

空间目标态势感知及多源数据融合技术发展与应用

高欣, 赵志远, 银鸿, 孙迎萍, 史亮, 王鷗

(兰州空间技术物理研究所 真空技术与物理重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 天基空间目标态势感知系统作为空间威胁目标运动状态监测和特性测量的重要手段, 与地面感知手段相比, 具有独特优势, 成为当今世界航天领域的发展热点。面对空间杂光背景噪声干扰下远距离空间暗弱目标与隐身、伪装等复杂目标精确识别与测量的感知需求, 依靠单一的空间态势感知手段远远不能满足未来空间对抗的发展需求。多传感器数据融合技术能弥补单个传感器感知能力的不足, 使它们发挥各自的优势, 形成对空间目标态势情形更加清晰、完整的多维感知描述, 在扩展目标感知信息的时空覆盖性、增强目标识别能力与降低误检率方面具有明显优势。在分析主要航天国家空间目标态势感知能力及态势感知信息融合技术发展现状基础上, 研究梳理相关技术与装备发展情况、未来发展趋势, 并给出空间目标态势感知数据融合应用实例, 最后提出我国太空态势感知系统发展的启示和建议, 为我国发展天基空间目标态势感知和多源数据融合技术, 加快构建天基空间态势感知一体化技术体系提供参考。

关键词: 态势感知; 数据融合; 空间目标; 多传感器; 空间安全

中图分类号: V447; TP73

文献标志码: A

文章编号: 1006-7086(2023)06-0543-12

DOI: 10.3969/j.issn.1006-7086.2023.06.002

Development and Application of Space Target Situation Awareness and Multi-source Data Fusion

GAO Xin, ZHAO Zhiyuan, YIN Hong, SUN Yingping, SHI Liang, WANG Yi

(Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory,

Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The space-based target situational awareness system, as an important means of monitoring the motion status and characteristic measurement of space threat targets, has unique advantages compared to ground situational awareness methods and has become a hot development topic in the world's aerospace field. In the face of the perception demand for accurate recognition and measurement of dim targets, stealth, camouflage and other complex targets in remote space under the interference of space background noise, relying on a single means of space situational awareness is far from meeting the development demand of future space confrontation. Multi sensor data fusion technology can make up for the lack of perception ability between different sensors, give their respective advantages, and form a clearer and more complete multi-dimensional perception description of the situation of space targets. It has obvious advantages in expanding the space-time coverage of target perception information, enhancing target recognition ability and reducing false detection rate. Based on the analysis of the current development status of space target situational awareness capabilities and situational awareness information fusion technology in major aerospace countries, this article summarizes the development status, future progress and trends of relevant technologies and equipment, and provides examples of spatial situational awareness data fusion applications. Finally, it proposes suggestions for the development of China's space situational awareness system, which will contribute to the development of space-based space target situational awareness and multi-source data fusion technology, accelerating the construction of an integrated technology system for spatial situational awareness to provide reference.

Key words: situation awareness; data-fusion; space target; multi sensors; space security

收稿日期: 2023-03-28

作者简介: 高欣, 高级工程师, 主要从事空间态势光电综合感知技术研究。E-mail: gaixin510@163.com

引文信息: 高欣, 赵志远, 银鸿, 等. 空间目标态势感知及多源数据融合技术发展与应用[J]. 真空与低温, 2023, 29(6): 543-554.

GAO X, ZHAO Z Y, YIN H, et al. Development and application of space target situation awareness and multi-source data fusion[J]. Vacuum and Cryogenics, 2023, 29(6): 543-554.

0 引言

随着全球航天活动的不断增加,空间碎片、工作和失效卫星、保护罩、进入空间轨道的助推火箭和其他物体日益增多,空间碰撞问题越来越严重;各类天地基武器平台干扰攻击、人为非合作目标抵近侦察等问题日益突出,使得各国更加重视空间目标态势感知能力的发展。

空间目标态势感知系统必须具备空间威胁源的识别和预警能力,感知太空潜在威胁征兆、探测和识别太空攻击事件类型、确定攻击来源、判断对手实际意图等。实际应用中,要对己方航天器周围一定范围内的空间目标进行精确探测、识别与跟踪,确定可能对航天器构成威胁的空间目标的位置、形状尺寸、外观特征和轨道参数等重要特性,进一步对目标不同特性数据进行归类,并按不同层次用户需求进行分发,为空间战场管理与指挥决策提供全面的数据和信息支持^[1-3]。天基目标态势感知不受传统地基态势感知的地理空间、大气环境等条件限制,能够有效弥补地基系统探测能力的不足,二者优势互补有望实现全域全时空间目标态势感知能力,成为当今世界主要军事强国空间态势感

知体系建设的重点^[4-9]。

高精度、高分辨率传感器技术的发展与应用使获取的空间目标信息的质量和数量大幅提升,然而空间目标态势感知系统所用传感器种类繁多,数据类型差异性较大、数据间关系复杂甚至相互矛盾,使对态势感知信息的准确利用造成困难,因此,对多传感器感知信息的有效管理和快速挖掘成为天基目标态势感知系统亟待解决的问题。采用高效数据处理算法,可以实现对不同类型空间目标态势感知信息的融合处理,去除不同传感器间的重复信息,排除虚假干扰信息,增强战场环境态势感知与目标识别能力,最终形成可靠有效的作战信息。

本文在调研国外天基空间目标态势感知装备部署现状和天基态势感知数据融合应用的基础上,梳理技术发展趋势和发展动向,分析我国空间安全形势,针对当前天基空间态势感知面临的问题和难点,提出面向实际战场环境的天基态势感知数据融合技术应用模式,为我国未来战场环境中天基信息的有效利用提供参考。图 1 给出的是本文关于空间目标态势感知及多源数据融合技术结构框架及研究思路。

