

面源红外诱饵对抗成像制导导弹的仿真研究

童奇¹, 李建勋^{1,2}, 方洋旺¹, 李成³, 童中翔¹, 柴世杰¹, 张志波¹, 贾林通¹

- (1. 空军工程大学 航空航天工程学院, 陕西 西安 710038;
2. 空军装备研究院 复杂航空系统仿真重点实验室, 北京 100076;
3. 空军航空大学, 吉林 长春 130022)

摘要: 面源红外诱饵是一种有效对抗红外成像制导导弹的干扰装备。它能模拟被保护目标的红外特征, 达到干扰红外成像制导导弹的目的。首先, 分析面源红外诱饵对抗红外成像制导导弹的干扰机理。其次, 建立面源红外诱饵的辐射模型和运动模型。然后, 分析面源红外诱饵红外图像的位置、面积和灰度的变化规律, 仿真生成面源红外诱饵红外图像。最后, 以干扰成功率作为面源红外诱饵干扰效果评估准则, 计算不同距离和不同投放数量下面源红外诱饵干扰成功概率, 并对仿真结果进行分析。仿真结果表明: 面源红外诱饵能够逼真地模拟目标飞机的光谱辐射分布特性, 有效干扰红外成像制导导弹, 显著提高目标飞机的战场生存力。

关键词: 面源红外诱饵; 红外成像制导导弹; 红外图像; 干扰成功概率; 干扰效果评估
中图分类号: TN976; TP391.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)04-1150-08

Simulation research on surface-type infrared decoy for jamming infrared imaging guided missile

Tong Qi¹, Li Jianxun^{1,2}, Fang Yangwang¹, Li Cheng³, Tong Zhongxiang¹, Chai Shijie¹,
Zhang Zhibo¹, Jia Lintong¹

- (1. Aeronautics and Astronautics Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;
2. Science and Technology on Complex Aviation Systems Simulation Laboratory, Equipment Academy of Air Force, Beijing 100076, China; 3. Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China)

Abstract: The surface-type infrared decoy is an effective interference equipment to jam infrared imaging guided missile. It can jam the approaching infrared imaging guided missile by simulating the infrared signatures of the fighter to be protected. Firstly, the mechanism of surface-type infrared decoy for jamming infrared imaging guided missile was analyzed. Secondly, the radiation and moving models of surface-type infrared decoy were built. Then, the change rules of the surface-type infrared decoy's position, area and gray-scale were analyzed. The infrared images of the surface-type infrared decoy were generated. Finally, regarding the jamming success probability as the jamming effect evaluation criterion of surface-type infrared decoy, the jamming success probability in different distances and different quantities

收稿日期: 2014-08-11; 修订日期: 2014-09-13

基金项目: 国家自然科学基金(61203134, 61172083)

作者简介: 童奇(1986-), 男, 博士生, 主要从事飞行器作战使用与效能评估仿真等方面的研究。Email: 15109288577@163.com

导师简介: 童中翔(1958-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事飞行器设计、论证及红外对抗仿真等方面的研究。

Email: tzxkgy@163.com

were calculated, and the simulation results were analyzed. The simulation results show that the surface-type infrared decoy can realistically simulate the spectral radiation distribution characteristic of fighter, which can effectively jam the infrared imaging guided missile and greatly improve the battlefield survivability of fighter.

Key words: surface-type infrared decoy; infrared imaging guided missile; infrared image; jamming success probability; jamming effect evaluation

0 引言

随着红外成像技术的不断发展,红外成像制导导弹对军用飞机构成严重威胁。与点源红外制导导弹相比,红外成像制导导弹具有环境适应性好、隐蔽性强、灵敏度高、体积小、功耗低、工作可靠等优点,其目标识别、制导精度、全天候作战和抗干扰能力均具有较大幅度的提高^[1]。如何有效避免红外成像制导导弹的威胁成为亟待解决的问题。各国为了有效对抗红外成像制导导弹,都在大力研发高效能、大面积、宽光谱、抗识别的面源红外诱饵。面源红外诱饵是一种新型诱饵,可模拟目标各红外辐射波段的特征和目标运动特征,有效对抗红外成像制导导弹。吕相银等^[2]研究分析了面源红外诱饵对红外成像制导的有效干扰。赵非玉等^[3]研究了面源红外诱饵仿真建模,利用 OpenGL 技术实现了面源红外诱饵动态红外图像生成。方建等^[4]研究了基于 HLA 的无源干扰效果评估,对红外诱饵的投放决策及飞机的机动决策进行动态寻优。

文中在分析红外成像制导原理和面源红外诱饵干扰机理的基础上,建立面源红外诱饵的辐射模型和运动模型,根据具体的作战想定场景进行仿真实验,对红外图像的位置、面积和灰度变化进行仿真分析,模拟生成面源红外诱饵红外图像,并对面源红外诱饵的干扰效果进行仿真分析,验证其有效性。

