比较常见的是“物理-化学”法、装备效益法及数学模型法等。国内在建模仿真评价法和室内烟幕箱评测法方面<sup>[7-8]</sup>开展了较多研究,分为理论计算法和实验测定法。理论计算法包括透过率计算法和信噪比计算法;实验测定法按照实验环境条件可分为实验室烟幕箱评价法、中小风

收稿日期: 2023-02-27; 修回日期: 2023-03-15; 录用日期: 2023-04-03; 网络首发日期: 2023-04-13

基金项目: 军委\*\*\*综合研究项目(KY21N019)

通信作者: \*lxhong@163.com

洞评价法和野外评价法。

由于现有评价方法多而杂,评价方法选用无据可依,为此本文拟从烟幕本身遮蔽性能、烟幕干扰对象光电系统工作性能受影响、图像质量变化的角度,对当前烟幕遮蔽和干扰效果的主要评价指标及其测试方法进行归纳与评述,分析方法的优缺点、适用范围与局限性,为烟幕遮蔽与干扰效果评价方法的选用提供参考,并对发展方向进行展望。

## 2 烟幕遮蔽效果评价法

烟幕遮蔽效果评价法旨在对烟幕本身的遮蔽性能指标进行计算,其中以透过率指标为基础,主要有 3 种测试方法。

### 2.1 基于烟幕透过率的评价

#### 1) 烟幕透过率

透过率  $\tau(\lambda)$ <sup>[9]</sup>指波长为  $\lambda$  的入射光透过烟幕的光

功率  $\Phi_\lambda(x)$  与入射光功率  $\Phi_\lambda(0)$  的比值,表达式为

$$\tau(\lambda) = \frac{\Phi_\lambda(x)}{\Phi_\lambda(0)}, \quad (1)$$

式中: $x$ 为光程。透过率与烟幕施放前后探测器接收的光辐射大小有关。透过烟幕到达光电探测系统的光辐射功率若低于光电探测器的响应阈值,则探测器无法探测到目标,相应的透过率即可定义为烟幕能实施有效干扰的透过率阈值。

当已知透过率和透过率阈值,便可计算烟幕有效遮蔽面积<sup>[10-14]</sup>和烟幕有效留空时间<sup>[15-16]</sup>,三者为相辅相成、相互嵌套的关系,从而更加全面地评价烟幕干扰效果的好坏。

#### 2) 测试方法

从烟幕本身的遮蔽性能评价出发,透过率计算法能够反映烟幕干扰前后辐射衰减特性,根据衰减强弱,将透过率  $\tau(\lambda)$  的大小分为 4 个等级,如表 1 所示。

表 1 烟幕遮蔽效果的评估等级  
Table 1 Evaluation grades of smoke shielding effect

Transmittance	Observation effect	Evaluation grade
$\tau(\lambda) \leq 5\%$	The target is indistinguishable from the background	Better
$5\% < \tau(\lambda) \leq 20\%$	It is difficult to distinguish the target from the background	Good
$20\% < \tau(\lambda) \leq 50\%$	The target is blurred and detectable	Poor
$\tau(\lambda) > 50\%$	The target is easily detectable	Worse

红外烟幕对成像系统产生干扰反映在透过率上,按照朗伯-比尔定律,透过率<sup>[17]</sup>可以表示为

$$\tau(\lambda) = \frac{\Phi_\lambda(x)}{\Phi_\lambda(0)} = \exp[-\alpha_c(\lambda)n_sL] = \exp\left(-\int \frac{3cQ_e}{4r\rho} dl\right), \quad (2)$$

式中: $\alpha_c(\lambda)$ 为烟幕质量消光系数<sup>[18]</sup>;  $n_s$ 为烟幕颗粒浓度;  $L$ 为烟幕厚度;  $c$ 为烟幕浓度;  $Q_e$ 为衰减效率因子;  $r$ 为烟幕粒子半径;  $\rho$ 为烟幕粒子质量密度;  $l$ 为目标红外辐射在烟幕中的传输距离。

由测得的烟幕物理参数以及透过率数学模型,可模拟透过率与各物理量变化的关系,其参数值由经验值假设,如图 1 所示,从而评价烟幕干扰效果的好坏。

这种评价方法的测试环境主要为烟幕箱,测试环境和参数可控、损耗小、使用方便,适用于烟幕剂性能表征和筛选,可用于评价烟幕对可见、红外、激光和毫米波<sup>[20]</sup>等波段光的衰减效果。其不足之处是只能单纯反映烟幕剂消光性能,大多用于烟幕材料研制阶段。在外场测试时,动态烟幕散布受气象条件影响较大,烟幕粒子始终处于流动状态,浓度、粒谱十分不均匀,这直接影响到消光系数的准确性,误差较大。

### 2.2 基于图像灰度的评价

#### 1) 图像灰度与目标亮度的关系

在以往的烟幕透过率测量研究中,传统的办法是

依靠辐射计接收点对点的目标辐射的,由于设备规格<sup>[21-24]</sup>的原因,视场限制在狭窄的区域。而外场中动态烟幕覆盖范围较大,并随着时间的推移会扩散,所以,为了全面评价烟幕的遮蔽性能,引入了光电成像技术。

理论上,烟幕透过率  $\tau_s$  可用辐射亮度来表示<sup>[25]</sup>,表达式为

$$\tau_s = \frac{L'_{tar}}{L_{tar}} = \frac{L'(r) - L'_{sur}}{L(r) - L_{sur}}, \quad (3)$$

式中: $L_{tar}$ 和  $L'_{tar}$ 分别为红外成像仪在烟幕施放前后采集的目标(tar)辐射;  $L(r)$ 和  $L'(r)$ 为红外成像仪在烟幕施放前后采集的  $r$  处的总辐射;  $L_{sur}$ 和  $L'_{sur}$ 为红外成像仪在烟幕施放前后采集的背景(sur)辐射。但直接获取目标辐射亮度是不现实的<sup>[26]</sup>,而图像的灰度值却可以提取出来。目标在场中的辐射亮度与图像对应的灰度值满足

$$L_{tar} = aG + L_{off}, \quad (4)$$

式中: $G$ 为红外图像中对应的灰度值;  $a$ 为辐射与灰度水平相关的系数,  $L_{off}$ 为辐射偏移量,针对同一型号的红外成像仪,  $a$ 和  $L_{off}$ 为常数。因此,提出了一种将红外图像中的亮度转换为相应灰度值的方法,由灰度值计算烟幕透过率<sup>[27]</sup>。