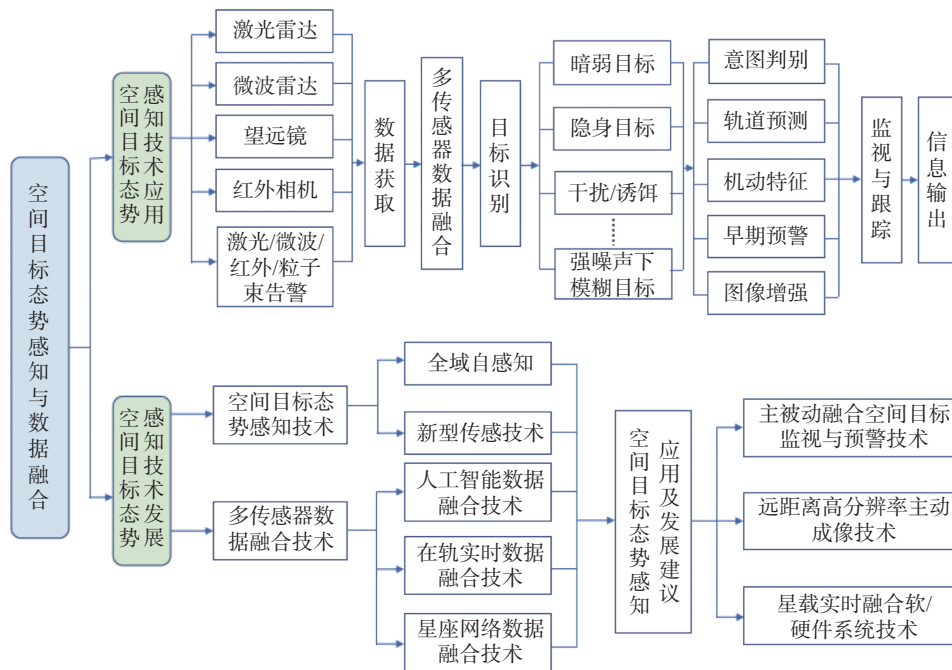


图 1 空间目标态势感知及多源数据融合技术结构框架

Fig. 1 Framework for space target situation awareness and multi source data fusion technology

1 空间目标态势感知国内外研究现状与发展趋势

1.1 空间目标态势感知发展背景

空间目标态势感知的概念最早由美军提出^[1]。

1998 年 8 月,美空军发布了第一个《太空作战条令》,指出态势感知是太空作战计划人员应该考虑的问题之一。随后在历次《太空作战》条令修订过程中,

态势感知的概念内涵被不断丰富。2018年4月10日,美军发布了新版《联合出版物3-14:太空作战》条令(以下简称《太空作战》条令),对太空态势感知概念范畴进行了新的界定:态势感知是进行太空作战的基础。太空态势感知是对太空目标、太空作战所依赖的作战环境,以及所有实施或准备实施太空作战的实体的全部要素、活动和事件的基本情况、现状和发展的认知和描述,包括物理的、虚拟的以及信息和人力维度。2019年10月,美航天司令部在—项通知中写道,太空态势感知更名为太空域感知。通知将“太空域感知”定义为“识别、表征和辨别与太空域相关、可能影响到太空作战并进而影响美国安保、安全、经济或环境的任何被动或主动因素”。本文所述空间目标态势感知属于空间态势感知概念范畴,具体指对空间合作或非合作目标特征信息与行为的感知。

1.2 美国空间目标态势感知装备技术

美国的空间目标态势感知系统由地基和天基系统两部分组成^[10-13]。地基系统的部署位置受限,观测区域存在死角,此外还受观测高度、观测时间和天气等条件限制,导致太空目标监视能力受到制约,主要表现在:对高轨太空目标、南半球上空目标的监视能力有限,对特定目标的连续监视跟踪能力有限,碰撞预警与目标识别的虚警率过高;不具备直径小于10 cm的空间碎片监测能力,难以确保航天系统运行安全和空间活动机构操作任务顺利执行。一般载人航天器可防护直径小于1 cm的空间碎片撞击,而1~10 cm空间碎片、大气和太阳光会对地基光学望远镜观测产生较大影响,因而采用天基光学观测方式成为最佳手段,无需地基雷达提供轨道参数,可保证碰撞预警的时效性。为此,本文主要研究天基空间目标态势感知系统发展现状与趋势。

在天基空间目标态势感知系统方面,美军重点发展低轨光学与高轨巡视系统相结合的天基态势感知体系。目前在轨运行的10颗空间监视卫星,均采用了高低轨组合配置,具备空间目标及时重访和战术态势感知能力。位于LEO的天基空间监视系统(SBSS),带有一台安装在万向架上的口径30 cm的三反消色散光学系统,可以快速扫描、识别、跟踪低轨至高轨目标,特别是静止轨道的卫星、天基机动平台和空间碎片等目标,主要用于目标探测和及时重访、高价值目标看护、目标分离探测等。位于LEO轨道的作战响应空间-5(ORS-5)卫星首

次采用“几何优化太空望远镜”概念,可实现GEO轨道目标连续快速搜索与识别,主要用于GEO全弧段目标精确测轨和探测等。据推测,位于GEO的4颗“地球同步轨道太空态势感知计划”卫星(GSSAP)的光学载荷选用安装于万向架上的约60 cm口径的侦查相机,具有较强的调焦能力,支持近距详查和远距巡视,能够对特定目标进行多角度立体观测;同时携带有无线电探测载荷,可收集卫星发射的无线电信号,主要用于GEO局部弧段巡视和抵近侦察、卫星目标特性获取、威胁目标跟踪、己方高价值卫星附近区域巡查等。部署在GEO轨道下方准同步轨道的EAGLE飞行器,被称为第四代空间态势感知试验技术验证星。资料显示,该飞行器搭载的有效载荷主要有高光谱时域相机、小型可操控卫星、逆合成孔径激光雷达、环境探测和弹性航天器平台系统,主要用于探索卫星成像新方法,演示弹性卫星平台技术等。部署在略高于坟墓轨道高度上的“太空监视小卫星系统”(S5),是美国发展的太空态势感知小卫星星座试验星,有效载荷是一台30 cm口径的先进光学系统,主要用于GEO全弧段目标跟踪监视,对高价值航天器进行重点侦察监视。此外,美军的低轨“空间跟踪与监视系统”(STSS)导弹跟踪监视卫星也具备一定的太空目标跟踪监视能力;加拿大“蓝宝石”(Sapphire)太空监视卫星数据汇入美国太空监视网(SSN),也为美军提供态势感知能力^[14-15]。目前,国外空间态势感知卫星处于高度保密状态,无法查到卫星外观结构及载荷的相关资料,只能给出一些典型卫星的效果图,如图2~4所示^[15-17]。其中,图2中的GSSAP卫星由地面望远镜与雷达控制,抵近并搜集空间目标特征信息。图3中的EAGLE卫星用于探索卫星成像新方法、验证弹性卫星平台。图4中的S5小卫星星座用于探测和定位近GEO空间目标,以更快地更新GEO目标数据库。

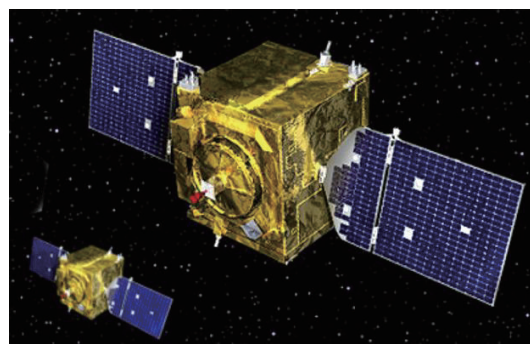


图2 美国Orbital ATK公司研制的GSSAP卫星
Fig. 2 GSSAP satellites developed by American Orbital ATK



