

〈综述与评论〉

## 空空导弹红外成像探测技术发展分析

李丽娟<sup>1,2</sup>, 刘珂<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:** 隐身飞机与新型红外干扰技术的发展, 对空空导弹的红外探测与抗干扰能力都提出了更高的要求。红外成像探测系统是实现红外空空导弹远距离探测目标的关键, 其所提供的目标、背景和干扰信息是红外空空导弹实现目标识别和抗人工与背景干扰的基础, 因此, 红外探测技术的发展是影响红外空空导弹未来发展方向的关键之一。本文首先介绍了空空导弹红外成像探测技术的现状与特点, 最后分析了空空导弹红外成像探测系统的关键技术和发展方向。

**关键词:** 空空导弹; 红外成像探测; 双色红外; 高灵敏探测

**中图分类号:** TP391

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-8891(2017)01-0001-07

## Analysis of Air-to-air Missile IR Image Detecting Technology Development

LI Lijuan<sup>1,2</sup>, LIU Ke<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:** The development of stealth airplanes and new IR countermeasures will be great challenges to air-to-air missiles and better detection and counter-countermeasure abilities. IR imaging detection system is the key to acquire a target in long range, and the information of the target, background and countermeasures from the detection system is the base for missiles to recognize target and counter countermeasures. So advanced IR image detecting technology is one of the key technologies for IR air-to-air missiles to develop. The current status and features of air-to-air missile IR image detecting technologies are introduced first, then the key technologies and its development trends are analyzed.

**Key words:** air-to-air missiles, IR imaging detection, dual color infrared, high sensitive detection

### 0 引言

现代战争离不开制空权的支持, 而性能先进的空空导弹是夺取制空权的重要保证, 在现代空战中发挥着越来越显著的作用。二次世界大战后, 空空导弹得到迅速发展, 逐渐形成了红外和雷达两种体制互补, 远、中、近距搭配的空空导弹家族<sup>[1]</sup>。其中红外型空空导弹已发展了四代, 作为其换代典型标志的红外导引头从最初的短波单元调制盘探测体制发展到最新的中波红外成像探测体制, 从而使得空空导弹对目标的探测能力从最初的仅能尾后攻击发展到可全向攻击, 从最初的最大探测距离 5 km 左右发展到 20 km 以上, 抗人工干扰与背景干扰的能力也得到了显著提升。

未来战场上的主力战斗机如美国的 F-22、F-35 均

有比较完善的隐身能力和综合干扰能力, 新型机载多源、面源和伴飞诱饵干扰以及激光定向干扰都在持续发展中。这使得未来红外型空空导弹所处的作战环境更加复杂、更加恶劣, 对红外空空导弹的探测能力和抗干扰能力提出了严峻的挑战。红外导引头探测系统是实现红外空空导弹远距离探测目标的关键, 其所提供的目标、背景和干扰的信息是红外空空导弹实现目标识别和抗人工与背景干扰的基础。因此, 红外探测技术的发展是影响红外空空导弹未来发展方向的关键之一。

本文试对空空导弹红外成像探测技术的现状和后续发展做初步的探讨。

### 1 空空导弹红外成像探测技术现状与特点

收稿日期: 2016-09-23; 修订日期: 2016-10-06.

作者简介: 李丽娟 (1968-), 女, 研究员, 主要从事红外成像制导、红外探测技术的研究工作。

1.1 空空导弹红外成像探测系统简介

目前世界各国已装备的第四代红外空空导弹都采用了红外成像探测技术,大幅度提高了导弹对目标的探测能力,可以全向探测、攻击目标,具备较强的抗传统红外诱饵干扰能力。典型的有美国的 AIM-9X、英国的 ASRAAM、德国的 IRIS-T、法国的 MICA-IR、以色列的 Python V 和南非的 A-Darter 等。国外典型第四代红外成像空空导弹如图 1<sup>[2-3]</sup>所示。

上述空空导弹中 IRIS-T、MICA-IR 和 A-Darter 采用了线列扫描成像技术,而 AIM-9X、ASRAAM 和 Python V 则采用了凝视成像技术。线列扫描成像与凝视成像是实现红外成像探测的 2 种方式,二者的主要区别是使用的红外探测器分别是线列和面阵焦平面探测器,前者需要在光学系统中增加扫描镜。从探测性能上比较,同样参数下的红外凝视成像探测系统具有更高的灵敏度,但由于面阵探测器的非均匀性比较

