

飞机成像目标的红外隐身效果评估

王超哲¹, 李慎波^{1,2}, 黄聪会^{1,3}, 柴世杰¹, 贾文铜¹

(1. 空军工程大学 航空工程学院, 陕西 西安 710038; 2. 空军哈尔滨飞行学院 理论训练系, 黑龙江 哈尔滨 150000; 3. 中国人民解放军 94314 部队, 河南 郑州 450003)

摘要: 评估飞机成像目标的红外隐身效果, 对飞机红外隐身技术的发展、隐身反隐身作战具有重要的意义。提出了一种飞机成像目标红外隐身效果的评估方法: 结合成像探测器工作原理, 考虑图像处理各个阶段的算法特点, 基于多种图像特征, 制定出能反映背景影响和诱饵干扰影响的飞机成像目标红外隐身效果评估指标; 通过建立红外成像探测器仿真模型, 验证了所制定的评估指标的合理性; 最后依据评估指标评估了采用不同隐身技术和施放诱饵干扰对飞机隐身效果的影响, 得到了一些对飞机隐身和反隐身具有指导意义的结论。

关键词: 红外隐身效果; 红外成像; 红外探测器; 评估指标

中图分类号: TN72+.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.1004004

Infrared stealth effectiveness evaluation of aircraft imaging target

Wang Chaozhe¹, Li Shenbo^{1,2}, Huang Conghui^{1,3}, Chai Shijie¹, Jia Wentong¹

(1. Aeronautics Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. Theory Training Department, Air Force Harbin Flight Academy, Harbin 150000, China; 3. The 94314 Unit of PLA, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Evaluation of infrared stealth effectiveness of aircraft imaging targets was important for the development of aircraft's infrared stealth technology and operations of stealth and anti-stealth. An evaluation method for infrared stealth effect of aircraft imaging target was proposed, which was based on the principles of imaging detector and the characteristics of each stage of image processing. The evaluation indexes of aircraft's infrared stealth effectiveness as imaging target which can reflect the influence of background and decoy jamming were established based on multiple infrared image features. Then, the simulation model of infrared imaging detector was established, and the rationality of the evaluation indexes was verified. Finally, based on the evaluation indicators, the effectiveness of different stealth techniques and the application of decoy jamming on the stealth effectiveness of the aircraft were evaluated. The results have instructive meanings for aircraft's infrared stealth and anti-stealth.

Key words: infrared stealth effectiveness; infrared imaging; infrared detector; evaluation index

收稿日期: 2019-06-11; 修订日期: 2019-07-21

基金项目: 中国博士后科学基金(2016M592922); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2019JQ-290)

作者简介: 王超哲(1985-), 女, 讲师, 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: wcz667@sina.com

0 引言

隐身性能是现代飞机的一个重要设计指标,不管是在设计定型阶段,还是在生产、使用阶段,对飞机红外隐身效果的评估都是必不可少的。隐身效果评估是飞机红外隐身设计的关键环节之一,评估采用不同红外隐身技术后飞机能达到的隐身水平,可以验证隐身技术的有效程度,同时为红外隐身设计做出指导。此外,通过隐身效果评估还可以更深入地分析我方飞机与敌方飞机红外隐身能力的优劣,从而更加合理地进行战场配置,制定战略战术,提高飞机的生存力和战斗力。

目前对雷达隐身效果的评估,比较公认的指标是 RCS,但对红外隐身,还没有形成能够被普遍认可的评价指标,这种现实影响了飞机红外隐身技术的发展和作战应用^[1]。对成像目标红外隐身效果的评估虽然已经发展出了较多的评估指标,但其中较大部分是依据人眼的识别机理制定的^[2-3]。如应用广泛一种评估方法是:由 Johnson 准则建立起最小可分辨温差(MRTD)与探测距离或探测概率的关系,然后在探测距离或探测概率的基础上定义隐蔽系数、隐身效率等定量评估指标^[4-7]。而 Johnson 准则描述的观察等级是将热像系统的客观性能与人眼视觉功能相结合的一种视觉能力评估方法。因此,基于 Johnson 准则的评估方法不适合评估目标对抗自主工作的红外成像探测器的隐身能力。

成像探测器作为红外探测器的发展趋势,得到了越来越广泛的应用。它可以利用形状、运动、光谱分布、辐射强度等特征识别目标,具有很强的目标识别能力。对成像目标红外隐身效果的评估不仅要考虑隐身技术对总体辐射强度的抑制,还要考虑隐身技术对辐射亮度分布和辐射面源形状的改变。目前针对成像目标开展,如基于灰度相关^[8]、基于纹理相似度^[9]、基于辐射对比度^[10]等的红外隐身效果评估,多是根据统计或经验公式,并没有密切结合红外探测器的目标识别方法。

文中结合红外探测器的识别机理,制定能够定量评估出飞机采用不同隐身措施、不同干扰手段、对抗不同探测器时的隐身效果的评估指标。科学合理的评估飞机隐身效果,可以直观评价红外隐身性能