图 3 美国 Orbital ATK 公司研制的 EAGLE 卫星
Fig. 3 EAGLE satellite developed by American Orbital ATK

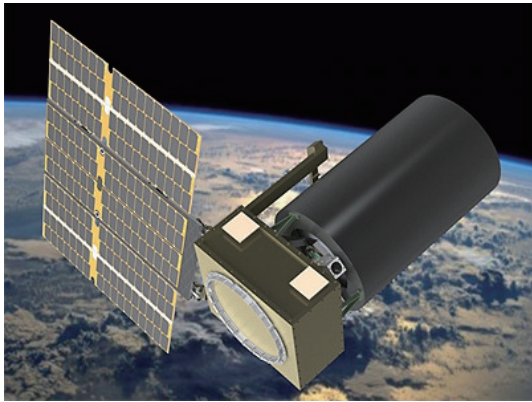


图 4 美国 Blue Canyon Technologies 公司研制的 S5 小卫星星座

Fig. 4 S5 small Satellite constellation developed by American Blue Canyon Technologies

目前,美军正加速推进新型天空间目标态势感知系统的装备部署和研发工作,推动新一代 GSSAP、SBSS 和 S5 等后续系统的研制或方案论证,快速提升空间态势感知能力。随着未来 S5 等星座态势感知系统的部署,美军将初步建立起空间目标全域全天时持续跟踪与高分辨率监视装备体系。

1.3 我国空间安全的威胁分析

高轨卫星大多是具有重要军事应用价值的高价值卫星。由于地面观测手段难以实时掌握高轨战场动态,因此,高轨态势感知装备自主化、智能化成为必然要求。近十多年来,美军突破了单星近场威胁自主感知、自主交会抵近控制、自适应空间武器对抗、自感知损伤评估等技术,初步具备“侦-控-打-评”全闭环、人工智能辅助的高轨攻防作战能力。美国空间态势感知领域技术的发展,使其能够获取目标精确的外观特征、轨道参数、位置(方位和距离)、速度等信息,可以为其地基或天基反

卫星武器平台的进攻、作战效果评估提供精确的信息保障。美国 CLIO 卫星属于美高度保密的国家侦察局的“复仇女神”情报通信卫星系列,该星在轨道间多次以机动方式抵近他国高轨卫星,利用电子侦察手段侦听他国卫星语音和通信数据^[18]。据不完全统计,2019 年 5 月份以来 CLIO 卫星频繁抵近我国高价值卫星,可能已经侦听到我国高轨卫星大量关键数据,并推断出我国关键装备的技术体制和实战能力。美在近地球同步轨道已部署 6 颗 GSSAP 卫星,每个卫星在各自轨道弧段区域往复巡视,监视目标异动情况,并具备目标交会、绕飞和抵近侦察能力。自发射以来对包括我国在内的多国高轨卫星多次进行抵近成像和技术侦察,获取目标特性,用于作战情报准备。据美突破防守网报道^[19],2020 年 8 月,美国 GSSAP-4(USA271)在地面操纵下开始接近实践 20,如图 5 所示。

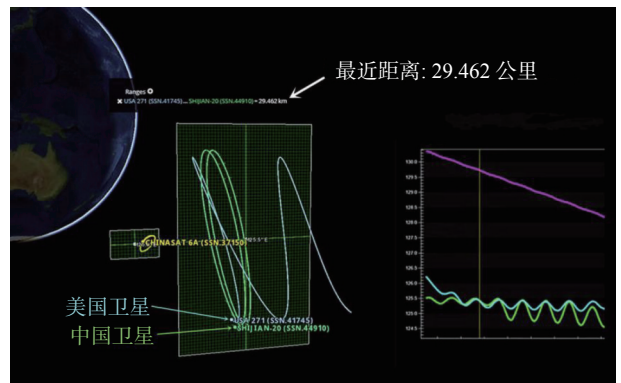


图 5 美国 GSSAP-4 接近中国实践 20 号卫星的情况
Fig. 5 US GSSAP-4 approaching Chinese SJ-20 satellite

图 6 为从 2023 年 1 月开始,美国 GSSAP-5(USA324)卫星与我国 SJ-23 号卫星的经度及倾角接近情况随时间的变化^[20]。

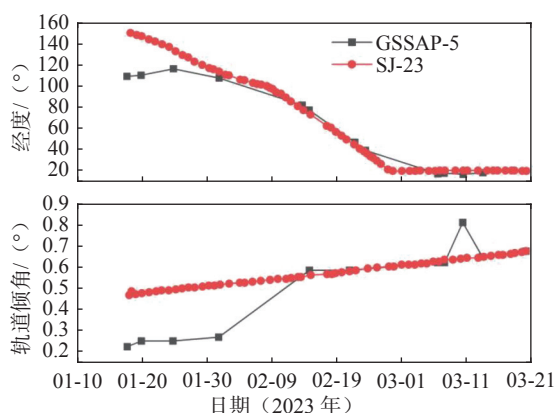


图6 美国 GSSAP-5 卫星接近我 SJ-23 号卫星情况

Fig. 6 American GSSAP-5 satellite has been approaching Chinese SJ-23 satellite since January 2023

从美国现阶段的试验内容来看,美国已具备微纳卫星轨道预置、机动部署、交会和抵近能力,卫星携带不同的有效载荷即可实现不同功能和手段的攻防。美国 EAGLE、PODS 等卫星的预置投送装备均采取了模块化设计,可根据任务需要安装各类侦察和攻防有效载荷以及微纳卫星,当需要时释放,实施攻击,当有威胁时释放,实施护卫作战^[12, 16, 21]。其中, EAGLE 高轨机动飞行器可携带 6~12 个各类侦察和攻防有效载荷以及挂载微纳卫星,既可作为高轨态势感知和对抗平台,又可作为隐秘机动部署平台。EAGLE 携带逆合成孔径激光雷达进行了高轨目标成像试验,在轨释放了 1 颗 Mycroft 和 2 颗 ARMOR 攻防试验微卫星并进行了轨道攻防试验。PODS 能够安装次级有效载荷挂架和吊舱,美军已经利用装载 PODS 的同步轨道卫星在轨部署了 S5 监视星座试验星。预置的投送装备投放的微纳卫星主要包括护卫和攻击两类卫星,通常具备较强的感知和轨道机动能力,可对来袭威胁目标告警、查证和拦截,也能够对空间目标进行主动攻击。