1 面源红外诱饵对抗红外成像制导导弹干扰分析

1.1 红外成像制导原理

红外成像制导导弹一般由红外摄像头、图像监视器、图像信号处理器(包括预处理器、目标识别电路、特征提取与选择)和跟踪伺服系统等部分组成^[2]。红外成像制导导弹结构如图 1 所示。

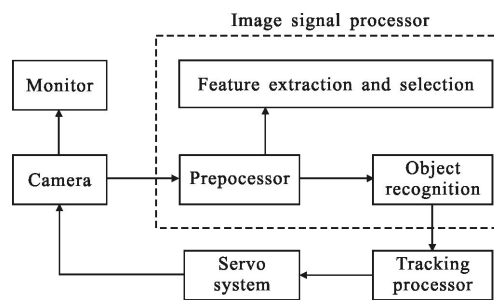


图 1 红外成像制导导弹原理框图

Fig.1 Principle frame of infrared imaging guided missile

(1) 摄像头是对目标进行摄像的装置;(2) 图像监视器用于显示目标和背景的图像以供观察;(3) 图像信号处理器由预处理器、特征提取与选择和目标识别三个部分构成;(4) 跟踪伺服系统由跟踪处理器和伺服机构两个部分组成。

发射导弹前,首先由飞机火控系统搜索、捕获要攻击的目标,一旦目标位置被确定,立即引导导弹上的红外导引头跟踪并锁定目标。导弹发射后,弹上摄像头摄取目标及背景的红外图像并进行预处理,得到数字化目标图像。经图像处理和图像识别,区分出目标、背景信息,识别出要攻击的目标并抑制噪声信号。跟踪处理器形成的跟踪窗口的中心按预定的跟踪方式跟踪目标图像,并把误差信号送到摄像头跟踪系统,控制摄像头继续瞄准目标。同时向导弹的控制系统发出导引指令信息,控制导弹的飞行姿态,使导弹飞向选定的目标。因此是一种“发射后不管”的制导方式。随着导弹与目标之间距离的缩小,目标在图像平面上的投影将扩大,且变得越来越清晰。此时,制导系统根据目标的形状识别出它的要害部位,并选择目标要害部位的中心作为攻击点。

1.2 对抗红外成像制导导弹的机理分析

目前红外成像制导导弹通过探测目标的热辐射来发现、识别和跟踪目标。但是,它也像其他武器系统一样,在一定的条件下受到干扰,以致失去作用。

红外成像制导导弹正常工作必须具备下列两个条件:

(1) 能量足够强。红外成像探测器接收足够强的红外辐射,即入射的辐射波长应与探测器的工作波长一致,探测器接收的辐射能量要足够强。

(2) 一定的信噪比。目标和背景之间的信噪比,若用辐射强度表示,则为:

$$C = \frac{I_T - I_B}{I_T} \quad (1)$$

式中: C 为目标与背景之间的信噪比; I_T 和 I_B 分别为目标和背景的辐射强度。

虽然红外成像导引头具有目标识别能力,但由于各种限制,识别能力有限。如果能够改变目标和背景的辐射特性,减少两者之间的对比度,或者大幅度地衰减进入红外成像制导导弹导引头的辐射强度,都可以使红外成像导引头系统受到干扰。如果干扰的强度相当大,目标与干扰物的图像重叠或部分重叠时,红外成像导引头没法根据灰度差辨认出目标和干扰物,即达到干扰的目的。因此,面源红外诱饵成为对抗红外成像制导的最佳选择。

1.3 面源红外诱饵干扰机理

从红外成像制导原理分析可知,红外成像制导导弹具有较高的跟踪精度、较强的抗干扰能力^[5]。这是因为红外成像制导导弹不仅利用目标红外辐射强度的大小,还利用目标飞机红外图像信息进行制导。面源红外诱饵除了要有一定的红外辐射强度,还必须破坏目标红外图像的空间分布并持续一定的干扰时间。

面源红外诱饵投放后在空中能够形成大面积的红外干扰云,其红外光谱特征相似于被保护目标,形成与被保护目标相似的红外辐射场和空间热红外轮廓图,歪曲目标热轮廓,欺骗红外成像制导导弹,继而使导弹偏离被保护目标。面源红外诱饵必须满足下列条件才能发挥其干扰效能:

(1) 模拟被保护目标的光谱辐射分布特征;(2) 形成的速度要快,一般控制在0.5s以内;(3) 有足够的燃烧时间,即应大于来袭导弹的红外制导时间。如果燃烧时间达不到要求,可采取连续投放方式实现;(4) 诱饵的有效辐射面积区域尽量要大,诱饵图像要与目标图像有一定的遮挡重合。