优劣,暴露隐身方案中的缺点和不足,为隐身方案的改进和提高提供参考。同时,可以为决策者完善作战方案,提高作战能力提供依据。

1 评估指标的制定

自主工作的成像探测器处理红外图像的过程包括目标检测、目标识别、目标跟踪等步骤,目标检测是确定视场内是否存在目标,目标识别是确定视场内存在的目标是否需要跟踪的目标,甚至确定出目标的类型,目标跟踪是对识别出的目标进行持续地跟踪。不论目标检测、识别或跟踪,其依据均是探测器视场内所成的红外图像的特征,有的利用单帧图像的特征,有的利用多帧图像形成的图像序列的特征。而单帧图像的处理是整个目标检测、识别、跟踪的基础和关键,而且隐身技术对目标红外图像特征的改变基本是非时变的,因此隐身效果的评估指标基于单帧图像的特征来制定。

成像识别依据的目标红外图像特征的内涵很广泛,如亮度特征、纹理特征、边界特征、分形特征、光谱特征等,某一类型的红外成像探测器利用其中的一种或几种图像特征进行目标识别。基于图像处理各个阶段的算法特点,提出的成像目标红外隐身效果评估指标包括目标检测阶段的评估指标和目标识别与跟踪阶段的评估指标,不同阶段的评估指标基于不同的图像特征来制定。

1.1 目标检测阶段的评估指标

目标检测的任务是从背景中发现目标,对于红外成像探测器,一旦目标构成红外图像,目标图像在视场中的尺寸大小对其发现目标的能力影响不大,目标与背景的灰度差异越大,发现目标就越容易。因此,目标检测阶段定义灰度对比度衡量目标被发现的程度:

$$C_G = \frac{\overline{G}_t - \overline{G}_b}{\overline{G}_t + \overline{G}_b} \quad (1)$$

式中: \overline{G}_t 为目标像素的灰度均值; \overline{G}_b 为背景像素的灰度均值。 C_G 越小,目标被发现的程度越低,红外隐身效果越好。

1.2 目标识别与跟踪阶段的评估指标

目标识别与跟踪的任务是从发现的目标中(可

能有多个)确认目标的真假和类型,方法是将可疑的目标区域与已知的目标模板进行图像相关匹配,目前采用的图像相关匹配算法多种多样,所依据的红外图像特征也各有不同,从根本上看是目标区域的灰度分布特征和边缘形状特征,选用如下特征量来描述:

(1) F_1 为灰度标准偏差。目标像素点灰度值的标准偏差,反映目标区域像素灰度值与灰度均值的偏离程度,表达式可写为:

$$F_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (G_{t,i} - \bar{G}_t)^2}{N}} \quad (2)$$

式中: N 为目标区域总像素个数。

(2) F_2 为高亮区比例。目标区域中灰度值大于最大灰度值的 90% ($G_{t,i} > 0.9G_{t,\max}$) 的像素点的个数与目标总像素点个数之间的比值。体现了目标区域的灰度分布特征。

(3) F_3 为长宽比。目标最小外接矩形的长度与宽度之比值。体现了目标区域的形状特征。

(4) F_4 为紧凑度。目标像素数与包围目标的矩形内的像素数之间的比值。反映了一个物体对其最小外接矩形的充满程度。

(5) F_5 为复杂度。边界像素点数与总目标像素点数的比值。反映了目标边界的复杂程度。

以上 5 个特征量均经过试验检验是稳定的,能够作为分类和识别红外目标的依据^[11]。由以上 5 个特征量定义目标图像与目标模板的区别度 D_{t-m}^* :

$$D_{t-m}^* = \vec{\xi} \cdot \vec{D}_{t-m} = \sum_{j=1}^5 (\xi_j D_{t-m,j}) = \sum_{j=1}^5 \left(\xi_j \frac{|F_{t,j} - F_{m,j}|}{F_{t,j} + F_{m,j}} \right) \quad (3)$$

式中: $F_{t,j}$ 为目标图像的第 j 个特征量; $F_{m,j}$ 为目标模板的第 j 个特征量; $\vec{\xi}$ 为权重向量; ξ_j 为第 j 个特征量在图像匹配算法中的重要性,对于不同的图像匹配算法, ξ_j 的取值会有所不同。

D_{t-m}^* 越大,表示目标图像与目标模板的差别越大,说明目标的隐身效果越好。为使评估标准统一,用公式(4)衡量目标图像与目标模板的相似度。

$$S_{t-m}^* = 1 - D_{t-m}^* \quad (4)$$

其中, S_{t-m}^* 越小,目标的红外隐身能力越强。

类似 D_{t-m}^* , 可以定义诱饵图像与目标模板的区

别度 $D_{d_i-m}^*$:

$$D_{d_i-m}^* = \vec{\xi} \cdot \vec{D}_{d_i-m} = \sum_{j=1}^5 (\xi_j D_{d_i-m,j}) = \sum_{j=1}^5 \left(\xi_j \frac{|F_{d_i,j} - F_{m,j}|}{F_{d_i,j} + F_{m,j}} \right) \quad (5)$$

式中: d_i 为第 i 个诱饵图像。

记假目标中的 $D_{d_i-m}^* < D_{t-m}^*$ 个数为 N^* , N^* 表示比飞机目标更像目标模板的假目标的个数,由此定义一个干扰系数:

$$m^* = \frac{1}{N^* + 1} \quad (6)$$

其中, m^* 越小,越难识别出飞机目标。当无假目标时, $m^* = 1$ 。

综合目标检测、识别、跟踪过程中图像处理的特点,制定的成像目标红外隐身效果评估指标为:

$$E^* = C_G \cdot m^* \cdot S_{t-m}^* \quad (7)$$

其中, E^* 越小,飞机的红外隐身效果越好。

2 评估指标的验证

评估指标不是客观存在而是人为制定的,因此其合理性必须要经过充分的验证。验证的目的是证明所制定的红外隐身效果评估指标确实能建立起与实际隐身效果如探测距离、探测概率等的对应关系。