美国利用 GSSAP 和 CLIO 等装备星多手段常态化收集目标特性数据,建立高轨目标特征与行为数据库,发展 S5 高轨空间态势感知小卫星星座,构建高轨目标持续感知与特性获取体系,为未来智能化作战的空间目标特性与行为大数据训练与分析奠定数据库基础^[22]。美国在空间态势感知装备与技术体制的新发展,使得其在空间态势感知领域方面的优势地位得到进一步巩固,在未来的空间态势感知与攻防对抗中更容易发挥先发制人的优势。

1.4 发展趋势分析

(1) 发展全域多方位自主态势感知能力

未来空间攻防作战将会是在地球轨道空间甚至包含整个地月空间的不同方式、不同烈度等级的对抗行为,对空间态势感知手段与数据分析能力提出了极高要求,即必须具备自主发现潜在威胁源,获取目标特性数据,判断威胁目标作战意图,评估威胁等级的能力,为决策指挥提供全方位的即时战场态势与进程信息。当前各国空间态势感知系统主要是以空间目标在轨编目、识别与跟踪为作战目标而设计的,无法满足不同层级对抗与作战对空间态势感知的需求。

美军近年大力发展卫星自主态势感知技术,通过高低轨协同感知、多方位多手段侦测、目标与环境特性自主学习、感知数据重建等技术手段,自主感知卫星周边环境的近场态势,不仅能够对威胁目标进行精密跟踪和严密监视,而且可以通过多方位多手段侦察和特性数据分析,推断目标的任務功能、活动规律,外观特征与构型、载荷配置与性能等信息,分析对方卫星的行为特征,判断其意图,从而自主采取抵近侦察、规避、主动驱离等相应措施^[22-23]。通过发展全域多方位自主态势感知能力,实现对空间目标的精准感知、异动告警,了解敌方的战略和战术意图及能力,是空间态势感知未来的重要发展方向。

(2) 发展模块化标准化新型空间态势感知传感器

对空间目标任何重要特征信号(视觉信号、热信号、电磁信号、光信号等)的感知能力可能成为数据融合增强目标识别的信息源,在某些场合某种感知手段力所不及时,其他感知手段将会保证卫星具备持续识别与跟踪能力。感知新技术的出现将会改变未来空间态势感知的模式与认知,例如量子传感器技术的出现,使得小型化宽频带无线电信息感知装备成为可能,可以准确定位发射频率在 0~100 GHz 的目标所处的位置,而传统天线需要多个天线、放大器等复杂组件。

美国开展了一系列新型空间态势感知传感器的研制。这些传感器覆盖了粒子束、紫外、可见光、红外、X 射线、太赫兹、射频谱段等,采用小型化、标准化、模块化设计理念,具有宽谱段、高灵敏度、超快响应速度、大动态范围等优点,针对不同卫星平台和载荷具有较好的兼容性,应用于卫星环境与人为辐射威胁探测和告警。未来态势感知手段不仅需要准确侦察、定位、识别空间目标的能力,而且还应当具备在无法“看见”目标情况下的准确探测、定位目标的能力。近年来,美国军事卫星设计

逐步向着隐身、隐蔽入轨、隐藏作战特征方向发展,这对空间态势感知技术手段提出了更高的要求。因此,发展新的感知技术、感知方法、感知体系、感知理论与概念,是未来重要的研究方向。

2 空间态势感知数据融合研究现状和发展趋势

2.1 空间态势感知数据融合概念

20 世纪 70 年代,美军为了探测潜艇活动,首次提出了多传感器数据融合的概念,在其研发的军用声呐信号处理系统中对多个独立连续信号进行了数据融合,并广泛应用于随后的军事装备中,发展了多种类型信息融合军事指挥系统。空间态势感知系统采用多传感器数据融合技术,可以解决单一传感器受观测条件和手段限制只能观测目标某一或某些属性,造成数据采集不完整、观测误差大、背景噪声难以去除等问题。相比单一传感器和单一信息源方式,多源信息融合技术在扩展时空覆盖性、增强目标识别能力、降低虚警率等方面具有较

大优势^[24]。如在空间态势感知任务中,必须结合微波雷达、光学等多种探测手段,融合天地基等多种测量数据进行目标识别、跟踪预警和威胁评估等;在航天器自主导航任务中,需要对多个传感器、多个观测目标甚至先验知识等多源信息进行融合处理,实现自主定轨、导航和控制等。在当前复杂多样的航天任务中,多源信息融合技术的重要性日益突出。

2.2 空间态势感知常用传感器

美国天基空间态势感知系统以光学传感器为主,激光或微波雷达为辅。天基光学成像系统利用天基平台搭载专用可见光波段光学相机,探测空间目标反射的太阳光,实现对空间目标的捕获、监视和跟踪。天基红外探测系统是利用天基平台搭载中远红外敏感探测器,通过捕捉和识别目标红外特征信号,实现空间目标探测、跟踪与告警。天基雷达多采用测距测速精度更高的激光雷达,获得目标的距离、方向、3D 图像等信息。目前天基常用空间威胁目标态势感知传感器如表 1 所列^[25-27]。

表 1 常用空间目标态势感知传感器

Tab. 1 Commonly used Space Target Situation Awareness Sensors

感知手段	常用传感器	测量信息	主要用途
主动感知	激光雷达	目标距离、方位、速度、3D 成像	抵近目标识别、定位、外观结构特征识别
	毫米波雷达	目标距离、方位、速度、成像	
	可见光相机	目标图像、方位信息	目标搜索、跟踪、外观结构特征识别
	中远红外相机		
被动感知	激光告警器	目标激光的方向、波长、脉宽、功率/能量密度等	潜在、异常威胁实时告警与溯源
	微波告警器	目标微波的方向、频率、功率/能量密度等	
	粒子束告警器	目标电子、质子、中子等粒子的入射方向、能量通量密度等	

2.3 空间态势感知数据融合关键技术

天基态势感知信息的融合是结合各种预警感知信息、数据库中的知识以及方法模型库中的推理算法和模型实现对多源信息的融合。关键技术主要有多样异构信息集成技术、基于专家系统的数据挖掘与信息融合技术^[17-19]。

(1) 多样异构数据融合技术

天基态势感知数据存在多源、异构、多粒度(不同传感器获取数据尺度差异较大)的特点。各种信息有不同的标准格式、表示方法等,异构问题影响形成一致的有效信息。例如,在实际应用中各个传感器系统采样频率不一致,且不可避免地存在通信延迟的现象,导致融合中心接收到的探测信息

异步,无法直接使用。因此,必须研究多样异构数据集成技术,采用标准的信息格式,构建多样异构数据信息映射模型,对各种不同传感器的感知数据进行统一表示,形成完整一致的数据模型。

