

DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.25062401 CSTR: 32055.14.sxjs.1000-3630.25062401

引用格式: 杨益新, 周建波, 李明杨, 等. 水声学研究现状与发展趋势[J]. 声学技术, 2025, 44(3): 309-332. [YANG Yixin, ZHOU Jianbo, LI Mingyang, et al. Underwater acoustics: current status and future trends[J]. Technical Acoustics, 2025, 44(3): 309-332.]

水声学研究现状与发展趋势

杨益新, 周建波, 李明杨, 侯翔昊, 杨 龙, 谢 磊, 王 璐,
沈 贺, 刘雄厚, 雷 波, 杜朝辉

(西北工业大学航海学院, 陕西西安 710072)

摘要: 水声学在维护国家海洋安全、促进海洋资源勘探开发等领域具有重要作用。文章首先回顾了国内外水声学的发展历程, 接着对水声学的若干方向进行了综述, 主要包括水声装备、水下声传播、海洋环境噪声、水下目标探测、水下目标识别、水下目标方位估计、水下目标被动跟踪、基于物理场特征的水下目标被动定位、分布式融合水下目标定位以及主动定位技术。最后结合实际应用场景中面临的诸多挑战, 探讨了水声装备及部分关键水声技术的发展趋势, 以期为我国水声学基础理论与应用拓展研究提供参考。

关键词: 水声学; 水声装备; 水声技术; 发展趋势

中图分类号: O427

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2025)-03-0309-24

Underwater acoustics: current status and future trends

YANG Yixin, ZHOU Jianbo, LI Mingyang, HOU Xianghao, YANG Long, XIE Lei, WANG Lu,
SHEN He, LIU Xionghou, LEI Bo, DU Zhaohui

(School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China)

Abstract: Underwater acoustics plays a significant role in safeguarding national maritime security and promoting the exploration and development of marine resources. This paper begins by tracing the progression of underwater acoustics research both from domestic and global perspectives, followed by a comprehensive overview of several key areas within the field. These include underwater acoustic equipment, underwater sound propagation, ocean ambient noise, underwater target detection, identification and tracking techniques, target bearing estimation and localization methods including both physical-feature-based and multi-array-based passive/active methods. Considering the challenges encountered in practical applications, the paper discusses the development trends of underwater acoustic equipment and critical technologies. This aims to provide insights for advancing fundamental theories and applied research in underwater acoustics in China.

Key words: underwater acoustics; underwater acoustic equipment; underwater acoustic technology; development trends.

0 引言

水声学主要研究水下声波的产生、传播与接收, 其核心是解决水下目标探测和信息传输过程中的各种声学问题。该学科起源于 19 世纪初, 瑞士物理学家 Colladon 于日内瓦湖完成首次水中声速测量^[1], 正式拉开了水声学研究的序幕。1912 年泰坦尼克号海难事件促使水声学开始加速发展。两年后, Fessenden 研制的电动式水声换能器成功实现了 2 n mile(1 n mile=1.852 km) 外冰山的探测, 标

志着水声学进入实用化发展阶段。第一次世界大战期间, 法国物理学家 Langevin 利用压电晶体探测水中反射体, 形成现代声呐的雏形^[2]。尽管最初的用途是军事防御, 但它为后来的水声学研究和科技发展奠定了基础。在 1920~1930 年期间, 声波传播理论和声呐技术在军事应用中得到了进一步发展, 英国海军研发的 ASDIC(anti-submarine detection investigation committee) 声呐系统, 成为世界上第一个实际用于潜艇探测的声呐系统^[3]。第二次世界大战进一步推动水声学的发展, 各国都投入了大量人力和财力开展水声研究, 这一期间研制出了声制导鱼雷、音响水雷、舰壳声呐、被动扫描声呐、水声通信机、声呐浮标等水声装备。二战中积累的先进声呐技术和水声科学, 为战后声呐发展奠定了基础。在二战后到 20 世纪 90 年代, 电子技术、计

收稿日期: 2025-06-24

基金项目: 国家自然科学基金(62431023、12274347)

作者简介: 杨益新(1975—), 男, 江苏常熟人, 教授, 研究方向为水声学与水声信号处理。

通信作者: 杨益新, E-mail: yxyang@nwpu.edu.cn

算机技术、大规模集成电路和数字计算机等技术的快速发展,大幅促进了声呐技术的发展,出现了一批大功率、大尺寸基阵,以及数字化声呐^[4]。20 世纪 90 年代以后,在世界主要海军强国的大力推动下,水声技术得到显著发展,水声通信技术、多基地探测技术、极地声学研究和跨域协同探测技术等领域均呈现出蓬勃发展的态势,推动传统水下探测模式不断实现技术突破。

当前,尽管国际水声学领域的研究投入增速有所放缓,但主要海洋国家仍持续推进该领域的技术探索与创新。诸多知名学府与专业机构,诸如华盛顿大学应用物理实验室、伍兹霍尔海洋研究所、麻省理工学院、加州大学圣地亚哥分校、美国海军海洋学研究所、北约海洋研究与试验中心、俄罗斯科学院普通物理研究所、南安普顿大学、佐治亚大学、海法大学、特拉华大学、新泽西技术研究所、佐治亚理工学院、夏威夷大学等,是目前国际上从事水声相关基础和应用研究的主要单位。

国内水声学的研究起步相对较晚,最早可以追溯到 1953 年,哈尔滨军事工程学院(哈军工)的何祚镛教授奉命创建了声呐专业,并与雷达专业携手组建了“雷达声呐教授会”^[5]。这标志着我国水声学研究的正式起步。20 世纪 50~60 年代,在国家战略需求驱动下,通过老一辈科学家的开拓性工作,我国相继建立了首批专业水声研究机构,成功研制出首代国产声呐装备,为海军反潜、探雷等关键作战任务提供了重要的技术保障。随着时间推移,20 世纪 70~80 年代期间,随着国家科技实力和工业基础的提升,水声学研究进入快速发展阶段。此间,一系列代表性成果斐然涌现:建立了中国首个“重力式低噪声水洞”,解决了国际水动力噪声测量难题,研制了“海上落点水声定位系统”并准确测量导弹落点等^[6]。20 世纪 90 年代至 21 世纪初,随着我国经济的迅猛发展,水声学研究迎来了全新契机,不仅获得了更为充裕的资金注入与有力的技术支撑,国际合作交流的持续深化亦成为推动其发展的关键力量。在此期间,1995 年中国首次在南海大陆坡、大陆架以及中央盆地开展系统的海上综合实验,揭示了大陆坡等复杂环境下声传播规律。2001 年中美联合在东海开展实验,掌握了我国典型海域声传播过程,以及海洋声学参数和海洋活动对声传播影响机理,显著增强了对亚洲海域声学环境的掌握程度^[7-8],为声呐在我国周边海域的使用提供了支撑。与此同时,我国自主研发实力显著提升,研制了拖曳阵、舷侧阵等声呐并装备于我国海军相关舰艇,大幅提升了舰艇水下探测及作

战能力。步入 21 世纪,我国水声学研究迈向全新高度,创新活力竞相迸发,应用领域不断拓展,跨学科融合进程持续加速。在微机电水听器^[9]、矢量水听器研制及其探测技术^[10]、非线性声学^[11]、海洋声学遥感^[12]等前沿方向蓬勃发展,部分领域跻身世界前列。

当前我国持续加大水声学领域投入,研究热度显著提升,除了哈尔滨工程大学、西北工业大学、中国科学院声学研究所、杭州应用声学研究所等传统从事水声研究的高校与科研机构外,一些新型研发机构也主动开展了水声学相关的研究,为我国的水声学发展注入了新的活力。

1 水声装备

1.1 固定式水下监视系统

固定式水下监视系统是一种部署于海底的声学探测网络。该系统通常由水听器阵列、电缆、信号处理设备以及通信系统等组成。固定式水声监视网络在源头监控与持续追踪方面发挥着至关重要的作用,构成反潜作战体系中的关键组成部分。自 20 世纪 50 年代起,美国着手构建固定式水下监视系统,逐步在全球范围内建立起固定式被动声呐探测网络。该网络主要分布于岛链、格陵兰-冰岛-英国“缺口”连接区、太平洋中部以及美国本土的东西海岸等地。至今,美国在亚太地区仍保有“海龙”、“海蜘蛛”及“巨人”等至少三套固定式水声监视系统^[13]。为克服固定式监视系统的局限性并增强整体水下信息采集能力,美国进一步开发了固定式分布系统(fixed distributed system, FDS)、先进可部署系统(advanced deployable system, ADS)、舰载拖曳阵监视系统以及多功能拖曳阵列等一系列可移动部署的水下监视系统。固定式系统与移动系统相结合,进一步增强了水下监测能力。此外,美国还开发了“广域海网”^[14]、“近海水下持续监视网络”^[15]、可部署自动分布式系统以及可靠声学通道线列阵系统等多种水下监视系统。通过这些系统的构建,美国实现了以分布式固定水下传感系统与搭载多种探测感知载荷的可移动式无人潜航器为主的水下目标监视系统,并持续维护水下军事对抗中的非对称优势。日本陆续研制了多种水下监视系统,包括 LQO-3、LQO-4、LQO-6 型系统,并在鄂霍次克海、日本海、对马海峡、东海等海域总计部署了至少 16 套,构筑起监视潜艇进出太平洋的战略反潜屏障。欧盟建立了“港口和海上监视与保护”系统,旨在对从港口至沿海水域的指定海域进行监

视与保护, 涵盖海上交通线及关键咽喉要道, 从而保障海上交通和设施的安全。韩国已在其主要港口部署一种新型港口监视系统, 该系统具备更高效的探测、识别及响应能力, 以应对接近其港口的低噪声水下目标。

1.2 艇载声呐

艇载声呐是指安装在潜艇上的声呐系统, 用于探测、识别和跟踪水下目标。一艘潜艇一般装备多型不同功能的声呐设备, 其中能实现远距离探测的主要有舷侧声呐和拖曳声呐等。

舷侧声呐是一种安装在舰艇或潜艇舷侧的声呐系统, 主要用于对水下目标进行探测、定位、跟踪和识别等。舷侧声呐通常与拖曳声呐配合使用以弥补拖曳声呐探测的“时间局限性”和“左右舷模糊”等缺陷。美国洛克希德·马丁公司研制了宽孔径舷侧声呐 (AN/BQG-5), 可在两舷 $45^{\circ}\sim 135^{\circ}$ 范围内对 10 n mile 外目标进行测距, 方位估计精度为 0.2° ^[16]。该公司还研制了轻型宽孔径舷侧阵声呐, 相对于 AN/BQG-5 声呐, 其在重量上减轻 54%, 在成本上减少了 37%, 大幅提升了潜艇作战攻防系统性能^[4]。美国在最新的部分型号攻击型核潜艇上还加装了大型垂直阵列舷侧声呐, 用于弥补艇尾探测盲区或者探测能力不足的缺陷^[17]。英国现役潜艇的舷侧声呐主要是宇航公司研制的 2007 型声呐, 目前 2007 型声呐已经被马可尼公司研制的 2072 型声呐取代^[18], 2072 型舷侧声呐的详细性能参数尚未有公开资料报道, 但可知其是一种被动低频舷侧阵声呐, 从工作频段来看, 应具备较远的探测能力。法国开发的 TSM-2253 型舷侧声呐装备于“不屈”级、“凯旋”级、“红宝石”级攻击型核潜艇, 作用距离达 30 n mile 以上^[19]。德国研制了 FAS3-1 型舷侧声呐, 装备于 212 型、214 型潜艇, 对水面舰艇的被动探测距离约为 25 km, 并具备 8 个目标自动跟踪能力^[20]。

拖曳阵声呐是将声呐基阵拖曳在舰艇 (主要是潜艇和水面舰艇) 后方, 通过主动或者被动接收目标反射或辐射的声波来探测目标的声呐系统。相对于舷侧阵声呐, 其突破了平台空间尺寸限制, 且远离本艇噪声源, 工作频率较之艇载其他常规声呐更低, 可根据需要选择有利的工作深度, 背景干扰小, 探测能力强。在艇载声呐系统中, 拖曳阵声呐虽然起步较晚, 但其迅速发展成为潜艇的主要声呐装备之一。美国是最早进行拖曳阵声呐装备研制的国家, 目前潜用拖曳阵主要有粗线阵和细线阵两种形态, 分别适用于潜艇高速和低速航行状态下的目

标探测。目前现役美国核潜艇装备有 BQR-15, TB-16, TB-23, TB-29A, TB-34 五型拖曳阵声呐。其中 BQR-15 仅装备于美国“俄亥俄”级核潜艇。TB-16 属于甚低频粗线拖曳阵, 虽然探测距离较近, 但是具有良好的抗流噪声能力, 适宜在复杂浅海、高速机动状态下使用。TB-23 主要装备于美国部分“弗吉尼亚”、“洛杉矶”级核潜艇上。该系统由 2 个高频段、2 个中频段、4 个低频段模块以及 1 个环境模块、2 个隔振模块组成, 总共集成 98 只水听器^[21]。TB-29A 属于甚低频细线阵声呐, 综合探测能力优于粗线阵, 具有良好的分辨和定位特性, 但由于基阵尺寸较细, 易受海浪影响, 不太适宜在海况复杂的近海环境中使用。TB-34 属于粗线阵, 目前已装备部分“洛杉矶”级攻击型核潜艇。该声呐采用多阵相干处理技术, 方位估计精度可与 200λ (λ 为声波波长) 孔径的阵相比拟, 目标深度估计精度在 ± 15 m 内^[21]。英国研发的拖曳阵声呐以小型为主, 例如 2026 型声呐、2046 型声呐、2076 型声呐, 其被动探测距离超过 20 n mile, 具备全方位覆盖、多目标探测能力。最新的“机敏级”潜艇大概率参考美国的 TB-29A 拖曳阵声呐, 采用了两条拖曳阵声呐。德国典型的潜艇拖曳阵声呐为阿特拉斯电子公司研制的 TAS90 甚低频拖曳阵, 利用 LOFAR、DEMON 分析增强了目标识别能力, 具有低噪声目标瞬态检测能力。法国研制的 DSUV-62 甚低频被动式拖曳阵声呐, 能自动启动跟踪多达 64 个噪声源目标, 可对疑似目标 (多达 8 个) 进行 LOFAR、DEMON 分析^[22]。

1.3 航空声呐

航空声呐系统主要分为吊放声呐和声呐浮标两大类。吊放声呐通常装备于反潜直升机, 而声呐浮标则主要应用于固定翼反潜巡逻机或反潜直升机。

吊放声呐通过电缆将声呐基阵垂入水中进行探测, 其深度可调, 以充分利用水文条件, 从而最大化潜艇探测概率。典型的吊放声呐包括 AN/AQS-13 系列、AN/AQS-22 和 HELRAS。AN/AQS-13 声呐^[23]以其远距离探测、低搜索频率和主被动联合搜索能力而著称。AN/AQS-22 声呐^[24]能够形成 24 个预成波束, 对全向各角度的目标具有快速感知和定向能力, 并能够兼顾处理 8 个全向浮标和 4 个定向浮标的全频段信号。此外, 它还能够通过指令控制 8~16 个声呐浮标。HELTRAS^[25]以其低发射频率和高功率而闻名, 能够在深海中实现超过第一会聚区的探测距离。HELTRAS 还采用了多普勒滤波、空-时脉冲长度分析、波形自适应选择和混响抑制

等技术,以满足浅海作业需求。

声呐浮标接收潜艇发出的噪声或反射的主动回波信号,并通过无线电将其传至飞机上的处理系统进行定位。常见的声呐浮标类型包括被动定向浮标、垂直线列阵浮标、主动定向浮标、扩展阵浮标、声源浮标、海洋环境噪声测量浮标和温度深度测量浮标^[26]。例如 AN/SSQ-53B/53C/53D/53E/53F 浮标经常用于 P-3C 飞机投放,其定向误差可达 $\pm 10^\circ$ ^[27]。AN/SSQ-77C 垂直线列阵浮标具备在复杂环境下检测目标的能力^[28]。AN/SSQ-62E 主动定向浮标能够实现目标测向、测距,并能单枚定位目标,同时发射多种声呐信号以适应不同探测环境和目标^[29]。AN/SSQ-110B 声源浮标通常与扩展阵浮标配合使用,以提供声源并依靠潜艇反射回波进行定位^[30]。海洋环境噪声测量浮标代表性产品为 AN/SSQ-57B^[31],其对海洋环境噪声测量精度可达 ± 2 dB。温度深度测量浮标代表性产品为 AN/SSQ-36B^[32],用于测量作战海域水体声速,为声呐投放间距以及深度提供支撑。

1.4 小目标探测声呐

水下慢速小目标探测声呐按照工作方式可分为主动声呐和被动声呐。其中,主动声呐的应用最为广泛,其工作频率在 50~500 kHz 之间,最大探测距离在 400~2000 m 之间。被动声呐作为主动声呐的补充,探测距离一般不超过 200 m^[33-34]。

英国代表性小目标探测声呐有 Cerberus 360 声呐、Cerberus Mod2 声呐、Sentinel IDS 声呐和 X-TYPE 声呐^[35-37]。Cerberus 360 由英国 QinetiQ 公司在 2003 年发布。该声呐工作频率为 100 kHz,声源级为 210 dB,可选装成像声呐和被动声呐。Cerberus 360 单独使用时探测距离为 800 m,联合布放时探测距离可达 1000 m。Cerberus Mod2 声呐由英国 Atlas Elektronik 公司研制,工作频率在 70~130 kHz 之间,带宽为 20 kHz。该声呐可探测 900 m 外的开式蛙人和 700 m 外的闭式蛙人,方位估计精度可控制在 1° 以内,此外,该声呐还可以跟踪 850 m 外的开式蛙人和 675 m 外的闭式蛙人。Sentinel IDS 声呐由英国 Sonardyne 公司研制,其工作频率为 70 kHz,对水下慢速小目标有效探测距离可达 900 m,识别距离超过 600 m,方位估计精度在 $0.1^\circ\sim 0.5^\circ$ 之间,距离精度为 0.2 m,可同时跟踪 20 个目标。X-TYPE 声呐由英国 Sonardyne 公司研制,其工作频率为 70 kHz,对水下慢速小目标有效探测距离可达 900 m,识别距离超过 600 m,方位估计精度在 $0.1^\circ\sim 0.5^\circ$ 之间,距离精