面源红外诱饵对抗红外成像制导导弹,各个阶段可以采用不同的方式进行干扰。

导弹搜索阶段(红外成像制导导弹距离目标飞机15000m以上),在目标飞机附近投放面源红外诱饵作为红外假目标,因为导弹距离目标较远,目标飞机形成的红外图像也较小,几乎可以作为点源目标进行对待,处于搜索阶段的红外成像制导导弹导引头可能会发生误判,面源红外诱饵起到“隐真示假”的作用。

在跟踪阶段初期(红外成像制导导弹距离目标飞机在7000~14000m左右),目标飞机图像占到1/5~1/3跟踪窗口,红外成像制导导弹使用形心跟踪或是质心跟踪方式^[1]。投放面源红外诱饵后,诱饵和目标飞机在导弹导引头视场中共同形成目标信息,在导引头视场中形成等效辐射中心。导引头将跟踪等效辐射中心,但由于红外诱饵形成的热图像比被保护目标红外辐射强度大若干倍,这样随着红外诱饵与目标在空间逐渐分离而把导弹逐渐引向诱饵,逐步改变导弹跟踪点位置,最后使目标飞机逸出导弹导引头视场而达到保护目标的目的^[6]。

随着红外成像制导导弹与目标飞机距离的进一步缩短(导弹距离目标飞机在1000~5200m左右),目标飞机图像慢慢充满跟踪窗口,导弹使用相关跟踪,跟踪目标飞机某一部分。此时可以将面源红外诱饵投放在导弹与目标飞机之间,使得面源红外诱饵图像充满跟踪窗口,破坏相关跟踪。

2 面源红外诱饵建模

面源红外诱饵包括诱饵辐射模型和诱饵运动模型。诱饵辐射模型表征从飞机高速平台投放后辐射面源的形状、辐射亮度分布、辐射光谱随时间的变化规律。诱饵运动模型表征从飞机高速平台投放后面源质心的运动规律,以及有效载荷的空间扩散规律。由于面源红外诱饵由一千多个箔片组成,因此面源红外诱饵的红外辐射特征和运动特征主要由箔片的红外辐射和运动所决定。箔片的红外辐射强度与箔片配方、起燃时间和持续时间等有关。箔片的运动特性与箔片的大小、形状、空气阻力和初速度等有关。

2.1 面源红外诱饵辐射模型

面源红外诱饵的红外辐射强度由各个箔片红外辐射合成。

对面源红外诱饵辐射变化实测数据进行取样,经插值拟合平滑处理,得到面源红外诱饵在整个燃烧过程中的辐射变化曲线^[7]。单枚面源红外诱饵中

波段红外辐射强度约为 1 000~2 500 W/sr。在高度为 1 000 m、速度为 110 m/s 条件下,某型面源红外诱饵的动态红外辐射强度变化拟合曲线如图 2 所示。

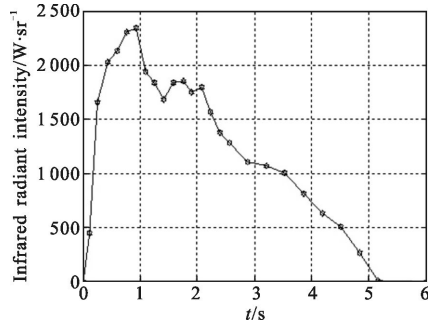


图 2 面源红外诱饵辐射强度变化曲线

Fig.2 Radiant intensity variation curve of surface-type infrared decoy

2.2 面源红外诱饵运动模型

面源红外诱饵投放后,诱饵箔片在空中除受地球重力、空气阻力、风速、风向和湿度等外界因素影响外,其诱饵箔片姿态、质量也会发生变化。这些因素都在影响面源红外诱饵的运动轨迹。根据外场试验数据,发现面源红外诱饵投放后空间分布区域约为 10~40 m²,长约为 20 m,宽度约为 1~2 m。

设定坐标系为地轴坐标系 $Ox_g y_g z_g$ ^[8],如图 3 所示。

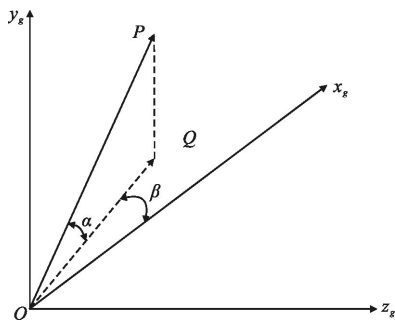


图 3 地轴坐标系

Fig.3 Earth coordinate system

其原点 O 固定于地面上某点, Oy_g 轴铅垂向上, Ox_g 和 Oz_g 轴在水平面内和 Oy_g 轴构成右手直角坐标系。重力通常在地轴系内给出,并沿 Oy_g 轴负向。假设投放面源红外诱饵瞬间飞机在地轴系 $Ox_g y_g z_g$ 中的坐标是 (x, y, z) 。