(2) 基于数据库系统的数据挖掘融合技术

天基目标态势感知信息包含大量、不完全、有噪声、模糊以及随机的实际数据,必须从中提取隐含在其中的有用的信息。可以向领域专家获取与天基态势感知信息相关的经验性知识,采用机器学习、数据挖掘的手段,获取融合知识并构建融合知识库,结合知识库中的知识和方法模型库中的算法模型进行融合处理,得出更加准确的融合信息,以辅助战场态势估计和威胁分析等战场应用。天基

预警侦察信息的数据挖掘要求具有较高的时效性,并从实时或准实时数据中分析找出其中隐含的关联规则,因此,如何构建专家知识库和方法模型库是基于专家系统的数据融合技术的关键。

2.4 空间态势感知数据融合发展趋势

(1) 基于人工智能的自适应数据融合技术发展趋势

空间战场环境的复杂性、动态性和不确定性持续增加,给空间态势感知提出了新要求。为适应这些新要求,需要在空间态势感知信息获取、空间态势感知信息处理以及空间态势感知信息输出等过程融入人工智能技术。人工智能技术能够提高空间态势感知信息获取、信息分类与处理、信息呈现的质量,可为提升空间态势感知系统认知精度和深度提供重要支撑。澳大利亚创新技术公司(IN-OVOR)正在开展“亥伯龙神”(Hyperion)天基空间态势感知项目研究^[28],他们使用新的计算机视觉系统,采用独特的机器学习算法以便从复杂背景图像中准确提取模糊目标信息。美国在坟墓轨道试验的攻防装备普遍采用通用平台和开放式体系架构,以具备自适应多功能一体化能力。试验内容从单星轨道博弈逐渐发展为多星智能任务规划和自主协作,以及多手段协同感知和作战效果评估,推动空间攻防向着基于多传感器数据融合的自感知、自适应、自决策的智能化方向发展^[21, 23]。

为提高人工智能技术在空间态势感知领域的应用效果,建议强化知识-数据混合驱动的应用理念,突出人机交互深度学习的应用模式,发展自适应的数据融合算法,建设空间安全环境模拟仿真的应用条件,有效减少人为介入,提升感知系统的整体性能。

(2) 多传感器在轨实时数据融合技术发展趋势

多传感器数据融合须对大量数据进行融合处理,采用的数据融合算法较为复杂,常规星载信息处理系统无法实现在轨即时处理,通常要传输到地面信息处理中心,由地面计算机进行详细计算,过程复杂,不具备实时监测目标并按不同需求进行信息分发的能力。随着空间对抗活动的加剧,用户对空间态势感知数据的时效性提出了更高要求,这就要求多传感器数据融合必须实现在轨即时处理,及时输出完整的战场环境态势感知信息。

空间抗辐射微电子技术的飞速发展极大地提升了微处理器的性能及在空间环境中使用的可靠性,使得多传感器高速在线融合成为可能。随着机

器深度学习技术的逐渐成熟,卫星智能信息处理系统将会采用多核 GPU、CPU、FPGA 等高性能计算平台,在云计算、大数据挖掘等先进数据处理技术的支持下,可以实现卫星多传感器数据融合实时在线处理。美国基于 ARM 处理器架构的新一代抗辐射多核处理器,已经在高性能空间飞行计算项目等专用航天计算机及子系统中得到应用。赛灵思全新 20 nm 抗辐射 FPGA 系统采用自适应运算架构,提供近乎无限制的在轨重组能力,数字信号处理效能提升 10 倍以上,高效能机器学习功能提供神经网络推论加速以处理复杂运算,实现在轨多传感器数据即时运算与融合处理^[29]。当前高性能计算平台的快速发展为在轨实时数据融合提供了必要的硬件支持,未来仍须不断发展与优化算法,提高计算速度与在轨融合能力,从而真正实现战场环境信息实时共享与利用,提高作战指挥时效性与准确性。

(3) 天基网络化综合信息融合技术发展趋势

当今各类卫星空间目标监视平台基本处于相互独立状态,不同卫星平台之间的态势感知信息互联互通性差,缺乏态势感知信息在不同卫星平台之间数据共享与融合机制,难以实现全空域、全时域战场环境的信息感知。未来的空间态势感知系统将会朝着空间多平台网络化数据共享与融合方向发展,充分利用高、中、低轨的卫星星座及微纳型专用态势感知卫星星座优势,使部署在不同轨道高度、具有不同感知功能的态势感知系统,能够实时获取相关网络节点的信息数据并进行融合处理,形成全空域、全时域、全要素战场环境态势感知能力。

3 空间态势感知数据融合应用

与地基空间目标监视系统相比,天基空间目标监视系统优势巨大,可以极大地增强空间态势感知能力。尤其是中、高轨道小尺寸空间目标,地基光学望远镜,由于受大气和太阳光照条件影响很难观测到,而天基观测方式可以弥补地基缺点,实现目标连续观测。天基空间目标态势感知系统要求具有小型化、轻量化、低功耗等特点,因此对发射功率、天线或反射镜直径都有限制,应尽可能减小系统的体积和成本。

3.1 多传感器融合的空间逼近目标定位系统

(1) 应用

空间目标监视的主要任务之一是确定空间目

标的轨道数。多传感器融合空间抵近目标定位系统可用于获取不可靠近的或不具备定位装置的空间目标(如抵近卫星、碎片等)的地理坐标信息^[30-32]。只要目标卫星在激光测距范围之内,在保证目标定位系统的导航信号连续不间断的情况下,即可实现目标定位。在地面军事装备上,多传感器融合目标定位系统可以用于地面或空中目标远距离主动探测,实时获取目标地理位置坐标信息,为空中或地面实施精确打击提供坐标参数。在空间攻防领域,多传感器融合目标定位系统可以实时获取卫星周围抵近目标的地理坐标信息,并反演出其轨道参数,跟踪监视或定性,为动能武器打击提供输入参数。

(2)数据融合

多传感器融合空间抵近目标定位系统是一种主动式定位系统,系统集成激光测距模块、导航模块、姿态测量模块、视频采集模块等多种光电传感器。

该系统可以安装在卫星平台上,系统的视频监视模块实时采集视线前方画面,通过传回的画面监视或瞄准被测目标,为激光测距模块提供目标方位信息。瞄准被测目标后,系统自动锁定被测目标方位,激光测距模块测量二者之间的距离,姿态测量模块给出此时目标相对于目标定位系统的方位角和俯仰角信息,导航模块获取目标定位系统自身所在位置的坐标信息。各传感器将获取的被测目标距离信息、角度信息、空间坐标信息传输到目标定位系统的数据融合处理单元,通过融合处理获得被测目标相对于目标定位系统的位置,再通过坐标变换,获得被测目标的经度、纬度、高度信息。