#### 2) 测试方法

根据红外辐射透射理论和红外定标原理,由灰度

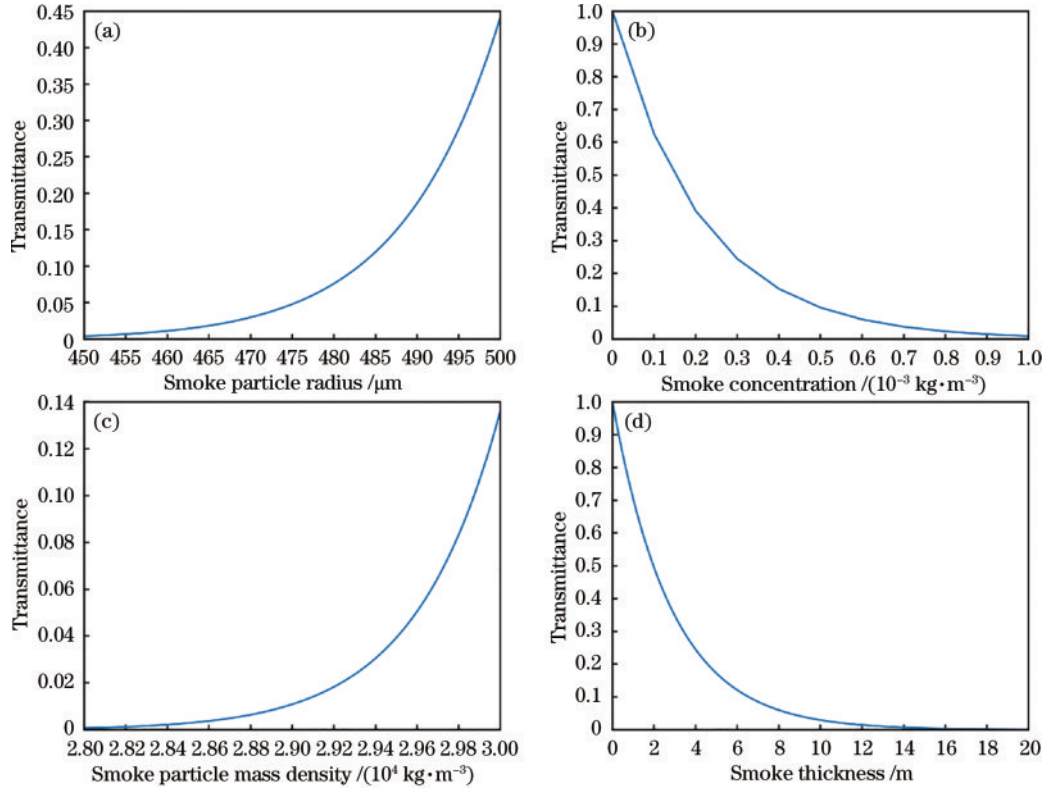


图 1 透过率与各物理量变化的关系<sup>[19]</sup>。(a)粒子半径;(b)烟幕浓度;(c)粒子质量密度;(d)烟幕厚度

Fig. 1 Relationship between transmittance and change of physical parameters<sup>[19]</sup>. (a) Particle radius; (b) smoke concentration; (c) particle mass density; (d) smoke thickness

表示的烟幕透过率为

$$\tau_s = \frac{G'(r) - G'_{sur}}{G(r) - G_{sur}}, \quad (5)$$

式中: $G(r)$ 为烟雾遮蔽前目标的总灰度值; $G'(r)$ 为烟

幕遮蔽后目标的总灰度值; $G_{sur}$ 为烟雾遮蔽前周围背景的平均灰度值; $G'_{sur}$ 为烟雾遮蔽后周围背景的平均灰度值。烟雾遮蔽前后目标与背景灰度值及位置选择如图 2 所示<sup>[28]</sup>。

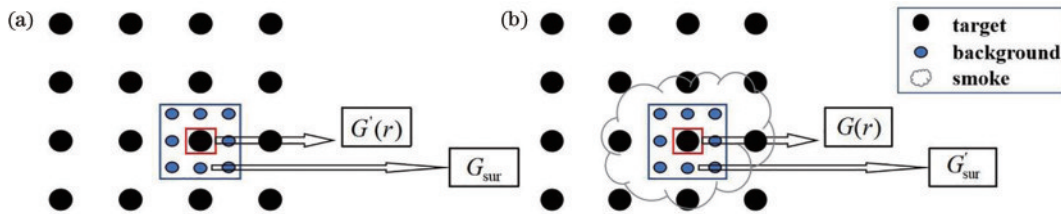


图 2 烟雾遮蔽前后目标与背景灰度值及位置选择<sup>[28]</sup>。(a)遮蔽前;(b)遮蔽后

Fig. 2 Target and background gray value and their position selection before and after smoke screening<sup>[28]</sup>. (a) Before screening; (b) after screening

利用红外成像技术,将亮度值与灰度值相关联,选取合适的图像处理算法<sup>[29-30]</sup>获取对应点的灰度值,从而计算烟幕的透过率值,由此评价烟幕干扰效果的好坏。这种评价方法直观、简单、快捷,适用于对可见光和红外波段烟幕分布、遮蔽率和遮蔽面积的定量表征,测试环境为烟幕箱和无风弱风外场。其不足之处是仅限于对成像系统的干扰评价,而且对成像系统辐射分辨率要求较高,且热图像灰度值会受热像仪噪声<sup>[31]</sup>影响,容易引起误差。

### 2.3 基于辐射出射度的评价

#### 1) 辐射出射度与目标亮度的关系

热成像对目标的探测主要依赖目标和背景的辐射亮度差,烟幕的遮蔽效果主要体现在消除这种亮度差。因此关注遮蔽前后热像图上目标点与背景点的亮度差。

定义烟雾施放前后目标与背景在图像中的亮度差分别为 $\Delta L$ 和 $\Delta'L$ ,烟雾透过率 $\tau_{smk}$ 可用烟雾施放前后目标与背景的辐射亮度差来表示:

$$\tau_{\text{smk}} = \frac{\Delta'L}{\Delta L} = \frac{L_c - L_h}{L_m - L_b}, \quad (6)$$

