

【引用格式】田德艳, 张小川, 邹司宸, 等. 异构滑翔器水声通信技术研究现状和发展趋势[J]. 数字海洋与水下攻防, 2023, 6(2): 145-154.

异构滑翔器水声通信技术研究现状和发展趋势

田德艳¹, 张小川^{1, 2, *}, 邹司宸¹, 孙芹东^{1, 2}, 张文清^{1, 2}

(1. 青岛海洋科技中心, 山东 青岛 266237; 2. 海军潜艇学院, 山东 青岛 266199)

摘要 水下滑翔器和波浪能滑翔器由于其低能耗、长航时、灵活机动的特点, 被广泛应用于海洋观测任务中。单一滑翔器无法满足海洋任务多样性、复杂性的需求, 借助水声通信技术可将水下滑翔器和水面波浪能滑翔器的优势相结合, 构成异构体滑翔器编队体系结构, 建立跨介质信息传输链路, 扩展滑翔器的作用范围和监测能力。简要介绍了水声通信技术研究现状、常用算法及其优劣, 综述了异构体滑翔器水声通信技术研究与应用国内外现状, 探讨了异构体滑翔器水声通信技术难点和未来研究趋势。对异构体滑翔器水声通信和组网的研究与应用具有重要价值。

关键词 水声通信; 异构体滑翔器; 人工智能; 仿生技术; 水下能源; 布放回收

中图分类号 TB567

文献标识码 A

文章编号 2096-5753(2023)02-0145-10

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2023.02.003

Research Status and Development Trend of Underwater Acoustic Communication Technology for Heterogeneous Gliders

TIAN Deyan¹, ZHANG Xiaochuan^{*1, 2}, ZOU Sichen¹, SUN Qindong^{1, 2}, ZHANG Wenqing^{1, 2}

(1. Qingdao Marine Science and Technology Center, Qingdao 266237, China;

2. Navy Submarine Academy, Qingdao 266199, China)

Abstract Underwater gliders and wave gliders are widely used in oceanographic exploration missions because of their characteristics of low energy consumption, long endurance, and good maneuverability. A single glider cannot meet the needs of diversity and complexity of marine missions. With the help of underwater acoustic communication technology, the advantages of underwater gliders and wave gliders can be combined to form a formation structure of heterogeneous gliders, establish a trans-medium information transmission link, and expand the range and monitoring ability of gliders. In this paper, the research status, common algorithms and the advantages and disadvantages of underwater acoustic communication technology are briefly introduced. The research and application status of underwater acoustic communication technology for heterogeneous gliders are reviewed. The difficulties and future research trends of underwater acoustic communication technology for heterogeneous gliders are discussed. This paper is of great value to the research and application of underwater acoustic communication and networking for heterogeneous gliders.

Key words underwater acoustic communication; heterogeneous gliders; artificial intelligence; biomimetic technology; underwater energy; launch and recovery

收稿日期: 2022-12-27

作者简介: 田德艳 (1989-), 女, 硕士, 工程师, 主要从事水声通信技术研究。

*通信作者: 张小川 (1990-), 男, 硕士, 讲师, 主要从事水声通信技术研究和水声换能器的研究。

基金项目: 国家重点研发计划课题“无人自主式***系统”(2021YFC3100903), “跨域***集成与性能验证”(2021YFC3100905)。

0 引言

随着海洋资源的开发和利用,海洋监测平台如水下滑翔器、波浪能滑翔器、浮标、潜标等重要水下无人平台,可搭载各种传感器和科考设备,被广泛应用于海洋环境监测、水下组网、军事侦察等领域。水下滑翔器^[1-3]依靠调节浮力实现升沉,借助水动力实现水中滑翔,可动态实现海洋大范围、全海深的立体观测。与传统的水下航行器相比,水下滑翔器具有优越的机动性、可控性,兼具小成本、低能耗、长航时和对母船的依赖性小等优点。水面波浪能滑翔器^[4-6]是一种依靠波浪能驱动的水面无人自主观测平台,辅以太阳能充电结构,可长期、自主地执行海洋水文环境监测、通信中继等任务。

单一滑翔器搭载传感器的类型和数量较少,观测能力有限,难以满足海洋任务多样性需求。以水下滑翔器为例,其运动速度慢,运动形式单一,运动轨迹易受海洋洋流、内波的影响。当水下滑翔器搭载声学传感器在水下执行探测任务期间,需要上浮至水面,经卫星通信与岸基指挥中心进行数据交互。现有通信方式难以实现水下探测数据的及时报送,甚至会因为上浮而中断执行任务,丢失跟踪目标^[7]。

水声通信技术^[8-13]是海洋中进行无线信息传输的重要有效手段,水声通信技术可将水下滑翔器全海深隐蔽观测与波浪能滑翔器能源充足的优势相结合,构成以波浪能滑翔器为领导的异构体滑翔器编队体系结构,实现异构体滑翔器编队成员之间信息的高可靠性交互,建立一条水下-水面-空中-岸基信息传送的完整数据链路,避免水下滑翔器频繁上浮而中断任务。同时,以波浪能滑翔器为通信中继的异构体滑翔器集群具有更加灵活的探测策略,水下滑翔器可快速将观测信息通过水声通信上传至通信中继,由波浪能滑翔器上传至岸基指挥中心,并下达至编队各成员,进行观测策略的调整和队形的优化,该体系结构扩展了异构体滑翔器的作用范围和观测能力,大幅提升综合观测效能。

