

〈综述与评论〉

紫外告警技术现状及发展分析

郑海晶, 白廷柱

(北京理工大学光电学院 光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

摘要: 讨论了紫外告警技术原理, 研究了导弹紫外辐射特性和导弹紫外辐射相关的发动机尾焰高温物质以及尾焰中可燃性物质二次燃烧, 介绍了国内外紫外告警装备的发展及现状, 论述了从第一代概略型紫外告警装备到第二代成像型紫外告警装备的发展过程。最后, 分析总结了紫外告警技术的发展动向。

关键词: 紫外告警; 日盲紫外; 发动机尾焰

中图分类号: TN23

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2017)09-0773-07

Development Analysis and State of Ultraviolet Warning Technology

ZHENG Haijing, BAI Tingzhu

(Key Laboratory of Photoelectronic Technology and System, Ministry of Education of China,

Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The principle of ultraviolet warning technology is discussed in this paper. The ultraviolet radiation characteristics of missiles, hot matters in the exhaust plumes from missile engines, and the secondary combustion of the flammable substances are investigated. Next, the development and state of ultraviolet warning equipment both at home and abroad are introduced. The development of the ultraviolet warning equipment from the first generation of the typical type to the second generation of the imaging type is presented. Lastly, the trend of the ultraviolet warning technology is summarized.

Key words: ultraviolet warning, sun-blind ultraviolet, exhaust plume

0 引言

导弹逼近告警作为对抗前端, 是飞机获取威胁信息、启动红外干扰并进行战术规避的重要前提, 作为导弹逼近告警技术的重要组成, 紫外导弹逼近告警技术得到了较快发展。目前的紫外导弹逼近告警设备多工作于“日盲”紫外 200~300 nm 波段, 利用导弹发动机尾焰的强烈紫外辐射进行被动探测, 具有极低的虚警率, 能进行导弹发射和逼近探测, 同时与其他告警系统具有很好的兼容性, 因此紫外告警系统是目前各国军队装备量最大的导弹预警系统之一^[1-4]。

1 紫外告警技术分析

1.1 紫外告警技术原理

紫外辐射是指波谱中 10~400 nm 波长范围的电

磁波, 其中 200 nm 以下为真空紫外, 200~300 nm 为中紫外, 300~400 nm 为近紫外。在自然界中, 太阳是最强的紫外辐射源。高空大气层中的氧原子强烈吸收真空紫外, 该波段的紫外辐射只能在外太空中存在。平流层中的臭氧层对中紫外有强烈的吸收作用, 这一波段的紫外辐射在近地大气中几乎不存在, 该波段也被称为“日盲区”。

紫外告警设备利用“日盲区”的紫外辐射特点, 在极其微弱的背景下探测紫外辐射源, 以达到预警的目的。紫外告警系统主要包括 3 个部分, 如图 1 所示, 即探测单元、信号处理单元和决策单元。探测单元一般包括若干个紫外探测器, 组合起来形成全方位角和大空域的覆盖探测。探测器探测到紫外辐射信号后, 经光电转换将信号送至信号处理单元; 信号处理单元对信号进行预处理, 再送入计算机依据目标特性及预

收稿日期: 2017-08-29; 修订日期: 2017-09-12.

作者简介: 郑海晶 (1988-), 男, 博士研究生, 主要从事尾焰紫外、红外辐射测量与仿真研究。E-mail: 3120120251@bit.edu.cn

通信作者: 白廷柱 (1955-), 男, 教授, 主要研究方向为光电成像技术、红外仿真、紫外通信等。E-mail: tzhubai@bit.edu.cn.

基金项目: 863 计划资助项目 (2007AA12Z101&2009AA01Z225); 预先研究 (9140C610301110C61); 总装预研基金项目。

