

文章编号:1001-5078(2023)11-1627-10

· 综述与评论 ·

# 低空光电探测系统的研究现状及发展趋势

李丽亚, 樊芮锋, 宋亚, 赵柱, 蔡荣  
(华北光电技术研究所, 北京 100015)

**摘要:**以无人机为代表的低慢小目标对当前军事产生了重大变革,特别是在复杂作战环境下对现代战争产生的威胁。本文通过对多种探测手段的分析,阐明了光电探测在低空复杂背景探测下的绝对性优势,分析了光电探测系统的研究现状,介绍了当前光电系统面临的四个主要的挑战难题:大视场远距离探测、大视场与高分辨兼容、复杂背景低虚警探测与高精度识别、多目标跟踪定位,并给出了对应的解决思路,同时也是未来光电探测系统的发展趋势,通过光电探测能力的提升,实现真正与雷达能力的匹配。

**关键词:**无人机作战;低慢小目标;光电探测系统

**中图分类号:**TN97;TN29 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2023.11.002

## Research status and development trend of low altitude electro-optic detecting system

LI Li-ya, FAN Rui-feng, SONG Ya, ZHAO Zhu, CAI Rong  
(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

**Abstract:** Low, slow and small targets, represented by UAVs, have revolutionized current militaries, especially in terms of the threat to modern warfare under the complex combat environment. In this paper, through the analysis of various detection means, the absolute advantages of photoelectric detection in low altitude complex background detection is clarified, and the research status of electro-optic detecting System is analyzed. Four major challenges faced by the current photoelectric system are introduced: long-range detection with large field of view, compatibility between large field of view and high resolution, low false alarm detection and high-precision identification of complex backgrounds, and multi-target tracking and localization, and the corresponding solution ideas are given as well. At the same time, above four is also the development trend of the electro-optic detecting System in the future. Through the improvement of the photoelectric detection capability, the real matching with radar capability can be realized.

**Keywords:** UAV operations; low, slow and small targets; electro-optic detecting system

### 1 引言

俄乌冲突事件的不断升级,引发了全世界的广泛关注,而俄乌战场中的无人机作战更是激发了各国军事专家的激烈讨论。其中乌克兰使用了土耳其“拜拉克塔尔 TB-2”、“爱好者”等多种无人机对俄罗斯军队实施了多次攻击,除了人员、坦克、装甲车等常规目标,还包括“道尔”“山毛榉”

机动防空导弹以及俄海军的运输舰、“猛禽”级快艇等高价值目标,开创了众多无人机作战领域的先河,同时乌克兰通过无人机拍摄各种乌军打击效果的图片视频,拓展了战场的信息环境,为乌克兰在全球盟友宣传、鼓舞军队士气等方面提供支持,尤其是TB2察打一体无人机在战场中发挥的情报侦察、精确打击、火炮引导等多个层面的作

用,颠覆了各国军队对无人机在高端战争中所起作用的认知。无人机作为低空、慢速、小型化的低慢小目标,飞行高度一般在 1000 m 以下,速度小于 200 km/h,雷达反射面积小,难发现、难捕捉、难处置,以民用小型无人机、军用小型无人机、巡飞弹为代表的低慢小目标,已经对现代战争、社会公共安全产生了极大的威胁。

无人机及无人机群未来必将成为军事对抗的重要目标。为了实现对无人机作战的防御,预警探测是掌握战场主动权、了解当前战场形势必不可少的手段,通过对当前防空空域的预警扫描,及时捕捉敌方目标信息,监视敌方目标动态,预测敌方作战意图,及时为己方攻击防备提供足够的情报信息以及反应时间。俄乌战场上的俄军在冲突早期正是由于缺乏电子防护装备,没有及时掌握空中态势,导致未能有效对抗乌克兰的无人机。因此,面对无人机作战的各种新动向,如何尽快地探测发现成为了各国军队关注的热点。

面对低慢小目标,传统的雷达在城市、山地等复杂环境下低空探测虚警率高,特别是强电磁对抗环境下无法工作,同时受制于雷达体制,防空雷达无法长时间一直处于工作状态,从俄乌冲突中 TB-2 无人机摧毁俄军防空导弹的视频看,它们基本都是准确抓住俄军机动防空系统雷达没有开机的间歇发动攻击,可以看出只是单靠雷达探测,无人机仍有机会避开防空系统;此外无线电探测能够通过低空目标的数传、图传、导航等链路信号的侦察,实现对常用无人机的探测,但是复杂电磁环境下,目标没有链路特征或者链路特征未知的情况下,无线电探测效果不佳;声探测能够对遮挡物后的目标进行探测,由于小型无人机的噪声与周围环境噪声相比非常小,其探测距离会非常近,并且精度较低,容易受到噪声的干扰;光电探测作为被动探测手段,抗干扰能力强,能够实现对目标的精确识别,但是低慢小目标的红外特征弱,影响探测距离。显然,单一的探测方式无法高效准确地探测到目标,多种手段复合探测的方式将是低空目标探测预警的发展趋势,根据不同的使用场景和作战对象,选用不同技术体制和技术参数的雷达、光电、无线电等多个传感器,通过多种探测装备协同,建立“一点发现,多维跟踪”多探测手段相结合的探测系统,大大提高低慢小目标的探

