

面源红外诱饵干扰效能评估系统仿真研究

李韬锐^{1,2}, 童中翔¹, 李慎波¹, 黄鹤松¹

- (1. 空军工程大学 航空航天工程学院, 陕西 西安 710038;
2. 中国人民解放军 95965 部队, 河北 故城 253800)

摘要: 面源红外诱饵干扰效能评估系统的建立, 是进行效能评估的关键环节。考虑实验条件的偶然性和测试成本的经济性, 提出了建立面源红外诱饵干扰效能评估仿真系统的思路。首先, 建立了飞机和导弹数学模型, 充分考虑其运动规律和辐射因素, 并加入算法优化模型; 其次, 建立了面源红外诱饵的运动扩散模型和红外图像模型, 通过燃烧优化算法提高求解效率; 最后, 选择了干扰效能评估的指标, 通过算例仿真并与实测数据进行对比, 验证仿真系统的合理性。仿真结果表明: 建立的效能评估仿真系统可行有效, 与实验测试结果很接近, 达到了对面源诱饵干扰效能进行评估的要求。

关键词: 红外对抗; 面源红外诱饵; 干扰效能; 仿真评估; 算法优化

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0304001

Simulation study of jamming effectiveness evaluation system of surface source infrared decoy

Li Taorui^{1,2}, Tong Zhongxiang¹, Li Shenbo¹, Huang Hesong¹

- (1. Aeronautics and Astronautics Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;
2. The No.95965 Army of PLA, Gucheng 253800, China)

Abstract: Establishing jamming effectiveness evaluation system of surface source infrared decoy was the key link of effectiveness evaluation. Considering the occasionality of experimental conditions and the economy of test cost, a simulation system was proposed. Firstly, the mathematical model of aircraft and missile was established, and the motion law and radiation factor were fully considered, and the algorithm optimization model was added. Secondly, the motion diffusion model and infrared image model of infrared decoy were established. The combustion optimization algorithm was used to improve the efficiency of the solution. Finally, the effectiveness evaluation index of interference was selected, and the rationality of the simulation system was verified by example simulation and comparison with the measured data. The simulation results show that the established effectiveness evaluation simulation system is feasible and effective, which is close to the experimental results, and meets the requirements of evaluating the effectiveness of the non-point source decoy jamming.

Key words: infrared confrontation; surface source infrared decoy; jamming effectiveness; simulation and evaluation; optimization algorithm

收稿日期: 2017-10-05; 修订日期: 2017-11-03

基金项目: 国家自然科学基金(61203134)

作者简介: 李韬锐(1993-), 男, 硕士生, 主要从事飞行器红外对抗仿真方面的研究。Email: 15596652671@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、论证与红外对抗仿真等方面的研究。

Email: tzxkg@163.com

0 引言

红外空空导弹正朝着高精度、高速度、高突防能力和高毁伤能力的方向发展,使“不接触作战”打击成为可能^[1]。随着红外对抗复杂化程度的提高,红外导引头跟踪性能灵敏度和自适应能力的显著提升,使得红外空空导弹成为空战对抗中的杀伤主力军^[2]。伴随着红外干扰技术日益成熟,面源诱饵作为一种常用的、经济型的对抗红外空空导弹的手段,已逐步替代传统的红外诱饵,在空战对抗中得到广泛应用^[3]。面源诱饵由千余片诱饵箔片压制而成,当诱饵箔片发射出去后,在外界气流的冲击下迅速扩散。表面可燃性金属燃点低,遇到空气后迅速自燃,产生高温火焰。扩散完全后,在飞机尾部形成椭球状的箔片云,箔片云具有显著的热辐射效应,能产生与目标机相近的辐射特性,可以有效改变导引头视场范围内的红外辐射特征,从而提高飞机规避导弹的成功率,提升战场生存力。

经济、快速、准确地评估各种空战态势下面源红外诱饵的干扰效能,对把握战机显得至关重要,因此,建立面源红外诱饵的干扰效能仿真系统十分必要。目前,国内的相关理论不够成熟,仿真系统有待进一步完善和优化。童奇等^[4]计算了不同距离和不同投放数量下面源红外诱饵干扰红外制导导弹成功概率;黄鹤松等^[5]建立了导弹识别、导引、控制和运动过程的数学模型,对面源诱饵不同释放数量下的导弹运动轨迹进行了仿真研究;汪中贤等^[6]通过算例分析导弹运动轨迹,计算了面源红外诱饵在不同投放时间间隔和投放数目下干扰成功的概率。文中以国家自然科学基金机载面源红外诱饵作用机理及干扰策略研究为依托,建立了面源红外诱饵干扰效能仿真系统。建立了导弹、飞机和面源诱饵的数学模型,加入了优化算法,选择效能评估的指标,通过外部的参数设置窗口,进行战术参数输入,进行面源红外诱饵干扰效能的仿真。通过与实验数据进行对比,充分验证了仿真系统建立的科学性和可行性,为下一步评估理论的完善,实验测试与验证步骤的优化,提供依据。