度为 0.2 m,可同时跟踪 20 个目标。

以色列代表性小目标探测声呐有 AquaShield 声呐和 PointShield 声呐^[33-34, 37]。AquaShield 声呐由以色列 DSIT 公司在 2007 年推出,可提供 120° 、 240° 、 360° 三种扇区覆盖配置,对开式蛙人的探测距离可达 1000 m,闭式蛙人可达 700 m,方位估计精度为 0.1° ,距离估计精度为 0.5 m。该声呐的扩展型号可将开式蛙人探测距离提升至 1800 m、闭式蛙人探测距离提升至 1200 m。PointShield 声呐由以色列 DSIT 公司在 2018 年与印度海军签署协议研制,能够实现 360° 全方位覆盖,对开式小目标的探测距离达到 700 m。

美国代表性小目标探测声呐有 SeaScout 声呐和 AN/WQX-2 声呐^[38-39]。SeaScout 声呐由美国 NuvoSonic 公司研制,其工作频率为 21~33 kHz,差频频率为 4~7 kHz,差频频率下发射声源级超过 200 dB,对小目标探测距离超过 2000 m。AN/WQX-2 声呐为美国海军现役的蛙人探测声呐,其最大作用距离约为 730 m,内置目标识别系统,能够有效区分蛙人、海洋哺乳动物、鱼类等。

加拿大代表性小目标探测声呐为 CSDS-85 声呐,由加拿大 C-Tech 公司开发。其工作频率为 80 kHz,可实现 360° 全方位监控,对水下慢速小目标的探测距离可达 2000 m^[40]。

土耳其的小目标探测声呐于 2012 年研发,工作频率为 60 kHz,带宽为 2 kHz,可选发射 CW/LFM 信号,发射声源级超过 216 dB,探测距离能够达到 1200 m^[33]。

相较于国外发达国家,国内水下慢速小目标探测声呐起步较晚,成熟的产品较少。目前主要有中国与乌克兰共同研制的 TRONKA 声呐^[41]、中国科学院声学研究所研发的蛙人探测声呐^[42]、中国科学院声学研究所与上海船舶运输科学研究所共同研发的 2010 型蛙人探测声呐、杭州应用声学研究所和上海船舶电子设备研究所也先后研发了蛙人探测声呐^[33, 39]。TRONKA 声呐由中乌联合研制,其工作频率为 60 kHz,可以实现 360° 全方位监控,对水下慢速小目标的最大探测距离可达 1000 m,最大识别距离可达 500 m。中国科学院声学研究所研制的蛙人探测声呐为国内首款数字多波束蛙人探测声呐,是 2008 年北京奥运会青岛奥帆赛水下安保系统的组成部分。该声呐工作频率为 100 kHz、带宽为 10 kHz,对蛙人的最大探测距离能够达到 600 m。2010 型蛙人探测声呐工作频率为 70 kHz,带宽为 4~20 kHz,可选发射连续波 (continuous wave, CW) 和线性调频信 (linear frequency modula-

tion, LFM) 两种信号, 探测范围为 180° , 在清澈水域的探测距离可达 500 m, 浑浊水域的探测距离可达 200 m。

1.5 无人平台声呐

近几十年来, 基于环境监测、资源开发、情报收集、国土安全等需求, 各国都在海洋无人探测平台领域谋求新的突破。按照工作域的不同, 可以将海洋移动无人平台分为无人水面艇 (unmanned surface vehicle, USV) 和无人潜航器 (unmanned underwater vehicle, UUV) 两大类。

无人水面艇通常搭载多种传感器和控制系统, 可实现导航、避障、控制、探测等功能, 被广泛应用于民用与军事领域。美国 MANTAS T12 多用途 USV 搭载 Klein UUV-3500 多波束侧扫声呐和 Norbit Subsea 公司生产的宽带多波束前视声呐, 常被用于执行海底测绘或浅海水雷探测任务^[43]。美海军“波浪滑翔者”无人艇搭载 TAIL 被动式拖曳声呐阵列系统, 可在不暴露自身位置的条件下对周围海域过往的船只与潜航器进行监测^[44]。澳大利亚的“蓝瓶”号 USV 采用泰勒斯公司的细线光纤拖曳阵声呐阵列, 对附近海域目标进行自主检测和定位, 被称为“蓝色哨兵”。美国“斯巴达侦察兵”、MCM、以色列“海鸥”、法国 Inspector 120 等 USV 搭载具有超高分辨率以及卓越小目标探测能力的合成孔径声呐 (synthetic aperture sonar, SAS), 能够执行反水雷任务, 可大大降低执行扫雷任务时人员的伤亡概率。法国 Inspector 120 无人艇配备 ECA 集团开发的 T18-M 拖曳合成孔径声呐, 具备执行反水雷任务能力, 同时也能够执行水下勘测、水文调查等一般任务。中国自主研发的无人艇 JARI-USV-A “虎鲸”号搭载相控阵雷达, 能够同时对不同类型水面及空中目标进行探测, 舰艏可搭载声呐浮标, 可实现对水下目标的探测^[45]。

无人潜航器是开展深海调查的重要装备。有缆遥控潜水器 (remotely operated vehicle, ROV) 通过脐带缆与母船连接, 其优点在于动力充足、作业能力强、信息交换便捷, 可有效支撑海底资源开发、深海救捞、海底光缆铺设、水下采样等工作^[46]。美国的 REMUS 600 可以搭载多种传感器设备, 包括声呐、摄像头、水文仪器和环境监测设备等, 能够执行海底地图绘制、目标搜索和采样等多种任务^[47]。中国的“海龙号”遥控水下潜水器, 成功突破万米级长距离微细光纤传输及控制的技术瓶颈, 实现了万米海底的巡航遥控和实时视频影像传输播放; “海斗一号”全海深自主遥控潜水器搭载了 DWS19-2 波浪传感器, 能够对海面波浪环境的关

键参数进行测量, 如平均波高、周期、最大波高、主波向、波浪功率谱及姿态信息等, 为“海斗一号”布放和回收的关键阶段提供了海面波浪环境现场保障。无缆自治潜水器 (autonomous underwater vehicle, AUV) 自带能源, 与母船无物理连接, 主要用于军事、海洋调查、海底勘查、水下搜索等方面。水下滑翔机 (glider) 具有自主水平推进与定向航行能力, 可通过改变自身浮力和浮心位置, 产生锯齿形滑翔运动, 并在运动过程中通过搭载的传感器进行海洋环境观测^[48], 是 AUV 的典型代表。

美国的 Slocum 水下滑翔机能够搭载温度测试传感器、盐度测试传感器、叶绿素检测传感器、水下声学传感器、水下重力传感器、水下地形声呐等多种探测设备, 能够对各类水文数据进行收集^[49]。中国的“海翼”号水下滑翔机可以搭载温度、盐度、溶解氧、浊度、叶绿素、硝酸盐海洋探测传感器及声学多普勒流速剖面仪、水听器等, 能够满足多种海洋观测任务的需求^[50]。中国的“潜龙”系列 AUV 搭载囊括声学探测器、照相机、磁力仪和多种用于多金属硫化物区域探测的传感器, 可进行海底地形地貌、浅地层结构、海底流场和海洋环境参数的综合精细调查。

随着水声通信^[51]、数据融合处理方法和控制决策等关键技术的突破, 集群化是未来海洋无人平台的主要发展方向之一。由欧盟发起的 Grex 项目将 USV、ROV、AUVs 进行互联, 实现了海洋无人平台集群组网由概念到实践的创新^[52]。美国 Aqua-botix 公司推出同构 AUV 集群 SwarmDiver 微小水下航行器集群系统, 搭载有温度及压力传感器, 可应用于海洋环境监测、羽流跟踪和目标探测等场景。中国沈阳自动化所使用由“探索 100”构成的集群开展了多项海洋观测试验, 利用集群观测大亚湾冷水团入侵和岬角涡旋现象, 首次获得大亚湾海域高分辨率的冷水团入侵和岬角涡旋精细结构特征, 为研究上升流冷水对大亚湾底层生态系统的影响提供依据^[53]。中国西北工业大学针对浅水濒海区域水下目标探测的需求, 开展了水下航行器自主跟踪目标以及多航行器集群探测等技术研究, 利用 3 台“勇毅”号水下航行器实现了集群三角队形和一字队形的快速变换和高精度保持, 为形成实际探测能力奠定了基础^[54]。

2 水下物理场建模与特性分析

2.1 水下声传播

水声传播理论主要揭示声波在水中的传播规

律,是水声学研究的基础。声波在海洋中的传播可以用波动方程进行数学描述,波动方程的参数和边界条件由海洋环境参数决定,包括海水声速剖面,海面 and 海底等。目前发展出多种经典的波动方程求解方式,包括快速场、简正波、射线、抛物方程、有限差分、射线-简正波、简正波-抛物方程等方法^[55-56]。其中简正波、射线和抛物方程模型较为常用,这三种模型不仅计算精度高,而且计算速度也较快。随着物理海洋和海洋观测能力的提升,人们对于海洋的认知能力和应用得到飞速发展。水声物理学者都知道海洋环境是动态变化的,不同海域的海底地形和底质参数也相差较大。近年来,针对不均匀水体和海底所组成的复杂波导环境中声传播研究成为关注的热点,出现了多种适用于距离变化波导环境中的声场计算模型。其中,耦合简正波模型^[57-59]能够精确计算距离相关波导中的声场,常作为距离变化波导环境中声场计算结果的参考;抛物方程模型计算声场的速度较快,计算精度较高,但早期的抛物方程法^[60-63]只适用于掠射角较小的声传播问题,随后出现了超宽角抛物方程模型以及诸如 UMPE^[64]、IFD PE^[65]、FEPE^[66]和 RAM^[67]等计算精度很高的声场计算程序,为仿真计算复杂波导环境中低频声传播提供了便利。

声场时空特性的研究对提升阵列增益和声呐水下目标探测性能具有重要意义,因此声场时空特性一直是声传播研究的重点。在浅海声场特性研究方面, Li 等^[68]观测到声场纵向水平相关长度随着频率增加而增加,并揭示了海底吸收系数随频率的非线性变化是导致这一现象的主要原因。Zhang 等^[69]提出了一种基于频率补偿的纵向相关补偿技术来提升大间距声场的相关性。任云等^[70]统计分析了声场时间相关长度的概率分布,随着孤立子内波进入声传播路径声场时间相关长度成倍降低。Ji 等^[71]研究了南海存在线性内波时声场时间相关长度随声速起伏、声源频率、收发距离等参数的变化规律。在深海声场特性研究方面, Li 等^[72]系统研究了深海直达声区、会聚区和声影区内的声场纵向相关特性,发现声场相关性和声场强度具有较好一致性。李整林等^[73]系统分析了深海直达区、影区和会聚区等不同距离下的深度声场垂直相关特性,结合传播模型对声场相关性随空间位置变换规律进行了解释。Xiao 等^[74]分析了南海和墨西哥湾区中尺度涡旋对声场的传播损失和到达角的影响规律,并对中尺度涡引起声场时空变化机理进行了解释。

我国具有辽阔的大陆坡海域,该海域内波等海洋中尺度活动频繁,水下声信道空时变化复杂,声

传播特性也随之改变,主要包括传播损失异常和声场空时相关性衰减等。针对大陆架斜坡海域复杂海洋动力过程对声传播影响的研究逐渐被重视,包括倾斜海底和非线性内波对水下声场能量分布、干涉结构和多途到达时间的影响等,近年来已取得了丰富的研究成果。文献^[75]对上坡条件下的声场垂直相关性进行了实验验证和分析,从理论和实验上分析了大陆架斜坡海域海底地形对垂直相关性的影响。文献^[76-77]详细分析了陆架斜坡海域上坡声能量急剧下降现象的形成机理,给出了“声能量急剧下降距离”的表达式,定量分析声源位置对该现象的影响,利用斜坡海域海上实验测量数据分析了声场水平纵向相关性随距离、空间间隔和时间延迟等参数的变化规律,并在此基础上开展了起伏水声信道对阵增益影响研究,为后续环境适应性阵列处理方法提供了先验信息。在南海东北部盆地边缘海域,海洋内波频发,2001 年 Duda 等对 ASIAEX 实验观测数据进行了详细分析,发现大振幅非线性波在到达浅水区域时其振幅、水平长度尺度和能量都将发生变化^[78]。中国海洋大学田纪伟研究团队对南海东北部内孤立波进行了长时间连续观测^[79-81],研究了内孤立波的生成机制、演变过程和季节性变化特点,分析了内孤立波传播速度与背景流、水深和振幅的关系,以及其他海洋学现象(如中尺度涡和内潮波等)的影响。随着南海海洋内波观测数据逐渐丰富和完善,非线性内孤立波对声传播影响的研究也受到关注。Li 等基于耦合简正波理论推导了内波运动时模态强度起伏的表达式,将模态强度表征为振荡项和趋势项的线性叠加,详细分析了浅海内孤立波动态传播过程中声波模态强度起伏规律^[82]。随后,为了便于分析内孤立波引起的声场起伏, Li 等针对内孤立波引起的水文参数起伏提出了一种基于温度剖面频散演化传播波列的声速场重构(dispersive evolutionary propagated thermistor string, DEPTS)方法^[83],利用 2019 年南海东北部内波-声学专项调查航次观测数据进行验证,在此基础上成功刻画了南海东北部大陆坡海域两组不同类型非线性内波的传播演变过程,并基于耦合模态强度的 Dyson 级数解揭示了内波的变形和色散对模态强度起伏的调制效应^[84]。2022 年, Gao 等考虑孤立子内波和海底地形对声传播的双重影响,基于简正波理论数值对比分析各波导模型条件下模态的耦合规律,进而研究声场强度起伏特性及其物理机理,结果表明当声波朝向或远离内波中心传播时,模态耦合在内波与大陆坡的共同作用下出现增强或衰减,且高号模态耦合系数振荡;内波扰动的

作用使得能量由低号模态耦合至高号模态, 提高了声场强度衰减^[85]。2024年, Wang等利用测量数据结合数值仿真, 讨论了内波引起单频信号和线性调频信号呈现不同起伏特征的原因, 并指出试验海域内波活动导致单频声场模态间干涉条纹出现移动, 进而导致接收位置处特定频率的声能量出现大幅度的快速起伏^[86]。

2.2 海洋环境噪声

海洋环境噪声会对声呐装备的探测形成干扰, 是限制主、被动声呐工作性能发挥的主要因素之一。充分了解海洋环境噪声统计特性, 对声呐设计与使用具有重要指导价值。各海洋军事强国对海洋环境噪声的研究都极为重视。目前对噪声场的研究主要集中在环境噪声测量与分析、环境噪声场时空特性建模预报及环境噪声场应用研究三个方面。

在噪声场测量与分析方面, 早在二战期间, Knudsen等^[87]就在近海岸地区对海洋环境噪声进行了测量。之后 Wenz、Knudsen、Piggott、Crouch等对大量理论和实测数据进行总结, 给出了经典 Wenz 谱^[88]、Knudsen 谱^[89]、Piggott 谱^[90]、Crouch 谱^[91]噪声曲线, 表征了海洋环境噪声强度与海面风速、海面波高以及航船密度之间的粗略关系。1996~2001年, 美国在我国北黄海、东中国海和南中国海先后公开进行了四次大型综合海上实验, 其中包括复杂水声环境条件下的环境监测、传播、混响、噪声测量等实验内容, 获得了包括卫星同步遥感资料在内的大量实验数据^[92]。在 2009~2010年, 美国在菲律宾海开展了声传播和环境噪声实验, 揭示了菲律宾海深海环境噪声在深度方向上的变化规律, 发现共轭深度之下的低频噪声远低于共轭深度之上的噪声^[93-94]。随着国家对海洋声学研究的重视, 相关单位在南海、太平洋、印度洋和极地等地开展了海洋环境噪声的测量实验。徐东等^[95]对南海低频噪声进行了长期观测, 建立了海面波浪谱与水下环境噪声谱的理论关系, 可用于揭示低频噪声形成机理。Jiang等^[96]对巴士海峡附近的西太平洋海域和南海海域的海洋环境噪声进行了长时间连续记录, 实验分析了风生海洋环境噪声场统计特性, 建立了适用于南海北部的风生噪声模型。Shi等^[97]对南海北部长期观测的噪声季节变化和日变化统计特征进行了细致分析, 发现在 500~2000 Hz 频带内噪声有显著的季节变化, 而白天和夜晚之间噪声差异较小。柳云峰等^[98]研究了印度洋海洋环境噪声特性, 分析了海面风速以及降雨对海洋环境噪声的影响规律。谭靖骞等^[99]发现北极噪声具有偶发的尖脉