3.2 激光雷达与可见光视觉图像融合检测识别技术

(1)应用

激光成像雷达是一种主动测距系统,能获得目标的位置、角度、距离、反射强度等信息,具有很高的目标距离和位置测量精度。该系统可以通过扫描方式获得目标距离和强度点云图,再采用单光子三维重构算法获得目标的精细三维结构图像,具有较强的抗干扰和抗隐身能力。其缺点是目标光谱信息单一,且受扫描精度和单光子探测器阵列的规模的限制,成像分辨率远低于高分辨率可见光CCD相机。可见光视觉成像属于被动成像,具有很好的隐蔽性,成像分辨率高,能真实记录目标表面的明暗变化、纹理细节、边缘轮廓、颜色等信息,缺点是所获得的目标图像是二维平面的,不能反映

出目标卫星设备的相对空间位置,而且成像质量受光照条件影响极大。

在航天领域,由于空间目标图像一般为远视场拍摄,图像中的空间目标较小,亮度较低,难以观测到显著的几何特征,而且空间背景中的恒星也增加了空间目标检测识别的难度。如何实现目标的有效检测和精确定位,降低目标的误检率,对于研究者具有极大的挑战性。激光雷达与可见光视觉成像融合可对空间抵近目标进行识别、成像和定位,为我方卫星采取措施提供预警信息。空间目标激光三维图像与可见光图像相融合,能使融合后的图像在反映目标卫星的光谱信息的同时,又能反映目标卫星装备载荷、几何构型的相对空间位置信息,大大丰富目标的可辨识信息,提高检测概率,降低误检率^[33-35]。

(2)数据融合

由于激光三维图像与光学图像分别由不同的传感器获取,图像分辨率、数据特性、噪声类型等存在较大差异,数据融合属于异源图像融合,因此图像配准和降噪预处理成为图像融合的前提和基础。

根据异源图像信息提取技术的不同,图像融合可以分为三个层次:像素级融合(pixel level fusion)、特征级融合(feature level fusion)和决策级融合(decision level fusion)。像素级图像融合对源图像细节信息的损失最少,融合精度最高,融合图像的信息最为丰富,有利于后续的目标识别和机器视觉分析。可见光图像和激光雷达强度图像也可以在特征层级进行数据融合,强度图像的匹配将两种类型数据在像素空间对齐,作为后续的图像融合、场景分类等任务的基础。多帧激光数据采用最近邻数据关联识别出其中的动态障碍物,并用卡尔曼滤波等算法可实现对目标的实时跟踪。决策级图像融合输出结果为综合的决策信息。决策级图像融合对图像之间的匹配程度要求较低,信息综合程度最高,同时信息损失也最大。因此,决策级图像融合通常用在对一些图像的关键信息要求比较突出的任务中,如目标识别、显著性检测、自动驾驶场景理解等。

对可见光和激光雷达三维图像融合的研究取得了很大进展,但是仍有许多理论和应用问题亟需解决。随着深度学习技术的快速发展,神经网络为更多研究人员所接受并投入使用。卷积神经网络

(Convolutional Neural Networks)在图像数据融合领域得到广泛应用,在空间目标检测领域,利用卷积神经网络作为特征提取器在图像分类和图像识别上取得了良好效果,显现出巨大的优势^[36-38]。

3.3 激光雷达与长波红外图像融合检测识别技术

(1)应用

长波红外探测系统是通过接收空间目标向外辐射出的红外谱段光子能量来实现目标检测的,属于被动探测技术,可以避免被敌方探测到的危险,也可以免受外界干扰信号的影响。研究表明,在近地轨道空间,卫星本体温度变化在 200~270 K 之间,平均温度 240 K 左右,发射率为 0.3,在 8~12.5 μm 波段平均辐射量约为 12.3 W/m^2 ,而此时的太阳辐射很微弱,目标自身辐射大约是太阳辐射的 5~50 倍^[39]。

因此,在空间应用中,当目标处于逆光、光照角度不佳以及地影区等条件下时,长波红外探测是一种有效的检测手段,比可见光和近红外探测技术更有优势。但是,类似于可见光探测,长波红外探测系统的探测信息只能给出目标的方位角、俯仰角等角度信息,无法探测出目标的距离,不能确定目标在三维空间的具体位置。考虑到全天时目标监测需求,一般不会选用寿命较短的低温制冷型红外探测系统,而使用非制冷红外探测系统(一般只需集成式 TEC 制冷),其灵敏度远低于制冷型红外探测系统。此外,一般卫星的红外辐射不强、空间碎片等目标自身不发热,难以探测,导致非制冷红外探测系统的探测距离远低于可见光相机和制冷型红外探测系统。

当目标较远时,目标在红外传感器上只占据数个像素点,此时目标图像表现为一个亮点。当空间背景信号较为复杂、背景辐射起伏较大时,目标可能会淹没在背景噪声中而无法探测识别,或者将背景噪声信号识别为目标信号,导致虚警现象。将激光雷达测距和红外系统测角功能结合起来,构成复合成像系统,可以实现信息互补,从而提高系统的目标识别和抗干扰能力,降低目标误检率。通过数据融合可以获取更完整、更精确的目标信息,解决光照不佳条件下的空间目标的感知和识别难题,以及复杂背景下远距离空间目标光学成像难以辨识的问题。近几年来,国外卫星在设计方面呈现“三隐”趋势,面对各型空间目标(暗弱、隐身、伪装、诱饵等目标)感知任务,采用基于红外、可见光与激光雷达的信息融合技术,可以有效增强目标识别

能力,获得丰富的目标成像细节,有助于辨别目标卫星的载荷配置、功能用途等信息。

(2)数据融合

激光雷达和红外传感器融合跟踪的核心是:这是不同类型的传感器,因此,首先须将传感器的量测信息进行时空数据配准^[40-42]。

天基激光雷达大多采用低重频、高脉冲能量的测距体制,采样频率一般为 1~10 Hz,而红外探测系统采样频率可达数十赫兹,二者存在较大差异。多个同类传感器之间也存在着通信延迟现象,导致在同一个周期内,某些传感器只能提供较少的测量数据,存在数据不匹配问题,融合处理系统无法直接使用异步探测数据信息。此外,在实际应用中,两种传感器融合选择的坐标系不同。当来自传感器的测量信息从球坐标系转换到直角坐标系时,转换关系通常是非线性的,也会造成转换误差问题。常用的融合方法是将红外探测系统获得的高频角度信息,通过数据配准方式与激光雷达测距信息同步,然后再进行数据融合估计;将激光雷达和红外传感器同地配置,使二者的坐标系原点重合,利用重叠的探测区域内的量测数据进行空间配准处理,再传输到系统融合中心进行后续滤波处理和航迹跟踪。

