

面源红外诱饵对抗红外制导导弹干扰策略研究

孙 卫¹, 王 彪², 黄金科², 杨永建²

(1. 西京学院理学院, 陕西 西安 710023; 2. 空军工程大学航空工程学院, 陕西 西安 710038)

摘 要:面源红外诱饵使用的过程中,合理有效的干扰策略是干扰红外制导导弹的关键,针对这一问题,通过理论分析与仿真模拟相结合得到面源红外诱饵对抗红外制导导弹的干扰策略。首先以红外成像制导导弹为例,介绍红外制导导弹的仿真模型,然后将攻击过程分为锁定前与锁定后,以命中率为评价指标,得到两个阶段下的最佳干扰策略,包括诱饵的最佳释放时机、释放间隔以及载机应采取的机动动作等。

关键词:红外对抗;面源红外诱饵;红外制导导弹;干扰策略

中图分类号:TN976 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2019.06.012

Research on jamming strategy of surface-type infrared decoy against infrared guided missile

SUN Wei¹, WANG Biao², HUANG Jin-ke², YANG Yong-jian²

(1. School of Science, Xijing University, Xi'an 710123, China;

2. Aeronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: In the use of surface-type infrared decoys, the reasonable and effective jamming strategy is the key to jamming the infrared guided missile successfully. Aiming at this problem, the jamming strategy of the surface-type infrared decoys against the infrared guided missile is obtained by combining theoretical analysis and simulation. First, taking infrared imaging guided missile as an example, the simulation model of infrared guided missile is introduced in this paper. Then, the attack process is divided into pre-lock and post-lock. At last, taking the hit rate as the evaluation index, the optimal jamming strategy under two stages is obtained, including the optimal release time of decoys, release interval and the maneuvering action that should be taken by the carrier aircraft.

Key words: infrared countermeasures; surface-type infrared decoys; infrared guided missiles; jamming strategies

1 引言

面源型红外诱饵由上千个箔片组成,每一片箔片表面都涂有自燃活性金属材料,可以在空气中迅速燃烧,其抛散后在气动力和重力的作用下迅速扩散形成箔片云,从而产生大面积的红外辐射^[1],相比于点源红外诱饵,面源红外诱饵红外辐射与飞机的红外辐射更加相似。但在实际使用中,在飞机这样的高速运动平台上,面源红外诱饵要达到预期的

干扰效果还是有一定难度的,这是由于红外成像探测系统有较强的图像识别能力,独立的面源诱饵图像很难欺骗红外成像探测系统,只有针对当前的攻防态势采用合理的诱饵释放策略才能有效干扰来袭导弹。因此,机载面源红外诱饵干扰效能的发挥一方面依赖于诱饵的设计技术水平,包括诱饵的辐射能量、光谱分布、辐射面的大小与形状、运动特性等,另一方面依赖于诱饵的作战使用(或称干扰策略),

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 61471390)资助。

作者简介:孙 卫(1964-),女,副教授,主要研究领域为数学与工程应用。

通讯作者:王 彪(1992-),男,博士研究生,主要研究方向为红外对抗仿真。E-mail:biao_gf@sina.com

收稿日期:2018-11-26

包括使用环境、所对抗的红外探测器的性能、干扰的时机(包括导弹发射前和发射后的干扰时机)、释放的方法(包括发射方向、间隔、数量)以及载机配合的机动规避等。以上两个方面是相辅相成的,诱饵的设计要考虑到其使用条件和方法,而诱饵的使用又必须以诱饵的设计性能为依据。因此,即使是一种新型的较为先进的红外诱饵,如果没有恰当的使用方法,也不会有十分理想的干扰效果,只有将诱饵设计性能与使用方法综合起来考虑,才能达到机载面源红外诱饵的最佳干扰效能。

