

海上无人系统跨域集群发展现状及其关键技术

闫敬¹ 关新平^{2,3}

摘要 随着无人系统技术的快速发展,海上无人系统跨域集群凭借其诸多优点已成为当前无人系统领域研究热点. 具体来说,海上无人系统跨域集群是指空中、水面、水下无人平台,通过跨域任务规划与信息交互实现高效集群协作,对提升复杂海洋环境下无人平台应对能力至关重要. 目前,海上无人系统跨域集群理论体系还不完善,相关研究正面临诸多亟待解决的难题. 为此,首先梳理跨域集群相关概念及其发展现状,分析其面临的挑战与关键问题;进而,从控制理论和通信技术相结合的角度出发,简述跨域集群任务规划、组网传输、协同控制等关键技术的研究进展;最后,结合实际发展情况和未来发展趋势,对海上无人系统跨域集群未来值得深入研究的方向进行总结与展望.

关键词 集群,海上无人系统,跨域,协同控制,组网传输

引用格式 闫敬,关新平. 海上无人系统跨域集群发展现状及其关键技术. 自动化学报, 2025, 51(4): 744-761

DOI 10.16383/j.aas.c240334 **CSTR** 32138.14.j.aas.c240334

Development Status and Key Techniques for Cross-domain Swarm of Maritime Unmanned Systems

YAN Jing¹ GUAN Xin-Ping^{2,3}

Abstract With the rapid development of unmanned system technology, the cross-domain swarm of maritime unmanned systems has become a hot research topic in the field of unmanned systems due to its many advantages. Specifically, the cross-domain swarm of maritime unmanned systems refers to the efficient swarm collaboration of air, water surface and underwater unmanned platforms, by means of the cross-domain task planning and information exchange. It is of great significance to enhance the response capability of unmanned platforms in complex marine environments. At present, the theoretical framework of cross-domain swarm for maritime unmanned systems is not mature. The relevant researches are facing many urgent problems to be solved. For that reason, this paper firstly outlines the concepts and development status of cross-domain swarm, through which the challenges and key issues are analyzed. And then, from the perspective of combining control theory and communication technology, we briefly describe the research progress of key technologies, such as the task planning, network transmission, and collaborative control in cross-domain swarm. Finally, based on the actual development situation and future trends, we summarize and look forward to the future research directions worthy of in-depth study on cross-domain swarm of maritime unmanned systems.

Key words Swarm, maritime unmanned systems, cross-domain, collaboration control, network transmission

Citation Yan Jing, Guan Xin-Ping. Development status and key techniques for cross-domain swarm of maritime unmanned systems. *Acta Automatica Sinica*, 2025, 51(4): 744-761

收稿日期 2024-06-11 录用日期 2024-08-27

Manuscript received June 11, 2024; accepted August 27, 2024

国家自然科学基金(62222314),河北省自然科学基金(F2024203047, F2022203001, F2024203072),中央引导地方基金(226Z3201G),河北省教育厅基金(JCZX2025027)资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (62222314), Natural Science Foundation of Hebei Province (F2024203047, F2022203001, F2024203072), Central Guidance Local Foundation (226Z3201G), and Foundation of Hebei Education Department (JCZX2025027)

本文责任编辑 杨涛

Recommended by Associate Editor YANG Tao

1. 燕山大学电气工程学院 秦皇岛 066004 2. 上海交通大学电子信息与电气工程学院 上海 200240 3. 海底科学与划界全国重点实验室 上海 201913

1. School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004 2. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240 3. National Key Laboratory of Underwater Science and Delimitation, Shanghai 201913

海上无人系统是指具有自主航行能力,可完成环境信息收集、固定/移动目标探测、识别、定位、跟踪、围捕等任务的各类空中/水面/水下无人平台的总称. 这些平台通常包括无人机(Unmanned aerial vehicle, UAV)、无人水面艇(Unmanned surface vessel, USV)、自主水下航行器(Autonomous underwater vehicle, AUV)、遥控水下航行器(Remote operated vehicle, ROV)等. 在认知与探索海洋的过程中,海上无人系统凭借其高机动性、强适应性、低维护成本等优点,已成为抢占海洋科技制高点的重要保障,其中集群化是其发展的重要方向. 具体来说,集群化是指空中、水面、水下异构无人平台通过跨域任务规划与信息交互实现高效集群协

作, 可完成单体智能向群体智能的跨越, 对提升海洋复杂环境下无人平台应对能力至关重要。

随着无线传感网络、智能控制理论、无人自主装备与通信设备等技术的不断发展, 海上无人系统跨域集群逐步由概念走向实际应用。例如, 2014年3月, 马航 MH370 航班消失在印度洋, 26个国家与地区采用空中、水面、水下无人平台开展联合搜索, 这一前所未有的搜索行动虽以失败告终, 但凸显了跨域集群在海事搜救中具有重要应用价值^[4]。2022年10月, 乌克兰采用无人艇与无人机组成的跨域集群系统对俄罗斯黑海舰队进行偷袭并取得成功, 引起国际社会广泛关注。与传统的单域集群相比, 跨域集群有利于充分发挥异构平台间功能冗余性和能力互补性, 实现各要素单元的一体化运用, 从而达到效果互用、效能增强的目的。同时, 跨域集群也有利于推动海上无人系统应用新模态的涌现, 从而进一步推动海上无人系统在海洋资源勘探、海上安全巡逻、环境监测和救援等任务中发挥全新作用。然而, 跨域集群与单域集群在网络环境、通信、控制以及管理和维护等方面存在明显差异, 因此现有的单域集群技术并不能直接应用于跨域集群中。

目前, 已经有很多学者对跨域集群相关研究进行综述, 如表 1 所示。可以看出, 现有综述大多聚焦

于装备、感知、通信或控制层面, 并未系统地对跨域集群进行综述。为揭示感知、通信与控制三者间耦合关系和提升跨域集群系统整体性能, 本文从控制理论与通信技术相结合的角度出发, 对海洋无人系统跨域集群发展现状与关键技术进行综述。主要从以下层面对其展开论述: 海洋无人系统跨域集群相关概念及其发展现状、面临的挑战与关键问题、关键技术的研究进展以及未来研究方向展望。

1 海上无人系统跨域集群内涵与其特点

“域 (Domain)”的概念最早起源于 20 世纪 90 年代美国提出的“网络中心战”, 并将其分为物理域、信息域、社会域和认知域, 然而并未给出“域”的明确定义。2016 年以来, 美军先后发布《多域作战: 21 世纪合成兵种的发展 (2025 至 2040)》、《美陆军多域作战 (2028)》与《运用机器人与自主技术支持多域作战》等白皮书, 认为“域”是“整体作战环境中组织与实施作战所涉及的某一领域, 包括陆域、海域、空域、太空域和网络等。”具体来说, 陆域是地球表面在高水位线处结束并与海域向陆地部分的滨海段相重叠的区域; 海域是海洋、港湾、河口、岛屿、沿海地区以及这些地形上方的空域; 空域是从地球表面往上延伸直到对作战行动的影响可以忽略不计

表 1 跨域集群相关的综述论文对比

Table 1 Comparison of the survey papers related to the cross-domain swarm

文献	题目	研究出发层面	主要内容	存在不足
[2]	水下无人系统发展现状及其关键技术	海洋装备	分析集群化的概念, 简述了国内外水下无人装备发展现状, 指出需突破的技术	主要偏重水下单域集群落脚于海洋装备领域
[3]	海上无人系统发展及关键技术研究	海洋装备	从战略规划、装备研发和系统演示等层面分析现状, 凝练挑战与需攻克的技术	偏重战略规划, 并没有对具体技术进行分析归纳
[4]	无人直升机海潜跨域协同作战体系构建与应用	海洋装备	对无人机会空潜协同作战体系进行综述, 分析了多种无人海洋装备互联互通技术	偏重跨域体系建立与应用介绍, 并没有对其耦合关系进行剖析
[5]	Survey of air, sea, and road vehicles research for motion control security	感知	从安全角度对空天地机器人态势感知进行了综述	偏重单体态势感知, 未对跨域集群展开讨论
[6]	水下无人系统集群感知与协同技术进展	感知	从感知与协同层面对水下感知与协同技术进行综述, 并指出集群面临的难点	偏重单域内无人系统的集群, 并没有对跨域集群进行综述
[7]	A survey on space-air-ground-sea integrated network security in 6G	通信	从安全角度对空天地海通信进行综述, 并讨论跨层攻击	偏重空天地跨域通信研究, 并未对跨域集群展开论述
[8]	水声通信及网络技术综述	通信	对水声通信路由与跨层设计等进展进行综述, 对未来水声通信技术进行展望	偏重单域内无人系统的通信, 未对跨域感知与控制进行综述
[9]	水域无人系统平台自主航行及协同控制研究进展	控制	综述水域无人平台航行与控制进展, 分析其面临的机遇与挑战	缺少对跨域集群组网综述, 并没有对集群过程中的关系进行剖析
[10]	Review of hybrid aerial underwater vehicle: Cross-domain mobility and transitions control	控制	综述跨域混合动力飞行器研究进展, 分析了水动力对控制的影响	主要对单个装备跨域进行机理分析, 并没有对跨域集群进行综述
[11]	天空地一体化网络环境下多运动体系统跨域协同控制与智能决策	控制	综述天地空跨域决策与控制, 阐述云控制在其中的作用	主要考虑陆地环境中的跨域, 并没有将水下环境加入跨域体系

的大气层;太空域是大气对飞行器的影响变得微不足道的某个海拔以上的空域;网域由各种相互依赖的信息技术基础设施网络和其中流转的数据组成。

基于上述概念,海上无人系统跨域集群可理解为以海域与空域为主要空间,依靠大量在水下、水面与空中不同域运行的、具有显著功能差异性的无人平台组成的有机整体,通过任务规划、信息交互、行为协同等方式实现功能互补、能力增强的目的。如图1所示,无人机具有航程远、全方位覆盖、分布式部署和成本低、效率高等特点,通过搭载的遥感、相机等感知装置以及无线通信单元,可承担搜索和移动中继等任务;无人水面艇在监测海域进行编队航行,通过搭载的相机、声呐等感知装置以及无线通信单元,可对重点区域进行监测预警,也可作为水下与空中平台间中继节点,确保跨域信息互联互通;水下平台,例如自主水下航行器与遥控水下航行器,搭载相机、声呐等感知装置与无线/有线通信单元,一方面可以补充静态网络监测盲区,另一方面可通过集群方式对重点区域进行探测与近距离作业。

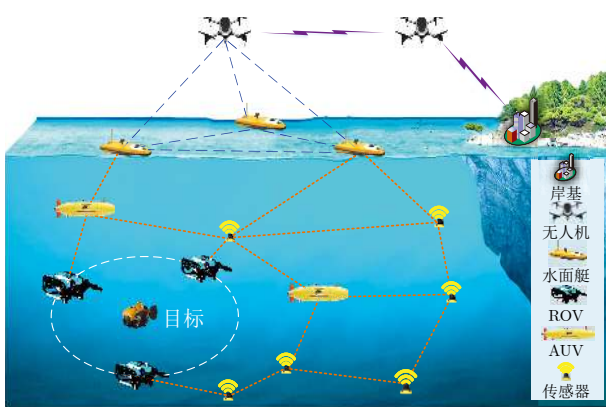


图1 面向水下移动目标围捕任务的跨域集群系统

Fig.1 Cross-domain swarm system for the encirclement of underwater mobile target

与传统的单域集群不同,海上无人系统跨域集群具有如下特点^[12]: 1) 资源多样化:传统的单域集群通常只在一个特定域内运作,而跨域集群横跨海面、海底、空中等多域,需要整合的资源更加多样复杂; 2) 架构去中心化:跨域资源的多样性与任务复杂性,决定了跨域集群体系架构必须朝着分布式、去中心化方向发展,并需能够根据任务需求和环境变化进行自适应调整和优化; 3) 协同体系化:由于集成了多种类型的无人系统,跨域集群更加关注多域间的协同能力,需要协同能力体系化,以根据任务需要进行分工协作,实现任务的高效执行。

2 面临的挑战与关键问题

海上无人系统的跨域集群思想源于异构多智能体系统的理论和技术发展。在海上无人系统背景下,这些智能体可以是各种类型的无人船、无人机、AUV与ROV等,进而通过多智能体系统理论与技术,使其能够更有效地应对复杂的海洋环境和多样化的任务需求。因此,海上无人系统可以看作是多智能体系统理论和技术在海洋环境中的应用,其在定义、应用场景和技术挑战上有显著的差异。基于上述考虑,开展海上无人系统跨域集群研究,并不是简单地将多种平台进行叠加,而是将海空多域平台进行功能互补,将面临如下多层次挑战。