1 目标机和导弹模型

1.1 目标机模型

目标机的运动模型是从真实的飞参数据中进行

提取。为了提高飞机运动轨迹的求解效率,保证飞机运动轨迹的真实性,通过处理飞参数据还原飞机的机动动作。收集整理了某型飞机500余架次飞行记录的飞参数据,从中提取出50余种飞机的机动动作,建立了机动动作数据库,如垂直蛇形机动、桶滚滚转机动等,给定初始时间,通过插值算法获得仿真周期内飞机的信息,如位置、姿态、速度等。图1为机动动作数据库。



图1 机动动作数据库

Fig.1 Database of maneuver

目标机的辐射特性在参考文献[7]中有详细地分析说明,在文献中对尾喷口、尾焰和蒙皮的红外辐射特性进行了模型建立,通过仿真分析充分验证了模型的可靠性。模型的仿真结果在这里不作为重点内容进行具体说明,文中重点介绍大气传输对红外辐射的影响。

在研究尾喷口、尾焰和蒙皮红外辐射的距离传输特性时,必须充分考虑大气传输这个关键因素。通过建立大气传输模型,定义波段的平均透过率,来仿真分析飞机红外辐射的距离传输特性。

大气对红外辐射的衰减程度用大气透过率 τ 来表示:

$$P_i = \tau P_0 \tag{1}$$

式中: P_0 为辐射源的红外辐射功率; P_i 为经过大气衰减后的红外辐射功率。

由朗伯定律可知,大气沿一定路径 R 的单体透过率为:

$$\tau(\lambda) = e^{-\beta(\lambda)R} \tag{2}$$

式中: $\beta(\lambda)$ 为大气对红外辐射衰减的影响系数。

大气中的衰减因素主要包括三方面:(1)大气中气体分子(H_2O 、 CO_2 等)的吸收作用;(2)大气分子、气溶胶的散射作用;(3)由气象条件(云、雾、雨、雪)造成的衰减。 $\beta(\lambda)$ 由各部分影响因素的衰减系数相加获得:

$$\beta(\lambda)=\alpha(\lambda)+\gamma(\lambda)+\chi(\lambda) \quad (3)$$

式中： $\alpha(\lambda)$ 为吸收系数； $\gamma(\lambda)$ 为散射系数； $\chi(\lambda)$ 为气象环境系数。

$\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波段内的平均透过率为：

$$\tau = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_a(\lambda) \tau_\gamma(\lambda) \tau_\chi(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

图 2 为通过大气传输模型计算所得到的“红外窗口”3~5 μm 和 8~12 μm 波段大气透过率曲线。经过数值计算,3~5 μm 波段的平均透过率为 0.523 3,8~12 μm 波段的平均透过率为 0.784 6。

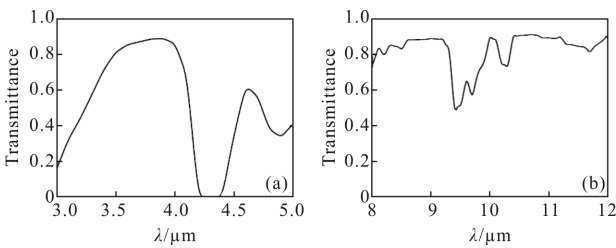


图 2 3~5 μm 和 8~12 μm 波段大气透过率

Fig.2 Atmospheric transmissivity of 3~5 μm and 8~12 μm

考虑大气透过率的影响,传输方向上的红外辐射强度为：

$$I_{\lambda_1-\lambda_2} = \varepsilon \tau (I_{j,\lambda_1-\lambda_2} + I_{w,\lambda_1-\lambda_2} + I_{s,\lambda_1-\lambda_2}) \quad (5)$$

式中： ε 为大气透射率修正系数； $I_{j,\lambda_1-\lambda_2}$ 为尾喷口在 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波段内的红外辐射强度； $I_{w,\lambda_1-\lambda_2}$ 为尾焰在 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波段内的红外辐射强度； $I_{s,\lambda_1-\lambda_2}$ 为蒙皮在 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波段内的红外辐射强度。

1.2 导弹模型优化算法

导弹的识别、导引、控制和运动模型在参考文献[5]中有详细的仿真验证,重点对导弹模型中的运用的优化算法进行详细说明。

1.2.1 跟踪优化算法

导弹存在记忆周期,若锁定目标,则继续跟踪锁定的目标机的红外辐射特征;若失去目标,则导弹重新进入搜索模式,直至捕捉到与记忆中目标机最相近的红外辐射特征。因此,可将迭代的贪心算法引入导弹失去目标的再搜索过程,来搜寻视野范围内的最佳红外辐射特征^[8]。迭代贪心算法的伪代码如下所示：

GREEDY-ACTIVITY-SELECTOR(s, A)

$n = s.length$

$A = \{a_1\}$

$k = 1$

for $m = 2$ to n

if $abs(a_m - a_1) = \min\{abs(s[m] - a_1)\}$

$A = A \cup \{a_m\}$

$k = m$

return A

第 2~3 行选择目标 a_1 , 将集合 A 的初值设为目标机的红外辐射特性。第 4~7 行的 for 循环, n 为设置的搜索循环的次数, $s[m]$ 为一个循环周期整个市场范围内红外辐射特征的集合。每循环一次,筛选出循环中的 a_m , 即每次循环中的最佳值,依次存入 A 中,直至导弹击中目标或自爆。变量 k 记录了在集合 A 中,搜索与目标红外辐射特性吻合度最高目标的下标。最终终止循环,返回集合 A ,即导弹每一周期锁定红外辐射特征。