测概率。



(a)车载移动式预警探测系统



(b)驻地固定式预警探测系统

图 1 多手段复合探测的预警探测系统

Fig. 1 Early warning and detection system with multiple means of composite detection

## 2 光电探测系统的研究现状

光电探测技术手段,作为复杂作战环境下对低空目标探测的重要手段,其在低空复杂背景探测下具有绝对性的优势:1)实现对低慢小目标的高精度探测,实时跟踪得到准确的位置信息便于下一步的精准打击;2)低空抗干扰能力强,被动工作方式不易被发现,利用目标自身辐射信息进行探测,避免了电磁环境中其他信息的干扰;3)图像直观性好,实现对目标属性的精确识别,为当前战场态势分析提供高价值信息。因此,相比容易受到干扰的无线电探测、声探测手段,光电探测技术手段可以在雷达关机间隙填充当前战场空域态势的空白,起到很好的补充作用;在电磁环境比较复杂的环境,可以替代雷达来面对超低空突防目标,其作用不可或缺<sup>[1]</sup>。

### 2.1 光电探测系统工作原理

光电探测系统利用不同波长范围的探测器来响应各种目标的辐射信息,其工作波段包括可见光(0.37 ~ 0.78  $\mu\text{m}$ )、近红外(0.78 ~ 1  $\mu\text{m}$ )、短波红外(1 ~ 3  $\mu\text{m}$ )、中波红外(3.7 ~ 4.8  $\mu\text{m}$ )、长波红外

(8 ~ 14  $\mu\text{m}$ )、双波段红外、双色红外等,其中可见光成像主要是通过光线的反射,其成像与光源的波长及物体的反射率有关,可见光成像的可视效果较好,可以准确反映目标的颜色属性、空间位置;红外热成像主要是通过物体之间的温度差造成红外辐射强度的差别来对目标和背景做出区分,红外热成像的环境适应性好,可以在夜间、大雾天气使用。可见光探测和红外探测均是获取信息的重要手段,光电探测系统将二者结合使用,相互补充,全天时工作,获取更多的目标信息<sup>[2]</sup>。

根据光电探测系统的工作体制,可以将其分为光电搜索系统、光电跟踪系统、光电搜跟一体系统。其中光电搜索工作体制的实现方式主要包括红外大面阵凝视扫描技术、超长线列扫描技术、分布式凝视技术等,通过对防护区域的全空域监视,完成对360°空域内可疑目标的发现、告警,同时引导光电跟踪系统实现对疑似目标的锁定跟踪;光电跟踪工作体制的实现方式主要包括三光同轴技术、被动定位技术等,通过对目标的跟踪定位,实时给指挥控制系统上报目标的跟踪位置信息,完成对告警目标的确认辨识;光电搜跟一体系统将搜索与跟踪两种功能结合起来,工作时大视场用于全空域扫描告警,通过对搜索视场中告警目标的威胁等级判断,选择威胁大的目标进行小视场跟踪识别。光电探测系统以其远距离探测、大视场覆盖、高分辨成像的特点,已然成为未来作战环境下战场防御的重要手段。

## 2.2 国内外光电探测设备发展概况

20世纪60年代,西方国家开始认识到了红外探测技术在军事应用的价值,最先研制红外探测系统。红外探测系统的发展一直受限于探测器件发展水平的限制,目前国际上已经发展了三代探测器和红外成像技术<sup>[3]</sup>。第一代探测器是线性光导探测器阵列,以此为代表的光电探测系统包括加拿大与美国联合研制的“AN/SAR-8”系统、法国研制的“DIVB-1A 旺皮尔(VAMPIR)”系统等<sup>[1,4]</sup>,该类系统光机扫描设计比较复杂,体积重量较大,探测距离较近。随着探测器焦平面材料工艺的发展,第二代探测器发展到了二维光伏探测器阵列,以凝视型中等规模中波红外焦平面探测器的红外成像应用为主<sup>[4]</sup>,20世纪90年代,红外探测系统有了快速发展,以此为代表的有荷兰研制的“天狼星(SIRIUS)”

远程红外警戒跟踪系统、法国研制的“旺皮尔(VAMPIR)MB型”系统等<sup>[1]</sup>,这类系统简化了光机扫描设计,进一步减小了光电探测系统的体积重量,实现了全景快速扫描,扩大了俯仰的视场范围,具备了双波段探测的能力,但是识别能力依然较弱。随着探测器焦平面阵列的像元数及性能的提升,第三代红外探测器在第二代基础上进一步提出了高性能、低成本的要求,长线列、超长线列,以及大规格面阵探测器得到了广泛应用,以此为代表的有以色列RAFAEL公司研制的“Sky Spotter”光电探测系统、法国研制的“月女神ARTEMIS”光电探测系统、美国研制的凝视红外全景传感器“SIRPS”等<sup>[1,5]</sup>,第三代光电探测系统以凝视红外焦平面阵列探测器为主,大大提升探测距离的同时保证了较高的分辨率,提高了系统的识别能力。

我国最早为歼-6甲夜航歼击机研制了第一代的航2甲型光电探测系统,但此系统采用的探测器件性能较差,探测距离非常有限<sup>[1]</sup>。20世纪80年代进入第二代探测器件的研制阶段,焦平面工艺制作水平、信息处理技术都有了一定突破,红外探测系统还是以线列为主,可靠性和探测距离得到提升,但是相比国外同时期的系统依然有明显的差距。从本世纪初开始,随着大面阵焦平面阵列、信号处理等技术的发展,我国开始研制第三代光电探测系统,这一阶段的光电探测系统拥有了大视场、远距离、全方位监视的能力,可同时对360°全景覆盖的探测区域实现多目标的搜索识别,探测距离、识别距离都有了质的飞跃。