针对红外/激光雷达传统融合算法精度较低且只适用于传感器采样时间对齐的情况,文献[43]提出基于多尺度融合理论,采用转换测量卡尔曼滤波数据融合算法,有效提高了运动目标的跟踪精度。文献[44]针对黑暗和弱光环境下红外图像训练数据较为稀缺的问题,基于深度学习的目标识别方法,引入部分可见光图像进行算法训练,通过稠密可见光视觉深度图像与激光雷达点云的数据融合对目标位置进行估计,提高了系统对小目标的定位精度。随着高重频高脉冲能量激光器、大面阵单光子探测器等新技术的使用,激光雷达的采样频率、图像分辨率将会得到大幅提升,从而可与红外探测系统的频率与分辨率匹配,大幅减少数据融合的复杂度。

4 发展建议

随着我国空间资产的不断扩大,各类天地基武器平台干扰攻击、人为非空间目标抵近侦察等问题的日益显现,空间废弃卫星、碎片、机动平台等的数量越来越多,空间态势感知的重要性越来越突出,建设可靠高效的多传感器融合空间目标态势感知系统,提供及时准确的空间态势感知信息,为维

护我国空间资产安全、确保空间对抗优势提供重要基础能力支撑已成为当务之急。本文在国内外现有空间目标态势感知与数据融合技术发展基础上,结合未来空间态势感知与军事装备发展需求,提出如下发展建议。

4.1 发展远距离高分辨率空间目标激光成像技术

远距离高分辨率空间目标三维成像仍然是一个极具挑战的技术难题。军事侦察和空间监视等重要应用场合要求激光成像系统必须同时具备远距离(几百千米以上)和高分辨(厘米级)的成像能力,面对国家空间对抗战略需求,亟需发展适应复杂空间环境的远距离光子计数三维成像技术。重点发展基于大面阵 SPAD 非扫描激光雷达、相干合成(逆合成)孔径激光雷达等三维成像技术,研制具备小型化、低功耗特点的高分辨率、远距离、高速激光雷达系统,并应用于卫星平台,实现太阳背景、地影区等复杂光照条件下的空间目标的测角、测距、测速、成像。加拿大正在发展的“空间目标识别卫星”(Space-Object Identification Satellite)就是采用合成孔径激光雷达技术,预计可实现 1 000 km 外空间目标 1 cm 的成像分辨率,用于对空间目标进行探测、监视、分类、识别,重点是实现对隐身目标的感知和响应^[45]。

4.2 发展主被动融合空间目标监视与预警技术

天基光学空间目标监测系统采用基于视觉的技术手段获取空间目标和碎片图像,可以实现对于空间碎片的实时检测与跟踪。这些光学系统通常为可见光或红外等,红外探测适用于近距离或者运行在地影区的空间目标,可见光主要用于远距离目标探测。但是空间环境复杂,存在较多噪声,且远距离空间目标成像成点状分布,与噪声、空间背景干扰信号有较高的相似度,会淹没在噪声中,给目标检测带来较大困难。

开发基于多传感器融合的主被动监视与预警技术,获取更丰富的目标信息,通过多传感器的多维信息融合增强目标识别检测能力,降低目标误检率,实现对重要空间目标(包括暗弱、隐身、伪装目标)等的全天时监测、跟踪、告警,确定可能对航天系统构成威胁的空间目标的位置、尺寸形状、载荷配置、轨道参数等重要特性,是未来空间态势感知的重要发展方向。

4.3 发展星载多源数据实时融合处理系统技术

传统卫星多源数据的融合通常采用离线数据

融合方式,由卫星载荷采集数据下传,地面融合中心对不同来源信息进行数据融合,获取同一场景目标更为可靠、全面、准确的综合信息。然而,这种离线数据融合方法时效性很差,无法满足高时效的战场环境态势研判、任务决策与卫星在轨自主响应需求。卫星在轨多源数据实时融合处理能力的实现依赖于信号处理算法与硬件算力的紧密结合。卫星常用的数字信号处理器主要有 CPU、DSP、FPGA、SoC 等系统,为了支持大数据量、复杂运算的智能化实时数据融合处理算法,须发展支持机器学习语言的高性能抗辐射数字信号处理系统,大幅提升星载信号处理系统的硬件算力。多源数据融合领域的应用实践表明,以深度卷积神经网络为代表的人工智能信号处理算法能够有效提升多源数据融合处理能力,成为卫星在轨实时数据融合处理算法的重要发展方向。然而,为了适应卫星数据处理系统的计算能力,仍须不断发展新的高效简化神经网络算法模型,提升数据处理性能与计算效率,大幅降低计算量。近年,随着多源数据融合算法不断发展与星载数字信号处理系统硬件算力的不断提升,星载多源数据实时融合处理系统空间应用的技术条件已经基本成熟。

5 结束语

开展多源数据融合技术在航天领域的应用研究,对于增强军事实力和建设航天强国都具有十分重要的现实意义。本文在分析主要航天国家太空态势感知能力发展现状基础上,梳理相关发展规划、现役装备情况、未来项目计划与发展趋势,总结了航天领域多源数据融合的关键技术。针对当前天基空间目标态势感知装备实际环境中应用存在的问题,提出了空间目标态势感知数据融合解决思路,并给出典型应用。最后,提出我国空间目标态势感知系统装备发展的建议,为天基信息融合技术支撑战场应用提供一定的借鉴。

参考文献:

- [1] 杜小平,耿文东,赵继广,等.空间态势感知基础[M].北京:国防工业出版社,2017.
- [2] 戴亚平,马俊杰,王笑涵.多传感器数据智能融合理论与应用[M].北京:机械工业出版社,2021.
- [3] WANG B C, LI S A, MU J Z, et al. Research advancements in key technologies for space-based situational awareness[J]. Space: Science & Technology, 2022, 2022(6): 1-31.