通常的验证方法有经验公式法和实验测试法。经验公式反映不出实施红外干扰对不同探测器探测距离的影响;实验测试法多是针对静止目标,高速运动的目标很难开展实验且花费巨大。因此作者认为可以采用实物或半实物模拟试验与全数字仿真试验相结合的方法对评估指标进行验证,通过各种试验对制定的评估指标进行充分的验证和完善,力求评估结果和实际探测情况相吻合,用较小的花费进行有说服力的验证。

由于实验条件有限,缺少自主识别的红外成像探测系统,半实物模拟实验验证尚没有进行,文中主要通过全数字仿真试验验证所制定的成像目标红外隐身效果评估指标的可行性。具体思路为:建立红外成像探测器的仿真模型,设置不同的仿真条件进行仿真试验,分析仿真结果得到评估指标与探测距离

或探测概率的关系。

对飞机目标威胁最大的是各类红外制导导弹，因此仿真中的探测器模型依据红外制导导弹导头的工作机理而建立^[12]。某型红外成像导引头目标识别的仿真流程如图 1 所示，其中图像预处理采用中值滤波算法进行图像增强，图像分割采用自适应阈值分割中的最小误差法，目标图像匹配依据的图像

特征是灰度偏差、高亮区比例、长宽比、紧凑度、复杂度，目标跟踪采用波门质心跟踪。

仿真实验的具体流程：

(1) 设定初始时刻导弹的位置、速度、姿态、视场角，飞机的位置、姿态、辐射强度，诱饵的位置、姿态、辐射强度，由此计算出弹目距离 R ，大气透过率，视场面积，目标、背景、诱饵在视场中所占的面积，从而