## 2.3 光电探测系统的挑战

现代复杂战场环境下,特别是复杂电磁干扰对抗环境下,光电探测已经成为辅助或者替代雷达进行预警探测的重要方式,但目前光电探测的能力与雷达相比,还存在很大的差距,如何实现光电与雷达能力的匹配是亟需解决的问题。从光电探测系统的发展历程来看,其发展主要依赖于军事需求和红外成像基础技术,虽然第三代红外探测器件发展了大面阵焦平面阵列、超长线列等大规格器件,但是探测系统的成像机制并没有发生改革,系统的指标性能依然强依赖于探测器件、光学系统设计、图像信息处理技术等方面<sup>[6]</sup>。目前,低慢小目标在复杂作战环境下的威胁不断增大,给光电探测系统带来了新的

挑战:

1) 为了尽早尽快地发现目标,光电搜索系统的探测视场需要尽可能的大,同时需要保证尽可能远地探测到目标。目前系统的仰角覆盖区域较小,传统的阶跃扫描来覆盖大范围空域耗费时间较多,搜索效率较低;传统的稳向摆扫装置能够快速完成视场阶跃,但是增加了系统的复杂度,无法满足当前系统小型化要求。远距离的目标在大视场图像中的占比很小,通常只有几个像素点,同时远距离目标衰减和大气对成像的干扰导致目标亮度微弱,信噪比较低。因此,大视场下的远距离探测是个很大的挑战。

2) 光电搜索系统主要满足大俯仰范围覆盖、远距离探测,系统设计采用大口径小 F 数来获得更多的通光量,接收更多的目标辐射能量,同时为了实现远距离的探测,需要采用大尺寸像元来提高系统的探测距离;而光电跟踪系统需要实现较好的识别效果,系统设计多采用大口径大 F 数来增大系统的焦距,从而获得更高的空间分辨率,同时为了实现高精度的识别,需要采用小尺寸像元来提高目标的成像分辨率。显而易见,探测发现与跟踪识别的设计是相互矛盾的,传统成像系统中的大视场与高分辨率不可兼得的,如何最大限度得同时满足搜跟一体系统的发现与识别是个很大的挑战。

3) 复杂作战背景下,特别是城市、山地等复杂场景,系统大视场的覆盖范围,视场中会出现山体、建筑物等多种背景物体,对远距离的目标进行探测,目标只占几个像元,且无法体现纹理特征,而山体、建筑物等复杂背景的灰度分布往往具有起伏剧烈、空间分布不平稳等特点<sup>[7]</sup>,背景杂波非常复杂,且高频信息强度与目标接近,不论是运动目标还是悬停目标,都会受到背景干扰,导致虚警较多;同样,在背景信号干扰下,跟踪的稳定性会下降,同时缺乏目标特征信息的远距离目标,识别精度会受到影响。因此,如何实现复杂作战环境下的低虚警检测和高准确度跟踪识别是个很大的挑战。

4) 多目标协同作战已经成为战争中的亮点,集群式目标是未来军事对抗的重要目标,其中无人机蜂群在人工智能技术的基础上,实现数据共享,通过携带不同的载荷,协同完成搜索、定位、引导、打击等多种复杂任务,达到低成本、低消耗、高效率的作战效果;无人机与巡飞弹的集群协同作战,通过利用无

人机自主灵活、巡飞弹生存能力强的特点,实现武器平台的优势互补,极大地提高了饱和攻击的作战效能。而传统的单视轴跟踪技术无法实现对多目标的跟踪与定位,如何实现多目标的航迹关联、进行多目标的跟踪定位是个很大的挑战。

### 3 光电探测系统的发展思路

#### 3.1 大视场远距离探测的需求

针对大视场下远距离的目标探测,除了需要提高探测器的灵敏度、扩大动态范围之外,需要充分利用探测器多维度信息的获取,除了强度信息外,还有光的谱段、偏振和相位等本征信息<sup>[8]</sup>。传统探测器只是单谱段的辐射强度维度的探测,目标信息获取较少,无法区分伪装目标与真实目标,且探测距离较近,尤其是雾霾天气或者能见度较低的环境下,已经无法满足现在战场环境下低慢小目标远距离探测的需求。

1) 多谱段探测拓宽了图像的信息丰富度,提高了场景信息的准确度,以双色探测器为例,其能够同时探测导弹弹头和尾部火焰区域辐射出的不同的红外波段,从而可以直接区分出只有单波长辐射的干扰弹。目前双色/多色的探测器件的发展趋势是纵向叠层结构模式,即在单个像元内叠加响应不同波段的多个吸收层,在不需要复杂光学系统的条件下,实现多谱段在时间、空间响应完全同步的目的,,在提升探测距离的同时也大大提高了探测精度<sup>[9]</sup>。