在投放面源红外诱饵的瞬间,面源红外诱饵坐标与目标飞机的坐标一致, P 为面源红外诱饵的一个箔片(视为一个点),其在平面 $x_g Oz_g$ 上的投影为 Q ^[9],

α 是 OQ 与 OP 所成的夹角,上仰为正,其范围是 $-\pi/2 \sim \pi/2$, β 是 OQ 与 Ox_g 轴正方向所成的夹角,其范围为 $0 \sim 2\pi$, α 与 β 是两个互不相关的参数。

面源红外诱饵的单个箔片的运动方程为:

$$\begin{cases} x_i = x_0 + v_x \cdot \Delta t \\ y_i = y_0 + v_y \cdot \Delta t \\ z_i = z_0 + v_z \cdot \Delta t \end{cases} \quad (2)$$

式中: Δt 为时间间隔; (x_0, y_0, z_0) 为上一个 Δt 时刻箔片的位置坐标。面源红外诱饵箔片的初始坐标位置是目标飞机投放面源红外诱饵时的瞬时坐标,即 (x, y, z) 。

$$\begin{cases} v_x = v_{x0} + a_x \cdot \Delta t \\ v_y = v_{y0} + a_y \cdot \Delta t \\ v_z = v_{z0} + a_z \cdot \Delta t \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} a_x = \frac{F \cos \alpha \cos \beta}{m} \\ a_y = \frac{-g \pm F \sin \alpha}{m} \\ a_z = \frac{F \cos \alpha \sin \beta}{m} \end{cases} \quad (4)$$

式中: F 为单个箔片受到的气动阻力; m 为箔片单元质量。 v_x, v_y, v_z 分别为当前时刻箔片速度 v 在 x_g, y_g, z_g 方向上的速度分量; v_{x0}, v_{y0}, v_{z0} 分别为上一个 v 时刻箔片速度 v 在 x_g, y_g, z_g 方向上的速度分量; a_x, a_y, a_z 分别为当前时刻箔片加速度 a 在 x_g, y_g, z_g 方向上的加速度分量。

$$F = -0.5 \times C_d \times \rho \times S \times v^2 \quad (5)$$

式中: F 为气动阻力; ρ 为空气密度; v 为燃烧箔片的瞬时速度; S 为箔片燃烧时有效阻力面积; C_d 为阻力系数。其中,大气密度 ρ 随着高度 H 的变化而变化,可由公式(6)求得:

$$\rho = \begin{cases} \rho_0 (1 - 0.02255H)^{4.2577} & 0 \leq H < 11 \text{ km} \\ 0.29691 \rho_0 \exp\left(-\frac{H-11}{6.341}\right) & 11 \leq H < 20 \text{ km} \\ 0.071765 \rho_0 (0.9077 + 0.000461H)^{-35.15} & 20 \leq H < 32 \text{ km} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\rho_0 = 1.225 \text{ kg/m}^3$ 。

气动阻力 F 又可以采用公式(7)来表示:

$$F = -k \times v^2 \quad (7)$$

式中: k 为阻尼系数。

面源红外诱饵自由落体过程中,当重力 mg 和气动阻力 F 大小相等方向相反时, $dv/dt = 0$ ^[10],则:

$$m \frac{dv}{dt} = mg + F = mg - kv^2 = 0 \quad (8)$$

由公式(8)可以推导出匀降速度,当 $v=u$ 时:

$$k = \frac{mg}{u^2} \quad (9)$$

匀降速度可以通过面源红外诱饵的低空投放试验实测得到,这样就可以间接求得阻尼系数。

公式(5)和公式(7)联立求解,可得:

$$C_d \cdot S = \frac{2k}{\rho} \quad (10)$$

将公式(10)带入公式(5)可以求得任意速度下,面源红外诱饵的气动阻力。

面源红外诱饵是由千百个箔片组成的,因此面源红外诱饵的实际运动轨迹由箔片运动轨迹合成。

2.3 干扰成功判据

投放的面源红外诱饵,只有在导弹导引头视场内才会起到干扰作用。图 4 是导弹视场的一个圆锥截面图,导弹视场角为 θ ,能量中心与诱饵对导弹的张角为 φ ,导弹与能量中心的距离为 R_{MB} ,导弹与诱饵的距离为 R_{MA} ,诱饵与能量中心的距离为 R_{AB} ^[4,11],则有:

$$R_{AB}^2 = R_{MA}^2 + R_{MB}^2 - 2R_{MA}R_{MB}\cos\varphi \quad (11)$$

由此可得:

$$\varphi = \arccos\left(\frac{R_{MA}^2 + R_{MB}^2 - R_{AB}^2}{2R_{MA}R_{MB}}\right) \quad (12)$$