定算法进行决策判决,确定有无威胁源。如有,则解算其方位角、距离等信息并向控制单元发送信息;若有多个威胁源,还需排定威胁程度的顺序^[5]。

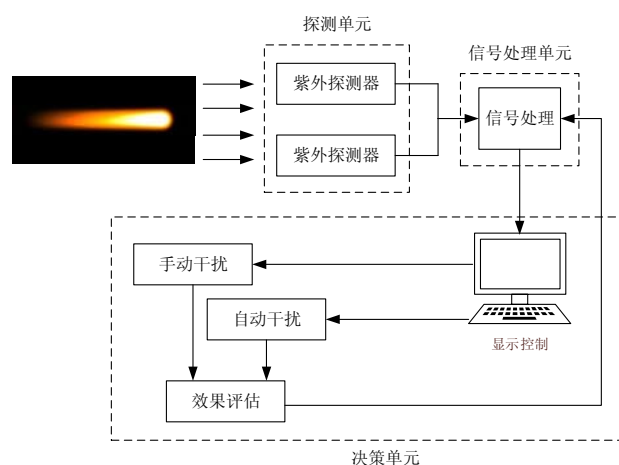


图1 紫外告警系统组成

Fig.1 Components of UV warning system

1.2 导弹的紫外辐射

从导弹发动机喷管喷出的燃烧产物中包含大量高温可燃性气体,这些气体与周围大气中的氧气混合后发生二次燃烧,形成火焰流场,称为尾焰。导弹的紫外辐射绝大部分来自高温尾焰的热辐射和二次燃烧化学发光。

1.2.1 辐射机理

1) 热辐射。任何物体,只要温度高于绝对零度,就会不停地向外发出热辐射。对于黑体来说,温度决定了辐射能量和波长分布,当黑体温度升高时,发出的辐射能量增加,峰值辐射波长向短波方向移动。导弹发动机尾焰的温度可达2000~3000 K,将产生一定量的紫外辐射。

2) 化学发光。化学发光是指吸收了化学能的分子由激发态回到基态时所产生的光辐射现象,是化学动力学过程导致的非平衡自由辐射。液体发动机尾焰的主要成分包括:CO₂、H₂O、H₂、O₂、N₂、OH、CO、NO、H、O和N等,固体发动机尾焰在此基础上还包括HCl、Cl₂和Cl等气体组分和Al₂O₃等颗粒物。尾焰中的可燃性组分与周围大气中的氧气在较高的温度条件下发生二次燃烧反应,使尾焰流场温度升高,并产生化学发光现象.CO+O化学发光和OH自由基化学发光是液体发动机尾焰紫外辐射的主要来源,对于固体发动机,不同状态和直径的Al₂O₃颗粒对尾焰紫外辐射影响较大^[6-7]。

1.2.2 辐射特征

由辐射机理分析可知,尾焰紫外辐射的光谱及强度取决于尾焰组分分布、流场温度分布以及二次燃烧

反应等。

1) 燃料成分。燃料燃烧后经由喷管喷出,燃料组成直接影响尾焰组分种类。液体燃料发动机尾焰中CH*、C₂*、OH* (上标“*”表示激发态)等物质是产生化学发光的主要反应物;固体燃料中通常会加入铝粉,因此固体燃料发动机尾焰中一般会有Al₂O₃颗粒物存在,高温Al₂O₃颗粒会发出一定量的紫外辐射并对入射紫外辐射产生散射作用。以上这些物质的含量变化直接影响到尾焰紫外辐射的光谱分布及强度分布。

3) 飞行高度。导弹飞行在小于50 km的低空时,尾焰卷吸大气形成湍流,尾焰中的可燃性组分与大气中的氧气发生二次燃烧反应,从而改变尾焰温度分布和组分分布,引起紫外辐射光谱分布和强度分布的变化。二次燃烧反应同时产生化学发光,发出紫外辐射。当导弹飞行高度增加时,大气变得稀薄,氧气含量减少,二次燃烧程度降低,尾焰温度变化程度相应地降低,尾焰紫外辐射也会相应的变化。

4) 观察角度。告警设备对不同方向的导弹进行探测时会有不同的辐射强度分布。当紫外告警设备正对来袭导弹时(设为180°),由于弹体挡住大部分尾焰及二次燃烧区域,此时探测到的尾焰紫外辐射强度最小;当观察角度为60°~90°时,辐射面积及二次燃烧区域最大,此时可探测到最大的紫外辐射强度;当导弹远离告警设备即观察角度为0°时,尾焰辐射区域为圆盘状,只有向后方发射的紫外辐射才能被探测到。

紫外告警设备通过探测来袭导弹尾焰紫外辐射光谱分布及强度分布,以计算来袭导弹种类、威胁方向、距离等信息,并做出相应的决策,如实施干扰、采取规避措施或者对敌方导弹进行攻击等。

2 国外紫外告警设备现状

从20世纪60年代开始,国外已经开始了在紫外波段探测导弹的研究工作,早期的研究主要集中在对导弹尾焰紫外辐射的测量工作上。80年代后,随着紫外探测技术的发展,利用“日盲区”紫外辐射对来袭导弹进行告警也取得了重大的进展。紫外告警设备从技术上可分为第一代概略型和第二代成像型,其主要区别在于紫外探测器,前者使用光电倍增管,后者使用像增强器。