冲声, 在幅度上有显著的非高斯性, 验证了用 α 分布可以较好地表现该区域的噪声统计特性。

在噪声场时空特性建模方面, 最早的海洋环境噪声预报模型是由 Cron 与 Sherman^[100](C/S 模型) 在 1962 年基于射线理论给出的, 该模型分别给出了体积噪声源与界面噪声源两种情形下噪声场空间相关系数的解析表达式。在 C/S 模型基础上, Chapman^[101]考虑了海底反射的影响, 给出了噪声场中不同掠射角到达的声波强度解析表达式, 发现海底底质会显著影响噪声场垂直指向性结构。Buckingham^[102]根据离散简正波理论给出了均匀声速剖面低损耗海底波导环境下噪声场垂直相关系数以及阵增益的解析表达式, 指出理想波导中水体中间部分噪声场垂直相关性仅和水听器垂直间距有关, 和绝对位置无关。Plaisant^[103]用射线模型给出了能考虑水体吸收、海水声速剖面变化以及海底反射损失的噪声场空间相关特性以及指向性的解析表达式, 并利用实验结果验证了其在 500 Hz 以上频段的有效性。Kuperman 与 Ingenito^[104]基于快速场模型给出了水平分层介质中噪声场空间特性预报模型(K/I 模型), 该模型只要求海底是水平分层的, 而对海水声速、海底类型等都没有特殊要求。周建波^[105]基于简正波理论统一了近场噪声源和远场噪声源贡献的噪声场垂直相关性预报模型, 简化了噪声模型的同时提升了预报速度。文献^[106](P/K 模型) 利用绝热简正波理论, 将 K/I 模型推广至与距离有关的三维环境中。需要说明的是 P/K 模型仅能处理海底地形缓慢变化的情形, 当海底地形剧变时, 可以采用抛物模型进行声传播过程的计算。Carey等^[107]在 1990 年将抛物方程方法和噪声源模型相结合, 用来预报与距离有关波导环境下噪声场垂直方向空间特性。对于距离有关波导, 在高频段射线预报精度较高, Harrison^[108]基于射线理论, 通过限定到达接收器的声线角度, 追踪连接海面和接收器的声线, 解决了给定海面与海底反射系数以及水体声速与衰减条件下噪声场空间特性预报这一问题。此模型最适合于高频噪声场的预报, 在一定程度上弥补了简正波方法和抛物方程方法的局限。国内外还有诸多学者在噪声场建模预报方面做了很多工作。Zhang等^[109]将 WKBZ 理论应用到噪声场建模中, 基于该理论给出了任意两点间噪声场空间相关系数的解析表达式。文献^[110-111]将体积噪声标量场预报模型以及界面噪声标量场预报模型扩展到矢量场。周建波^[105]对 P/K 模型进行扩展, 使其能够计算噪声场垂直相关性, 并将其推广到矢量场。林建恒^[112]采用近场射线-远场简正波方法对噪声场空间

特性进行预报, 互补了射线方法和简正波方法的优缺点, 在保证精度的同时能够对噪声场空间特性进行快速预报。

海洋环境噪声最主要的应用是指导声呐装备的设计与使用。噪声场强度直接影响到声呐接收端的信噪比, 比如在深海可靠声路径^[113]条件下, 在共轭深度之下噪声显著低于共轭深度之上, 因此将探测系统布放在共轭深度之下能获得较好的探测性能。此外对噪声场空间特性精准建模可以为声呐装备的布放、相关算法的设计以及鲁棒性的评估提供参考。海洋环境噪声亦可用于海洋环境参数以及海洋气象参数反演。在几百赫兹以上频率, 海洋环境噪声与对数风速具有很好的线性关系, 根据该线性关系可以利用海洋环境噪声谱级值来反演海面风速^[114]。噪声在信道传播过程中与海底充分作用, 地声参数的变化会对噪声场部分特性产生影响, 因此可以利用噪声场的这些特性实现地声参数的反演。常见的可用于地声参数反演的量有噪声场垂直相干性^[115]、噪声场的垂直指向性^[116]、噪声场重构的格林函数^[117-118]。利用海洋环境噪声还可以实现无源探测。20 世纪 80 年代, Buckingham^[119]提出了声学照明的想法, 用海洋噪声充当“光源”, 对海洋中的目标进行探测和成像。李小雷等^[120]基于环境噪声互相关和环境噪声自相关理论, 利用海浪噪声进行安静目标探测。日本国防学院的 Mori 等^[121]基于非球面镜头原理研制了环境噪声成像系统即 ANI 系统, 通过环境噪声成像系统成功地探测出多个目标。

3 水下目标检测与识别技术

3.1 水下目标检测技术

水下目标检测是声呐系统的关键功能, 是水声技术(包括检测、定位、识别和跟踪)的首要环节。被动声呐系统通过分析接收信号中是否含有感兴趣目标的辐射声音来判断目标是否存在。这种工作模式克服了主动声呐系统发射高能量信号以及容易暴露自身位置的缺点, 成为岸基警戒声呐最常用的模式。然而, 随着减振降噪技术的不断发展^[122], 以及传统信号检测算法对声传播规律上的忽视, 基于纯数据驱动^[123-125]的被动声呐目标检测能力不断下降。为提升水下目标检测性能, 将水下声传播规律融入算法设计已成为现代水声信号检测算法的重要发展趋势。在此指导思想下发展起来的信号检测算法被统称为环境适应性检测算法。

匹配场处理(matched field processing, MFP)是

最早提出的环境适应性信号检测算法^[126-128], 它将阵列接收数据与声传播模型计算得到的拷贝场向量进行匹配相关, 实现目标的检测和定位。尽管 MFP 结构简单、性能优异, 但其对环境知识的高度依赖很大程度上限制了其在实际中的应用。受潮汐、风浪、温深结构变化等因素影响, 以及底质特性参数固有的难以准确测量和反演精度低的问题, 海洋环境参数的准确获取极为困难, 这都可能使得基于特定环境先验信息的 MFP 性能显著下降^[129]。

为提升不确定环境下的水下目标检测性能, 科研人员从统计信号处理角度出发, 将广义似然比方法和贝叶斯方法等经典的统计检测方法引入到不确定环境下的稳健目标检测问题中^[130]。广义似然比检测器通过对似然比函数中所有未知参数进行搜索, 来解决参数未知导致的检测困难问题, 本质上可视为 MFP 在环境参数未知情况下的扩展。然而, 大量的未知环境参数和声源位置导致了高维搜索问题, 因此有关广义似然比检测器的研究主要集中在数值优化上, 如 Harrison、Gerstoft、Collins 等分别提出使用分布搜索、遗传算法和模拟退火等数值优化方法, 来降低计算的复杂度^[131-133]。

贝叶斯检测器将未知参数视为随机变量, 通过边缘化处理来消除参数未知带来的影响, 可以提供平均意义下的最优检测性能。不确定环境下的贝叶斯检测器最早可以追溯到 Richardson 和 Nolte 提出的最优不确定场处理器, 该处理器对应了声源位置的最大后验估计^[134]。随后, Sha 等对后验概率密度函数中的声源位置进行边缘化处理, 给出了贝叶斯检测器形式, 并首次推导了该检测器在不确定环境下性能的理论表达式, 为其性能预报奠定了良好基础^[135-137]。刘宗伟等提出了一种基于蒙特卡洛优化的广义似然比检测器, 该检测器将似然比函数关于未知参数的最大值用关于未知参数大量随机采样的最大值来代替^[138], 在大幅降低计算量的同时, 获得了与贝叶斯检测器相近的平均检测能力。

除统计检测算法外, 约束化的 MFP 方法通过对相邻位置、环境实现下的波束响应施加约束来提升 MFP 的稳健性。Schmidt 等提出通过约束扫描的相邻位置处波束响应与 Bartlett 处理器相同^[139], 导出了多邻点约束 MFP, 提升了 MFP 对环境参数失配的稳健性。然而, 当环境扰动较大时, 该方法性能并不理想。针对该问题, Krolik 提出根据环境参数的不确定性来设计约束条件, 并以平均增益最大化为准则, 构建了环境扰动约束下的稳健 MFP 方法, 获得了 MFP 稳健检测性能的进一步提升^[140]。Gingras^[141]和 Preisig 等^[142]则从另一最优性

能准则“最差性能最大化”角度建立了极小极大化MFP,但其缺点在于当环境不确定度较大时,权向量难以收敛。由于约束化MFP方法设计的初衷是用于目标定位,因此,单就检测性能而言稍逊于统计检测方法。

统计检测与约束化MFP本质上都属于相关类型的检测器。近年来, Li等深入分析了这类检测器在不同声源位置和海洋环境下的检测性能,发现由于采样声场结构的差异,不同检测场景下检测器性能存在巨大差异,在部分场景中或出现大幅下降^[143-144]。针对该问题,文献^[143-147]中将子空间检测器引入到水下目标检测中,利用垂直阵采样声信号的模态空间特性以及不确定环境中模态空间的近似不变性,提出了匹配模态空间检测器、稳健模态空间检测器和有效模态空间检测器等一系列子空间检测算法,成功避免了相关类型检测器存在的上述性能缺陷,并同时降低了计算复杂度。

王宣等则将子空间检测的思想运用到了浅海水平阵目标检测,构建了水平阵波数—模态信号空间,仅需已知沉积层上层介质声速的变化范围,即可实现不确定环境下水平阵的稳健目标检测^[148]。基于此,文献^[149]进一步从信号空间中剥离出目标方位,在实现信号空间降维、噪声滤除的同时,通过矩阵变换,构造出维数恒定的角度域子空间检测器,进一步获得了稳健检测性能的提升。同时,文献^[150]还分析了不确定环境下干扰对检测性能的影响,给出了干扰条件下水平阵目标检测的“免疫区域”及其理论解,在该区域内检测器性能将保持稳定,海试数据验证了其稳定的检测性能。

与上述检测算法大多需要环境参数取值范围不同,还有一些检测算法利用声传播的几何结构或多途相干信号对信号特性的影响,在获取性能提升的同时,进一步降低了对环境参数的依赖,或成为未来环境适应性检测的一个发展方向。例如, Liu等利用深海影区的多途到达结构特征,结合虚源理论将近海面垂直阵接收的声场信号建模为关于水平面对称的两个平面波之和,并据此构造了仅依赖到达角的信号子空间,提出了弹射角度子空间检测器,该检测器在部分环境中可以在无需环境知识的条件下获得与匹配场检测器相比拟的性能^[151]。而 Ephraty等通过证明多途相干信号的引入会使接收信号的空间平稳性下降,提出了基于接收信号平稳特性的目标检测方法,降低了对环境参数的依赖^[152]。

总体来讲,经过长达四十余年的发展,环境适应性目标检测算法已取得了长足进步,大量算法通过挖掘利用水下声传播的稳定物理特征,在大幅降

低对环境参数依赖的同时,获得了尽可能高的信号匹配增益,为实现深/浅海远程目标检测提供了崭新的方法与思路。然而,与此形成鲜明对比的则是对自适应检测(噪声统计特性由训练数据获得)和噪声协方差矩阵失配情况下稳健目标检测问题的研究显著不足,导致环境适应信号检测算法的应用迟迟难以获得较大进展。

3.2 水下目标识别技术

水下目标的声学识别利用声呐系统接收目标辐射噪声信号,采用专家知识或者人工智能手段从声信号中构建稳健特征,并设计分类器进行目标参数或者类别的判定^[153]。声呐系统最初的识别方法主要通过训练有素的专业人员进行听音辨识,然而其辨识精度高度依赖于人员的经验、健康状态和心理等多方面的因素。其后,为了降低人员的主观因素影响,研究人员利用机器学习理论和方法构建了智能识别模型架构。该架构的主要思想是从数据中设计稳健的鉴别特征,包括物理特性、时频表示、声音生成感知、无监督学习等特征,然后设计分类器,从而实现目标的识别。近年来,深度学习依据其强大的学习能力和优异的自动识别能力,在水下目标识别领域越来越受到研究人员的关注^[154-156]。基于深度学习的识别模型具有较强的稳定性和抗干扰能力,识别精度高,同时可以完成水下目标多特征自动提取融合、多模态数据处理、多识别任务分析,具有广阔的应用前景^[157]。

水声目标智能识别模型的关键在于挖掘高维观测数据中的非线性关系,稳健的特征表示可以降低非线性关系的描述要求,因此特征设计成为了水声识别任务的关键^[153, 158]。声呐采集的信号中具有丰富的目标时频结构信息,因此利用短时傅里叶变换(short-time Fourier transform, STFT)、Wigner-Ville变换、LOFAR分析、希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang transform, HHT)、经验模态分解等技术对原始声压信号进行变换,得到信号强度随时间变化的表征图,可有效提高识别精度^[159]。此外,部分学者从音频信号的生理感知角度出发,设计了梅尔(Mel)频率倒谱图,将时频表示转换到模拟人耳听觉的Mel视角,对噪声有较强的鲁棒性,基于该生理特征的水声目标识别模型取得了稳健的识别结果^[160-161]。同时,许多研究采用滤波器组来设计特征,通过一组带通滤波器将水声信号分离成多个分量,凸显高鉴别性特性,经典的滤波器有小波滤波器组、伽马通(Gammatone)滤波器组、Mel滤波器组^[162]。另一方面,为了获得多个特征的优势,特

征融合策略将多种时频特征融合为一个特征,有效增强特征表示的深度和丰富度,更加全面地表征水下目标声信号所包含的信息。较为常见的特征融合方式是将 Gammatone 频率倒谱系数、对数梅尔频谱图、色度特征、频谱带宽、频谱质心和恒 Q 变换、多尺度谱特征等进行加权组合^[163]。然而,以上特征设计方式的有效性极大地依赖专家知识,限制了特征的泛化性。深度神经网络可直接从数据中学习出高鉴别性的特征,并且采用端到端的方式同时学习特征表示模块和分类模块,联合优化深度网络,达到目前最好的识别精度。

在水声目标识别模型方面,利用深度学习算法构建识别模型是近年来研究的重点。声呐系统采集的信号是一维时间序列,循环神经网络 (recurrent neural network, RNN) 在序列数据处理方面具有显著的优势,通过挖掘时间维度和空间维度的隐状态信息,有效表征水声目标的特性,从而识别目标或者对目标状态进行预测。典型的 RNN 模型由长短期记忆单元 (LSTM) 和门控循环单元组成^[164]。声呐系统中的 LOFAR、BTR 图等均是二维图像,而卷积神经网络 (CNN) 是描述图像结构的主流框架之一,因此许多研究工作采用 CNN 及其改进模块开展了水下目标识别,包括经典 CNN 网络、MobileNet 系列、VGGNet 网络、ResNet 网络、多尺度 ResNet 网络、深度可分离卷积网络、大卷积核网络等^[165-169]。深度网络单元 RNN 或者 CNN 在描述声学数据中的长程依赖关系时性能稍显不足,尤其是对于水下运动目标,其运动特征需要较长的时间序列综合分析才能学习到有效表征。为此,注意力机制被引入深度识别网络模型设计中^[170-171]。基于注意力机制的网络可以捕捉输入序列中多个时间位置的全局长程关系,改善了以前时序模型中的长距离依赖性描述能力不足的问题,同时注意力机制在训练过程中具有并行化计算的优势,可显著加快训练的效率,在 ShipsEar、DeepShip 等水下目标识别数据集上实现了最优的识别精度^[172-174]。

利用深度学习来自动提取特征和识别水下目标逐渐进入水下信息处理领域,并取得了优异的识别精度。然而,深度学习模型依赖大量标注数据,而水下目标辐射噪声数据因具有高价值和封闭性导致获取困难,因此,如何进行少样本数据下的深度模型构建是未来高可靠识别模型设计的难点之一。此外,水下目标的特性数据多样,包含时频特征、运动特征以及声呐图像等多模态表征数据,为此采用图神经网络、元学习、迁移学习、多模态学习、强化学习等先进的学习策略,从不同视角和多维度构

建综合表征识别网络是提升深度学习网络识别能力的关键。深度网络模型提取的特征具有高度的鉴别特性,但是其特征与水下目标特性的物理先验知识相关度较低,使得识别模型的可解释性差、泛化能力不足。因此,如何将水下目标的物理先验知识融入网络设计或者参数学习过程必将成为未来水下目标识别的重点。

4 水下目标方位估计与跟踪技术

4.1 水下目标方位估计技术

水下目标的方位估计是声呐阵列处理的重要环节,可为水下目标的检测、定位、跟踪提供重要的目标信息。随着海洋运输行业的发展,海洋背景噪声级逐年增加,水下目标方位估计技术面临着多目标密集分布、低信噪比强干扰条件下准确测向等现实难题。

水下目标方位估计算法具有悠久的历史,最早可追溯至二战时期的常规波束形成方法^[175]。该算法原理简单,易于实现,然而受到“瑞利准则”的限制,空间方位分辨能力较差^[176]。为提高方位分辨能力,学者们提出了最小方差无失真响应算法^[177],因其具有更窄的主瓣宽度,空间分辨能力有了较大提升。

随着信号处理技术的发展,新的信号处理技术也被应用到方位估计中,如稀疏重构技术和解卷积技术等。稀疏重构技术主要包括波形重构和协方差矩阵重构。重构的手段包括 l_p ($0 < p \leq 1$) 范数优化、最大似然重构以及稀疏贝叶斯学习等。范数优化算法如 M-FOCUSS^[178]和 l_1 -SVD 算法^[179]利用扫描网格点信号波形的 l_p ($0 < p \leq 1$) 范数和信号重构模型误差的 l_2 范数联合最小化来实现信号方位估计,因为当信号稀疏性较高时可以利用 l_p ($0 < p \leq 1$) 范数近似代替 l_0 范数。范数优化算法简单直观,但需要使用优化工具箱求解,同时正则参数较难选取,因而实际使用受到一定程度限制。最大似然重构算法如协方差稀疏迭代估 (sparse iterative covariance-based estimation, SPICE)^[180-182]和稀疏近似最小方差 (sparse asymptotic minimum variance, SAMV)^[183]则是从最大似然估计的角度,利用采样协方差与期望信号模型协方差的关系给出信号参数的估计准则,得到扫描网格点的信号功率谱估计这类算法过程无需提供任何正则参数,具有较高的应用前景。稀疏贝叶斯类算法^[184-185]是基于概率模型的稀疏信号重构算法,其首先对稀疏信号进行先验分布假设,结合噪声的统计特性假设建立阵列接收信号的贝叶斯

概率模型, 然后根据最大似然的思想对稀疏信号的后验估计值进行优化求解。该算法同样不需要正则参数, 且通过波形重构可获得目标方向的接收信号波形, 相当于实现了波束形成的功能, 但波形恢复效果还需进一步研究。