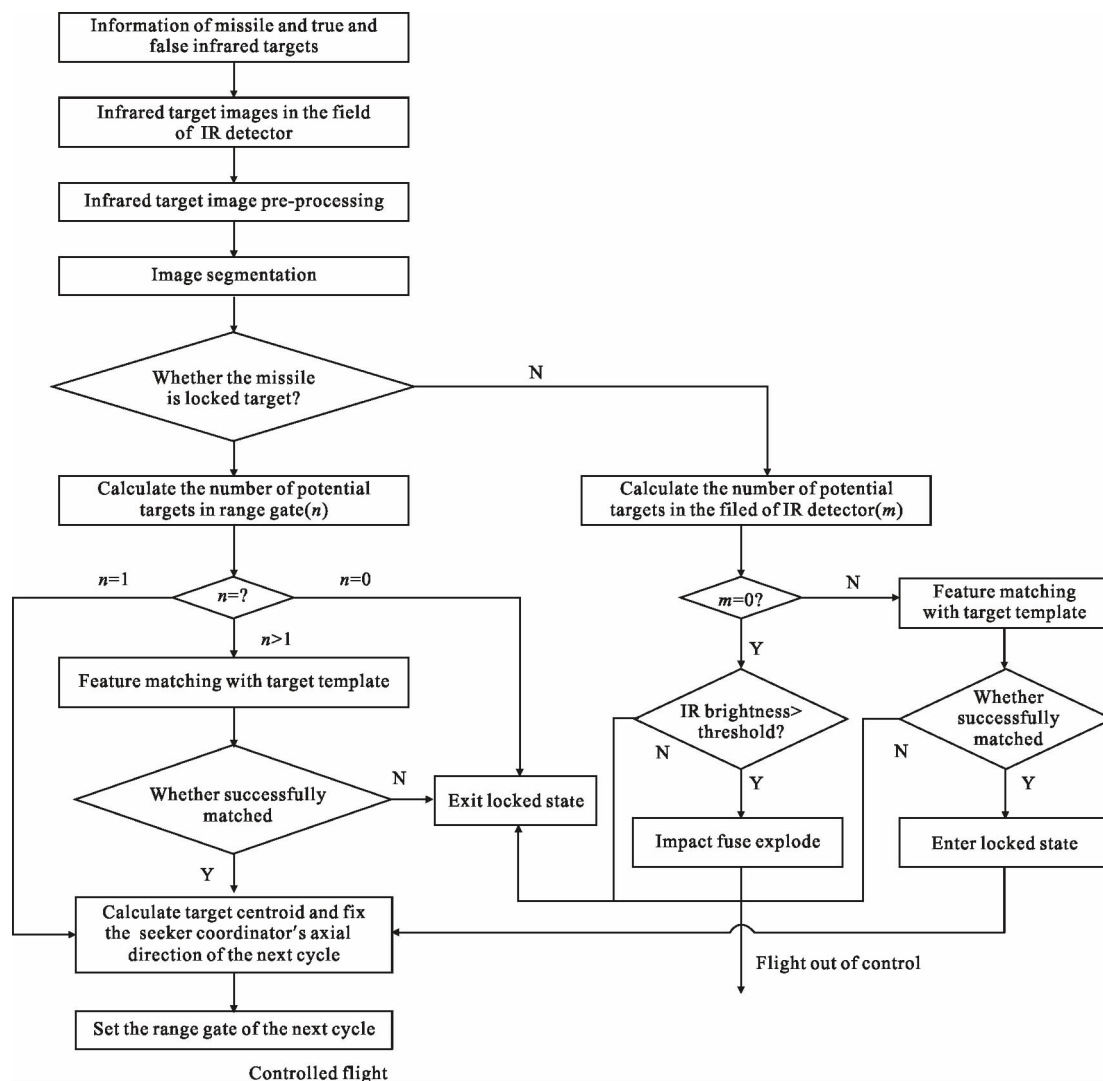


图 1 红外成像导引头目标识别的仿真流程图

Fig.1 Target simulation process frame of IR seeker

得到初始时刻的 E^* 。初始时设导弹锁定目标，计算 E^* 时视场为小视场。

(2) 在设定的仿真条件下进行导弹跟踪目标的仿真，由导引头指向的变化判断探测器是否稳定跟踪目标。由于仿真系统的各个环节加入了适当的随机因素，相同设置下的多次仿真可以得到稳定跟踪

目标的概率 p ，将此概率作为 E^* 在距离 R 时对应的探测概率 p 。

(3) 改变飞机或诱饵的辐射强度，即改变 E^* ，仿真得到不同 E^* 值对应的探测概率 p 。

(4) 改变初始弹目距离 R ，重复上述过程，得到不同距离 R 下 E^* 值对应的探测概率 p 。

(5) 将所有测得的 $E^* - p$ 对应值按 E^* 的升序重新排列, 观察 p 的变化情况。

设某型战斗机 11 km 高度 1.6 Ma 巡航飞行时受到下前方红外成像导弹的攻击, 飞机机长 19 m, 翼展 14 m, 高 5 m, 零距离上飞机 8~12 μm 的辐射亮度分布(也作为目标模板)见图 2, 导弹瞬时视场为 $5^\circ \times 5^\circ$, 由导弹的图像处理算法, 权重向量 $\vec{\xi}=(0.25, 0, 0.25, 0.25, 0.25)$ (图像特征量的权重向量 $\vec{\xi}$ 对评估结果有重要的影响, 该算例取值原则是: 分析图像识别算法中用到了哪几个特征量, 把这几个特征量的权重平均分配)。改变飞机的整体辐射亮度(不改变形状和灰度分布)和探测距离, 得到评估指标 E^* 的不同取值, 仿真得到无诱饵干扰时 E^* 与探测概率 p 的关系, 见图 3。在飞机图像不同位置添加红外诱饵弹图像, 仿真得到有诱饵干扰时 E^* 与探测概率 p 的关系, 如图 4 所示。由仿真结果可以看出, 探测概率 p 始终随 E^* 的增大而增大, 即评估指标的变化与探测概率的变化一致, 证明了以 E^* 作为成像目标对该类



图 2 目标模板

Fig.2 Target template

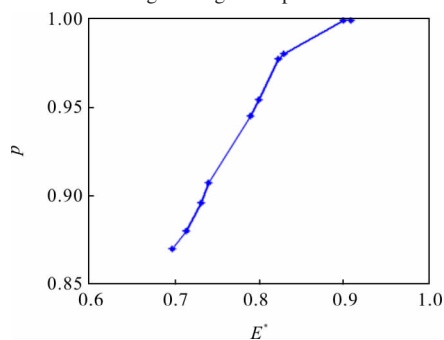


图 3 无红外诱饵干扰时的 $E^* - p$ 曲线

Fig.3 $E^* - p$ curve without IR decoy jamming

探测器红外隐身效果的评估指标是合理的, 可以反映真实的红外隐身效果。

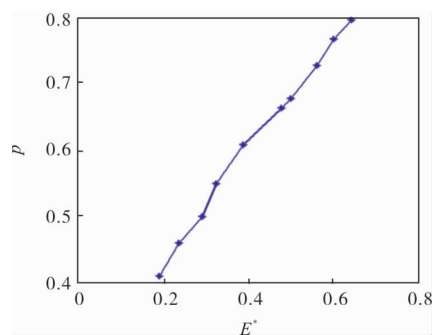


图 4 有红外诱饵干扰时的 $E^* - p$ 曲线

Fig.4 $E^* - p$ curve under IR decoy jamming

3 红外隐身效果评估

用评估指标 E^* 对某型双发战斗机的成像红外隐身效果进行评估。背景为北半球夏季晴朗天空-地背景, 飞机在 11 km 高度平飞, 飞行速度 1.6 Ma。选择两种采用不同图像处理方法的红外成像探测器, 其区别体现在图像特征量的权重上: $\vec{\xi}_1=(0.25, 0, 0.25, 0.25, 0.25)$, $\vec{\xi}_2=(0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2)$, 则两种探测器对应的评估指标的表达式也不同, 记为 E_1^* 和 E_2^* 。成像视场均为 $5^\circ \times 5^\circ$ 。飞机目标模板为数据库中存储的飞机不同姿态下的红外图像, 均是仿真得到的飞机无隐身时零距离的红外图像。