2.1 第一代概略型

2.1.1 AN/AAR-47

第一代概略型紫外告警设备通过紫外物镜接受导弹尾焰的紫外辐射,使用单阳极光电倍增管作为光

电转换器件，信号放大后传输到信号处理系统，经过预处理后送入计算机系统，根据目标特征及预定算法做出相应决策。

典型的第一代紫外告警设备有美国 ATK 公司的 AN/AAR-47、以色列 Rafael 公司的 Guitar-300、Guitar-320 以及南非的 MAWS 等。

AN/AAR-47 系统被动探测导弹紫外辐射信号，利用相关算法区别来袭导弹与虚假信号。新版本系统包含激光预警传感器，能够探测更大范围的威胁源。通过分析威胁源特征，系统提供给飞行员音频和图像信号进行预警，并指示威胁源方位。另外，该系统还会发送信号给红外对抗系统，后者得以开展例如发射诱饵弹等行动。

AN/AAR-47 全系统包括 4 个探测器、一个处理单元和一个信号指示器，4 个探测器分别指向 4 个方向，能在导弹到达前 2~4 s 发布警报。表 1 所示为 AAR-47 性能参数。图 2 所示为安装在 USMCV-22“鱼鹰”飞机上的 AAR-47。

表 1 AAR-47 性能参数
Table 1 Parameters of AAR-47 system

	长度/ mm	宽度/ mm	高度/ mm	质量/ kg	视场角 92°	覆盖 空域
探测器	203	127	127	1.6		水平：360° 俯仰：92°
处理器	254	203	203	7.4		
信号指示器	154	127	51	1.0		
系统总质量/kg			14.6		总功率/W	70



图 2 安装在鱼鹰飞机上的 AAR-47 系统

Fig.2 AAR-47 sensors mounted on Osprey aircraft

AAR-47 告警系统虽然是非成像装备，但以其良好的探测性能和兼容性一直得到军方的青睐，经过不断的升级和功能增强，目前在探测器市场仍占有很重要的位置。该系统已成为美国海军装备最普遍的导弹告警系统，并进行了多次实战检验，在 QF-100 型无人机试验中，从各个方向向靶机发射了 19 枚地空导弹和 2 枚空空导弹，无一漏报；在廷德尔空军基地进行的试验中，又发射了十几枚空空导弹，同样获得了成功。当 QF-100 型无人机装备该系统飞行在 9143 m

高空时，检验附近加速飞行的 F-16 战斗机对该系统的虚警情况，获得了令人满意的效果。在其他一些试验中，该系统还能在导弹向飞机发射后不到 1 s 的时间内控制投放红外诱饵弹，满足了防御近程肩扛式导弹的需要。该系统还具有在运输机起落过程中保护飞机的能力。

AN/AAR-47 由 Loral（现为 BAE 公司一部分）和 ATK 公司开发。最初版本的 AN/AAR-47(V)1 由 Loral 公司在 1983 年研制出，ATK 公司在 90 年代中期参与研制，最后完全由 ATK 公司承担。1998 年，ATK 公司推出改进型的 AN/AAR-47(V)2，其中加入了激光告警功能。到 2005 年，此型号设备已经售出超过 5000 套。2006 年，AN/AAR-47A(V)2 实现量产，此型号预警设备进一步增强了激光预警功能。2008 年，升级型号 AN/AAR-47B(V)2 研制成功，在以前型号设备功能的基础上，加入了敌方火力指示器（Hostile Fire Indicator, HFI）。HFI 可以探测火箭榴弹和曳光弹，更一步增强了探测导弹的能力。2009，美国海军订购了超过 1600 套 AN/AAR-47B(V)2^[8]。

2.1.2 MAW-300

Saab Avitronics 公司生产的 MAW-300 工作在“日盲”紫外波段，使用光电倍增管作为探测器件，对抗响应时间为 2~3 s，每个传感器 110°锥形视场角，覆盖全视场。其性能参数如表 2 所示。