- [4] MCKISSOCK D. Foundational space situational awareness [C]//The 3th Military Space Situational Awareness Conference, London, UK, April 25-26, 2018.
- [5] WEEDEN B. Space situational awareness, norms of behavior, and space security[C]//The 3th Military Space Situational Awareness Conference, London, UK, April 25-26, 2018.
- [6] 刁华飞, 张雅声. 美国高轨态势感知卫星能力分析[J]. 航天电子对抗, 2019, 35(4): 48-51.
- [7] 宋万均, 马志昊, 刁华飞. 美国空间态势感知力量研究(上)[J]. 中国航天, 2019(4): 48-51.
- [8] 宋万均, 马志昊, 刁华飞. 美国空间态势感知力量研究(下)[J]. 中国航天, 2019(5): 18-20.
- [9] 李青, 刘爱芳, 王永梅, 等. 美国空间攻防体系发展与能力研究[J]. 航天器工程, 2018, 27(3): 95-103.
- [10] 汤泽滢, 黄贤锋, 蔡宗宝. 国外天基空间目标监视系统发展现状与启示[J]. 航天电子对抗, 2015, 31(2): 24-30.
- [11] 刘海印, 曹秀云, 林飞. 2016年美军空间态势感知能力建设及发展动向分析[J]. 中国航天, 2017(2): 9-12.
- [12] 宋博. 美国天基空间态势感知系统发展[J]. 国际太空, 2015(12): 13-20.
- [13] ARMSTRONG C. Military space situational awareness[C]//The 3th Military Space Situational Awareness Conference, London, UK, April 25-26, 2018.
- [14] STOLTZ C. The future of Canadian space situational awareness[C]//The 3th Military Space Situational Awareness Conference, London, UK, April 25-26, 2018.
- [15] AFSPC. Geosynchronous space situational awareness program [EB/OL]. (2020-09-16)[2023-03-28]. <http://www.afspc.af.mil/About-Us/Fact-Sheets/Article/730802/geosynchronous-space-situational-awareness-program-gssap>.
- [16] MESSIER D. Successful launch for AFRL eagle spacecraft experiment on AFSPC-11 mission[EB/OL]. (2020-09-16)[2023-03-28]. <http://www.parabolicarc.com/2018/04/24/successful-launch-afrl-eagle-spacecraft-experiment-afspc11-mission>.
- [17] TIAN. The technical test satellite S5 of USA air force for space situational awareness will be launched[EB/OL]. (2020-09-16)[2023-03-28]. <http://www.dsti.net/information/News/114113>.
- [18] CLIO. Mystery satellite[EB/OL]. [2023-03-28]. <https://spaceflight101.com/spacecraft/clio/>.
- [19] Space war tactics? The US, Russia, and China are testing orbital [EB/OL]. (2021-10-28)[2023-03-28]. <https://interestingengineering.com/innovation/space-war-tactics-the-us-russia-and-china-are-testing-orbital-vulnerabilities>.
- [20] 美国卫星7次逼近我国航天器, 空间站倍受骚扰, 太空战提前打响?[EB/OL]. (2023-03-22)[2023-03-28]. <https://new.qq.com/rain/a/20230322A03M7W00>.
- [21] 蒙波, 黄剑斌, 李志, 等. 美国高轨抵近操作卫星MiTeX飞行任务及启示[J]. 航天器工程, 2014, 23(3): 112-118.
- [22] ZHANG H, LI Z, WANG W, et al. Trajectory planning for optical satellite's continuous surveillance of geostationary spacecraft[J]. IEEE Access, 2021, 9: 114282-114293.
- [23] 胡海鹰, 朱永生, 江新华. 美国高轨空间安全发展态势及其关键技术[J]. 空间控制技术与应用, 2022, 48(3): 1-10.
- [24] 王兴龙, 蔡亚星, 陈士明, 等. 多源信息融合在空间态势感知领域的应用与发展[J]. 航天返回与遥感, 2021, 42(1): 11-20.
- [25] 曹斌. 国外空间目标监视系统的发展[J]. 军事文摘, 2015(11): 18-22.
- [26] 许博玮, 马志勇, 李悦. 多传感器信息融合技术在环境感知中的研究进展及应用[J]. 计算机测量与控制, 2022, 31(9): 6-12.
- [27] 祁友杰, 王琦. 多源数据融合算法综述[J]. 航天电子对抗, 2017, 33(6): 37-41.
- [28] Space situational awareness[EB/OL]. [2023-03-28]. <https://www.inovor.com.au/space-technology/hyperion-mission/>.
- [29] MAILLARD P, CHEN Y P, VIDMAR J, et al. Radiation tolerant deep learning processor unit (dpu) based platform using xilinx 20 nm kintex ultrascale fpga[J]. IEEE Transactions On Nuclear Science, 2022, 69(7): 1-9.
- [30] 郝雅楠, 陈杰, 关晓红. 美军空间态势感知信息融合思路与途径研究[J]. 战术导弹技术, 2019(2): 91-98.
- [31] 王海霞, 吴清锋, 吴相彬, 等. 多传感器融合在机器人位置感知中的应用研究[J]. 机电工程技术, 2020, 49(12): 89-91.
- [32] 熊亦威, 李慧诚, 周朝, 等. 基于激光雷达与单目相机融合的人体多目标室内定位系统[J]. 自动化与仪器仪表, 2022(5): 11-15.
- [33] 胡云鹏, 黎克波, 陈磊. 面向空间态势感知的天基可见光空间目标自主跟踪方法[J]. 中国科学: 科学技术, 2021, 51(4): 424-434.
- [34] 严洁, 阮友田, 薛珮瑶. 被动光学图像融合技术研究[J]. 中国光学, 2015, 8(3): 378-385.
- [35] 马海. 面向激光雷达和可见光图像的异源匹配及融合方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- [36] 张昌芳, 毕兴. 人工智能技术在空间态势感知领域应用需求和建设[J]. 空间碎片研究, 2021, 21(2): 52-57.

- [37] 高晓阳, 王刚. 基于深度学习的空天防御态势感知方法[J]. 火力与指挥控制, 2018, 43(8): 8-12.
- [38] 张香竹, 张立家, 宋逸凡, 等. 基于深度学习的无人机单目视觉避障算法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2022, 50(1): 101-108.
- [39] 万向成, 孙永岩, 陆晴, 等. 基于长波红外单目视觉相机的在轨目标感知及自主规避技术[C]//第二届未来空间技术高峰论坛会议, 2021: 604-609.
- [40] 韩义波, 杨新锋, 滕书华, 等. 激光与红外融合目标检测[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(8): 204-210.
- [41] 王兴, 邵艳明, 杨波, 等. 基于激光雷达与红外数据融合的跟踪算法[J]. 红外技术, 2019, 41(10): 947-955.
- [42] 仝选悦, 吴冉, 杨新锋, 等. 红外与激光融合目标识别方法[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(5): 1-8.
- [43] WANG B J, HAO J Y, YI X. Infrared/laser multi-sensor fusion and tracking based on the multi-scale model[J]. Infrared Physics & Technology, 2016, 75(3): 12-17.
- [44] 郑欣悦, 赖际舟, 吕品, 等. 基于红外视觉/激光雷达融合的目标识别与定位方法[J]. 导航定位与授时, 2021, 8(3): 34-41.
- [45] HOUMAN H, BARRY S, MARC F, et al. Space-object identification satellite (soisat) mission[C]//The Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies (AMOS) Conference At: Maui, Hawaii, September 19-22, 2020.

(责任编辑:任 妮)