严重,其高灵敏度的优势必须在良好的非均匀性校正基础上才能发挥出来。

从探测波段上看,AIM-9X、ASRAAM 和 IRIS-T 均采用了中波红外探测,而 MICA-IR、Python 5 和 A-Darter 采用了双色红外成像探测,其主探测波段也是中波。红外探测器、光学头罩等技术的发展对空空导弹探测波段和体制的选择具有较大的影响。当前中波红外面阵探测器和可用于中波的头罩制备技术相对比较成熟,因此选择中波红外凝视成像探测是空空导弹的主流。为了进一步提高红外空空导弹抗典型红外诱饵干扰的能力,利用目标与诱饵光谱差异的双色红外成像探测技术在空空导弹上得到应用。由于空空导弹体积小、重量轻,需要集成的双色探测器实现双色红外成像探测,因而大多双色成像空空导弹采用了相对易于研制的双色线列扫描探测器。图 2<sup>[2]</sup>列出一些空空导弹的红外图像。

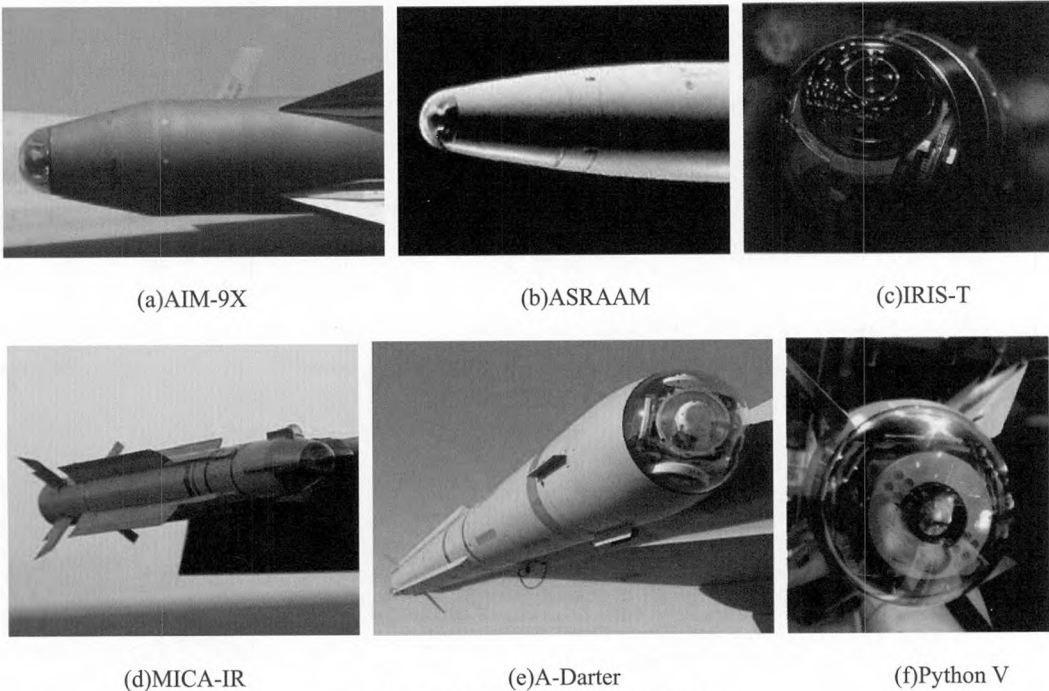


图 1 国外典型第四代红外成像空空导弹  
Fig.1 Typical foreign fourth generation IR imaging air-to-air missiles