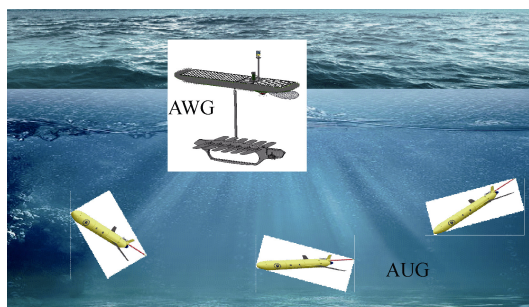


图1 异构体滑翔器编队结构

Fig. 1 Formation structure of heterogeneous gliders

为明晰异构体滑翔器水声通信技术研究现状,本文将对以下几方面进行梳理概括:

- 1) 水声通信技术和水声通信设备国内外研究现状;
- 2) 异构体滑翔器水声通信技术研究与应用国内外现状;
- 3) 异构体滑翔器水声通信技术难点;
- 4) 异构体滑翔器水声通信技术研究趋势。

1 水声通信技术

相较于无线电通信,水声信道的复杂性使得水声信道在通信速率、通信距离和通信稳定性方面受到极大限制。在通信体制上,水声通信从最早的抑制载波的单边带幅度调制体制,发展出跳频扩展、直接序列扩频、多频移键控以及 Chirp 调制等低速率的通信体制^[14]。MILICA STOJANOVIC 提出的二阶锁相环信道跟踪与自适应反馈均衡技术相结合的单载波通信体制,是水声通信从低速率发展到高速率的里程碑,而后发展起来的多载波通信体制是现在高速水声通信的主要研究热点。

多载波通信的基本原理^[15]是将高速率串行的信息数据调制到若干个并行独立的子载波上同时传输,接收端按照相干或非相干方式对发射的子载波进行解调,然后进行并串转换获得原始高速数据流,并通过增加码元的长度来克服载波间干扰和频率选择性衰落。国内外学者对多载波技术的研究方向主要包括:正交频分复用 (OFDM) 技术、MFSK 和多载波正交结合技术、多载波扩频技术和多载波调频技术。

1.1 OFDM 技术

OFDM 是一种多载波技术, 相较于其他调制方法, OFDM 有比较明显的优势所在。1) 子载波频谱正交, 将所传数据均匀的分配到数据速率相对较低的若干个子信道中进行传输, 有效提高了系统的频带利用率和传输速率。2) 通过增加每个子信道中的符号周期, 可有效适应频率选择性衰落。3) 在符号之间插入循环前缀作为保护间隔, 最大程度上消除由多径引起的符号间干扰。4) 在频域上完成信道的估计与均衡, 避免复杂时域均衡器的使用, 并可以利用 FFT/IFFT 完成调制与解调, 方便工程实现。

同时, OFDM 的缺点也很明显。1) 对相位噪声和载波频偏非常敏感。载波频偏会破坏子载波间的正交性, 引起子载波间干扰; 相位噪声会导致码元星座点的旋转、扩散, 形成码间干扰。2) 由于数据符号叠加在很多子载波上, 若子载波同方向累加, OFDM 波形会有较大的峰均比 (PAPR)。3) 负载算法和自适应调制技术会增加系统复杂性, 增加工程实现的难度。

国内外学者也对 OFDM 调制技术做了深入的研究和应用。徐晓卡研究了基于 OFDM 的浅海高速水声通信关键技术, 包括信道估计与均衡、抗多普勒技术、峰均功率比、空间分集技术、时反 OFDM^[16]。马璐^[17]开展多用户 OFDM 水声通信技术研究, 对多用户信道估计、多用户异步接入等方面深入研究。美国康涅狄格大学 (UCONN) 水下传感器网络 (UWSN) 实验室对 OFDM 水声通信

调制技术深耕数年, 取得不错的研究成果^[14]。值得一提的是, 周胜利研究员将 OFDM 水声通信技术的研究成果展开详细深入的论述并著书, 为后继学者提供理论依据。

1.2 多载波 MFSK 技术

多载波 MFSK 是将 MFSK 调制与多载波正交技术相结合的调制方式。该调制方式兼顾了 MFSK 稳健性的同时, 有效提高系统通信速率以及多途的能力, 也避免了 OFDM 通信体制对载波相位敏感的问题。多载波 MFSK 在接收端可采用非相干解调方式, 不需要载波同步, 不需要信道估计, 易于工程实现。常用的非相干解调方式有: 鉴频法、差分检波法、动态滤波法、零交点法等。

国内外学者在多载波 MFSK 调制技术方面也取得一定成果。RAJNISH SINHA 等人研究了基于多载波的 MFSK 扩频多址方案, 仿真结果表明多载波 MFSK 具有良好的频率分集特性。德国 MATTHIAS WETZ 等人针对时变无线电信道中相干通信信道估计失效的情况, 提出 OFDM-MFSK 通信体制, 避免时变信道估计, 提高系统稳定性。哈尔滨工程大学、浙江大学、厦门大学、西北工业大学等均有团队研究多载波 MFSK 水声通信技术并完成系统实现^[18-19]。