1.2.2 抗干扰识别算法

抗干扰识别算法流程如图 3 所示。开始记录了 T 时刻导引头视场范围内的目标机的红外辐射特征,进而考虑环境因素的影响,最主要的是太阳的干扰。一旦太阳进入导引头的视场范围中,导引头的跟

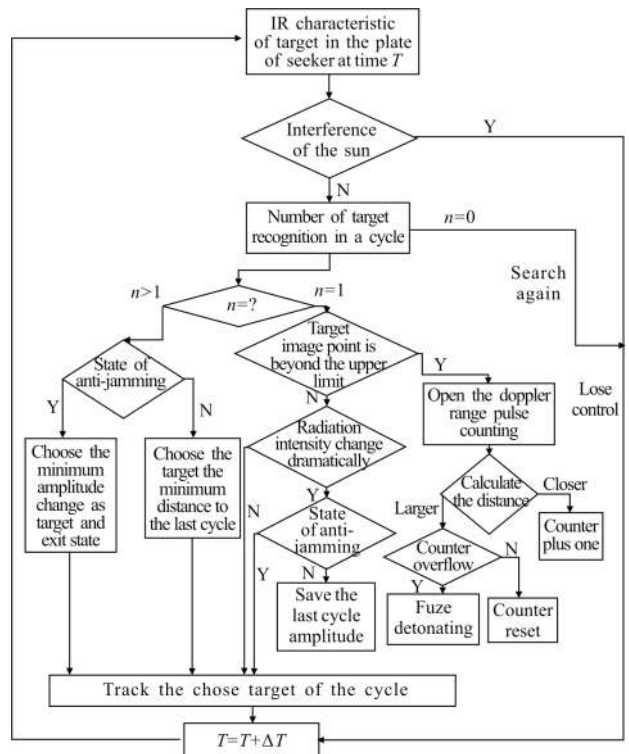


图 3 抗干扰识别优化算法流程

Fig.3 Optimization algorithm of anti-interference recognition

踪视线将会受到严重的辐射干扰,很难获得真实目标的目标辐射,在这种情况下导弹命中目标机的概率很低。导弹锁定目标之后的发射初期,导引头焦平面视场范围内只有一个目标,通过视场角收缩、设置波门、锁定目标。当目标像点的红外辐射强度值瞬间增大时,一般为目标开加力状态或释放诱饵,导引头进入抗干扰识别状态,同时记忆变化前锁定的目标机的红外辐射幅特征。当面源红外诱饵与目标分离开来时,导引头通过跟踪优化算法,比较视场范围中辐射特征,选择与记忆中的辐射吻合度最高的目标。若像点没有迅速分离,则是由发动机加力引起的,导引头退出抗干扰识别状态。当导引头视场中没有目标像点时,导弹退出锁定状态,放大视场角,重新进入搜索状态,运用跟踪优化算法,进行目标搜索。

2 面源红外诱饵模型

2.1 运动扩散模型

为了更好地描述诱饵箔片空中运动规律,需要建立适当的坐标,并进行相应的坐标转换,坐标系建立的示意图如图4所示。

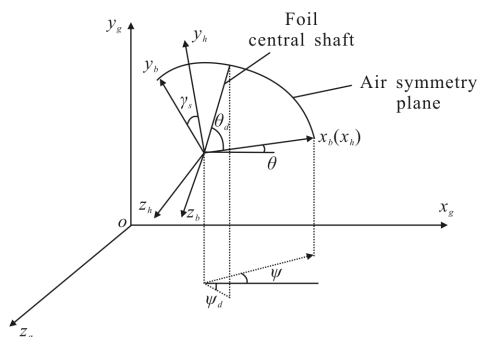


图4 坐标系建立示意图

Fig.4 Schematic diagram of coordinate system

箔片扩散过程中只受气动力和重力的作用,考虑到箔片的对称性,其气动侧力可忽略不计。在航迹坐标系下建立诱饵箔片的动力学方程:

$$\begin{cases} m \frac{dV}{dt} = -X - mg \sin \theta \\ mV \frac{d\theta}{dt} = Y \cos \gamma_s - mg \cos \theta \\ mV \cos \theta \frac{d\psi_s}{dt} = -Y \sin \gamma_s \end{cases} \quad (6)$$

式中: m 为箔片质量; X 气动阻力; Y 为气动升力。

根据空间几何的换算关系,由诱饵箔片质心运

动的速度和诱饵箔片的姿态,可计算出箔片的速度滚转角 γ_s 。箔片的速度方向由速度俯仰角 θ 和速度偏转角 ψ 确定,箔片姿态由中心轴俯仰角 θ_d 和中心轴偏转角 ψ_d 确定,则可以求出:

$$nv = (\cos \theta \cos \psi, \sin \theta, -\cos \theta \sin \psi) \quad (7)$$

$$nd = (\cos \theta_d \cos \psi_d, \sin \theta_d, -\cos \theta_d \sin \psi_d) \quad (8)$$

