

## 红外成像空空导弹智能化抗干扰研究

卢 晓<sup>1</sup>, 梁晓庚<sup>1,2</sup>, 贾晓洪<sup>1,2</sup>

(1. 中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009;

2. 航空制导武器航空科技重点实验室, 河南 洛阳 471009)

**摘 要:** 红外型空空导弹经过四代发展已经从只能以尾后追击的攻击方式发展至具备全向攻击、越肩发射和发射后截获等能力的高性能战术武器, 其导引体制也经历了从单元、多元再到目前红外成像的发展过程。文中针对红外成像体制空空导弹的抗干扰问题, 首先介绍了成像导引系统的组成、成像阶段对目标的角跟踪原理与通常采用的抗干扰方法; 在分析了空空导弹对智能化技术的应用需求、当前空战复杂对抗环境构成以及红外成像空空导弹对抗自然背景与人工干扰源主要方法的基础上, 面向具体背景与人工干扰对抗问题, 从智能感知与导引、智能制导控制、智能协同等三个方面提出了六种拟采用的抗干扰方法, 并对其进行了简要介绍; 已进行的部分仿真结果表明, 上述方法能够针对各自拟解决的具体问题取得较好的抗干扰效果。

**关键词:** 红外成像制导; 抗干扰; 背景干扰; 人工干扰源; 智能化导弹

**中图分类号:** TJ760.2      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA20200240

## Study on intelligent counter-countermeasures of infrared imaging air-to-air missiles

Lu Xiao<sup>1</sup>, Liang Xiaogeng<sup>1,2</sup>, Jia Xiaohong<sup>1,2</sup>

(1. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China;

2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Airborne Guided Weapons, Luoyang 471009, China)

**Abstract:** After four generations of development, the infrared air-to-air missile has developed from the attack mode of trailing pursuit to a high-performance tactical weapon with omnidirectional attack, over-the-shoulder launch and interception after launch, and its guidance system has also gone through the development process from unit, multiple to IIR at present. On account of the infrared imaging air-to-air missile anti-jamming problems, the composition of imaging guidance system, the principle of the angle tracking of the target in the imaging stage was introduced firstly, and the relevant anti-jamming methods that usually used at this time. Second, on the analysis of the application of intelligence technology requirement for air-to-air missiles in the course of actual combat, current complex air combat environment composition and infrared imaging counter-countermeasures against natural background as well as artificial interference sources, six anti-jamming methods, each dealing with a specific interference problem, were proposed from intelligent perception and guidance, intelligent guidance and control and intelligent cooperation, and the brief introduction was carried on. Some part of the simulation results show that above methods can achieve good effects on their respective anti-jamming problems.

**Key words:** infrared imaging guidance; counter-countermeasures; background interference; artificial interference sources; intelligent missile

收稿日期: 2020-06-17; 修订日期: 2020-08-10

## 0 引言

为应对红外空空导弹威胁,提升作战飞机的战场生存能力,世界各军事强国都已积极开展了多年的机载干扰技术研究,并衍生出了大量的红外对抗产品。同时,导弹的更新换代也推进着干扰技术的不断改进和升级。干扰与抗干扰在相互博弈中的不断发展、进化,使空战环境变得日益复杂,导弹的空中作战优势也受到了严峻挑战。

目前,传统 MTV 干扰弹、空气动力/推进式干扰弹、光谱自适应干扰源、空间分布式干扰源以及红外干扰机,如 MJU-7A/B、MJU-71B、DM69 A2、MJU-52/B、AN/ALO-24 等欺骗式人工干扰已投入实际应用。这些人工干扰源主要通过模拟目标的辐射能量、运动特征、光谱特征以及对目标进行遮挡等方式达到欺骗、干扰红外空空导弹的目的<sup>[1]</sup>。另外,压制式的激光定向干扰,消光式的红外隐身技术、烟幕干扰等也被用来对抗红外型空空导弹。

红外型空空导弹经过四代发展,已经从只能以尾后追击的攻击方式发展至具备全向攻击、大离轴发射、越肩发射和发射后截获等能力的高性能战术武器,其导引体制也相应地由单元、多元发展至红外成像制导。红外成像空空导弹如 AIM-9X、ASRAAM、IRIS-T 等,已经能够通过能量上升时间判断、视线角速率突变等方法有效判断几乎所有欺骗式干扰源的出现,并启动相应的对抗措施,只是在某些攻击态势下存在抗干扰低概率区域且缺少针对新型分布式面源干扰的对抗策略<sup>[2]</sup>。其次,法国的 MICA\_IR、以色列的 Python5 和南非的 A-Darter 已经采用了双色红外成像制导技术,具备了对传统 MTV 干扰弹、空气动力/推进式干扰弹等更强的抗干扰能力,但仍存在