表 2 MAW-300 性能参数
Table 2 Parameters of MAW-300 system

	长度/mm	宽度/mm	高度/mm	质量/kg	功率/W
每个传感器	134	130	130	2.3	11（一套）
控制器	224	99	152	2.5	30

2.2 第二代成像型

第二代紫外告警系统使用像增强器作为探测器件，主要通过大相对孔径的广角紫外物镜接受导弹尾焰的紫外辐射，通过解算图像位置，得出相应的空间位置并进行距离的估算。相对于概略型告警系统，它探测和识别目标的能力更强，角分辨率更高，不仅能引导烟幕弹、红外诱饵弹的投放，还能指引定向红外干扰机，具有多目标探测能力，能对导弹的威胁等级进行排序，精确给出威胁目标的方向。成像型告警系统是紫外告警系统发展的主导潮流。

2.2.1 AN/AAR-54(V)

美国 Northrop Grumman 公司生产的 AN/AAR-54(V)被动探测导弹尾焰紫外辐射，可追踪多个紫外辐射源，迅速精确地对每个辐射源进行分类，并将威胁信号发送到对抗系统中，以便其做出最优反应。

AN/AAR-54 最早被称为 PWAWS-2000, 可探测地-空导弹以及空-空导弹, 可安装在固定翼飞机、直升机以及地面装备上, 常用在特种作战直升机和低空飞行运输机上, 如 MC-130。现装备该预警系统的国家有澳大利亚、德国、荷兰、葡萄牙、英国以及美国 (美国特种作战司令部、美国运输司令部)。另外, 美国国土安全部正考虑拓展其民用用途, 将其作为航线保护系统的一部分^[10]。

AN/AAR-54(V)性能参数见表 3, 图 4 所示为该系统实物图。

表 3 AN/AAR-54(V)性能参数

Table 3 Parameters of AAR-47 system

	长度/ mm	宽度/ mm	高度/ mm	质量/ kg	功率/ mm	视场角	角分 辨率
探 测 器	112	87	87	1.75	8	120°	1°
控 制 器	216	160	96.5	4.8	34		



图 4 AN/AAR-54 紫外导弹逼近预警系统

Fig.4 AN/AAR-54 UV missile approaching warning system

2.2.2 MILDS AN/AAR-60

法国 MBDA 和德国 EADS 公司研制的 MILDS AN/AAR-60 是一种基于高性能凝视紫外成像探测器的机载导弹告警系统, 是目前世界上体积最小、性能最好的告警器之一。其探测系统采用硅 CCD 阵列, 由于每一像素对应的视场比单元光电倍增管视场小得多, 使得对同样的信号只产生较小的噪声, 可有效降低背景噪声, 其信噪比比使用光电倍增管的 AN/AAR-47 提高几个量级。

MILDS 系统最多可包括 6 个紫外探测器, 每个探测器具有 120°锥形视场, 6 个探测器可提供全空域覆盖。每个探测器自带处理器, 每个处理器可控制全系统, 故在只剩下一个探测器时也能正常工作。该系统不仅能指示目标来袭方向, 还能估算其距离, 系统响应时间约为 0.5s, 平均故障间隔时间 (MTBF) >9600 飞行小时, 探测距离约为 5 km, 可同时应对 8 个目标, 可在海拔高度 14 km 下工作, 目前已有超过 4000 台

MILDS AN/AAR-60 告警器应用在运输机和直升机平台上, 如 CH-47 和 C-130。表 4 所示为 MILDS 系统性能参数。

表 4 MILDS AN/AAR-60 性能参数

Table 4 Parameters of MILDS AN/AAR-60 system

	长度/ mm	宽度/ mm	高度/ mm	质量/ kg	视场角	角分 辨率
单个 探测器	120	120	120	2	120°	1°
总质量				20	6 个覆盖 全视场	

AAR-60(V) 2 是其升级型号, 由美国和德国联合研制, 该系统于 2010 年开始生产, 可应用在战斗机上, 目前已装备在欧美的部分 F-16 战斗机, 希腊空军 F-16 的机载自卫综合系统 II 含有 AN/ALE-47 箔条/曳光弹投放器和 MILDS AAR-60(V) 2^[11]。

2.2.3 Guitar-350

2001 年 5 月, 针对战斗机、直升机和运输机的导弹预警, 隶属于以色列装备开发局 (Armament Development Authority) 的 Rafael 公司研制出被动导弹预警系统 Guitar-350, 该系统工作在紫外波段, 探测导弹尾焰发出的紫外辐射, 当探测到威胁源时发出警告并激活机上红外对抗系统。