式中: nv 为 $x_b O_b y_b$ 面的单位法向量; nd 为气流对称面 $x_b O_b y_b$ 面的单位法向量。

$$\gamma_s = \arccos \left[\frac{(nv \times nd)(nv \times oy)}{|nv \times nd| |nv \times oy|} \right] \quad (9)$$

箔片质心的运动学方程为:

$$\begin{cases} \frac{dx_g}{dt} = V \cos \theta \cos \psi \\ \frac{dy_g}{dt} = V \sin \theta \\ \frac{dz_g}{dt} = -V \cos \theta \sin \psi \end{cases} \quad (10)$$

给出箔片初始位置,初始速度大小 V_0 ,初始速度方向 θ_0 和 ψ_0 ,箔片初始姿态 θ_{d0} 和 ψ_{d0} 之后,积分方程组(6)、(10)即可得到箔片完全燃烧前空间位置随时间的变化规律。

由于箔片形状的特殊性,箔片的转动可以看作是为中心轴两个姿态角的转动:

$$\begin{cases} \frac{d\theta_d}{dt} = \omega_{\theta_b} \\ \frac{d\psi_d}{dt} = \omega_{\psi_b} \end{cases} \quad (11)$$

已知初始分离阶段的最后时刻箔片的位置、速度大小和方向,以及箔片的姿态之后,积分方程组(6)、(10)和(11)即可得到充分燃烧后箔片的飞行轨迹。

设置了上千诱饵箔片的初始姿态角和旋转角速度的概率分布情况^[9],同时对上千诱饵箔片求解运动方程,即可得到面源红外诱饵的空间扩散运动规律。

2.2 红外图像模型

诱饵箔片表面的温度场和辐射亮度求解完成后^[10-12],采用动态规划法中的自底向上法求解思路,来解决面源诱饵整体辐射强度综合的优化问题。简要介绍自底向上动态规划法的求解思路为:

(1) 定义面源红外诱饵的数量规模。算法优化过程中,将箔片数量设为1000片,即与实际仿真或实验测试中的数量保持一致,若求解规模更大的诱饵箔片组,只需调整诱饵箔片的初始规模即可;

(2) 将子问题最小的求解规模定义为单片诱饵箔片表面的温度场。上节中对诱饵箔片进行了具体的求解,结果已经保存在相应的存储空间中,可直接调用,提高运算效率;

(3) 通过递归调用每次增加规模“1”,所求解出来的“子问题”规模的温度场分布均被存下来,可直接调用。相同类型的子问题只需求解一次,不用重复处理。当数据规模没有达到初始设置的数据规模时,继续递归调用,直到子问题的规模与定义的初始规模相同时,递归调用终止,返回最终求解出来的温度场;

(4) 通过后期的运算转换,图像处理,生成面源诱饵在空间分布的红外扩散图像;

(5) 当需要调用特定规模的求解值时,可以通过设定的调用窗口,进行调用。

燃烧优化算法求解流程图如图5所示。

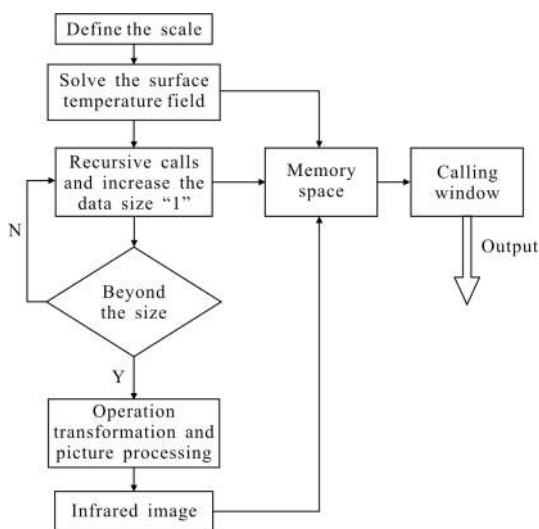


图5 燃烧优化算法求解流程图

Fig.5 Solving process of combustion optimization algorithm

3 评估指标选择

在仿真中,导弹的制导误差通过脱靶量来刻画,脱靶量关系示意图如图6所示。不考虑系统误差带来的影响,仿真中得到的脱靶量就是干扰误差和随机误差的代数和。选取导弹脱靶量作为面源红外诱饵的作战效能评价的指标,这里的脱靶量为多次仿真脱靶量的数学期望。通过计算脱靶量的大小来判断是否干扰成功,统计干扰成功的次数,得到面源红外诱饵的干扰成功的概率,评估面源红外诱饵的干扰效能。