对光谱自适应、空间分布式面源干扰对抗能力不足的问题。

国内针对对抗红外干扰的研究和应用多集中在传统的点源、多点源 MTV 干扰弹方面,并在分析其干扰原理的基础上,制定了相应的对抗策略<sup>[3]</sup>。另外,国内对双色红外导引头抗干扰技术的原理研究和试验也取得了一些良好的成果,但其应用对象主要是多元非成像导引头<sup>[4-5]</sup>。在成像导引系统方面,参考文献[6]分析了双色红外成像抗干扰的关键技术和系统组成,并根据目标与干扰间的特征差异着重研究了双色波段的选择问题,提出了为提升抗干扰能力需要融合及关联的特征信息,但未有相应的试验验证。除上述问题之外,红外成像空空导弹的抗背景干扰能力也有待提升。

由此,文中将在已有研究基础上,以干扰类型主线,以各干扰源的干扰机理为切入点,从制导控制、背景建模、红外双色成像与深度学习等多方面考虑红外成像空空导弹“智能化”抗干扰的方法设计。

## 1 红外成像导引系统

红外成像导引系统是成像空空导弹的重要子系统,是提升导弹抗干扰能力的核心组件。其相比于点源导引系统的不同点在于,成像导引系统可将外界景物的热辐射分布转变成数字图像,通过融合目标和干扰更多维度的信息如尺度、形状等,以及更先进的信息处理方法完成目标识别、跟踪和抗干扰过程。

### 1.1 红外成像导引系统的组成

红外成像导引系统即红外成像导引头,如图 1 所示,其按功能可分解为成像探测、信号处理、跟踪稳定及导引信号形成等多个子系统。

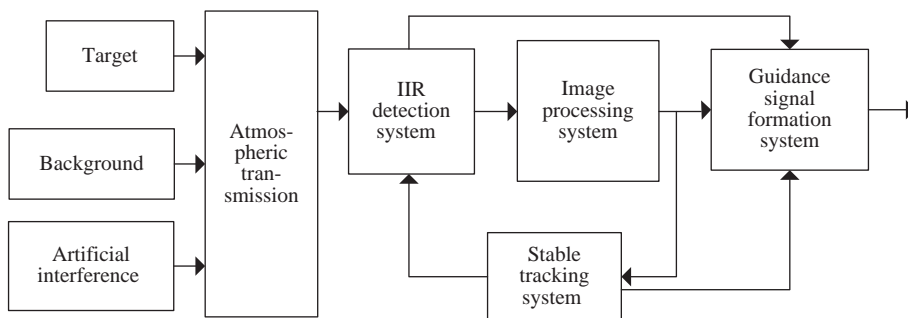


图 1 红外成像导引系统原理框图

Fig.1 Schematic diagram of IIR guidance system

其中,成像探测系统将经过大气传输的目标、背景及人工干扰等景物的辐射分布汇聚至探测器的光敏面上,并进行适当的预处理;图像信号处理系统将探测器的输出转换为数字图像信号(见图 2),其图像灰度与物体的红外辐射亮度成正比,并根据实时图像进行目标的检测、识别,同时输出误差信号驱动伺服平台跟踪目标或辅助导引信号形成;跟踪稳定系统主要用于实现目标跟踪和光轴与弹体的运动隔离;导引信号形成系统根据导引律要求对跟踪回路测得的误差信号与其他有关信号进行综合处理,形成制导系统所要求的导引信号。

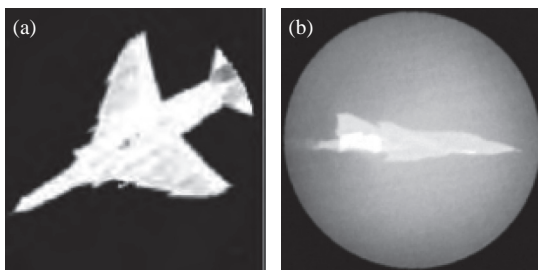


图 2 AIM-9X (a)、ASRAAM (b) 红外成像导引头图像

Fig.2 AIM-9X (a) & ASRAAM (b) IIR seeker image

与点源红外导引系统相比,新一代红外成像导引系统具有如下一些优点:

- (1) 更高的探测灵敏度和空间分辨率、更大的系统动态范围;
- (2) 更远的作用距离、更高的目标分辨能力;
- (3) 更强的目标识别和抗人工干扰能力;
- (4) 更大的离轴发射能力,准全天候工作等。

## 1.2 红外成像导引系统的工作原理

由于结构、体积等限制,红外成像导引头的视场有限,且新一代导引系统采用的凝视成像体制,其光学系统焦距固定。使得导弹在与目标逐渐接近的过程中,探测系统所成的目标图像会经历四个阶段的较大变化:

- (1) 点目标阶段:目标在图像中只占一个像素,几乎淹没在背景噪声中;
- (2) 亚成像阶段:目标成像的弥散斑占几个至几十个像素,信噪比有所提高;
- (3) 成像阶段:目标成像具备形状特征,信噪比较高;