国外对红外防御干扰策略的研究较早, Sonawane, H. R. 研究了红外制导导弹的转弯率对飞机的生存力的影响^[2],考虑了导弹过载对导弹最大转弯率的限制作用,分析了攻击区和导弹转弯率之间的关系,最终得到了红外制导导弹的转弯率对飞机的生存力影响较大的结论。Tae-Wuk Bae 等分析了定向红外干扰对调制盘红外探测器的干扰效果^[3],介绍了调制盘红外探测器的制导原理,通过对比干扰前后导引头输出波形的变化,得到定向红外干扰对导引头的干扰结果。Arthur Vermeulen 研究了规避导弹的干扰策略^[4],建立红外诱饵和垂直 S 形机动模型,通过分析红外诱饵和机动对导弹脱靶量的影响,最终得到飞机应该在释放多枚红外诱饵的同时做垂直 S 形机动的红外防御干扰策略。但是文献[2]和文献[4]研究的防御策略是基于识别能量中心的第二代调制盘式红外空空导弹,这类红外空空导弹抗干扰性能差,在现代空战中已经被性能更好的多元探测器红外空空导弹和红外成像制导导弹所替代,因此研究对抗调制盘式红外空空导弹的防御策略并不能满足现代空战的要求。Fumiaki Imado 研究了桶滚机动对以比例导引法制导的红外空空导弹的干扰效果^[5],研究结果表明:相比分离 S 形机动,大过载的桶滚机动普遍能够产生更大的脱靶量。Shahah Akhari 通过研究飞行员在空战中所采取的有效对抗策略^[6],建立了空战中的飞行员决策系统。该系统可以有效缓解飞行员在空战中存在的紧张、压迫感等不利因素,指导飞行员在空战中采取正确的对抗策略,取得空战中的胜利。

近年来红外防御干扰策略方面的研究逐渐成为国内的热点,王斯财研究了导弹迎头攻击时载机的最佳防御策略^[7],分别建立了导弹、飞机以及红外诱饵的数学模型,并对比了机动规避、红外诱饵和两者相结合的干扰结果,最终得到飞机做非常规机动

同时释放红外诱饵的最佳干扰策略。郭冰涛研究了红外诱饵对目标图像红外特征的影响^[8],并仿真分析了红外诱饵不同的发射方向对红外成像导引头的干扰效果,研究结果表明:红外诱饵的初始发射方向与目标飞机的飞行方向之间的夹角 $75^{\circ} \sim 95^{\circ}$ 、 $195^{\circ} \sim 215^{\circ}$ 以及 $250^{\circ} \sim 280^{\circ}$ 时,红外诱饵的干扰效果最好。童奇建立了面源红外诱饵的运动模型和辐射模型^[9-10],并分析了面源红外诱饵干扰红外成像制导导弹的作用机理,以干扰成功率为依据,计算了面源红外诱饵的释放数量以及释放时机对其干扰效果的影响。仿真结果表明:面源红外诱饵可以显著提高目标飞机的生存力。吴晓迪等对于载机连续发射多枚红外诱饵弹的运动轨迹进行了仿真^[11]。谢新辉建立了桶滚机动末端规避的数学模型并研究了战斗机桶滚机动的末端规避效果^[12],研究结果表明:导弹的脱靶量随着桶滚机动的角速度先增大后减小。胡朝晖仿真了空战态势对己不利的情况下,不同规避机动对摆脱敌机跟踪和攻击的效果^[13]。

本文主要仿真分析载机机动、诱饵释放时机以及释放方法对面源红外诱饵干扰效能的影响,以导弹后半球攻击为例,采用导弹命中率为评判依据,仿真得到面源红外诱饵的有效干扰策略。其中,仿真分析中的载机机动主要选取两种最常见也是最有效的防御机动,即:桶滚机动和 S 形机动(S 形机动又分为垂直 S 形机动和水平 S 形机动^[14])。

以第四代红外成像制导导弹为例仿真干扰策略,该导弹采用红外成像探测器,工作波段 $3 \sim 5 \mu\text{m}$,跟踪视场角 180° ,瞬时视场角 $3^{\circ} \times 3^{\circ}$,焦平面分辨率 128×128 ,有效杀伤半径 15 m,所采取的抗干扰方法主要包含:轨迹外推、位置记忆、图像特征^[15](主要包含目标图像的平均亮度、长宽比、紧凑度、轮廓特征、形心位置等)。其攻击区如图 1 所示。

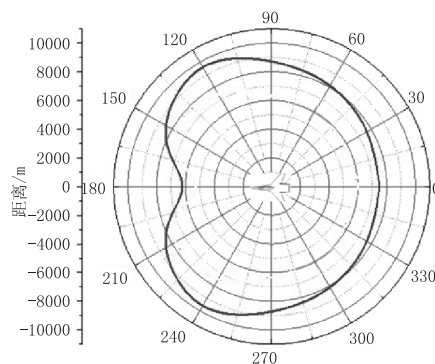


图1 导弹不可逃逸攻击区

Fig.1 The inescapable missile range

2 仿真方法

建立如图2所示的红外制导导弹仿真总体结构^[16],进行导弹攻击过程的仿真,由于红外对抗中机载综合信息采集设备可采集到红外制导导弹发射前的各种数据,因此对红外制导导弹的仿真从导弹发射时开始,到红外制导导弹爆炸时结束。