1) 异构平台感知信息难以一致性表征与融合

对于海空跨域集群系统,不同平台感知信息的一致性表征与融合,是跨域信息共享共用的关键。然而,复杂海洋环境导致感知数据易出现时空偏差,此外不同平台获得的感知视角、数据尺度、数据类型、噪声水平等信息存在明显差异,上述因素导致异构平台感知信息的一致性表达与融合面临极大挑战。以水面目标探测为例,自主水下航行器可通过主被动声呐反射接收方式对目标进行声学探测定位^[13],然而声学感知存在噪声干扰大、图像模糊、分辨率低等不足;与此同时,无人机可通过相机光学感知方式对目标进行检测定位^[14],然而光学图像受水体浊度与光线吸收等因素影响,易存在颜色失真、偏移、对比度低等不足。因此,如何刻画并统一表征海空异构平台的感知模型成为关键。此外,无人机需保持轻量化以提高飞行效率和续航能力,水下/水面平台控制舱容量有限使其无法携带大容量电池,因此如何满足不同平台能量有效性与环境适应性,这也是海空跨域平台分布式感知面临的难点。

2) 复杂海洋环境导致跨域信息传输稳健性弱

海空跨域集群涉及多种传输手段,包括无人机与水面艇间电磁波通信、水面艇与ROV/AUV间水声通信、ROV与AUV间水声通信等。虽然电磁波通信能够提供广泛的海洋表面网络覆盖,但是水具有较高的电导率和吸收率,会削弱电磁波的传播能力,使得电磁波在水下传输的距离非常有限。目前,水声通信是水下远距离传输最成熟可靠的方式^[8],其1 Hz ~ 50 kHz的声衰减系数约为 $10^{-1} \sim 10^{-2}$ dB/m^[15],低频率、高功率的声波能传至水下数千公里,然而水声信道传输时延大且时变,通信带宽有限,传播损失大且易受噪声干扰,并存在多径与多普勒效应,导致其呈现“弱通信”特性。尽管光通信具有高带宽、低能耗、高速率的优点,但是其通信距离短,而且易

受海洋浊度和光对准等因素影响,使其传输稳健性远不如水声通信.此外,不同介质间传输方式的信道容量和延迟存在差异,信息的传输距离、速率、带宽与延迟也不同,受复杂海洋环境影响,不同平台间运动速率也不同,这加剧了跨域信息传输的难度,使其很难建立稳健的跨域组网传输网络.

3) 网络环境下多域平台难以有效决策与控制

自主决策是实现跨域集群的核心,协同控制是确保跨域集群有效性的基础.然而,跨域集群涉及海空多个维度,不同域内平台的运动能力差异明显.例如,空中与水下平台具有三维运动能力,而水面平台只能进行二维运动,同时空气动力学、水流动力学等环境干扰对运动平台的影响机理不同^[16].如何在充分考虑运动学与环境差异性基础上,对多域平台进行资源调度与任务分解,是多域平台自主决策面临的一个重要挑战.此外,跨域集群系统引入了网络环境,其局部扰动、通信延时、链路动态切换等弱通信特性均会通过物理耦合与网络的接入由此及彼地传播,导致不同平台间的同步性下降、信息反馈不及时,降低了跨域无人平台协同控制的可靠性.因此,在对跨域平台进行集群控制过程中,不仅需要考虑局部子系统的控制性能,更需要兼顾跨域系统的全局优化.然而,受限于水下探测与通信技术,跨域平台一些关键参数并不能精确测量,同时不同平台间耦合关系无法有效描述,直接制约了跨域集群系统的协同控制性能.因此,如何克服环境与平台间不确定因素,揭示控制信息间耦合关系,是提升多域集群平台控制有效性面临的一大挑战.

基于上述挑战,并从控制理论与通信技术相结合的角度出发,海上无人系统跨域集群需解决如下问题:1) 资源受限下跨域无人平台集群感知;2) 弱通信条件下海空跨域平台组网传输;3) 网络环境下多域平台协同控制.其中,集群感知是组网传输与协同控制的依据,需通过跨平台多源信息融合、在线协同更新与分布式集成学习等手段,提升跨域无人系统集群感知范围与精度;组网传输是跨域集群各平台互联互通以及态势感知的基本保障,需突破水下弱通信环境下全域信息共享与信息交互等关键技术,提升信息传输的稳健性;协同控制是跨域集群系统执行复杂动态任务的前提条件和基本保障,也是支撑集群智能倍增的核心与关键,因此需突破跨域网络环境下高动态任务自主决策与协同控制难题,通过各平台优势互补提升跨域集群系统整体性能.

3 跨域集群发展现状与关键技术研究进展

3.1 国内外发展现状

早在 2012 年,美国国防部就正式发布了《联合作战介入概念》报告,首次明确提出海空跨域协同的理论概念^[17].2015 年 10 月,美国国防高级研究计划局启动了“跨域海上监视与瞄准”(CDMaST)项目,该项目以实现“面向海洋的跨域协同体系集成”为目的,旨在构建具有跨域执行监视与瞄准任务的海上监测系统.2018 年 8 月,美国国防部发布了《无人系统综合路线图(2017—2042)》^[18],如图 2 所示,可看出从最早的陆海空割裂(2007)到共处同一画面(2009、2011),再到单域协同(2013)、跨域协同(2017),表征了美军在不同时期对跨域协同这一概念的理解和重视程度.2021 年 4 月,美国太平洋舰队开展了空中/海上有人和无人系统的联合演习(UxS IBP 21),以将跨域有人/无人系统应用到海洋作战场景中,这也是美军对未来载人舰艇和无人舰艇混合作战的首次测试.英国海军自 2016 年以来多次组织“无人战士(Unmannedwar-Rior)”系列演习,测试了包括水面艇、AUV/ROV 与无人机在内的无人平台,以提升其情报监视与作战能力.此外,2018 年欧盟启动了“欧洲海上感知开放式合作”(OCEAN)项目,该项目共涉及 15 个国家,旨在将不同类型的海空无人平台与海上指控中心相整合,以验证跨域协同中的态势感知、自主性、互操作性及其效能.此外,日本于 2016 年建成了“海洋实时监测系统”(DONET),以通过多平台协作来监测地震与海啸信号.可以预见,随着跨域集群概念的持续推进,未来全域体系化作战与目标协同监测将迎来颠覆性发展,新的技术将会不断涌现.

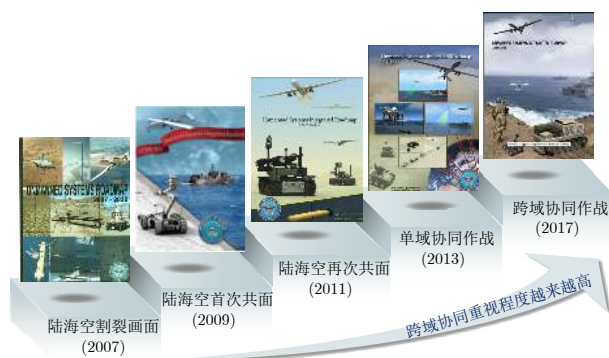


图 2 美国国防部无人系统发展路线图封面

Fig. 2 Covers of the unmanned systems development roadmap for US Department of Defense

与国外相比,我国海空跨域集群的研究起步较晚.2023年10月,国家自然科学基金委公布《国家自然科学基金“十四五”发展规划》,明确将“空天地海协同信息网络”列为“十四五”期间优先发展领域.2022年2月,国务院印发《“十四五”国家应急体系规划》,指出加强构建空、天、地、海一体化全域覆盖的灾害事故监测预警网络,提升监测预警和应急处置能力.2022年9月,交通运输部等部门与单位发布关于进一步加强海上搜救应急能力建设的意见,指出加快构建“陆海空天”一体化感知系统,提升海上感知和监测能力.2024年6月,自然资源部编制完成了《2023年中国海洋生态预警监测公报》,指出提升卫星、无人机、原位在线等新型监测手段应用水平.国内众多高校与研究所也开展了海空跨域协同监测理论与应用研究,并取得了一定的成果.其中,2018年6月,中国科学院沈阳自动化所在大连海域开展了国内首次空海一体化协同观测联合海试;2020年9月,南方海洋科学与工程实验室陈大可院士牵头的“智能敏捷海洋立体观测系统”,利用空、海、潜等智能无人装备进行跨域协同,在珠海海域完成了首次系统级演示验证;2022年5月,上海交通大学两栖无人飞行器“哪吒IV”,在海南省分界洲岛附近海域,完成全球首例真实海洋环境下自主飞行和海空跨域航行全流程试验.国内已取得的研究成果,推动了海上无人系统跨域集群理论与应用的深度融合.

3.2 关键技术研究进展

为充分发挥跨域集群的功能互补能力,海上无人系统应具有集群任务规划、组网传输和协同控制等技术特征,以支撑水面、水下和空中不同域无人平台的集群协作.上述关键技术研究的内部关联关系如图3所示,其研究进展如下所述.

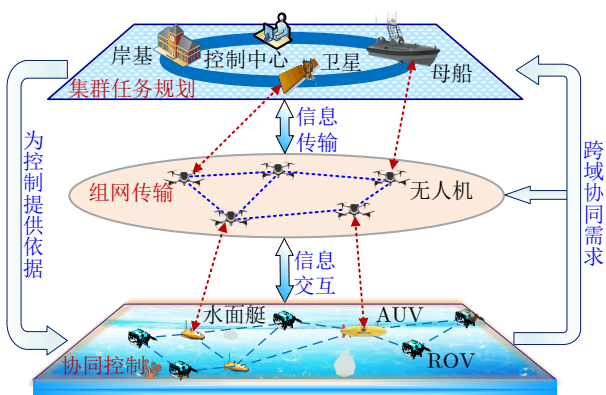


图3 关键技术的内部关系

Fig.3 Internal relationship for the key technologies

3.2.1 跨域集群任务规划

跨域无人平台集群任务种类与数目众多,从军用角度出发,可包括联合反潜、靶场测量以及对岛攻击等场景;从民用角度出发,可包括管道巡检、港口探摸以及深海采矿等场景.因此需根据平台运动特性、任务优先级及时间限制等因素将任务与平台之间的关系进行合理规划,以最大程度实现任务执行效率和质量的联合提升.目前,很多学者针对无人系统任务规划问题展开了研究.例如,Zhang等^[19]利用云服务器将水面艇与海上平台之间的网络资源分配问题建模为竞标游戏,并通过Q学习提出水面艇最优投标策略,以提高任务规划效率.Ma等^[20]提出基于改进K-means的水面艇任务规划算法,实现了“任务-水面艇”的有效匹配.Liu等^[21]提出多无人机协同任务规划方法,根据无人机与海面通信站间的距离变化实现任务分配和轨迹优化.然而,上述任务规划方法主要面向同类无人平台,并不适用于异构平台的任务规划.为此,文献[22]构建了任务导向的空-天-地-海智能立体网框架,其中涉及卫星、无人机、地面站、水面艇、潜器等无人平台,实现了自上而下的任务规划方式.与此类似,Chen等^[23]构建了水面艇-无人机分层任务规划模型,其中下层模型根据无人平台博弈建立目标规划问题,上层模型利用启发式算法给出规划方案,提高了任务规划效率.Tan等^[24]针对水面艇任务规划中的异质性问题,提出任务规划过程中的优先级约束策略.然而,受平台关联性及其任务执行序列约束等因素制约,上述集中式“自上而下”任务规划架构^[22-24]具有求解难度大、耗时长等不足.因此,有必要充分发挥跨域无人平台的边缘决策能力,构建分布式“自下而上”的任务规划架构.基于此考虑,Beard等^[25]针对多无人机多目标提出端对端任务规划算法,其中无人机根据自身与雷达、邻居的相对位置设计代价函数,以确保躲避雷达扫描的同时避免无人机碰撞.Bai等^[26]提出基于拍卖机制的“自下而上”式任务规划架构,并采用分布式边成本策略为无人平台分配无冲突目标.Li等^[27]提出基于差分进化的人工蜂群分布式任务优化算法,以通过潜器与邻居的竞争与合作获得任务规划最优解.在文献[25-27]中,“自下而上”式任务规划架构虽然能够充分发挥边缘计算能力,但是边缘节点感知决策能力有限且缺乏任务规划全局信息,导致跨域平台任务规划易出现冲突.因此,如何将跨域无人平台的边缘智能优势与岸基控制中心的全局规划优势融合,形成“自上而下”和“自下而上”的跨域任务规划架构仍未得到很好解决.