1.3 水声通信设备现状

随着水声通信技术的发展, 水声通信设备经过几十年的更迭, 国内外已有多家研究机构和公司推出不同系列的水声通信设备, 如表 1 所示。从这些

表 1 国内外典型小型水声通信设备主要参数指标

Table 1 Main parameters and indexes of small typical underwater acoustic communication equipment

国家机构设备	通信体制	通信速率	通信距离/km
美国 Linkquest UWM 系列	宽带扩频 (BASS)	5~17.8 kbps	1.5~10
德国 EvologicS2C 系列	S2C	6.9~62.5 kbps	0.3~6
德国 DevelogicHAM 系列	n-mFSK/OFDM-MDPSK	145 bps~7 kbps	1.95~30
英国 Trittech	扩频	40 bps	0.5
美国伍兹霍尔海洋所 Micro-Modem	FH-FSK/PSK	5 kbps	6
声学所朱敏团队	非相干/相干	850 bps@3.5 km	3.5
哈尔滨乔钢团队	OFDM/多载波 MFSK	40 bps@5 km	5
声学所鄢社锋团队	OFDM/多载波 MFSK	360 bps@5 km	5
浙江大学瞿逢重团队	相干	3.07 bps	14
深圳智慧海洋团队 SOT-NIM-D02	OFDM	1~4 kbps@2 km	5

通信机所采用的通信体制来看,多以稳健的 MFSK 和扩频为主,低速单载波 PSK 和高速 OFDM 为辅,工作频段由低频到中高频,工作距离远近不等,尺寸各异^[15]。

水声通信设备的发展,也加速推动了人们对海洋的观探测进程。将水声通信设备搭载集成在海洋观探测设备上,拓展了海洋观探测的范围和距离,增进了人们对海洋的认知。相较于大型的海洋观探测设备来说,在小微移动平台上搭载集成水声通信设备还存在很多约束和限制,尤其是空间和能量受限的滑翔器。

2 异构体滑翔器水声通信技术

近年来,基于水下滑翔器和水面波浪能滑翔器等水下无人平台进行海洋观探测的研究成果日益增多,下面将分别介绍国外、国内异构体滑翔器水声通信技术发展现状。

2.1 国外异构体滑翔器水声通信技术发展现状

美国海军研究院的海网计划 Seaweb,在加利福尼亚蒙特利湾进行水下无人航行器试验,采用 telesonar 调制解调器实现对潜器的水下导航、定位和追踪,将 SLOCUM 水下滑翔器作为水下移动节点,并与布置在海底的传感器节点、水面舰艇、空中飞机和铱星等构成信息采集网,首次实现跨介质网络通信^[20-21]。MARQUES 等人^[22]从声通机的软、硬件框架着手,研制小型化水声通信机,搭建航行器的控制框架,制定控制指令和协议,利用水声通信建立起 AUV 与水面航行器 Neptus 之间的通信连接,构成多 AUV 联合的或 AUV 与 Neptus 混合的移动水声通信网络。BINGHAM 等人^[23]使用波浪能滑翔器搭载主被动声学探测和定位设备,进行海洋环境、海洋生物以及水下潜器的观探测和定位;此外,波浪能滑翔器还作为主动声学网关,在科学、工业和军事领域中发挥导航参考和通信中继的重要作用,最明显的应用是波浪能滑翔器代替固定的无线浮标连接海底声学数据和卫星遥测。CHEN 等人^[24]提出基于水声通信的编队和转向算法,使用伍兹霍尔海洋研究所的低功耗小型水声调制解调器(在 3 kHz~30 kHz 的 4 个不同频段以 FH-FSK、PSK

调制方式),可传输 4 种不同速率的数据包,应用于多水下自主航行器集群中,保障各航行器之间互相通信和协调。BUSQUETS-MATAIX 等人^[25]将声和激光调制解调器集成在水下滑翔器上,使其成为具备声通信和光通信的混合滑翔器。北约海上研究和试验中心(CMRE)STO^[26]在 La Spezia 湾开展 CommsNet17 试验,部署了 11 个 AUV 节点组成的持久性传感器网络(UASN),可自主实现分布式网络节点配置、节点定位和导航、支持分配任务的网络拓扑自调整、水下对接、无线电池充电和数据卸载,该试验证明了 ad-hoc USAN 的有效应用。意大利 CMRE 团队^[27-32],经历近 60 年的海上工程试验,现已取得辉煌成就,涉猎水下声学、海洋学、电子学、机械和海洋工程,以及现在炙手可热的无人系统领域。2018 年开展的合作反潜项目(CASW),将研究被动声学新领域,在水下滑翔器上集成一个声学矢量传感器,可对 3 Hz~3 kHz 的目标进行探测;同时也配备一个声学调制解调器,能够与母船或网关部署的超短基线(USBL)通信,通过 USBL 控制站可获得水下滑翔器的位置。