(4) 图像溢出阶段:目标距离很近,图像充满导引头视场。

### 1.2.1 成像阶段角跟踪原理

红外成像导引系统的角跟踪是由成像探测系统、图像信号处理系统与跟踪稳定系统构成的角跟踪回路完成的。

成像条件下系统稳定跟踪目标时,目标的视线角速度信号正比于图像处理系统输出的误差信号。以波门跟踪为例,此误差信号的提取如图 3 所示。

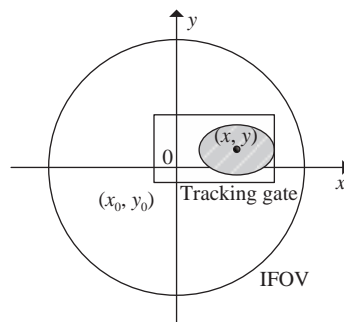


图 3 误差信号提取原理图

Fig.3 Schematic diagram of error signal extraction

其中,误差信号指的是目标跟踪点与图像中心点(视场中心)的位置差。设跟踪点坐标 $(x, y)$ ,中心点坐标 $(x_0, y_0)$ 则误差信号可表示为:

$$\begin{cases} u_x = k(x - x_0) \\ u_y = k(y - y_0) \end{cases} \quad (1)$$

### 1.2.2 成像阶段抗干扰原理

红外成像空空导弹的抗干扰能力主要体现在抗背景和人工干扰源两个方面。

背景干扰主要包括太阳、云层、云团和地物背景等。一般情况下,抗背景干扰多用光谱滤波和空间滤波等方法。其中,光谱滤波根据目标与干扰的红外辐射光谱差异抑制背景干扰,它通常可利用光学滤光片或探测器等实现,可有效抑制与目标光谱特性区别较大的目标;空间滤波属于图像预处理过程,它通过低通滤波预测空间中缓慢变化的背景,然后在原始图像中减去背景,达到抑制背景突出目标的目的。

对于传统 MTV 干扰弹,由于成像阶段弹目距离相对较近,诱饵弹可很快与目标分离且目标的形状特征明显,因此常利用目标与诱饵在灰度及形状等方面的差异进行抗干扰目标识别。

## 2 空空导弹的智能化需求

在半个多世纪的发展过程中,空空导弹的性能提升总是以空战需求和科学技术的进步为基础。

对于未来的空中作战,红外型空空导弹不可避免地要面对隐身战斗机、无人作战飞机、有人/无人协同作战、分布式预警探测系统与作战体系,及更为先进的人工干扰源等<sup>[7]</sup>,因此需要进行能力提升,如:

(1) 当前普遍使用的比例导引及其扩展形式只能通过目标的视线角速率信息进行制导,信息维度过低且在一些情况下可能出现信息缺失的情况,可通过多模技术、数据链、它机制导与构建分布式作战系统等提升导弹的制导信息获取能力,即综合化信息感知与导引能力;

(2) 新一代红外成像导弹虽然已极大降低了对载机占位的要求,但良好的作战态势(包括导弹与目标的相对位置等)依然能够在较大程度上提升其作战效能,因此需要其具备弹道在线规划等制导控制能力;

(3) 为了完成联合精确打击等任务而发射的多枚空空导弹,应具备自组织、自通讯、自飞行等特点的协同作战能力;

(4) 导弹在飞行过程中,还应该能够根据当前获取的信息对空战态势进行预测,对威胁程度更高的目标进行优先打击等的决策能力等。

上述能力提升将使红外空空导弹摆脱“单一信息、单一弹道、单一目标、单独飞行”等局限,朝着智能化的方向发展。

能够支持导弹实现智能化的理论、技术不仅包括当前的制导控制、信息处理与计算机网络等。近年来蓬勃发展的大数据、云计算、以深度学习为方向的人工智能及量子理论等也能为其提供强有力的支撑。两者均属于“广义人工智能”的范畴<sup>[8]</sup>。

文中即从上述导弹智能化能力需求出发,聚焦红外成像空空导弹制导过程中的抗干扰问题,研究相应的智能化对抗方法。

## 3 红外成像空空导弹智能化抗干扰方法

导弹的抗干扰能力指的是,在对抗环境下完成导弹精确制导要求的能力。因此,首先,红外成像空空导弹智能化抗干扰的应用场景应是复杂对抗环境。

### 3.1 空战复杂对抗环境

当前空中对抗作战过程中,没有背景或人工干扰的净空作战条件已经不复存在。红外成像空空导弹要实现在多种攻击态势和各类人工干扰等条件下仍然能够对目标进行精确打击,是一个具有挑战意义的课题。

从空空导弹的实际作战场景出发,复杂对抗环境的构成主要包括背景、目标、红外人工干扰源和导弹四个要素。其中,各构成要素之间又存在内在关联与相互作用,如:目标的飞行高度决定了背景类型及特性,其运动特性会影响投放干扰的初始运动特征,其机动动作与姿态也将直接影响弹目相对态势;人工干扰源会影响近距目标以及云雾背景的红外特征等,具体如图 4 所示。