除稀疏重构技术外, 解卷积高分辨测向技术也得到了长足发展。解卷积测向方法最早应用于航空飞行器气动噪声定位^[186-187], 通过将波束扫描的方位谱构建为波束图和目标空间分布的卷积关系, 再通过高斯赛德尔迭代, 求解出噪声源空间分布。Yardibi 等将范数优化的稀疏估计方法应用到解卷积模型中^[188], 并应用于高分辨声学成像。Yang^[189]首次将图像处理领域的 R-L 解卷积算法^[190-191]应用于波达方向 (direction of arrival, DOA) 估计, 提出解卷积波束形成方法, 该方法提供了较窄的主瓣和较低的旁瓣, 已在实际声呐阵列中获得高分辨方位估计效果。进一步, 解卷积方法被推广至二维 (方位角和俯仰角), 并被用于小幅度弯曲水平线阵在浅海多途信道中的目标方位估计^[192], 提升了线阵接近端射方向的测向精度, 同时降低了多途条件下波束分裂问题的影响。

4.2 水下目标被动跟踪技术

水下目标跟踪在海洋资源开发利用以及国家安全防御等方面都具有广泛的应用价值和重要的战略意义^[193-194]。水下目标跟踪分为 DOA 跟踪和纯方位跟踪两种应用场景。

4.2.1 水下目标方位被动跟踪技术

水下目标方位被动跟踪是指基于被动声呐阵列输出或 DOA 估计后的方位角, 对水下目标的方位进行持续跟踪的过程。基于所建立的目标方位变化模型, 以及基于阵列输出的阵列信号模型或经过 DOA 估计的方位量测模型, 通过滤波跟踪技术实现对目标方位的跟踪。一些研究人员将基于贝叶斯滤波的 DOA 跟踪作为 DOA 估计后的后续处理步骤^[195-196], 易于工程实现。然而, 这些方法计算效率较低且忽略了目标运动学信息, 使得 DOA 估计过程中出现的误差会在跟踪过程中累积。为提高数据信息利用率, 一些研究人员使用阵列信号的原始测量进行 DOA 跟踪。文献^[197]提出了一种基于子空间的 DOA 估计和跟踪方法, 推导了 DOA 和互耦矩阵的联合估计算法。文献^[198]在高斯模型假设下, 提出了一种基于最大后验原理的目标 DOA 跟踪方法, 并通过仿真证明了方法的准确性和稳健性。

在水下跟踪的真实场景中, 未知的水下环境会

产生不确定的量测噪声。因此, 在量测噪声不确定的情况下, 实现稳健和准确的水下目标跟踪具有重要意义。为了处理不确定噪声, 研究者们提出了许多基于不同算法的自适应卡尔曼滤波器来估计噪声统计量。目前, 典型的自适应卡尔曼滤波的方法有: Sage-Husa 自适应卡尔曼滤波^[199], 基于新息的自适应卡尔曼滤波^[200], 以及基于变分贝叶斯的自适应卡尔曼滤波等^[201-205]。针对未知水下环境产生的不确定量测噪声, 文献^[206-209]进行了基于自适应滤波跟踪算法的稳健水下目标方位跟踪算法研究。Zhang 等在量测噪声不确定情况下的水下目标方位跟踪场景中, 利用 Sage-Husa 算法在线估计噪声统计量, 并将其代入推导的扩展卡尔曼滤波 (extend Kalman filter, EKF) 目标方位跟踪算法中, 实现了量测噪声不确定情况下的稳健水下目标方位跟踪^[206]。Zhang 等分析了 VB-AEKF 水下目标稳健方位跟踪算法的计算量, 推导了数学上等价的新型迭代过程, 提出了快速 VB-AEKF 水下目标稳健方位跟踪算法^[208]。在上述单目标研究的基础上, 文献^[207, 209]基于 CPHD 滤波推导了多目标方位跟踪方法, 将基于 SH 和 VB 的在线噪声估计算法推广至多目标场景下, 提出了基于 SH-CPHD 滤波和 VB-CPHD 滤波的水下多目标稳健方位跟踪方法。

4.2.2 水下目标纯方位跟踪技术

纯方位跟踪多年来一直受到研究者的广泛关注。纯方位跟踪是指利用多个 (非共点) 声呐阵列同一时刻对目标进行 DOA 估计, 进而对目标的平面位置进行持续跟踪的过程。基于目标的运动学模型, 结合分布式 DOA 量测信息, 通过滤波跟踪技术, 从而实现对目标的纯方位跟踪。Kalman 于 20 世纪 60 年代初提出了卡尔曼滤波 (Kalman filter, KF), 其采用递推估计算法^[210]。扩展卡尔曼滤波 (extend Kalman filter, EKF) 算法^[211-212]适用于非线性高斯系统模型, 但无法适用于非高斯系统。无迹卡尔曼滤波 (unscented Kalman filter, UKF) 算法^[213]用到了非线性方程泰勒展开的二阶项, 但其依旧有对系统分布限制的局限性。此外, 还有容积卡尔曼滤波^[214]可在非线性系统下进行滤波跟踪。随着现代信息技术的发展, 基于蒙特卡洛采样方法的粒子滤波^[215] (particle filter, PF) 已成为处理非线性非高斯系统的有效工具。然而, 上述滤波跟踪方法均针对单目标跟踪场景, 未考虑多目标跟踪过程中的量测—状态关联问题, 因此, 仅能用于水下单目标的跟踪。

水下是天然的多目标环境, 在进行水下目标纯

方位跟踪研究时还需考虑解决多目标数据关联的问题。Singer 等提出的最近邻域标准滤波器 (nearest neighbor standard filter, NNSF)^[216]是解决数据关联的最简单方法, 但性能有限。联合概率数据关联法 (joint probabilistic data association, JPDA)^[217]解决了 PDA 所不能解决的跟踪性能在回波密集时不理想的问题, 但有计算量大的缺点。研究人员对 JPDA 算法进行改进, 分别从不同角度提出了一系列改进算法, 如自适应 JPDA^[218]、简化 JPDA^[219]和准最佳 JPDA 等。近年来, 基于随机有限集的水下多目标纯方位跟踪算法被广泛使用^[220-221], 由于不需要数据关联就能够对多个水下目标进行持续跟踪, 因此受到了学界的广泛关注, 也是目前研究的热点之一。

由于纯方位跟踪至少需要两个观测站才能正常进行, 且现实情况往往需要多个观测站共同协作以达到更高的稳健性和更低的跟踪误差。所以, 多观测站的组合优化问题成了纯方位跟踪研究者的另一个关注热点。John A Fawcett 首次将克拉美罗下界 (Cramer-Rao lower bound, CRLB) 引入无源定位的精度评价体系^[222], 推导了应用于纯方位目标定位和跟踪的 CRLB 公式。Oshman 等首次建立估计误差协方差矩阵和 CRLB、Fisher 信息矩阵 (Fisher information matrix, FIM) 三者之间的关系^[223], 从概率误差椭圆的角度, 对 FIM 的行列式作为判断当前传感器布局定位性能指标的合理性做出了解释。后续的研究在此基础上继续利用并优化基于精度的 CRLB 公式进行观测站的多点优化, 并在此基础上提高精度, 尽可能得到最优的观测站点组合。

5 水下目标定位技术

5.1 基于物理场特征水下目标被动定位技术

被动定位作为声呐系统的一项主要功能, 多年来一直是水声工作者致力解决的问题。传统的被动定位方法有三子阵法^[224]、球面内插法^[225]以及目标运动分析^[226]等。但是这些方法没有充分考虑信道的影响, 应用场景受到很大制约。为了实现复杂海洋信道中水下目标被动远程定位, 一系列基于物理场特性的目标被动定位方法被提出, 主要分为以下几大类: 匹配场定位方法、基于多途结构定位方法、基于简正波模态特征定位方法、基于干涉结构目标定位方法以及基于机器学习目标定位方法。

匹配场处理技术^[128]在处理接收到的水声信号时最大限度地利用了水声信道模型、基阵设计、以及窄带和宽带相关处理技术的综合优势, 因而与传

统的淡化信道特性的信号处理技术相比取得了重大的进展。近年来, 随着研究的深入, 匹配场处理技术逐渐走向实用阶段, 稳健匹配场处理技术成为研究热点。为了提升匹配场定位的稳健性, 一系列宽带 MFP 以及自适应 MFP 方法被提出。宽带 MFP 方法通过对窄带模糊度函数在信号频带内做非相干平均实现主瓣增强, 显著提升定位的稳健性。自适应匹配场处理^[227]往往通过设计具有一定宽容性的处理算法或者将不确定参数作为未知变量与声源位置同时解算, 从而降低模糊度函数的旁瓣, 增强主瓣, 进而实现定位性能的改进。常见的自适应匹配场方法有最小方差估计器^[140]、匹配模处理方法^[228]、不确定声场最佳处理器^[229]、聚焦处理算法^[133]等。匹配场处理在计算拷贝场时, 需要耗费大量时间, 一定程度上制约了其在工程中的应用。时间反转镜^[230]可以利用海洋自身来构造拷贝场, 可以极大降低计算复杂度, 广泛应用于水下通信等领域。

匹配场处理大多是基于声压信号进行二次处理的。声压是一个时变的量, 其幅度和相位是起伏的, 单次或有限多次的测量无法完整反映声场的真实特性。时延结构相对稳定, 因此利用时延特征代替声压特征在某些场景下能获得更佳的性能。基于多途特征的定位方法主要利用声线多途到达角和到达时间信息完成目标位置估计。无论在浅海环境还是深海环境, 到达角度都可以很容易地通过水听器阵列得到, 到达时间差一般通过匹配滤波、信号自相关^[231]、最小二乘或者最大似然估计的迭代方法^[232]、基于子空间分解的超分辨估计方法^[233]、粒子滤波^[234]等方法得到。提取得到到达角和到达时间差后可以与模型计算得到的结果进行匹配, 搜索得到目标位置。浅海环境下多途相对较多, 相应包含的与目标位置相关的信息丰富, 仅利用多途时延差信息就可以实现目标的定位^[235]。深海环境多途相对较少, 大多数情形下多途时延对目标深度信息敏感, 多途到达角对目标距离信息敏感, 往往需要联合多途时延和到达角信息才能对目标距离和深度进行估计^[236]。

低频浅海环境中, 声场可以用有限阶模态表征, 若发射信号为脉冲信号, 可以提取模态的时域波形^[237]、频散以及幅度^[238]等信息, 利用这些信息实现声源的被动定位。此外, 与时间反转镜思想类似, 还可以对不同模态的到达波形, 按照其群速度反传, 在实际声源位置处, 这些模态将同时到达并叠加, 从而实现目标的定位^[239]。深海环境中, 由于简正波阶数较多且难以区分, 因此基于模态特征方法通常情况下对深海不适用。但是当收发间距极

远时,若模态群速度范围已知,则可通过频散时延信息估计声源距离^[240]。

由于多途的存在,信号经过海洋波导传播后相互干涉,某些情况下形成特定的干涉特征,这些干涉特征与目标位置相关,可以用于目标定位。浅海中的干涉特征可以用波导不变量^[241]描述。波导不变量与声源距离有关,被广泛用于浅海目标距离估计^[242]。深海环境下的波导不变量十分复杂,受到声源和接收位置以及信号频率等因素影响^[243],但在特定的传播模式下,深海的干涉特征具有明显的规律,并可以用于目标位置估计。典型干涉特征的有频率-距离干涉特征^[244]、波束干涉特征^[245]、频率-深度干涉特征^[246]等。

2010年机器学习取得了突破性进展,其在语音识别、图像处理等方面取得了极大的进展,2017年机器学习逐渐受到重视并应用于解决水下问题。围绕机器学习在水下被动定位的应用涌现了大量的研究。例如利用前馈神经网络实现水下目标测距^[247],利用卷积神经网络实现目标的检测与测距^[248]、利用深度学习网络实现目标深度和距离的同时估计等^[249]、利用卷积神经网络实现水下多目标方位估计^[250]。从相关文献来看,基于机器学习水下目标被动定位方法具有良好的应用前景和潜力,但是在不确定海洋环境、低信噪比以及多声源情形等场景中,还面临很大的挑战^[251]。

5.2 分布式融合水下目标定位技术

从分布式融合定位的角度来看,水下目标定位技术主要存在以下两种定位机制。第一种机制是将各基阵的原始接收数据传输至处理中心,将各基阵看作一个相关的大阵进行集中式处理,即数据级融合^[252]。这种机制要求各基阵在数据采样时保持时间上的同步,并且接收数据之间的相关性较高。在实际应用时,也可以降低对时间同步性和数据相关性的要求,即各基阵将原始接收数据传输至处理中心,处理中心对各基阵的数据分别进行处理,再将处理结果进行融合。这适用于观测节点信号处理能力较弱的情况。基于原始采样数据,Tollefsen等学者对采用以上两种机制的多水平阵匹配场定位的性能进行了理论分析和试验数据处理分析^[253]。在雷达领域,Weiss在2004年针对信号发射源提出了直接定位方法^[254],在数据域直接构建信号模型和代价函数并进行优化求解,在近十几年来中引起了国内外学者的关注。信息工程大学和国防科技大学等多家单位的学者对直接定位及跟踪方法进行了相关研究^[255-260]。西北工业大学和中国科学院声学研

究所的学者还将直接定位方法应用到了水声目标定位^[261-262]和跟踪^[263]领域,并通过海上试验数据验证了这种方法在实际海洋环境中的有效性。然而,原始数据级的传输需求限制了直接定位方法在水下分布式被动探测系统中的应用推广。

第二种机制就是常用的二步定位方法,属于决策级融合。每个观测节点将估计得到的到达角、到达时间等中间参数(又称量测)传输至处理中心,通过最小二乘法等统计方法得到目标位置的估计结果^[264]。二步定位法数据传输量小,实际应用简便。然而,这类算法通常假设相互独立的量测数量较多且误差较小,从而获得渐近无偏估计结果^[265],因此近些年在理论方法层面的研究多集中在雷达或大规模传感器网络等领域^[266]。与上述领域不同,在水下攻防中可以协同探测的节点数量是有限的,方位估计误差也相对较大。目前水下航行器探测精度技术指标一般设定误差为 5° ,适于布放的中小孔径阵探测精度难以控制在 5° 以下,二者均无法满足上述较为理想的假设条件。文献^[267]针对水下机动目标研究了基于双观测站的纯方位目标被动跟踪算法,当方位量测误差到达 5° 时跟踪效果已经大幅下降。文献^[268]的多站纯方位定位研究中,在 $30\text{ km}\times 20\text{ km}$ 测量海区内采用5阵元星形布站、单站测向误差为 $2^\circ\sim 5^\circ$ 的场景,全区域均方根误差中值达到了1 km精度水平。通过处理4节点的潜标海上实测数据发现,当节点方位估计误差保持在 $5^\circ\sim 8^\circ$ 范围内,随着目标距离增大,定位轨迹会逐渐偏离真实目标轨迹。可见,对于水下定位场景,需重点关注观测节点数量和探测精度均有限的情况下如何有效提升分布式系统目标定位方法的精度。为了在较少数据传输量的条件下提高水下目标定位精度,西北工业大学的学者提出了基于目标二维方位谱的融合定位方法^[269]。该方法利用动态能量检测将传统一维方位量测进行二维表征,从二维波束图中提取出了目标频-空特征谱。该特征谱包含了从接收阵列指向目标所在位置的目标方位信息,提高了分布式系统输入端目标有效信息量,从根本上提高了二步定位精度。

在多目标场景下,每个探测平台会获得多个目标参数,需要将多个目标参数与多个目标进行正确的关联,一旦关联错误会导致定位失败,产生“鬼影”^[270]。直接定位方法无需进行数据关联,但通常难以直接消除因波束关联错误导致的能量相对较强的波束交点;二步定位方法往往需要首先进行数据关联,之后再再将多目标问题转化为单目标问题进行求解。因此,在多目标场景下,现有分布式定位

技术面临数据关联难度大、关联方法效率和精度均较低的难题,需要研究在方位估计误差相对较大,甚至存在漏检^[271]和虚警情况下的数据关联问题,以提高关联效率和正确率。

5.3 主动定位技术

主动声学目标定位技术通过发射声信号并接收目标散射波来确定目标位置,是海洋资源勘探和 underwater 安全防护等任务中的重要环节。传统主动声学定位方法采用阵列信号处理和脉冲压缩技术获取目标的距离和方位,易受到低信噪比、低信混比等难题的制约,定位分辨率和感知距离受限。随着水声换能器研制水平提升和信号处理技术持续发展,涌现出了一系列分辨率高、感知距离远的主动目标定位技术,典型代表包括基于多输入多输出 (multiple-input multiple-output, MIMO) 的目标定位技术和基于前向声散射的目标主动定位技术。

MIMO 声呐通过多个发射和接收阵元的协同工作,利用波形分集和阵列信号处理等技术,构建丰富的传播路径组合,从而有效克服了传统声呐在分辨率和多目标检测、定位能力上的限制^[272-273]。波形分集方面,通过设计具有高自相关电平且低互相关电平的发射信号^[274],可显著提高目标分辨能力。阵列信号处理技术可进一步提高分辨率和稳健性,采用距离维自适应波束形成技术能获得比仅采用脉冲压缩技术更高的距离分辨率^[275],二阶锥规划 MIMO 波束优化^[276]和协方差矩阵重构^[277]等技术可提高在阵列流形失配和数据缺失情况下的稳健性。

研究表明,当目标靠近双/多基地声呐的收发连线时,沿声传播方向的目标散射强度非常大,且不受消声瓦等技术影响^[278-279],目标感知距离远。根据这一原理,许多研究者致力于基于前向散射的探测技术研究。接收机上的前向散射波受到声源强直透波在时、频、空域掩盖,信直比(目标前向散射波与直达波之间的相对强度比值)低于 -20 dB,形成“直视阳光”的感知盲区^[280]。由于直接分离散射声场十分困难,因此常利用目标对信道扰动的空时特征实现基线目标的定位。Song 等^[281]利用时间反转镜构建水声绊网,利用目标穿越引起的系统散焦特性定位目标,但系统成本较高;Folegot 等^[282]利用目标对透射声线的扰动特性,采用波束形成提取起伏声线的加权求和得到模糊图上的目标“亮点”,但仍对接收阵列有较高要求;Roux 等^[283]提出了敏感核定位方法,利用模型构建前向散射场景下的敏感核拷贝场,并与接收数据场进行匹配实现主动定位,不需要波束形成,但易受环境