2) 红外偏振探测在目标与背景的温差较小、对比度较小的情况下,仍会具有较好的探测效果,同时不同的目标由于材料、观测角、表面粗糙度等因素的差异,会表现出不同的红外偏振特性,因此在复杂背景光干扰、雾霾散射光的环境下,偏振探测在清晰目标轮廓、突出目标信息方面有很大的优势,更加有利于实现对远距离目标的探测识别。目前像素级偏振集成的红外探测器是未来的发展趋势,包括超表面相位调制、偏振敏感吸收器等,其避免了传统方法偏振片的增加,简化了光学系统设计,降低了成本,真正意义上实现了偏振焦平面一体化<sup>[9-10]</sup>。

3) 红外相位探测通过检测目标散射光的相位能够获得目标的距离信息,实现对低慢小目标实现更精确地探测<sup>[9]</sup>。传统相位调制的方法需要在光学系统中增加干涉仪、调制器等器件,但是其精度较低、光学系统设计复杂,已经无法满足当前对光学系

系统集成化及小型化的要求,表面微结构是未来实现相位调制的发展趋势。以最近备受关注的超表面为例,通过周期性的亚波长单元的排列构成二维超材料,其排列方式和结构尺寸决定了此超材料的光学特性,可通过利用亚波长单元在交界面处的光波相位突变来实现对任意电磁波的相位调制,其小型化和平面化有望取代传统的光学系统<sup>[9-11]</sup>。

当前探测器的高低角俯仰范围有限,无法匹配雷达大俯仰范围的视场,红外探测器件以提高时间分辨率、空间分辨率、面阵大小、灵敏度、宽动态范围等性能为目标来提升对目标的感知。在此基础上,未来光电探测系统的重点将集中在多维感知方面,需要将强度、多光谱、偏振、相位等多维光场信息进行融合,弥补复杂作战环境下单一维度信息的不足,通过多维信息的优势互补实现对目标信息的增强,提高目标在复杂背景下的对比度,从而提升光电系统的探测识别能力;尤其针对远距离下低慢小目标的暗弱特点以及伪装目标的近似红外特征,增强光电探测系统的侦察能力,进一步提升光电探测系统在复杂环境、极端气候下的适应能力。

### 3.2 大视场与高分辨兼容的需求

对于光电搜索跟踪一体的系统,受限于当前红外探测器件的发展水平,目前的光电系统难以同时满足成像对大视场和高分辨的要求,导致系统的探测视场与识别距离相互制约。传统的使用多个面阵探测器件进行焦平面机械拼接的方法受限于当前芯片的制造工艺,无法解决相邻成像器件之间的非感光缝隙的问题,不能完整成像,且此方法成本较高,系统过于复杂,满足不了当前对光电探测系统小型化低成本的要求<sup>[12]</sup>。受启于生物系统的作用机理,未来光电探测系统的设计方向是模拟构建仿生的系统结构,基于鹰眼、人眼、昆虫复眼等生物来设计仿生的光学系统,增大系统的视场范围,提高关键区域的空间分辨率(图2)。

鹰眼具有高灵敏度、大视场搜索、远距离探测和识别精度高的特点,其采用侧中央凹和正中央凹的交叠视场搜索目标,确定目标后再使用具有高空间分辨率的正中央凹观察识别目标,即双目视觉进行搜索目标,单目视觉识别目标<sup>[13]</sup>。而人眼视网膜的两种感光细胞在视网膜不同位置的分布密度也各不相同,在人眼视网膜的外周地带,视杆细胞的数目占

绝对优势,但在靠近视网膜中心“中央凹”区域,视锥细胞却高度密集,起到了类似增加像素的效果,显著提高了此处的视觉分辨率,因此出现了视网膜中央物体分辨率高而处于视网膜外周的物体不易被清晰分辨的现象。

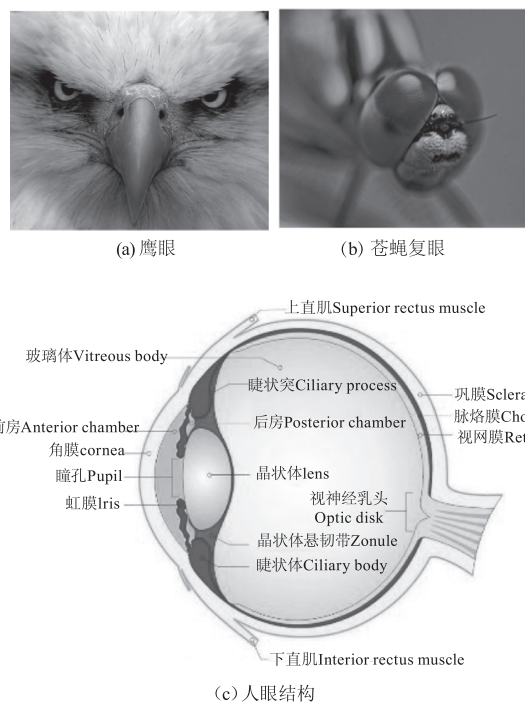


图2 生物的眼睛结构

Fig. 2 Eye structure of organisms

从系统的角度来看,鹰眼类似于多个子系统的集成,人眼类似于多尺度像元集成分布,仿鹰眼与人眼的研究主要集中在功能性仿生和结构性仿生。针对当前光电系统大视场与高分辨的需求,构建多孔径的成像系统,通过多个探测器的光学拼接实现超大视场。美国的机载对地侦察系统 ARGUS-IS 使用 4 个共轴的分系统拼接,满足大视场高分辨的同时,避免了直接对焦平面成像器件进行机械拼接时光敏面周围的封装导致的视场盲区问题<sup>[12]</sup>。文献[14]提出了四个边缘子孔径与一个中央高分辨孔径集成的多孔径系统,其中 4 个边缘子孔径的视场进行视场拼接,可构成系统成像大视场,实现了仿鹰眼多系统的集成;根据人眼的特点,可以将边缘子孔径的探测器应用大像元,而中央孔径的探测器应用小像元,从而实现中央孔径在大 F 数的条件下具有更高的分辨率,同时 4 个边缘子孔径利用光学或者机械装置产生亚像素的偏移,使得“交集”视场构成的重叠视场区域能够进行超分辨图像重构,在中央高分辨