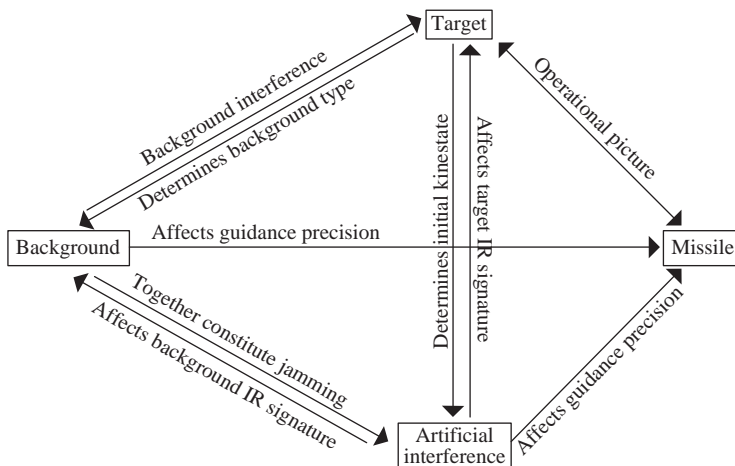


图 4 空战复杂对抗环境构成

Fig.4 Composition of complex air combat environment



### 3.2 红外成像空空导弹干扰源分析

红外成像空空导弹面临的干扰源主要包括自然背景干扰与人工干扰,后者根据干扰机理的不同又可分为欺骗式、压制式及消光式等。

#### 3.2.1 自然背景干扰

空空导弹的自然背景主要是蓝天、太阳、云层和地物等。蓝天的红外辐射很弱,其干扰在高空一般可以忽略不计,因此主要考虑其他三类干扰源。

(1) 太阳干扰: 太阳是一个极强大的红外辐射源,其峰值辐射波长约为  $0.45\ \mu\text{m}$ ,比一般航空目标的峰值波长短,而且约 90% 的辐射能量分布在  $0.15\sim 4\ \mu\text{m}$  范围内。太阳干扰对工作在近红外波段的导引系统影响较大,对工作中、远波段的红外导引系统也有一定影响。

(2) 云层、云团干扰: 云层、云团的干扰主要是它们对太阳光的散射,有些亮云的散射非常强烈。散射波段主要在  $2\ \mu\text{m}$  以下的短波范围,其对  $3\ \mu\text{m}$  附近中波探测的干扰也不容忽视;在  $4\ \mu\text{m}$  以上的红外波段,云自身的温度辐射又开始显现。然而,从对导弹红外探测系统影响的程度来看,云对太阳的散射要大于自身的辐射。另外,云背景辐射的亮度或强度与其尺寸、厚度、浓度以及太阳的方位等也有极大关系。

(3) 地物背景干扰: 地物背景在白天的红外辐射类似于云层,由于它的吸收系数较大,因此受太阳照射升温后自身的热辐射较强,而对太阳光的散射较弱;在冬季,地物背景中的白雪对太阳光的散射很强,会对短波红外探测系统产生较大影响。

#### 3.2.2 人工干扰

如上所述,根据干扰机理的不同人工干扰可以分为欺骗式、压制式与消光式三种。其中,欺骗式干扰源主要包括各种红外诱饵弹如点源、多点源、空气动力/推进式、光谱自适应与面源诱饵等,以及红外干扰机;压制式干扰指的是激光定向干扰;消光式干扰主要包括红外隐身与红外烟幕干扰等。

##### (1) 传统 MTV 干扰弹

由于结构简单、成本低以及可大量携带等优点,传统 MTV(镁/聚四氟乙烯/氟橡胶)干扰弹仍是目前装备量最大、使用最广泛的机载干扰源。

MTV 干扰弹具有与目标重叠的红外辐射波段、但辐射能量更高,其主要通过高能量压制将来袭导弹

诱偏,达到干扰目的。按照投放方式的不同,MTV 干扰弹又可分为点源干扰与多点源干扰两种,如图 5 所示,后者是前者在调整药体结构、投放方向、投放时序等内容后的另一种应用形式,主要是为了在空间形成多辐射源分布,干扰导弹对目标的正常跟踪等<sup>[9]</sup>。

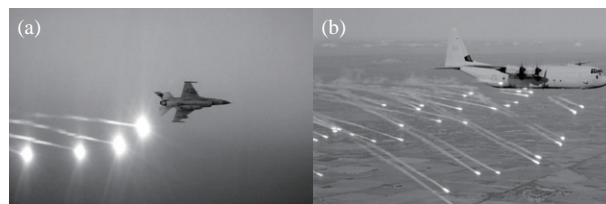


图5 投放点源(a)与多点源(b)干扰的可见光图像

Fig.5 Visual images of point (a) and multi-point (b) source decoys

然而,MTV 干扰弹具有以下两个缺点:(1) 发射即减速,与作战飞机分离过快;(2) 光谱不能完全覆盖作战飞机的红外辐射波段,干扰能力有限。因此,在大多数对抗态势下,MTV 干扰源对红外成像空空导弹的干扰效果较差。