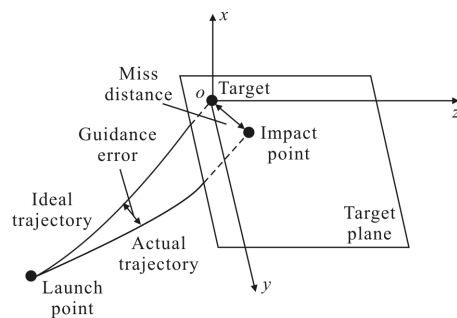


图6 脱靶量关系示意图

Fig.6 Schematic diagram of miss distance

4 仿真分析

4.1 扩散图像仿真分析

设一枚面源红外诱饵有1000个诱饵箔片,单个诱饵箔片质量0.65g,直径25.4mm,初始分离时间为0.36s。箔片以75°的发射角度进行发射,发射平台的运动速度为0.6Ma,发射点高度为3.5m。同时求解1000个诱饵箔片的运动方程,得到了1s时刻诱饵箔片空间扩散的三维分布散点图,如图7所示。诱饵箔片空间扩散0.5、1、1.5s时刻的正侧向和正后向的图像序列,如图8~10所示。在仿真的图像序列中,当y坐标值为负值时,表示箔片已经落地,下图中零刻度横线以下的图像可忽略。

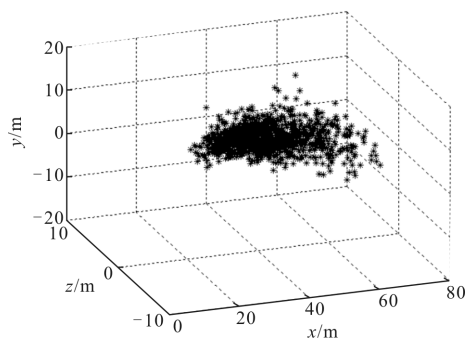


图7 1s时刻诱饵箔片空间扩散散点图

Fig.7 Space scatter plot of decoy foils diffuse at 1s

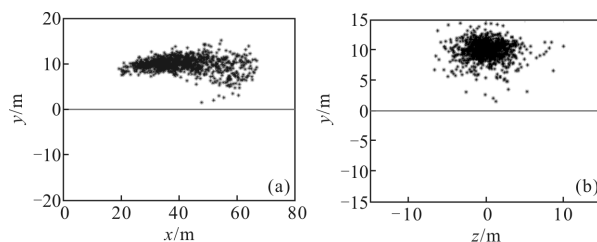


图8 0.5s时刻诱饵箔片空间扩散正侧向和正后向散点图

Fig.8 Space scatter plot of decoy foils diffuse in the lateral and rear at 0.5s

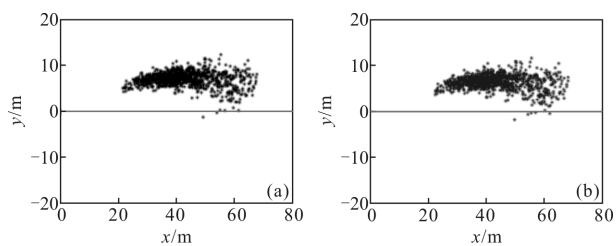


图 9 1 s 时刻诱饵箔片空间扩散正侧向和正尾向散点图
Fig.9 Space scatter plot of decoy foils diffuse in the lateral and rear at 1 s

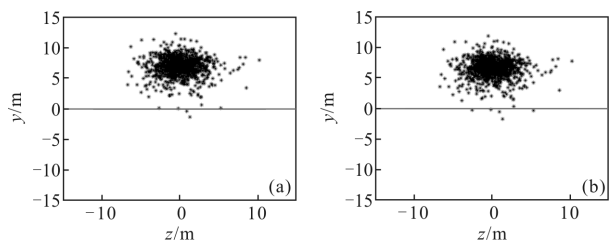


图 10 1.5 s 时刻诱饵箔片空间扩散正侧向和正后向散点图
Fig.10 Space scatter plot of decoy foils diffuse in the lateral and rear at 1.5 s

通过观察诱饵箔片扩散运动的正侧方和正后方图像序列可以发现,在 0.5 s 时刻,面源红外诱饵扩散形状基本成型, x 轴方向分布距离约为 45 m, y 轴方向分布距离约为 10 m, z 轴方向分布距离约为 10 m。在 0.5 s 时刻以后,面源红外诱饵总体形状及尺寸不再发生过大的变化,在扩散过程中形成椭球状的箔片云团,箔片云团前疏后密,与箔片的发射初速度有一定的关系。箔片云团沿垂直方向缓缓沉降,直至完全降落到地面。实测红外图像进行对比,可知仿真运动扩散图像与实验扩散图像基本吻合,图像扩散的变化趋势基本保持一致,仿真结果可信。

4.2 红外图像仿真分析

如图 11 所示,在 $t=0.5$ s 时,面源红外诱饵的扩散形状已经基本形成,可以比较清楚地看到辐射云团。由于箔片云团中箔片的燃烧温度还未达到峰值燃烧温度,从仿真图中可以看到,面源红外诱饵云团整体辐射亮度并不是很高,中心区域亮度相对较高,四周边缘区域亮度较小;从图 12 中可以看出,在 $t=1$ s 时,面源红外诱饵的燃烧温度已经达到峰值温度,箔片云团的辐射亮度达到最大,整体辐射亮度分布均匀;由图 13 可知,在 $t=2$ s 时,箔片云团依然保持着较为稳定的红外辐射亮度,但在 2 s 时刻的面源红外诱饵红外辐射亮度较 1 s 时刻的稍低一些。对比仿真图