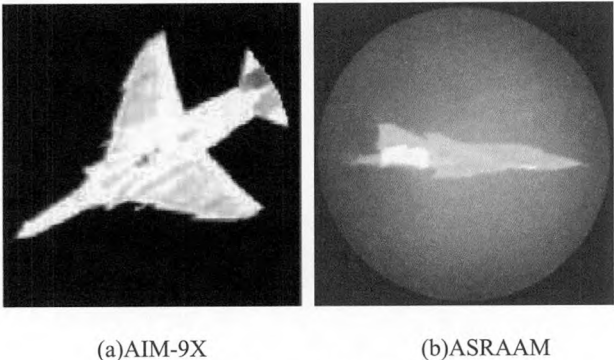


图 2 国外第四代空空导弹红外导引头图像  
Fig.2 Images of foreign fourth generation IR imaging air-to-air missiles

1.2 空空导弹红外探测系统的特点

红外成像探测技术已广泛应用于光电侦察、搜索跟踪与制导武器等军用领域和红外测温、安保监视等民用领域，与其他领域的应用相比，空空导弹红外成像探测系统具有以下显著的特点：

1) 体积小、重量轻

第四代红外型空空导弹的弹径多为 127 mm 或 160 mm 左右，体积和重量相比其他导弹较小，且大都具有接近±90°的跟踪场。受到空空导弹小弹径、大跟踪场的限制，红外成像探测组件要求体积小、重量轻，因此其光学系统的孔径不能做得太大，一些先进的杂散光抑制、无热化设计、非均匀性校正等技术的应用也受到诸多限制。这些对空空导弹提升探测性能是不利的因素。

2) 大动态范围响应

红外探测系统需要正确地响应目标的红外辐射并通过后续处理提取目标的有效信息以与背景和干扰进行区分。对于空空导弹而言，典型飞机目标的红外辐射随弹目距离、迎头尾后攻击方位及巡航加力飞行状态的不同而发生剧烈的变化，在一个弹道过程中目标本身的红外辐射变化通常不少于 120 dB。此外，在空空导弹发射后因气动加热引起的激波和整流罩温升使得背景辐射大幅度增加，而目标的辐射是叠加在此背景辐射之上的，因而进一步提高了对系统响应动态范围的要求。在当前技术水平下，红外成像探测系统的高灵敏度与大动态范围存在一定的制约关系，因此红外成像探测系统的动态范围设计与管理是影响系统性能的重要因素。

3) 响应的快速性

在空空导弹攻击目标的过程中，目标与导弹均处于高速飞行状态，且飞机目标还具有高机动的特性，因此相对空空导弹红外探测系统，目标的状态变化很快，因而要求红外探测系统具有快速响应能力。这意味着探测系统的帧频较高，对目标和场景变化的响应要快，同时积分时间不能太长，否则会出现目标成像模糊。较低的积分时间对系统的探测性能也会造成不利的影响。

4) 场景的背景辐射变化大

空空导弹红外探测系统看到的背景可能是低温的晴空背景，也可能是常温的地面背景，及气动加热引起的高温背景。空空导弹挂载在飞机上，飞机从地面到起飞至不同高度的作战空域，空空导弹工作的环境会有很大的变化，环境温度可能从四五十摄氏度变到零下几十摄氏度。环境温度的变化可能通过光学或结构件的反射和辐射被红外探测器响应。这些都使得

空空导弹红外探测系统响应的背景辐射变化很大。较大的背景辐射变化一方面使红外探测系统的非均匀性发生比较严重的漂移，使得在某种场景下校正好的系统在剧烈变化的其他场景下呈现出严重的非均匀性，继而影响空空导弹对目标的截获和跟踪性能。另一方面，要求红外探测系统调整其最佳的响应区间，以便正确地响应叠加在背景之上的目标辐射。

2 空空导弹红外成像探测系统关键技术与发展方向

随着隐身飞机、新型红外干扰技术的日益发展，以及空空导弹向远程化发展的趋势，对空空导弹的红外探测能力、抗干扰能力以及复杂气动热环境的适应能力都提出了更高的要求，为适应这些军事需求，红外成像探测系统一方面需要在各种作战环境下具有更高的目标探测灵敏度，另一方面，需要提供更多维度的其他信息以提高目标与干扰的区分度。下面对空空导弹红外成像探测系统涉及的关键技术及发展方向进行初步的分析。