2.2 国内异构体滑翔器水声通信技术发展现状

相较于国外异构体滑翔器水声通信技术来说,国内在这方面起步晚,研究成果相对少些。

哈尔滨工程大学的兰华林^[33]等人将波浪能滑翔器作为水下物联网的节点进行声学观测,提出多波浪能滑翔器节点声学定位算法,通过仿真和海试验证了波浪能滑翔器声学观测的可行性。青岛海洋国家实验室联合天津大学、中国海洋大学和声学所,在水下滑翔器和波浪能滑翔器上搭载集成水声通信和定位设备,在中国青岛近海、南中国海分别进行了试验验证,真正意义上的首次实现了异构体滑翔器在水下-水面-空基-岸基跨介质通信,取得不错的成果。

3 异构体滑翔器水声通信技术难点

在实际应用中,异构体滑翔器协同执行任务多样,面临的环境复杂多变,异构体滑翔器想要真正实现高可靠实时的互联互通,仍然有诸多技术难点

和挑战亟待解决。

3.1 水声通信技术难点

3.1.1 水声通信信道的复杂多变

水声通信最大的难点在于水声信道的复杂时-空-频变特性^[34]。水声信道是可用带宽窄、传播速度慢的时延、多普勒频移双扩散信道。在水声通信过程中,声波从发射端经过水声信道,这其中经历了海水吸收、折射和散射衰减,海底和海面反射,强多途干扰,以及海洋中各种噪声的干扰,到达接收端,已经变得面目全非。

对于异构体滑翔器的水声通信,由于异构体滑翔器间存在相对运动,集成在滑翔器上的水声通信机发射端和接收端也做相对运动,再加上波浪、湍流、潮汐等海洋变化,导致接收信号频率发生变化,产生严重的多普勒频移,引起时间选择性衰落,时域信号包络的某些时刻被增强而某些时刻被削弱。

此外,水下滑翔器平台噪声、波浪能滑翔器水下牵引机运动噪声以及电噪声干扰等,都会导致水声通信接收端信噪比低,不利于水声通信接收端的检测和解调。这些都对异构体滑翔器之间的高可靠稳健通信带来难度和挑战。

3.1.2 水声通信机远距离、小型化的需求

水下滑翔器和波浪能滑翔器均为尺寸空间有限的小微移动平台,这就要求搭载的水声通信机在不降低通信距离前提下,实现小型化特性。

水声通信机硬件部分包括水声信号处理机、水声换能器 2 部分。水声通信机通信频带为中频带 2 kHz~50 kHz,该频带的换能器多为圆环换能器、纵向换能器、球型换能器。换能器的尺寸与通信频段有关,也影响着通信可通距离。在中频带内,一般通信频段越高,换能器直径越小,但通信距离也越近。因此,水声通信机的通信距离和换能器尺寸是 2 个相互约束制衡的因素。水声信号处理机一般集成于平台的密封舱里,密封舱除了平台自身的控制处理器还要集成其他载荷的处理机,因此也要求信号处理机在满足通信指标的前提下,尽量小型化。

深圳智慧海洋崔军红教授团队、中科院声学所朱敏团队和哈尔滨工程大学乔钢教授团队均设计

研制出性能尺寸不一的圆柱型、长方型水声信号处理机以适配不同平台的集成搭载^[35]。但目前来看,搭载集成于滑翔器上的水声通信机还在研究和试验中,没有广泛的工程应用。

3.1.3 水声通信机高处理、低功耗的需求

水下滑翔器和波浪能滑翔器均属于供电受限的移动平台,进行水声通信机电路系统设计时,在满足高性能处理能力前提下,也对低功耗特性提出了要求。

王旭^[36]针对通信物理层对计算能力的要求和一般的低功耗器件无法满足的矛盾,提出双处理平台:低功耗、低处理能力的休眠值守单元与较高功耗、高处理能力的以 TMS320C5505 为核心处理器的信号处理单元。系统处于接收状态时,信号处理单元处于关闭状态,休眠值守单元负责检测是否有唤醒信号到达,如果有则启动信号处理单元完成对信息的解析。中科院声学研究所朱彤^[37]等人提出一种基于 MSP430 单片机的低功耗值班电路设计,利用频谱分析来判决唤醒信号,并通过仿真和千岛湖试验,验证了算法的有效性。相较于利用信号能量与门限关系的判定方法,具有抗干扰能力强、可靠性高、唤醒率高等优势。还有研究团队为满足计算量和实时性的要求,在系统设计过程中选用数字信号处理芯片作为处理器,采用直接软件编写方式进行系统控制,简化电路设计。在系统电路尺寸没有明显增提高额前提下,采用发射机并联设计,实现多个 D 类功率放大器并联输出结构,提高发射功率,通过在声学系统中增加唤醒电路设计,采用监听+唤醒工作模式,实现声通信待机低功耗。

追求高性能、低功耗是异构体滑翔器工程应用中的难点和重点,还需要持续的关注和研究。

3.2 异构体滑翔器编队控制难点

针对通信受限欠驱动多耦合强干扰条件下的编队控制策略研究,一直是控制学科研究的难点。以波浪能滑翔器为领导的水下滑翔器编队结构中,波浪能滑翔器与水下滑翔器平台的驱动模式和运动规律大不相同,如何实现 2 类滑翔器的编队构型保持稳定,以及设计可靠鲁棒的编队协同控制策略,对于异构体滑翔器集群应用来说是个