##### (2) 空气动力/推进式干扰

为了解决 MTV 干扰弹与载机分离速度过快导致的干扰性能下降问题,空气动力/推进式干扰弹应运而生。

空气动力式诱饵弹投放后,可以通过弹簧翼片与气动式外形的弹筒减小飞行阻力,进而降低其与载机的分离速率,达到抗干扰的目的。然而,由于空气动力效果有限,成像导引头仍能在一定时间内通过航迹差异区分出目标与干扰。

推进式干扰弹除具备传统 MTV 干扰源的结构外,还将部分化学燃料放置于一个带有喷嘴的燃烧室内。投放燃烧后,热能从喷嘴喷出推动干扰弹继续沿着与被保护目标相似的航迹运动,诱骗导弹跟踪干扰弹自身。随后,在重力影响下,推进式干扰的飞行高度逐渐下降并远离载机,从而达到干扰目的。

空气动力/推进式干扰弹能够较好对抗成像导引头的运动特征识别策略,但仍存在与被保护目标辐射能量、光谱分布差异较大的问题。

##### (3) 光谱自适应干扰源

光谱自适应干扰源是通过模拟与被保护目标相似的光谱分布对抗来袭导弹的人工干扰源。一种实现方法是改变传统 MTV 干扰弹的化学组成,但干扰弹的辐射强度会有所降低。另一种实现光谱干扰的

方法是使用固体或液体自燃型材料作为干扰弹原料,如图 6 所示。自燃型干扰弹投放后,一经接触空气即可点燃,液体自燃干扰源还具备辐射面积较大的优点。然而,自燃型干扰源也存在辐射能量较低且受投放高度影响较大的问题。

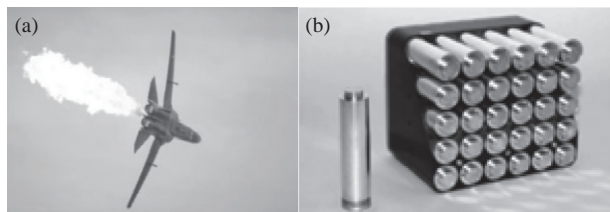


图 6 液体喷油延燃 (a) 与固体 (b) 光谱自适应干扰源

Fig.6 Spectrally-matched liquid (a) and solid (b) spectral adaptive countermeasure

#### (4) 分布式干扰源

分布式干扰源指的是针对红外成像制导导弹设计、生产的面干扰源。

如上所述,液体自燃干扰能在空间形成一定面积的分布式红外辐射。更为先进的箔片式固体自燃材料被投放于载机尾后的涡流场中时,能够产生面积更大的红外辐射云。其形成速度快,燃烧时间长,光谱特性与目标相似且具备一定的形状特征,主要通过遮挡或将来袭导弹诱偏达到干扰目的。然而,由于面积/体积比值较大,面源干扰的减速比传统 MTV 干扰弹更快,甚至成为静态的红外辐射源,这也为红外成像空空导弹提供了一种可能的对抗途径。典型面源干扰的红外图像如图 7 所示。



图 7 MJU-52/B 面源干扰红外图像

Fig.7 IR image of MJU-52/B spatially distributed flares

#### (5) 红外干扰机

红外干扰机安装在载机平台上,通过发射辐射波段与目标相似、频率与导引头调制频率相近的红外脉

冲信号,使来袭导弹产生虚假跟踪信号而偏离目标。其多列装在直升机或军用运输机上,且主要用于对抗非成像体制的红外导引系统,对红外成像导引头的干扰效果有限。

#### (6) 激光定向干扰

激光定向干扰通常采用相干激光作为光源,如图 8 所示。当机载告警系统探测到来袭导弹的方向时,干扰机向此方向较小的立体角内发出高能量的窄激光波束,致眩、致盲甚至摧毁红外探测器,从而破坏导弹对目标的稳定跟踪造成脱靶等。