2.1 高灵敏探测技术

系统工作波段、探测器、光学系统、处理电路及非均匀性校正等各部分的性能都会影响红外成像探测系统的灵敏度，其中有些技术已相对成熟，从未来发展看，需关注的技术有：

1) 系统工作波段向长波扩展

由于目标迎头方向的红外辐射主要是蒙皮辐射，峰值波长在长波段，因此目前中波红外探测系统对目标的迎头探测距离最近，成为制约空空导弹探测性能的瓶颈。采用长波红外系统可以有效提高目标的迎头作用距离，此外传统红外诱饵弹在长波的红外辐射较低，对目标的遮挡与照亮作用不明显，可能有利于通过形状特征识别目标。目前制约该系统在空空导弹上应用的主要技术瓶颈集中在整流罩材料上，最有望解决这一技术瓶颈的是金刚石整流罩材料技术。

2) 灵巧红外探测器

在提高红外探测器本身性能的基础上，将以往在探测器外进行的 AD 转换和非均匀性校正、边缘提取、运动检测等算法集成到探测器读出电路中<sup>[4]</sup>，可提高系统信噪比，减小探测系统的体积、质量，降低功耗和成本，增强系统的可靠性。美国雷神视觉系统公司已开发出了这种在焦平面阵列中实现基于像素处理功能的灵巧红外探测器，图 3<sup>[5]</sup>所示为其研发的一种自适应红外探测器，有多种可选择的工作模式。国内 211 所等单位也研制出集成了 AD 转换功

能的红外探测器。



图3 灵巧红外焦平面探测器可实现的图像处理功能

Fig.3 Image processing functions of smart IR FPA

3) 微透镜阵列与探测器耦合

当点源目标落入面阵探测器相邻像元之间的空档时，红外探测系统对目标辐射的响应大幅降低，从而严重影响了空空导弹对目标的远距离探测能力。采用微透镜阵列作为聚能元件与探测器耦合，将落在光敏元空隙间的光能尽可能汇聚到光敏元上，可以有效提高光能利用率（见图4）。根据国内的相关报道，集成后的探测器的响应率可提高约40%，收效可观<sup>[5]</sup>。

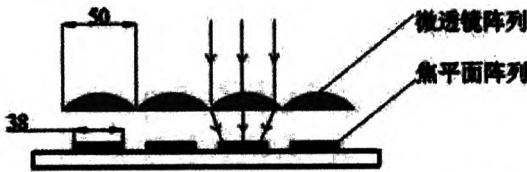


图4 一种微透镜阵列探测器集成结构示意图  
Fig.4 Diagram of the integration of micro-lens arrays and infrared focal plane

4) 实时非均匀性校正

为了实现在空空导弹全弹道过程中均保持良好的成像质量，必须在背景辐射快速大幅度变化时及时进行非均匀性校正。目前研究较多的为定标校正与基于场景的自适应校正相结合的联合非均匀校正算法<sup>[6-8]</sup>，在基于场景的非均匀性校正算法中需要重点解

决鬼影抑制问题，可能采取的措施主要有：对图像进行预处理，将容易产生鬼影的场景和 FPN 分开<sup>[9-11]</sup>；进行运动检测，只在场景运动的时候更新系数，而场景不动时则不更新校正系数<sup>[12-14]</sup>；采用先验知识和统计方法，将不符合要求的校正参数去掉<sup>[15]</sup>。

2.2 大动态范围管理技术

为了适应空空导弹工作过程中目标与背景辐射的大范围变化，需要红外成像探测系统具有更大的动态范围，且能根据背景与目标辐射的高低自适应地调整其响应范围。

1) 探测器直流分量抑制

随着空空导弹弹速的增加，气动加热引起的背景辐射量激增，占用了红外成像探测系统的很大一部分动态范围，严重时甚至使目标饱和，这成为限制红外成像探测系统在高速导弹上应用的重要因素之一。如果在探测器中增加直流分量抑制功能，就能使探测器根据后端系统的反馈摒弃一部分直流分量，仅响应设定值以上的红外辐射，保证目标辐射的正常响应，避免系统饱和。

2) 探测系统增益自适应调整

当弹目距离由远及近时目标自身的辐射由弱至强发生很大的变化，探测系统的增益需要随之调整以使目标信号达到最佳幅值范围。红外成像探测系统可通过变换探测器的积分电容及改变积分时间进行系统增益的控制。需要注意的是系统增益的调整会影响成像的非均匀性并造成目标特征的变化，因此在系统增益调整时要做好非均匀性的校正及目标特征在不同增益下的变换。

