

无人机光电信息装备转型发展思考

王惠林 刘吉龙 尹海林 姜世洲

Reflections on transformational development of unmanned aerial vehicle electro-optical information equipment

WANG Huilin, LIU Jilong, YIN Hailin, JIANG Shizhou

引用本文:

王惠林, 刘吉龙, 尹海林, 等. 无人机光电信息装备转型发展思考[J]. 应用光学, 2025, 46(3): 473–480. DOI: 10.5768/JAO202546.0311001

WANG Huilin, LIU Jilong, YIN Hailin, et al. Reflections on transformational development of unmanned aerial vehicle electro-optical information equipment[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(3): 473–480. DOI: 10.5768/JAO202546.0311001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0311001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

无人机光电对抗技术研究

Research on UAV photoelectric countermeasure technology

应用光学. 2021, 42(3): 377–382 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0301001>

航空光电侦察技术发展研究

Development of aviation electro-optical reconnaissance technology

应用光学. 2022, 43(5): 825–832 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0509001>

无人机光电设备对地目标单站无源定位方法

Method of single-station passive location to ground target by UAV photoelectric equipment

应用光学. 2022, 43(4): 599–610 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0401003>

无人机载光电载荷自主侦察的参数计算与分析

Parameter calculation and analysis of autonomous reconnaissance for UAV-borne photoelectric payload

应用光学. 2024, 45(5): 930–936 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0501007>

激光供能无人机的一种优化跟踪算法

Optimal tracking algorithm for laser powered unmanned aerial vehicles

应用光学. 2020, 41(1): 194–201 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0107002>

基于改进YOLOv4的低慢小无人机实时探测算法

Improved YOLOv4 for real-time detection algorithm of low-slow-small unmanned aerial vehicles

应用光学. 2024, 45(1): 79–88 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0102002>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 03-0473-08

引用格式: 王惠林, 刘吉龙, 尹海林, 等. 无人机光电信息装备转型发展思考 [J]. 应用光学, 2025, 46(3): 473-480.

WANG Huilin, LIU Jilong, YIN Hailin, et al. Reflections on transformational development of unmanned aerial vehicle electro-optical information equipment[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(3): 473-480.



在线阅读

无人机光电信息装备转型发展思考

王惠林, 刘吉龙, 尹海林, 姜世洲

(西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 深入分析国内外无人机光电信息装备发展现状, 研究并提出新形势下未来无人机光电信息装备发展趋势。在此基础上, 从大国体系对抗、现代战争启示和国内行业共识等方面, 重点论述新形势下无人机光电信息装备转型发展的需求, 同时提出无人机光电信息装备转型发展在体系建设、装备发展、军民融合和基础创新等方面的几点建议。最后, 对无人机光电信息装备转型发展进行总结, 强调其要走出一条创新发展之路。

关键词: 无人机; 情报侦察监视; 光电信息装备; 转型发展

中图分类号: TN206

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202546.0311001](https://doi.org/10.5768/JAO202546.0311001)

Reflections on transformational development of unmanned aerial vehicle electro-optical information equipment

WANG Huilin, LIU Jilong, YIN Hailin, JIANG Shizhou

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: The current development status of electro-optical information equipment for unmanned aerial vehicles (UAVs) was deeply analyzed domestically and internationally, and the development trend in the future of UAVs electro-optical information equipment under new circumstances was studied and proposed. Building on this foundation, the demands of transformation and development of UAVs electro-optical information equipment were emphasized and discussed from the aspects of confrontation among major power systems, insights from modern warfare, and domestic industry consensus. Additionally, several recommendations were put forward regarding the transformation and development, encompassing system construction, equipment development, civil-military integration, and foundational innovation. Finally, the transformation and development of UAVs electro-optical information equipment was summarized, emphasizing the necessity of pursuing a path of innovative development.