红外制导导弹仿真的输入信息:(1)导弹初始化信息。由战斗机的机载综合信息采集设备提供,包括战斗机发射导弹的时刻、发射导弹的类型和发射时刻导弹的位置、状态、速度等。(2) T 时刻目标机的位置信息。由目标机的机载综合信息采集系统提供。(3) T 时刻目标机辐射以及干扰的位置与辐射信息。信息来自目标机红外辐射特性模型和红外干扰特性模型,并经过大气红外辐射传输模块的衰减。

红外制导导弹仿真的输出信息:导弹从发射到爆炸的运动轨迹。

由图2可以看出,红外制导导弹导引头目标识别是仿真中最关键的部分,导弹的抗干扰技术也在目标识别方法中体现,目标识别的真实性直接影响到脱靶量的可信性。导弹的目标识别与导弹的种类有关,不同类型的导弹目标识别方法不同。仿真中先选定导弹类型,然后依据该导弹所采用的目标识别方法,结合战斗机与诱饵的运动特性和红外辐射特性进行判别,确定导弹的跟踪目标源,最后通过制导规律和运动模型确定导弹如何运动。

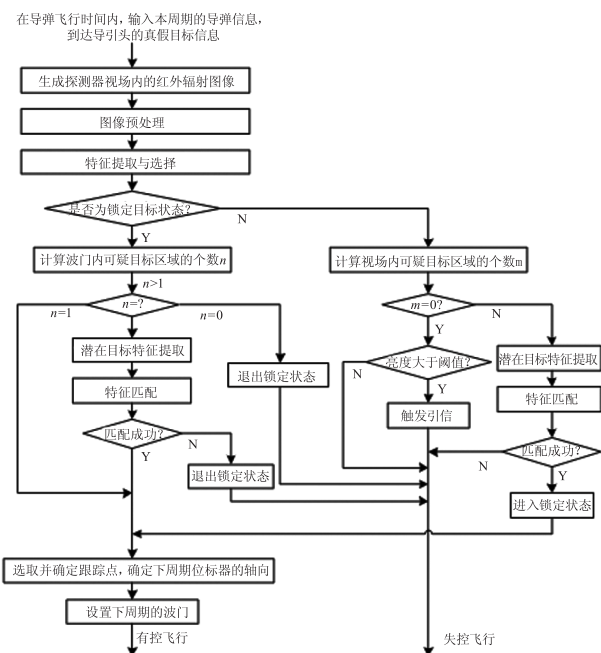


图2 仿真流程图

Fig. 2 Simulation flow chart

3 锁定前干扰策略

由于锁定前导引头无法获得真实目标飞机的红外图像信息,因此此时对红外空空导弹进行干扰最为有效。导引头在锁定目标前通过搜索视场内的像点目标,选择红外特征最明显的像点为目标进行锁定并跟踪,因此,此时如果目标飞机通过对其进行连续的干扰,很可能让导引头无法锁定目标或者将箔片云锁定。基于此,锁定前目标飞机应该尽量的让导引头视场中出现尽量多的箔片云团,并且目标飞机需要连续做过载较大的机动,使目标飞机像点在导引头视场中的位置发生较大变化。

导引头锁定目标需要在视场内识别到连续几帧具有足够辐射强度的像点,而如果此时释放面源红外诱饵的话,会在导引头视场内形成多个像点目标,且箔片云的红外辐射强度比飞机大,导弹很难锁定真实的目标飞机。

设目标机在攻击机前方,两机相距2 km,攻击机上装有红外成像制导导弹。目标机做防御型桶滚机动和S形机动且连续释放面源红外诱饵箔片,释放间隔为0.1 s。则仿真得到的导引头视场内的红外图像如图3与图4所示。