孔径的基础上,实现变分辨率的图像融合,提升对目标的识别能力。在实际使用过程中,通过四个边缘子孔径拼接的大视场进行全景搜索,目标告警后,跳转中央高分辨孔径实现高分辨识别,克服传统光电系统设计结构的视场盲区,实现真正大的高低角覆盖,完成与雷达能力的匹配。

昆虫复眼均由许多微小光学单元组成,复眼在自身体积极小的情况下,通过众多的子眼数目拼接实现极大的视场,根据生物复眼成像特性的异同,其主要包括并置型复眼和重叠性复眼两大类,其中重叠性复眼由于各子眼相互关联,具有较强的光灵敏度,但是会导致像差较大,影响最终的分辨率,因此目前的仿生复眼的结构多设计以并置型复眼为主<sup>[15]</sup>。文献[16]建立了并置仿生复眼光学系统,同样由中心光学系统和边缘阵列子眼光学系统组成,给出了紧凑型子眼系统架构,避免了相邻子眼的机械干涉,在增加空间分辨率的同时提高了空间利用率;文献[17]重点阐述了美军在大视场仿生复眼光电探测技术的发展现状,可以看出仿生复眼在作战武器装备中的应用优势。未来复杂战场环境下,复眼特殊的成像机制为解决光电探测系统大视场条件下的目标高分辨探测、识别和跟踪问题提供了明确的解决思路。

### 3.3 复杂场景低虚警探测与高精度识别的需求

城市、山地等复杂的作战场景下,系统搜索的大视场中会出现多种背景杂波,如何在复杂场景中排除云层、飞鸟、光照、噪声以及遮挡等干扰,准确地检测和识别出缺乏特征信息的低慢小目标是亟需解决的难题。同时,面对战场环境目标的未知性,要求算法在检测过程中对目标大小具有较好的鲁棒性,而传统的检测算法主要通过滑动窗口去提取候选区域的目标特征后进行匹配,时间复杂度高且鲁棒性较差;基于深度卷积神经网络的算法建立的多尺度目标检测模型能够较好地适应目标尺度的变化,但是在复杂背景下,目标外观信息会受到背景的干扰,无法适应环境的变化,算法精度降低<sup>[18-19]</sup>。受启于生物视觉系统,在复杂环境下,生物视觉可以有效应对环境变换从而快速捕捉目标位置<sup>[20]</sup>,因此可以借鉴生物脑机制,基于生物关键视皮层脑区的机制解析,建立视觉计算模型,并将其与当前主流的计算机视觉算法相融合,在当前高灵敏

度、宽动态范围、多维感知的红外探测器的基础上,提出类脑智能算法。

以灵长类为代表的生物脑是已知的智能水平最高的系统,其视觉感知的鲁棒性和准确性远超当前的深度学习技术。从生物视觉的信息处理过来看,人类视网膜的光感受细胞接受外界的光刺激形成神经电信号,向上传递后分成用于运动信息提取的大细胞通路和用于细节提取的小细胞通路两条信息通路,然后视神经将电信号传递给外侧膝状体后,再传到大脑皮层进行高级语义的处理<sup>[20]</sup>。人类的视觉信息加工是时空不可分离的,其大细胞通路能够通过细胞间的时空滤波变换有效提取视觉运动信息完成复杂环境下的目标检测识别;同时,视觉皮层作为视觉系统中的核心部分,其腹-背侧通路分别处理表观信息和运动信息,并同时互相投射,因此,借鉴人脑双通道并行处理机制和交互投射机制,充分利用运动信息对目标检测过程进行引导,可以提高计算效率,同时将运动信息和表观信息在时空维度进行融合,提高视频目标检测的准确率。目前业内普遍认为借鉴生物视觉运动机制对提升目标检测识别的智能化水平具有重要意义。文献[20]~[21]引入人类视网膜算法提取图像中目标的运动信息,并将其与YOLO算法融合,解决了在外观信息不明显情况下的检测虚警问题,极大地提高了无人机在复杂背景下的探测概率;文献[22]从生物视觉系统得到启发,模拟视觉系统不同模块具有不同的功能,在深度网络中引入复杂的分块机制效果,并验证了这种拓扑结构的实用性,在降低算法计算复杂度的同时,提高了对目标的识别能力。