Key words: unmanned aerial vehicle; intelligence reconnaissance and surveillance; electro-optical information equipment; transformation and development

引言

光电(光电子)技术是对电子技术的发展与突破, 同时也是信息科技和产业支撑技术^[1]。源于光电(光电子)技术的光电信息装备, 以“立体

监视、全域透明、多维感知、智能认知”为特征, 在目标搜索捕获瞄准、情报侦察监视、告警对抗、驾驶导航等领域得到了广泛的应用^[2-3]。

随着美国马赛克战、多域战等新型作战概念

收稿日期: 2025-03-28; 修回日期: 2025-04-08

基金项目: 国家自然科学基金(62203353)

作者简介: 王惠林(1971—), 男, 硕士, 研究员, 主要从事航空光电总体研究。E-mail: wanghuilin1971@sina.com

的涌现与发展,未来作战领域不断扩展,平战界线更加模糊,作战样式更加多变,电磁和网络环境日益复杂^[4]。从战斗力生成模式角度,战争形态正在加速演进,多域作战、分布式作战等已成为现代战争的主要形式,杀伤网链快速闭合已成为战场制胜内核逻辑;从装备能力建设角度,聚焦复杂作战环境,突出战役战术层级物理域、信息域、认知域等多域能力分布部署和即时聚优释能,加速体系弹性融合,为塑造对敌全域感知、智能指控、多域瘫体优势提供持续支撑;从技术发展角度,大数据、云计算、人工智能等技术快速更新迭代,科技创新赋能的装备智能化正沿着“装备辅助智能、武器平台自主智能和联合作战装备体系智能”路径交迭演进、螺旋上升。

1 无人机光电信息装备发展现状

1.1 国外发展现状及特点

一是装备体系建设方面,国外光电装备更加注

重支撑军兵种在宽广时空范围内分布部署、协同行动和弹性杀伤网链敏捷闭合的情报监视侦察体系中发挥作用。

2018年12月,美国海军正式提出分布式海上作战(distributed maritime operations, DMO)概念,旨在利用分配、整合和机动原则,在选定的时间和地点实现对敌方大规模压倒性作战力量 and 效果^[5-7]。美国海军一体化火控-防空(naval integrated fire control-counter air, NIFC-CA)系统是贯彻DMO思想的典型代表,其系统架构如图1所示,将传感器、先进数据网络、远程防空导弹武器系统综合集成,实现平台分布部署、信息网络融合、一体化超视距快速协同制空的海上防御作战体系^[8]。美国空军正在开发先进战斗管理系统(advanced battle management system, ABMS)^[9],以创造更灵活、更有弹性和更加致命的杀伤链,通过装备跨域操作,并在由传感器和平台组成的大型网络上快速共享信息,从而增强杀伤链在对手反制措施下的弹性。



图1 美国海军一体化火控-防空(NIFC-CA)系统架构

Fig. 1 Architecture of U.S. naval integrated fire control-counter air (NIFC-CA) system

2023年10月,第20届美国陆军协会年会暨博览会在华盛顿特区举办。会上,美国陆军官员宣称,美国陆军正在实施一项情报、监视和侦察(intelligence, surveillance and reconnaissance, ISR)架构现代化战略,其中包括太空、陆地和空中领域的量子计算和商业卫星通信。美国陆军在情报、监

视和侦察方面的转型将在三个层面进行:一是太空层,利用政府和商业太空资源;二是空中层,如图2所示由载人的高精度探测和开发系统(high-accuracy detection and exploitation system, HADES)以及无人平台组成;三是地面层,包括旅级战斗队和旅级以上部队的地面层系统。其中,HADES包

含了以下三个目标: 一是为“空射效应”项目 (air launched effects, ALE) 提供高空情报监视侦察能力 (包括电子情报、通信情报、光学侦察、合成孔径雷达侦察、移动目标指示和网络/电子战传感), 支撑美国陆军构建多层次协同“侦察-打击-评估”一

体化作战集群; 二是通过高空无人机 (工作高度在 18 000 m 以上) 在空中层和太空层之间架起桥梁, 为作战提供可靠的定位导航和授时; 三是在更高高度和更远距离提供多维融合, 跨区域协同感知能力, 创建一体化战场态势图^[10]。