3.1 距离 R 对隐身效果的影响

图 5 为 8~12 μm 波段不同探测距离天空背景下飞机的红外场景图像。由图可见, 探测距离增大, 则飞机在视场中所占的面积减小, 但探测器处理图像的精度是固定的, 使得计算的飞机图像特征略有改变, 影响到目标图像与目标模板的相似度 S_{t-m}^* ; 同时由于透过率的减小, 飞机的亮度略有降低, 影响到目标与背景的灰度对比度。综合以上作用, E_1^* 和 E_2^* 随距离 R 的变化规律如图 6 所示。可见, E_1^* 和 E_2^* 均随距离 R 的增加而加速减小, 说明对于红外成像探测器, 实施红外隐身的时机很重要, 在距探测器较近时实施红外隐身效果较差, 而在太远的距离目标构不成红外图像, 仍要依据点源目标规则来处理。因此当目标图像在视场中的尺寸较小时采用红外隐身效果更好。 E_2^* 对图像高亮区比例的变化更敏感, 因此 E_2^* 随

距离 R 变化的程度大于 E_1^* 。

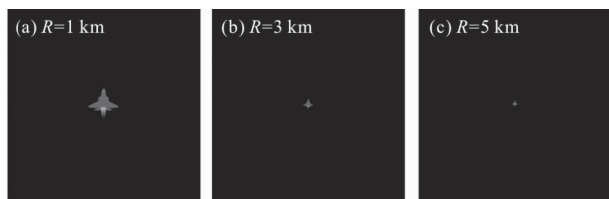


图 5 不同探测距离上的目标红外场景图像

Fig.5 Target IR scenes at different detection distances

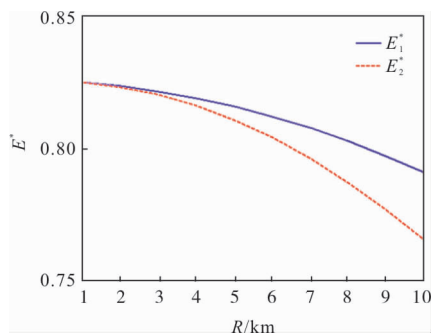


图 6 E_1^* 和 E_2^* 随距离 R 的变化规律

Fig.6 Change law of E_1^* and E_2^* with different distance R

3.2 采用不同隐身技术的隐身效果评估

在距离 5 km 处,无诱饵干扰的情况下,比较了不同隐身技术对隐身效果的影响,以及不同方位上隐身效果的变化(隐身飞机红外辐射的建模仿真可参考文献[13])。由于灰度对比度是评估指标 E^* 的重要组成部分,而灰度的对比实质上是辐射亮度的对比,因此首先给出飞机采用不同隐身技术时平均辐射亮度在飞机对称面内随视线高低角 α 的变化规律,见图 7 和图 8。图中线 1 为不采用额外的隐身技术时的辐射强度曲线,线 2 为采用排气系统红外辐射抑制技术后的辐射强度曲线,线 3 为采用机体红外辐射抑制技术后的辐射强度曲线,线 4 为同时采

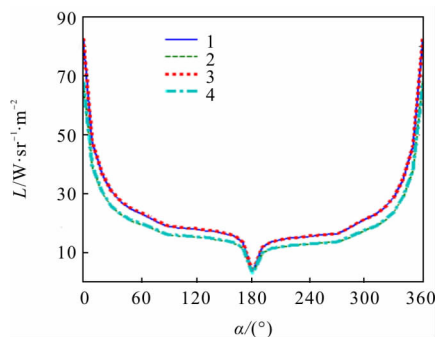


图 7 3~5 μm 波段的飞机辐射亮度

Fig.7 Aircraft's infrared radiance in the 3~5 μm waveband

用两种红外辐射抑制技术后的辐射强度曲线。其中,采用的排气系统红外辐射抑制技术为冷气注入,注入冷气的流量比为 10%,方向与轴向呈 30° 角向中心;机体红外辐射抑制技术为低发射率隐身材料,在红外波段的发射率为 0.3。

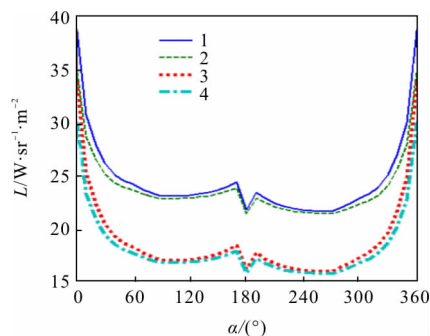


图 8 8~12 μm 波段的飞机辐射亮度

Fig.8 Aircraft's infrared radiance in the 8~12 μm waveband

由图可以看出,飞机正后方的辐射亮度最大,正前方的辐射亮度最小,3~5 μm 波段辐射亮度随方位的变化幅度较大,8~12 μm 波段辐射亮度随方位的变化幅度较小,因此 8~12 μm 波段更利于飞机的全向探测。

图 9~12 分别为在 3~5 μm 波段和 8~12 μm 波段 E_1^* 和 E_2^* 在飞机对称面内随视线高低角 α 的变化规律。由图可见, E_1^* 和 E_2^* 随 α 的变化规律与飞机辐射亮度随 α 的变化规律有很大关系,在 8~12 μm 波段从上方探测($0^\circ \sim 180^\circ$)时, E_1^* 和 E_2^* 的变化趋势与辐射亮度的趋势相反,其它情况下, E_1^* 和 E_2^* 的变化趋势与辐射亮度的趋势相同。在相同条件下,和的差别很小。这是由于在无诱饵干扰时,评估指标 E^* 由灰度对比度 C_G 和 S_{i-m}^* 和与目标模板的相似度两部分构成,由于存储有各个探测方向的目标模板,在同样的