根据公式(12)可知,如果 φ 小于半视场角,则面源红外诱饵在导弹导引头视场中,反之,诱饵已经偏离导引头视场。

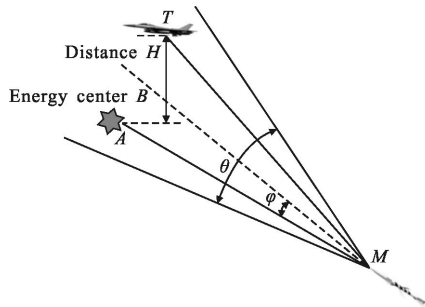


图 4 飞机和诱饵在导弹视场中的位置示意图

Fig.4 Position schematic of fighter and decoy in missile FOV

2.4 评估准则

面源红外诱饵干扰效果评估准则用干扰成功率来表示,面源红外诱饵的干扰成功率 P 为:

$$P = \frac{N_s}{N_L} \times 100\% \quad (13)$$

式中: P 为干扰成功率; N_s 为成功干扰的导弹数; N_L 为正常发射的导弹数。

3 仿真分析

作战应用中,面源红外诱饵作战效能的发挥主要受到来袭导弹、投放装置、投放方向、投放速度、投放数量、投放间隔和持续作用时间等因素的影响。依据作战想定,分别对红外成像制导导弹、目标飞机和面源红外诱饵进行仿真设置。

(1) 红外成像制导导弹:红外成像制导导弹速度为 450 m/s,爆炸半径为 11 m,中波段(3~5 μm)内工作,视场角为 $3^\circ \times 3^\circ$,偏航角为 0° ,俯仰角为 0° ,尾向追击目标飞机。

(2) 目标飞机:高度为 10 000 m,速度为 200 m/s,水平直线飞行,方向为地轴坐标系 $Ox_g y_g z_g$ 的 x_g 轴正方向。导弹尾向追击时,中波段内可观测到的飞机红外辐射面积为 62 m^2 ,非加力状态下正后方红外辐射强度为 $1\,050 \text{ W/sr}$ 。

(3) 面源红外诱饵:投放方向为垂直目标飞机机翼平面向上,投放速度大小为 30 m/s,投放间隔为 0.1 s,投放后经 0.4 s 时间布散到最大,持续作用时间为 6 s,在来袭导弹视线方向有效辐射面积为 30 m^2 ,辐射强度为 $2\,200 \text{ W/sr}$ 。

3.1 红外图像仿真

随着仿真时间的推进,红外成像制导导弹逐渐接近目标,导弹导引头视场半径慢慢缩小,而面源红外诱饵逐渐拉大与目标飞机之间的距离^[12]。根据作战想定,假定投放面源红外诱饵时,目标飞机与红外成像制导导弹之间相距 5 000 m,计算得到面源红外诱饵-飞机的垂直距离与红外成像制导导弹导引头视场半径的关系如图 5 所示。分析可知,面源红外诱

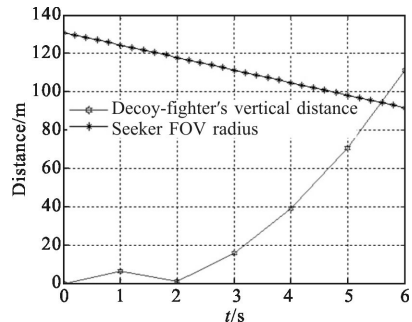


图 5 诱饵-飞机垂直距离与导引头视场半径的比较

Fig.5 Comparison of decoy-fighter's vertical distance and seeker FOV radius

饵在 1~2 s 处于目标飞机上方, 在 2 s 差不多与目标飞机处于同一高度, 在 $t=5.6$ s 时面源红外诱饵-目标飞机之间的垂直距离与红外成像制导导弹导引头视场半径相同, 此时面源红外诱饵在视场边缘, 其运动出导引头视场时就不再具有干扰效果。因此在 $t=5.6$ s 停止干扰图像仿真, 此时红外成像制导导弹与目标飞机之间的距离为 3 600 m。

根据仿真设置中目标飞机、面源红外诱饵的性能参数及其位置信息, 可以计算得到面源红外诱饵与导弹导引头视场中心的距离如图 6 所示。“◇”代表面源红外诱饵与导弹视场中心的相对距离, “×”代表其水平距离, “*”代表其垂直距离。面源红外诱饵先上升后下降, 其与导弹导引头视场中心垂直方向的距离先增大后减小, 随着诱饵的下降垂直距离又逐渐增大。诱饵与导弹导引头视场中心的距离几乎与其水平方向的距离重合, 这是因为诱饵水平方向的速度分量占据主导地位, 垂直方向的速度分量相对较小。诱饵与导弹导引头视场中心的距离呈现近似线性增长趋势。