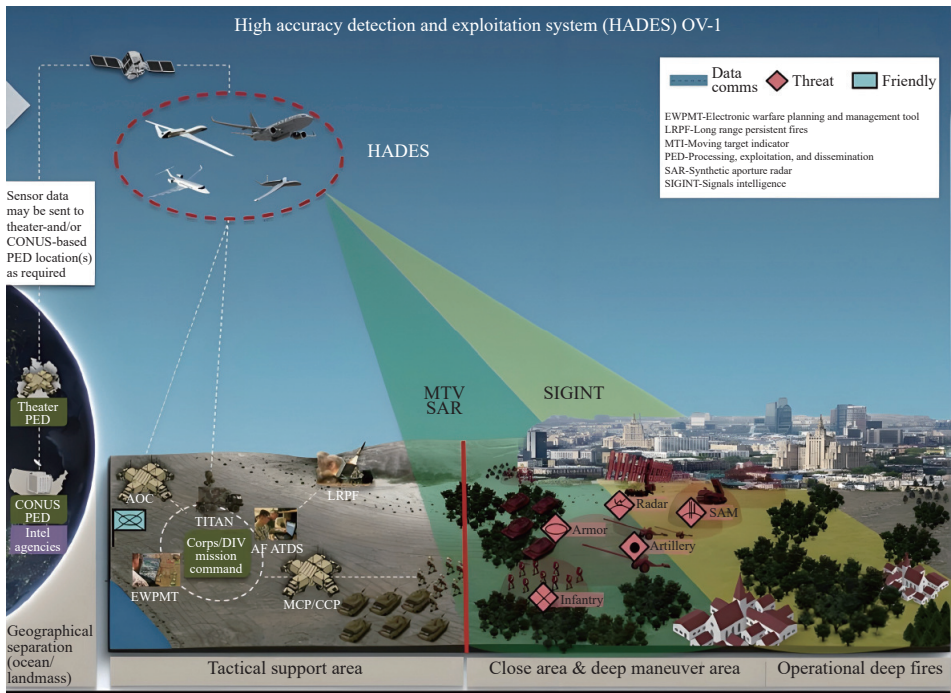


图 2 美军高精度探测和开发系统 (HADES)

Fig. 2 High-accuracy detection and exploitation system (HADES) of U.S. military

二是装备能力建设方面, 国外光电装备正在发生五个转变: 一是从点/面目标探测向多维探测转变; 二是从基于图像的“所见即所得”向融合多源传感信息的态势感知转变; 三是从“数据采集传感器”向“传感器+数据互连+情报生成/分发”边缘智能转变; 四是从支撑“平台”作战向支撑“体系”作战转变; 五是从“整机应用”向“技术应用”转变。

如图 3 所示, 国外光电装备转型发展的代表性产品包括: 美国雷声公司推出的“下一代”光电智能传感识别系统 RAIVEN, 主要特点除传统光电探测和高光谱成像外, 集成了激光雷达创建环境 3D 图像, 其 AI 算法自动识别潜在威胁, 减少操作员认知负担的同时提升了决策和行动效率。同时采用开放式架构, 多任务能力强, 提升了多域作战能力^[11]; 美国雷声公司研制的 MS-110 侦察吊舱, 具备远程多光谱广域探测成像能力的同时, 集成了信息互联数据链和情报生成软件包^[12]; 以色列

RAFEL 公司研制的 Litening-5 多功能吊舱, 包含了数据传感单元-吊舱、信息互联单元-数据链和情报构建单元, 不仅是一个全天候空空/空面瞄准吊舱, 而且是一个情报、监视、目标捕获和侦察系统, 支持激光、GPS 和光电/红外成像制导多类型空面智能弹药, 并且具备空面广域持续监视能力^[13]; 上述典型产品反映了国外对于单一光电装备的理解已经不局限于信息采集, 而是包含了信息互联和情报构建的内涵。此外, 随着光电装备从支撑“平台”作战向支撑“体系”作战转变, 可消耗的低成本智能光电信息装备发展成为完成作战应用目标的又一有效方式^[14]。近年来, 在“俄乌冲突”中应用的巡飞弹和蜂群无人机上采用的光电装备就是很好的例证。这些光电装备虽然功能单一, 性能不高, 但利用群体间形成的能力互补、信息通联共享, 并结合智能算法, 在全域灵敏打击、集群侦察监视、战术欺骗干扰、战场清缴攻坚等任务中发挥了显著作用。