在任务规划过程中, 需要对目标态势进行感知, 以更好地了解跨域集群环境, 为架构设计、组网传输与协同控制提供可靠依据. 与单域系统不同, 海空跨域平台的感知资源更为丰富, 涵盖了众多态势感知信息源, 其信息类型也更加多样. 在这一背景下, 融合来自多个领域和异构平台的信息以形成统一的态势感知显得尤为重要. 为此, Miguelañez 等^[28]构建了分布式语义世界模型, 以增强水下无人平台的态势感知能力. Ferreira 等^[29]利用独立声学信标设计三维定位算法, 提升了目标态势感知精度. 进一步, Zhang 等^[30]提出异构多层移动边缘计算概念, 其中不同类型的边缘设备通过协同对数据进行处理. Wu 等^[31]设计了满意度选择机制, 通过移动边缘计算来提高异构无人平台对动态任务目标的感知能力. Yuan 等^[32]研究了边缘计算约束优化问题, 以最小化平台能耗、数据传输延迟等系统成本, 从而有效提升了目标态势感知效率. 然而, 上述边缘计算过程中易出现数据传输丢失、时空错序与失配问题. 为此, Mills 等^[33]使用联邦学习来提升算法收敛速度和模型准确性; Feng 等^[34]提出集中学习和联邦学习混合算法, 提高了模型准确性, 降低了传输延迟和通信能耗. 文献^[35]提出一种基于最陡下降法的策略搜索算法, 以优化多 AUV 的搜寻任务分配. Wu 等^[36]提出改进的粒子群算法, 用于无人机、水面艇和 AUV 的水下目标探测. 文献^[37]提出一种基于分布式模型预测控制的实时路径规划方法, 以提高无人机群搜索效率, 同时文献^[38]采用网格法对探测区域建模, 以规划无人机和水面艇对海面的探测路径. 然而, 上述工作并没有从理论上分析跨域无人平台集群参数与队形对探测性能的影响. 针对上述问题, Yan 等^[39]采用测度论从理论上揭示了集群队形与探测概率间的耦合关系. 如图 4 所示, 无人机-水面艇-自主水下航行器采用协同探测方式对水面与水下目标进行感知, 为实现水下目标探测概率最大化, 水面艇和 AUV 需沿直线探测, 且移动方向平行, 两者探测区域尽量减少重叠, 此外水面艇与 AUV 的相对角度 α_{SU} 应满足如下条件

$$\alpha_{SU} = \arcsin \frac{h_p}{D_{SU}} \text{ 或 } \alpha_{SU} = \pi - \arcsin \frac{h_p}{D_{SU}} \quad (1)$$

式中, h_p 表示水下目标所处深度; D_{SU} 表示水面艇与 AUV 间直线距离. 上述工作为进一步融合空中-水面-水下多源信息以及多任务需求, 开展多源异构数据融合下的目标态势感知奠定了良好基础.

3.2.2 跨域集群组网传输

跨域集群组网传输是指利用空中/水面/水下无人平台进行跨域通信和数据传输. 作为无人集群系

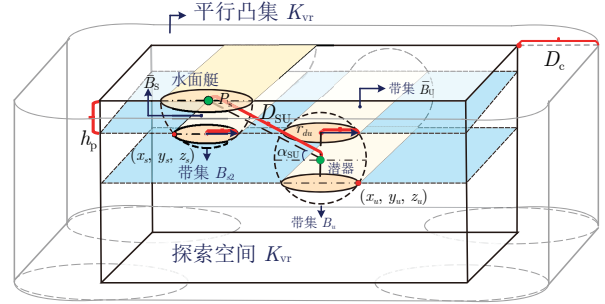


图 4 水面艇与潜器联合探测网络

Fig. 4 Joint detection network of USV and AUV

统实现互联互通的基础, 组网传输是保障无人平台任务规划、协同控制以及其他数据信息交互的关键. 受海空传输介质以及复杂海洋环境的影响, 如何实现跨越水-气界面的可靠组网传输一直是学术界的研究热点, 目前常通过基于中继的跨介质通信方式和无中继的跨介质通信方式进行解决. 需要指出的是, 在 1000 m 水深处形成深海声道轴, 在此区域海洋表层的扰动不影响声速分布, 声波可沿此声道传播达数千公里. 由于工程技术上难度大、甚低频大功率发射换能器缺乏, 导致深海声道的应用迄今很有限且不成熟^[40], 为此本部分综述中并不考虑声道轴处的通信, 可在未来研究中进行深入探讨.

在无中继的跨介质通信中, 无人机与 ROV/AUV 建立直接通信链路 (如图 5 所示), 可提高海空跨介质通信的灵活性, 降低通信时延, 提升安全性. 其中, 无中继的跨介质通信主要分为如下形式^[41]: 1) 甚低频/超低频/极低频跨介质通信; 2) 蓝绿激光跨介质通信; 3) 激光致声跨介质通信; 4) 磁感应跨介质通信. 具体来说, 甚低频跨介质通信采用频率 3 Hz ~ 30 kHz、波长 10 m ~ 10 km 的电磁波进行数据传输, 可穿透约 10 ~ 20 m 海水深度; 超低频跨介质通信采用频率 3 ~ 300 Hz、波长 1000 ~ 10000 km 的电磁波进行数据传输, 可穿透约 100 ~ 400 m 海水深度; 极低频跨介质通信采用频率 3 ~ 30 Hz、波长 10000 ~ 100000 km 的电磁波进行数据传输, 穿透深度更高, 电离层干扰较小. 另一方面, 蓝绿激光跨介质通信采用激光波束作为信息载体, 将数据信号调制到光载波上进行传输, 例如 Alharbi 等^[42]分析了海面对蓝绿激光跨介质通信的影响, 并在水池环境验证了跨介质通信的有效性. 激光致声跨介质通信, 利用激光脉冲在空气或其他介质中产生声波来进行通信, 可利用激光脉冲在一种介质中产生临时的局部加热, 从而引起该介质的膨胀和收缩, 进而产生可听到的声波, 这些声波可以被接收器捕获并解码成原始的信息信号. 基于上述原理, Yel-

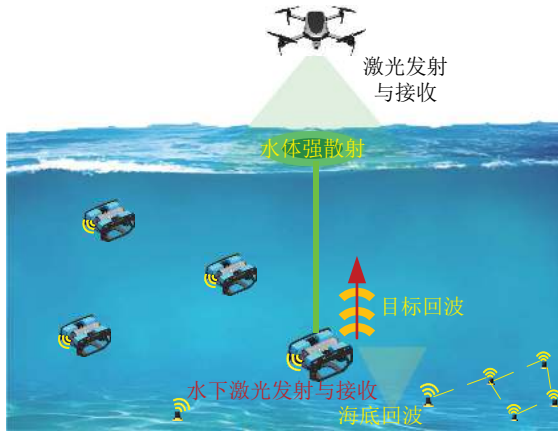


图 5 无中继的跨介质通信示意图

Fig.5 Schematic diagram of the cross-domain communication without the relay nodes

laiah^[43] 采用有限元分析来可视化激光致声通信界面处的水声信号反射和传输, Zhao 等^[44] 搭建了激光致声通信实物系统, 并在长距离通信中进行了应用验证. 除此之外, 磁感应跨介质通信以磁场为载体 (如图 6 所示), 利用近场交变磁感应进行数据传输, 隐蔽性强且不受光线阻挡, 在某些需要穿透障碍物的场景下具有优势, 但是磁场传输随距离和频率的增加而快速衰减, 限制了磁感应跨介质通信的传输距离. 综上所述, 上述无中继的跨介质通信各有优缺点, 然而在实际应用中仍然面临信号高衰减和传输损失、信号易受干扰、协议转化难、物理机制描述难等挑战, 如何综合考虑以上问题, 通过合适技术手段和解决方案来克服这些挑战, 实现理论可行到实际可用间的转化, 仍需进一步研究.

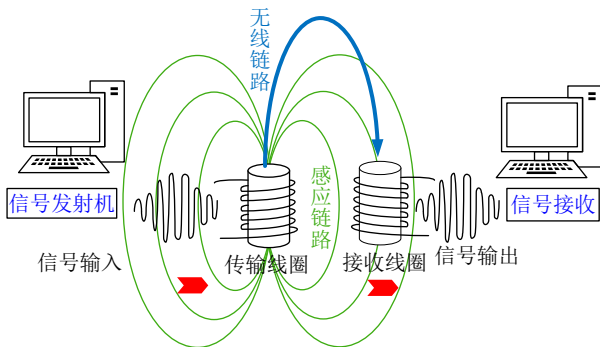


图 6 基于磁感线通信的跨介质数据传输

Fig.6 Cross-domain data transmission based on the magnetic induction line communication

在基于中继的跨介质通信中, 浮标部署在海面, 并配备多种无线发射与接收设备, 对岸基/空中/水面和水下平台间的数据进行多模态通信. 例如, 浮标配置声通信与无线电通信两种通信模式, 一方面

利用声学收发器与水下平台进行信息交互, 另一方面通过无线电通信与岸基/空中/水面平台进行信息交互. 上述多模态通信方式虽然能够实现水上与水下平台间的互联互通, 但仍存在如下问题: 1) 水上与水下通信模式功率难以均衡且信道复杂; 2) 中继节点的引入使其易暴露于海面, 面临安全隐患, 另外额外的跳数增加了通信时延. 针对上述问题, Coutinho 等^[45] 提出基于随机模型的多模态机会路由协议, 用于联合选择最适合数据传输的声学调制解调器和下一跳转发候选节点, 以降低多模态通信能耗并提高网络数据传输率. Celik 等^[46] 提出基于扇区的机会路由协议, 通过水下光学无线信道的广播特性候选中继, 提高了分组传送率, 并考虑混合的声/光协调机制, 以避免中继的重复传输. Campagnaro 等^[47] 提出基于分时多址帧的多模态水下网络调度协议, 其时隙被最佳地确定以最大限度提高整体信道利用率, 同时保留流量限制和保持资源分配的公平性. Zhao 等^[48] 提出基于改进增强学习框架的多级路由策略, 设计了多中继节点协同传输策略, 能够满足不同海洋应用多种传输时延要求, 提高了数据传输的可靠性. 然而, 上述路由策略忽视了信道质量对中继选择的影响. 为此, Diamant 等^[49] 通过声学预测光链路的质量, 并分析了声学链路的特性与光通信的可靠性之间的相关性. 考虑到移动通信系统的指标权衡与水下移动通信系统中最优的数据传输分配问题, Cao 等^[50] 设计数据采集算法来节省多模态通信能量, 提升水声传感器网络寿命. Wang 等^[51] 设计了一种联合时间和功率分配算法来处理直接和继电器辅助模式下的资源分配问题. 针对中继节点传输策略可移植性差的问题, Zhilin 等^[52] 提出一种在不同模式 (声学、磁感应、光学和射频) 下工作的通用水下软件定义调制解调器架构, 通过交换数据控制和同步信息, 并根据用例和水下信道条件选择适当的模式进行中继通信, 降低水下传输延迟, 提高能量效率, 同时保持高可靠性和鲁棒性. 根据事件的类型和时效性, Zhao 等^[53] 提出一种基于水下多模态通信系统设计的分布式多级传输策略, 并考虑传输延迟、能源效率和传输负载的传输策略, 设计构建最小成本流模型, 提高了平均网络寿命. Francescon 等^[54] 提出由声学调制解调器、光学调制解调器和地面 WiFi 链路组成的多模态系统, 量化了每种可能的硬件配置的性能损失. 如图 7 所示, Wang 等^[55] 提出基于 6G 的“空天地海”一体化跨域中继策略, 以实现全方位无线覆盖. 尽管如此, 在跨域中继时, 仍需通过优化设备设计、改进通信协议、加强安全保护等措施来提升通信稳定性、效率和安全性.