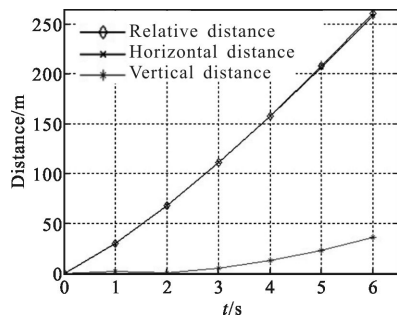


图 6 面源红外诱饵与导弹视场中心的距离

Fig.6 Distance between decoy and missile FOV center

依据导弹导引头视场大小随距离变化, 面源红外诱饵自身辐射形状也在发生变化, 在导弹摄像头中面源红外诱饵的图像面积大小随时间的变化规律如图 7 所示。

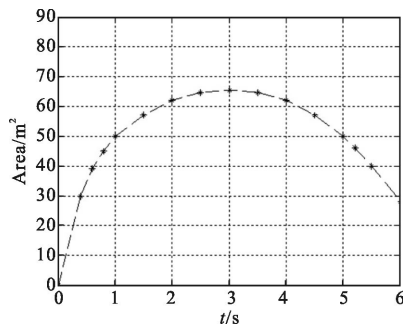


图 7 面源红外诱饵图像面积变化

Fig.7 Area variation of surface-type infrared decoy

随着红外成像制导导弹与面源红外诱饵之间距离的拉近, 面源红外诱饵在导引头视场中占据的面积也逐渐变大。随着面源红外诱饵箔片的燃烧能量消耗, 图像面积逐渐变小。

根据面源红外诱饵辐射强度可以计算得到辐射亮度变化规律。综合考虑大气衰减, 将辐射亮度转化为灰度随时间的变化规律。这是一个均匀量化的过程^[13-14]。

(1) 确定上下限。对于具有 256 个灰度等级的导引头而言, $G_{\min}=G_0$, $G_{\max}=255$ (即灰度范围 $G_{\text{rang}}=256$)。

(2) 找出最大、最小辐射亮度值, 分别用 L_{\max} 和 L_{\min} 表示。

(3) 计算每级灰度对应的辐射间隔 r 。

$$r = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{G_{\text{rang}}} \quad (14)$$

(4) 计算各辐射值 R 对应的量化灰度值

$$G = \frac{L - L_{\min}}{r} + G_{\min} \quad (15)$$

根据均匀量化步骤, 可以计算得到面源红外诱饵灰度随时间的变化曲线如图 8 所示。

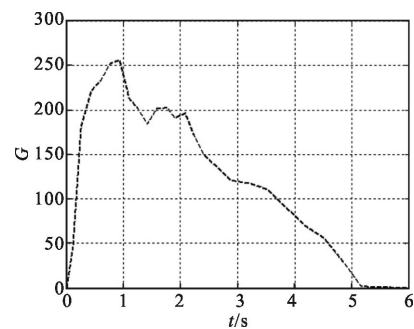
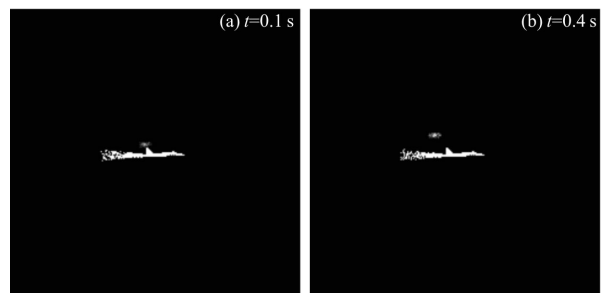


图 8 面源红外诱饵灰度随时间的变化曲线

Fig.8 Surface-type infrared decoy's gray scale vs time

根据以上仿真分析, 可以通过计算机模拟生成面源红外诱饵的红外图像。图 9 是面源诱饵红外仿真图像序列分别在 $t=0.1$ s、 $t=0.4$ s、 $t=0.6$ s、 $t=0.9$ s 时的 4 帧红外图像。图 9(a) 是 $t=0.1$ s 时的红外图像, 面源红外诱饵还未扩散; 图 9(b) 是 $t=0.4$ s 时的红外



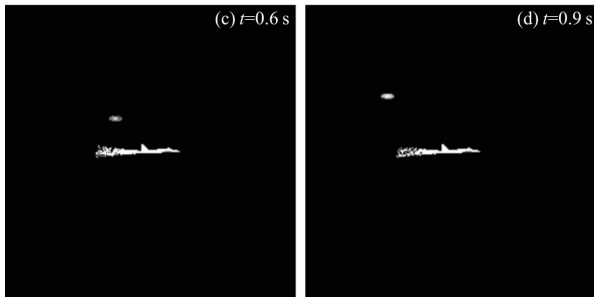


图 9 面源诱饵红外图像序列

Fig.9 Image sequences of surface-type infrared decoy

图像,面源红外诱饵布散到最大;图 9(c)是 $t=0.6$ s 时的红外图像,面源红外诱饵逐渐远离飞机;图 9(d)是 $t=0.9$ s 时的红外图像,面源红外诱饵的辐射亮度达到最大,根据仿真设置,此时面源红外诱饵在垂直方向速度为零,达到最高点。