式中： $L_c$ 、 $L_h$ 分别为烟幕燃放后目标点、背景点的亮度值； $L_m$ 、 $L_b$ 分别为烟幕燃放前目标点、背景点的亮度值。由于辐射亮度  $L(\lambda, T)$  与辐射出射度  $M(\lambda, T)$  满足  $M(\lambda, T) = \pi L(\lambda, T)$  的关系<sup>[32]</sup>，因此提出了一种将红外图像的亮度转换为相应的辐射出射度的方法，由辐射出射度计算烟幕透过率。

### 2) 测试方法

红外热像仪<sup>[33-34]</sup>进行补偿计算后，可以测得视场内各点的视在温度。当热像仪测得烟幕燃放前后目标、背景的视在温度值，由辐射出射度表示的烟幕透过率<sup>[35-36]</sup>为

$$\tau_{\text{smk}} = \frac{M_{\Delta\lambda T_c} - M_{\Delta\lambda T_b}}{M_{\Delta\lambda T_m} - M_{\Delta\lambda T_b}}, \quad (7)$$

式中： $T_m$ 和  $T_c$ 是烟幕燃放前后目标的视在温度； $T_b$ 为烟幕的视在温度； $T_h$ 为背景的视在温度； $\Delta\lambda$ 为探测波段范围。利用普朗克公式，通过软件计算或者使用  $F(\lambda T)$  函数得到探测波段的辐射出射度，因而得出烟幕的透过率，由此可以评价烟幕红外遮蔽效果的好坏。此测试法可以采用烟幕箱进行测试，如图 3 所示。

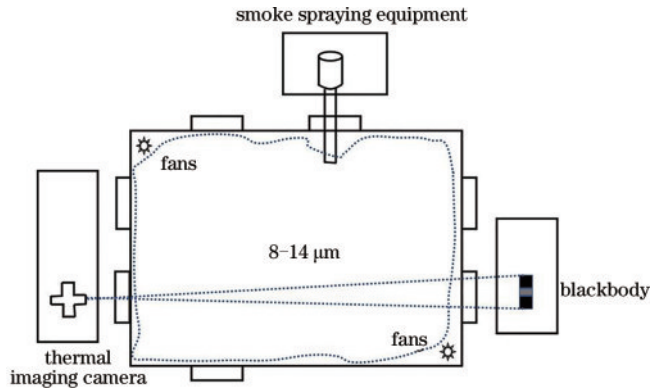


图 3 烟幕箱测试布局

Fig. 3 Smoke box test distribution

这种评价方法操作简单，可用于表征中远红外波段遮蔽率，测试环境为烟幕箱、无风弱风外场。其不足之处是外场试验昂贵，需要布设大面积热源阵列，而且试验数据处理麻烦。

## 3 烟幕干扰效果评价法

从烟幕干扰对象光电系统工作性能受影响的角度，可归纳出 3 种测试方式，包括基于系统信噪比、基于光电导引系统作用距离和基于跟踪精度的测试方法。

### 3.1 基于系统信噪比的评价

#### 1) 信噪比与目标亮度的关系

信噪比<sup>[37]</sup>用来表征红外导引系统的探测能力，

是导引系统的一个关键参数<sup>[38]</sup>。被动红外探测系统的性能是由目标和背景的辐射差异决定的，噪声主要由探测器和电子处理等环节决定。因此，探测系统的固有信噪比(SNR)可表示为

$$\left(\frac{S}{N}\right)_0 = \frac{L_i - L_k}{L_n}, \quad (8)$$

式中： $L_i$ 和  $L_k$ 分别为目标和背景的固有辐射亮度； $L_n$ 为噪声的比例常数。燃放烟幕后，若导引头输出的信噪比小于导引系统的信噪比阈值，则导引头就失去了对目标的探测和跟踪能力，表明烟幕干扰成功。

### 2) 测试方法

当在大气中燃放烟幕后，目标发出的辐射在烟幕中传输，产生两种附加辐射能，包括烟幕散射和烟幕自身辐射，统称为路程辐射亮度  $L_a$ 。于是在距离目标  $R$  处观察到的表现信噪比<sup>[39]</sup>为

$$\left(\frac{S}{N}\right)_R = \frac{(L_i \tau_{\text{IR}} + L_a) - (L_k \tau_{\text{IR}} + L_a)}{L_n} = \left(\frac{S}{N}\right)_0 \tau_{\text{IR}}, \quad (9)$$

式中： $\tau_{\text{IR}}$ 为烟幕的透过率函数。所以便可以通过有效的信噪比传递函数  $T_{\text{ef}}$ <sup>[40-41]</sup>来表示工作的红外成像系统的消光效应，表达式为

$$T_{\text{ef}} = \left(\frac{S}{N}\right)_R / \left(\frac{S}{N}\right)_0 = \tau_{\text{IR}}. \quad (10)$$

显然，烟幕对红外成像系统的影响与附加的辐射没有关系，仅与烟幕透过率有关，其遮蔽效果便可通过红外烟幕透过率来反映。而烟幕透过率又可通过消光模型<sup>[42-43]</sup>、辐射出射度、灰度值等计算得出。

这种评价方法继承了透过率法的优点，具有简便和客观的特点，并且直接针对光电探测系统进行干扰效果评价，可以更直接地反映烟幕干扰效果，多用于外场测试。其不足之处是遮蔽效果仍需借助红外光谱透过率来反映，对探测器设备性能参数要求较高。

### 3.2 基于光电导引系统作用距离的评价

#### 1) 光电导引系统作用距离

光电导引系统作用距离<sup>[44]</sup>包括探测距离和成像距离。当红外探测系统探测很远处的目标时，目标张角小于或等于系统的瞬时视场，此时称目标为点目标<sup>[45]</sup>，光电导引系统作用距离为探测距离，探测距离  $R$  满足的关系为

$$\Delta T_0 e^{-\mu R} = \frac{\alpha \cdot \beta \cdot R_{\text{SN}} \cdot T_{\text{NED}} \cdot R^2}{S_i}, \quad (11)$$

式中： $\Delta T_0$ 为零距离时目标固有等效黑体温差； $\mu$ 为目标与探测系统之间传输路径上的平均衰减系数； $R$ 为一定探测概率下的探测距离； $\alpha$ 和  $\beta$ 为探测器的瞬时视场角； $R_{\text{SN}}$ 为大于探测概率的阈值信噪比； $T_{\text{NED}}$ 为红外探测系统的噪声等效温差； $S_i$ 为目标探测方向的投影面积。当红外探测系统探测近距离的目标时，光电导引系统作用距离为成像距离，在一定观察等级下的成像距离  $R_i$  和温差关系为

$$\begin{cases} \Delta T_0 \cdot \tau(R_i) \geq T_{\text{MRD}}(f) \\ \frac{1}{2f} \leq \frac{h}{N_e R_i} \end{cases}, \quad (12)$$