难点和挑战。

3.2.1 异构体滑翔器编队控制技术

在实际海洋任务中,随时可能出现环境变化、任务目标变化等突发情况,需要异构体滑翔器编队具备自主优化的控制能力,能够根据海洋环境、任务需求、运动约束、通信约束等多时空约束,快速响应外界环境变化,实时任务调整和重规划。

传统的编队控制方法需要滑翔器平台和扰动的精确模型来设计控制率。但实际应用中,滑翔器平台和扰动通常具有时变、非线性等特点,再加上传感器误差和环境扰动等不确定因素,很难得到好的控制效果。新发展起来的方法有人工势场法、虚拟结构法和基于强化学习的编队控制法等^[38]。张文清根据不同海况不同海流的通信受限约束条件,分析了编队控制系统的稳定性,给出多约束条件下的稳定条件和失稳边界,设计了一种稳定鲁棒的异构体编队协同控制方法,并进行了控制策略优化。但目前也是在理论和试验研究中,与工程应用还有些差距。

3.2.2 异构体滑翔器编队稳定性技术

天津大学的薛冬阳^[39]针对滑翔器编队协调控制以及编队任务过程中的稳定性问题展开讨论研究,提出一种基于多体力学分析方法的多层级运动协调控制结构和一种降低能耗的混合驱动滑翔器运动优化控制策略。并针对滑翔器编队稳定性问题,提出一种基于统计学分析的滑翔器编队不确定分析方法。李学成^[40]等人对异构体滑翔器在不同通信概率下编队构型的稳定性进行了分析,根据领导者与跟随者策略建立了海洋滑翔器编队构型,并给予复杂网络理论,提出了一种适用于异构编队系统的稳定性评估方法。

4 异构体滑翔器水声通信技术研究趋势

4.1 仿生技术

4.1.1 仿生编码调制技术

随着异构体滑翔器的发展和应用,水声通信的安全性问题也将是异构体滑翔器编队发展的重要方面。尤其在海洋的观探测任务中,需要传输敏感性水声数据信息时,涉及到国防安全,这就

对异构体滑翔器水声通信的安全性和保密性提出了更高要求。

隐蔽仿生水声通信是通过采用海洋生物叫声作为通信载波,降低通信信号发现概率的一种隐蔽水声通信。相较于传统通过降低通信信噪比的隐蔽通信方法,仿生水声通信的通信性能更优。仿生通信调制方式主要分为2大类,一种是基于原始的生物叫声,利用各种编码技术将信息调制到叫声类别与时间位置上;另一种是利用原始生物叫声高度相似的人工合成模拟叫声作为通信载波,基于叫声的参数模型或数字水印嵌入技术,将信息调制到模拟叫声的时频参数上,以此实现仿生通信。

国内外学者在仿生水声通信方向的研究取得了不错的成果。哈尔滨工程大学的乔钢团队在仿生水声通信方向深耕数年,其中马天龙博士^[41]研究了基于频移键控的仿海豚哨声水声通信,通过模拟海豚哨声以降低通信信号被发现的概率,从而实现仿生隐蔽通信。仿真和海试验证了该方法的可行性。浙江大学的贾淤青^[42]研究了仿鲸目生物叫声的伪装水声通信,并从时域和频域角度入手研究,提出3种隐蔽仿生通信方法,改进的 Sage-Husa 自适应卡尔曼滤波时频轮廓平滑算法、基于哨声信号分段时频轮廓仿生通信方法以及一种哨声信号掩盖下基于切比雪夫混沌信号的仿生隐蔽通信方法,仿真和试验均取得一定效果。

仿生隐蔽水声通信在带来安全性通信的同时,也导致通信速率的下降,难以应对一些通信速率高、通信安全性高的场景需求。目前来看,异构体滑翔器的仿生隐蔽通信发展还不够成熟,是将来异构体滑翔器水声通信发展的一个难点和热点。

4.1.2 仿生滑翔器技术

随着仿生材料、仿生结构、仿生控制和生物信息智能感知等领域的发展和应用,国内外学者进行了水下滑翔器和波浪能滑翔器的仿生技术研究,取得了一定研究成果。

天津大学的沈新蕊^[1]介绍了国内外滑翔机融合仿生技术的研究进展。其中,德国 EvoLogics 公司采用智能设计,按照鳐鱼进行仿生设计,研制出一款仿生滑翔器 Sub Seaglider。北京航空航天大学

等多家科研单位根据鱼类运动肌群和流体外形的运动原理,进行了大量的滑翔机仿生研究,梳理了国内外仿生滑翔器的发展现状,并提出未来发展趋势^[43]。西北工业大学朱崎峰等^[44]根据滑翔机运动原理设计了一种仿海龟扑翼滑翔机,打破了传统滑翔机的外形设计。针对传统滑翔机机动性较弱问题,马峥等^[45]通过引入仿生推进设计技术,借助水平翼运动增加滑翔机的前进速度,该研究也为未来仿生滑翔机的研制提供技术依据和理论指导。李永成^[46]在传统水下滑翔器设计基础上加上仿生推进的设计理念,借助机翼运动来增加滑翔机器的滑翔速度,从而解决传统水下滑翔器易“随波逐流”的问题。吴俊飞^[47]等人参考海龟水中姿态和前肢外形,设计了一种新型仿生波浪滑翔器水翼,并通过 ANSYS CFX 模拟分析,验证了仿生水翼的推进性能。