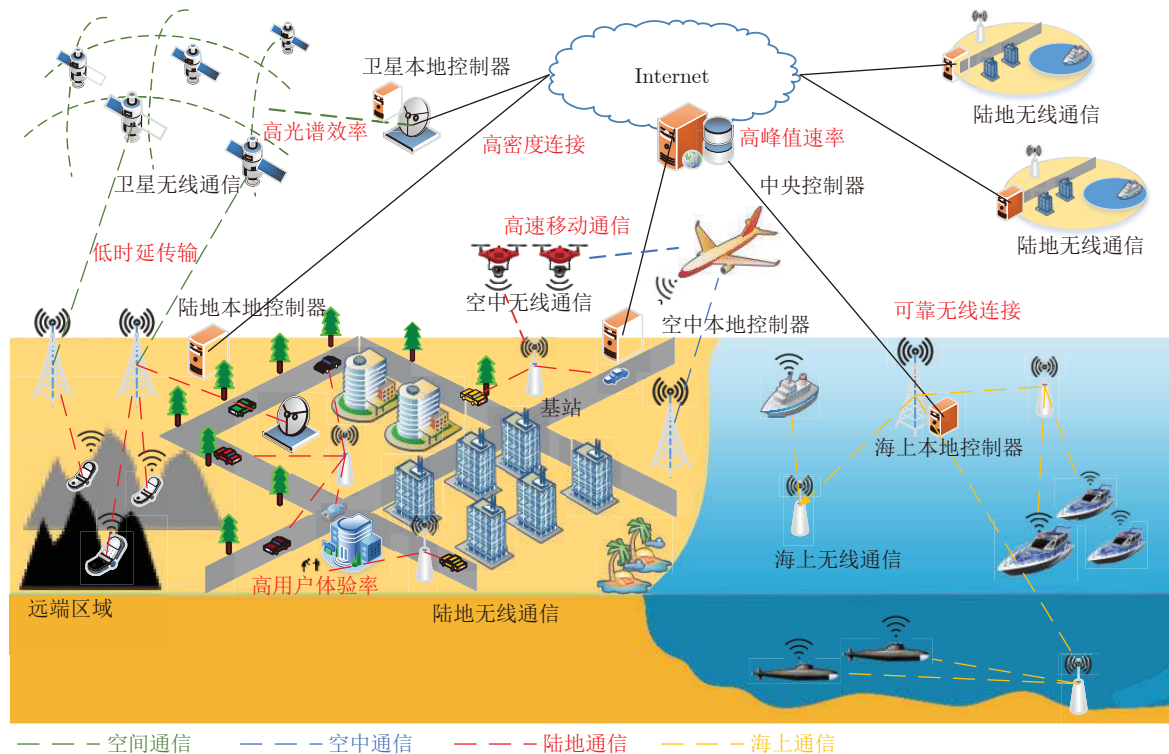


图7 基于6G技术的“空天地海”一体化跨域中继传输网络

Fig.7 Air-space-ground-sea integration cross-domain relay transmission network based on 6G technology

在上述跨域组网传输过程中,不同介质的引入导致时钟延迟和漂移,影响通信性能,因此需要确保空中-水面-水下平台间时钟同步.目前,不同场景下的时钟同步算法已经有许多研究.例如,既有基于实时以太网(Real-time ethernet)协议进行改进的时钟同步算法^[56],也有针对以太网控制自动化技术(EtherCAT)设计的提高时钟同步性能的算法^[57].另外,Garg等^[58]提出一种无限精确时间协议,以在不影响同步精度的情况下减少同步所需时间.然而,上述估计方法缺少对随机延迟的考虑,而海上信号传输存在更多干扰,传输延迟不对称.为此,Jin等^[59]开发了一种基于动态拓扑的多无人机时间同步算法以估计无人机时钟参数,Alsolami等^[60]提出一种无人机群自定时同步方法.为了提高水下时钟同步精度,Kebkal等^[61]采用水声调制解调器进行数据收发并测量信号传播时间,实现水下时钟同步.然而,在高混杂的环境中,声学传播时间测量结果干扰严重,同时由于时钟设备的差异,时钟晶振计数频率存在误差,导致时钟节点间存在时钟漂移.基于此,Liu等^[62]通过两次线性回归对时钟漂移系数和时钟偏移进行校准以提高时钟精度.Jin等^[63]考虑节点相对运动影响,提出一种集成的多通道时间同步协议以降低传输延迟,提高时钟准确度.Zhou等^[64]提出具有能量有效性的时钟同步算法,

以减少同步次数并降低节点消耗.除此之外,Vermeij等^[65]基于AUV、水面艇以及部署在海底的传感器节点,提出一种基于调制解调器数据包的时钟偏移和漂移估计策略.Gong等^[66]以AUV作为移动锚节点辅助时钟同步,通过周期性的广播信号使通信范围内的任何传感器都可以测量接收数据包的到达时间.为提高时钟同步的收敛速度和稳定性,文献^[67]提出基于深度学习的同步算法,以通过无人机-水面艇-潜器时间戳交互方式(如图8所示),从样本经验池中多次随机抽取样本进行训练,最终得到估计参数.王恒等^[68]设计基于最大似然估计的同步算法,以对陆地无线传感器网络中的隐含节点时钟漂移和偏移参数进行联合估计.此外,刘妹琴等^[69]采用水声传感器网络对水下目标进行声学探测,并对目标追踪过程中的网络架构与组网协议进行了综述.上述方案为进一步研究跨域集群下的时钟同步奠定了很好基础.

3.2.3 跨域集群协同控制

跨域集群协同控制是指空中-水面-水下平台,根据已规划的任务与组网信息,通过编队控制共同完成预定的集群任务.为实现上述任务,空中-水面-水下平台需要进行路径规划与编队控制.其中,路径规划是指规划一条从起点到终点的路径,以实现无人平台的自主导航和目标达成,这个过程需要考

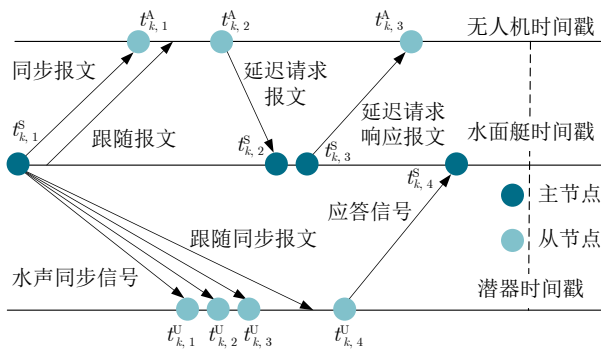


图8 无人机-水面艇-潜器间时钟同步

Fig.8 Clock synchronization among UAV, USV and AUV

考虑环境的特点,包括水下地形、障碍物、水流等因素;编队控制是指无人平台根据自身姿态感知与邻居信息交互,实现编队形成、保持和调整,从而完成各项任务,如搜索救援、巡逻监控、环境监测等。

针对路径规划,常用方法包括粒子群优化算法、人工势场、差分进化算法以及人工神经网络等算法。例如,Ke等^[70]提出粒子群优化的协同规划算法,以解决无人机、水面艇和自主潜航器有障碍物的规划问题,具体来说,以无人机-水面艇-AUV最短路径时间为优化指标,构建如下优化问题

$$\begin{aligned} & \min t_1^a \\ & \text{s.t.} \\ & \begin{cases} L_{a-T}^0 < L_{s-T}^0 \leq L_{u-T}^0 \text{ 或 } L_{a-T}^0 < L_{u-T}^0 \leq L_{s-T}^0 \\ L_{a-H}^{t_1^a} = \lambda_{a, \max} - R_T \\ L_{s-H}^{t_1^a} > \lambda_{s, \max} - R_T \\ L_{u-H}^{t_1^a} > \lambda_{u, \max} - R_T \\ C_{a-s, \text{safe}} \leq C_{a-s}^1(t) \leq C_{(a-s), \max}, \quad t \in [0, t_1^a] \\ C_{s-u}^1(t) \leq C_{(s-u), \max}, \quad t \in [0, t_1^a] \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

式中, t_1^a 表示无人机规划搜索时间; L_{*-T}^0 , $* \in \{a, s, u\}$ 表示 t_0 时刻无人平台(例如无人机、水面艇或AUV)与目标间的空间距离; $L_{*-H}^{t_1^a}$ 表示 t_1^a 时刻无人平台与中心点H之间的水平距离; $\lambda_{a, \max}$, $\lambda_{s, \max}$, $\lambda_{u, \max}$ 分别表示AUV、水面艇和无人机的最大探测半径; R_T 表示目标半径; $C_{a-s, \text{safe}}$ 表示水面艇与无人机间的安全距离; $C_{a-s}^1(t)$ 表示无人机与水面艇间相对距离; $C_{s-u}^1(t)$ 表示水面艇与AUV间相对距离; $C_{(s-u), \max}$ 与 $C_{(a-s), \max}$ 表示避障安全距离。为求解上述问题,给出了改进型粒子群最优算法,以在通信约束下获取跨域集群系统最优路径。

此外,文献^[71]采用启发式灰狼优化(Grey wolf optimizer)路径规划算法来提高水下目标捕获成功率;Zhang等^[72]面向水下追踪问题,提出一种基于人工势场法的水面艇和潜器路径规划算法;Lindsay等^[73]提出自适应的路径规划算法,以维持无人机、水面艇和AUV与目标的安全距离。需要注意的是,上述路径规划算法中,无论是水面艇还是AUV均被视为一个质点,通过二阶线性或非线性方程来描述其运动学过程。然而,在异构系统协同控制过程中,为了有效地完成控制任务,往往需要考虑真实的动力学模型。近年来,国内外学者提出了许多基于动力学模型的异构系统协同追踪算法。例如,Yang等^[74]基于模型最优控制器实现无人机、水面艇和AUV在障碍物环境下的轨迹跟踪控制;Jia等^[75]提出一种基于模型预测控制的路径规划策略,其中采用运动学和动力学模型描述水面艇和潜器的运动状态。在存在未知速度策略的情况下,Li等^[76]为水面艇和AUV设计了方位跟踪控制器;Enayat等^[77]采用拉格朗日动力学动态调整水面艇和AUV路径,以确保跟踪稳定性。然而,现有的路径规划算法大多忽略了跨域环境中的信道影响,导致控制性能的提升以牺牲通信质量为代价。鉴于此,Dixon等^[78]将信道中的阴影损耗与多径损耗融入到无人机中继算法中,提出空对空信道下的路径规划算法,其中无人机集群作为通信中继,并利用信道采样计算出的电磁波信道梯度来指导无人机集群运动方向。Guo等^[79]将无人机飞行路径上的路径损耗、多径阴影损耗用于无人机轨迹的辅助预测,提升了轨迹预测的精度,降低了算法复杂度。Wu等^[80]提出基于凸优化的信道与路径规划联合设计算法,其中通信质量与无人机集群轨迹的功率用于最大程度提高通信链路的最小吞吐量。文献^[81]提出如图9所示的水声信道参数反馈下AUV路径规划策略,以均衡路径规划过程中的控制稳定性与通信有效性。为进一步估计障碍物造成信道散射效应下的信道分布,文献^[82]设计障碍物环境下水声信噪比(Signal-to-noise ratio, SNR)的估计方法;同时文献^[83]考虑水流场场景,进而提出基于自适应神经网络的水面艇追踪控制器,实现水面艇路径规划有效性。上述结果为进一步研究跨域集群过程中的路径规划提供了很好的基础。由于空中与水下介质的不同,导致视觉和水下声学探测信息维度不同,缺乏统一的数据对齐方法,且水下声学信号信噪比低,静态与动态障碍物无处不在,使得量测信号中充斥虚假和干扰信息,增加了跨域集群路径规划难度。因此,如何将光学与声学测量特性融合,设计适用

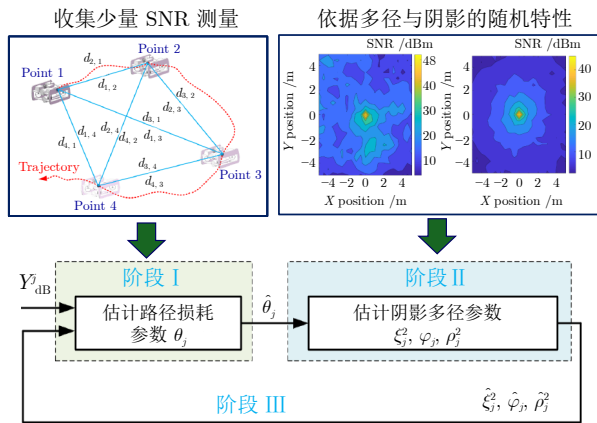


图 9 信噪比测量下的信道估计算法流程

Fig.9 Channel estimation algorithm flow under SNR measurements

于跨域集群的路径规划算法仍需进一步研究。

在路径规划基础上, 无人机-水面艇-AUV 以及 UUV 能否形成预期编队队形, 将最终决定协同控制的成败. 根据体系结构与控制策略, 编队控制分类主要通过如下两种方式: 1) 基于体系结构的编队控制: 包括集中式^[84-86]、分布式^[87-90]和分层式^[91-93]. 三种结构的重要区别在于决策过程, 例如集中式结构要求中央控制单元具有全局信息并做全局决策, 进而将控制指令发送给各个平台, 同时各个平台将其状态等信息返回给中央控制单元作为反馈依据 (见图 10), 其优点包括集中管理、易于监控和维护、便于统一调度和控制等, 然而其缺点也很明显, 比如单点故障可能导致整个系统瘫痪、扩展性受限等; 在分布式结构中, 每个无人平台利用局部信息独立决策, 并与相邻的平台交互信息, 完成编队任务 (见图 11), 其优点包括稳定可靠、容错性更强、响应速度更快、扩展性更好, 然而其计算量与通信量比较大; 分层式结构介于分布式与集中式结构之间, 每个层级不仅可以独立进行控制, 也可以与上下层级进行通信和协作, 可以实现系统的模块化、可扩展和可维护, 并提高系统的性能和可靠性. 2) 基于控制策略的编队控制: 可分为领导者-跟随者 (Leader-follower) 策略、基于行为的策略、虚拟结构策略和人工势场策略等. 例如在基于行为的策略中, 每个平台根据预设行为达到控制效果, 在虚拟结构策略中, 一组无人平台被定义为一个刚性结构, 虚拟结构策略下的无人平台保持固定的相对距离和方位的几何形状, 在人工势场策略中, 无人平台根据势场进行吸引力与排斥力的设计.