式中： $\tau(R_i)$ 为目标与探测系统之间传输路径上的平均大气透射比； $T_{\text{MRD}}(f)$ 为一定观察等级下的探测系统的最小可分辨温差； $f$ 为目标的空间特征频率； $h$ 为目标高度； $N_e$ 为按 Johnson 准则发现、定位、识别和确认目标所需的等效条带数。当人眼通过红外探测系统能够发现、定位、识别和确认一个目标时，满足式(11)或式(12)的最大距离  $R_{\text{max}}$  即为红外探测系统对点源或扩展源目标的作用距离阈值。

### 2) 测试方法

不同的制导方式<sup>[46]</sup>存在不同的作用距离阈值，在施放烟幕后，由于烟幕可以削弱一定的光辐射，因而可缩短导引头的制导距离，降低导弹的命中概率，从而对目标进行保护。由此可见，在施放烟幕后，光电导引头作用距离根据不同的制导方式会被缩短为不同的  $R$ ，即弹目距离  $R$  小于  $R_{\text{max}}$  时才可精确制导。此  $R_{\text{max}}$  被设置为光电导引头的作用距离阈值，按实际作用距离可以判断烟幕干扰效果优劣，当实际作用距离大于并远离  $R_{\text{max}}$  时，代表烟幕干扰效果越好。当测试环境为外场时，根据烟幕干扰前后热像仪采集到的目标、烟幕与背景温度等信息，由式(11)或式(12)计算光电导引系统的作用距离，将其与不同制导方式的作用距离阈值相对比，可以从作用距离的角度评估烟幕干扰效果的好坏。

这种评价方法在外场测试时无视目标距离的远近，都可计算光电导引系统的作用距离值，适用于小目标检测。其不足之处是需要已知敌方红外成像系统参数才能更加准确判断实际效果，往往需要能模拟敌方导引头的设备，对设备性能参数要求较高。

表 2 不同情况下的判决规则

Table 2 Judgment rules under different cases

Actual situation	Tracking accuracy of the electro-optical guidance system with known smoke interference $\sigma_0$		Tracking accuracy of electro-optical guidance system with unknown smoke interference $\sigma_0$	
	$\sigma \leq 3\sigma_0$	Invalid interference	$\sigma \leq R_d$	Invalid interference
Judgment rule	$\sigma > 3\sigma_0$	Effective interference	$\sigma > R_d$	Effective interference
	Tracking failed	Effective interference	Tracking failed	Effective interference

表 2 中定义  $3\sigma_0$  为界限来判定实施干扰时跟踪误差是否超出正常跟踪精度允许范围，由概率论中心极限定理获得。当干扰成功后，计入次数。在进行多次干扰实验测试后，可以定义干扰成功率为

$$\alpha = \frac{n_e}{n}, \quad (13)$$

式中： $n$ 为总干扰次数， $n_e$ 为有效干扰次数。不同的导引系统具有不同的跟踪精度，干扰成功率  $\alpha$  越高代表干扰效果越好。

### 3.3 基于光电系统跟踪精度的评价

#### 1) 跟踪精度

光电导引头的跟踪瞄准轴指向目标的精度即跟踪精度<sup>[47-48]</sup>。跟踪精度越小，则跟踪误差越大，表示烟幕干扰效果越好。通过比较实施干扰前后的跟踪误差的变化，可以评价烟幕干扰效果。

#### 2) 测试方法

利用导引头挂飞干扰试验法，将导引头悬挂于飞行平台，在飞行过程中，由导引头对地面目标进行跟踪，模拟导弹导引头的动态跟踪过程<sup>[49]</sup>，当导引头稳定跟踪目标时，释放烟幕，对导引头进行干扰，试验过程如图 4 所示<sup>[50]</sup>。

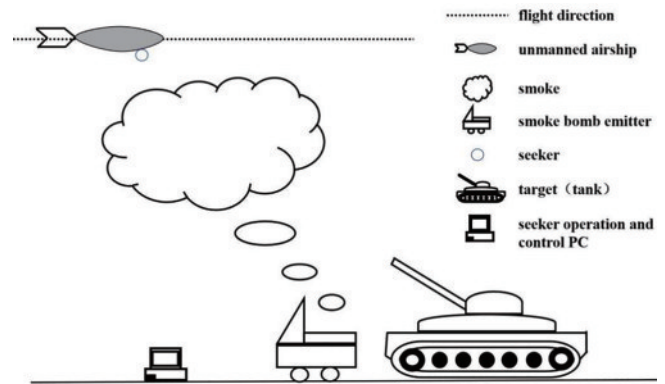


图 4 试验过程<sup>[50]</sup>

Fig. 4 Test process<sup>[50]</sup>

试验过程中有两种情况：一是已知未实施烟幕干扰时光电导引系统的跟踪精度为  $\sigma_0$ ，实施烟幕干扰时导引头的脱靶量<sup>[51]</sup>为  $\sigma$ ，存在一组判决规则<sup>[52]</sup>；二是当无法获得未实施干扰时的跟踪精度时，以实施干扰后制导装置杀伤被保护目标的半径大小  $R_d$  为依据，判断干扰是否有效，存在另一组判决规则。表 2 为不同情况下的判决规则。

这种评价方法更接近实战情况，可实时观测烟幕干扰效果，适用于装备定型试验，测试环境为导引头、外场。其不足之处是外场试验昂贵，并且当导引头稳定跟踪假目标时，无法获得正确的评估结果。

### 4 烟幕干扰前后图像质量变化评价法

在数字图像领域，干扰前后场景图像的特征变化间接反映场景受干扰程度，可归纳出 3 种测试方法，包括基于分形特征、基于图像纹理特征和基于图像信噪

比的测试方法。

#### 4.1 基于分形特征的评价

##### 1) 干扰前后图像分形拟合误差

在数学模型中,分形理论对图像处理的主要物理基础是人造场景目标与自然场景目标表面粗糙度的差异。而处理烟幕干扰前与烟幕干扰后的场景可视为自然场景目标和人造场景目标。释放烟幕前,目标分形维度较高,与分形模型的拟合程度较高,则分形拟合误差小;在释放烟幕后,人造场景目标分形维度低,分形拟合误差大,但随着烟幕遮蔽程度的增强,目标区域的灰色特征逐渐接近自然物体的灰色特征,这与分形模型一致,因而分形拟合误差减小<sup>[53-54]</sup>。因此利用探测器<sup>[55]</sup>获取外场图像,对外场图像进行数据处理,目标热图像上烟幕遮蔽程度的动态过程可以通过分析分形拟合误差变化得到,进而可以根据分形拟合误差的大小 $E$ <sup>[56]</sup>评价烟幕干扰性能。