和实测图,发现仿真得到的面源红外诱饵红外图像的形状与实际红外辐射图像较为吻合,但也存在一定的差别:一方面是因为试验中有许多诱饵箔片已经落地,不再显示在图像中;另一方面在实际试验中还要考虑外界环境风速、大气温度、气压等因素的影响。

设定面源红外诱饵发射平台运动速度为 $0.6 Ma$, 发射点高度为 3.5 m, 诱饵发射初速度为 30 m/s, 发射角度为 75° , 探测器的视场角为 $3^\circ \times 3^\circ$, 探测距离为 3 km, 仿真得到面源红外诱饵在 $3 \sim 5 \mu m$ 波段内正侧方和正后方的红外图像序列如图 12~14 所示, 图 15~16 为 0.5、1、1.5 s 时刻实测的红外辐射图像。

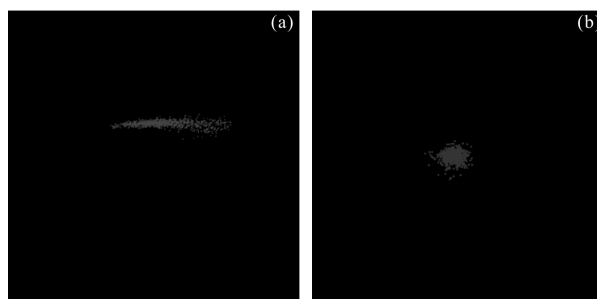


图 11 0.5 s 时刻红外图像序列
Fig.11 Infrared image sequence at 0.5 s

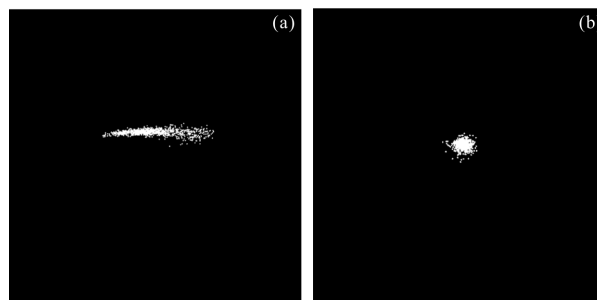


图 12 1 s 时刻红外图像序列
Fig.12 Infrared image sequence at 1 s

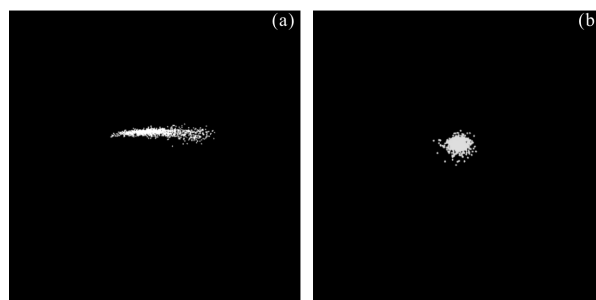


图 13 1.5 s 时刻红外图像序列
Fig.13 Infrared image sequence at 1.5 s



图 14 0.5 s 时刻实测红外图像

Fig.14 Tested infrared image at 0.5 s



图 15 1 s 时刻实测红外图像

Fig.15 Tested infrared image at 1 s



图 16 1.5 s 时刻实测红外辐射图像

Fig.16 Tested infrared image at 1.5 s

4.3.1 场景算例一

某型三代红外导弹, 导引头采用四元正交红外探测器, 工作波段 3.5~4.8 μm , 跟踪视场角 $\phi_1=80^\circ$, 瞬时视场角 $\phi_2=3^\circ$, 正侧方攻击距离 5 km, 高度 9 100 m, 爆炸后的有效杀伤半径 13 m, 工作时间 25 s。目标机飞行速度 0.8 Ma, 作半径 125 m 桶型滚转机动, 飞行高度 9 100 m。面源红外诱饵发射角度 70°, 发射数量一枚, 发射时机为导弹锁定目标机时, 仿真次数 3 000 次。

算例一的参数设置窗口如图 18 所示。杀伤能力中的“3”代表三代弹; 来袭方位中的“90”代表正侧方 90°方向; 机动动作中的“2”代表桶型滚转机动, “125”代表机动半径 125 m; 发射时机中的“1”代表发射一枚面源红外诱饵, 第一个“0”代表导弹锁定时, 发射面源红外诱饵, 第二个“0”代表时间间隔, 由于只发射一枚, 时间间隔为 0; 发射方式中第一个“0”代表无齐发, 第二个“0”代表无连发。



