

〈制导与对抗〉

应对导弹威胁的机载光电复合侦察技术研究

李志伟, 王皖阳

(空军第一航空学院航空军械工程系, 河南 信阳 464000)

摘要: 为了应对空中高速来袭导弹的威胁, 研究了导弹壳体受热及废气羽烟的辐射特性, 分析了其红外、紫外光谱特征, 以及背景辐射对导弹侦察的影响。结合目前红外焦平面技术的发展状况, 提出了扩展红外工作波段, 采用红外/紫外双色, 以及综合应用多色提高机载光电侦察效果的技术方法。相关装备的应用证明, 多色复合侦察技术的应用对提高战机复杂战场环境下的生存能力具有十分重要的意义。

关键词: 导弹; 机载光电; 复合侦察; 红外/紫外

中图分类号: TN971

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2014)09-0753-04

Study on Airborne Composite Electro-optical Reconnaissance Technology Dealing with the Missile Threat

LI Zhi-wei, WANG Wan-yang

(Department of Aviation Ordnance Engineering, The First Aeronautical Institute of Air Force, Xinyang 464000, China)

Abstract: In order to cope with high-speed incoming air missile threats, the radiation characteristics of heat on missile crust and exhaust gas tail smoke are studied. The spectral features of its infrared, ultraviolet, as well as the influence of background radiation on the target reconnaissance are analyzed. Combined with the current development of infrared focal plane technology, the technique methods to improve effects of airborne electro-optical reconnaissance are proposed, including expanding infrared waveband, using IR / UV double color, as well as applying multi-color synthetically. The related equipment application shows the applications of multi-color composite electro-optical reconnaissance technology has great significance for improving battle-plan survivability in a complex battlefield environment.

Keywords: missiles, airborne electro-optical, composite reconnaissance, infrared/ultraviolet

0 引言

面向空中来袭的火箭、导弹等高威胁目标, 如何在其发射的初始瞬间及时侦察截获到目标的特征信息, 并采取有效的对抗措施, 是机载光电侦察的首要任务之一。多年来, 人们主要通过红外探测系统对空中高威胁目标进行侦察并实施告警, 然而随着红外隐身及干扰技术的发展, 光电对抗日益复杂^[1], 采用单一波段或某几种波段简单复合的方式, 不但侦测困难, 而且虚警率高, 很难适应复杂战场环境下对导弹等高威胁目标准确、快速侦察的要求。

本文以火箭助推的空中来袭导弹为侦察对象, 通过对其自身及背景光辐射特性的分析, 研究并提出多

波段、多色光的复合侦察方法, 提高对导弹等高威胁目标的侦察准确率。

1 导弹飞行过程的辐射规律

对于空中飞行的导弹, 虽然可以将其作为一个红外辐射源来研究, 然而由于其飞行过程的复杂性, 很难建立一个简单的数学模型。通常情况下, 可以将其发射后的飞行过程划分为2个阶段主要进行分析^[2]。

第1个阶段为导弹点火发射到发动机熄火的这一时段, 通常称为初始段或加力段。这一阶段, 导弹的辐射主要有4个来源: 一是火箭尾焰的可见光和红外辐射; 二是废气羽烟产生的红外辐射和紫外辐射; 三是火箭的气动加力使导弹蒙皮与空气摩擦产生的红

外热辐射；四是发动机尾喷管受热产生的红外辐射。

第2个阶段为火箭熄火后的飞行阶段。这一阶段，导弹利用惯性继续向前飞行，其主要辐射来源仅有上述最后二种。此时，发动机虽然已经熄火，但尾喷管的温度仍然很高，是一个主要的红外辐射源。

根据上述分析，导弹在飞行过程中除可见光之外，自身产生的光辐射可进一步归纳为如下3种主要来源：一是包括尾焰及尾喷管在内的壳体受热产生的红外辐射；二是废气羽烟产生的红外辐射；三是废气羽烟产生的紫外辐射。

2 尾焰及壳体受热产生的红外辐射

导弹点火以后燃烧室工作，火箭发动机罩及尾喷管温度迅速升高，同时环境空气温度也急剧升高，产生很强的红外辐射^[3]。由于导弹壳体都是金属材质，因此可以将其看作是具有高发射率的灰体，其辐射特性遵循黑体辐射的有关定律。

根据黑体辐射的维恩位移定律，物体辐射光谱的峰值波长与绝对温度成反比^[4]，即：

$$\lambda_m \cdot T = a$$

式中： λ_m 为光谱辐射度的峰值波长， μm ； T 为黑体的绝对温度， K ； a 为 $2897 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ 。