Guitar-350 系统的单个探测器视场角为 120°, 系统处理部分包含内部惯性角度单元 (Internal Inertial Angular Unit), 可补偿飞机的摆动操作。利用大口径物镜, 该系统比现有的导弹告警系统灵敏度高, 且拥有更远的预警距离。Guitar-350 已成功验证可对 100 多种类型的导弹进行预警, 包括空-空导弹、反甲导弹和地-空导弹, 可探测导弹发射, 也可对飞行中的导弹进行追踪, 系统的复杂算法可排除假目标 (闪光弹等) 的干扰。

装备于直升机的 Guitar-350 系统有 4 个探测器, 覆盖水平 360°、俯仰 120°的可攻击视场; 装备于战斗机的 Guitar-350 系统使用 6 个探测器, 覆盖全球形空间视场。Guitar-350 导弹预警系统能提前 4~6 s 进行预警, 总质量不超过 15 kg, 总功率不超过 200 W。图 5 为 Guitar-350 的展示图^[12]。

2.2.4 101KS-U

101KS-U 紫外传感器是 101KS 光电套件的一部分, 该光电套件还包括: 101KS-O 定向压制光电球、101KS-N 机载吊舱、101KS-P 红外成像探头和 101KS-V 光电探头, 该光电系统将会装备于俄罗斯苏-57 战斗机上, 如图 6 所示。

101KS-U 光学探测窗口分布在战机全身, 其中单窗口的 101KS-U/01 位于飞机前部两侧, 2 个双光学窗

口二合一的 101KS-U/02 分别布置在机腹和机背, 形成全机 360°覆盖。苏-35 也装备了类似光学设备, 苏-35 的此类装备不仅可以进行导弹逼近告警, 也能红外成像, 形成“透明座舱”。101KS-U 的一个特色是一个光学窗口有 2 个探头, 一个大探头用于导弹逼近告警, 另一个小探头用于激光感应^[13]。图 7 所示为 101KS-U 展示图。



图 5 Guitar-350 展示图

Fig.5 Exhibition of Guitar-350 sensors

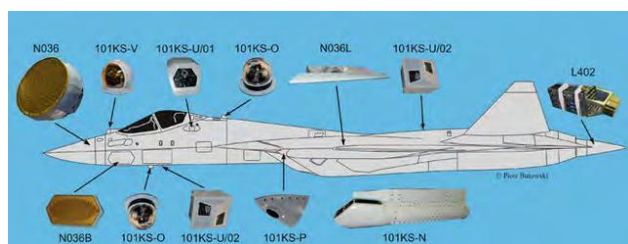


图 6 苏-57 全身装备位置示意图

Fig.6 Su-57 equipments location

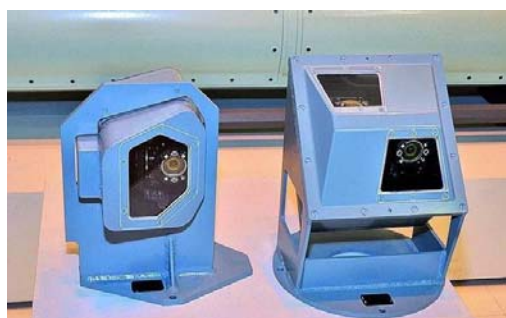


图 7 101KS-U 展示图

Fig.7 Exhibition of 101KS-U sensors

3 国内紫外探测技术现状

国内在紫外告警系统的研制及装备方面的工作公开资料不多, 目前, 仅有东北电子技术研究所研制的 SE-2 型导弹逼近紫外告警系统公开展出, 该设备采用成像型探测器, 角分辨率、探测及识别能力都达到一定水平, 能确定其攻击距离并发出警报, 适当改进后还能装备到坦克、装甲车等多种作战平台上, 与国外装备的差距在于虚警率高^[14]。

虽然很少有实用的导弹紫外预警系统资料公开,

但是在紫外预警关键技术方面的工作还比较多, 如:

北京理工大学的娄颖基于导弹的紫外辐射特性、辐射传输的大气特性以及探测器件的性能参数等, 提出了紫外告警系统探测距离的估算方法^[15]; 国爱燕用数值仿真方法建立了液体和固体火箭发动机尾焰三维紫外辐射分布模型, 并与实验数据对比, 计算结果与实验数据具有一致性, 研究结果反映了不同视角下火箭发动机尾焰紫外辐射强度的空间变化^[6-7,16]。