图 18 算例一参数设置窗口

Fig.18 Windows of example 1 parameter setting

4.3 干扰效能评估系统仿真分析

干扰效能评估仿真系统思路框图的如图 17 所示, 在此基础上对三种典型场景下, 面源红外诱饵的干扰效能进行了仿真分析。

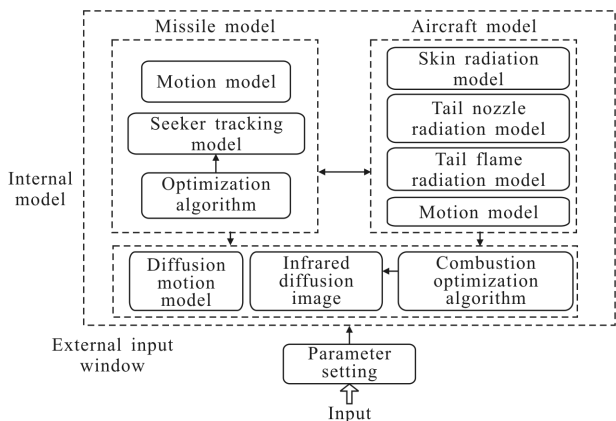


图 17 干扰效能评估系统思路框图

Fig.17 Thought of jamming effectiveness evaluation system

算例一中的红外对抗示意图, 如图 19 所示。三代弹在二代弹的基础上跟踪性能和抗干扰性能得到了明显的提升, 可根据目标的运动特征和辐射特征来区别真实目标和虚假目标, 所以目标机在释放面源红外诱饵的同时, 需要进行机动规避, 仿真过程中目标机采用桶型滚转机动, 迅速离开导引头视场平面, 干扰成功。相同战场情景仿真 3 000 次, 以导弹脱靶量为判断依据, 当导弹脱靶量大于导弹杀伤半径 13 m 即视为干扰成功, 干扰成功率对比如表 1 所示, 干扰成功次数为 2 493 次, 干扰成功率为 73.1%。相关合作研究所经过实验统计, 面源红外诱饵在目标机采取桶型滚转机动的情况下, 干扰三代弹的成功概率小于 80%, 仿真结果在误差范围之内, 仿真结果可信合理。

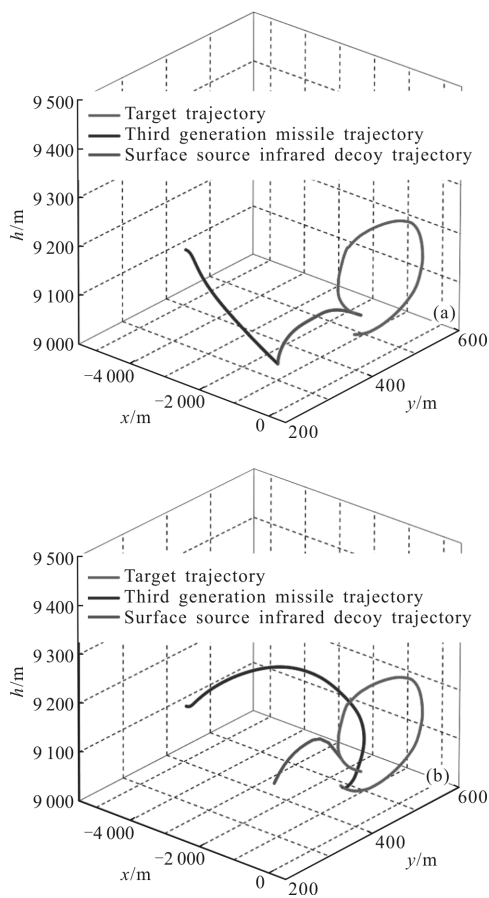


图 19 红外对抗示意图

Fig.19 Schematic diagram of infrared confrontation

表 1 仿真与实测干扰成功率

Tab.1 Successful interference rate of simulation and experiment

	Simulating calculation	Measured statistics
Successful interference rate	73.1%	≤ 80%

4.3.2 场景算例二

某型四代红外导弹，导引头采用红外成像探测器，工作波段 3~5 μm，跟踪视场角 $\phi_1=180^\circ$ ，瞬视视场角 $\phi_2=2^\circ$ ，正前方攻击距离 5 000 m，高度 9 000 m，爆炸后的有效杀伤半径 15 m，工作时间 45 s，恰能形成可分辨的红外图像的距离 $R_0=2$ km。目标机飞行速度 0.7 Ma，平飞，飞行高度 9 000 m。面源红外诱饵发射角度 75°，发射数量两枚，发射时机为导弹锁定目标机后 1 s，仿真次数 3 000 次。

算例二参数设置窗口如图 20 所示。杀伤能力中的“4”代表四代弹；来袭方位中的“180”代表正前方；

机动动作中的“1”代表平飞，“0”代表无机动半径；发射时机中的“2”代表发射两枚面源红外诱饵，“1”代表导弹锁定后 1 s 时，发射面源红外诱饵，“0.5”代表两枚面源红外诱饵发射的时间间隔为 0.5 s；发射方式中第一个“0”代表无齐发，第二个“0”代表无连发。