基于上述分类, 学者们从不同角度出发给出了跨域平台编队控制方法. 例如, 文献 [94] 提出一种

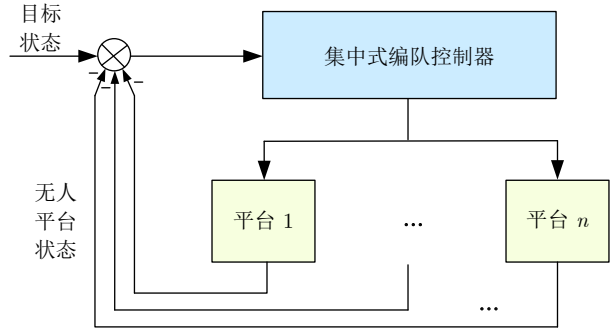


图 10 集中式编队结构

Fig.10 Centralized formation structure

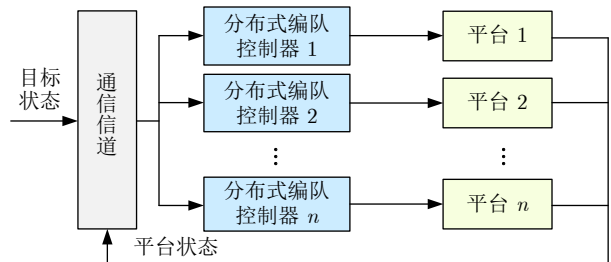


图 11 分布式编队结构

Fig.11 Distributed formation structure

领导者-跟随者的分布式编队算法, 该算法使得跟随者能够渐进跟踪领导者的速度并接近与其邻居的平衡距离. 文献 [95] 利用期望的轨迹和阻抗控制律来实现多个平台间的协同运动, 从而达到整体上的目标跟踪和避障. 文献 [96] 针对三维环境下多 AUV 时变编队控制问题, 提出固定时间事件触发的避障策略, 并根据当前状态调整控制输入, 以实现避障和编队控制. 文献 [97] 提出一种将人工势场和虚拟结构相结合的 AUV 编队控制方法, 同时文献 [98] 设计了一种基于仿射变换和改进人工势场的可变编队重构避障控制方案, 使得 AUV 能够在外部干扰下避开静态和动态障碍, 并保持所需的时变编队. 然而, 上述方法忽略了通信时延的影响, 水声通信的低传播速度使得每传输 1000 m 大约需要 0.67 s, 同时水声通信速度又随水的盐度、温度的升降而升降, 因此使得水声通信时延呈现动态变化的特点, 上述时变的通信时延降低了水下潜器的编队性能. 由于水声弱通信特性影响, 在设计编队控制策略过程中, 需要考虑水声通信时延的影响. 在跨域环境中, 通信时延主要分由三部分组成: 1) 声波在水中的传播时间, 其主要由距离与声速决定, 其中空中传播时延可以忽略不计; 2) 信息处理时延, 其主要由信号调整、换能器收发等信号处理因素决定; 3) 时间差测量误差, 其主要由信号测量精度决定. 基于上述考虑, 文献 [99] 考虑 AUV 编队控制中的时变

通信时延, 将 AUV 1 选择为领航者, 其目的是追踪目标点 X_d . 同时, 其余 AUV 与领航者保持期望的相对状态, 进而设计如下形式的编队控制器

$$\tau_i = \sum_{j=1}^N a_{ij} k_i (\bar{\eta}_i - \bar{\eta}_j) + b_i k_i (X_d - \bar{\eta}_i(t - d_i(t))) - b_i \alpha_i \dot{\bar{\eta}}_i(t - d_i(t)) + \bar{g}_i(\bar{\eta}_i) \quad (3)$$

式中, τ_i 代表第 i 个 AUV 的控制输入; N 代表 AUV 的总个数; a_{ij} 代表 AUV i 与 j 之间的邻接关系; k_i 与 α_i 表示待设计的增益矩阵; η_i 代表 AUV i 的姿态, γ_i 表示 AUV i 与 1 之间理想的相对状态, 进而 $\bar{\eta}_i = \eta_i + \gamma_i$ 且 $\bar{\eta}_1 = \eta_1$; $\bar{g}_i(\bar{\eta}_i)$ 代表经过转换后的水下惯性向量; b_i 代表 AUV i 与目标点连通关系增益, 其中 $b_1 > 0$, 对于跟随者 AUV, $b_i = 0$; $d_i(t)$ 表示 AUV i 与水面浮标之间的时变通信时延. 目前, 针对控制系统中的通信时延问题, 一般通过时延补偿技术或者时序校正与同步技术进行处理, 具体选择取决于系统的特定要求、可用的技术和限制条件.

然而, 上述工作主要面向全驱动动力学系统进行设计, 需要指出的是各自由度的运动由推进系统完成, 其推力随着无人平台运动速度增加而减弱, 使得该自由度的运动难以控制. 目前, 一些学者已针对欠驱动无人平台的控制问题展开了研究. 例如, Belleter 等^[100] 建立基于扰动观测器的海洋船体航迹追踪控制算法, 利用级联系统理论证明了闭环系统的全局稳定性. Fang 等^[101] 采用深度学习设计了欠驱动 AUV 姿态追踪控制器, 通过多任务分解完成了位置跟踪任务. Kong 等^[102] 考虑欠驱动特性、速度约束和集中扰动, 采用扩展状态观测器对未知不确定进行估计, 进而设计了基于模型预测控制的航迹追踪控制器. 考虑非对角结构的欠驱动 AUV, Park 等^[103] 构造了基于神经网络的速度观测器, 并提出了基于输出反馈的追踪控制算法. 进一步, Li 等^[104] 利用滑模控制方法, 设计了欠驱动 AUV 有限时间编队控制器. 考虑有领导者和无领导者两种情况, 文献 [105] 设计了基于避障算法的有限时间多 AUV 一致性控制器. 此外, 林安辉等^[106] 采用干扰观测器设计了输入饱和与不确定下的欠驱动船体编队控制器. 如图 12 所示, Shojaei 等^[107] 设计了预定性能下欠驱动 AUV 链式编队控制器. 尽管上述编队控制器需要水面或者空中平台信息协助, 但是其研究重点还是聚焦于单域无人平台, 目前针对空中-水面-水下平台的编队控制方法很少. 此外, 水下流速场对 AUV 与 ROV 控制的影响是一个重要的挑战, 因为流速会影响其运动轨迹、姿态稳定性以及

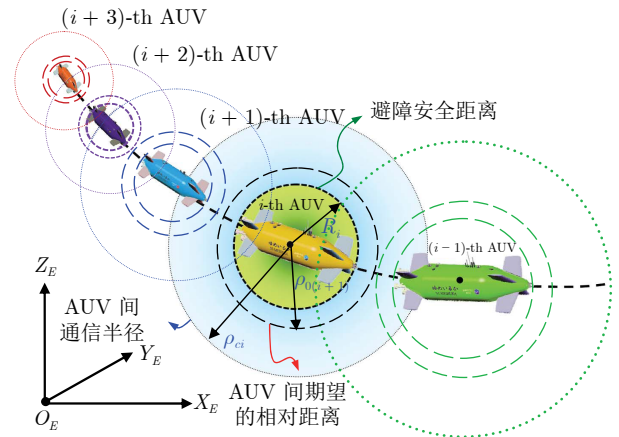


图 12 AUV 间链式编队结构

Fig. 12 Structure of the chain formation for AUVs

能源消耗. 目前, 陆地风速场下的机器人控制已经有很多研究, 例如 Bai 等^[108-109] 考虑风速场影响并采用最优控制与聚类策略, 设计了移动机器人最短时间路径规划算法; Zhang 等^[110] 提出无人机鲁棒编队控制器, 以克服无人机空对地打击任务中风场的影响. 然而, 上述方法并不能直接应用于水下追踪编队中, 因为潮汐使水下平台周期性振荡, 涡流使其非周期性移动, 其建模过程更加复杂. 为刻画水流时空变化特性, Yan 等^[111] 构建了异步时钟下基于浮标-潜器信息交互的流速场反演模型, 为水下网络系统中的水流估计提供了新的思路. 基于上述结果, 有必要进一步将水流反演模型融入到多潜器编队控制过程中, 通过合理的建模方法、实时数据处理和优化的控制策略, 克服水下流速场影响, 确保编队在不同海流环境条件下的稳定性和高效性.

4 跨域集群典型应用场景

如图 13 所示, 跨域集群在军民领域有着广泛应用前景. 为更好地理解跨域集群重要意义, 从军事与民用角度出发, 对其典型应用场景进行阐述.

1) 基于海上跨域集群的联合反潜

2022 年 4 月 13 日, 乌克兰派出 2 架土耳其 TB-2 无人机对俄罗斯“莫斯科”号巡洋舰精准侦察并干扰其防空兵力, 随即发射 2 枚“海王星”导弹命中目标, 随后“莫斯科”号巡洋舰侧舷中弹后冒出白烟, 缓缓沉入大海. 同年 10 月 29 日凌晨 4:30 分, 乌克兰 7 艘无人艇和 9 ~ 16 架无人机采取跨域集群化协同行动, 袭击了位于克里米亚塞瓦斯托波尔港内的俄黑海舰队, 据乌克兰 UKRicon 网站报道称, 俄罗斯 4 艘军舰遭到袭击, 分别是“马卡洛夫海军上将”号护卫舰、1 艘“蟾蜍”级登陆舰、1 艘护卫舰和 1 艘 22 160 型巡逻艇, 其中“马卡洛夫海军上

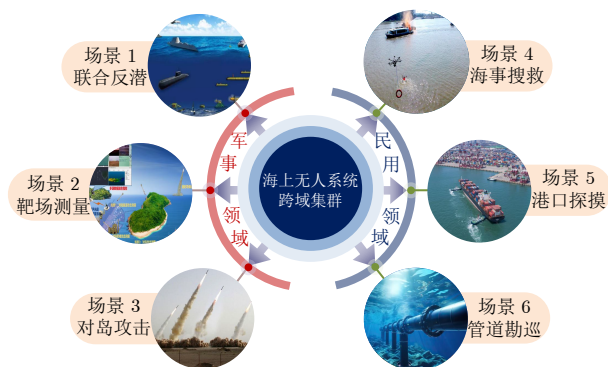


图 13 跨域集群任务场景

Fig. 13 Task scenarios for the cross-domain swarm

将”号受创最重, 雷达系统受到严重损毁。上述事件表明, 俄乌战场上的跨域集群系统发挥了不可替代的作用, 达到了有人装备都无法实现的战略目的。也启示我国, 必须面向海上重要基础设施安全保护措施, 采用空中-水面-水下跨域集群形式, 共同执行反潜作战任务, 以利用不同平台的优势提高反潜作战的效率和效果。

2) 跨域集群驱动下的对岛登陆作战

海上登陆是在组织和实施上最为复杂的海上作战样式, 但同时也是海上力量影响和作用陆上战争进程的最有效方式。1944年6月6日, 美英盟军在法国诺曼底地区对德军实施战略性登陆作战, 共投入兵力45个师、各型飞机1.3万架、各种舰艇约5000艘, 伤亡12.2万人; 德军共投入兵力15个师、各型飞机约500架, 各种舰艇500余艘, 伤亡和被俘11.4万人。在信息化战争条件下, 现代化战争已不需要靠诺曼底登陆这样的模式。然而, 实施海上对岛登陆需要面临更大的困难, 表现在登陆意图更容易暴露, 登陆兵力要承受远程精确打击的更大风险。针对上述难题, 跨域集群驱动下的对岛作战可利用多个领域(例如陆地、海洋、空中、网络等)的军事力量协同作战, 对被登陆一方的薄弱防御环节进行精准锁定, 可实现夺取、控制或削弱敌方控制的岛屿或岛屿附近地区。需要注意的是, 这种作战通常涉及到陆军、海军、空军、网络作战部队等不同兵种的协同作战, 旨在通过综合利用各种军事力量和资源, 达到对敌方岛屿实施打击、突袭、占领或封锁等目标。

3) 基于跨域集群的海事搜救

2014年3月8日, MH370航班凌晨起飞不久后失联, 航班上载有乘客227名、机组人员12名。随即, 世界多国利用太空、空中、水面、水下等装备进行搜索工作, 例如美国海军派出“蓝鳍金枪鱼”水下无人潜航器参与水下搜救工作, 我国海军第十七

批护航编队前往印度洋海域执行搜救任务。这场历时数年的海上搜索创造了多项纪录, 其中之一就是利用大量空中-水面-水下装备进行跨域搜救。据不完全统计, 在海难后的9天内(即截至2014年3月17日), 已经有来自26个国家与地区的40艘舰船、超过58架飞机参与搜索, 覆盖区域超过78万平方公里^[112]。严格来讲, 马航搜救并不能称为严格意义上的跨域集群, 因为各个国家与地区的平台协同方式并不紧密。尽管这一创纪录的搜救任务以失败而告终, 但是凸显出跨域集群在海事搜救中具有重要的潜力。与此同时, 2019年6月, 秦皇岛市海上搜救中心承办“大型客船人命救助暨污染事故应急演练”^[113], 在渤海近海进行, 通过空中-水面-水下平台协同作业, 实现了跨域集群在海洋监控中的尝试。