在弹目距离较近时，通过调整探测系统的增益还可实现对目标不同部位的清晰成像。图5表示了目标不同部位与背景和干扰的温度分布特点，即通常情况下，天空背景温度最低，飞机机身比天空背景高，最高的是飞机的尾喷、尾焰等高温区及干扰弹。当系统增益较高时，可得到目标蒙皮的清晰图像，但发动机

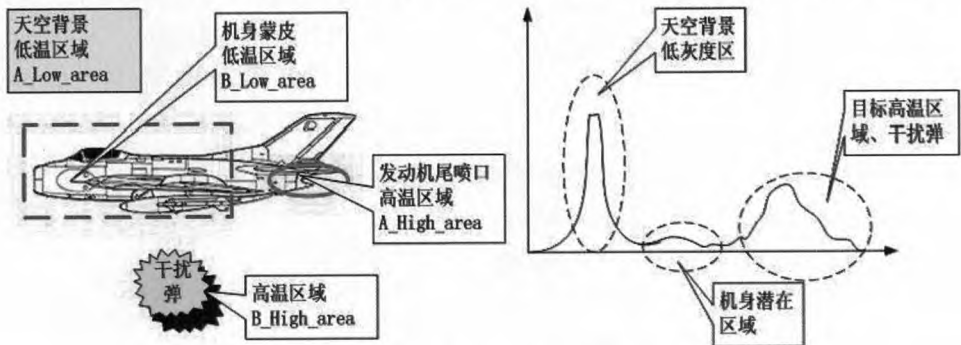


图5 飞机、背景与干扰的温度分布  
Fig.5 Temperature difference of airplane, sky and flares

尾喷和尾焰部位可能会饱和失真；当系统增益降低时，可得到发动机尾喷和尾焰部位的清晰图像，但蒙皮可能不完整。红外成像探测系统可配合图像信息处理的要求进行增益的调整，为目标瞄准点的精确识别及目标与干扰的区分提供最佳的图像信息。

2.3 高空间分辨技术

提高红外成像探测系统的空间分辨率有助于增强目标形状特征的提取能力，并更容易从空间上将目标与密集分布的干扰区分开，从而提高空空导弹目标识别和抗干扰能力。另一方面，希望能兼顾高空间分辨与大视场探测的需求。未来实现高空间分辨的技术途径主要有：

1) 变焦距光学系统  
变焦距光学系统可以实现大视场下低分辨率和小视场下高分辨率，满足系统在不同情况下对空间分辨率的不同需求。

2) 新型探测器  
国外提出了采用视网膜中央凹视觉机制的非均匀采样智能焦平面阵列同时实现大视场、高空间分辨率和高帧频的设想。如美国战略防御局资助的中央凹引导头多目标跟踪研究及美国空军航空系统部资助的中央凹自动目标识别技术研究，已取得了一定的进展<sup>[2]</sup>。美国NOVA传感器公司研制的1024×1024 VASI焦平面阵列探测器如图6所示，其可在不同的区域分别定义高空间分辨率和低空间分辨率的区域。图7示出了采用上述探测器的成像系统对飞行中的直升机分别以常规的均匀采样方式成像(a)和在小的中央凹区域(64×64)以高分辨率成像，其他区域为低分辨率成像的结果(b)<sup>[16]</sup>。

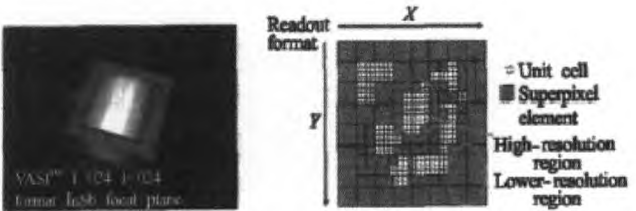


图6 美国NOVA传感器公司研制的1024×1024 VASI焦平面阵列

Fig.6 1024×1024 VASI FPA manufactured by NOVA

3) 超分辨率技术

实现超分辨的途径之一是采用微扫描振镜技术，即在凝视红外成像传感器的物镜和焦平面阵列之间加入一个微扫描平面镜，使该镜子按一定规律做微小摆动以获得若干亚像素级的图像序列，通过对这些图像进行超分辨率处理就可以重建出一幅高分辨率的图像。该技术在美、法等国的吊舱中已得到应用，