##### 2) 测试方法

烟幕运动视为分形布朗运动,主要用于描述自然界不规则物体表面,其中分形拟合误差 $E$ 表示施放烟幕前后场景图像粗糙度的变化,更能直接表示烟幕干扰效果。分形拟合误差 $E$ 可以表示为

$$E = \sum_{\epsilon=1}^M [\ln A(\epsilon) - s_{\text{slope}} \times \ln \epsilon - i_{\text{intercept}}]^2, \quad (14)$$

式中: $\epsilon$ 为灰度图像上下表面的尺度; $M$ 为尺度达到的最大极限; $A(\epsilon)$ 为相距上下表面 $\epsilon$ 处的灰度表面的面积; $s_{\text{slope}}$ 为拟合曲线斜率; $i_{\text{intercept}}$ 为拟合曲线截距。由式(14)可知,分形拟合误差 $E$ 越小,烟幕的遮蔽效果越好。

这种评价方法在外场测试下精确且高效,所需数据量较少,适用于对烟幕遮蔽动态过程的表征,有助于探寻烟幕干扰规律和改进烟幕材料研制。其不足之处是只适用于表现静止目标图像的结构,描述物体的运动过程受限。

#### 4.2 基于图像纹理特征的评价

##### 1) 干扰前后图像纹理特征

考虑到烟幕干扰也会对图像纹理信息造成破坏,在选择评价指标时也可以将图像纹理特征作为指标。图像纹理特征<sup>[57-58]</sup>反映像素及其邻域内的灰度分布,一般可以通过灰度共生矩阵来得到关键的图像纹理特

征,在灰度共生矩阵的基础上计算统计量,并将其作为纹理特征,如熵、角二阶矩等<sup>[59]</sup>。

##### 2) 测试方法

图像纹理特征可由熵 $E_{\text{NT}}$ 和角二阶矩 $A_{\text{DM}}$ 进行衡量<sup>[60]</sup>,熵度量图像信息,计算公式为

$$E_{\text{NT}} = - \sum_{i=1}^{L_1} \sum_{j=1}^{L_1} p(i, j) \ln p(i, j), \quad (15)$$

式中:灰度共生矩阵大小为 $L_1 \times L_1$ ;  $p(i, j)$ 为灰度共生矩阵中某一灰度对 $(i, j)$ 出现的概率。角二阶矩度量图像灰度分布均匀程度和纹理粗细度,计算公式为

$$A_{\text{DM}} = \sum_{i=1}^{L_1} \sum_{j=1}^{L_1} p(i, j)^2, \quad (16)$$

当图像复杂程度越高,熵值越大,角二阶矩值越大。在释放烟幕前,图像中目标与背景复杂程度高,熵值和角二阶矩值大;随着烟幕的释放,目标与背景逐渐被烟幕掩盖,图像中灰度均匀,复杂程度下降,熵值和角二阶矩值变小。定义干扰率 $\gamma$ 为

$$\gamma = \frac{n_1 E_{\text{NT}} [p'(x, y)] + n_2 A_{\text{DM}} [p'(x, y)]}{n_1 E_{\text{NT}} [p(x, y)] + n_2 A_{\text{DM}} [p(x, y)]}, \quad (17)$$

式中: $n_1$ 代表 $E_{\text{NT}}$ 的权重值, $n_2$ 代表 $A_{\text{DM}}$ 的权重值,可采用不同的权重分配方法<sup>[61]</sup>, $n_1 + n_2 = 1$ ;  $p'(x, y)$ 为烟幕释放后灰度共生矩阵中某一灰度对 $(i, j)$ 出现的概率, $p(x, y)$ 为烟幕释放前灰度共生矩阵中某一灰度对 $(i, j)$ 出现的概率。由式(17)可知, $\gamma$ 值越小,代表烟幕的干扰效果越好。

这种评价方法在外场测试环境下所需指标单调性好,计算过程简单,图像分析全面,适用于对图像像素及其邻域内的灰度分布的定量表征。其不足之处是难以获得具有真实感的运动图像,而且对图像质量要求较高。

#### 4.3 基于图像信噪比的评价

##### 1) 干扰前后图像信噪比

图像是辐射量子分布再现的景物。辐射量子数的差异表现出图像的亮暗,构成了图像信号。同时,由于辐射量子在数量上存在随机涨落,该量子数的起伏又构成了图像噪声。两个相邻的像元具有不同的辐射亮度,构成一个图像细节。图像细节探测的原理如图5所示<sup>[62]</sup>。

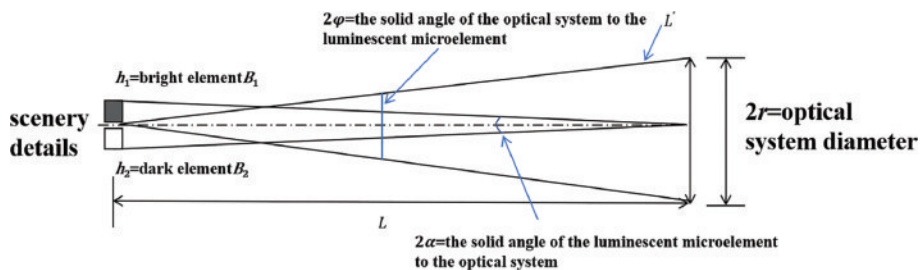


图5 光电成像系统探测图像细节的原理<sup>[62]</sup>

Fig. 5 Principle of the photoelectric imaging system for detecting image detail<sup>[62]</sup>

当采用光学中的对比度  $C$  和平均亮度  $B_m$  来表示输入图像时,推断出光电成像系统的输出图像信噪比为

$$\frac{S_p}{N_p} = \sqrt{2\pi B_m r_1^2 \alpha_1^2 t \eta Q C^2}, \quad (18)$$

式中: $S_p$  为光电成像系统输出的图像信号; $N_p$  为输出的图像噪声; $r_1$  为光电成像系统接收孔径的半径; $\alpha_1$  为瞬时视场; $t$  为有效积分时间; $\eta$  为光电转换量子效率; $Q$  为每流明光通量每秒所通过的光子数。