4) 基于跨域集群的海上基础设施运维

传统的海上基础设施运维, 主要通过物理防护网、人工和水面警卫艇巡逻等方式实施, 这些方式不仅工作强度大、成本高、耗时长, 而且效率低、可靠性不高, 受复杂海洋环境、风力与波浪力等外界作用力影响, 无法及时应对突发事故。例如, 2022年9月26日, 由俄罗斯经波罗的海向德国等欧洲国家输送天然气的“北溪”管道发生爆炸泄漏, 这为海底管道安全敲响了警钟, 也为管道实时可靠勘测提出了更高要求。基于上述考虑, 可通过跨域集群系统对海上基础设施进行运维, 例如可集成空中-水面-水下无人平台于一体, 构建空海潜一体化作业系统, 实现水下地形地貌、地质、水文气象、化学物理等要素勘测, 以及水上/水下设施传输线缆等监测功能。需要指出的是, 文献^[114]给出了面向港珠澳大桥智能化运维技术的跨域集群方案, 其中以运维需求为导向, 并借助多传感器融合、在线评估预警、数字孪生以及多模态数据调度技术, 尝试攻克跨海集群设施运维关键技术难题, 实现跨海集群设施数字转型和智能升级, 确保港珠澳大桥安全高效运维。上述方案也为拓展到其他海上基础设施运维提供了借鉴。

5) 海空跨域集群辅助下的深海采矿

在陆地矿产资源日益匮乏的背景下, 通过开发深海矿产资源来缓解人类社会资源匮乏这一难题已成为全球趋势。然而, 深海采矿通常是在水深可达6000m的海域开展, 海洋环境下的风、浪、流以及内波等因素, 对水面支持船、管道、海底采矿车在其安装、生产、维护、风险规避以及回收等各个阶段的正常运维影响很大。此外, 深海地质、地形、水深、矿石赋存形式的复杂性, 增加了采矿车海底作业的

难度^[15]。为此,可在空中无人机-水面艇-潜器集群辅助下,一方面为海底采矿车提供定位导航综合服务,实现水下采矿车的精准定位和精确跟踪;另一方面,操作员在岸基通过远程操控与跨域通信方式,对多个水下采矿车进行编队作业,提高作业效率,提升处理复杂任务水平,增加抵抗外部扰动能力。

5 思考与展望

纵观历史,向海则国兴,闭海则国弱。历史上,我国农耕文明繁荣,但海洋意识薄弱,长期以来重陆轻海,错失海洋事业大发展机遇。2012年党的十八大报告首次提出“建设海洋强国”的战略目标,2017年党的十九大强调“坚持陆海统筹,加快建设海洋强国”,2022年二十大再次强调“发展海洋经济,保护海洋生态环境,加快建设海洋强国”。无论从党的十八大报告、十九大报告到党的二十大报告,以及“十四五”规划和2035年远景目标纲要,都把海洋强国放在突出的位置加以强调。向海图强,装备先行,海上跨域集群系统凭借其诸多优点,可为海洋资源的开发与利用提供技术保障,是我国实施海洋战略、建设海洋强国的重要抓手。受制于当前技术发展水平,本节列出跨域集群过程中一些重要但尚需解决的问题以及未来值得深入探究的方向。

1) 跨域无人集群标准制定

海上跨域无人集群系统能够综合利用多种技术和资源,跨越单一领域的限制,实现多任务、多领域的高效协同和运作,为海洋资源管理、科学研究和环境保护等领域带来前所未有的机遇。然而,不同领域可能采用不同的技术标准和规范,每个领域可能有独特的操作流程和规定,同时不同国家或组织间对跨域集群的管理标准和法律规定不同。因此,需要加强顶层规划,制定跨域合作的统一框架和标准化协议,这可能涉及到国际组织、行业标准制定机构和技术研究团体的合作,通过制定统一的技术接口、通信协议和操作规范,可以促进不同领域间的集成和协作,提升跨域集群系统的整体效能和可用性。

2) 海上长续航无人装备

性能先进、长续航、稳定可靠的海上无人装备是跨域集群的基础。因此,一方面需要加强空中-水面-水下无人装备自身技术水平、成熟度、续航能力、可靠度,另一方面可发展“长时驻留+快速移动”的大型实海试验平台,实现海上长时驻留、抵御极端海况、快速航行部署等功能。目前,上海交通大学提出的“远海浮动岛”概念,可为海洋装备和海洋科学提供长时、实海的试验平台,实现海上长时驻留、抵

御极端海况、快速航行部署,同时具备深海装备技术的试验平台、未知海洋奥秘的科考平台以及国际海洋科考的合作平台功能。这也为进一步提升跨域无人设备长时间可靠驻留提供了很好基础。

3) 探测-通信-控制一体化架构

目前,跨域集群平台的探测、通信与控制功能相互独立设计,相关设备在能耗与频带上相互竞争,受其体积限制,不利于探测感知与通信交互功能的提升。需要注意的是,跨域探测、通信与控制在工作原理、系统架构、信号处理与工作频带等方面具有相似之处,可为探测-通信-控制一体化设计带来可能。Mealey^[116]于上个世纪60年代首次提出利用雷达脉冲对通信信号进行调制的思想。受此启发,学者们从不同角度提出了面向雷达信号的探通一体化方案,闫敬等^[117]对水下探测-通信-控制一体化进行了综述。然而,如何针对跨域集群自身与环境特点开展探通控一体化架构设计,确保跨域无人平台资源共享、提升作业效率、增加隐蔽性、降低平台体积与功耗,仍是一个未来待解决的难题。

4) 跨介质通信技术

为确保跨域集群系统通信互联,无人平台有必要与岸基、空中、水面、水下多类型有人/无人平台交互信息,实施预警探测、态势共享以及协同决策等任务,同时兼顾自身体积和功耗等因素。因此,可集成水声、光学、电磁和其他各种通信手段,通过声、光、电、磁多模互补,提升跨介质通信的可靠性与传输速度,增强各类无人平台的水面/水下机动航行和作业能力;另一方面,可发展无中继的跨介质通信技术,实现与其他无人平台间有效信息通联。上述功能的实现需攻克多项技术,例如光电转换技术、无线电频率转换技术、协议转换与中继技术。

5) 融合人在回路的协同控制

跨域无人集群系统,可以感知环境、获取任务信息,并根据预设的目标和约束条件做出自主决策和行动。然而,在复杂海洋环境以及特定重要场合,全自主模式并不能高效稳定地完成集群任务。在上述场景下,需要将人的智能引入到跨域集群系统中,进而将无人跨域集群系统感知信息与人的智能相融合,实现有人/无人态势信息感知与信息共享,提升整体态势认知与决策能力。目前,人在回路思想广泛应用于网络化遥操作系统中^[118]。以目标抓取为例,遥操作机器人一方面利用其搭载的传感器对目标位置进行估计,另一方面根据操作者临场视觉信息动态调整遥操作机器人的姿态以提升定位性能;在抓取阶段,遥操作机器人一方面根据目标位置动态协同邻域内机器人,以通过追踪控制的方式实现对目

标的趋近, 另一方面根据操作者力反馈信息, 动态调整遥操作机械臂的抓取力以实现目标有效抓取. 受复杂海洋环境以及弱通信特性影响, 上述方法并不能直接应用于海上跨域集群系统, 然而可为跨域集群协同提供一定参考.

6) 人工智能驱动下的跨域集群

在人工智能驱动下, 跨域集群可以得到更加高效和智能的应用. 例如, 跨域集群中的各个平台可以通过机器学习和推理算法做出智能化的决策, 并与其他平台进行协调和合作, 以达到更好的整体效果; 同时人工智能技术可以使跨域集群的平台具备智能感知和数据分析能力, 从而提取出有价值的信息, 进而帮助其做出更加准确和及时的决策. 然而, 并不能机械地将人工智能技术移植到跨域集群中, 而是需要充分考虑到跨域集群的特点和需求, 并结合人工智能技术的优势与局限性进行设计和实现.

7) 跨域集群模拟试验

为验证系统有效性, 需进行大量试验验证与优化, 但是海上环境复杂、试验成本高、风险大, 无法长时间进行海上试验. 为此, 可采用虚拟仿真技术对跨域进行半实物模拟验证. 具体来说, 可综合利用数字孪生技术, 使跨域无人集群系统具备更强的自主性、智能性和适应性, 从而提高任务的执行效率和完成质量, 以应对复杂多变的任务环境和挑战. 例如, Yang 等^[119]借助数字孪生技术, 将真实的海洋环境映射到虚拟的数字空间, 为信息不完整下的追踪控制提供了一个全面可靠的环境, 也为虚实相生下的动态模拟提供了重要参考. 如何针对跨域集群特点进行管控模拟也是未来一个重要研究方向.

6 结论

海上无人系统跨域集群是多智能系统在海洋环境中的拓展与应用, 其不仅能提升海洋安全和资源利用效率, 还能为环境保护、科研教育和经济发展带来显著的积极影响. 基于上述考虑, 本文从控制论与通信技术相结合的角度出发, 阐述海上无人系统跨域集群的内涵及其特点, 进而凝练出其面临的挑战与关键问题. 针对上述问题, 综述跨域集群发展现状与关键技术研究进展, 并给出其军事与民用典型应用场景. 最后, 从国家战略需求出发, 对海上跨域集群系统研究进行思考与展望, 详细给出一些重要但尚未解决的问题与研究方向.

References

1 He Yu-Qing, Qin Tian-Yi, Wang Nan. Cross-domain collaboration: New trends in the development and application of unmanned systems technology. *Unmanned Systems Technology*, 2021, 4(4): 1-13

(何玉庆, 秦天一, 王楠. 跨域协同: 无人系统技术发展和应用新趋势. *无人系统技术*, 2021, 4(4): 1-13)

2 Pan Guang, Song Bao-Wei, Huang Qiao-Gao, Shi Yao. Development and key techniques of unmanned undersea system. *Journal of Unmanned Undersea Systems*, 2017, 25(1): 44-51 (潘光, 宋保维, 黄桥高, 施瑶. 水下无人系统发展现状及其关键技术. *水下无人系统学报*, 2017, 25(1): 44-51)

3 Qiu Zhi-Ming, Meng Xiang-Yao, Ma Yan, Chen Yi, Feng Wei. Development and key technologies of maritime unmanned systems. *Strategic Study of CAE*, 2023, 25(3): 74-83 (邱志明, 孟祥尧, 马焱, 陈轶, 冯炜. 海上无人系统发展及关键技术研究. *中国工程科学*, 2023, 25(3): 74-83)

4 Wang Wei-Da, Zhao Dong-Yang. Construction and application of unmanned helicopter air-sea-submarine cross-domain cooperative combat system. *Journal of CAEIT*, 2022, 17(12): 1141-1146 (王伟达, 赵东阳. 无人直升机空海潜跨域协同作战体系构建与应用. *中国电子科学研究院学报*, 2022, 17(12): 1141-1146)

5 Pöllny O, Held A, Kargl F. Survey of air, sea, and road vehicles research for motion control security. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, 24(7): 6748-6763

6 Wei Tao, Zhu Lin, Liang Shi-Long. Research on perception and cooperation technologies for underwater unmanned system swarm. *Command Control & Simulation*, 2022, 44(5): 6-13 (韦韬, 朱遴, 梁世龙. 水下无人系统集群感知与协同技术发展. 指挥控制与仿真, 2022, 44(5): 6-13)

7 Guo H Z, Li J Y, Liu J J, Tian N, Kato N. A survey on space-air-ground-sea integrated network security in 6G. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2022, 24(1): 53-87

8 Yang Jian-Min, Wang Jia-Hui, Qiao Gang, Liu Song-Zuo, Ma Lu, He Peng. Review of underwater acoustic communication and network technology. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2024, 46(1): 1-21 (杨健敏, 王佳惠, 乔钢, 刘松佐, 马璐, 何鹏. 水声通信及网络技术综述. *电子与信息学报*, 2024, 46(1): 1-21)

9 Ma Yong, Wang Wen-Qi, Yan Xin-Ping. Research progress on autonomous navigation and cooperative control of water area unmanned system platform. *Unmanned Systems Technology*, 2022, 5(1): 1-16 (马勇, 王雯琦, 严新平. 水域无人系统平台自主航行及协同控制研究进展. *无人系统技术*, 2022, 5(1): 1-16)

10 Zeng Z, Lv C X, Bi Y B, Jin Y F, Lu D, Lian L. Review of hybrid aerial underwater vehicle: Cross-domain mobility and transitions control. *Ocean Engineering*, 2022, 248: Article No. 110840

11 Xia Yuan-Qing, Xie Chao, Gao Han, Zhan Yu-Feng, Sun Zhong-Qi, Dai Li, et al. Cross-domain cooperative control and intelligent decision-making of multi-dynamic agents in space-air-ground integrated network environment: A review. *Control and Decision*, 2023, 38(5): 1176-1199 (夏元清, 谢超, 高寒, 詹玉峰, 孙中奇, 戴荔, 等. 天空地一体化网络环境下多运动体系统跨域协同控制与智能决策. *控制与决策*, 2023, 38(5): 1176-1199)