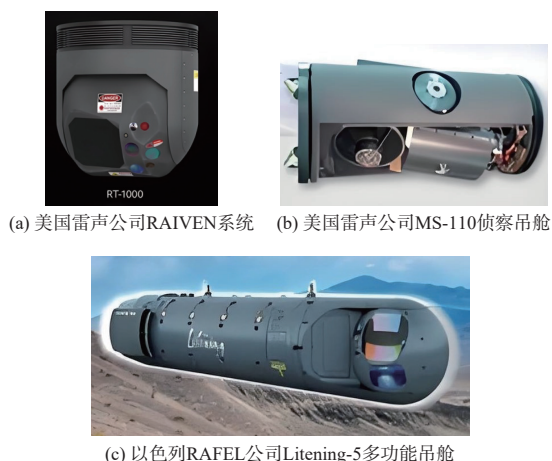


图3 国外光电装备转型发展的代表性产品

Fig. 3 Representative products of transformation and development of foreign electro-optical equipment

1.2 国内发展现状及特点

国内无人机光电装备经历了从对外引进、跟踪仿研到自主创新的发展阶段,目前正逐步向更高层次的自主创新迈进^[15]。这一发展历程不仅体现了国内技术实力的提升,也反映了对无人机光电装备需求的日益增长。从早期对国外先进光电技术的引进和消化吸收,到如今在核心技术和系统集成能力上的突破,国内无人机光电装备已经形成了完整的研发体系和生产能力,已经形成了适于各型无人直升机、固定翼无人侦察机、攻击无人机、小型旋翼/系留型无人机等平台的系列化光电装备,并衍生出与无人机保形、具备隐身特性的光电装备。这些装备不仅支持传统的昼夜侦察和战场监视任务,还扩展至广域监视、远程预警、目标瞄准定位、武器精确制导以及光电对抗等多样化作战任务。装备特性逐步向高集成度、多功能、智能化和隐身化方向发展,展现出较强的综合性能和多样化应用能力。

总体来看,国内无人机光电装备的发展呈现出以下特点:首先,情报侦察监视能力的支撑层级较低,主要局限于前端单一来源的时、空、影像数据采集,缺乏对后端多源数据接入、管理、保护、通信、关联和融合等面向服务的数据流创建的深入开发,导致体系化情报支撑能力较弱。这种能力的不足使得情报系统的整体效能难以充分发挥,难以满足现代战场对实时化、智能化、协同化情报需求的提升。其次,装备谱系和产业链较为完整,但在高性能与低成本的协调发展方面与国外存在差距,基础能力如理论研究、材料和器件创新能力

相对薄弱。这种差距不仅体现在高端光电器件和高性能传感器等领域,还反映在基础研究的深度和广度上,制约了装备整体性能的提升和成本的优化。最后,“平台牵引”和“整机应用”仍是光电信息装备发展的主要模式,装备与平台、产品与技术的解耦能力不足,军民融合发展潜力尚未充分释放,技术转化效率较低。这种现象导致技术成果难以快速转化为实际应用,同时也限制了产业链的协同创新和发展活力。

尽管国内无人机光电装备在技术上取得了显著进展,但与国际先进水平相比仍存在差距,主要体现在高集成度、智能化和隐身化等方面的不足。例如,在高集成度方面,国外已开始采用更先进的光电系统集成技术,能够实现多种传感器和功能模块的高度融合,而国内在这方面仍有提升空间;在智能化方面,国外已经开始探索人工智能技术在光电装备中的深度应用,如自主目标识别、智能任务规划等,而国内在智能化算法和应用深度上仍需加强;在隐身化方面,国外已将隐身技术与光电系统设计深度融合,能够实现更低的雷达和红外信号特征,而国内在这一领域的技术成熟度和应用范围仍有待提高。

2 无人机光电信息装备发展趋势

随着人工智能、云计算、大数据等新一代信息技术发展的推动,未来战争基本形态正在从以信息力/协合力为核心的信息化战争向以智力/算力为核心的智能化战争发展。在此背景下,无人机光电装备的角色定位、功能需求,以及对整个作战行动的支撑作用及影响意义都将发生深刻转变^[16]。