北方夜视科技集团公司的贺英萍提出了一种紫外像增强器分辨力和视场质量的测试方法, 用以分析紫外像增强器的光学成像特性和视场质量, 其测量精度约为 5%^[17]; 李晓峰对 $\text{Rb}_2\text{Te}(\text{Cs})$ 、 K_2Te 和 Cs_2Te 日盲紫外光电阴极进行了探索, 研究了制作工艺, 测量了阴极样品的光谱响应、光谱反射率及光谱, 研究结果表明 $\text{Rb}_2\text{Te}(\text{Cs})$ 、 K_2Te 及 Cs_2Te 紫外阴极均可用于日盲紫外探测成像器件^[18-20]。

南京理工大学的吴星琳设计了紫外像增强器信噪比测试系统, 利用研制的测试系统研究了微通道板两端电压对日盲型紫外像增强器信噪比的影响, 结果表明电压小于 850 V 时, 像增强器的输出信噪比随电压增大而增大, 当电压超过 850 V 时, 信噪比基本维持不变^[21]。刘涛提出了一种用于测试紫外像增强器辐射增益的测试仪, 辐射计最低探测强度达 10^{-11} W/cm^2 , 最低亮度探测阈值可达 $3 \times 10^{-4} \text{ cd/m}^2$, 辐射增益测试重复性优于 $\pm 8\%$ ^[22]。

电子科技大学的郭晶研究了大气紫外临边辐射及偏折效应, 建立了紫外波段大气的临边辐射模型, 并分析了大气偏折响应带来的影响, 其计算结果可为紫外探测系统的仿真应用提供相关的理论基础^[23]。

空军第一航空学院的李志伟研究了导弹壳体受热及尾焰的辐射特性, 分析了其红外、紫外光谱特性以及背景辐射对导弹侦察的影响, 并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以提高机载光电侦察效果的技术方法^[24]。

中科院上海技术物理研究所的卢怡丹分析了 InGaN 紫外探测器的研制过程, 利用金属有机化学气相沉积方法生长 GaN 外延材料, 通过刻蚀、钝化、欧姆接触电极等工艺制作了 InGaN 紫外探测芯片, 最后测量了该探测芯片的性能。通过测试和分析, 该紫外探测芯片在 360~390 nm 波段表现了良好的响应^[25]。徐菲菲针对天基紫外探测系统, 在 290~400 nm 的紫外窗口建立了不同场景空间杂波辐射模型, 并利用该模型分析了空间背景杂波辐射亮度的主要影响因素, 估算了杂波影响下系统的探测性能^[26]。中国人民解放军

的刘火平和中科院上海技术物理研究所的尹达一等利用自行研制的一套紫外光学成像设备,验证了地面紫外探测器可以实现对高空高速再入目标探测成像,获取了40 km以上高空高速再入目标的地面紫外探测图像,突破了地面光学探测从未获取臭氧层以上高空高速目标紫外图像的空白记录^[27]。

4 发展分析

随着紫外探测技术的不断发展,紫外告警系统性能不断提高,应用领域也不断扩展,告警系统向综合一体化方向不断推进。

1) 核心探测器件-紫外探测器不断推陈出新。首先的光电倍增管被成像的面阵器件所取代,且探测灵敏度不断提高;新的紫外探测器材料在不断研究中,基于固体紫外探测器的紫外告警装备有望问世。

2) 系统性能不断提高。新型成像型紫外告警系统在探测距离、角分辨率和灵敏度方面会不断提高;随着对不同类型、不同条件下的导弹紫外辐射特性的研究积累,紫外告警系统的决策单元越来越智能,虚警率会不断降低,战场实用性会进一步提升。

3) 应用领域不断扩展。紫外告警系统的应用领域从最初的低速飞行器到高速飞行器,从空中平台到地面坦克、装甲车及水面舰艇,其应用平台不断扩展,甚至从军用领域扩展到民用领域。

4) 向综合一体化发展。红外告警、紫外告警到双色告警这一技术发展沿革构成了几十年来导弹告警发展的路线图,先进的探测器阵列和处理技术更促使越来越多的小型传感器在飞机上应用,同时双色红外告警系统已形成装备,并与其他光电装备形成搭配,将导弹告警、态势感知、辅助导航等多功能一体化^[28]。

5 结束语

国内紫外探测关键技术不断发展和积累,高性能的紫外告警设备终将出现;国际上随着红外告警、紫外告警、激光告警和一体化告警技术的不断研制和开发,其告警精度越来越高,效果越来越好。在未来现代化战争或局部战争中,适时使用告警设备将会使战斗人员的生存几率大大提升。

参考文献:

[1] 许强. 高速固定翼飞机导弹逼近紫外告警的战术应用[J]. 光电技术应用, 2005, 20(4): 1-15.