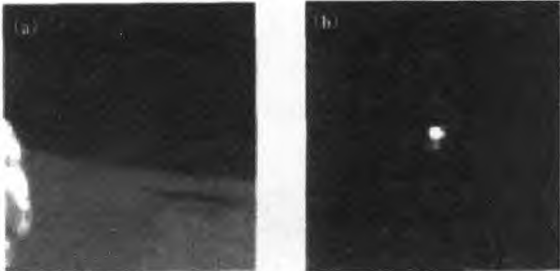


图7 采用1024×1024 VASI焦平面阵列对飞行中的直升机成像

有的采用平移式压电陶瓷微动器实现图像的微扫描。图8为微扫描图像采样点的示意图。国外还提出了“不受控微扫描”的概念，即各帧之间的亚像素位移不是预先设计的，而是通过景物与焦平面之间的随机运动产生的<sup>[17]</sup>。这种方法图像重建的关键是能精确估计出序列图像中相邻帧间的相互运动，常见的运动估计方法有块匹配法和基于梯度的迭代法等。

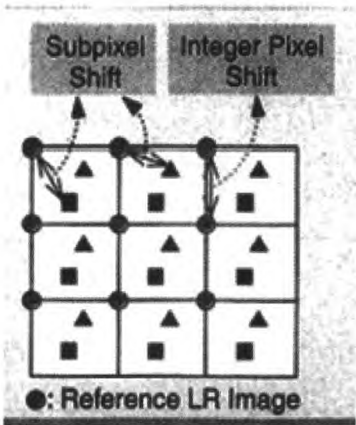


图8 微扫描图像采样点的示意图

Fig.8 Sketch of micro scan image sampling position

另一种途径是采用编码孔径成像技术，利用多孔径编码替代常规的光学元件，通过相关或解卷积对探测的二维强度图像进行解码，恢复场景的图像。目前国外还提出了自适应编码孔径成像技术<sup>[18]</sup>，在提高分辨率的同时还有利于实现轻、薄、小的成像系统，及具有柔性故障模式、图像畸变小等特点<sup>[16]</sup>。图9为自适应孔径编码成像的示意图。

2.4 双色与多波段成像技术

利用目标与干扰之间光谱分布的差异有利于进一步提高空空导弹抗人工与背景干扰的能力，因此双色与多波段成像探测是空空导弹发展的方向之一。实现双色与多波段成像主要有以下两种途径：

1) 利用多谱段焦平面阵列探测器  
美、法、德和以色列等国均已研制出较大规模、不同波段组合的双色叠层探测器，可同时输出不同波

段的图像<sup>[19]</sup>,我国上海技术物理研究所等单位也在开展相关的研究<sup>[20]</sup>,随着该项技术的成熟,未来可较容易地利用双色叠层探测器实现双色与多波段成像。

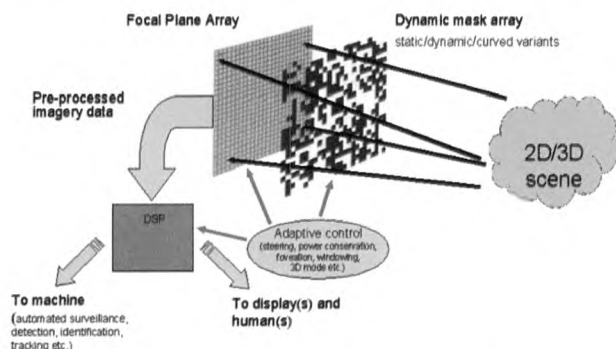


图9 自适应孔径编码成像示意图

Fig. 9 Sketch of adaptive coded aperture imaging

## 2) 利用宽波段探测器+波段选择器

通过宽波段探测器和波段选择器可实现不同波段的快速成像,满足空空导弹高帧频、高光谱分辨力的要求。电可调谐光谱滤波器可实现快速的波段切换,且系统构成简单,可靠性高;缺点是所能形成的光谱带宽太窄,对目标的识别距离近。另一种方式是采用机电结构的波段选择器,通过电机驱动将多个不同谱段的滤光片序列插入光路中,对入射光进行调制,分时输出不同谱段的图像。其优点是一方面降低了对探测器的要求,另一方面系统能根据目标、背景、干扰选择合适的谱段信息,波段带宽和波段数可灵活选择,具有较强的自适应性。