2.1 无人机光电信息装备仍是情报侦察监视的重要手段,但内涵与外延发生深刻变化

一方面,无人机光电信息装备的内涵不断深化。传统的光电装备主要依赖于可见光和红外波段的探测,但随着激光雷达、太赫兹、高光谱成像等新型光电技术逐渐应用于情报侦察领域,使得光电装备能够获取更精准、全面的目标信息;同时,与人工智能技术的结合不断强化,光电装备不仅要“看得清、看得远、看得广”,还要“识得准”,即具备高效、客观、快速的目标情报获取及处理能力;此外,作为一体化联合作战背景下“决策中心战”的重要组成部分,光电装备不只是无人机的任务载荷,更重要的是以无人机为平台成为情报侦

察感知网络强节点, 承担战场态势感知及快速情报处理的角色。另一方面, 无人机光电信息装备的外延不断拓展。首先, 功能不断拓展, 从单纯的侦察监视向分布式多任务方向发展, 如目标跟瞄、广域侦察、导航定位、预警对抗、通信组网等多功能一体; 其次, 与网络通信、云计算、边缘智能等技术深入结合, 使光电装备快速融入作战体系, 实现杀伤链敏捷闭合。另外, 装备与技术解耦, 用军用优势技术开发民用特色产品, 加速产业发展。

2.2 平台牵引仍是光电信息装备发展的重要推手, 但信息赋能势在必行

无人机光电装备将逐步迈向智能化、网络化、协同化发展进程, 单纯依靠无人机平台牵引的方式已无法满足装备发展需求, 信息赋能势在必行。通过信息赋能更加合理、有效地发挥光电信息装备战斗力, 提升其在一体化联合作战中的体系贡献率(这也是我们将光电装备称为光电信息装备的原因)。首先, 信息赋能可以提升光电信息装备的智能化水平。通过引入人工智能、机器学习等技术, 光电装备能够完成态势评估、自动识别目标并判断威胁等级, 评估备选行动方案并自主规划无人机侦察路线, 以此提高平台侦察和打击效率。其次, 信息赋能可以增强光电装备的自主协同水平。利用先进的感知、导航、光通信技术, 光电装备可在复杂环境中辅助或引导无人机(群)自主飞行、避障、定位、侦察、攻击等行为, 减少其对外部指挥控制系统的依赖, 提高无人机(群)独立作战能力。此外, 信息赋能可以提升光电装备的网络化水平。通过与其它侦察、指挥和打击系统无缝链接, 光电装备在信息通联和资源共享基础上, 建立面向作战服务架构的数据流, 持续更新目标作战图像态势、威胁和 ISR 传感器任务分配, 实现决策优势, 提高体系作战效能。

3 无人机光电信息装备转型发展需求

随着技术发展, 未来战场范围越来越宽广, 作战空间及作战样式正在向陆、海、空、天、电、网等全域联合作战拓展, 作战模式显现认知中心战特点^[17,18]。为应对战争形态变化及对战场情报侦察监视带来的挑战, 无人机光电装备转型发展迫在眉睫。

3.1 大国对抗下的体系化作战对光电装备发展提出新要求

体系层面, 大国对抗下的多种分布式作战概念

要求无人系统在机动、网关、导航、情报、火力、防护、保障、指控等关键功能上提供支撑, 强调多域装备协同作战, 发挥体系优势; 装备层面, 高空广域监视无人机、隐身长航时战略侦察无人机、隐身加油无人机、隐身制空无人机、对地攻击无人机、高超声速飞行器等平台, 要求光电装备多任务综合和态势感知能力强。低端无人机突出低成本可消耗、自主协同能力, 包括蜂群无人机、巡飞弹、无人僚机等要求光电装备成本低、适装性强、边缘智能化程度高; 技术层面, ISR 任务由作战单元执行单域情报分析发展为融合分布式跨域作战单元的情报数据的全域分析, 并建立面向作战服务架构的数据流^[5], 支撑分布式作战和杀伤网链快速闭合。