将仿生技术融合到异构体滑翔器上,是异构体滑翔器走向智能化的过渡环节,有助于异构体滑翔器更高效、智能地完成各种复杂任务。

4.2 人工智能技术

近年来,人工智能技术在教育、医疗、决策和智能感知等各领域快速发展,已经取得了不错的应用成果。为突破异构体滑翔器水声通信所面临的传统技术瓶颈,结合人工智能技术,从水声通信和异构体滑翔器两方面拓展新思路。

4.2.1 水声通信方面

在水声通信领域应用人工智能技术,主要思路是结合水声信道窄带宽、大时延、强多途、高噪声的水声固有物理特性和不同海域信道冲激响应的差异性,根据通信指标要求,在发射端自适应切换最优调制方式,在接收端自适应匹配最佳信道参数。

1) 时变信道的自适应调制。

针对海洋水声信道时空频变特性和海底的差异性对水声通信的巨大影响,利用人工智能算法(如强化学习 Q-learning、神经网络等),自主切换调制方式和调制参数,实现基于深度学习的自适应编码,从而保证在不同水域环境下水声通信的成功率和可靠性。

2) 水声信道的估计均衡。

国内外学者提出基于人工智能技术的信道估计与均衡方法。针对不同的海洋信道环境,自适应匹配最佳信道参数;基于粒子群算法的自适应决策反馈均衡器的运用;基于深度神经网络的信道估计器;基于向量机的水声信道盲均衡算法等。

4.2.2 异构体滑翔器方面

1) 航迹规划。

随着异构体滑翔器集群技术的研究和应用的推进,对滑翔器集群控制性能提出更高要求。针对不同编队任务需求,在通信受限以及环境受限的条件下,结合深度学习技术,以异构体滑翔器编队效能最大为输出结果,功耗最小为代价函数,自适应匹配最优航迹规划。

2) 能源分配。

异构体滑翔器执行任务,需要搭载不同任务载荷。如何以高效、节能的方式对任务载荷分配能源,将是异构体滑翔器编队未来发展的关键。结合深度学习技术,针对不同任务、不同载荷工作的需求,自适应分配能源,自主控制不同载荷的工作与休眠。

3) 参量调节。

发展滑翔器人工智能技术,并结合流体力学和机械结构理论,优化滑翔器结构、性能及各种控制参量,可实现基于海洋环境的准实时智能感知,有助于增强其在各种复杂海洋环境和任务突变情况下的自主运行能力和智能调节能力。

4) 故障诊断(数字孪生)。

结合人工智能技术,可实现对滑翔器平台的实时故障诊断,避免传统故障诊断方式带来的延迟滞后性。西北工业大学梁庆卫等人结合人工智能、机器学习技术,采用数字孪生方法,在信息化平台建立数字化模拟,对集成物理反馈的数据进行分析,在虚拟空间中实现映射,反应实体系统的生命周期过程,提高故障诊断效率^[48]。

4.3 水下能源补给技术

水下能源补给技术是异构体滑翔器海洋观测的关键技术,也是其发展与应用的“瓶颈”。水下滑翔器大多自身携带蓄电池,有限的电池能量除自

身供给外,还要给搭载载荷及其数据处理分析系统供能,且需要上浮或打捞进行充电或更换电池组,这会导致异构体滑翔器自持力、续航力和任务执行能力受到制约。

国内外专家针对水下滑翔器的能源补给问题展开研究。一方面充分利用海洋中的巨大能源,除波浪能外还有潮汐能、海流能、海洋温差能等多种形式,突破异构体滑翔器海洋自供能关键技术。另一方面,国内外研究团队着手研发水下充电站、水下接驳坞、水下无线充电等技术,当异构体滑翔器监测到能源报警后,即刻寻找最近充电装置,进行能量补给,在能量恢复后,再返回编队中继续执行任务。

中国船舶七一〇所的曹红梅^[49]详细梳理了国外无人潜航器能源技术发展现状,常用能源技术的优缺点以及最新技术进展,并探讨了能源技术发展趋势。其中,美国巴特爾(Battelle)公司2014年已研发出“水下母港”(Oceanhub)样机,利用“金枪鱼”-12 UUV完成了海试。利用该样机,UUV可自主导航并停泊,使用感应线圈实现电力传输,无需金属间的直接接触。“水下母港”充电功率为1.7 kW,效率可达90%,UUV充电时间为4~6 h^[50]。美国2015年启动的创新性海军项目,设想在3 000 m海底布设一定数量能源补给点,绵延数百千米,寿命超过20年。UUV执行任务时,可在补给点补充能源并中转数据,保障了水下长航时、远航程作业。