失配的影响。Lei 等针对目标前向散射声场特征及其探测、定位方法方面开展了深入研究,基于目标引起接收声场强度起伏的典型特征^[284],利用目标穿越多条收发连线的时延差和几何关系^[285],提出了运动目标前向散射定位方法,并在进一步深入研究前向散射声场特征的基础上^[286-292],建立了信道内复杂目标体前向散射特征表征,提出了基于声场时空结构的目标探测方法,建立了多发多收的探测与定位体制。其中针对匹配场易受环境失配影响的问题,进一步提出了基于迁移学习的前向散射定位方法^[293],利用模型生成数据训练卷积神经网络,再采用少量接收数据对训练模型做迁移优化,提高模型的适配性,该方法对目标散射函数、海底底质等参数不甚敏感,提高了基于前向散射的目标定位稳健性。

6 水声学研究展望

随着声隐身以及无人平台等技术的快速发展,现有水声探测能力逐渐下降,难以满足对水下目标远程广域探测的需求,这对水声技术提出了全新的挑战。为了实现大范围、高精度、远距离的水下目标探测需求,水声探测频段正逐渐从传统的中高频向低频乃至甚低频、极低频发展,信号处理手段从纯信号场或者纯物理场处理向与物理场适配的信号处理以及基于物理场特征的人工智能信号处理手段发展,探测模式从传统的固定平台、单节点、主/被动探测模式向固定平台与移动平台结合、分布式集群、主被动联合探测模式发展^[294-296]。

在声呐装备方面,未来发展的趋势有:(1) 广域异质多传感器联合探测声呐。单一声呐覆盖范围小、探测效率低,难以满足现代水下监测的需求。通过在海底、水体、海面甚至空中布设分布式传感器,形成分布式网络化探测系统,结合多源信息融合技术,实现对大范围区域内目标的预警与探测,可显著增强对水下信息的获取与感知能力。(2) 无人化、智能化、集群化探测装备。随着水下无人平台的发展,通过在无人平台上搭载声呐可实现对水下环境的自主检测,在整个回路中都无须人为介入,可极大提升安全性和效率。不同平台可根据各自的优势和任务分工,对水下目标进行全方位、多层次的监测,提升对水下环境的立体化感知能力。

在水下物理场研究方面,未来发展的趋势有:(1) 多物理场耦合声场精细化预报。海洋是一个复杂过程,声传播受海洋环境、海洋活动影响。随着计算机技术以及测量技术的发展,对于声传播与海

洋多物理场精细化耦合的研究成为可能。(2) 精细化与实用化三维声场预报。实际海洋环境在距离、深度和方位三个维度都是变化的,虽然现在已经开发了部分三维声场模型,但是其计算复杂度高或预报精度不高,随着计算机性能以及数值计算方法的改进,使得精细化三维声场快速预报成为可能。(3) 多传感器协同分布式长周期噪声测量。融合多类型传感器同步获取噪声场、海洋声学参数以及海洋精细化动力过程,构建分布式观测网络,实现大面积、高分辨、长周期海洋环境噪声观测,支撑声呐装备的使用。(4) 基于大数据与机器学习辅助的声场传播及噪声场预报。机器学习技术在数据分析和预测方面具有强大的能力,利用多年观测的大量数据,通过机器学习获得源-信道以及声场之间的非线性映射关系,有望实现复杂不确定海洋环境中信号场与噪声场的快速预报。

在水下目标探测方面,对于被动探测,未来的发展趋势有:(1) 与浅海/深海水声物理场适配的水下目标探测技术。现有部分探测技术对水声信道的考虑并不充分,例如方位估计等方法大多还是采用平面波假设,噪声也大多考虑的是高斯背景噪声,导致实际探测性能不佳。将信号处理方法与水声物理场充分适配,势必将大大提高被动探测的性能。(2) 分布式探测技术。随着潜艇减振降噪的发展,单节点探测能力急剧下降,分布式节点之间可以相互协作,获取更全面、更准确的目标信息,从而实现大范围区域的水下目标探测。(3) 高自主和智能化的探测技术。未来水下战场必然更加复杂化和多元化,这就要求声呐具备更高的自主性和智能化,需要根据战场动态趋势自主分析和处理数据,实时识别目标特征,根据环境调整探测策略,实现目标的自主智能探测与跟踪。对于主动声呐,未来发展趋势主要有:(1) 低频大功率探测技术。随着探测距离要求不断提高,高频声波传播距离有限,迫使探测频段向低频段转移,现有低频声源功率有限,一定程度上制约了低频主动探测距离,且易受干扰场影响。需要研究大功率发射技术以及低频干扰场特性,并发展与低频干扰场适配的低频主动探测技术,显著提升主动探测距离。(2) 新体制主动探测技术。新体制探测技术可在较小的代价下获得优于传统探测技术的探测优势,可通过 MIMO 声呐、前向散射声呐和深海可靠声路径探测模式等关键技术,实现水下声隐身目标远程定位,确保系统在复杂环境下的稳定性与可靠性。(3) 智能化探测技术。主动探测受使用环境影响较大,需要根据信道、目标特性、声呐装备类型调整优化声呐参数。

研究基于信道自适应、深度学习、大数据分析等技术的智能化主动探测技术,将环境参数、目标特性参数以及声呐装备参数纳入到探测算法框架中,显著提升主动探测在不同环境下、不同海域中对不同类型目标的探测能力。

7 结语

水声学理论、技术和工程研究对增强海防实力、维护国家海洋安全至关重要。历经几十年的发展,我国水声理论、技术以及水声装备都取得了长足的进步。本文简要对部分声呐装备、水下声传播、海洋环境噪声、水下目标检测与识别、水下目标方位估计与跟踪以及水下目标定位等技术的研究现状进行了介绍,给出了部分技术未来的发展趋势。由于篇幅与作者认识水平的限制,还有很多内容没有包括在本文中,比如海洋混响、水声通信、水声定位与导航等,文中挂一漏万,请读者指正。国家对海洋事业的重视程度达到了前所未有的高度,希望广大水声学领域科研工作者携手把握这一历史性机遇,砥砺前行共同推动我国水声技术的跨越式发展。

参 考 文 献

- [1] 汪德昭,尚尔昌. 水声学[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2013.
- [2] 钱纪英. 水中声速的第一次测定[J]. 物理教师, 1987, 8(4): 35. QIAN Jiying. The first measurement of the speed of sound in water[J]. Physics Teacher, 1987, 8(4): 35.
- [3] 吴锐锋, 王一博, 胡童颖, 等. 水声换能器研究现状与发展[J]. 传感器技术与应用, 2023, 11(2): 194-201. WU Ruifeng, WANG Yibo, HU Tongying, et al. Progress and development of underwater acoustic transducer[J]. Journal of Sensor Technology and Application, 2023, 11(2): 194-201.
- [4] 杜召平, 陈刚, 王达. 国外声呐技术发展综述[J]. 舰船科学技术, 2019, 41(1): 145-151. DU Zhaoping, CHEN Gang, WANG Da. Foreign sonar technology development research summary[J]. Ship Science and Technology, 2019, 41(1): 145-151.
- [5] 唐晓伟. 杨士莪与中国首个水声专业的创建[EB/OL]. [2016-03-18] [2025-06-22]. <https://news.hrbeu.edu.cn/info/1133/8986.htm>.
- [6] 唐晓伟. 杨士莪传: 倾听大海的声音[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [7] DAHL P H, ZHANG R, MILLER J H, et al. Overview of results from the Asian Seas international acoustics experiment in the East China Sea[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2004, 29(4): 920-928.
- [8] LAMB K, WARN-VARNAS A. Two-dimensional numerical simulations of shoaling internal solitary waves at the ASIAEX site in the South China Sea[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2015, 120(1): 410-425.
- [9] 丁然, 唐洁, 赵珍阳, 等. MEMS 水听器国内研究现状与未来技术发展[J]. 传感器与微系统, 2022, 41(8): 157-160. DING Ran, TANG Jie, ZHAO Zhenyang, et al. Domestic

- research status and future technology development of MEMS hydrophone[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2022, **41**(8): 157-160.
- [10] 盛洁. 分布式多矢量水听器的联合控制技术[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2022.
SHENG Jie. Research on joint control and measurement technology of distributed multi-vector hydrophone[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2022.
- [11] 杨德森, 刘庆, 时洁, 等. 噪声与单频声波非线性相互作用规律[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, **38**(9): 1345-1350.
YANG Desen, LIU Qing, SHI Jie, et al. Nonlinear interaction between noise and a single-frequency sound wave[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2017, **38**(9): 1345-1350.
- [12] 李桂香. 海洋声学遥感技术[J]. 海洋科学, 1985, **9**(2): 61-62.
LI Guixiang. Marine acoustic remote sensing technology[J]. *Marine Sciences*, 1985, **9**(2): 61-62.
- [13] 张寅权, 张爽, 孙春健, 等. 水下目标监视系统发展综述[J]. 海洋信息, 2019, **34**(1): 11-18.
ZHANG Yinquan, ZHANG Shuang, SUN Chunjian, et al. Development of underwater target surveillance system[J]. *Marine Information*, 2019, **34**(1): 11-18.
- [14] RICE J A. Seaweb acoustic com/nav networks[R]. Arlington: DARPA ATO Disruption Tolerant Networking Program, 2005.
- [15] STEWART M S, PAVLOS J. A means to networked persistent undersea surveillance[C]//Submarine technology symposium. Tacoma: University of Washington, 2006: 2-38.
- [16] 刘洪生, 姜朝宇. 美俄潜艇声纳装备的发展[J]. 舰船电子工程, 2015, **35**(5): 7-10.
LIU Hongsheng, JIANG Zhaoyu. Sonar equipment development of USA and Russia submarine[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2015, **35**(5): 7-10.
- [17] 刘伟, 陈琬晴, 陈开. 国外舷侧声纳发展浅析[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2023(4): 1-4.
LIU Wei, CHEN Wanqing, CHEN Kai. Analysis of the development of flank array sonar[J]. *optical fiber & electric cable and their applications*, 2023(4): 1-4.
- [18] 陶秀云. 国外舷侧阵声纳的发展[J]. 声学电子工程, 1993(4): 31-36.
TAO Xiuyun. Development of lateral array sonar abroad[J]. *Acoustics and Electrical Engineering*, 1993(4): 31-36.
- [19] 解宝兴, 郝拥军, 程玲. 水下远程探测的研究和发展方向[J]. 舰船科学技术, 2008, **30**(3): 17-21.
XIE Baoxing, HAO Yongjun, CHENG Ling. Underwater remote detection research and development[J]. *Ship Science and Technology*, 2008, **30**(3): 17-21.
- [20] 罗浩, 陶伟, 严科伟, 等. 国外典型潜艇作战系统及其关键技术分析[J]. 指挥控制与仿真, 2018, **40**(6): 136-140.
LUO Hao, TAO Wei, YAN Kewei, et al. Analysis for typical foreign submarine combat system and key technology[J]. *Command Control & Simulation*, 2018, **40**(6): 136-140.
- [21] 董波, 张郑海. 美国潜艇拖曳阵声纳技术特点及发展趋势[J]. 舰船科学技术, 2016, **38**(17): 150-153.
DONG Bo, ZHANG Zhenghai. Current status and development trend of submarine towed linear array sonar of US navy[J]. *Ship Science and Technology*, 2016, **38**(17): 150-153.
- [22] 陈卓. 国外潜艇拖曳阵声纳装备及技术的最新发展综述[J]. 声学电子工程, 2020(3): 47-52.
CHEN Zhuo. A review of the latest developments in sonar equipment and technology for foreign submarine towed arrays[J]. *Acoustics and Electronics Engineering*, 2020(3): 47-52.
- [23] ANONYMOUS. AN/AQS-13 series[EB/OL]. [2025-06-24]. <https://military-history.fandom.com/wiki/AQS-13>.
- [24] DARDINE A. AN/AQS-22 ALFS(Airborne low frequency sonar)[J]. An equipment forecast, 2024:72-82.
- [25] 金立峰, 邓歌明. 美国海军航空吊放声呐技术与发展趋势[J]. 电子世界, 2014(21): 77-78.
JIN Lifeng, DENG Geming. US navy dipping sonar technology and its development trend[J]. *Electronics World*, 2014(21): 77-78.
- [26] 尹晓东, 刘清宇, 徐江. 国外航空声学探潜装备研究进展[J]. 舰船科学技术, 2008, **30**(6): 172-175.
YIN Xiaodong, LIU Qingyu, XU Jiang. Development of foreign airborne acoustic submarine-detectingequipment[J]. *Ship Science and Technology*, 2008, **30**(6): 172-175.
- [27] FUNNELL C. AN/SSQ-53F(international), airborne ASW-sonobuoys[J]. *Jane's Underwater Warfare Systems*, 2009-2010: 264-265.
- [28] FUNNELL C. AN/SSQ-77C(international), airborne ASW-sonobuoys[J]. *Jane's Underwater Warfare Systems*, 2009-2010: 266.
- [29] FUNNELL C. AN/SSQ-62 series DICASS (international), airborne ASW-sonobuoys[J]. *Jane's Underwater Warfare Systems*, 2009-2010: 265-266.
- [30] FUNNELL C. AN/SSQ-101 ADAR (united states), Airborne ASW-sonobuoys[J]. *Jane's Underwater Warfare Systems*, 2009-2010: 271.
- [31] FRIEDMAN N. The naval institute guide to world naval weapon systems[M]. Annapolis: Naval Institute Press, 2006: 701-704.
- [32] 许滔. 航空探潜声纳的现状和发展[J]. 声学与电子工程, 2017(2): 53-56.
XU Tao. Present situation and development of airborne submarine sonar[J]. *Acoustics and Electronics Engineering*, 2017(2): 53-56.
- [33] 黄颖淞, 葛辉良, 王付印, 等. 蛙人探测声纳系统发展综述[J]. 水下无人系统学报, 2020, **28**(1): 1-9.
HUANG Yingsong, GE Huiliang, WANG Fuyin, et al. Review on the development of diver detection sonar system[J]. *Journal of Unmanned Undersea Systems*, 2020, **28**(1): 1-9.
- [34] 孙玉臣, 陈维义, 王平波, 等. 蛙人水下声信号特征研究综述[J]. 声学技术, 2022, **41**(4): 479-488.
SUN Yuchen, CHEN Weiyi, WANG Pingbo, et al. Review of research on the characteristics of underwater acoustic signal of frogman[J]. *Technical Acoustics*, 2022, **41**(4): 479-488.
- [35] U. S. Department of defense. network centric warfare: report to congress[R]. Washington, D. C. , 2001-07.
- [36] LOVIK A, BAKKEN A R, DYBEDAL J, et al. Underwater protection system[C]//OCEANS 2007. Vancouver, BC. IEEE, 2007.
- [37] CRAWFORD A M, CROWE D V. Observations from demonstrations of several commercial diver detection sonar systems [C]//OCEANS 2007. Vancouver, BC. IEEE, 2007: 1-3.
- [38] 李颂文. 参量阵及其在水声工程中的应用进展[J]. 声学技术, 2011, **30**(1): 9-16.
LI Songwen. Parametric array and its application in underwater acousticengineering: an overview[J]. *Technical Acoustics*, 2011, **30**(1): 9-16.
- [39] 许钢灿, 倪东波, 郭建. 反蛙人声纳系统发展综述[J]. 中国安全防范技术与应用, 2018(5): 13-18.
XU Gangcan, NI Dongbo, GUO Jian. Comprehensive development of anti-frogman sonar systems[J]. *China Security Protection Technology and Application*, 2018(5): 13-18.
- [40] KONGSBERG. New advances in sonar diver detection systems[R]. Kongsberg Gruppen, 2009.
- [41] 张颖, 孙继昌, 张颖颖, 等. TRONKA 声纳系统在蛙人探测中的应用研究[J]. 海洋技术, 2008, **27**(2): 92-95.