## 2) 测试方法

式(18)是理想条件下光电成像系统的输出信噪比,如果这一信噪比大于接收器(通常是人眼)所需的阈值信噪比  $(S_p/N_p)_{\min}$ ,说明理想的光电成像系统可以探测到这一图像。即可建立光电成像系统的图像探测方程,为

$$\sqrt{2\pi B_m r_1^2 \alpha_1^2 t \eta Q C^2} \geq \left( \frac{S_p}{N_p} \right)_{\min}. \quad (19)$$

当式(19)成立时,表明图像可探测到,反之不可探测。可以通过计算烟幕干扰过程中图像的输出信噪比与阈值信噪比的接近程度且是否大于接收器的阈值信噪比,判断烟幕干扰效果的好坏。当图像的输出信噪比小于阈值信噪比且两者之间的差值越大,代表烟幕干扰效果越好。

这种评价方法多用于外场测试,当光电成像系统处于理想工作状态时,除量子噪声外,无其他附加噪声,无像差,适用于探测景物微小细节。但接收器通常为人眼,主观性偏强,而且图像的形状也会影响人眼的阈值信噪比。

## 5 总结与展望

当前烟幕遮蔽和干扰效果的评价方法很多,分别适用于烟幕技术研究的不同环节和针对不同干扰对象时的性能评价。其中,透过率法、图像灰度法和辐射出射度法适用于实验室内对烟幕剂自身衰减性能、不同光学波段遮蔽效果等的评价;基于光电制导系统信噪比、作用距离、跟踪精度的评价方法比较适合从被干扰导引头的角度对烟幕性能的评价;而基于烟幕干扰前后图像质量变化的评价方法则比较适合对外场遮蔽效果的评价。但是,现代战场光电探测手段已经往多波段、多模式和信息融合方向发展,无论是先进的多功能光电瞄准吊舱,还是多模复合制导装置,往往集成了激光、可见光、红外等多种探测方式,采用单一指标显然难以全面定量评估烟幕遮蔽和干扰效果。因此,针对采用单一评价指标定量评估效果的不足,迫切需要构建基于多指标的综合评价方法数值模型,以满足对烟幕遮蔽和干扰效果进行综合评价的需求,这正是下一步需要开展的研究工作。与此同时,各种围绕烟幕干扰的研究的最终目的都是提高战场上烟幕的干扰效

果,因此,探索适合于实战条件下的烟幕遮蔽和干扰效能评价方法,对综合全面地评价烟幕性能、评估战场光电对抗作战效能是十分必要的,这也是烟幕干扰效果评估下一步需要重点关注的方面。相信随着先进测试技术和信息处理技术的不断发展,烟幕效能评价手段会更加科学完善。

## 参 考 文 献

- [1] 彭文联,张兴高,刘庚冉,等. 纳米石墨基烟幕材料的遮蔽干扰特性研究[J]. 光电技术应用, 2019, 34(6): 17-20.  
Peng W L, Zhang X G, Liu G R, et al. Research on shadowing and interference characteristics of nano-graphite based smoke screen material[J]. Electro-Optic Technology Application, 2019, 34(6): 17-20.
- [2] 胡洋嶼,程正东,梁振宇,等. 激光关联成像在烟幕条件下的实验研究[J]. 中国激光, 2021, 48(4): 0401020.  
Hu Y D, Cheng Z D, Liang Z Y, et al. Experimental study on laser computational ghost imaging through smoke media[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(4): 0401020.
- [3] 汤永涛,王国恩,林鸿生. 激光制导技术的发展应用及干扰技术研究[J]. 制导与引信, 2021, 42(3): 18-22.  
Tang Y T, Wang G E, Lin H S. Development and application of laser guidance technology and research on jamming technology[J]. Guidance & Fuze, 2021, 42(3): 18-22.
- [4] 韩宏伟,张晓晖. 烟幕对红外热成像干扰效果评价[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(12): 1204004.  
Han H W, Zhang X H. Evaluation of interference effects of smokescreen on IR imaging[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(12): 1204004.
- [5] 刘顺民. 发烟剂材料粒径影响红外辐射规律及应用[D]. 南京:南京理工大学, 2004.  
Liu S M. Influence of particle size of smoke agent on infrared radiation and its application[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2004.
- [6] 钟志农. 烟幕消光的数值模拟[J]. 光电对抗与无源干扰, 1999, 14(1): 14-19.  
Zhong Z N. Numerical simulation of smoke extinction[J]. Electro-Optic Technology Application, 1999, 14(1): 14-19.
- [7] 熊晓伟,刘上乾. 红外气溶胶烟幕干扰效果的定量评估[J]. 系统工程与电子技术, 2001, 23(2): 38-41.  
Xiong X W, Liu S Q. Effect evaluation on infrared aerosol screening smoke[J]. Systems Engineering and Electronics, 2001, 23(2): 38-41.
- [8] 韩洁,张建奇,何国经. 红外烟幕干扰效果评价方法[J]. 红外与激光工程, 2004, 33(1): 1-4, 13.  
Han J, Zhang J Q, He G J. Estimation technology of the infrared smoke interference effect[J]. Infrared and Laser Engineering, 2004, 33(1): 1-4, 13.
- [9] 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.  
Li N. Impact of smoke jamming on the probability of