## 2.5 气动热抑制技术

气动热抑制措施需要从导弹系统的角度综合考虑和权衡。对红外成像探测系统而言,可通过光谱滤波抑制激波的红外辐射、选用在高温状态下具有更低红外辐射系数的整流罩材料、采用保形整流罩、加装流线型保护罩和激波锥及主动制冷技术等。图10为保形整流罩和常规球形整流罩的对比,图11为采用激波锥的导弹。

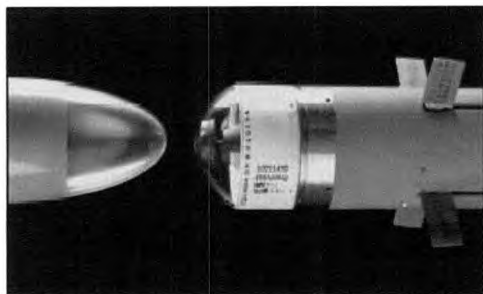


图10 保形整流罩和常规球形整流罩的对比

Fig.10 Comparison of conformal dome and traditional spherical dome



图11 采用激波锥的导弹

Fig.11 Missile with anti-drag spike

## 3 结束语

红外成像探测技术是第四代及未来红外空空导弹的关键技术之一,未来空空导弹红外成像探测系统将向着高灵敏探测、大动态范围管理、高空间分辨、双色与多波段成像等方向发展,以满足空空导弹反隐身、抗干扰能力不断提升的需求。

## 参考文献:

- [1] 谢彦宏,孔挺,王旭明.空空导弹发展趋势研究[J].舰船电子工程,2015,35(7):11-34.  
XIE Yanhong, KONG Ting, WANG Xuming. Development tendency for air-to-air missile[J]. Ship Electronic Engineering, 2015, 35(7): 11-34.
- [2] 刘珂,陈宝国,李丽娟.空空导弹红外导引头技术发展趋势及关键技术[J].激光与红外,2011(10):1117-1121.  
LIU Ke, CHEN Baoguo, LI Lijuan. Development tendency and key technology of IR seeker for air-to-air missile[J]. Laser & Infrared, 2011(10): 1117-1121.
- [3] Helmoed-Römer Heitman, A-Darter programme nears completion[J]. Janes's Defence Weekly, 2015, 52(8): 17.
- [4] John T Caulfield. Advanced IRFPAs for next-generation sensors[C]//Proc. of SPIE on Infrared Technology and Applications XXX, 2004, 5406: 178-183.
- [5] 孙艳军,陈哲,冷雁冰,等.基于矩形微透镜阵列的红外焦平面集成技术研究[J].红外技术,2014,36(3):225-228.  
SUN Yanjun, CHEN Zhe, LENG Yanbin, et al. Study on the integration of square aperture spherical micro-lens arrays and infrared focal plane[J]. Infrared Technology, 2014, 36(3): 225-228.
- [6] 施长城,张天序,刘慧娜,等.一种红外焦平面非均匀性组合校正算法[J].红外与毫米波学报,2010,29(1):23-26.  
SHI Changcheng, ZHANG Tianxu, LIU Huina, et al. Combinational algorithm for nonuniformity correction of infrared focal plane array[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2010, 29(1): 23-26.
- [7] 季尔优,顾国华,陈钱,等.双通道分频段恒定统计非均匀校正算法[J].激光与红外,2011,41(4):474-478.