在导弹初始飞行阶段，火箭尾喷管的温度可升高到 1000 K 以上，此时产生辐射的峰值波长为：

$$\lambda_m = a/T = 2897/1000 = 2.897 \mu\text{m}$$

在导弹惯性飞行阶段，导弹壳体因气动加热产生的温度主要与导弹的飞行速度、飞行高度以及飞行时间有关。研究表明，壳体的温度与速度的平方成正比关系，速度越高，产生的辐射越强。在 12300 m 的高空，热平衡时壳体的表面温度 T 与速度的关系可表示为^[2]：

$$T = 216.7 \times (1 + 0.164Ma^{-1})$$

式中： Ma 为导弹速度的马赫数。

对于空空战术导弹，通常速度可达到 $4 \sim 10 \text{ Ma}$ ，按照上述公式推算，其表面温度可达 $785 \sim 3770 \text{ K}$ 。再根据维恩位移定律，其产生辐射的峰值波长为 $3.7 \sim 0.77 \mu\text{m}$ ，在近红外波段范围之内。

根据上述分析，针对空空导弹的红外探测器的设计应当尽量考虑采用 $1 \sim 3 \mu\text{m}$ 的大气窗口。

3 废气羽烟产生的红外辐射

在导弹发射的初始阶段，火箭羽烟也是一个重要

的辐射来源。由于羽烟化学组分及结构的特殊性，其辐射规律非常复杂，不仅包括红外辐射，而且包括紫外辐射。

3.1 羽烟的化学组分

为了使导弹的火箭发动机产生更高的推力，通常使其工作在富燃料状态，此时羽烟中含有大量的可燃烧物质，这些可燃烧物质一旦得到空气中氧气的补充，就会二次燃烧。低空时，二次燃烧的温度可达到 500 K 以上。

燃料的羽烟中含有多种微粒，根据燃料的不同，微粒的成分有所差异。以含有 13% 铝的聚亚胺酯固体燃料为例，其燃烧后各种产物的重量比如表1所示^[5]。

燃料燃烧过程中燃烧室温度很高，此时喷嘴及室内壁材料将会受到熔蚀，因此废气中还可能包含有其他成分的粒子。研究表明，羽烟辐射的光谱分布与羽烟中分子种类有关，根据各组分的辐射分布可以进一步研究羽烟辐射的光谱特征。

3.2 羽烟结构

了解羽烟结构是分析羽烟红外辐射的另一个重要途径。研究表明，羽烟结构与环境压力和火箭的速度有关。通常在火箭发动机尾喷口呈现一个不受干扰的锤形羽烟区，该区域内羽烟的微粒呈均匀等温分布，且温度最高^[5]。

3.3 羽烟的红外辐射

通常情况下，尾焰及排出后不久的废气团可粗略地看作是一种灰体，废气羽烟中大量的高温固体微粒这些微粒不但具有很强的红外辐射，而且还具有对来自燃烧室辐射的反射能力。因此羽烟的辐射光谱主要由高温粒子辐射和散射的连续光谱相互叠加而成。同时，由于羽烟中各种粒子的直径与红外波长具有同一个数量级，因此从严格意义上讲，粒子的辐射不仅仅是单纯的灰体辐射，还包括粒子的散射，其光谱辐射如图1所示。该图表示了某型含铝固体推进剂火箭的近场光谱分布情况。

从图1可以明显看出，羽烟中粒子辐射和散射的连续光谱（虚线）对整个辐射起了很大作用。

通常情况下，导弹羽烟的温度可达 $2000 \sim 3000 \text{ K}$ ，根据维恩位移定律可计算出其波长范围在 $1.45 \sim 0.97 \mu\text{m}$ 之间，这个范围的波长也在 $1 \sim 3 \mu\text{m}$ 的大气窗口之内。

表1 聚亚胺酯固体燃料燃烧后的产物重量比

Table 1 Product weight ratio of polyurethane solid fuel combustion

成分	H ₂	CO ₂	H ₂ O	N ₂	HCl	Al ₂ O ₃	CO
重量百分比/%	3.4	3.8	4.8	8.1	20.2	24.6	35.1

4 废气羽烟产生的紫外辐射

4.1 羽烟的紫外辐射规律

由于羽烟化学组分的特殊性,因此在其产生红外辐射的同时也产生一定的紫外辐射。羽烟的紫外辐射主要是热辐射与化学荧光。紫外的热辐射主要是由羽烟在二次燃烧时产生的大量高温 Al_2O_3 粒子引起的,而化学荧光则是化学动力学过程导致的非平衡自由辐射。

在羽烟尾流中包含有大量的未燃尽燃料,在进行化学反应时生成高浓度的碳、氢、氮等化合物,从而产生紫外辐射。研究表明,导弹羽烟紫外辐射的光谱强度与推进剂化学组分的分子种类及二次燃烧有关。例如,液氢/液氧推进剂产生羽烟的紫外光谱辐射强度比煤油/液氧推进剂的紫外光谱辐射强度高 8~13 个数量级,且在 $0.28 \mu m$ 波长处的辐射亮度前后相差 12 个数量级^[6]。