- SUN Ying, SUN Jichang, ZHANG Yingying, et al. Research on the application of TRONKA sonar system in frogman detection[J]. *Journal of Ocean Technology*, 2008, **27**(2): 92-95.
- [42] 张颖, 孙继昌, 郭威. 蛙人探测声纳系统在奥帆赛中的应用[J]. *气象水文海洋仪器*, 2008, **25**(3): 47-50.
- ZHANG Ying, SUN Jichang, GUO Wei. Application of research of TRONKA sonar system in frogmen detection[J]. *Meteorological*, 2008, **25**(3): 47-50.
- [43] ROWLEY J. Autonomous unmanned surface vehicles (USV): a paradigm shift for harbor security and underwater bathymetric imaging[C]//OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston. Charleston, SC. IEEE, 2018: 1-6.
- [44] DANIEL T, MANLEY J, TRENAMAN N. The wave glider: enabling a new approach to persistent ocean observation and research[J]. *Ocean Dynamics*, 2011, **61**(10): 1509-1520.
- [45] LI Weichao. China's large unmanned combat vessel "Orca" attracts wide attention[EB/OL]. (2023-11-18)[2025-06-22]. http://eng.mod.gov.cn/xb/News_213114/Features/16352979.html.
- [46] AZIS F A, ARAS M S M, RASHID M Z A, et al. Problem identification for underwater remotely operated vehicle (ROV): a case study[J]. *Procedia Engineering*, 2012, **41**: 554-560.
- [47] STOKEY R P, ROUP A, VON ALT C, et al. Development of the REMUS 600 autonomous underwater vehicle[C]//Proceedings of OCEANS 2005 MTS/IEEE. Washington, DC, USA. IEEE, 2005: 1301-1304.
- [48] 中国科学院沈阳自动化研究所海洋机器人前沿技术中心. “海翼”水下滑翔机首次完成印度洋集群观测应用[J]. *海洋测绘*, 2020, **40**(3): 54.
- [49] BACHMAYER R, LEONARD N E, GRAVER J, et al. Underwater gliders: recent developments and future applications[C]//Proceedings of the 2004 International Symposium on Underwater Technology (IEEE Cat. No. 04EX869). Taipei, China. IEEE, 2004: 195-200.
- [50] WEBB D C, SIMONETTI P J, JONES C P. SLOCUM: an underwater glider propelled by environmental energy[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2001, **26**(4): 447-452.
- [51] 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.
- WANG Haibin, WANG Jun, TAI Yupeng, et al. Development and the state of the art in underwater acoustic communication[J]. *Journal of Signal Processing*, 2019, **35**(9): 1441-1449.
- [52] AGUIARY A, ALMEIDAY J, BAYATY M, et al. Cooperative Autonomous Marine Vehicle motion control in the scope of the EU GREX Project: Theory and Practice[C]//OCEANS 2009-EUROPE. Bremen, Germany. IEEE, 2009: 1-10.
- [53] 陈瑜. 我国实现大规模多类型无人无缆潜水器组网作业[N]. *科技日报*, 2021-09-24.
- [54] 宋保维, 潘光, 赵立川, 等. 自主水下航行器发展趋势及关键技术[J]. *中国舰船研究*, 2022, **17**(5): 27-44.
- SONG Baowei, PAN Guang, ZHANG Lichuan, et al. Development trend and key technologies of autonomous underwater vehicles[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2022, **17**(5): 27-44.
- [55] JENSEN F B, KUPERMAN W A, PORTER M B, et al. *Computational ocean acoustics*[M]. New York: Springer Science & Business Media, 2011.
- [56] 张仁和, 李风华. 浅海声传播的波束位移射线简正波理论[J]. *中国科学(A辑)*, 1999, **29**(3): 241-251.
- ZHANG Renhe, LI Fenghua. Normal mode theory of beam displacement ray for shallow water sound propagation[J]. *Science in China, Ser. A*, 1999, **29**(3): 241-251.
- [57] EVANS R B. A coupled mode solution for acoustic propagation in a waveguide with stepwise depth variations of a penetrable bottom[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1983, **74**(1): 188-195.
- [58] KNOBLES D P, STOTTS S A, KOCH R A. Low frequency coupled mode sound propagation over a continental shelf[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2003, **113**(2): 781-787.
- [59] 秦继兴, 杨春梅, 骆文于. 水平变化波导中一种声场计算方法的数值实现[J]. *应用声学*, 2012, **31**(2): 145-151.
- QIN Jixing, YANG Chunmei, LUO Wenyu. Numerical implementation of a coupled-mode method in range-dependent waveguides[J]. *Applied Acoustics*, 2012, **31**(2): 145-151.
- [60] THOMSON D J, WOOD D H. A postprocessing method for removing phase errors in the parabolic equation[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1987, **82**(1): 224-232.
- [61] HARDIN R H. Application of the split-step Fourier method to the numerical solution of nonlinear and variable coefficient wave equations[J]. *SIAM Review*, 1973: 15-423.
- [62] COLLINS M D. The rotated parabolic equation and sloping ocean bottoms[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1990, **87**(3): 1035-1037.
- [63] COLLINS M D, WESTWOOD E K. A higher-order energy-conserving parabolic equation for range-dependent ocean depth, sound speed, and density[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1991, **89**(3): 1068-1075.
- [64] SMITH K B, TAPPERT F. UMPE: the university of Miami parabolic equation model. version 1.0[R]. San Diego, CA: Marine Physical Laboratory, 1993.
- [65] LEE D, BOTSEAS G. IFD: an implicit finite-difference computer model for solving the parabolic equation[R]. New London, CT: Naval Underwater Systems Center, 1982.
- [66] COLLINS M D. FEPE users guide[R]. Stennis Space Center: Naval Ocean Research and Development Activity, 1988.
- [67] COLLINS M D. Users guide for RAM version 1.0 and 1.0p[R]. Washington, DC: Naval Research Laboratory, 1995.
- [68] LI F H, ZHANG R H. Frequency dependence of longitudinal correlation length in the Yellow Sea[J]. *Chinese Physics Letters*, 2008, **25**(7): 2539-2541.
- [69] ZHANG R H, SU X X, LI F H. Improvement of low-frequency acoustic spatial correlation by frequency-shift compensation[J]. *Chinese Physics Letters*, 2006, **23**(7): 1838-1841.
- [70] 任云, 吴立新, 李整林, 等. 南中国海存在孤立子内波条件下的声场时间相关半径[J]. *声学学报*, 2010, **35**(5): 515-522.
- REN Yun, WU Lixin, LI Zhenglin, et al. The signal temporal correlation length with the existence of solitons in the South China Sea[J]. *Acta Acustica*, 2010, **35**(5): 515-522.
- [71] JI G H, LI Z L, DAI Q X. Coherence-time of matched-field processing in shallow water in the presence of linear internal waves[J]. *Chinese Physics Letters*, 2009, **26**(9): 094301.
- [72] LI J, LI Z L, REN Y, et al. Horizontal-longitudinal correlations of acoustic field in deep water[J]. *Chinese Physics Letters*, 2015, **32**(6): 064303.
- [73] 李整林, 董凡辰, 胡治国, 等. 深海大深度声场垂直相关特性[J]. *物理学报*, 2019, **68**(13): 205-223.
- LI Zhenglin, DONG Fanchen, HU Zhiguo, et al. Vertical correlation characteristics of deep-sea and deep-sea sound fields at large depths[J]. *Acta Phys. Sin.*, 2019, **68**(13): 205-223.
- [74] XIAO Y, LI Z L, LI J, et al. Influence of warm eddies on sound propagation in the Gulf of Mexico[J]. *Chinese Physics B*, 2019, **28**(5): 054301.
- [75] 王鲁军. 过渡海域声场空间相关特性研究[D]. 北京: 中国科学院声学研究所, 2009.
- WANG Lujun. Research on the spatial correlation character-

- istics of sound field in transitional sea areas[D]. Beijing: Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, 2009.
- [76] XIE L, SUN C, LIU X H, et al. Investigation and quantitative analysis on the acoustic energy tobogganing in the upslope waveguide of continental slope area[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, **66**(19): 194301.
- [77] XIE Lei, SUN Chao, LIU Xionghou, et al. Effect of the fluctuant acoustic channel on array gain in the downslope waveguide[J]. *Chinese Physics B*, 2018, **27**(5): 262-269.
- [78] DUDA T F, LYNCH J F, IRISH J D, et al. Internal tide and nonlinear internal wave behavior at the continental slope in the northern South China Sea[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2004, **29**(4): 1105-1130.
- [79] HUANG X, CHEN Z, ZHAO W, et al. An extreme internal solitary wave event observed in the northern South China Sea[J]. *Sci Rep*, 2016, **6**: 30041.
- [80] HUANG X D, ZHANG Z W, ZHANG X J, et al. Impacts of a mesoscale eddy pair on internal solitary waves in the northern South China Sea revealed by mooring array observations[J]. *Journal of Physical Oceanography*, **47**(7): 1539-1554.
- [81] ZHANG X J, HUANG X D, ZHANG Z W, et al. Polarity variations of internal solitary waves over the continental shelf of the northern South China Sea: impacts of seasonal stratification, mesoscale eddies, and internal tides[J]. *Journal of Physical Oceanography*, **48**(6): 1349-1365.
- [82] LI Q R, SUN C, XIE L. Modal intensity fluctuation during dynamic propagation of internal solitary waves in shallow water[J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, **71**(2): 024302.
- [83] LI Q R, SUN C, XIE L, et al. Reconstructions of time-evolving sound-speed fields perturbed by deformed and dispersive internal solitary waves in shallow water[J]. *Chinese Physics B*, 2023, **32**(12): 124701.
- [84] LI Q R, SUN C, XIE L, et al. Modulation effects of internal-wave evolution on acoustic modal intensity fluctuations in a shallow-water waveguide[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, **11**(9): 1686.
- [85] GAO F, XU F H, LI Z L, et al. Mode coupling and intensity fluctuation of sound propagation over continental slope in presence of internal waves[J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, **71**(20): 204301.
- [86] WANG Z, HU T, WANG W B, et al. Characteristics of coastal internal waves and acoustic-energy fluctuations in the South China Sea in summer[J]. *Acta Acustica*, 2024, **49**(1): 67-77.
- [87] KNUDSEN V O, ALFORD R S, EMLING J W. Underwater ambient noise[J]. *Journal of Marine Research*, 1948, **7**(3): 410-429.
- [88] WENZ G M. Acoustic ambient noise in the ocean: spectra and sources[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1962, **34**(12): 1936-1956.
- [89] 盛振邦, 刘应中. 船舶原理-下册[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2004.
- [90] PIGGOTT C L. Ambient sea noise at low frequencies in shallow water of the Scotian shelf[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1964, **36**(11): 2152-2163.
- [91] CROUCH W W, BURT P J. The logarithmic dependence of surface-generated ambient-sea-noise spectrum level on wind speed[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1972, **51**(3B): 1066-1072.
- [92] 郭新毅, 李凡, 铁广朋, 等. 海洋环境噪声研究发展概述及应用前景[J]. *物理*, 2014, **43**(11): 723-731.
- GUO Xinyi, LI Fan, TIE Guangpeng, et al. Overview of ocean ambient noise and application prospects[J]. *Physics*, 2014, **43**(11): 723-731.
- [93] WAGE K E, FARROKHROOZ M, DZIECIUCH M A, et al. Analysis of the vertical structure of deep ocean noise using measurements from the SPICEX and PhilSea experiments [C]//Proceedings of Meetings on Acoustics. Montreal, Canada. ASA, 2013.
- [94] WORCESTER P F, DZIECIUCH M A, MERCER J A, et al. The North Pacific Acoustic Laboratory deep-water acoustic propagation experiments in the Philippine Sea[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2013, **134**(4): 3359-3375.
- [95] 徐东, 李风华, 郭永刚, 等. 海面波浪谱对深海低频环境噪声的影响[J]. *声学学报*, 2018, **43**(2): 137-144.
- XU Dong, LI Fenghua, GUO Yonggang, et al. The effects of the ocean surface wave spectrum on low frequency ambient noise in deep water[J]. *Acta Acustica*, 2018, **43**(2): 137-144.
- [96] JIANG D G, LI Z L, QIN J X, et al. Characterization and modeling of wind-dominated ambient noise in South China Sea[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2017, **60**(12): 124321.
- [97] SHI Y, YANG Y, TIAN J, et al. Long-term ambient noise statistics in the northeast South China Sea[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2019, **145**(6): EL501.
- [98] 柳云峰, 李整林, 秦继兴, 等. 东印度洋海域风和降雨对环境噪声的影响[J]. *物理学报*, 2022, **71**(20): 152-163.
- LIU Yunfeng, LI Zhenglin, QIN Jixing, et al. Effects of wind and rainfall on ambient noise in the East Indian Ocean[J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, **71**(20): 152-163.
- [99] 谭靖鹭, 曹宇, 黄海宁, 等. 北极海域海洋环境噪声建模与特性分析[J]. *应用声学*, 2020, **39**(5): 690-697.
- TAN Jingqian, CAO Yu, HUANG Haining, et al. Modeling and characterization of marine ambient noise in the Arctic[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2020, **39**(5): 690-697.
- [100] CRON B F, SHERMAN C H. Spatial-correlation functions for various noise models[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1962, **34**(11): 1732-1736.
- [101] CHAPMAN D. Surface-generated noise in shallow water: a model[C]//Underwater Communication and Position Fixing 1987. Norwich, UK. Institute of Acoustics, 2024.
- [102] BUCKINGHAM M J. A theoretical model of ambient noise in a low-loss, shallow water channel[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1980, **67**(4): 1186-1192.
- [103] PLAISANT A. Spatial coherence of surface generated noise[C]//Proceedings of the Undersea Defence Technology Conference, 1992: 515.
- [104] KUPERMAN W A, INGENITO F. Spatial correlation of surface generated noise in a stratified ocean[J]. *Acoustical Society of America Journal*, 1980, **67**(6): 1988-1996.
- [105] 周建波. 海洋环境噪声场垂直方向空间特性建模及应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
- ZHOU Jianbo. Modeling and application of vertical spatial characteristics of marine environmental noise field[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018.
- [106] PERKINS J S, KUPERMAN W A, INGENITO F, et al. Modeling ambient noise in three-dimensional ocean environments[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1993, **93**(2): 739-752.
- [107] CAREY W M, EVANS R B, DAVIS J A, et al. Deep-ocean vertical noise directionality[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1990, **15**(4): 324-334.
- [108] HARRISON C H. Formulas for ambient noise level and coherence[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1996, **99**(4): 2055-2066.
- [109] ZHANG R H, YI H G. A theory on spatial correlation and vertical directivity of surface-generated ambient noise in the sea[J]. *Chinese Journal of Acoustics*, 1992(1): 31-40.
- [110] 尚华, 黄益旺, 张靖. 基于矢量水听器的海洋环境噪声场空间

- 相关[J]. *舰船科学技术*, 2009, **31**(10): 43-46.
- SHANG Hua, HUANG Yiwang, ZHANG Jing. Spatial correlation of ambient noise based on acoustic vector hydrophone[J]. *Ship Science and Technology*, 2009, **31**(10): 43-46.
- [111] 黄益旺, 李婷, 于盛齐, 等. 水平分层介质表面噪声矢量场空间相关特性[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2010, **31**(7): 975-981.
- HUANG Yiwang, LI Ting, YU Shengqi, et al. Spatial correlation of surface noise received by acoustic vector sensors in a horizontally stratified medium[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2010, **31**(7): 975-981.
- [112] 林建恒. 风关海洋环境噪声理论模型[D]. 北京: 中国科学院声学研究所, 2002.
- LIN Jianheng. Theoretical model of marine environmental noise in fengguan[D]. Beijing: Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, 2009.
- [113] 沈同圣, 郇永帅, 罗再磊. 可靠声路径传播特性及目标定位方法研究现状[J]. *应用声学*, 2022, **41**(4): 503-511.
- SHEN Tongsheng, GAO Yongshuai, LUO Zaili. Research status of sound propagation characteristics in reliable acoustic path and target location method[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2022, **41**(4): 503-511.
- [114] 王超, 笪良龙, 韩梅, 等. 南海夏季海洋环境噪声与海面风速相关特性分析[J]. *应用声学*, 2015, **34**(3): 243-248.
- WANG Chao, DA Lianglong, HAN Mei, et al. Correlation property analyses of ambient noise with surface wind speed in summer of the South China Sea[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2015, **34**(3): 243-248.
- [115] BUCKINGHAM M J, JONES S A S. A new shallow-ocean technique for determining the critical angle of the seabed from the vertical directionality of the ambient noise in the water column[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1987, **81**(4): 938-946.
- [116] EVERS L G, WAPENAAR K, HEANEY K D, et al. Deep ocean sound speed characteristics passively derived from the ambient acoustic noise fieldFree[J]. *Geophysical Journal International*, 2017, **210**(1): 27-33.
- [117] YARDIM C, GERSTOFT P, HODGKISS W S, et al. Compressive geoacoustic inversion using ambient noise[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2014, **135**(3): 1245-1255.
- [118] 黎洁. 格林函数中的虚拟到达在反演中的应用[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2017.
- LI Jie. The application of virtual arrival in Green's functions in inversion[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2017.
- [119] BUCKINGHAM M J. Personal communication to Dr. David Bradley[Z]. Washington DC: Naval Research Laboratory, 1987.
- [120] 李小雷, 高大治, 黎洁, 等. 利用环境噪声进行安静目标探测[J]. *应用声学*, 2018, **37**(5): 636-644.
- LI Xiaolei, GAO Dazhi, LI Jie, et al. Silence target detection by ambient noise[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2018, **37**(5): 636-644.
- [121] MORI K, KAWAHARA H, OGASAWARA H, et al. Expression with red-green-blue additive color mixing for frequency-dependent targets in the third sea trial of ambient noise imaging with acoustic lens in 2016[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2018, **57**(7S1): 07LG05.
- [122] TYLER G D. The emergence of low-frequency active acoustics as a critical antisubmarine warfare technology[J]. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 1992, **13**(1): 145-159.
- [123] 陈敬军, 陆佺人. 被动声呐线谱检测技术综述[J]. *声学技术*, 2004, **23**(1): 57-60.
- CHEN Jingjun, LU Jiren. A review of techniques for detection of line-spectrum in passive sonar[J]. *Technical Acoustics*, 2004, **23**(1): 57-60.
- [124] 李启虎, 李敏, 杨秀庭. 水下目标辐射噪声中单频信号分量的检测: 理论分析[J]. *声学学报*, 2008, **33**(3): 193-196.
- LI Qihu, LI Min, YANG Xiuting. The detection of single frequency component of underwater radiated noise of target: theoretical analysis[J]. *Acta Acustica*, 2008, **33**(3): 193-196.
- [125] 李启虎, 李敏, 杨秀庭. 水下目标辐射噪声中单频信号分量的检测: 数值仿真[J]. *声学学报*, 2008, **33**(4): 289-293.
- LI Qihu, LI Min, YANG Xiuting. The detection of single frequency component of underwater radiated noise of target: digital simulation[J]. *Acta Acustica*, 2008, **33**(4): 289-293.
- [126] HINICH M J. Maximum-likelihood signal processing for a vertical array[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1973, **54**(2): 499-503.
- [127] BUCKER H P. Use of calculated sound fields and matched-field detection to locate sound sources in shallow water[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1976, **59**(2): 368-373.
- [128] BAGGEROER A B, KUPERMAN W A, MIKHALEVSKY P N. An overview of matched field methods in ocean acoustics[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1984, **9**(4): 401-424.
- [129] 杨坤德. 水声信号的匹配场处理技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2003.
- YANG Kunde. A study on matched field processing of underwater acoustic signals[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2003.
- [130] KAY S. Fundamentals of statistical signal processing, Volume II: Detection theory[M]. New Jersey: Prentice Hall, 1993.
- [131] HARRISON B F, VACCARO R J, TUFTS D W. Robust source localization in an acoustic waveguide[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1996, **100**(1): 384-391.
- [132] GERSTOFT P. Global inversion by genetic algorithms for both source position and environmental parameters[J]. *Journal of Computational Acoustics*, 1994, **2**(3): 251-266.
- [133] COLLINS M D, KUPERMAN W A. Focalization: environmental focusing and source localization[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1991, **90**(3): 1410-1422.
- [134] RICHARDSON A M, NOLTE L W. A posteriori probability source localization in an uncertain sound speed, deep ocean environment[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1991, **89**(5): 2280-2284.
- [135] SHA L, NOLTE L W. Effects of environmental uncertainties on sonar detection performance prediction[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2005, **117**(4 pt 1): 1942-1953.
- [136] SHA L, NOLTE L W. Bayesian sonar detection performance prediction with source position uncertainty using SWellEx-96 vertical array data[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2006, **31**(2): 345-355.
- [137] SHA L, NOLTE L W. Bayesian sonar detection performance prediction in the presence of interference in uncertain environments[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2005, **117**(4 pt 1): 1954-1964.
- [138] 刘宗伟, 孙超, 吕连港. 不确定海洋环境中基于蒙特卡罗优化的稳健检测方法[J]. *声学学报*, 2015, **40**(5): 665-674.
- LIU Zongwei, SUN Chao, LYU Liangang. A robust signal detection method based on Monte Carlo optimization in uncertain ocean environment[J]. *Acta Acustica*, 2015, **40**(5): 665-674.
- [139] SCHMIDT H, BAGGEROER A B, KUPERMAN W A, et al. Environmentally tolerant beamforming for high-resolution matched field processing: Deterministic mismatch[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1990, **88**(4): 1851-1862.
- [140] KROLIK J L. Matched-field minimum variance beamforming in a random ocean channel[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1990, **88**(4): 1851-1862.