- Ji Eryou, GU Guohua, CHEN Qian, et al. Dual channel constant statistic NUC algorithm of separate band[J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(4): 474-478.
- [8] 任婷婷, 张智杰. 一种基于场景的红外图像非均匀校正算法[J]. *光学与光电技术*, 2014, 12(2): 44-47  
REN Tingting, ZHANG Zhijie. A scene-based non-uniformity correction algorithm for infrared image[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2014, 12(2): 44-47.
- [9] 张爽, 周慧鑫, 牛肖雪, 等. 基于非局部均值滤波与时域高通滤波的非均匀校正算法[J]. *光子学报*, 2014, 43(1): 1-4.  
ZHANG Shuang, ZHOU Huixin, NIU Xiaoxue, et al. Temporal high-pass filter nonuniformity correction algorithm based on non-local means filter for infrared focal plane array[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(1): 1-4.
- [10] Alessandro Rossi, Marco Diani, Giovanni Corsini. Bilateral filter-based adaptive nonuniformity correction for infrared focal-plane array systems[J]. *Optical Engineering*, 2010, 49(5): 057003-1-12
- [11] 张天序, 袁雅婧, 桑红石, 等. 基于 PDE 去鬼影的自适应非均匀校正算法研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2012, 31(2): 177-182.  
ZHANG Tianxu, YUAN Yajing, SANG Hongshi, et al. PDE-based deghosting algorithm for correction of nonuniformity in infrared focal plane array[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2012, 31(2): 177-182.
- [12] 刘秀, 刘咏, 金伟其, 等. 基于边缘检测的神经网络非均匀校正及硬件实现[J]. *光电工程*, 2014, 41(2): 63-68.  
LIU Xiu, LIU Yong, JIN Weiqi, et al. Adaptive neural network non-uniformity correction based on edge detection and running on hardware[J]. *Opto-electronic Engineering*, 2014, 41(2): 63-68.
- [13] 曹晓荷, 朱斌, 郭立新, 等. 自适应时间常数的时域高通滤波校正算法[J]. *光电工程*, 40(7): 89-94.  
CAO Xiaohu, ZHU Bin, GUO Lixin, et al. Temporal high-pass filtering nonuniformity correction with adaptive time constant[J]. *Opto-electronic Engineering*, 40(7): 89-94.
- [14] 桑红石, 袁雅婧, 张天序, 等. 基于运动指导的红外焦平面非均匀校正方法[J]. *中国图象图形学报*, 2011, 16(9): 1577-1582  
SHANG Hongshi, YUAN Yajing, ZHANG Tianxu, et al. Non-uniformity correction of infrared focal plane array based on motion guidance[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2011, 16(9): 1577-1582.
- [15] 冷寒冰, 谢庆胜, 刘伟, 等. 基于贝叶斯估计的 IRFPA 自适应非均匀校正[J]. *光学学报*, 2014, 34(9): 1-6.  
LENG Hanbing, XIE Qingsheng, LIU Wei, et al. Adaptive nonuniformity correction for IRFPA based on Bayesian estimation[J]. *Acta Optico Sinica*, 2014, 34(9): 1-6.
- [16] 范晋祥, 张渊. 新概念军用红外成像系统的发展[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(3): 388.  
FAN Jinxiang, ZHANG Yuan. Development of new concept military infrared imaging system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(3): 388.
- [17] 张楠, 金伟其, 苏秉华, 等. 高分辨力红外热图像重建算法的进展与研究[J]. *兵工学报*, 2005, 26(2): 173-175.  
ZHANG Nan, JIN Weiqi, SU Binhua, et al. Development and study on high resolution IR image reconstruction[J]. *Acta Armamentarii*, 2005, 26(2): 173-175.
- [18] Keith Fife, Abbas El Gamal, H-S Philip Wong. A multi-apertures image sensor with 0.7  $\mu\text{m}$  pixels in 0.11  $\mu\text{m}$  CMOS technology[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2008, 43(13): 2990-3005.
- [19] Zecri M, Maillart P. Advanced ROIC design for cooled IR detectors[C]//*SPIE*, 2008, 6940: 1-12.
- [20] 徐向晏, 叶振华, 李志峰, 等. 中波双色光伏型 HgCdTe 红外探测器模拟研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2007, 26(3): 165-169.  
XU Xiangyan, YE Zhenhau, LI Zhifeng, et al. Numerical modeling of middle wavelength two-color photovoltaic HgCdTe detectors[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2007, 26(3): 165-169.