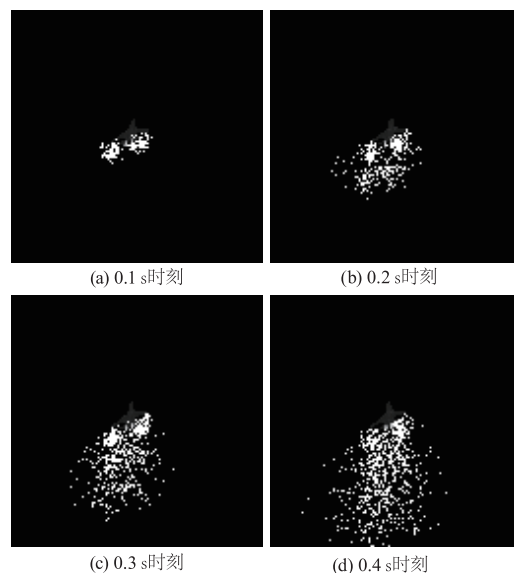


图3 桶滚机动时面源红外诱饵箔片云红外图像

Fig. 3 Infrared image of foil cloud in barrel roll maneuvering

从视场内的红外图像可以看出,箔片云释放后在视场内可以形成大面积的红外图像,导致导引头很难锁定飞机。同时,飞机做防御性桶滚机动时箔片云与飞机重合的时间更长,箔片云更不容易飞出视场,视场内的像点目标更多,导致导引头更难锁定真实的目标飞机。

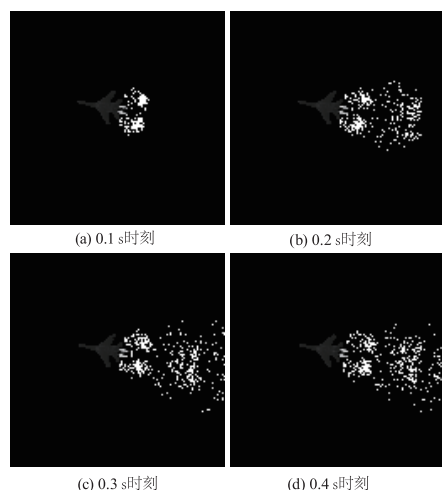


图4 S形机动与面源红外诱饵箔片云红外图像

Fig. 4 Infrared image of foil cloud in S-shape maneuvering

改变面源红外诱饵的释放间隔,分别对每种情况仿真2000次,并统计目标飞机被锁定的次数,计算锁定率,如表1所示。

表1 面源红外诱饵释放间隔
对导引头锁定率的影响

Tab. 1 Effect of infrared decoy release
interval on seeker locking rate

释放间隔/s	锁定率/%			
	0.1	0.2	0.5	1
桶滚机动	15.9	23.5	49.4	78.1
S形机动	21.7	30.0	77.4	98.6

从表1的结果可知,导弹尾后攻击时,目标飞机通过连续的释放面源红外诱饵可有效降低其被锁定的概率,且桶滚机动的干扰比S形机动要好,这图3与图4的分析相一致。当飞机做S形机动时,其水平方向的过载较大,机身侧向进入导引头视场,此时由于箔片云与飞机迅速脱离,始终处于视场内的像点就是目标飞机本身,因此S形机动的干扰效果相对差一些。同时,释放间隔越短视场内的箔片云像点越多,导引头越难锁定目标,释放间隔为0.1 s时干扰效果最好。防御型桶滚机动不仅可以摆脱导引头的锁定,同时还可以大大地降低飞机前进方向上的速度,迫使尾后的敌机飞到目标飞机之前,目标飞机变不利态势为有利态势,可以对其进行攻击。综上,导弹尾后攻击目标飞机且没有锁定目标飞机时,目标飞机应该做桶滚机动,同时连续的释放面源红外诱饵箔片,释放间隔为0.1 s。

4 导弹发射后干扰策略

导弹从飞机的后半球攻击是最常见的攻击态

势,飞机后半球辐射强度大,尤其是在中短波段,其辐射强度远大于前半球,因此导弹非常容易锁定目标对其进行攻击。而导弹后半球攻击时,飞行员只能通过机载告警系统的警报声得知被导弹锁定^[17],不能够看到导弹的攻击轨迹以及弹目距离,因此心理压力巨大,此时非常容易处理不当,选择错误的机动动作以及错过面源红外诱饵的最佳释放时机,最终导致被导弹击落。因此研究导弹后半球攻击时的有效干扰策略十分重要。

干扰策略的仿真分析应主要从以下几点考虑:导弹锁定前,应想办法破坏导弹的锁定条件,让导弹无法锁定目标。即应当使导弹视场中尽量多的出现箔片云团,让箔片云尽量多的将载机的红外特征遮蔽,同时载机应采取能够改变飞机在导引头焦平面上的位置并使飞机的目标特征发生较大改变的机动动作。导弹锁定并发射后,目标机应选择合适的机动动作并合理的释放面源红外诱饵,让箔片云对飞机的遮蔽时间尽可能长,遮蔽的面积尽可能大,同时目标机应尽可能的从导弹的视场中逃离。