12 Liang Xiao-Long, Wang Ning, Wang Wei-Jia, Ke Wei-Yi. Progress in maritime cross-domain manned swarms. *Journal of Air Force Engineering University*, 2023, 24(5): 2-15 (梁晓龙, 王宁, 王维佳, 可唯一. 海上跨域无人集群研究进展综述. *空军工程大学学报*, 2023, 24(5): 2-15)

13 Steiniger Y, Kraus D, Meisen T. Survey on deep learning based computer vision for sonar imagery. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2022, 114: Article No. 105157

14 Yan J, You K L, Cao W Q, Yang X, Guan X P. Binocular vision-based motion planning of an AUV: A deep reinforcement learning approach. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, DOI: 10.1109/TIV.2023.3321884

15 Jia Ning, Huang Jian-Chun. An overview of underwater acous-

- tic communications. *Physics*, 2014, **43**(10): 650–657 (贾宁, 黄建纯. 水声通信技术综述. 物理, 2014, **43**(10): 650–657)
- 16 Zhang Wei-Dong, Liu Xiao-Cheng, Han Peng. Progress and challenges of overwater unmanned systems. *Acta Automatica Sinica*, 2020, **46**(5): 847–857 (张卫东, 刘笑成, 韩鹏. 水上无人系统研究进展及其面临的挑战. 自动化学报, 2020, **46**(5): 847–857)
- 17 Dempsey M E. Joint operational access concept (JOAC) [Online], available: https://dod.defense.gov/Portals/1/Documents/pubs/JOAC_Jan%202012_Signed.pdf, December 1, 2020
- 18 Li Lei, Wang Tong, Jiang Qi. Key technology develop trends of unmanned systems viewed from unmanned systems integrated roadmap 2017–2042. *Unmanned Systems Technology*, 2018, **1**(4): 79–84 (李磊, 王彤, 蒋琪. 从美军 2042 年无人系统路线图看无人系统关键技术发展动向. 无人系统技术, 2018, **1**(4): 79–84)
- 19 Zhang J L, Dai M H, Su Z. Task allocation with unmanned surface vehicles in smart ocean IoT. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, **7**(10): 9702–9713
- 20 Ma S, Guo W H, Song R, Liu Y C. Unsupervised learning based coordinated multi-task allocation for unmanned surface vehicles. *Neurocomputing*, 2021, **420**: 227–245
- 21 Liu H S, Chen Q Y, Pan N, Sun Y X, Yang Y L. Three-dimensional mountain complex terrain and heterogeneous multi-UAV cooperative combat mission planning. *IEEE Access*, 2020, **8**: 197407–197419
- 22 Liu J, Du X Q, Cui J H, Pan M, Wei D B. Task-oriented intelligent networking architecture for the space-air-ground-aqua integrated network. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, **7**(6): 5345–5358
- 23 Chen C, Liang X, Zhang Z, Zheng K, Liu D Y, Yu C D, et al. Cooperative target allocation for air-sea heterogeneous unmanned vehicles against saturation attacks. *Journal of the Franklin Institute*, 2024, **361**(3): 1386–1402
- 24 Tan G G, Zhuang J Y, Zou J, Wan L. Multi-type task allocation for multiple heterogeneous unmanned surface vehicles (USVs) based on the self-organizing map. *Applied Ocean Research*, 2022, **126**: Article No. 103262
- 25 Beard R W, McLain T W, Goodrich M A, Anderson E P. Coordinated target assignment and intercept for unmanned air vehicles. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2002, **18**(6): 911–922
- 26 Bai X S, Yan W S, Ge S S. Distributed task assignment for multiple robots under limited communication range. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2022, **52**(7): 4259–4271
- 27 Li J J, Zhang R B. Multi-AUV distributed task allocation based on the differential evolution quantum bee colony optimization algorithm. *Polish Maritime Research*, 2017, **24**(3): 65–71
- 28 Miguelañez E, Patrón P, Brown K E, Petillot Y R, Lane D M. Semantic knowledge-based framework to improve the situation awareness of autonomous underwater vehicles. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2011, **23**(5): 759–773
- 29 Ferreira B M, Graça P A, Alves J C, Cruz N A. Single receiver underwater localization of an unsynchronized periodic acoustic beacon using synthetic baseline. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2023, **48**(4): 1112–1126
- 30 Zhang Y T, Di B Y, Wang P F, Lin J L, Song L Y. HetMEC: Heterogeneous multi-layer mobile edge computing in the 6G era. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, **69**(4): 4388–4400
- 31 Wu D P, Liu J, Yang Z G. Bilateral satisfaction aware participant selection with MEC for mobile crowd sensing. *IEEE Access*, 2020, **8**: 48110–48122
- 32 Yuan H T, Bi J, Duanmu S F. Cost optimization for partial computation offloading and resource allocation in heterogeneous mobile edge computing. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). Melbourne, Australia: IEEE, 2021. 3089–3094
- 33 Mills J, Hu J, Min G Y. Multi-task federated learning for personalised deep neural networks in edge computing. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2022, **33**(3): 630–641
- 34 Feng C Y, Yang H H, Wang S Y, Zhao Z Y, Quek T Q S. Hybrid learning: When centralized learning meets federated learning in the mobile edge computing systems. *IEEE Transactions on Communications*, 2023, **71**(12): 7008–7022
- 35 Zhang M Y, Chen H, Cai W Y. Hunting task allocation for heterogeneous multi-AUV formation target hunting in IoUT: A game theoretic approach. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, **11**(5): 9142–9152
- 36 Wu Y, Low K H, Lv C. Cooperative path planning for heterogeneous unmanned vehicles in a search-and-track mission aiming at an underwater target. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, **69**(6): 6782–6787
- 37 Zheng J B, Ding M H, Sun L, Liu H W. Distributed stochastic algorithm based on enhanced genetic algorithm for path planning of multi-UAV cooperative area search. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, **24**(8): 8290–8303
- 38 Yang T T, Jiang Z, Sun R J, Cheng N, Feng H L. Maritime search and rescue based on group mobile computing for unmanned aerial vehicles and unmanned surface vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, **16**(12): 7700–7708
- 39 Yan J, Lin J S, Yang X, Chen C L, Guan X P. Cooperation detection and tracking of underwater target via aerial-surface-underwater vehicles. *IEEE Transactions on Automatic Control*, DOI: 10.1109/TAC.2024.3447976
- 40 Ma Y L, Zhang Q F, Wang H L. 6G: Ubiquitously extending to the vast underwater world of the oceans. *Engineering*, 2022, **8**: 12–17
- 41 Wang Yi-Fan, Zhou Mi, Song Zhi-Hui. Development of underwater wireless communication technology. *Communications Technology*, 2014, **47**(6): 589–594 (王毅凡, 周密, 宋志慧. 水下无线通信技术发展研究. 通信技术, 2014, **47**(6): 589–594)
- 42 Alharbi O, Xia W T, Wang M H, Deng P, Kane T. Measuring and modeling the air-sea interface and its impact on FSO systems. In: Proceedings of the SPIE 10770, Laser Communication and Propagation through the Atmosphere and Oceans VII. San Diego, USA: SPIE, 2018. Article No. 1077002
- 43 Yellaiah J. Characteristics of nanosecond laser-induced underwater acoustic signals across the water-air interface. *Acoustical Physics*, 2023, **69**(1): 7–19
- 44 Zhao Y, Li P, Zhang P H, Zhou Z Q, Li J Q. Application of laser-induced acoustic method on air-underwater communication. In: Proceedings of the International Conference on Space-air-ground Computing. Huizhou, China: IEEE, 2021. 77–82
- 45 Coutinho R W L, Boukerche A. OMUS: Efficient opportunistic routing in multi-modal underwater sensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, **20**(9): 5642–5655
- 46 Celik A, Saeed N, Shihada B, Al-Naffouri T Y, Alouini M S. Opportunistic routing for opto-acoustic internet of underwater things. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, **9**(3): 2165–2179
- 47 Campagnaro F, Casari P, Zorzi M, Diamant R. Optimal transmission scheduling in small multimodal underwater networks. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2019, **8**(2): 368–371
- 48 Zhao Z, Liu C F, Guang X Y, Li K Q. MLRS-RL: An energy-

- efficient multilevel routing strategy based on reinforcement learning in multimodal UWSNs. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023, **10**(13): 11708–11723
- 49 Diamant R, Campagnaro F, de Filippo de Grazia M, Casari P, Testolin A, Calzato V S, et al. On the relationship between the underwater acoustic and optical channels. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, **16**(12): 8037–8051
- 50 Cao J B, Dou J F, Chu L, Qu C R, Wang L H, Zhao B L. Optimum data transmission allocation in multimodal communication of underwater sensor networks. *IEEE Communications Letters*, 2022, **26**(4): 788–792
- 51 Wang R S, Ma R F, Zhang Y, Liu G L, Kang W J. An energy-efficient multimode transmission scheme for underwater sensor network. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023, **10**(22): 19640–19654
- 52 Zhilin I V, Bushnaq O M, de Masi G, Natalizio E, Akyildiz I F. A universal multimode (acoustic, magnetic induction, optical, RF) software defined modem architecture for underwater communication. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, **22**(12): 9105–9116
- 53 Zhao Z, Liu C F, Qu W Y, Yu T. An energy efficiency multilevel transmission strategy based on underwater multimodal communication in UWSNs. In: Proceedings of the IEEE Conference on Computer Communications. Toronto, Canada: IEEE, 2020. 1579–1587
- 54 Francescon R, Campagnaro F, Coccolo E, Signori A, Guerra F, Favaro F, et al. An event-based stack for data transmission through underwater multimodal networks. In: Proceedings of the 5th Underwater Communications and Networking Conference (UComms). Lercici, Italy: IEEE, 2021. 1–5
- 55 Wang C, Zhang P Y, Kumar N, Liu L, Yang T T. GCWCN: 6G-based global coverage wireless communication network architecture. *IEEE Network*, 2023, **37**(3): 218–223
- 56 Chen Jia-Jia, Zhang Feng-Deng, Zhang Yu-Hui. Improved clock synchronization algorithm based on RTEthernet. *Computer Measurement & Control*, 2022, **30**(3): 229–233 (陈佳佳, 张凤登, 张宇辉. 基于 RTEthernet 改进的时钟同步算法. 计算机测量与控制, 2022, **30**(3): 229–233)
- 57 Park S M, Kim H, Kim H W, Cho C N, Choi J Y. Synchronization improvement of distributed clocks in EtherCAT networks. *IEEE Communications Letters*, 2017, **21**(6): 1277–1280
- 58 Garg A, Yadav A, Sikora A, Sairam A S. Wireless precision time protocol. *IEEE Communications Letters*, 2018, **22**(4): 812–815
- 59 Jin X, An J P, Du C H, Pan G F, Wang S, Niyato D. Frequency-offset information aided self time synchronization scheme for high-dynamic multi-UAV networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2024, **23**(1): 607–620
- 60 Alsolami F, Alqurashi F A, Hasan M K, Saeed R A, Abdel-Khalek S, Ben Ishak A. Development of self-synchronized drones' network using cluster-based swarm intelligence approach. *IEEE Access*, 2021, **9**: 48010–48022
- 61 Kebkal K G, Kebkal V K, Kebkal O G, Petrocchia R. Underwater acoustic modems (S2CR series) for synchronization of underwater acoustic network clocks during payload data exchange. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2016, **41**(2): 428–439
- 62 Liu J, Wang Z H, Zuba M, Peng Z, Cui J H, Zhou S L. DA-sync: A Doppler-assisted time-synchronization scheme for mobile underwater sensor networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2014, **13**(3): 582–595
- 63 Jin Z G, Ding M G, Luo Y M, Li S. Integrated time synchronization and multiple access protocol for underwater acoustic sensor networks. *IEEE Access*, 2019, **7**: 101844–101854
- 64 Zhou F, Wang Q, Han G J, Qiao G, Sun Z X, Niaz A. APE-sync: An adaptive power efficient time synchronization for mobile underwater sensor networks. *IEEE Access*, 2019, **7**: 52379–52389
- 65 Vermeij A, Munafò A. A robust, opportunistic clock synchronization algorithm for ad hoc underwater acoustic networks. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2015, **40**(4): 841–852
- 66 Gong Z J, Li C, Jiang F. AUV-aided joint localization and time synchronization for underwater acoustic sensor networks. *IEEE Signal Processing Letters*, 2018, **25**(4): 477–481
- 67 Yu Jian-Yu, Lin Jing-Sheng, Yan Jing, Cao Wen-Qiang, Zhang Shi-Hang, Yang Xian. Clock synchronization algorithm of UAV-USV-UUV cross-domain cooperation. *Journal of Unmanned Undersea Systems*, 2024, **32**(4): 678–687 (于建宇, 林景胜, 闫敬, 曹文强, 张诗杭, 杨晔. 一种 UAV-USV-UUV 跨域协同时钟同步算法. 水下无人系统学报, 2024, **32**(4): 678–687)
- 68 Wang Heng, Peng Zheng-Cen, Ma Wen-Qiao, Li Min. Synchronization parameter estimation algorithm of silent node in wireless sensor networks with timestamp-free exchange. *Acta Automatica Sinica*, 2022, **48**(11): 2788–2796 (王恒, 彭政岑, 马文巧, 李敏. 免时间戳交互的无线传感网络节点同步参数估计算法. 自动化学报, 2022, **48**(11): 2788–2796)
- 69 Liu Mei-Qin, Han Xue-Yan, Zhang Sen-Lin, Zheng Rong-Hao, Lan Jian. Research status and prospect of target tracking technologies via underwater sensor networks. *Acta Automatica Sinica*, 2021, **47**(2): 235–251 (刘妹琴, 韩学艳, 张森林, 郑荣濠, 兰剑. 基于水下传感器网络的目标跟踪技术研究现状与展望. 自动化学报, 2021, **47**(2): 235–251)
- 70 Ke C, Chen H F. Cooperative path planning for air-sea heterogeneous unmanned vehicles using search-and-tracking mission. *Ocean Engineering*, 2022, **262**: Article No. 112020
- 71 Cao X, Liu W Z, Ren L. Underwater target capture based on heterogeneous unmanned system collaboration. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, DOI: 10.1109/TIV.2024.3362358
- 72 Zhang J, Sha J F, Han G J, Liu J, Qian Y J. A cooperative-control-based underwater target escorting mechanism with multiple autonomous underwater vehicles for underwater internet of things. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, **8**(6): 4403–4416
- 73 Lindsay J, Ross J, Seto M L, Gregson E, Moore A, Patel J, et al. Collaboration of heterogeneous marine robots toward multidomain sensing and situational awareness on partially submerged targets. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2022, **47**(4): 880–894
- 74 Yang X K, Wang W, Huang P. Distributed optimal consensus with obstacle avoidance algorithm of mixed-order UAVs-USVs-UUVs systems. *ISA Transactions*, 2020, **107**: 270–286
- 75 Jia Z H, Lu H B, Li S Q, Zhang W D. Distributed dynamic rendezvous control of the AUV-USV joint system with practical disturbance compensations using model predictive control. *Ocean Engineering*, 2022, **258**: Article No. 111268
- 76 Li S S, Wang X J, Wang S P, Zhang Y W. Distributed bearing-only formation control for UAV-UWSV heterogeneous system. *Drones*, 2023, **7**(2): Article No. 124
- 77 Enayat M, Khorasani K. Semi-decentralized nonlinear cooperative control strategies for a network of heterogeneous autonomous underwater vehicles. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2017, **27**(16): 2688–2707
- 78 Dixon C, Frew E W. Optimizing cascaded chains of unmanned aircraft acting as communication relays. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2012, **30**(5): 883–898
- 79 Guo Y J, You C S, Yin C C, Zhang R. UAV trajectory and communication co-design: Flexible path discretization and path compression. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2021, **39**(11): 3506–3523
- 80 Wu Q Q, Zeng Y, Zhang R. Joint trajectory and communica-