表 2 给出了某型导弹羽烟主要组分与紫外发射带的对应关系^[7]。

从表 2 可以看出,导弹羽烟发出紫外辐射的波长大约在 $0.200 \sim 0.437 \mu m$ 之间,利用火箭发动机羽烟的这种紫外辐射特性可以实现对导弹的紫外侦察告警。

由于火箭发动机固体燃料和液体燃料在化学组分上的差别,目前国外装备的紫外侦察告警设备,通常以对固体燃料驱动的导弹侦察效果最佳。

4.2 羽烟紫外侦察的特点

1) 全方位探测

火箭燃烧室辐射出来的紫外光子经过废气团内

固体微粒的反射或散射,在空中 4π 球面度内呈立体角分布,具有后向散射特性,因此紫外侦察设备中的紫外光子传感器可以从各个方向对来袭导弹进行紫外探测。

2) 背景噪声低

自然界中,太阳是最强的紫外辐射源,但太阳的紫外辐射在穿过地球大气层时,绝大部分已被臭氧层吸收,中紫外波段的辐射非常微弱,并且辐射比较平滑。导弹羽烟的紫外辐射波段大部分在“太阳光谱盲区”(波长在 $0.22 \sim 0.280 \mu m$ 的中紫外波段)之内,太阳辐射对紫外探测器产生的背景噪声非常低,从而可以避开最强大的自然光源——太阳所造成的背景干扰,大大减小信号处理的复杂度。

3) 虚警率极低。

4) 与其它侦察告警系统具有很好的兼容性。

5) 使用温度要求低,无需制冷设备,也无需预热。

6) 该侦察方式只能用于导弹飞行的初始阶段,发动机熄火后即无法对目标截获,且无法测距。因此在机载侦察装备应用中,通常与红外等侦察方式配合使用。

4.3 装备应用

紫外侦察是 20 世纪 80 年代以来光电侦察的新方法、新途径。目前,国外已有多种紫外侦察告警设备得到了应用,如美国的 AN/AAR-47,能在导弹到达 2~4 s 内发出警报,并能自动释放假目标实施干扰;而 AN/AAR-54(V)还具有将导弹与假目标区分的能力,且截获目标的时间缩短到 1 s 左右,指向精度高达 1° 左右^[5],大大提高了战机的空中生存能力。

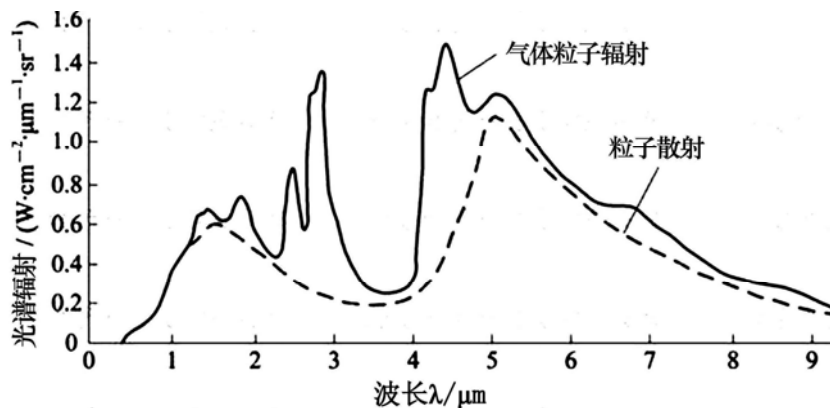


图 1 火箭近场光谱分布图

Fig.1 Graph of rocket near-field spectral distribution

表 2 羽烟主要组分与紫外发射带的关系

Table 2 Relationship of tail smoke main components with UV emission band

成分	CO	H ₂ O	O ₂	NO	CO ₂
紫外波段/ μm	0.200~0.246	0.244~0.308	0.244~0.437	0.250~0.370	0.287~0.316

5 目标侦察的背景影响因素

在对导弹的光电侦察中,导弹产生的光辐射要经过大气传输才能到达探测器。由于大气对辐射具有吸收和散射作用,因此辐射在大气传输过程中便会导致的能量衰减,对导弹探测产生一定的影响。研究表明,辐射能量的衰减与大气的组成有关,而空中的云、雨、雪、雾、霾等气象条件产生的影响最大,除此之外,空气湿度、战场沙尘等也是影响光电侦察的主要因素。