导弹从飞机尾后攻击时,由导引头焦平面得到的导弹逼近过程的目标飞机的红外图像序列如图5所示。导弹尾后攻击时,虽然导引头可以接收到很强的红外辐射,但是飞机机体和尾焰的红外辐射在焦平面上的投影面积较小。从图中可以看出,弹目距离5 km时,目标图像在导引头焦平面上所呈像素较少,可认为是点源目标。弹目距离小于4 km时,可以在焦平面内看到飞机的大致轮廓和尾喷口(此时像素点多于 9×9 个),导弹由点源目标阶段进入成像阶段。

由图5的红外成像序列可知,当弹目距离大于4 km时,目标飞机的红外图像在导引头焦平面内所

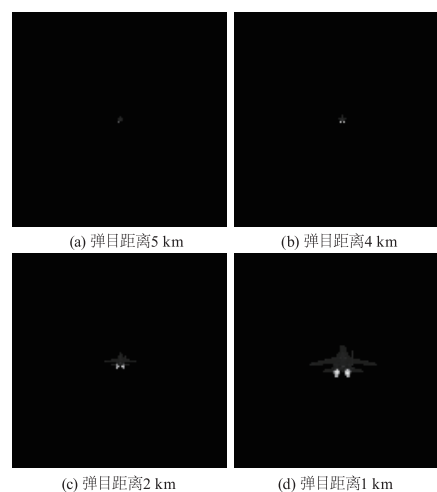


图5 目标后上方15°的红外成像序列

Fig. 5 Infrared imaging sequence above and behind the target

占像素点较少,导弹不能进入成像阶段。在点源阶段,红外成像制导弹的抗干扰算法与以正交多元探测器为主的第三代红外空空导弹相一致。干扰这类导弹,目前广泛应用的点源诱饵以及箔片型面源红外诱饵就能发挥很好的作用。而在点源阶段,面源红外诱饵的有效干扰策略与普通的红外诱饵相一致,相应的研究已经很多,本文不再对其进行仿真分析。本节主要仿真分析,目标图像进入成像阶段时面源红外诱饵的有效干扰策略。

设目标机在前攻击机在后,攻击机在距离目标机4 km时发射红外成像制导弹,导弹发射后目标飞机分别做桶滚机动、S形机动以及水平飞行,同时连续释放面源红外诱饵^[19],释放间隔为0.1 s。仿真得到的导弹攻击过程如图6所示,图中的箔片云轨迹为箔片云形心轨迹。

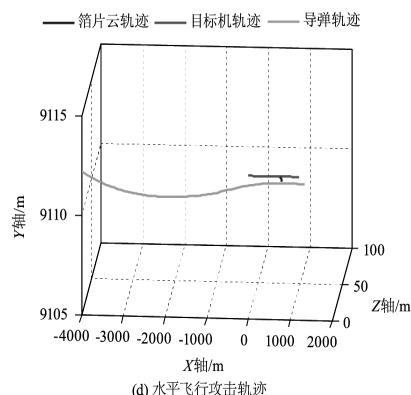
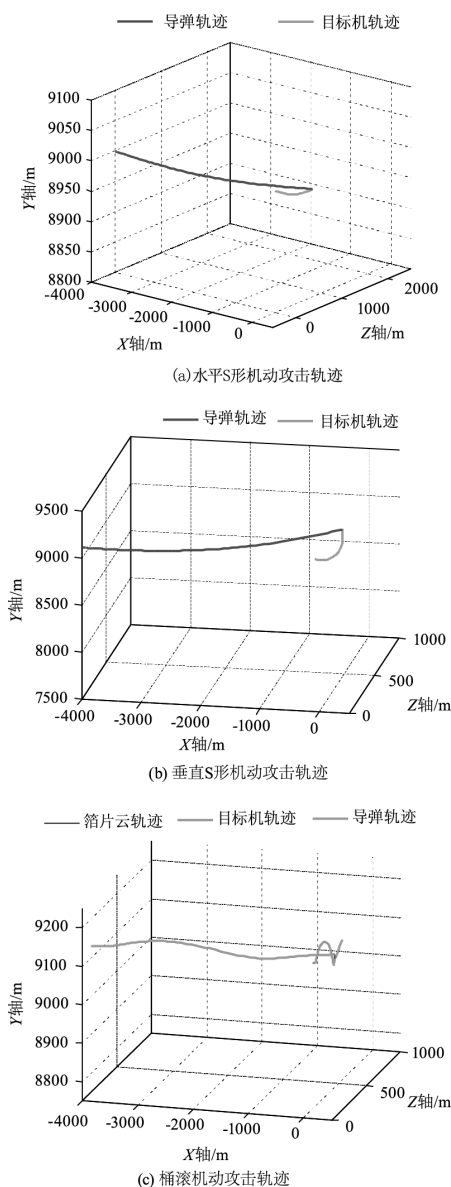