运动目标的识别前提是保持对目标的稳定跟踪,城市、山地等复杂背景下会遇到跟踪过程中前景遮挡导致目标跟踪丢失的现象,如何克服背景干扰与前景遮挡也是当前的重点与难点。现有的跟踪算法只能简单应对部分遮挡场景,无法解决密集遮挡、完全遮挡、长时间遮挡场景下的稳定跟踪,算法的鲁棒性与实时性还需要进一步改善,而人类视觉的记忆信息和强依赖的先验知识有益于进行场景理解,但是当前的先验学习模型能耗较高无法满足使用<sup>[23]</sup>。而最符合生物神经元机制的脉冲神经网络(SNN)的出现,对解决具有较高的实时性和精确度要求的任务有较高的应用价值,其以脉冲序列的形

式在神经元之间传送信息,具有低能耗高信息处理效率的特点<sup>[24]</sup>。SNN 能够自然地编码异步事件流,同时由于输出脉冲触发的原则,离散噪声事件无法对脉冲神经元的隐藏状态引起足够大的变化以引发输出脉冲,因此,离散噪声事件将被抑制,该方法具有较强的稳定性。基于事件流和遮挡图像帧作为输入,构建 SNN 与人工神经网络的混合模型,预期能够合成无遮挡的清晰场景图像,解决密集遮挡、完全遮挡、长时间遮挡情况下基于帧的方法中缺失有效视觉信息的问题。

### 3.4 多目标跟踪定位的需求

无人机集群作战将成为未来战场环境中的重要角色,不同个体携带不同的载荷,通过信息共享实现在复杂战场态势下的情报侦察、目标打击等任务,因此在无法对当前的集群目标进行威胁等级判断时,需要对当前视野中出现的个体进行跟踪来判断其属性,因此如何实现对集群中多个目标的跟踪定位是当前光电探测系统需要解决的难题。相较单目标跟踪,多目标跟踪除了需要适应目标形变、背景杂波等因素外,还需要额外考虑目标数量不确定、多目标轨迹关联、目标相互遮挡、轨迹交叉等问题<sup>[25]</sup>。近年来,基于深度学习的多目标跟踪算法取得了显著的突破,主流的两类算法包括基于检测跟踪 DBT 和联合检测跟踪 JDT 两类,其中 DBT 算法中目标检测、特征提取、数据关联各模块之间的关联度较低,且存在较多冗余,导致算法的准确度和效率较低;JDT 算法将多模块融合学习,提升了跟踪性能,但是其强依赖于检测器的效果,对于复杂背景下远距离的低慢小目标,目标占据像素点较少,目标表观特征不足,对目标的检测和匹配有很大的影响,从而最终降低了跟踪算法的性能<sup>[25-27]</sup>。因此,在远距离低慢小目标表观特征失效的场景下,如何开发低外观特征依赖的高效可靠的多目标跟踪方法,是需要解决的关键问题。

表观特征的降低甚至是难以获取,需要将重点放在目标运动特征上。目前大多数方法都集中在二维下的多目标跟踪,而三维下的跟踪可以提供更准确的目标位置和大小估计,对于深度学习而言,获取更多维度的信息能够保证信息输入的完备性,从而更有效地提取运动特征,因此光电探测系统中的测距机需要高效使用,实现对视场内多目标的快速定

位。传统的光束扫描方式通过机械装置移动反射镜使其扫描方位和俯仰来保证覆盖整个空间,但是此方法效率较低,实时性不高,且难以实现小型化。微纳精密光束调控器件是未来实现目标快速定位的重要方向,其中 MEMS 振镜阵列通过在其基底材料上加工微型反射镜及驱动线圈,通过控制驱动线圈中的电流使微振镜进行摆动,改变激光指向,多个 MEMS 振镜的拼接扩展了 MEMS 振镜偏转角度的范围,实现了大范围扫描,在高重频高灵敏度测距机的基础上,实现对大视场范围内多目标的实时测距<sup>[28]</sup>;光学相控阵(Optical Phased Array, OPA)通过控制 OPA 芯片的光相位实现出射光束快速扫描和对不同目标的精确瞄准,且速度更快、精度更高<sup>[29]</sup>;由亚波长尺度的单元结构排布组成的超构表面也提供了变革性的方案,将超构表面与 MEMS 集成,超构表面作为反射调制器件,通过 MEMS 驱动超构表面产生形变实现光束扫描<sup>[30]</sup>。

在实现多目标定位的基础上,可以充分发挥深度学习对运动特征的学习。人类视觉在视线跟踪、自适应机制等方面具有先天优势。人眼视网膜的光感受器分布不均匀,中央凹具有很高的视敏度,能够有效识别微小目标;而视网膜周边部分却无法识别微小目标,但对给物体运动等刺激有很高的敏感性。当目标较小时,人眼跟踪目标不再依赖目标的外观特征,而更多地是基于目标的位置和轨迹等先验信息。人类视觉的这种特性和处理方法对于跟踪算法具有一定的启发性,因此可以将以人类视觉的注意力机制为基础,结合基于深度学习的运动特征提取方法,针对远距离的低慢小目标,开发基于注意力机制的多目标跟踪方法,缓解外观特征失效对于小目标跟踪的影响,实现对多目标的精确跟踪。

## 4 结论

通过对俄乌战争无人机作战现状的分析,可以看出,无人机及无人机群将会成为未来军事对抗的重要目标,而光电探测已经成为预警探测必不可少的探测手段,但是光电探测技术仍需进一步提升。

针对光电探测系统的发展现状,本文分析了当前光电探测在复杂作战场景下面对的主要挑战难题,同时给出了不同难题下的解决思路,针对快速发现目标的难题,可以引入多维感知的光电探测器,将