相比较来说,国内在海洋能源供能和水下无线充电站方面与国外存在很大的差距,在这方面还需要持续的深入研究。

4.4 安全布放回收技术

目前,美国已实现在自主海洋采集网络中通过固定的水下回收器收集水下无人平台的数据并对其补充能量。意大利北约海上研究和试验中心(CMRE)^[51]研究了一种带有传感器的AUV捕捉器,能够精准检测对准AUV,结合其配套的控制软件,还可自动锁定/解锁AUV和电池充电器接合/分离。

目前,国内水下滑翔器的布放回收大多采用吊

绳和回收船;波浪能滑翔器由于其分体结构,水面船和水下牵引机,中间由7 m铠装缆相连,一般采用作业船上的龙门吊来布放回收。异构体滑翔器搭载多种传感器载荷,其外形结构发生变化,更增加其布放回收的难度。异构体滑翔器的安全快速布放回收,是异构体滑翔器稳健高效执行任务的前提和基础。为异构体滑翔器配备专业的甲板控制终端,提供任务调度、数据管理、通信组网、维修保养、成果展示等方面支撑,并配备安全可靠的布放回收设备和软件系统,是异构体滑翔器编队协同发展和广泛应用的必然之举。

5 结束语

异构体滑翔器的体系结构借助水声通信技术,将水下滑翔器全海深隐蔽观探测和波浪能滑翔器能源充足的优势相结合,构建了跨介质信息链路,拓展了滑翔器的作用范围和观探测能力。本文简要综述了水声通信技术的研究现状,异构体滑翔器水声通信技术研究与应用国内外现状,探讨了异构体滑翔器水声通信技术难点和未来研究趋势。同国外先进水平相比,我国虽然在异构体滑翔器和水声通信机研制领域有了长足进步,但在人工智能、能源补给以及安全布放回收等方面仍存在较大差距,这也是需要我们持续关注和研究的关键点。本文对异构体滑翔器水声通信和组网的研究与应用具有指导参考意义。

参考文献

- [1] 沈新蕊,王延辉,杨绍琼,等.水下滑翔机技术发展现状与展望[J].水下无人系统学报,2018(2):89-106.
- [2] 程雪梅.水下滑翔机研究进展及关键技术[J].鱼雷技术,2009,17(6):1-6.
- [3] 孙芹东,兰世泉,王超,等.水下声学滑翔机研究进展及关键技术[J].水下无人系统学报,2020,28(1):10-17.
- [4] 孙秀军,王雷,桑宏强.“黑珍珠”波浪滑翔器南海台风观测应用[J].鱼雷技术,2019,27(5):562-569.
- [5] 廖煜雷,李晔,刘涛,等.波浪滑翔器技术的回顾与展望[J].哈尔滨工程大学学报,2016,37(9):1227-1236.
- [6] 邹念洋.波浪滑翔器研究和应用的现状及发展前景

- [J]. 中外船舶科技, 2017 (4): 13-21.
- [7] 毛柳伟, 杜度, 李杨. 水下滑翔机集群应用现状与关键技术展望[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(23): 13-20.
- [8] 朱敏, 武岩波. 水声通信及组网的现状和展望[J]. 海洋技术, 2015, 34(3): 75-79.
- [9] 朱敏, 武岩波. 水声通信技术进展[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(3): 289-296.
- [10] 王海斌, 汪俊, 台玉朋, 等. 水声通信技术研究进展与技术水平现状[J]. 信号处理, 2019, 35(9): 1441-1449.
- [11] 吴华, 吴学智, 闫肃. 水声通信技术与网络研究进展[J]. 通信技术, 2018, 51(7): 1625-1630.
- [12] 许肖梅. 水声通信与水声网络的发展与应用[J]. 声学技术, 2009, 28(6): 811-816.
- [13] 曾宪武. 水声综合通信网络关键技术的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
- [14] 周胜利, 王朝晖. OFDM 水声通信[M]. 任欢, 译. 北京: 电子工业出版社, 2018.
- [15] 王永恒. 基于 OFDM-MFSK 的水声通信技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- [16] 徐小卡. 基于 OFDM 的浅海高速水声通信关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.
- [17] 马璐, 刘淞佐, 乔钢, 等. 水声正交频分复用异步多用户接入方法[J]. 声学学报, 2017, 42(4): 436-444.
- [18] 李伟伟. 多载波 MFSK 水声技术研究及 Modem 实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- [19] 包烨帆. 基于 MFSK 的水声通信技术研究及其硬件实现[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [20] AKYILDIZ I F, POMPILI D, MELODIA T. Underwater acoustic sensor networks: research challenges[J]. Ad Hoc Networks, 2005, 3(3): 257-279.
- [21] RICE J, GREEN D. Underwater acoustic communications and networks for the US Navy's Seaweb program[C]// International Conference on Sensor Technologies & Applications. Cap Esterel: IEEE, 2008.
- [22] MARQUES E, PINTO M, KRAGELUND S, et al. AUV control and communication using underwater acoustic networks[C]// OCEANS. Aberdeen: IEEE, 2007.
- [23] BINGHAM B, KRAUS N, HOWE B, et al. Passive and active acoustics using an autonomous wave glider[J]. Journal of Field Robotics, 2012, 29(6): 911-923.
- [24] CHEN B, POMPILI D. Team formation and steering algorithms for underwater gliders using acoustic communications[J]. Computer Communications, 2012, 35(9): 1017-1028.
- [25] BUSQUETS-MATAIX J, BUSQUETS-MATAIX J V, BUSQUETS-MATAIX D, et al. Hybrid glider Alba 14 with laser-acoustic data transfer as a low-cost independent instrumentation data-mule[C]// OCEANS. Aberdeen: IEEE, 2017.
- [26] PETROCCIA R, SLIWKA J, GRATI A, et al. Deployment of a persistent underwater acoustic sensor network: The CommsNet17 experience[C]// 2018 OCEANS-MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean (OTO). Kobe: IEEE, 2018.
- [27] STINCO P, TESEI A, BIAGINI S, et al. Source localization using an acoustic vector sensor hosted on a buoyancy glider[C]// OCEANS 2019-Marseille. Marseille: IEEE, 2019.
- [28] MAGUER A, STEFANO B. Providing engineering support to advance maritime research through successful at-sea experimentations: 60 years' experience in CMRE facing evolving complex challenges and providing efficient solutions. A practical example[C]// OCEANS 2019. Marseille: IEEE, 2019.
- [29] TESEI A, STINCO P, MICHELI M, et al. A buoyancy glider equipped with a tri-dimensional acoustic vector sensor for real-time underwater passive acoustic monitoring at low frequency[C]// OCEANS 2019. Marseille: IEEE, 2019.
- [30] STINCO P, GUERRINI P, TESEI A, et al. Passive acoustic signal processing at low frequency with a 3-D acoustic vector sensor hosted on a buoyancy glider[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2020, 46(1): 283-293.
- [31] FERRI G, STINCO P, MAGISTRIS G D, et al. Cooperative autonomy and data fusion for underwater surveillance with networked AUVs[C]// 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Paris: IEEE, 2020.
- [32] SOLDI G, GAGLIONE D, MAGISTRIS G D, et al. Underwater tracking based on the sum-product algorithm enhanced by a neural network detections classifier[C]// ICASSP 2020. Barcelona: IEEE, 2020.
- [33] LAN H, LV Y, JIN J, et al. Acoustical observation with multiple wave gliders for internet of underwater things[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 8(4): 2814-2825.
- [34] 陈友淦, 许肖梅. 人工智能技术在水声通信中的研究进展[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(10): 1536-1544.
- [35] 支绍龙, 袁兆凯, 李宇, 等. 一种小型化水声信号调制发射系统[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(7): 1668-1675.
- [36] 王旭. 水声 Modem 低功耗信息处理平台的设计与实