图6 不同机动下的导弹攻击轨迹

Fig. 6 Missile attack trajectories under different maneuvers

由仿真的导弹攻击轨迹可知,桶滚机动和水平飞行成功地将导弹干扰。图6(c)中,在面源红外诱饵的连续释放下,导弹认为弹目距离为1246 m时释放的箔片云为真目标并对其进行跟踪。而图6(d)中,将导弹成功引偏的箔片云初始释放时刻为弹目距离2279 m。

对以上的各种机动分别进行2000次的仿真,并统计导弹的命中次数,计算其命中率,如表2所示。

由仿真结果可知,导弹尾后来袭时,目标飞机通过连续的释放面源红外诱饵配合表2中的四种机动对导弹都会造成一定的干扰作用,大大地降低了导弹的命中率。同时,目标飞机保持水平飞行对导弹的干扰作用最大。

表2 不同机动对红外成像制导弹命中率的影响

Tab. 2 Influence of different maneuvers on the hit rate of missile

机动类型	桶滚机动	水平S形机动	垂直S形机动	水平飞行
命中率/%	42.3	59.4	61.7	38.1

图7和图8分别为目标飞机保持水平飞行,导弹逼近至目标飞机尾后2 km处,目标飞机不释放面源红外诱饵和连续释放面源红外诱饵的红外图像。从图7中可以看出,弹目距离2 km时,导引头焦平面可以清晰的获得飞机尾喷口的红外图像,将飞机牢牢锁定。而图8中,箔片云将飞机尾喷口的红外图像完全遮蔽,完全改变了目标飞机的红外图像特征,因此导引头无法对真实目标进行跟踪,只能认为与记忆目标图像特征和位置最为接近的部分箔片云为真目标并对其进行攻击。因此,目标飞机保持水平飞行并通过连续的释放面源红外诱饵对导弹的干

扰效果最好。

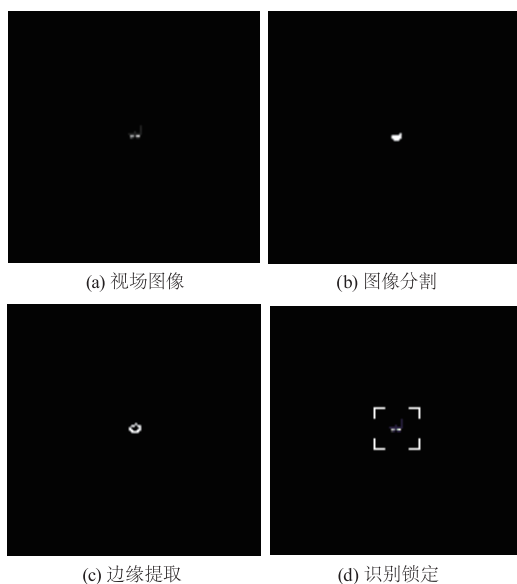


图7 无干扰时导引头图像处理过程

Fig. 7 The seeker image processing process without interference

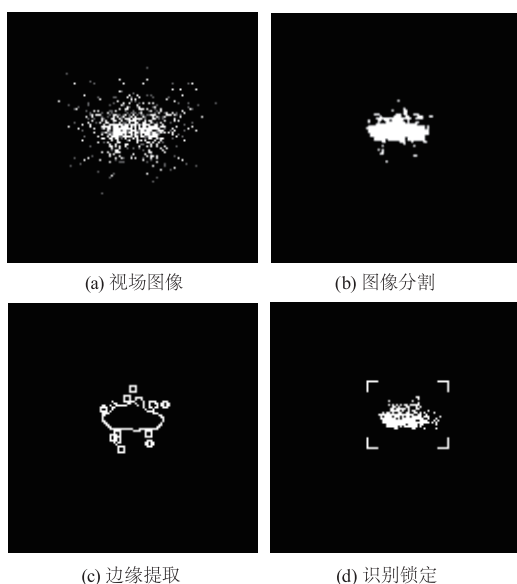


图8 连续释放面源红外诱饵时导引头图像处理过程

Fig. 8 The seeker image processing process when the infrared decoy is released continuously