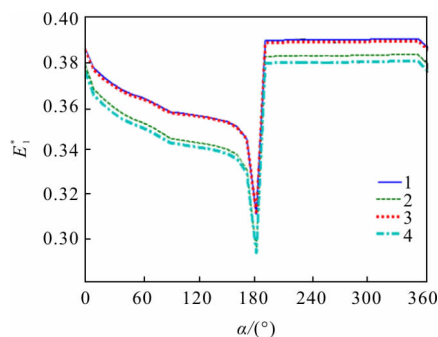


图 9 3~5 μm 波段的 $E_1^*-\alpha$ 曲线

Fig.9 $E_1^*-\alpha$ curve in the 3~5 μm waveband

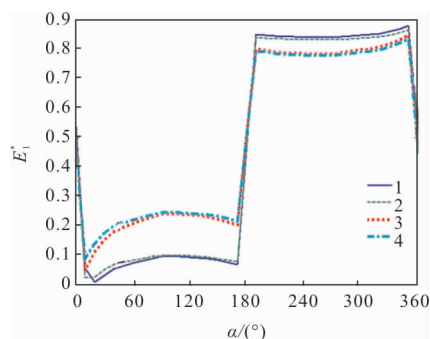


图 10 8~12 μm 波段的 E_1^* - α 曲线

Fig.10 E_1^* - α curve in the 8-12 μm waveband

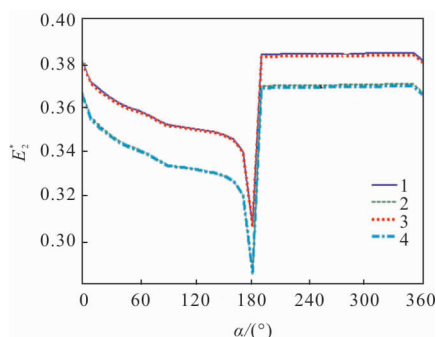


图 11 3~5 μm 波段的 E_2^* - α 曲线

Fig.11 E_2^* - α curve in the 3-5 μm waveband

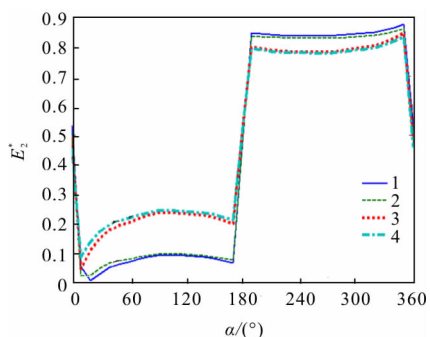


图 12 8~12 μm 波段的 E_2^* - α 曲线

Fig.12 E_2^* - α curve in the 8-12 μm waveband

探测距离下,目标图像与目标模板的图像特征差别随方向变化不大,因此隐身效果的方位差别主要由灰度对比度 C_G 来体现。在 8~12 μm 波段从上方探测时,飞机辐射亮度小于背景辐射亮度, C_G 随飞机辐射亮度的减小而增加,其它情况下,飞机辐射亮度大于背景辐射亮度, C_G 随飞机辐射亮度的减小而减小。

从图中还能看出,排气系统红外隐身技术对飞机 3~5 μm 波段的红外隐身效果影响较大,机体红外隐身技术对飞机 8~12 μm 波段的红外隐身效果影响

较大。由于探测器 2 利用的图像特征更多,对图像灰度分布的变化更敏感, E_2^* 普遍小于 E_1^* , 这在采用排气系统红外隐身技术后 3~5 μm 波段表现尤为明显。各种红外隐身技术对抗探测器 2 时的隐身效果更好。

经过了 5 km 的传输,目标图像特征在 3~5 μm 波段改变较大,在 8~12 μm 波段改变较小,3~5 μm 波段的相似度 S_{i-m}^* 远小于 8~12 μm 波段的相似度,但 3~5 μm 波段目标与背景的对比度较大,综合来看,从上方探测时,8~12 μm 波段的红外隐身效果优于 3~5 μm 波段,而从下方探测时,3~5 μm 波段的红外隐身效果优于 8~12 μm 波段。这些结论与对直接观察仿真得到的红外场景图像(图 13、14)所得的直观感受相符,也进一步证明了所定指标的合理性。场景图像中,左上角显示的是该角度下的目标模板,中央为采用了红外隐身技术后的飞机图像。(为便于比较,每张图的灰度等级是相同的)

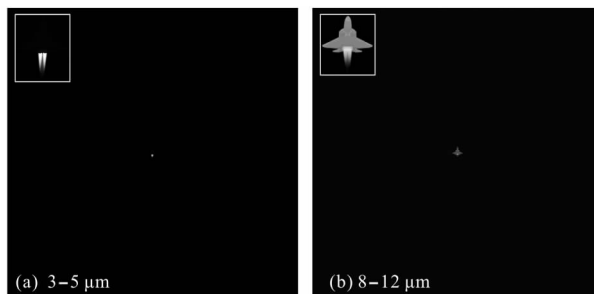


图 13 从飞机下方探测时的目标红外场景($\alpha=230^\circ$)