- 现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- [37] 朱彤, 鄢社锋, 曾迪. 水声通信节点的低功耗值班电路设计[J]. 网络新媒体技术, 2021, 10(6): 62-68.
- [38] 王伟平, 张尤君, 董超, 等. 海洋无人系统跨域协同观测技术进展[J]. 无人系统技术, 2021, 4(4): 14-21.
- [39] 薛冬阳. 水下滑翔机编队协调控制与不确定性研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
- [40] 李学成, 张润锋, 杨绍琼, 等. 不同通信概率下海洋滑翔机异构编队稳定性分析[J]. 无人系统技术, 2021, 4(4): 59-66.
- [41] 马天龙, 刘淞佐, 乔钢, 等. 基于频移键控的仿海豚哨声水声通信技术[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(6): 2045-2053.
- [42] 贾於清. 仿鲸目哨声隐蔽水声通信方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [43] 王田苗, 杨兴帮, 梁建宏. 中央鳍/对鳍推进模式的仿生自主水下机器人发展现状综述[J]. 机器人, 2013, 35(3): 352-362.
- [44] 朱崎峰, 宋保维, 丁浩, 等. 一种仿海龟扑翼推进机构设计[J]. 机械设计, 2011, 28(5): 30-33.
- [45] 马峥, 李永成, 潘定一, 等. 水下滑翔器仿生推进水动力学特性研究[C]//第十四届全国水动力学学术会
议暨第二十八届全国水动力学研讨会文集(上册). 长春: 全国水动力学研讨会, 2017.
- [46] 李永成. 水下滑翔器高效滑翔及仿生推进水动力学特性研究[D]. 北京: 中国舰船研究院, 2017.
- [47] 吴俊飞, 杜照鹏, 熊学军. 新型仿生波浪滑翔器水翼设计与水动性能研究[J]. 机械制造, 2017, 55(8): 20-23.
- [48] 梁庆卫, 胡珊珊, 宋保维, 等. 一种基于数字孪生的水下滑翔机故障诊断实时诊断方法, 中国, CN114662569A[P], 2022.
- [49] 曹红梅, 胡光兰, 李晓东. 国外无人潜航器能源技术发展现状与趋势研究[J]. 数字海洋与水下攻防, 2022, 5(4): 361-368.
- [50] 刁宏伟, 李宗吉, 王世哲, 等. 水下滑翔器研究现状及发展趋势[J]. 舰船科学技术, 2022, 44(6): 8-12.
- [51] PETROCCIA R, SLIWKA J, GRATI A, et al. Deployment of a persistent underwater acoustic sensor network: the CommsNet17 experience[C]// 2018 OCEANS-MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean (OTO). Kobe: IEEE, 2018.

(责任编辑: 肖楚楚)