- cal Society of America, 1992, **92**(3): 1408-1419.
- [141] GINGRAS D F, GERR N L. Minimax robust matched-field processing[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1993, **93**(5): 2798-2808.
- [142] PREISIG J C. A minmax approach to adaptive matched field processing in an uncertain propagation environment[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, **42**(6): 1305-1316.
- [143] LI M Y, SUN C, WILLETT P. Performance of mode space detector in uncertain shallow water and its robust realization[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, **43**(1): 131-144.
- [144] LI M Y, SUN C, ZHAO H F, et al. Robust mode space detection in uncertain shallow water with incomplete mode sampling[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, **47**(1): 201-212.
- [145] LI M Y, SUN C, WILLETT P. Approximate containment relation between mode spaces in uncertain shallow water[J]. *Applied Acoustics*, 2021, **171**: 107545.
- [146] 李明杨, 孙超, 刘雄厚, 等. 浅海环境中的匹配模态空间检测器[J]. *声学学报*, 2018, **43**(4): 504-515.
LI Mingyang, SUN Chao, LIU Xionghou, et al. Matched mode space detector in shallow-water environments[J]. *Acta Acustica*, 2018, **43**(4): 504-515.
- [147] 李明杨, 孙超, 邵炫. 模态信息非完备采样对水下声源检测的影响及改进方法[J]. *物理学报*, 2014, **63**(20): 211-224.
LI Mingyang, SUN Chao, SHAO Xuan. Effects of incomplete modal sampling on the underwater target detection and performance improvement method[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, **63**(20): 211-224.
- [148] 王宣, 孙超, 向龙凤, 等. 不确定浅海环境中基于水平阵稳健子空间估计的宽容检测方法[J]. *西北工业大学学报*, 2020, **38**(6): 1171-1178.
WANG Xuan, SUN Chao, XIANG Longfeng, et al. A tolerant detection method based on horizontal matrix robust subspace estimation in uncertain shallow sea environments[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2020, **38**(6): 1171-1178.
- [149] 王宣, 孙超, 李明杨, 等. 不确定浅海环境中水平阵角度域子空间检测[J]. *物理学报*, 2022, **71**(8): 190-202.
WANG Xuan, SUN Chao, LI Mingyang, et al. Detection by angle-domain subspace with horizontal array in uncertain shallow-water environment[J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, **71**(8): 190-202.
- [150] WANG X, SUN C, LI M Y. Generalized likelihood ratio detector with horizontal linear array in presence of interference in uncertain shallow-water environment[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2023, **153**(5): 2909.
- [151] LIU J P, SUN C, LI M Y, et al. Bottom-bounce ray angle subspace detector in the shadow zone of deep water[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2024, **18**(8): 1318-1332.
- [152] EPHRATY A, TABRIKIAN J, MESSER H. Underwater source detection using a spatial stationarity test[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2001, **109**(3): 1053-1063.
- [153] 方世良, 杜桂平, 罗昕炜, 等. 水声目标特征分析与识别技术[J]. *中国科学院院刊*, 2019, **34**(3): 297-305.
FANG Shiliang, DU Shuanping, LUO Xinwei, et al. Development of underwater acoustic target feature analysis and recognition technology[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, **34**(3): 297-305.
- [154] SMITH T A, RIGBY J. Underwater radiated noise from marine vessels: a review of noise reduction methods and technology[J]. *Ocean Engineering*, 2022, **266**: 112863.
- [155] NIU H Q, LI X L, ZHANG Y L, et al. Advances and applications of machine learning in underwater acoustics[J]. *Intelligent Marine Technology and Systems*, 2023, **1**(1): 8.
- [156] LUO X W, CHEN L, ZHOU H L, et al. A survey of underwater acoustic target recognition methods based on machine learning[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, **11**(2): 384.
- [157] 程玉胜, 邱家兴, 刘振, 等. 水声被动目标识别技术挑战与展望[J]. *应用声学*, 2019, **38**(4): 653-659.
CHENG Yusheng, QIU Jiaxing, LIU Zhen, et al. Challenges and prospects of underwater acoustic passive target recognition technology[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2019, **38**(4): 653-659.
- [158] 孟华, 刘杨, 李杰, 等. 机器学习方法在水声信号处理中的应用进展[J/OL]. *应用声学*, 1-13[2024-11-20].
MENG Hua, LIU Yang, LI Jie, et al. Advances in machine learning methods in underwater acoustic signal processing [J/OL]. *Journal of Applied Acoustics*, 1-13[2024-11-20].
- [159] PAN A D, CHEN X, LI W. Recognition of underwater acoustic target using sub-pretrained convolutional neural networks[M]//*Proceedings of the 8th Conference on Sound and Music Technology*. Singapore: Springer Singapore, 2021: 113-123.
- [160] LIU F, SHEN T S, LUO Z L, et al. Underwater target recognition using convolutional recurrent neural networks with 3-D Mel-spectrogram and data augmentation[J]. *Applied Acoustics*, 2021, **178**: 107989.
- [161] YAO Q H, WANG Y, YANG Y X. Underwater acoustic target recognition based on data augmentation and residual CNN[J]. *Electronics*, 2023, **12**(5): 1206.
- [162] WU J, LI P, WANG Y X, et al. VFR: the underwater acoustic target recognition using cross-domain pre-training with FBank fusion features[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, **11**(2): 263.
- [163] HUMMEL H I, VAN DER MEI R, BHULAI S. A survey on machine learning in ship radiated noise[J]. *Ocean Engineering*, 2024, **298**: 117252.
- [164] YANG H H, ZHENG K F, LI J H. Open set recognition of underwater acoustic targets based on GRU-CAE collaborative deep learning network[J]. *Applied Acoustics*, 2022, **193**: 108774.
- [165] MISHACHANDAR B, VAIRAMUTHU S. Diverse ocean noise classification using deep learning[J]. *Applied Acoustics*, 2021, **181**: 108141.
- [166] DOMINGOS L C F, SANTOS P E, SKELTON P S M, et al. An investigation of preprocessing filters and deep learning methods for vessel type classification with underwater acoustic data[J]. *IEEE Access*, 2022, **10**: 117582-117596.
- [167] 杨宏晖, 申昇, 姚晓辉, 等. 用于水声目标特征学习与识别的混合正则化深度置信网络[J]. *西北工业大学学报*, 2017, **35**(2): 220-225.
YANG Honghui, SHEN Sheng, YAO Xiaohui, et al. Underwater acoustic target feature learning and recognition using hybrid regularization deep belief network[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2017, **35**(2): 220-225.
- [168] YANG H, SHEN S, YAO X, et al. Competitive deep-belief networks for underwater acoustic target recognition[J]. *Sensors (Basel)*, 2018, **18**(4): E952.
- [169] XU K, XU Q, YOU K, et al. Self-supervised learning-based underwater acoustical signal classification via mask modeling[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2023, **154**(1): 5-15.
- [170] YOU K, XU K L, FENG M, et al. Underwater acoustic classification using masked modeling-based swin transformer[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2022, **152**(4_Supplement): A296.
- [171] LI P, WU J, WANG Y X, et al. STM: spectrogram transformer model for underwater acoustic target recognition[J].

- Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, **10**(10): 1428.
- [172] 徐齐胜, 许可乐, 甯勇, 等. 基于被动声呐音频信号的水中目标识别综述[J]. *自动化学报*, 2024, **50**(4): 649-673.
XU QiSheng, XU Kele, DOU Yong, et al. A review of underwater target recognition based on passive sonar acoustic signals[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2024, **50**(4): 649-673.
- [173] 徐及, 黄兆琼, 李琛, 等. 深度学习在水下目标被动识别中的应用进展[J]. *信号处理*, 2019, **35**(9): 1460-1475.
XU Ji, HUANG Zhaoqiong, LI Chen, et al. Advances in underwater target passive recognition using deep learning[J]. *Journal of Signal Processing*, 2019, **35**(9): 1460-1475.
- [174] 张奇, 笕良龙, 王超, 等. 基于深度学习的水声被动目标识别研究综述[J]. *电子与信息学报*, 2023, **45**(11): 4190-4202.
ZHANG Qi, DA Lianglong, WANG Chao, et al. An overview on underwater acoustic passive target recognition-based on deep learning[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2023, **45**(11): 4190-4202.
- [175] KIM H, VIBERG M. Two decades of array signal parameter estimation[J]. *IEEE signal magazine*, 1996, **13**(4): 67-94.
- [176] 宫先仪. 关于波束形成[J]. *声学及电子工程*, 1988(1): 1-7.
GONG Xianyi. About beamforming[J]. *Acoustics and Electrical Engineering*, 1988(1): 1-7.
- [177] CAPON J. High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis[J]. *Proceedings of the IEEE*, **57**(8): 1408-1418.
- [178] COTTER S F, RAO B D, ENGAN K, et al. Sparse solutions to linear inverse problems with multiple measurement vectors[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2005, **53**(7): 2477-2488.
- [179] MALIOUTOV D, CETIN M, WILLSKY A S. A sparse signal reconstruction perspective for source localization with sensor arrays[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, **53**(8): 3010-3022.
- [180] STOICA P, BABU P, LI J. SPICE: a sparse covariance-based estimation method for array processing[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011, **59**(2): 629-638.
- [181] STOICA P, BABU P, LI J. New method of sparse parameter estimation in separable models and its use for spectral analysis of irregularly sampled data[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011, **59**(1): 35-47.
- [182] YANG Z, XIE L H, ZHANG C S. A discretization-free sparse and parametric approach for linear array signal processing[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, **62**(19): 4959-4973.
- [183] ABEIDA H, ZHANG Q L, LI J, et al. Iterative sparse asymptotic minimum variance based approaches for array processing[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, **61**(4): 933-944.
- [184] TIPPING M E. Sparse Bayesian learning and the relevance vector machine[J]. *Journal of Machine Learning Research*, 2001, **1**(3): 211-244.
- [185] WIPF D P, RAO B D. Sparse Bayesian learning for basis selection[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2004, **52**(8): 2153-2164.
- [186] BROOKS T F, HUMPHREYS W M. A deconvolution approach for the mapping of acoustic sources (DAMAS) determined from phased microphone arrays[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, **294**(4-5): 856-879.
- [187] BROOKS T, HUMPHREYS W. Extension of DAMAS phased array processing for spatial coherence determination (DAMAS-C)[C]//12th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (27th AIAA Aeroacoustics Conference). Cambridge, Massachusetts. Reston, Virginia: AIAA, 2006: 2654.
- [188] YARDIBI T, LI J, STOICA P, et al. Sparsity constrained deconvolution approaches for acoustic source mapping[C]//14th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (29th AIAA Aeroacoustics Conference). Vancouver, British Columbia, Canada. Reston, Virginia: AIAA, 2008: 2956.
- [189] YANG T C. Deconvolved conventional beamforming for a horizontal line array[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2018, **43**(1): 160-172.
- [190] RICHARDSON W H. Bayesian-based iterative method of image restoration[J]. *Journal of the Optical Society of America* (1917-1983), 1972, **62**(1): 55.
- [191] LUCY L B. An iterative technique for the rectification of observed distributions[J]. *The Astronomical Journal*, 1974, **79**: 745.
- [192] 马诗卉. 浅海多径效应下基于二维解卷积的目标方位估计方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
MA Shihui. Research on target azimuth estimation method based on two-dimensional deconvolution under multipath effect in shallow water[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [193] 杨益新. 声呐波束形成与波束域高分辨方位估计技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2002.
YANG Yixin. Research on sonar beamforming and high resolution DOA estimation in beam domain[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2002.
- [194] 侯翔昊, 乔钢, 周建波, 等. 基于矢量对偶四元数的水下机动目标自适应跟踪[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2020, **41**(10): 1444-1449, 1463.
HOU Xianghao, QIAO Gang, ZHOU Jianbo, et al. Adaptive tracking algorithm for underwater maneuvering target based on vector dual quaternions[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2020, **41**(10): 1444-1449, 1463.
- [195] YAN H Q, FAN H H. Signal-selective DOA tracking for wideband cyclostationary sources[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, **55**(5): 2007-2015.
- [196] CHEN W, ZHANG W, WU Y Q, et al. Joint algorithm based on interference suppression and Kalman filter for bearing-only weak target robust tracking[J]. *IEEE Access*, 2019, **7**: 131653-131662.
- [197] LIAO B, ZHANG Z G, CHAN S C. DOA estimation and tracking of ULAs with mutual coupling[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, **48**(1): 891-905.
- [198] GAO X Z, LI X, JASON F, et al. A sequential Bayesian algorithm for DOA tracking in time-varying environments[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2015, **24**(1): 140-145.
- [199] GAO X D, YOU D Y, KATAYAMA S. Seam tracking monitoring based on adaptive Kalman filter embedded Elman neural network during high-power fiber laser welding[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **59**(11): 4315-4325.
- [200] MOHAMED A H, SCHWARZ K P. Adaptive Kalman filtering for INS/GPS[J]. *Journal of Geodesy*, 1999, **73**(4): 193-203.
- [201] SARKKA S, NUMMENMAA A. Recursive noise adaptive Kalman filtering by variational Bayesian approximations[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **54**(3): 596-600.
- [202] SARKKA S, HARTIKAINEN J. Variational Bayesian adaptation of noise covariance in nonlinear Kalman filtering [EB/OL]. 2013: arXiv: 1302.0681. <https://arxiv.org/abs/1302.0681?context=stat>.
- [203] HUANG D L, LEUNG H, EL-SHEIMY N. Expectation maximization based GPS/INS integration for land-vehicle navigation[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, **43**(3): 1168-1177.
- [204] BAVDEKAR V A, DESHPANDE A P, PATWARDHAN S C. Identification of process and measurement noise covariance for state and parameter estimation using extended Kalman filter[J]. *Journal of Process Control*, 2011, **21**(4): 585-