强度、多光谱、偏振、相位等多维光场信息进行融合,通过多维信息的优势互补来提升系统的探测识别能力,满足光电系统大视场远距离探测的需求;针对探测发现与跟踪识别矛盾的难题,需要突破传统探测技术体制,基于鹰眼、人眼、昆虫复眼等生物设计仿生的光学系统,增大系统的视场范围的同时提高关键区域的空间分辨率,满足光电系统大视场与高分辨的需求;针对复杂背景检测识别困难的难题,可以引入跨学科的思维理念,基于生物关键视皮层脑区的机制,建立视觉计算模型,使用类脑智能算法,满足光电系统复杂背景下低虚警率探测及高精度识别的需求;针对集群式多目标饱和攻击的问题,引入 MEMS 振镜、OPA 芯片、超构表面等微纳光束调整器件实现对多目标的精确定位,在基于深度学习的运动特征提取算法的基础上,开发基于人类视觉注意力机制的多目标跟踪算法,实现对战场集群目标的态势分析。

实现大视场远距离探测、兼容大视场与高分辨、满足复杂背景下低虚警探测与高精度识别、具备多目标定位跟踪能力是未来光电探测系统的发展趋势,通过光电探测技术的提升,最终实现与雷达能力的匹配。

#### 参考文献:

- [1] Sun Gang. Research on key technologies of target detection in large field of view infrared search system[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015. (in Chinese)  
孙刚. 大视场红外搜索系统目标检测关键技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2015.
- [2] Liu Guangfei. Development of photoelectric networking detection system[D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Technology, 2019. (in Chinese)  
刘广飞. 光电组网探测系统开发[D]. 西安:西安电子科技大学, 2019.
- [3] Cai Yi, Wang Lingxue. 9 problems in infrared imaging technology[J]. Infrared Technology, 2013, (11): 671 - 682. (in Chinese)  
蔡毅, 王岭雪. 红外成像技术中的 9 个问题[J]. 红外技术, 2013, (11): 671 - 682.
- [4] Chen Zhaofeng, Li Yong. Research on the development of infrared search and tracking technology[J]. Modern Defense Technology, 2009, 37(2): 116 - 118. (in Chinese)  
陈兆峰, 李勇. 红外搜索跟踪技术发展研究[J]. 现代防御技术, 2009, 37(2): 116 - 118.
- [5] Wang Yingli. The third generation infrared search and tracking(IRST) system[J]. Laser & Infrared, 2009, 39(10): 1017 - 1021. (in Chinese)  
王颖丽. 第三代红外搜索和跟踪(IRST)系统[J]. 激光与红外, 2009, 39(10): 1017 - 1021.
- [6] Zhai Shangli, Bai Junqi. Key technologies and solutions of infrared search and tracking system[J]. Command Information System and Technology, 2013, 4(6): 59 - 64. (in Chinese)  
翟尚李, 白俊奇. 红外搜索跟踪系统的关键技术和解决途径[J]. 指挥信息系统与技术, 2013, 4(6): 59 - 64.
- [7] Liu Zhonglin. Research on infrared dim small target detection method in complex background[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020. (in Chinese)  
刘忠林. 复杂背景下的红外弱小目标检测方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2020.
- [8] Guo Jiaxiang, Xie Runzhang, Wang Peng, et al. Multi-dimensional infrared photodetector[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2022, 41(1): 40 - 60. (in Chinese)  
郭家祥, 谢润章, 王鹏, 等. 多维度红外光电探测器[J]. 红外与毫米波学报, 2022, 41(1): 40 - 60.
- [9] Ye Zhenhua, Li Huihao, Wang Jindong, et al. Frontier hotspots and innovation trends of infrared photodetectors[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2022, 41(1): 15 - 39. (in Chinese)  
叶振华, 李辉豪, 王进东, 等. 红外光电探测器的前沿热点与变革趋势[J]. 红外与毫米波学报, 2022, 41(1): 15 - 39.
- [10] Niu Jiyong. Research on key technologies for acquiring infrared polarization characteristics of space targets[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015. (in Chinese)  
牛继勇. 空间目标红外偏振特性获取关键技术研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2015.
- [11] Zhang Xiaodong. Research on generation method of near-infrared vortex beam based on geometric phase hypersurface[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Machinery, Chinese Academy of Sciences, 2020. (in Chinese)  
张晓冬. 基于几何相位超表面的近红外涡旋光束产生