激光定向干扰比传统的红外干扰机的作用距离更远,能量大、方向性好,即使模式不匹配也能具备较好的干扰效果,是对红外成像导引头很有威胁的一种干扰手段。

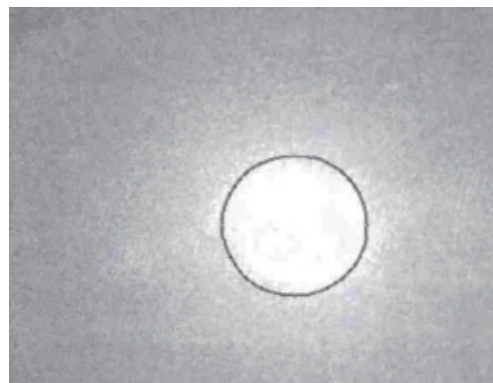


图 8 激光定向干扰对 HgCdTe 焦平面阵列的致眩效果图

Fig.8 Laser dazzle effect on HgCdTe focal plane array

#### (7) 红外隐身

作战飞机的红外隐身主要是通过尽可能降低飞机与背景的温度差异,降低发动机尾气的红外辐射梯度,尤其是降低飞机超音速飞行时由气动加热导致的机翼前缘的红外辐射等实现的。例如, F-22 整个机身表面被涂以波音公司研制的用于抑制红外辐射的伪装涂层,同时其采用了二元喷管、尾翼遮挡与主动冷却等技术,能够在持续超音速飞行条件下,具有很低的全方位红外辐射特征<sup>[10]</sup>。

#### (8) 红外烟幕

红外烟幕主要通过降低探测器信噪比或覆盖目标的红外辐射来实施干扰:一方面,目标发出的红外辐射入射到烟幕中时,大量烟幕粒子将对其进行吸收和散射,减弱红外探测器的接收能量;另一方面,烟幕面积较大时,在一定方位可以对目标实施红外遮挡或

覆盖。但其主要适用于地面或低速平台的防护,在主战飞机等高速飞行目标中应用较少。

综上所述,除激光定向干扰通过能量压制对抗来袭红外成像导弹外,其他干扰源均通过“隐真”或“示假”的方式干扰红外成像导引系统。其中,“隐真”指抑制或消除目标的红外辐射特征,使其与背景相似或对其进行遮挡、覆盖等;“示假”指通过生成与被保护目标某种或某些红外特征相似的假目标,诱骗导弹对其进行跟踪,达到干扰的目的。

### 3.3 当前采用的抗干扰方法

由上述内容可知,除背景干扰外,各人工干扰源均是根据红外导引系统的目标探测方式、信号/信息处理及跟踪方法等有针对性地进行设计和发展的,其所利用的干扰特征如表 1 所示。

表 1 各人工干扰所利用的红外特征

Tab.1 Infrared feature used by artificial interference sources

Flare type	IR Feature used
MTV	Energy
Aerodynamic/Propelled	Energy, movement
Spectrally adapted	Energy, spectral distribution
Spatially distributed	Energy, spectral distribution, shape
IR jammer	Energy, spectral distribution
DIRCM	Energy
IR stealth	Energy
IR smoke	Energy, shape

相应地,红外成像空空导弹抗干扰方法的设计、实现也是通过背景干扰与表 1 中各人工干扰源的自身特征进行的。

对于太阳干扰,红外成像导弹在发射时都要求偏离太阳一定的夹角,但制导过程中是否能保持光轴与太阳之间的夹角大于一定角度,是一个尚未确定的问题。

对于云层与地物背景干扰,如 1.2.2 节中的内容所述,成像导引系统一般采用光谱滤波、空间滤波等方式进行一定程度的抑制。

红外成像空空导弹对抗人工干扰源,以传统 MTV 干扰弹为例:(1)点目标阶段:可用灰度梯度和像素值梯度作为诱饵弹出现的标志,随后利用灰度或位移变化等区分出干扰与目标;(2)亚成像阶段:可利

用像素数、平均灰度、最大灰度以及位移变化等识别目标;(3)成像阶段:可以利用目标与诱饵在灰度(均值、最大值、方差等)及形状(长宽比、圆度、面积等)特征进行目标识别;(4)图像溢出阶段:目标面积很大,诱饵弹的图像一般不会落在图像处理区域内,不会干扰对目标的跟踪。

当前,红外成像空空导弹对抗其他人工干扰源的具体策略、方法国内外研究较少,或者是由于涉密原因没有进行公布。但从其干扰机理与相关资料中分析可知,主要采用的抗干扰方法如表 2 所示。

表 2 当前常用的部分抗干扰方法

Tab.2 Part of the current common CCMS

Flare type	IRCCMS
MTV	Abrupt energy or LOS rate, 2-color
Aerodynamic/Propelled	Abrupt energy, 2-color
Spectrally adapted	Abrupt energy or LOS rate
Spatially distributed	Abrupt LOS rate

表 2 中并未涉及红外干扰机、激光定向干扰及消光性干扰的对抗方法,其主要原因是其对红外成像导引系统的干扰效果较差、研究较少或者还需要通过提升成像探测系统性能等措施才能达到较好的抗干扰效果等。

### 3.4 拟采用的智能化抗干扰方法

针对已公布参考文献对红外成像空空导弹抗干扰方面研究的不足,文中从制导控制、图像处理、深度学习等“广义智能化”角度,面向具体问题,对拟采用的抗干扰方法简要介绍如下:

#### 3.4.1 抗太阳干扰

当前防止太阳干扰红外导引系统的方法是,与之偏离一定角度发射导弹。但在制导过程中红外成像空空导弹的光轴也可能出现与太阳夹角较小的情况,进而严重影响导弹对目标的正常跟踪,甚至导致脱靶。因此,考虑通过实时控制导弹的制导过程,使光轴与太阳光线的夹角始终保持大于一定角度,从而避免其对探测系统造成影响。

#### 3.4.2 抗云背景干扰

当前,成像导引头主要通过空间滤波、时域滤波的方法抑制云背景,减小其对目标检测的影响。此方法具有简单、高效的优点,但在环境亮度变化较大时效果较差,且未考虑背景亦在运动的实际情况。

高斯混合背景减除法虽然也是一种面向静态背景的动目标检测方法,但其能根据场景变化对背景模型进行自适应更新,因此可以考虑用于对抗云层、云团干扰。另外,背景运动补偿法、光流法等面向动态背景的目标检测方法也是一种较好的选择<sup>[11]</sup>。

文中拟通过将传统的混合高斯背景建模改进为有学习能力的“智能化”检测方法,在消除动态背景条件下目标“鬼影”的同时,对不同成像阶段的目标进行自适应检测。

### 3.4.3 MTV 干扰弹低概率区规避

由参考文献 [2] 可知,当成像导弹进入末制导的末端时,若被攻击目标投放干扰,将会使导弹的制导精度下降,甚至脱靶。以尾追作战态势为例:其影响是,在飞机尾后形成了一个俯仰、偏航角度约为  $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$  的抗干扰低概率锥体区域。

类似于无人机的航迹规划,文中考虑通过在线规划导弹弹道对低概率区进行规避的方法应对上述问题<sup>[12]</sup>。

### 3.4.4 红外双色成像抗干扰

由表 2 可知,传统 MTV 干扰弹及空气动力/推进式干扰源仍与其被保护目标之间存在较大的光谱分布差异,因此考虑通过双色技术对目标进行抗干扰识别。

双色红外成像导引系统可以获取目标、干扰在两个波段的红外辐射信息。因此:(1)可以利用双色比的不同对二者进行区分;(2)在成像阶段可以采用同时融合双色比、能量与形状等特征的方法进行目标识别。

国内对红外双色抗干扰技术的研究多集中在点源导引系统,其采用的方法与上述 (1) 的内容基本相同。文中将利用采集到的中、远红外图像数据,在提取出目标与干扰双色比的基础上,对二者进行像素与特征级的融合,所融合特征包括双色比特征与形状特征等。

### 3.4.5 协同制导抗干扰

光谱自适应干扰与分布式干扰源起燃后会在空间形成面积较大的红外辐射云,可能会部分或完全遮挡导弹的攻击目标,造成制导信息缺失,从而导致制导精度下降、甚至脱靶。

面对这种情况,考虑设计用两枚红外成像空空导弹对目标进行协同攻击的制导律,其特点如下:

(1) 两枚导弹基本同时到达,保证对目标的双重打击;

(2) 两枚导弹的末端弹道成一定夹角,至少保证一枚导弹具备完整的制导信息;

(3) 可采用非“领-从弹结构”的双层协同制导架构<sup>[13]</sup>。

### 3.4.6 深度学习抗干扰

自 2006 年 Hinton 等人提出深度学习的概念以来,其在语音识别、图像分类、目标检测及自然语言处理等方面都取得了一定突破<sup>[14]</sup>,如常用于目标检测的 YOLO 系列单阶段检测算法及以 R-CNN 为代表的两阶段检测算法;常用于目标跟踪的 GOTURN、SiameseFC 及 MDNet 算法等。

然而,当前上述深度学习算法在图像方面的应用和测试仍主要集中在可见光波段的日常生活物体,且场景中出现相似干扰或遮挡的情况很少。因此,以现有深度学习在目标检测、跟踪方面的已有技术为基础,文中拟针对特定红外场景设计用于成像空空导弹抗干扰的深度学习网络,研究其在各类干扰源条件下的目标检测、识别能力。

综上所述,本节从智能化角度对拟采用的红外成像空空导弹抗干扰技术进行了简要介绍与分析。借鉴参考文献 [15] 对智能化导弹的特征描述,上述内容形成了红外成像空空导弹抗干扰的智能感知与导引技术、智能制导与控制技术以及智能协同等三个方面(如图 9 所示),且三者基本都是为了达到“智能突防”的战术目的。