- 601.
- [205] ARDESHIRI T, OZKAN E, ORGUNER U, et al. Approximate Bayesian smoothing with unknown process and measurement noise covariances[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2022, **22**(12): 2450-2454.
- [206] ZHANG B, HOU X, YANG Y. Robust underwater direction-of-arrival tracking with uncertain environmental disturbances using a uniform circular hydrophone array[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2022, **151**(6): 4101.
- [207] 张博轩, 杨益新, 侯翔昊. 量测噪声不确定情况下的水下多目标稳健方位跟踪[J]. *声学学报*, 2023, **48**(4): 605-617.
ZHANG Boxuan, YANG Yixin, HOU Xianghao. Robust underwater multi-target direction-of-arrival tracking with uncertain measurement noise[J]. *Acta Acustica*, 2023, **48**(4): 605-617.
- [208] ZHANG B X, HOU X H, YANG Y X, et al. A fast variational Bayesian adaptive extended Kalman filter for robust underwater direction-of-arrival tracking[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, **23**(13): 14709-14720.
- [209] ZHANG B X, HOU X H, YANG Y X, et al. Variational Bayesian cardinalized probability hypothesis density filter for robust underwater multi-target direction-of-arrival tracking with uncertain measurement noise[J]. *Frontiers in Physics*, 2023, **11**: 1142400.
- [210] KALMAN R E. A new approach to linear filtering and prediction problems[J]. *Journal of Basic Engineering*, 1960, **82**(1): 35-45.
- [211] AIDALA V, HAMMEL S. Utilization of modified polar coordinates for bearings-only tracking[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1983, **28**(3): 283-294.
- [212] SONG T, SPEYER J. A stochastic analysis of a modified gain extended Kalman filter with applications to estimation with bearings only measurements[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1985, **30**(10): 940-949.
- [213] JULIER S, UHLMANN J, DURRANT-WHYTE H F. A new method for the nonlinear transformation of means and covariances in filters and estimators[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1995, **40**(3): 477-482.
- [214] 张浩为, 谢军伟, 葛佳昂, 等. 自适应 CS 模型的强跟踪平方根容积卡尔曼滤波算法[J]. *系统工程与电子技术*, 2019, **41**(6): 1186-1194.
ZHANG Haowei, XIE Junwei, GE Jia'ang, et al. Strong tracking square-root cubature Kalman filter over adaptive current statistical model[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2019, **41**(6): 1186-1194.
- [215] PHAM N T, LEMAN K, WONG M, et al. Combining JPDA and particle filter for visual tracking[C]//2010 IEEE International Conference on Multimedia and Expo. Singapore, Singapore. IEEE, 2010: 1044-1049.
- [216] SINGER R, SEA R. New results in optimizing surveillance system tracking and data correlation performance in dense multitarget environments[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1973, **18**(6): 571-582.
- [217] FORTMANN T, BAR-SHALOM Y, SCHEFFE M. Sonar tracking of multiple targets using joint probabilistic data association[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1983, **8**(3): 173-184.
- [218] 李首庆, 徐洋. 基于自适应聚概率矩阵的 JPDA 算法研究[J]. *西南交通大学学报*, 2017, **52**(2): 340-347.
LI Shouqing, XU Yang. Joint probabilistic data association algorithm based on adaptive cluster probability matrix[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2017, **52**(2): 340-347.
- [219] 秦卫华, 胡飞, 秦超英. 一种简化的联合概率数据关联算法[J]. *西北工业大学学报*, 2005, **23**(2): 276-279.
QIN Weihua, HU Fei, QIN Chaoying. Improving JPDA(joint probabilistic data association) algorithms[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2005, **23**(2): 276-279.
- [220] 周天, 张丽红, 杜伟东, 等. 声呐图像多目标跟踪高斯滤波算法[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2020, **41**(5): 691-697.
ZHOU Tian, ZHANG Lihong, DU Weidong, et al. Improved GM-PHD filtering algorithm for multi-target tracking in sonar images[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2020, **41**(5): 691-697.
- [221] 马雪飞, 李胤, 吴英姿, 等. 基于高斯混合概率假设滤波的水下目标跟踪算法[J]. *应用声学*, 2023, **42**(2): 249-259.
MA Xuefei, LI Yin, WU Yingzi, et al. Underwater target tracking algorithm based on Gaussian mixture probability hypothesis density filter[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2023, **42**(2): 249-259.
- [222] SONG T, KIM D. Highest probability data association for active sonar tracking[C]//2006 9th International Conference on Information Fusion. Florence. IEEE, 2006.
- [223] OSHMAN Y, DAVIDSON P. Optimization of observer trajectories for bearings-only target localization[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2003, **35**(3): 892-902.
- [224] 李启虎. 声呐信号处理引论[M]. 北京: 海洋出版社, 1985: 371-377.
- [225] SMITH J, ABEL J. Closed-form least-squares source location estimation from range-difference measurements[J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1987, **35**(12): 1661-1669.
- [226] NARDONE S, LINDGREN A, GONG K. Fundamental properties and performance of conventional bearings-only target motion analysis[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1984, **29**(9): 775-787.
- [227] BAGGEROER A B, KUPERMAN W A, SCHMIDT H. Matched field processing: Source localization in correlated noise as an optimum parameter estimation problem[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1988, **83**(2): 571-587.
- [228] WILSON G R, KOCH R A, VIDMAR P J. Matched mode localization[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1988, **84**(1): 310-320.
- [229] SHOREY J A, NOLTE L W, KROLIK J L. Computationally efficient Monte Carlo estimation algorithms for matched field processing in uncertain ocean environments[J]. *Journal of Computational Acoustics*, 1994, **2**(3): 285-314.
- [230] ZHANG T W, YANG K D, MA Y L. Matched-field localization using a virtual time-reversal processing method in shallow water[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, **56**(8): 743-748.
- [231] KNAPP C, CARTER G. The generalized correlation method for estimation of time delay[J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1976, **24**(4): 320-327.
- [232] XIE S D. Time-delay estimation in the multi-path channel based on maximum likelihood criterion[J]. *KSII Transactions on Internet and Information Systems*, 2012, **6**(4): 1063-1075.
- [233] LI H W, JIANG C Q, CHEN S, et al. Joint delay and angle estimation algorithm with low-complexity in multipath environments[C]//2018 IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC). Chongqing, China. IEEE, 2018: 2505-2509.
- [234] LEHMANN E A. Particle filtering approach to adaptive time-delay estimation[C]//2006 IEEE International Conference on Acoustics Speed and Signal Processing Proceedings. Toulouse, France. IEEE, 2006: 1129-1132.
- [235] BILAZARIAN P, PISTACCHIO D J. The use of multipath time-delay estimation for source localization with passive broadband sonar systems[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1989, **85**(S1): S71.

- [236] 段睿. 深海环境水声传播及声源定位方法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2016.
DUAN Rui. Study on underwater acoustic propagation and sound source localization in deep sea environment[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2016.
- [237] YANG T C. Effectiveness of mode filtering: a comparison of matched-field and matched-mode processing[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1990, **87**(5): 2072-2084.
- [238] BONNEL J, CHAPMAN N R. Geoacoustic inversion in a dispersive waveguide using warping operators[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2011, **130**(2): EL101-EL107.
- [239] LIN Y T, NEWHALL A E, LYNCH J F. Low-frequency broadband sound source localization using an adaptive normal mode back-propagation approach in a shallow-water ocean[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2012, **131**(2): 1798-1813.
- [240] UDOVYDCHENKOV I A, BROWN M G, DUDA T F, et al. Weakly dispersive modal pulse propagation in the North Pacific Ocean[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2013, **134**(4): 3386-3394.
- [241] ROUSEFF D, ZURK L M. Striation-based beamforming for estimating the waveguide invariant with passive sonar[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2011, **130**(2): 76-81.
- [242] 余赞, 惠俊英, 殷敬伟, 等. 基于波导不变量的目标运动参数估计及被动测距[J]. *声学学报*, 2011, **36**(3): 258-264.
YU Yun, HUI Junying, YIN Jingwei, et al. Moving target parameter estimation and passive ranging based on waveguide invariant theory[J]. *Acta Acustica*, 2011, **36**(3): 258-264.
- [243] BONNEL J, NICOLAS B, MARS J, et al. Source localisation in deep water using waveguide invariant distribution[C]// *Proceedings of the 10th European Conference on Underwater Acoustics*. 2010: 1-5.
- [244] 翁晋宝, 杨燕明. 深海海面目标单水听器被动测距方法与验证[J]. *海洋学报*, 2017, **39**(1): 36-45.
WENG Jinbao, YANG Yanming. A passive sea-surface source ranging method by single hydrophone in deep sea[J]. *Haiyang Xuebao*, 2017, **39**(1): 36-45.
- [245] MCCARGAR R K, ZURK L M. Depth-based suppression of moving interference with vertical line arrays in the deep ocean[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2012, **132**(3): 2081.
- [246] LIU W, YANG Y, LÜ L, et al. Source localization by matching sound intensity with a vertical array in the deep ocean[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2019, **146**(6): EL477.
- [247] NIU H, REEVES E, GERSTOFT P. Source localization in an ocean waveguide using supervised machine learning[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2017, **142**(3): 1176.
- [248] FERGUSON E L, RAMAKRISHNAN R, WILLIAMS S B, et al. Convolutional neural networks for passive monitoring of a shallow water environment using a single sensor[C]// *2017 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. New Orleans, LA. IEEE, 2017: 2657-2661.
- [249] LIU W, YANG Y, XU M, et al. Source localization in the deep ocean using a convolutional neural network[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2020, **147**(4): EL314.
- [250] 夏文博, 范威, 高莉. 基于卷积神经网络的水下多目标方位估计方法[J]. *声学技术*, 2023, **42**(3): 290-296.
XIA Wenbo, FAN Wei, GAO Li. Underwater multi-target azimuth estimation method based on convolutional neural network[J]. *Technical Acoustics*, 2023, **42**(3): 290-296.
- [251] 牛海强, 李整林, 王海斌, 等. 水声被动定位中的机器学习方法研究进展综述[J]. *信号处理*, 2019, **35**(9): 1450-1459.
NIU Haiqiang, LI Zhenglin, WANG Haibin, et al. Overview of machine learning methods in underwater source localization[J]. *Journal of Signal Processing*, 2019, **35**(9): 1450-1459.
- [252] WAX M, KAILATH T. Optimum localization of multiple sources by passive arrays[J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1983, **31**(5): 1210-1217.
- [253] TOLLEFSEN D, DOSSO S E. Source localization with multiple hydrophone arrays via matched-field processing[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2017, **42**(3): 654-662.
- [254] WEISS A J. Direct position determination of narrowband radio frequency transmitters[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2004, **11**(5): 513-516.
- [255] 王云龙, 吴瑛. 联合时延与多普勒频率的直接定位改进算法[J]. *西安交通大学学报*, 2015, **49**(4): 123-129.
WANG Yunlong, WU Ying. An improved direct position determination algorithm with combined time delay and Doppler[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2015, **49**(4): 123-129.
- [256] YIN J X, WANG D, WU Y, et al. Direct localization of multiple stationary narrowband sources based on angle and Doppler[J]. *IEEE Communications Letters*, **21**(12): 2630-2633.
- [257] CHEN M Q, MAO X P, ZHAO C L. Direct localization of emitters based on expectation-maximization technique[C]// *2018 IEEE Radar Conference (RadarConf18)*. Oklahoma City, OK. IEEE, 2018: 754-758.
- [258] HAO K G, WAN Q. High resolution direct detection and position determination of sources with intermittent emission[J]. *IEEE Access*, 2019, **7**: 43428-43437.
- [259] MA F H, GUO F C, YANG L. Direct position determination of moving sources based on delay and Doppler[J]. *IEEE Sensors Journal*, **20**(14): 7859-7869.
- [260] 逯志宇, 巴斌, 任衍青, 等. 基于进化粒子滤波的数据域直接跟踪方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2018, **40**(5): 968-975.
LU Zhiyu, BA Bin, REN Yanqing, et al. Direct trajectory determination algorithm based on evolutionary particle filter[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2018, **40**(5): 968-975.
- [261] WANG L, YANG Y, LIU X. A cluster-based direct source localization approach for large-aperture horizontal line arrays[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2020, **147**(1): EL50.
- [262] WANG L, YANG Y X, LIU X H. A direct position determination approach for underwater acoustic sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **69**(11): 13033-13044.
- [263] 王冠群, 张春华, 尹力, 等. 联合多站阵元域数据的水下目标检测与跟踪[J]. *声学学报*, 2019, **44**(4): 491-502.
WANG Guanqun, ZHANG Chunhua, YIN Li, et al. Underwater target detection and tracking based on array element domain data from multi-arrays[J]. *Acta Acustica*, 2019, **44**(4): 491-502.
- [264] LINGREN A, GONG K. Position and velocity estimation via bearing observations[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, **AES-14**(4): 564-577.
- [265] NGUYEN N H, DOGANCAI K. Closed-form algebraic solutions for angle-of-arrival source localization with Bayesian priors[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, **18**(8): 3827-3842.
- [266] KAZEMI S A R, AMIRI R, BEHNIA F. Efficient closed-form solution for 3-D hybrid localization in multistatic radars[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic*

- Systems, **57**(6): 3886-3895.
- [267] COMPAGNONI M, BESTAGINI P, ANTONACCI F, et al. Localization of acoustic sources through the fitting of propagation cones using multiple independent arrays[J]. IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, **20**(7): 1964-1975.
- [268] 张旭, 李智生. 大范围海域多站纯方位定位精度分布特性估计[J]. 信号处理, 2020, **36**(12): 2052-2060.
ZHANG Xu, LI Zhisheng. Distributed accuracy estimation for bearings-only localization based on multi-stations in the large-scale sea area[J]. Journal of Signal Processing, 2020, **36**(12): 2052-2060.
- [269] WANG L, FANG S L, YANG Y X, et al. A feature-level fusion-based target localization method with the Hough transform for spatial feature extraction[J]. Remote Sensing, 2023, **15**(8): 2121.
- [270] REED J D, DA SILVA C R C M, BUEHRER R M. Multiple-source localization using line-of-bearing measurements: Approaches to the data association problem[C]//MILCOM 2008-2008 IEEE Military Communications Conference. San Diego, CA, USA. IEEE, 2008: 1-7.
- [271] ALEXANDRIDIS A, BORBOUDAKIS G, MOUCHTARIS A. Addressing the data-association problem for multiple sound source localization using DOA estimates[C]//2015 23rd European Signal Processing Conference (EUSIPCO). Nice. IEEE, 2015.
- [272] 孙超, 刘雄厚. MIMO 声纳: 概念与技术特点探讨[J]. 声学技术, 2012, **31**(2): 117-124.
SUN Chao, LIU Xionghou. MIMO sonar: concept and technical characteristic discuss[J]. Technical Acoustics, 2012, **31**(2): 117-124.
- [273] 刘雄厚, 孙超, 杨益新, 等. 单基地多输入多输出声纳的方位分辨力[J]. 声学学报, 2016, **41**(2): 163-173.
LIU Xionghou, SUN Chao, YANG Yixin, et al. On angle resolution of mono-static multiple-input multiple-output sonar[J]. Acta Acustica, 2016, **41**(2): 163-173.
- [274] 刘伟烨, 杨益新, 刘雄厚. 基于相关干扰抑制的 MIMO 声纳波形设计[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2023, **44**(9): 1510-1518.
LIU Weiye, YANG Yixin, LIU Xionghou. MIMO sonar waveform design based on correlation interference suppression[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2023, **44**(9): 1510-1518.
- [275] 刘雄厚, 樊嘉豪, 魏焘, 等. 有源声纳距离维波束形成方法[J]. 声学学报, 2019, **44**(4): 715-725.
LIU Xionghou, FAN Jiahao, WEI Tao, et al. Active sonar range-dimensional beamforming[J]. Acta Acustica, 2019, **44**(4): 715-725.
- [276] 黄聪, 孙大军, 张殿伦, 等. 双基地多输入多输出虚拟阵列的稳健低旁瓣波束优化技术[J]. 物理学报, 2014, **63**(18): 473-481.
HUANG Cong, SUN Dajun, ZHANG Dianlun, et al. Optimizations for robust low sidelobe beamforming of bistatic multiple-input multiple-output virtual array[J]. Acta Physica Sinica, 2014, **63**(18): 473-481.
- [277] 刘建涛, 任岁玲, 姜永兴, 等. 基于数据协方差矩阵重构的 MIMO 声纳 DOA 估计[J]. 应用声学, 2017, **36**(2): 162-167.
LIU Jiantao, REN Suiling, JIANG Yongxing, et al. DOA estimation in MIMO sonar based on sample covariance matrix reconstruction[J]. Journal of Applied Acoustics, 2017, **36**(2): 162-167.
- [278] NALUAI N K, LAUCHLE G C, GABRIELSON T B, et al. Bi-static sonar applications of intensity processing[J]. J Acoust Soc Am, 2007, **121**(4): 1909-1915.
- [279] GILLESPIE B, ROLT K, EDELSON G, et al. Littoral target forward scattering[M]//Acoustical Imaging. Boston, MA: Springer US, 1997: 501-506.
- [280] LEI B, HE Z Y, YANG Y X, et al. Experimental demonstration of forward scattering barrier for AUV intruder[J]. Applied Acoustics, 2022, **190**: 108635.
- [281] SONG H, KUPERMAN W A, HODGKISS W S, et al. Demonstration of a high-frequency acoustic barrier with a time-reversal mirror[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2003, **28**(2): 246-249.
- [282] FOLEGOT T, MARTINELLI G, GUERRINI P, et al. An active acoustic tripwire for simultaneous detection and localization of multiple underwater intruders[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2008, **124**(5): 2852-2860.
- [283] ROUX P, MARANDET C, NICOLAS B, et al. Experimental measurement of the acoustic sensitivity kernel[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2013, **134**(1): EL38-EL44.
- [284] LEI B, YANG K D. Evaluate the performance of underwater target detection system in forward scattering zone[C]//2008 Second International Symposium on Intelligent Information Technology Application. Shanghai, China. IEEE, 2008.
- [285] LEI B, YANG K D, MA Y L. Range estimation for forward scattering of an underwater object with experimental verification[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2012, **132**(4): EL284-EL289.
- [286] LEI B, YANG K D, WANG LU INSTITUTE OF ACOUSTIC ENGINEERING M Y &, et al. Forward acoustic scattering by moving objects: Theory and experiment[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, **57**(4): 313-319.
- [287] LEI B, YANG K, MA Y. Forward scattering detection of a submerged object by a vertical hydrophone array[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2014, **136**(6): 2998.
- [288] LEI B, YANG Y X, YANG K D, et al. A hybrid passive localization method under strong interference with a preliminary experimental demonstration[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2016, **2016**(1): 130.
- [289] LEI B, YANG Y, YANG K, et al. Detection of forward scattering from an intruder in a dynamic littoral environment[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2017, **141**(3): 1704.
- [290] 雷波, 杨益新, 何传林, 等. 等声速环境中目标前向声散射简正波耦合的垂直阵空域响应特征[J]. 声学学报, 2018, **43**(4): 471-480.
LEI Bo, YANG Yixin, HE Chuanlin, et al. Modal coupling response on vertical hydrophone array caused by forward scattering from intruder in the isovelocity underwater environment[J]. Acta Acustica, 2018, **43**(4): 471-480.
- [291] LEI B, HE Z Y, ZHANG Y, et al. GLRT-based detection in bistatic sonar under strong direct blast with multipath propagation[J]. Digital Signal Processing, 2022, **129**: 103657.
- [292] 何兆阳, 雷波, 杨益新. 源致内波引起的声场扰动及其检测方法[J]. 物理学报, 2023, **72**(14): 135-149.
HE Zhaoyang, LEI Bo, YANG Yixin. Acoustic field fluctuation caused by source-generated internal waves and its detection method[J]. Acta Physica Sinica, 2023, **72**(14): 135-149.
- [293] 雷波, 何兆阳, 张瑞. 基于迁移学习的水下目标定位方法仿真研究[J]. 物理学报, 2021, **70**(22): 224302.
LEI Bo, HE Zhaoyang, ZHANG Rui. Simulation research on underwater target location method based on transfer learning[J]. Acta Phys. Sin., 2021, **70**(22): 224302.
- [294] 杨益新, 汪勇, 何正耀, 等. 传感器阵列超指向性原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [295] 李整林, 杨益新, 秦继兴, 等. 深海声学探测技术[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2020.
- [296] 杨益新, 杨龙, 唐建生, 等. 声纳系统的波束形成与目标方位精确估计[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2018.