3.2 “俄乌冲突”和“巴以冲突”等对光电装备发展带来新启示

“俄乌冲突”中, 美国利用低轨卫星星座-“星链”、E-8C 联合预警机、RC-135 全频段战略侦察机、RQ-4“全球鹰”侦察无人机、P-8A“海神”巡逻机等侦察平台系统为乌克兰提供天基、空基战场情报信息和气象、导航、通信等服务, 为乌军获取对俄情报优势、实现战场单向透明发挥了积极作用; 同样, 俄军采用天基预警卫星探测火箭弹尾迹预估目标位置, 结合有人侦察机或无人机获取目标坐标, 引导火力对乌远程火力武器系统实施精确打击; “巴以冲突”中, 哈马斯通过改装多旋翼无人机投掷弹药, 成功摧毁以军机枪炮塔, 紧接着向以色列发射大量火箭弹, 并运用包括动力滑翔伞在内的多种“低慢小”飞行器, 规避以军地面雷达监测, 成功突破以色列防线; 伊朗伊斯兰革命卫队向以色列发动饱和式空袭打击, 采用“低成本自杀无人机、巡航导弹和弹道导弹”相结合的模式, 以最小的代价实现较大的作战效果。上述战例对光电装备发展的启示: 一是现代战争是信息力、火力、兵力等资源的协同联动, 构建一体化的情报网络和全域多源数据协同处理, 缩短杀伤网链闭合时间才是决胜关键; 二是光电装备要有效融入作战体系, 形成跨域近实时情报监视侦察支撑能力; 三是高低端光电装备各有用武之地, 信息赋能是关键; 四是多层级“反无”能力体系构建现实且迫切。

3.3 国内传统赛道竞争已现“红海厮杀”局面, 谋划新赛道成为业内共识

国内从事无人机载光电装备研制生产的单位

主要集中在各个军工集团,中国科学院和民营企业三大板块。产业链发展相对齐全,各单位借助内外部资源和各自优势力量,不断扩大产品布局,竞争日趋复杂和白热化。需求与发展之间的矛盾日益突出,一方面,产业链各层级研制单位在传统光电产品重叠率不断扩大,“价格战”、“技术、产品、能力等单体要素优势已不足以确保竞争领先”等现象频繁发生,传统赛道“红海厮杀”局面已现;另一方面,国内高质量与低成本的协调发展矛盾突出,如何采用创新技术提升复杂环境下的装备效能,怎么实现光电装备对体系情报能力强支撑仍存在诸多短板弱项,面对竞争、创新和经济形势压力,谋划新赛道已成为业内同行都在积极探索的脱困出路。

4 无人机光电信息装备转型发展建议

无人机光电装备的转型发展需要做好三个转变:一是观念转变,传统光电装备以单装发展为主线,强调性能提升和谱系拓展,忽视装备间的协同效能发挥。观念转变就是紧盯国家需求,以装备体系化、网络化、智能化发展和运用为主导,强调装备间协同交互和杀伤链敏捷闭合,重视多装整体效能发挥;二是模式转变,传统光电装备以平台发展为牵引,以整机应用促进产业发展和专业技术进步。模式转变就是“军民融合”两条腿走路,“军用”实现平台与装备解耦,光电(信息)装备不只是无人机的任务载荷,更是情报侦察监视网络强节点;“民用”实现产品与技术解耦,找准市场定位,由整机民用向技术民用转变,双向互动,促进降本增效,加速产业发展;三是抓手转变,传统光电装备建立在麦克斯韦电磁场理论和香农信息论基础上,以被动光强探测、经典力学、模块化集成等技术支撑研制迭代,在加速变革的战争形态对情报监视侦察的广域、持久、敏捷、远程、智能等能力的支撑上已显吃力,抓手转变既要挖潜传统技术,加强信息通联、智能算法、电磁感知加持,提升光电(信息)装备体系融入能力,又要强化量子传感、微纳制造等创新技术,开辟新质新域赛道。

4.1 深度传感,构建立体广域多维情报侦察感知体系

在“支持远程远海作战的预警探测与精确打击、支持作战全过程的跨域多维情报保障、辅助决策与协同控制下的集群作战”等需求牵引下,以

高、中、低空分布式无人机为平台,以多域(天空地海立体域)多维(光频、电频、地理空间信息等)光电信息装备互联、互通、互操作为抓手,围绕跨域杀伤链快速闭合,构建具有多域分布、异质多源、互联互通、动态重组、敏捷智能、迭代演进等特征的立体广域多维情报侦察感知体系,体系架构如图4所示,需要关注两个方面:一是围绕区域情报侦察监视及目标杀伤网快速构建任务,发展火力控制、战术指挥等多层级战术综合情报处理系统,建立面向作战服务架构的数据流。依据网络信息订阅机制,实现态势情报信息的按需分发和智能推送;二是构建动态拓扑重构的智能光网联系统,与微波数据链互为备份。