- seeker hit by infrared imaging[J]. *Laser & Infrared*, 2021, 51(3): 358-362.
- [10] 齐航, 袁健全, 李磊, 等. 基于深度学习的红外烟幕区域分割技术[J]. *控制与信息技术*, 2019(4): 18-22, 57.  
Qi H, Yuan J Q, Li L, et al. A method of smoke area segmentation for infrared images based on deep learning [J]. *Control and Information Technology*, 2019(4): 18-22, 57.
- [11] 杨子龙, 朱付平, 田金文, 等. 基于显著性与稠密光流的红外船只烟幕检测方法研究[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(7): 20200496.  
Yang Z L, Zhu F P, Tian J W, et al. Ship smoke detection method based on saliency and dense optical flow [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(7): 20200496.
- [12] Tang Y J, Dong X W, Shuai W J, et al. A new testing method of shielding effect of single smoke equipment [C]//2015 7th Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics (CEEM), November 4-7, 2015, Hangzhou, China. New York: IEEE Press, 2016: 293-295.
- [13] 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.  
Liu Y, Zhou J Z. Discussion on testing method of effective area of smoke screen[J]. *Mine Warfare & Ship Self-Defence*, 2004, 12(2): 31-33.
- [14] 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.  
Li Y. Research on testing method of infrared smoke shading effect[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2020.
- [15] 李明, 范东启, 康文运, 等. 红外烟幕遮蔽效果测量与评估方法研究[J]. *激光与红外*, 2006, 36(7): 599-603.  
Li M, Fan D Q, Kang W Y, et al. A method for measurement & evaluation of infrared smoke[J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(7): 599-603.
- [16] 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.  
Hua C, Liao S Y, Zhang Z Y, et al. Simulation research on jamming efficiency about the smoke screen against infrared seeker[J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49(2): 217-221.
- [17] 刘安昌. 红外烟幕干扰效果仿真及评价方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007.  
Liu A C. Research on simulation and evaluation method of infrared smoke jamming effect[D]. Xi'an: Xidian University, 2007.
- [18] 李晓霞, 马德跃, 郭宇翔, 等. 光程和容积连续可调式粒子消光系数测试装置及方法: CN104655589B[P]. 2017-12-29.  
Li X X, Ma D Y, Guo Y X, et al. Device and method for testing continuously adjustable optical path and capacity particle extinction coefficient: CN104655589B [P]. 2017-12-29.
- [19] 顾有林, 胡以华, 朱东涛, 等. 一种不规则生物颗粒毫米波透过率的测试装置: CN111735741B[P]. 2020-12-08.  
Gu Y L, Hu Y H, Zhu D T, et al. Device for testing millimeter wave transmittance of irregular biological particles: CN111735741B[P]. 2020-12-08.
- [20] 刘松, 马淑芳, 易明, 等. 红外烟幕干扰效果的分析评价方法[J]. *电子世界*, 2021(24): 79-83.  
Liu S, Ma S F, Yi M, et al. Analysis and evaluation method of interference effect of infrared smoke screen[J]. *Electronics World*, 2021(24): 79-83.
- [21] Butters B, Walmsley R. Use of a transmissometer model for infrared smoke model validation and assessment of obscuration and detection times[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7115: 71150T.
- [22] Farmer W M, Davis R E, DeAntonio M, et al. An evaluation of transmissometer systems used to measure smoke screen performance[J]. *Proceedings of SPIE*, 1988, 0926: 195-204.
- [23] 黄伟, 吉洪湖, 斯仁. FTIR 光谱辐射计测量结果的非均匀性修正[J]. *激光与红外*, 2015, 45(4): 400-405.  
Huang W, Ji H H, Si R. Non-uniformity correction for the measurement results of FTIR spectrometer[J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(4): 400-405.
- [24] 王乃岩, 王正萍, 董海波, 等. 傅里叶变换红外光谱仪在烟幕测试中的应用[J]. *分析化学*, 2001, 29(4): 443-445.  
Wang N Y, Wang Z P, Dong H B, et al. The application of Fourier transform infrared spectrometer to the smoke determination[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2001, 29(4): 443-445.
- [25] Oliveros C S, Sánchez G S M, Pérez C R. Field trials for determining the visible and infrared transmittance of screening smoke[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7483: 74830P.
- [26] Rogalski A. Recent progress in infrared detector technologies[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2011, 54(3): 136-154.
- [27] 马德跃, 李晓霞, 郭宇翔, 等. 红外烟幕遮蔽率及其分布表征方法[J]. *应用光学*, 2014, 35(4): 707-712.  
Ma D Y, Li X X, Guo Y X, et al. Measurement of screening rate and its distribution of infrared smoke screen [J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(4): 707-712.
- [28] 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*, 2017, 8(1): 40.
- [29] 李毅. 非球形微粒及其形成烟幕的消光机理研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2002.  
Li Y. Study on extinction mechanism of non-spherical particles and their smoke formation[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2002.
- [30] 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.  
Dai M. Research on ground target recognition algorithm under smoke interference[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020.
- [31] 李相民, 倪国强. 红外热像仪的噪声分析[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(S2): 523-526.  
Li X M, Ni G Q. Noise analysis of infrared cameras[J].



- Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(S2): 523-526.
- [32] 李晓霞, 豆正伟. 热成像法定量测试红外干扰剂遮蔽效果[J]. 红外技术, 2008, 30(10): 615-618.  
Li X X, Dou Z W. Quantitative measurement of screening efficiency of IR-screening materials by thermal imager[J]. Infrared Technology, 2008, 30(10): 615-618.
- [33] 李云红, 孙晓刚, 原桂彬. 红外热像仪精确测温技术[J]. 光学精密工程, 2007, 15(9): 1336-1341.  
Li Y H, Sun X G, Yuan G B. Accurate measuring temperature with infrared thermal imager[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(9): 1336-1341.
- [34] 吕俊伟, 卢毅, 张鹏, 等. 一种用热像仪获得烟幕透过率的方法[J]. 红外技术, 2006, 28(10): 602-605.  
Lü J W, Lu Y, Zhang P, et al. A method to acquire transmission of smoke with thermal imager[J]. Infrared Technology, 2006, 28(10): 602-605.
- [35] 周利存, 李斌. 基于红外成像探测器的烟幕遮蔽率测试方法研究[J]. 光电技术应用, 2018, 33(3): 70-73.  
Zhou L C, Li B. Research on smoke obscuring ratio testing method based on infrared imaging detector[J]. Electro-Optic Technology Application, 2018, 33(3): 70-73.
- [36] 李晓霞, 郭宇翔, 冯云松, 等. 一种干扰粒子红外遮蔽率三维静态测试装置: CN206348264U[P]. 2017-07-21.  
Li X X, Guo Y X, Feng Y S, et al. Disturb three-dimensional static test device of infrared rate of shielding of particle: CN206348264U[P]. 2017-07-21.
- [37] 严晓芳, 李磊, 任晓冰, 等. 烟幕对抗红外成像制导弹的仿真建模[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(10): 2697-2700, 2704.  
Yan X F, Li L, Ren X B, et al. Simulation modeling on countermeasure between smoke screen against infrared imaging guided missile[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(10): 2697-2700, 2704.
- [38] 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, 13(4): 31-33.  
Qiu J J, Zhao X Z. Jamming effect of smoke screen on infrared-guided anti-ship missile[J]. Electronics Optics & Control, 2006, 13(4): 31-33.
- [39] 杨彦杰, 王敏帅, 杜翠兰. 红外烟幕干扰效果评估方法研究[J]. 电子对抗, 2008(3): 10-13, 28.  
Yang Y J, Wang M S, Du C L. Evaluation method research on the jamming effect of infrared smoke screen [J]. Electronic Warfare, 2008(3): 10-13, 28.
- [40] 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.  
Yu N, Li J S, Wang X Z, et al. Simulation of jamming effect evaluation of IR smoke screen[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2012, 31(1): 23-25.
- [41] Wang X W, Xiong Z, Li H Y, et al. Practical aerosol model of infrared smoke[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 4891: 431-434.
- [42] 刘鑫. 基于 MATLAB 环境的激光烟幕干扰分析与研究[J]. 光电技术应用, 2017, 32(1): 86-90.  
Liu X. Analysis and research on laser smoke jamming based on MATLAB[J]. Electro-Optic Technology Application, 2017, 32(1): 86-90.
- [43] 张磊. 太空飞行器烟幕干扰遮蔽消光特性研究[J]. 现代防御技术, 2021, 49(3): 80-85.  
Zhang L. Study on the extinction characteristics of smoke jamming in spacecraft[J]. Modern Defence Technology, 2021, 49(3): 80-85.
- [44] 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.  
Xue P, Dong W F, Luo W. Research on the jamming effects of smoke screen on target identification capability of photoelectric guidance[J]. Laser & Infrared, 2018, 48(3): 374-378.
- [45] 谢家豪, 黄树彩, 韦道知, 等. 空天红外探测系统对无人机集群探测能力分析[J]. 光学学报, 2022, 42(18): 1812002.  
Xie J H, Huang S C, Wei D Z, et al. Detectability analysis of air-space infrared detection system for UAV swarm[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(18): 1812002.
- [46] 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, 112.  
Zhao J Y, Liu X W, Jiang L. Hit probability calculation of photoelectric guided missile under smoke jamming condition[J]. Journal of Detection & Control, 2019, 41(1): 102-105, 112.
- [47] 陆斌, 吕俊伟. 烟幕干扰效能外场试验的验证方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2012, 20(12): 3271-3272, 3276.  
Lu B, Lü J W. Technique of testifying for smoke disturbance performance in field testing[J]. Computer Measurement & Control, 2012, 20(12): 3271-3272, 3276.
- [48] 高卫. 烟幕干扰效果评估方法研究[J]. 兵工学报, 2006, 27(4): 681-684.  
Gao W. Study on evaluation of smokescreen jamming effectiveness[J]. Acta Armamentarii, 2006, 27(4): 681-684.
- [49] 刘松涛, 周晓东, 陈永刚. 光电成像制导系统干扰与抗干扰的性能评估[J]. 激光与红外, 2007, 37(1): 10-13.  
Liu S T, Zhou X D, Chen Y G. Evaluation techniques for countermeasures and counter-countermeasures performance on electro-optical imaging guided systems [J]. Laser & Infrared, 2007, 37(1): 10-13.
- [50] 高卫, 孙奕帆, 李娟, 等. 烟幕对电视导引头干扰效应的试验研究[J]. 光子学报, 2014, 43(10): 1011006.  
Gao W, Sun Y F, Li J, et al. Field test of smokescreen jamming effect on TV seekers[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(10): 1011006.
- [51] 高卫. 对光电制导系统干扰效果的评估方法[J]. 弹道学报, 2005, 17(3): 53-59.  
Gao W. Study on evaluation and test of electro-optical jamming effectiveness on electro-optical guided weapons [J]. Journal of Ballistics, 2005, 17(3): 53-59.
- [52] 赵怀学, 刘波, 谢梅林, 等. 基于多视场拼接光电经纬仪的成像系统指向校正方法[J]. 光学学报, 2022, 42(6): 0612002.  
Zhao H X, Liu B, Xie M L, et al. Pointing calibration method for imaging systems of photoelectric theodolites with multi-field of view stitching[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(6): 0612002.

- [53] 刘松涛, 杨绍清. 基于分形拟合误差的红外烟幕遮蔽效果评估方法[J]. 激光与红外, 2008, 38(1): 52-54, 66.  
Liu S T, Yang S Q. The evaluation method of infrared smoke screen shielding on ship target based on fractal fitting error[J]. Laser & Infrared, 2008, 38(1): 52-54, 66.
- [54] 郑淋萍, 王斌, 刘华巍, 等. 复杂背景下结合颜色和分形特征的多目标检测[J]. 上海师范大学学报(自然科学版), 2020, 49(1): 69-75.  
Zheng L P, Wang B, Liu H W, et al. Multi-target detection by using combined color and fractal features in complex background[J]. Journal of Shanghai Normal University (Natural Sciences), 2020, 49(1): 69-75.
- [55] 胡小江, 陈战辉, 白云. 红外成像导引头动态性能测试系统设计[J]. 红外技术, 2017, 39(12): 1078-1082.  
Hu X J, Chen Z H, Bai Y. Design of dynamic performance test system for infrared imaging seeker[J]. Infrared Technology, 2017, 39(12): 1078-1082.
- [56] Liu S T, Chen M R, Wang L Y. Research on the evaluation method of smoke jamming effect[C]// Proceedings of the 2019 International Conference on Image, Video and Signal Processing, February 25-28, 2019, Shanghai, China. New York: ACM Press, 2019: 105-110.
- [57] 薄郇. 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.  
Bo D. Research on simulation and classification method of infrared imaging jamming for target recognition[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [58] Pan H L, Gao P L, Zhou H C, et al. Roughness analysis of sea surface from visible images by texture[J]. IEEE Access, 2020, 8: 46448-46458.
- [59] Liu L Y, Fan X J. The design of system to texture feature analysis based on gray level Co-occurrence matrix [J]. Applied Mechanics and Materials, 2015, 727/728: 904-907.
- [60] Arivazhagan S, Ganesan L, Priyal S P. Texture classification using Gabor wavelets based rotation invariant features[J]. Pattern Recognition Letters, 2006, 27(16): 1976-1982.
- [61] 刘家军, 林皓琨. 基于ViBe算法的自适应阈值运动目标检测方法[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(2): 0210007.  
Liu J J, Lin H K. Adaptive threshold moving target detection algorithm based on ViBe method[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(2): 0210007.
- [62] 白廷柱. 光电成像技术与系统[M]. 北京: 电子工业出版社, 2016: 398-401.  
Bai T Z. Photoelectric imaging technology and system [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2016: 398-401.