从图3与图4中可知,箔片云与飞机图像没有完全重合或完全遮蔽飞机图像,因此,导弹命中率较高。尽管,面源红外诱饵箔片可以吊挂于飞机机翼两侧的导弹挂架上,装载量大大增加。但是,导弹发射后目标飞机就开始连续的释放面源红外诱饵会造成大量的浪费,需要对面源红外诱饵的释放时机和释放间隔进行仿真分析。

设仿真初始条件不变,目标飞机保持水平飞行,弹目距离分别为4 km、3 km、2 km、1 km以及500 m

时开始连续释放面源红外诱饵,释放间隔为0.1 s,并计算导弹命中率如表3所示。

表3 释放时机对红外成像制导
导弹命中率的影响

Tab. 3 Effect of release timing on the hit
rate of missile

释放时机/km	4	3	2	1	500
命中率/%	38.1	38.3	39.6	40.1	68.4

由表3可知,弹目距离接近至3 km时开始释放面源红外诱饵对导弹的干扰与4 km差不多,但是释放的面源红外诱饵数量得到减少。因此,干扰来袭红外成像制导导弹的最佳时机为弹目距离为3 km时,开始释放面源红外诱饵。

设仿真初始条件不变,目标飞机保持水平飞行,弹目距离为3 km时开始连续释放面源红外诱饵,释放间隔分别为0.1 s、0.2 s、0.5 s和1 s,并计算导弹命中率如表4所示。

释放间隔为0.1 s时,导弹的命中率最低。由于干扰红外成像制导导弹的最佳时机是在导弹攻击的末端,因此释放面源红外诱饵的间隔越长,进入导引头视场内的箔片云越少,对导弹的干扰就越小。箔片云在高速高空中的有效燃烧时间较短,当释放间隔大于0.5 s时,在导引头视场内就会出现上一枚面源红外诱饵辐射强度已经很小,下一枚面源红外诱饵还没有有效燃烧,因此箔片云不能对目标飞机的红外图像进行有效遮挡,导致命中率大幅提升。

表4 释放间隔对红外成像制导
导弹命中率的影响

Tab. 4 Effect of release interval
on the hit rate of missile

释放间隔/s	0.1	0.2	0.5	1
命中率/%	38.3	52.8	69.1	84.3

综上,导弹尾后来袭时,有效干扰红外成像制导导弹的策略为目标飞机保持水平飞行。在弹目距离逼近至3 km时开始连续的释放多枚面源红外诱饵,释放间隔为0.1 s。若来袭的导弹其方位角 δ 不为零,即:导弹不处于目标机的正尾后(如:导弹从目标机的后上、后下方来袭),为了增加箔片云对飞机的遮蔽时间和重合面积,目标机应该调整飞行方向,使其飞行方向尽量与弹目线的方

向相一致。

5 结束语

本文通过理论分析与仿真模拟得到了红外成像导弹尾后攻击时,目标机应采取的防御干扰策略,主要结论有:

(1) 锁定前目标飞机应连续释放面源红外诱饵,释放间隔应尽量短,同时目标飞机的机动动作应可以使目标像点在视场内的位置发生明显变化,并且能够尽量增加箔片云与飞机图像的重合时间。对于导弹后方来袭的情况,目标机可通过桶滚机动对导弹进行干扰。

(2) 导弹发射后,在导弹尾后来袭的情况下,有效干扰红外成像制导弹的策略为目标飞机保持水平飞行。在弹目距离 3 km 时开始连续的释放多枚面源红外诱饵,释放间隔为 0.1 s。若来袭的导弹其方位角 δ 不为零,即:导弹不处于目标机的正尾后(如:导弹从目标机的后上、后下方来袭),为了增加箔片云对飞机的遮蔽时间和重合面积,目标机应该调整飞行方向,使其飞行方向尽量与弹目线的方向相一致。

参考文献:

- [1] JIA Lintong, TONG Zhongxiang, WANG Chaozhe, et al. Survey on airborne surface-type infrared decoy[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(9): 0904005. (in Chinese)
贾林通, 童中翔, 王超哲, 等. 机载面源红外诱饵及干扰效能研究[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(9): 0904005.
- [2] Hemant R. Sonawane, Shripad P. Mahulikar. Effect of missile turn rate on aircraft susceptibility to infrared-guided missile[J]. Journal of Aircraft, 2013, 50(2): 663 – 666.
- [3] Tae-Wuk Bae, Byoung-Ik Kim, Young-Choon Kim. Jamming effect analysis of infrared reticle seeker for directed infrared countermeasures[J]. Infrared Physics & Technology, 2012, 55: 431 – 441.
- [4] Arthur Vermeulen, Gerrit Maes. Missile avoidance maneuvers with simultaneous decoy deployment[C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 2009.
- [5] Fumiaki Imado, Susumu Miwa. Missile guidance algorithm against high-g barrel roll maneuvers[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1994, 17(1): 123 – 128.
- [6] Shahab Akbari, M. B. Menhaj. A new framework of a decision support system for air to air combat tasks[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, 2000.
- [7] WANG Sicai, NAN Ying, LIU Jingwei. Optimal escape strategy of fighter against oncoming missiles[J]. Aero Weaponry, 2009, 4: 28 – 32. (in Chinese)
王斯财, 南英, 刘经纬. 导弹迎击时飞机的最佳逃逸策略研究[J]. 航空兵器, 2009, 4: 28 – 32.
- [8] GUO Bingtao, WANG Xiaorui, WANG Xiaobing, et al. Analysis of imaging features and tracking performance of seeker after decoys jamming[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(7): 2027 – 2033. (in Chinese)
郭冰涛, 王晓蕊, 王小兵, 等. 诱饵弹作用后导引头成像特征建模及跟踪性能分析[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(7): 2027 – 2033.
- [9] TONG Qi, LI Jianxun, FANG Yangwang, et al. Simulation research on surface-type infrared decoy for jamming infrared imaging guided missile[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(7): 2027 – 2033. (in Chinese)
童奇, 李建勋, 方洋旺, 等. 面源红外诱饵对抗成像制导弹的仿真研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(4): 1150 – 1157.
- [10] TONG Qi, ZOU Tao, TONG Zhongxiang, et al. Radiation characteristics and simulation image of surface-type infrared decoy[J]. Laser & Infrared, 2018, 48(7): 896 – 902. (in Chinese)
童奇, 邹涛, 童中翔, 等. 面源红外诱饵辐射特性及其图像仿真[J]. 激光与红外, 2018, 48(7): 896 – 902.
- [11] WU Xiaodi, HUANG Chaochao. Simulation for the motion traces of infrared decoys[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(12): 1473 – 1476. (in Chinese)
吴晓迪, 黄超超. 多枚红外诱饵弹运动轨迹仿真[J]. 激光与红外, 2015, 45(12): 1473 – 1476.
- [12] XIE Xinhui, ZHANG Xuebin, LI Fei. Research on effects of fighter HGB maneuvering terminal evasion[J]. Fire Control & Command Control, 2016, 41(2): 97 – 107. (in Chinese)
谢新辉, 张学斌, 李飞, 等. 战斗机“滚筒”机动的末端规避效果[J]. 火力与指挥控制, 2016, 41(2): 97 – 107.
- [13] HU Zhaohui, SUI Yonghua, CHE Qi, et al. Research on evasion modes of fight plane in dogfight mode[J]. Fire Control & Command Control, 2004, 29(3): 61 – 66. (in Chinese)

- 胡朝晖,隋永华,车奇,等. 近距格斗规避方式研究[J]. 火力与指挥控制, 2004,29(3):61-66.
- [14] FENG Yuanwei, XIA Xiaohua, WU Zhengyan. Comparison of penetration effect of two kinds of S maneuver missile against anti-missile naval gun[J]. Fire Control & Command Control, 2011,36(8):107-113. (in Chinese)
- 冯元伟,夏小华,吴艳征. 导弹两种蛇形机动对反舰舰炮突防效果比较[J]. 火力与指挥控制, 2011,36(8):107-113.
- [15] Fu Wenxing, Zhu Supeng, Zhang Kai. Conceptual research on application of single pixel infrared imaging to missile guidance[C]//2009 Asia-Pacific Conference on Information Processing. IEEE, 2009.
- [16] LI Jianxun. Study on infrared countermeasure effectiveness evaluation method and offense-defense strategy of fighter[D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2015. (in Chinese)
- 李建勋. 战斗机红外对抗效能评估方法及攻防策略研究[D]. 西安:空军工程大学, 2015.
- [17] CHEN Ning, WAN Chun, HUANG Feng, et al. Interference availability of IR surface-type decoy[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2012,28(6):38-41. (in Chinese)
- 陈宁,万纯,黄烽,等. 红外面源诱饵干扰有效性分析[J]. 航天电子对抗, 2012,28(6):38-41.