XU Qiang. The Tactical Application of UV MAWS for High Speed

Fixed-wing Fighter[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2005, 20(4): 1-15.

[2] 张洁. 机载导弹逼近告警技术发展分析[J]. 舰船电子工程, 2014, 34(11): 19-23.

ZHANG Jie. Development and Analysis of Airborne Missile Warning Technology[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2014, 34(11): 19-23.

[3] Kou Jinfeng, Xiao Yang. Estimating ultraviolet warning distance of approaching missiles based on atmosphere model[C]//*IEEE International Conference on Signal Processing*, 2013: 26-30.

[4] Mehmet Cihan Sahingil. Time-to-impact estimation in passive missile warning systems[C]//*Proc. of SPIE*, 2017: 102030E.

[5] 鲜勇, 赖水清. 日盲紫外探测技术的军事应用[J]. 直升机技术, 2016(2): 67-72.

XIAN Yong, LAI Shuiqing. Military Applications of the Blind Ultraviolet Detection Technology[J]. *Helicopter Technique*, 2016(2): 67-72.

[6] 国爱燕, 白廷柱, 胡海鹤, 等. 固体火箭发动机羽烟紫外辐射特性分析[J]. 光学学报, 2012(10): 176-183.

GUO Aiyang, BAI Tingzhu, HU Haihe, et al. Analysis of Ultraviolet Radiation Characteristics of Solid Propellant Rocket Motor Exhaust Plume[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012(10): 176-183.

[7] 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.

GUO Aiyang, BAI Tingzhu, HU Haihe, et al. Analysis of Ultraviolet Radiation Characteristics of Liquid Propellant Rocket Motor Exhaust Plumes[J]. *Acta Armamentarii*, 2013, 34(4): 418-424.

[8] Wikipedia. AAR-47 missile approach warning system[EB/OL]. [2017-08-30]. https://en.wikipedia.org/wiki/AN/AAR-47_Missile_Approach_Warning_System.

[9] SAAB. MAW 300 on fighter platforms[R]. [2017-08-30]. Saab Avionics, July, 2010.

[10] Wikipedia. AAR-54[EB/OL]. [2017-08-30]. <http://en.citizendium.org/wiki/AAR-54>.

[11] Deagel.com website. ANAAR-60V2-MILDS-F[EB/OL]. [2017-08-30] http://www.deagel.com/Protection-Systems/ANAAR-60V2-MILDS-F_a001597002.aspx.

[12] Israeli-Weapons.com website. Aero-gem[EB/OL]. [2017-03-30]. http://www.israeli-weapons.com/weapons/aircraft/systems/aero_gem/Aero_Gem.htm.

[13] 俄五代苏 57 锁定世界纪录. 全身上下 15 只眼睛可看穿周围一切[EB/OL]. [2017-08-30]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=14563504286&wfr=spider&for=pc>.

Russia Su-57 locked the world record, 15 eyes on the whole up-and-down can see through all around. [EB/OL]. [2017-08-30]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1577144814563504286&wfr=spider&for=pc>.