多枚面源红外诱饵连发投放的红外图像如图 10 所示。图 10(a)为两枚连发投放模式 $t=0.3$ s 时的正侧

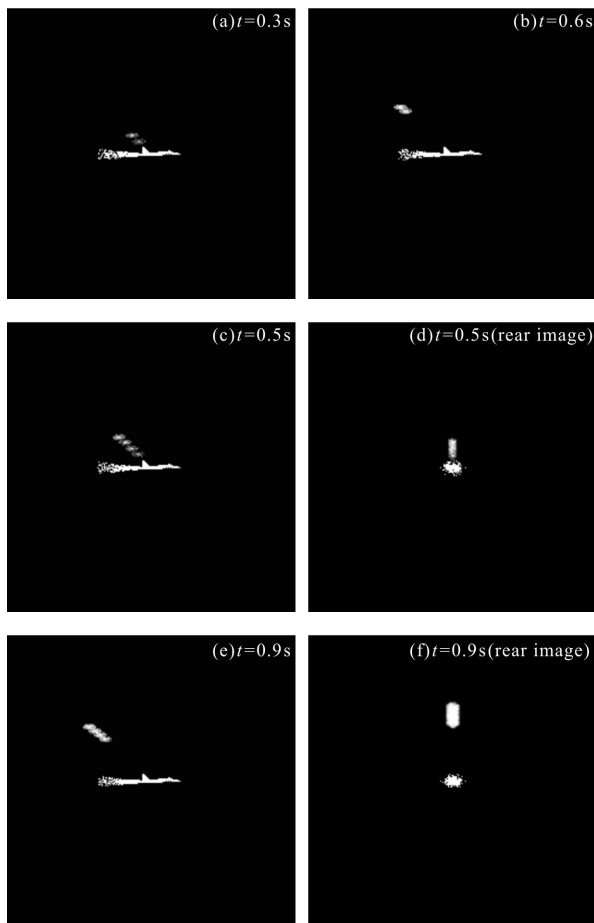


图 10 多枚面源诱饵连发投放的红外图像

Fig.10 Infrared images of dispensing multiple surface-type infrared decoys

方红外图像,面源红外诱饵的投放时间间隔为 0.1 s,两枚独立的诱饵还没有完全扩散开来;图 10(b)为两枚连发投放模式 $t=0.6$ s 时的正侧方红外图像,诱饵的辐射亮度比图 10(a)中 $t=0.3$ s 时的大得多,两枚诱饵已经基本融合在一起;图 10(c)为四枚连发模式 $t=0.5$ s 时的正侧方红外图像,图 10(d)为尾后的红外图像,此时第一枚面源红外诱饵已经达到其有效辐射强度;图 10(e)为四枚连发模式 $t=0.9$ s 时的正侧方红外图像,图 10(f)为尾后的红外图像,此时四枚面源红外诱饵连成一体,形成与目标飞机相似的红外辐射场和空间分布轮廓图,可以对红外成像制导弹形成有效干扰。

3.2 干扰效果分析

在实际空战中,影响面源红外诱饵干扰效果的因素很多。综合考虑这些因素的情况下,仿真的结果就存在一定的随机性。在进行干扰效果评估时,不是把某一次干扰仿真结果作为依据,而是将在一定条件下干扰成功概率作为干扰效果评估的标准。按照作战想定,红外成像制导弹尾后追击目标飞机,目标飞机在不同的距离按照不同的投放模式使用面源红外诱饵进行红外对抗。投放面源红外诱饵后,目标飞机快速进行大过载机动规避。目标飞机作机动规避有助于其快速逃离导弹导引头视场。由于面源红外诱饵受重力作用最终会下落,飞机应以最大过载向上偏离导弹速度方向。但考虑向上爬升要增大油门,会增大目标飞机的红外辐射,目标飞机可进行最大过载的侧向转弯。面源红外诱饵干扰效果仿真结果如表 1 所示。其中,红外成像制导弹尾后追击目标飞机,目标飞机分别在 1 000 m、3 000 m、5 000 m、7 000 m、11 000 m 和 15 000 m 处投放面源红外诱饵进行红外干扰,投放模式主要采用:单发投放、两枚连发和四枚连发。目标飞机投放面源红外诱饵后迅速机动规避。每一种作战想定各进行 2 000 次仿真。