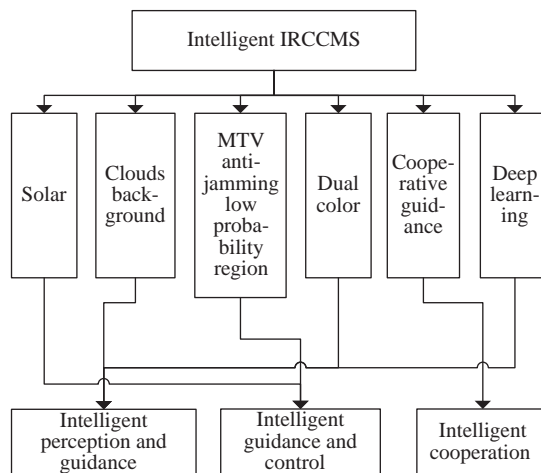


图 9 拟采用抗干扰方法的智能化特征图

Fig.9 Intelligent features of proposed anti-jamming methods



## 4 结 论

针对红外成像空空导弹对抗自然背景与人工干扰问题,文中在分析了当前已有技术的基础上,面向具体干扰源或抗干扰问题,从智能感知与导引、智能制导控制、智能协同等“智能化”角度提出了六种拟采用的抗干扰方法,且后续提出的抗干扰方法可以兼容对抗前述方法涉及的干扰源,如 3.4.5 节的抗光谱自适应干扰的方法可以用于应对 3.4.4 节中的 MTV 与空气动力式干扰源等。另外,文中讨论的“智能化”是广义的智能,并不特指深度学习技术,如有一些主流学派认为:目前仅利用关联能力的深度学习算法也只能算是更高层次的曲线拟合等。

需要注意的是,在实际作战环境及对抗条件下,各自然背景与人工干扰源并不是单独出现或存在的。因此,为了提升真实作战场景下红外成像空空导弹的抗干扰能力,可能需要对所述方法进行信息融合与综合运用等。这也是空空导弹抗干扰能力的实现需从顶层或总体角度思考、设计的原因之一。

### 参考文献:

- [1] Niu Deqing, Wu Youli, Xu Yang, et al. Quantification modeling for environmental complexity under point source infrared decoy interference [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(2): 0204003. (in Chinese)
- [2] Viau C R. Expendable Countermeasure Effectiveness against Imaging Infrared Guided Threats[R]. Canada: Tactical Technologies Inc., 2012.
- [3] Tong Qi, Li Jianxun, Tong Zhongxiang, et al. Combat operational method of airborne infrared decoy [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 419-427. (in Chinese)
- [4] Zhang Hongwei, Ding Yalin, Ma Yingjun, et al. Design of infrared dual-band/dual-FOV imaging early warning system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(6): 1283-1294. (in Chinese)
- [5] Li Xue, Chen Yong, Jia Mingyong. The target recognition technology for multi-element dual-band IR seeker [J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(6): 373-376. (in Chinese)
- [6] Huang Shike, Zhang Tianxu, Li Lijuan, et al. IR guiding technology based on multispectral imaging for air to air missile [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(1): 16-20, 93. (in Chinese)
- [7] Zhang Pengpeng. Evolution and intelligent development of air combat system [J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2019(3): 60-64. (in Chinese)

- [8] Goodfellow I, Bengio Y, Courville A. Deep Learning[M]. USA: The MIT Press, 2017: 1-28.
- [9] Zhou Weiwen, Kang Meiling, Zhou Zeqiang. Research of infrared flares influence mechanism on the imaging guidance missile [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(12): 1204004. (in Chinese)
- [10] Song Xinbo, Lv Xueyan, Zhang Jianjun. Study on the infrared stealth technology of plane [J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42(1): 3-7. (in Chinese)
- [11] Yin Hongpeng, Chen Bo, Chai Yi, et al. Vision-based object detection and tracking: A review [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2016, 42(10): 1466-1489. (in Chinese)
- [12] Zarchan P. Tactical and Strategic Missile Guidance[M]. 6th edition. Astronautics and Aeronautics, Inc, 2012: 569-601.
- [13] Zhao Jianbo, Yang Shuxing. Review of multi-missile cooperative guidance [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2017, 38(1): 22-34. (in Chinese)
- [14] Zhuang Xuyang, Chen Baoguo, Zhang Jingshan. Application prospect of deep learning in infrared target tracking [J]. *Aero Weaponry*, 2019, 26(1): 47-52. (in Chinese)
- [15] Hao Yanan, Zhu Bin, Zhu Huaqiao, et al. Research on the intelligence development of US army missiles [J]. *Tactical Missile Technology*, 2020(1): 15-21. (in Chinese)



**第一作者简介:** 卢晓(1990-),男,博士,主要研究方向为红外成像制导抗干扰。以红外成像型空空导弹为平台,在研究了自然环境干扰与传统点源、多点源等人工干扰源干扰机理的条件下,尝试从制导、控制与图像处理等方面解决当前红外成像空空导弹在抗干扰过程中可能面临的问题。



**导师简介:** 梁晓庚(1960-),男,研究员,博士生导师,主要从事空空导弹的制导、控制与总体设计等方面的研究。先后参与了多种型号空空导弹总体设计技术、制导控制系统的研究以及多种相关设备的

研制工作;创造性地提出了与红外成像空空导弹控制系统相适应的多模制导规律,并负责了第二代红外空空导弹制导控制系统、某型号导弹二通道脉冲调宽控制系统等的研制工作。