- [14] 李炳军, 梁永辉. 紫外告警技术发展现状[J]. 激光与红外, 2007, **37**(10): 1033-1035.
- LI Bingjun, LIANG Yonghui. Development of Ultraviolet Warning Technology[J]. *Laser & Infrared*, 2007, **37**(10): 1033-1035.
- [15] 娄颖, 白廷柱, 高稚允, 等. 紫外告警系统探测距离的估算[J]. 光学技术, 2005, **31**(3): 472-475.
- LOU Ying, BAI Tingzhu, GAO Zhiyun, et al. Estimation of detectable distance for ultraviolet warning system[J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(3): 472-475.
- [16] 国爱燕, 唐义, 白廷柱, 等. 液体火箭发动机羽烟三维紫外辐射仿真研究[J]. 北京理工大学学报, 2012, **32**(4): 410-414.
- GUO Aiyun, TANG Yi, BAI Tingzhu, et al. Simulation of 3-D Ultraviolet Radiation from Liquid Rocket Engine Plume[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2012, **32**(4): 410-414.
- [17] 贺英萍, 李敏, 尹雷, 等. 紫外像增强器分辨力和视场质量测试技术研究[J]. 应用光学, 2012, **33**(2): 337-341.
- HE Yingping, LI Min, YIN Lei, et al. Resolution and FOV quality of UV image intensifier[J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, **33**(2): 337-341.
- [18] 李晓峰, 赵学峰, 张昆林, 等. $\text{Rb}_2\text{Te}(\text{Cs})$ 日盲紫外光电阴极研究[J]. 红外技术, 2013, **35**(9): 581-586.
- LI Xiaofeng, ZHAO Xuefeng, ZHANG Kunlin, et al. Study on $\text{Rb}_2\text{Te}(\text{Cs})$ Solar Blind Ultraviolet Cathode[J]. *Infrared Technology*, 2013, **35**(9): 581-586.
- [19] 李晓峰, 赵学峰, 陈其钧, 等. K_2Te 日盲紫外阴极研究[J]. 红外技术, 2014, **36**(12): 967-972.
- LI Xiaofeng, ZHAO Xuefeng, CHEN Qijun, et al. Study of K_2Te Solar Blind Ultraviolet Photocathode[J]. *Infrared Technology*, 2014, **36**(12): 967-972.
- [20] 李晓峰, 姜云龙, 李靖雯, 等. Cs_2Te 紫外光电阴极带外光谱响应研究[J]. 红外技术, 2015, **37**(12): 1068-1073.
- LI Xiaofeng, JIANG Yunlong, LI Jingwen, et al. Study on Spectral Response beyond Cut off of Cs_2Te Ultra Violet Photo Cathode[J]. *Infrared Technology*, 2015, **37**(12): 1068-1073.
- [21] 吴星琳, 邱亚峰, 钱芸生, 等. 紫外像增强器信噪比与 MVP 电压的关系[J]. 应用光学, 2013, **34**(3): 494-497.
- WU Xinglin, QIU Yafeng, QIAN Yunsheng, et al. Relationship between voltage of MCP and signal-to-noise ratio of UV image intensifier[J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, **34**(3): 494-497.
- [22] 刘涛, 邱亚峰. 紫外像增强器辐射增益测试系统设计[J]. 应用光学, 2015, **36**(5): 723-726.
- LIU Tao, QIU Yafeng. Testing system of radiation gain in UV image intensifiers[J]. *Journal of Applied Optics*, 2015, **36**(5): 723-726.
- [23] 郭晶, 杨春平, 何曾文, 等. 大气紫外临边辐射及偏折效应影响研究[J]. 电子科技大学学报, 2014, **43**(1): 149-154.
- GUO Jing, YANG Chunping, HE Zengwen, et al. Research on Atmospheric Limb Radiation and Refractive Effect in UV Band[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2014, **43**(1): 149-154.
- [24] 李志伟, 王皖阳. 应对导弹威胁的机载光电复合侦察技术研究[J]. 红外技术, 2014, **36**(9): 753-756.
- LI Zhiwei, WANG Wanyang. Study on Airborne Composite Electro-optical Reconnaissance Technology Dealing with the Missile Threat[J]. *Infrared Technology*, 2014, **36**(9): 753-756.
- [25] 卢怡丹, 王立伟, 张燕, 等. InGaN 紫外探测器的制备与性能研究[J]. 半导体光电, 2014, **35**(5): 785-788.
- LU Yidan, WANG Liwei, ZHANG Yan, et al. Study on the Fabrication and Properties of InGaN Ultraviolet Detector[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2014, **35**(5): 785-788.
- [26] 徐菲菲, 胡勇, 尹球, 等. 不同场景的天基紫外背景杂波仿真计算[J]. 光学学报, 2015, **35**(6): 0601002.
- XU Feifei, HU Yong, YIN Qiu, et al. Modeling Calculation for Space-Based Ultraviolet Clutter Radiance from Different Scenes[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(6): 0601002.
- [27] 刘火平, 尹达一, 张荣杰, 等. 地面紫外探测高空高速再入目标分析与验证[J/OL]. 光学学报, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1252.O4.20170905.1307.010.html>.
- LIU Huoping, YIN Dayi, ZHANG Rongjie, et al. Feasibility Analysis and Verification of High Speed Reentry Target on Ground Ultraviolet Detection[J/OL]. *Acta Optica Sinica*, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1252.O4.20170905.1307.010.html>.
- [28] Holm Ovrén H., Emilsson E. Missile approach warning using multi-spectral imagery[D]. Linkopings University Institute for System Technic Department of Electrical Engineering, 2010.