Fig.13 Target IR scenes of detection from aircraft below($\alpha=230^\circ$)

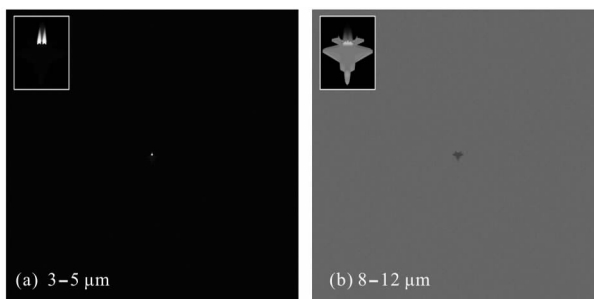


图 14 从飞机上方探测时的目标红外场景($\alpha=135^\circ$)

Fig.14 Target IR scenes of detection from aircraft above($\alpha=135^\circ$)

3.3 有诱饵干扰时的红外隐身效果评估

诱饵对成像探测器的影响较为复杂,不同种类的红外诱饵具有不同的图像特征,同一诱饵从不同的方位探测也呈现不同的图像特征,而且当诱饵与

目标在视场中的图像发生部分重叠时,相当于改变了飞机目标的图像特征,这些都关系到飞机的红外隐身效果。由于飞机在 8~12 μm 波段天空背景下的红外图像特征最明显,文中研究在此条件下施放红外诱饵对飞机隐身效果的改善(诱饵红外辐射的建模仿真见参考文献[14])。

在距离 5 km 处,飞机同时采用了排气系统和机体红外辐射抑制技术的情况下,选取了 5 个具有代表性的红外场景,包括不同的探测方位和不同的诱饵干扰方式,比较了不同诱饵干扰条件下飞机 8~12 μm 波段的红外隐身效果。5 个红外场景的描述和对应的评估结果 E_1^* 、 E_2^* 列于表 1。

表 1 不同红外场景下的红外隐身效果

Tab.1 Infrared stealth effectiveness under different infrared scenes

Scene number	Detection orientation	Infrared decoy	Scene image	E_1^*	E_2^*
1	Below	No bait	Fig.13(b)	0.783 8	0.781 4
2	Below	Two infrared decoys	Fig.15(a)	0.783 8	0.781 4
3	Below	One surface-type infrared decoy	Fig.15(b)	0.783 8	0.781 4
4	Below the side	One surface-type infrared decoy	Fig.15(c)	0.476 8	0.397 3
5	Below the side	Two surface-type infrared decoys	Fig.15(d)	0.215 6	0.183 3

相似性,但飞机图像与目标模板的相似度更高,成像探测器能很容易地辨认出飞机目标,因此, E_1^* 、 E_2^* 数值与无诱饵干扰时相同。在场景 4 中,面源诱饵与飞机在图像上有部分重叠,重叠后的区域的图像特征与目标模板产生了较大的区别,使得 E_1^* 、 E_2^* 大幅减小,飞机红外隐身效果提高。在场景 5 中,不但有一枚面源诱饵与飞机图像重叠,改变了目标区域的图像特征,而且有一枚面源诱饵形成一个独立的假目标,使得探测器识别出飞机目标的难度大大提高,因此, E_1^* 、 E_2^* 数值更小,飞机红外隐身效果更好。

比较 E_1^* 和 E_2^* 的数值发现,当目标图像特征改变时, E_2^* 的降幅更大,这是由于探测器 2 识别目标时依据的图像特征信息更多,对图像特征改变更敏感。可见对于红外成像探测器,图像相关匹配能力越强,越能准确地从复杂环境中识别出目标,但对目标特征的改变也越敏感,越容易受到主动或被动红外隐身技术的影响。

总之,红外诱饵干扰成像探测器的难度远大于

由图 15 可以直观地看出,点源型的红外诱饵弹由于形成的图像尺寸太小,对飞机的红外图像特征几乎没有任何影响,面源红外诱饵的红外图像特征与飞机图像具有一定的相似性,且当诱饵图像与飞机图像有重叠时,能较大幅度地改变目标的图像特征。

比较表 1 中不同场景的 E_1^* 、 E_2^* 数值可见,施放有限数量的红外诱饵弹不会提高飞机的红外隐身效果。当诱饵图像和飞机图像不重叠时,施放面源红外诱饵也对飞机的红外隐身效果没有改善。这是由于在 5 km 距离上,飞机的图像特征已较明显,虽然面源红外诱饵的图像特征与飞机目标模板具有一定的