图 20 算例二参数设置窗口

Fig.20 Windows of example 2 parameter setting

算例二中的红外对抗示意图，如图 21 所示。四代弹的跟踪性能和抗干扰性能明显优于三代弹，导引

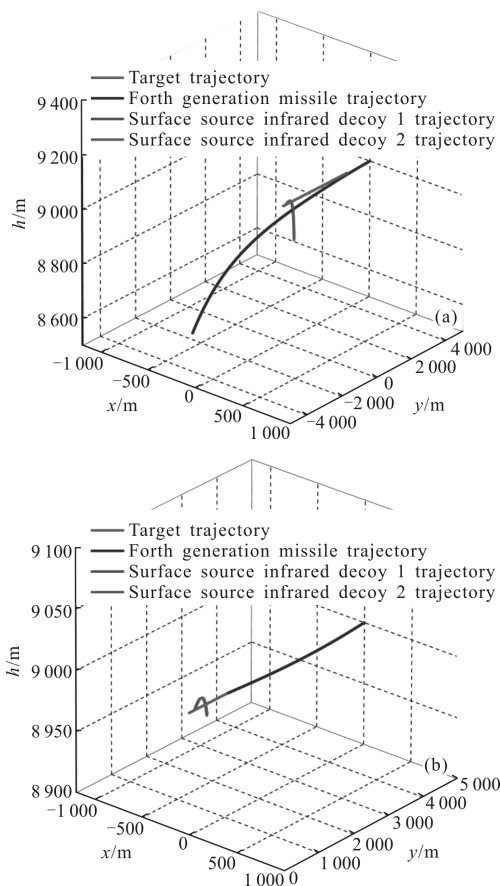


图 21 红外对抗示意图

Fig.21 Schematic diagram of infrared confrontation

头采用红外成像探测器, 不仅能对目标机的红外辐射特征具有记忆存储功能, 同时也能根据目标机当前周期内的运动特性, 推测下一周期的运动轨迹。可以根据辐射强度的变化率, 推断视场范围内引起辐射强度变化的原因, 从焦平面内的红外辐射特征当中, 筛选出目标机的红外辐射特征, 并进行跟踪。仿真过程中, 目标机没有进行机动, 仅仅增加了面源红外诱饵释放的数量, 干扰效果不明显。相同战场情景仿真 3 000 次, 以导弹脱靶量为判断依据, 当导弹脱靶量大于导弹杀伤半径 15 m 即视为干扰成功, 干扰成功率对比如表 2 所示, 干扰成功次数为 1 104 次, 干扰成功率为 36.8%。相关合作研究所经过实验统计, 目标机在未采取任何机动的情况下, 仅仅通过增加释放的面源红外诱饵的数量, 干扰四代弹, 效果不好, 干扰成功率不超过 40%。

表 2 仿真与实测干扰成功率

Tab.2 Successful interference rate of simulation and experiment

	Simulating calculation	Measured statistics
Successful interference rate	36.8%	≤ 40%

5 结 论

文中提出了面源红外诱饵干扰效能仿真系统的建立思路: 对飞机、导弹和面源诱饵红外进行了模型建立, 并加入优化算法进行模型优化, 通过仿真分析了面源红外诱饵的扩散图像和红外图像, 与实验测试图像进行对比可知, 面源红外诱饵的运动扩散图形和红外图像与实验测试图像基本吻合, 选择两个典型场景算例, 进行战术参数的设置, 进行干扰效能评估仿真系统的测试, 测试结果与研究相关统计数据基本吻合, 表明了仿真系统的合理性。达到了预期的目的, 为下一步实验测试和诱饵的释放策略提供了理论基础。

参考文献:

- [1] Gu Lu. Development of the infrared guidance technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(6): 686-690. (in Chinese)
- [2] Luo Haibo, Shi Zelin. Status and prospect of infrared imaging guidance technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(4): 565-573. (in Chinese)
- [3] Li Bingrong, Liu Feng, Wang Xinxin. The image simulation of the IR decoy countermeasures against IR guidance missile [J]. *Electro-optic Warfare & Radar Passive Countermeasures*, 2003(2): 15-17. (in Chinese)
- [4] Tong Qi, Li Jianxu, Fang Yangwang, et al. Simulation research on surface-type infrared decoy for jamming infrared imaging guided missile [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(4): 1150-1157. (in Chinese)
- [5] Huang Hesong, Tong Zhongxiang, Li Jianxun, et al. Functional simulation of infrared air-to-air missiles based on combat assessment [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(3): 803-809. (in Chinese)
- [6] Wang Zhongxian, Fan Xiang, Ma Donghui, et al. Study of jamming effect of infrared decoy on infrared imaging guided air-to-air missile [J]. *Infrared*, 2009, 30(5): 27-31. (in Chinese)
- [7] Li Taorui, Tong Zhongxiang, Huang Hesong, et al. Study on infrared radiation characteristic of aircraft [J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47(2): 189-194. (in Chinese)
- [8] Cormen T H, Leiserson C E, Rivest R L, et al. Introduction to Algorithm[M]. Massachusetts: MIT Press, 2005.
- [9] Zou Tao, Tong Zhongxiang, Wang Chaozhe, et al. Diffusion regularity study of foil-surface-type infrared decoy [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2016, 37(9): 2634-2645.
- [10] Mokry M. Numerical simulation of aircraft trailing vortices interacting with ambient shear or ground [J]. *Journal of Aircraft*, 2001, 38(4): 636-643.
- [11] Kraft C C Jr. Flight measurements of the velocity distribution and persistence of the trailing vortices of an airplane [R]. NACA TN 3377. Washington: National Advisory Committee for Aeronautics, 1995.
- [12] Wilham C K. Combustion model for pyrophoric metal foils [J]. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 2003, 28(6): 296-300.