5.1 云层背景的影响

云层辐射对光电侦察系统的影响主要有2个方面:一是云层或云层边缘对太阳的反射、散射以及云层自身的辐射,这些辐射光谱范围很宽,不论采用哪一个波段,都会受到很大干扰,有时还可能严重影响系统的性能指标;二是云层的屏障作用,可以部分或全部遮断来自目标与侦察系统之间的辐射,使侦察系统侦察不到目标或丢失已跟踪的目标。

5.2 雨雪天气的影响

通常情况下,雨滴的半径在200~2000 μm之间,相对于红外波,雨滴可以被看作是大粒子。研究表明,雨滴对红外的衰减与波长无关,只与降雨量有关。

雪对光的衰减与雨相似,其衰减系数与降雪强度有关,不同波长的光在雪中的衰减差别不大。然而对于同样的含水量来说,雪的衰减比雨大,比雾小^[8]。

5.3 雾霾天气的影响

近年来,随着空气质量的恶化,雾霾天气越来越多。雾霾,是雾与霾的混合物。雾是由大量悬浮在近地面空气中的微小水滴或冰晶组成的气溶胶系统,霾主要是由微小的悬浮状固体颗粒物组成,其直径通常在2.5 μm左右(即PM2.5)。有时雾和霾同时出现,它们共同作用将导致能见度急剧降低,且对1~3 μm的短波红外侦察影响最大,其主要原因是PM2.5对光的散射,而对8~12 μm的长波红外侦察则影响较小。

5.4 战场沙尘、烟幕以及沙尘暴的影响

战场带来了其它地方没有的杂质颗粒,这些战场“垃圾”包括泥土、被炸到空中的植物、燃烧的灰、掩饰用的烟雾,以及枪口喷出的硝烟等,称为人工沙尘暴,其中许多高温成分产生的路径辐射对光的传播影响最大。海湾战争中,由于沙尘暴的影响,美军M1A1主战坦克红外热像仪的侦察识别距离由原来的2500 m降低到了800 m,而当时伊军坦克装备的白光瞄准装置则几乎成了睁眼瞎。

6 结论

目前,国外现役主战飞机上用于导弹侦察的光电

设备通常以红外系统为主。从侦察波段来看,大都集中在3~5 μm的中波红外和8~12 μm的长波红外,而对于1~3 μm的短波红外还存在一定的侦察盲区,这个波段虽然受雾霾天气的影响较大,但对其它气象条件的适应性相对较强,而且这个波段又是对导弹侦察的关键波段。因此要想提高机载光电侦察系统的综合性能,有效应对导弹等高速目标的威胁,可通过以下几种途径来实现:

1) 增加1~3 μm的工作波段,采用多波段工作模式,提高对导弹等高威胁目标的侦察感知能力。

2) 根据火箭羽烟的紫外辐射特性,增加紫外侦察告警功能,提高对导弹侦察告警的准确性。

3) 采用红外、紫外、可见光等多色复合模式,根据导弹辐射的多光谱特征,同时截获多个波段的光波辐射,通过信息融合,及时发现和识别目标,有效弥补单一波段或有限波段侦察能力的不足。

4) 综合利用导弹辐射的瞬时光谱特征和时间光谱特征,提高对导弹的综合识别能力。

5) 利用红外成像和电视成像及时,通过运动轨迹的建立,提高对导弹的跟踪能力。

近年来,随着光电子技术的迅速发展,以双色(短波红外+中波红外、短波红外+长波红外、中波红外+长波红外等)或多色(包括紫外和可见光)复合为标志的第三代红外焦平面阵列技术已进入成熟阶段^[9],并且在非制冷技术方面也取得了重大突破,为机载光电复合侦察告警设备的更新换代提供了技术基础,成为该领域发展的一个重要方向。

参考文献:

- [1] 李江勇,王诚. 机载红外探测系统的发展新思路[J]. 激光与红外, 2013, 43(7): 794-798.
- [2] 付小宁,王炳健,王荻. 光电定位与光电对抗[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [3] 冯云松,金伟,路远,等. 红外探测系统对某型隐身飞机的作用距离分析[J]. 火力与指挥控制, 2014, 39(1): 153-156.
- [4] 王小鹏,梁燕熙,纪明. 军用光电技术与系统概论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [5] 李云霞,蒙文,马丽华,等. 光电对抗原理与应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2009.
- [6] 国爱燕,白廷柱,韩强,等. 液体火箭发动机羽烟紫外辐射特性分析[J]. 兵工学报, 2013, 34(4): 418-424.
- [7] 贺东雷,刘品雄,王增斌,等. 紫外侦察告警技术[J]. 航天电子对抗, 2011, 27(1): 33-36.
- [8] 陈前荣,杨淼淼,王敏,等. 红外侦察告警系统在不同气象条件下作用距离等效推算[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(12): 3160-3165.
- [9] 史衍丽. 第三代红外探测器的发展与选择[J]. 红外技术, 2013, 35(1): 1-8.