- tion design for multi-UAV enabled wireless networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, **17**(3): 2109–2121
- 81 Yan J, Zhang L, Yang X, Chen C L, Guan X P. Communication-aware motion planning of AUV in obstacle-dense environment: A binocular vision-based deep learning method. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, **24**(12): 14927–14943
- 82 Cao W Q, Yan J, Yang X, Luo X Y, Guan X P. Communication-aware formation control of AUVs with model uncertainty and fading channel via integral reinforcement learning. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2023, **10**(1): 159–176
- 83 Deng Y J, Zhang X K, Zhang G Q. Line-of-sight-based guidance and adaptive neural path-following control for sailboats. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2020, **45**(4): 1177–1189
- 84 Burlutskiy N, Touahmi Y, Lee B H. Power efficient formation configuration for centralized leader-follower AUVs control. *Journal of Marine Science and Technology*, 2012, **17**(3): 315–329
- 85 Choi S, Kim J. Three dimensional formation control to pursue an underwater evader utilizing underwater robots measuring the sound generated from the evader. *IEEE Access*, 2019, **7**: 150720–150728
- 86 Moreno-Salinas D, Crasta N, Pascoal A M, Aranda J. Formation control of surface marine vehicles for underwater target tracking using range information. In: Proceedings of the 13th APCA International Conference on Automatic Control and Soft Computing (CONTROLO). Ponta Delgada, Portugal: IEEE, 2018. 201–206
- 87 Liu H, Wang Y H, Lewis F L. Robust distributed formation controller design for a group of unmanned underwater vehicles. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2021, **51**(2): 1215–1223
- 88 Gao Z Y, Guo G. Fixed-time sliding mode formation control of AUVs based on a disturbance observer. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2020, **7**(2): 539–545
- 89 Wang J Q, Wang C, Wei Y J, Zhang C J. Filter-backstepping based neural adaptive formation control of leader-following multiple AUVs in three dimensional space. *Ocean Engineering*, 2020, **201**: Article No. 107150
- 90 Yuan C Z, Licht S, He H B. Formation learning control of multiple autonomous underwater vehicles with heterogeneous nonlinear uncertain dynamics. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2018, **48**(10): 2920–2934
- 91 Wang D H, Yuan J, Xu J, Zhou Z H. Finite-time formation control for autonomous underwater vehicles based on hierarchical leader-follower. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, **541–542**: 1164–1167
- 92 Das B, Subudhi B, Pati B B. Co-operative control of a team of autonomous underwater vehicles in an obstacle-rich environment. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 2016, **15**(3): 135–151
- 93 Tangirala S, Kumar R, Bhattacharyya S, O'Connor M, Holloway L E. Hybrid-model based hierarchical mission control architecture for autonomous underwater vehicles. In: Proceedings of the American Control Conference. Portland, USA: IEEE, 2005. 668–673
- 94 Jia Y N, Wang L. Leader-follower flocking of multiple robotic fish. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2015, **20**(3): 1372–1383
- 95 Heshmati-Alamdari S, Bechlioulis C P, Karras G C, Kyriakopoulos K J. Cooperative impedance control for multiple underwater vehicle manipulator systems under lean communication. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2021, **46**(2): 447–465
- 96 Wang L L, Zhu D Q, Pang W, Luo C M. A novel obstacle avoidance consensus control for multi-AUV formation system. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2023, **10**(5): 1304–1318
- 97 Zhen Q Z, Wan L, Li Y L, Jiang D P. Formation control of a multi-AUVs system based on virtual structure and artificial potential field on SE(3). *Ocean Engineering*, 2022, **253**: Article No. 111148
- 98 Pang W, Zhu D Q, Sun C Y. Multi-AUV formation reconfiguration obstacle avoidance algorithm based on affine transformation and improved artificial potential field under ocean currents disturbance. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2024, **21**(2): 1469–1487
- 99 Yan J, Gao J, Yang X, Luo X Y, Guan X P. Position tracking control of remotely operated underwater vehicles with communication delay. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2020, **28**(6): 2506–2514
- 100 Belleter D, Maghenem M A, Paliotta C, Pettersen K Y. Observer based path following for underactuated marine vessels in the presence of ocean currents: A global approach. *Automatica*, 2019, **100**: 123–134
- 101 Fang Y, Huang Z W, Pu J Y, Zhang J S. AUV position tracking and trajectory control based on fast-deployed deep reinforcement learning method. *Ocean Engineering*, 2022, **245**: Article No. 110452
- 102 Kong S H, Sun J L, Qiu C L, Wu Z X, Yu J Z. Extended state observer-based controller with model predictive governor for 3-D trajectory tracking of underactuated underwater vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, **17**(9): 6114–6124
- 103 Park B S, Kwon J W, Kim H. Neural network-based output feedback control for reference tracking of underactuated surface vessels. *Automatica*, 2017, **77**: 353–359
- 104 Li T S, Zhao R, Chen C L P, Fang L Y, Liu C. Finite-time formation control of under-actuated ships using nonlinear sliding mode control. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2018, **48**(11): 3243–3253
- 105 Li S H, Wang X Y. Finite-time consensus and collision avoidance control algorithms for multiple AUVs. *Automatica*, 2013, **49**(11): 3359–3367
- 106 Lin An-Hui, Jiang De-Song, Zeng Jian-Ping. Underactuated ship formation control with input saturation. *Acta Automatica Sinica*, 2018, **44**(8): 1496–1504
(林安辉, 蒋德松, 曾建平. 具有输入饱和的欠驱动船舶编队控制. 自动化学报, 2018, **44**(8): 1496–1504)
- 107 Shojaei K, Chatraei A. Robust platoon control of underactuated autonomous underwater vehicles subjected to nonlinearities, uncertainties and range and angle constraints. *Applied Ocean Research*, 2021, **110**: Article No. 102594
- 108 Bai X S, Yan W S, Cao M. Clustering-based algorithms for multivehicle task assignment in a time-invariant drift field. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2017, **2**(4): 2166–2173
- 109 Bai X S, Yan W S, Cao M, Xue D. Distributed multi-vehicle task assignment in a time-invariant drift field with obstacles. *IET Control Theory & Applications*, 2019, **13**(17): 2886–2893
- 110 Zhang J L, Yan J G. A novel control approach for flight-stability of fixed-wing UAV formation with wind field. *IEEE Systems Journal*, 2021, **15**(2): 2098–2108
- 111 Yan J, Guo D B, Luo X Y, Guan X P. AUV-aided localization for underwater acoustic sensor networks with current field estimation. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, **69**(8): 8855–8870
- 112 Li Wen-Xia, Mao Deng-Sen. A review for search and rescue equipment of main countries for missing Malaysia airlines flight 370. *Electronic and Electro-Optical Systems*, 2014(4): 1–9
(李文霞, 毛登森. 马航搜救行动中主要国家的搜救装备综述. 光电系统, 2014(4): 1–9)

- 113 Zhang Hui. Large scale maritime joint exercise held in Qinhuangdao waters [Online], available: <https://yzdsb.hebnews.cn/pc/paper/c/201906/20/c147436.html>, June 20, 2019 (张辉. 大型海上联合演习秦皇岛水域举行 [Online], available: <https://yzdsb.hebnews.cn/pc/paper/c/201906/20/c147436.html>, 2019-06-20)
- 114 Jing Qiang, Zheng Shun-Chao, Liang Peng, Wang Jin-Feng. Technologies and engineering practices of intelligent operation and maintenance of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge. *China Journal of Highway and Transport*, 2023, **36**(6): 143–156 (景强, 郑顺潮, 梁鹏, 汪劲丰. 港珠澳大桥智能化运维技术与工程实践. *中国公路学报*, 2023, **36**(6): 143–156)
- 115 Li Jia-Biao, Wang Ye-Jian, Liu Lei, Xu Xue-Wei. Current status and prospect of deep-sea mining technology. *Science and Technology Foresight*, 2022, **1**(2): 92–102 (李家彪, 王叶剑, 刘磊, 许学伟. 深海矿产资源开发技术发展现状与展望. *前瞻科技*, 2022, **1**(2): 92–102)
- 116 Mealey R M. A method for calculating error probabilities in a radar communication system. *IEEE Transactions on Space Electronics and Telemetry*, 1963, **9**(2): 37–42
- 117 Yan Jing, Guan Xin-Ping, Luo Xiao-Yuan, Yang Xian. Towards the integration of detection, communication and control for underwater cyber physical system: Challenges and progresses. *Control Theory & Applications*, 2022, **39**(11): 1996–2008 (闫敬, 关新平, 罗小元, 杨峴. 水下信息物理系统探测-通信-控制一体化: 挑战与进展. *控制理论与应用*, 2022, **39**(11): 1996–2008)
- 118 Darvish K, Penco L, Ramos J, Cisneros R, Pratt J, Yoshida E, et al. Teleoperation of humanoid robots: A survey. *IEEE Transactions on Robotics*, 2023, **39**(3): 1706–1727
- 119 Yang J C, Xi M, Wen J B, Li Y, Song H H. A digital twins enabled underwater intelligent internet vehicle path planning sys-

tem via reinforcement learning and edge computing. *Digital Communications and Networks*, 2024, **10**(2): 282–291



闫敬 燕山大学电气工程学院教授。主要研究方向为水声传感网络, 水下机器人协同控制。本文通信作者。

E-mail: jyan@ysu.edu.cn

(YAN Jing Professor at the School of Electrical Engineering, Yanshan University. His research interest covers underwater acoustic sensor networks and the cooperation control of underwater vehicle. Corresponding author of this paper.)



关新平 上海交通大学电子信息与电气工程学院教授。主要研究方向为工业信息物理系统, 无线组网及应用和水下传感器网络。

E-mail: xpguan@sjtu.edu.cn

(GUAN Xin-Ping Professor at the School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University. His research interest covers industrial cyber-physical systems, wireless networking and applications, and underwater sensor networks.)