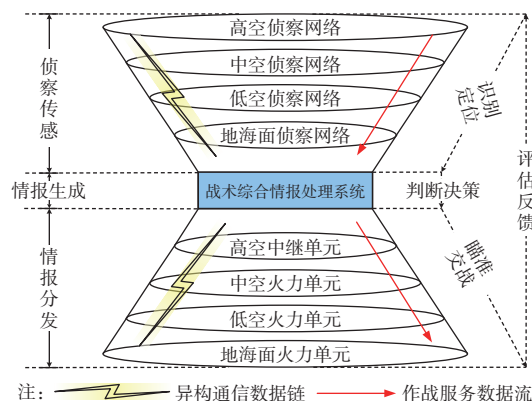


图4 立体广域多维情报侦察感知体系“双漏斗”模型

Fig. 4 Double funnel model of three-dimensional wide-area multidimensional intelligence reconnaissance and perception system

4.2 围绕需求,树立“远、多、高、智”装备特色

聚焦新时期备战打仗对“远程大范围战场态势感知”能力提升的紧迫需求,围绕“非传统情报侦察监视”方向,通过信息赋能,逐步构建并完善无人机光电信息装备与技术体系,树立远(远程探测感知)、多(多任务与多种类)、高(高分辨力与高精度稳定)、智(智能感知与体系融入敏捷)的无人机光电信息装备特色。

4.3 优化布局,促进军民融合发展

面对竞争、创新和经济形势的变化,走军民融合发展道路,是适应经济周期发展规律,增强企业抗风险能力的必由之路。一方面,完善民品开发管理流程,规范统一接口标准和协议,发展谱系化产品;注重产品与技术解耦,化整为零,孵化发展通用化、规模化军民两用特色产品;识别自身优势,瞄准国民经济建设需求,寻求发展机遇。另一

方面,技术双向转移转化,保证装备技术优势。在军品研制中借力民用技术,“反哺”军事技术创新,降低成本的同时,提升效能,保证装备技术优势。

4.4 夯实基础,开辟新质新域赛道

信息时代的特征之一就是战术与技术的紧耦合,从军事任务而言,新技术更有利于实现全域感知、杀伤网链快速闭合、远程交战等作战优势;从军民融合发展而言,把握技术变革带来的机遇与挑战,更是弱者崛起、强者衰退的前奏。因此,针对现有装备存在的问题,夯实基础,深化量子传感、微纳制造等新质新域技术研发,是光电装备转型发展的重要举措。

5 结论

正如丹尼·格雷厄姆在《高边疆-新的国家战略》一书中所说:“历史上,凡是能够最有效的从人类活动的一个领域迈向另一个领域的国家,都能获得巨大的战略优势。军事领域是竞争最激烈的领域,谁勇于走新路,谁就能占得先机”^[19]。无人机光电信息装备转型发展的核心思想也是如此。未来无人机光电装备要走出一条既有新原理、新材料、新技术的持续赋能,又有信息化、网络化和智能化的创新运用,还有军民融合产业特色的发展之路,才能在国家建设中不断发挥积极作用。

参考文献:

- [1] KASAP S O. Optoelectronics and photonics: principles and practices[M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2016: 212-235.
- [2] 向世明,高教波,焦明印,等.现代光电子成像技术概论[M].北京:北京理工大学出版社,2010: 173-190.
XIANG Shiming, GAO Jiaobo, JIAO Mingyin, et al. Introduction to modern optoelectronic imaging technology[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2010: 173-190.
- [3] 王春龙.军用光电侦察装备发展需求研究[R].长春:第二届军用光电技术发展论坛,2019.
WANG Chunlong. Research on development needs of military photoelectric reconnaissance equipment[R]. Changchun: The 2nd Defense Electro-Optics Forum, 2019.
- [4] SAPATY P S. Mosaic warfare: from philosophy to model to solutions[J]. Multimedia Systems, 2019(5): 157-166.
- [5] JIM S, WILL W, JIHANE M, et al. Naval ISR fusion principles operations and technologies[M]. Dedham: Artech House, 2023: 55-67.
- [6] KEVIN E, STEVE M. Operationalizing distributed maritime operations[R]. San Francisco: Center for International Maritime Security, 2019.
- [7] BRAITHWAITE K J. Advantage at sea prevailing with integrated all-domain naval power[R]. Washington D. C.: Department of the Navy, 2020.
- [8] 华卿,石静,郭勇,等.美国海军一体化火力控制-制空能力解析[J].国防科技,2016,37(2): 50-53.
HUA Qing, SHI Jing, GUO Yong, et al. Analysis of naval integrated fire control-counter air[J]. National Defense Technology, 2016, 37(2): 50-53.
- [9] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Advanced battle management system: needs, progress, challenges, and opportunities facing the department of the air force[R]. Washington D. C.: The National Academies Press, 2022.
- [10] FABIJANOWICZ J R. Design of experiments for air launched effects unmanned aerial vehicles[R]. San Francisco: Center for International Maritime Security, 2020.
- [11] 雷神技术公司. RAIVEN 智能传感器的多光谱融合和人工智能识别研究[J].王润荣,译.新光电,2024,18(1): 79-84.
Raytheon Technologies Corporation. Research on multi-spectral fusion and artificial intelligence recognition of RAIVEN intelligent sensors[J]. WANG Runrong, translated. EO Frontiers, 2024, 18(1): 79-84.
- [12] ROBIN H. Rafael adds SAR capability to Litening 5, Reccelite XR EO pods[R]. London: Jane's International Defence Review, 2019.
- [13] 李永昆,林招荣,张绪国.国外远距斜视航空相机发展概况[J].航天返回与遥感,2017,38(6): 11-18.
LI Yongkun, LIN Zhaorong, ZHANG Xuguo. Development survey of foreign aerial cameras for distant oblique reconnaissance[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2017, 38(6): 11-18.
- [14] 徐泽宇,郝峰,王永周.智能无人集群作战发展现状及关键技术挑战[C]//2019弹药技术发展学术研讨会.重庆: [出版者不详], 2019: 472-478.
XU Zeyu, HAO Feng, WANG Yongzhou. Development status and key technical challenges of intelligent unmanned swarm combat[C]//2019 Seminar on Ammunition Technology Development. Chongqing: [s. n.], 2019:

- 472-478.
- [15] 王惠林, 刘吉龙, 宁飞, 等. 航空光电装备智能化发展需求及趋势[J]. 国防科技, 2023, 44(5): 20-25.
- WANG Huilin, LIU Jilong, NING Fei, et al. Requirements and trend of intelligent development for airborne optoelectronic equipment[J]. National Defense Technology, 2023, 44(5): 20-25.
- [16] 刘静怡, 司思. 美军无人系统及相关技术发展特点[J]. 国防科技, 2023, 44(5): 75-82.
- LIU Jingyi, SI Si. Advancements and characteristics of intelligent technologies in U. S. military unmanned systems[J]. National Defense Technology, 2023, 44(5): 75-82.
- [17] 李晓文. 美国空军多域指挥控制发展研究[C]//第七届中国指挥控制大会. 北京: [出版者不详], 2019: 199-203.
- LI Xiaowen. Development of multi-domain command and control for the United States air force[C]//The 7th China Conference on Command and Control. Beijing: [s. n.], 2019: 199-203.
- [18] 邓启文, 刘书雷, 吴集. 国防颠覆性技术推动军事智能化发展[J]. 国防科技, 2023, 44(5): 46-50.
- DENG Qiwen, LIU Shulei, WU Ji. Military intelligence promoted by disruptive defense technologies[J]. National Defense Technology, 2023, 44(5): 46-50.
- [19] GRAHAM D O. 高边疆-新的国家战略[M]. 张健志, 马俊才, 傅家祯, 等, 译. 北京: 军事科学出版社, 1988: 92-117.
- GRAHAM D O. The high frontier-a new national strategy[M]. ZHANG Jianzhi, MA Juncai, FU Jiazhen, et al, translated. Beijing: Military Science Press, 1988: 92-117.