干扰点源探测器,只有把握好施放时机、方位,或将多枚诱饵配合使用,才能达到较好的红外隐身效果。

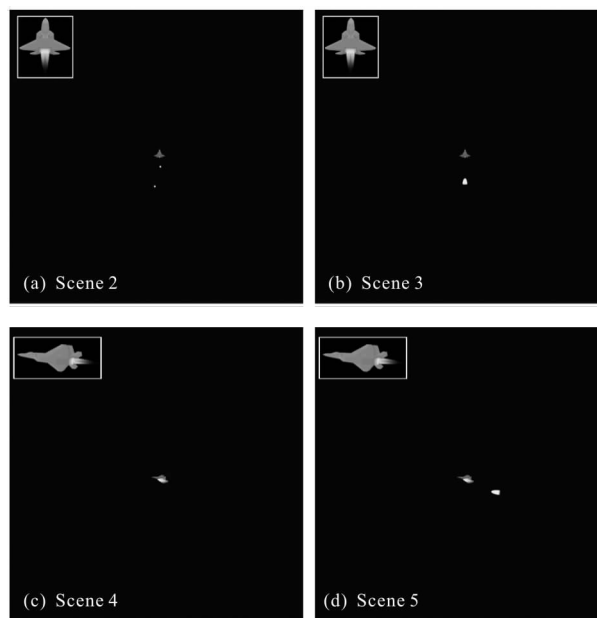


图 15 不同诱饵干扰下的红外场景图

Fig.15 Target IR scenes under different decoys jamming

4 结 论

文中密切结合红外探测器的识别机理,制定了能够定量评估出飞机采用不同隐身措施、不同干扰手段、对抗不同探测器时的隐身效果的评估指标,克服了目前常用的评估指标中受探测器性能参数影响较大、无法反映诱饵干扰等主动红外隐身的作用效果、与目标自主识别红外探测器的跟踪结果偏差较大等问题;提出了通过探测器仿真验证评估指标的新思路。主要结论有:

(1) 探测距离增加,成像目标的红外隐身效果提高。在实战中飞机与探测器的距离不断变化,探测距离反映了实施主动或被动红外隐身的时机,应根据探测距离的不同采用相应的红外隐身技术,在降低红外隐身成本的同时提高红外隐身的效率。

(2) 实现 3~5 μm 波段飞机的红外隐身,关键是采用有效的排气系统红外隐身技术,实现 8~12 μm 波段飞机的红外隐身,关键是采用有效的机体红外隐身技术。对于成像探测器,从上方探测时,8~12 μm 波段的红外隐身效果优于 3~5 μm 波段,而从下方探测时,3~5 μm 波段的红外隐身效果优于 8~12 μm 波段。

(3) 红外诱饵弹对成像阶段的红外探测器基本不起作用,面源红外诱饵干扰成像探测器的难度也远大于干扰点源探测器,当诱饵图像和飞机图像不连通时,成像探测器能很容易地识别出飞机目标,只有把握好施放时机、方位,或将多枚诱饵配合使用,保证视场中的诱饵图像和飞机图像有重叠,才能达到较好的红外隐身效果。

需要说明的是:由于文中所给出的评价方法旨在评估飞机目标本身的红外隐身(包括被动隐身和主动干扰)技术水平,所以排除了大部分探测器性能参数的影响。文中虽然制定评估指标时排除了大部分探测器性能参数的影响,所举示例也是仿真得到的红外场景图像,但评价方法同样适用于实测红外场景图像的评估,前提是用于评估的实测红外场景图像必须出自同一探测器。

参考文献:

[1] Olsen F B. Methods for evaluating thermal camouflage [R]. ADA456649, 2005.

- [2] Theodore J D, Shane W M, David E S, et al. Biologically-based vision simulation for target-background discrimination and camouflage/LO design[C]// SPIE, 1997, 3062: 231-242.
- [3] Piet Bij. Acquisition of sea targets, part 1: Observer performance and "ACQUIRE" model predictions for air-to-surface FLIR imagery [R]. TNO Report TM-96-A037, 1996.
- [4] Pei Xu, Ma Dongli. Calculation of detection and recognition probabilities of imaging infrared seekers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(11): 253-256.(in Chinese)
- [5] Gao Yuan, Liu Jian, Zhang Junju, et al. Research on weapon equipment based on method for infrared stealth effect evaluation[J]. *Infrared Technology*, 2017, 39(11): 1060-1065.(in Chinese)
- [6] Lai Dexiong, Zhang Yunfei. Evaluation method research for aircraft infrared stealth performance[J]. *Infrared Technology*, 2014, 36(5): 398-403.(in Chinese)
- [7] James A R, Richard H V Ronald G D. Target acquisition performance modeling of infrared imaging systems: Past, present, and future [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2001, 1(1): 31-40.
- [8] Huang Feng, Wang Yuefeng, Dong Wei, et al. Study on infrared camouflage effect evaluation based on gray correlation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(6): 928-931.(in Chinese)
- [9] Han Yuge, Xuan Yimin, Ma Zhongjun. Assessment on the infrared stealth effect of imaging object [J]. *Infrared Technology*, 2010, 32(4): 239-241.(in Chinese)
- [10] Gao Shaoshu, Jin Weiqi, Wang Jihui, et al. Study on camouflage effect of targets with different characteristics under typical background [C]//SPIE, 2010, 7656: 1-8.
- [11] Zhang Zhongchen, Meng Qinghua, Shen Zhenggang. Infrared feature analysis of objects[J]. *Infrared Technology*, 1999, 21(4): 25-28.(in Chinese)
- [12] Li Shenbo, Li Taorui, Tong Zhongxiang, et al. Influence of tactical parameters of missile on jamming effectiveness of surface source infrared decoy [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(7): 0704004.(in Chinese)
- [13] Wang Chaozhe, Tong Zhongxiang, Liu Yongzhi, et al. Evaluation method of stealth aircraft's infrared radiation measurement [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(11): 2891-2897.(in Chinese)
- [14] 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(4): 1150-1157.(in Chinese)