- 方法研究[D]. 西安:中国科学院西安光学精密机械研究所,2020.
- [12] Zhang Xiang. Research on photoelectric detection system of long-range target based on field of view stitching[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Precision Mechanics and Physics, University of Chinese Academy of Sciences, 2020. (in Chinese)
- 张祥. 基于视场拼接的远距离目标光电探测系统研究[D]. 长春:中国科学院大学,长春光学精密机械与物理研究所,2020.
- [13] Yang Daokun. Target search and target area spatial resolution improvement technology with large field of view imitating eagle eye[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016. (in Chinese)
- 杨道锟. 仿鹰眼大视场目标搜索与目标区域空间分辨率提高技术[D]. 北京:北京理工大学,2016.
- [14] Liu Peng, Ding Hongjie, Zhang Wang. Research on eagle eye large field of view high-resolution intelligent imaging system[J]. Progress in Laser and Optoelectronics, 2022, 59(4): 29-37. (in Chinese)
- 刘鹏,丁红杰,张旺. 仿鹰眼大视场高分辨智能成像系统研究[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(4): 29-37.
- [15] Hu Xuelei. Research on large field curved bionic compound eye imaging system[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020. (in Chinese)
- 胡雪蕾. 大视场曲面仿生复眼成像系统研究[D]. 西安:西安工业大学,2020.
- [16] Fu Yuegang, Zhao Yu, Liu Zhiying, et al. Design of compact bionic compound eye optical system for target recognition[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(6): 602001. (in Chinese)
- 付跃刚,赵宇,刘智颖,等. 用于目标识别的紧凑型仿生复眼光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(6): 602001.
- [17] Song Yanfeng, Hao Qun, Cao Jie, et al. Research and development of photoelectric imaging detection technology of bionic compound eye with large field of view[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(5): 20210593. (in Chinese)
- 宋岩峰,郝群,曹杰,等. 大视场仿生复眼光电成像探测技术的研究发展[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(5): 20210593.
- [18] Wu Yanfeng. Research on "low, small and slow" target detection technology in complex background[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Precision Mechanics and Physics, University of Chinese Academy of Sciences, 2020. (in Chinese)
- 吴言枫. 复杂背景下“低小慢”目标检测技术研究[D]. 长春:中国科学院大学,长春光学精密机械与物理研究所,2020.
- [19] Luo Huilan, Peng Shan, Chen Hongkun. Overview of the latest research progress on difficult issues of target detection[J]. Computer Engineering and Application, 2021, 57(5): 36-46. (in Chinese)
- 罗会兰,彭珊,陈鸿坤. 目标检测难点问题最新研究进展综述[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(5): 36-46.
- [20] Chen Mingsong. Research on target detection method of small UAV inspired by biological vision[D]. Henan: South China University, 2021. (in Chinese)
- 陈明松. 生物视觉启发的小型无人机目标检测方法研究[D]. 衡阳:南华大学,2021.
- [21] Chen Mingsong, Wang Gang, Li Xing, et al. UAV target detection based on retinal large cell pathway calculation model and deep learning[J]. Mathematical Theory and Application, 2020, 40(3): 65-76. (in Chinese)
- 陈明松,王刚,李棕等. 基于视网膜大细胞通路计算模型和深度学习的无人机目标检测[J]. 数学理论与应用, 2020, 40(3): 65-76.
- [22] Chen Bing. Research on depth network and image detection and recognition inspired by biological vision[D]. Shanghai: Donghua University, 2020. (in Chinese)
- 陈兵. 生物视觉启发的深度网络与图像检测识别研究[D]. 上海:东华大学,2020.
- [23] Xie Guorong, Qu Yi, et al. Overview of tracking algorithms based on anti-occlusion target model[J]. Progress in Laser and Optoelectronics, 2022, 59(8): 14. (in Chinese)
- 谢郭蓉,曲毅等. 基于抗遮挡目标模型的跟踪算法综述[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(8): 14.
- [24] Xu Min. Pulse neural network and its application in target tracking[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)
- 徐敏. 脉冲神经网络及其在目标跟踪中的应用研究[D]. 武汉:华中科技大学,2020.
- [25] Zhang Yao, Lu Huanzhang, Zhang Luping, et al. Overview of visual multi-target tracking algorithms based on depth learning[J]. Computer Engineering and Application, 2021, 57(13): 55-66. (in Chinese)
- 张瑶,卢焕章,张路平,等. 基于深度学习的视觉多目标跟踪算法综述[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57

- (13);55-66.
- [26] Liu Wenqiang, Qiu Hangping, Li Hang, et al. Overview of deep online multi-target tracking algorithm[J]. Computer Science and Exploration, 2022. (in Chinese)  
刘文强, 裘杭萍, 李航, 等. 深度在线多目标跟踪算法综述[J]. 计算机科学与探索. 2022.
- [27] Luo Wenhan, Xing Junliang, Anton Milan, et al. Multiple object tracking; a literature review. computer vision and pattern recognition[J]. arXiv:1409.7618. 2022. (in Chinese)  
罗文瀚, 邢俊良, Anton Milan, 等. 多目标跟踪: 文献综述. 计算机视觉与模式识别 [J]. arXiv: 1409.7618. 2022.
- [28] Li Xiaolu, Zhou Yier, Bi Tengfei, et al. Overview of the development of key technologies of lightweight sensing lidar[J]. China Laser, 2022, 49(19):1910002. (in Chinese)  
李小路, 周依尔, 毕腾飞, 等. 轻量型感知激光雷达关键技术发展综述 [J]. 中国激光, 2022, 49(19):1910002.
- [29] Tao Min. Research on drive and control technology of optical phased array all-solid-state laser radar[D]. Jilin: Jilin University, 2022. (in Chinese)  
陶敏. 光学相控阵全固态激光雷达驱动与控制技术研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2022.
- [30] Chi Hanbin, Duan Huigao, Hu Yueqiang. Application of hypersurface in 3D imaging and display technology[J]. Optical Precision Engineering, 2022, 30(15):1775-1801. (in Chinese)  
池汉彬, 段辉高, 胡跃强. 超构表面在三维成像与显示技术中的应用[J]. 光学精密工程, 2022, 30(15):1775-1801.