由表 1 分析可知:在 5 000~7 000 m 处投放面源红外诱饵干扰效果相对较好。投放面源红外诱饵的距离太近或是太远,其干扰成功概率较低。三种投放模式中,连发投放四枚面源红外诱饵时干扰成功概率比其他两种模式要高些,干扰效果较为明显。

表1 面源红外诱饵干扰仿真结果

Tab.1 Jamming simulation results of surface-type infrared decoy

Distance	1 000 m			3 000 m			5 000 m			7 000 m			11 000 m			15 000 m		
Dispensing number	1	2	4	1	2	4	1	2	4	1	2	4	1	2	4	1	2	4
Number of success	1023	1189	1322	1450	1650	1724	1810	1913	1952	1832	1937	1962	1092	1230	1420	145	281	426
P	51.1%	59.45	66.1%	72.5%	82.5%	86.2%	90.5%	95.7%	91.6%	92.1%	96.8%	98.1%	54.6%	61.5%	71%	7.3%	14.1%	21.3%

4 结论

文中研究面源红外诱饵对抗红外成像制导导弹的仿真,研究结果表明:

(1) 随着距离的变化,面源红外诱饵红外图像的大小、亮度以及运动符合实际,仿真结果定性地反映了面源红外诱饵的特性,可以将其应用于实时动态红外干扰场景的模拟。

(2) 目标飞机距离红外成像制导导弹较近时,投放面源红外诱饵干扰成功概率很低,当红外成像制导导弹距离目标飞机 5 000~7 000 m 左右干扰效果较好,干扰成功概率达到 90%以上。

(3) 多枚面源红外诱饵连发投放相比单枚诱饵投放时干扰成功概率要高一些。

(4) 面源红外诱饵在红外波段能够逼真地模拟目标飞机的光谱辐射分布特性,以假乱真,有效干扰红外成像制导导弹,显著提高目标飞机的战场生存力。红外对抗中,目标飞机应在较短的时间内投放四枚以上面源红外诱饵,这样可以取得较为理想的干扰效果。

参考文献:

- [1] Xu Hailong, Wang Jun, Wu Xu efeng. Research into the jamming of distributed surface type infrared decoy to infrared imaging guidance anti-missile [J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2013, 36(1): 43-46. (in Chinese)
- [2] Lv Xiangyin, Huang Chaochao, Ling Yongshun. Analysis on surface-type infrared decoy for jamming infrared imaging guidance [J]. *Electronic Warfare Technology*, 2004, 19(9): 41-45. (in Chinese)
- [3] Zhao Feiyu, Lu Shan, Jiang Chong, et al. Research on the modeling method of surface-type infrared decoy [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2012, 27(2): 66-69. (in Chinese)
- [4] Fang Jian, Li Yanjun, Zhang Ke. Modeling and simulation of passive jamming effect assessment based on HLA [J]. *Computer Simulation*, 2008, 25(8): 32-35. (in Chinese)
- [5] Fang Youpei, Qian Jianping. Jamming technology research to the imaging IR guidance missile [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2000, 29(3): 7-14. (in Chinese)
- [6] Xiao Bende. Analysis of surface-source infrared Jamming technology [J]. *Mine Warfare & Ship Self-Defence*, 2011, 19(2): 52-55. (in Chinese)
- [7] Guo Bingtao, Wang Xiaoxin, Huang Xi, et al. Modeling and simulation of the scattering of targets surface by infrared decoys radiation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(2): 300-304. (in Chinese)
- [8] Lin Tao, Li Kuo. Research on a model of distributed surface type infrared decoy [J]. *Electro-optic Technology Application*, 2007, 22(1): 72-74. (in Chinese)
- [9] Kong Xiaoling, Ma Shengxian, Du Yuping, et al. Simulation research on surface-type infrared decoy for jamming infrared imaging guided missile [J]. *Command Control & Simulation*, 2011, 33(1): 78-81. (in Chinese)
- [10] Chen Naiguang. Moving characters simulation of foils cloud used in optics-electronic countermeasure [J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2007, 24(5): 20-23. (in Chinese)
- [11] Zeng Xianwei, Fang Yangwang, Wang Zhiqiang, et al. Technology of radar/IR dual-mode seeker against infrared decoy jamming [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(6): 1054-1059. (in Chinese)
- [12] Tian Xiaofei, Ma Lihua, Li Fengjing. The study on computer image generation of surface-type infrared decoy [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2012, 32(3): 205-208. (in Chinese)
- [13] Wang Xuewei, Zhang Weiguo, Shen Tongsheng. Computer generation of dynamic infrared images of a plan [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 1999, 28(2): 21-24. (in Chinese)
- [14] Li Jianxun, Tong Zhongxiang, Wang Chaozhe. Calculation and image simulation of aircraft infrared radiation characteristic [J]. *Acta Armamentarii*, 2012, 33(11): 1310-1318.