

水下无线通信装备发展研究

刘新宇, 周恒, 葛锡云, 焦慧锋*

(中国船舶科学研究中心, 江苏无锡 214000)

摘要: 水下无线通信 (UWC) 装备提供水下环境中信息传递和数据交换的能力, 是支撑海洋科学研究、水下组网监测、水下协同作业、海洋安全维护等应用的重要装备类型。本文从水声通信、水下光通信、水下电磁波通信、水下磁感应通信4类主要的UWC装备出发, 深入剖析了各自面临的技术难点, 全面梳理了相关装备的国内外发展现状, 进而凝练了UWC装备未来发展趋势。着眼我国UWC行业发展, 辨识了整体差距、底层共性问题、顶层体系等方面的发展困境, 提出了攻关基础机理与共性问题、聚焦突破行业核心方向、明晰装备顶层体系架构、完善保障措施与扶持政策等发展建议。相关内容可为把握UWC装备发展态势、布局UWC装备研制与应用等提供参考和启示。

关键词: 水下无线通信; 水声通信; 水下光通信; 水下电磁波通信; 水下磁感应通信; 装备体系
中图分类号: TN929 **文献标识码:** A

Development of Underwater Wireless Communication Equipment Technology

Liu Xinyu, Zhou Heng, Ge Xiyun, Jiao Huifeng*

(China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214000, Jiangsu, China)

Abstract: Underwater wireless communication (UWC) equipment facilitates information transmission and data exchange in underwater environments, playing vital roles in marine scientific research, underwater network monitoring, underwater collaborative operation, and marine safety maintenance. This study explores four primary UWC equipment categories: underwater acoustic communication, underwater optical communication, underwater electromagnetic communication, and underwater magnetic induction communication. It conducts in-depth analyses of the technical challenges associated with each category, comprehensively reviews their development status in China and abroad, and forecasts future trends. Focusing on the UWC industry of China, we summarize the development challenges in terms of overarching gaps, common issues, and top-level system, and propose the following development suggestions: (1) improving fundamental mechanisms and addressing common issues, (2) prioritizing breakthroughs in industry core areas, (3) elucidating the top-level system structure of the UWC equipment, and (4) enhancing safeguard measures and support policies. This study is expected to provide references for understanding the developmental trend and promoting the research and application of the UWC equipment.

Keywords: underwater wireless communication; underwater acoustic communication; underwater optical communication; underwater electromagnetic communication; underwater magnetic induction communication; equipment system

收稿日期: 2024-02-27; 修回日期: 2024-03-25

通讯作者: *焦慧锋, 中国船舶科学研究中心研究员, 研究方向为水下平台探测及作业装备; E-mail: jiaohuifeng@163.com

资助项目: 中国工程院咨询项目“深海装备技术体系及发展战略研究”(2023-XZ-06)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

一、前言

海洋因面积广阔、蕴含着丰富资源而吸引人类不断进行探索，各国在海洋资源开发、维护海洋安全、保障领海权益等方面已经展开了竞争与合作。在海洋强国建设战略^[1]提出后，我国进一步提高了对海洋战略空间的重视程度。其中，开展目标海洋区域的环境观察与监测、获取并传输大范围海洋环境数据，是实现海洋进入、保护、开发等目标任务的关键环节。

水下无线通信（UWC）装备是海洋环境观察与监测系统、水下传感器网络的关键构成。目前，应用较成熟的UWC装备主要有水声通信装备^[2]、水下光通信装备^[3]、水下电磁波通信装备^[4]；新兴的水下磁感应通信也获得了实际应用研究^[5]。在民用领域，UWC装备在海洋生物观测、海洋环境污染监控、海上石油及天然气资源勘探、海洋自然灾害监测预警、海洋环境变化研究等方面发挥了重要作用^[6]。在军用领域，UWC装备能够辅助完成各类战术行动，如水下目标信息回传、港口及目标海域监控、沿海及领海安全保障、水下运载平台集群协同等。

对于多数的UWC装备类型，我国仍处于“起步晚、发展缓、应用少”的发展阶段，不利于在海洋权益竞争态势逐步加剧的背景下维护海洋权益，相关装备技术发展需求迫切。为此，本文从UWC装备技术难点及解决方法的角度出发，梳理国内外发展现状，总结未来发展趋势，剖析国产装备存在

的差距和行业发展的核心瓶颈，进而提出相应发展建议，以为先进海洋装备研制布局、海洋通信装备能力提升等提供参考。

二、水下无线通信技术难点

水下环境存在通透性差、压力大等特征^[7]，导致水下数据感知难、传输难，加大了海洋探索和调查的挑战性。声波、光波、电磁波都可作为UWC的潜在波形，用于水下环境中的信息传输。大量的UWC技术研究及设备研制围绕此展开（见图1）。

（一）水声通信技术

水声通信（UAC）是在水下覆盖数百米至数千千米范围，实现信息无线远距离传输的唯一可靠手段^[8]。水声信道是声信号从发射端到接收端所经历的无线传输环境，存在通信带宽受限、频率相关衰减大、有色环境噪声强、多径时延扩展高、信道时变速度快、多普勒效应严重等情况，被视为最复杂的无线传输信道之一^[9]。水声信道直接导致UAC信号出现能量衰减、信号畸变，影响UAC的通信质量，是制约UAC技术发展的主要难题。

1. 衰减和有色噪声

在能量衰减方面，水声信道的重要特征之一即传播过程中的吸收能量损失取决于声信号频率，吸收系数随着频率的提高而迅速增大^[10]。声信道中包含的噪声主要由海洋环境噪声、特定区域噪声组成：前者的声源构成非常复杂，含有风浪噪声、湍



图1 UWC场景示意图

流噪声、船舶噪声、热噪声等^[11]；后者与区域地点密切相关，如北极海域出现的冰层断裂噪声、浅海海域养殖虾蟹的钳子发出的近似冲击噪声等^[12]。不同的噪声经过叠加，导致海洋噪声呈现明显的非白功率谱特征。衰减随频率的提高而增大，海洋噪声随着频率的提高而下降，使得通信频带内的信噪比出现明显变化。

衰减和噪声降低了接收信号的信噪比，可能出现解调误码。在传输信息中引入冗余比特，采用卷积码、低密度奇偶校验码^[13]、极化码^[14]等信道纠错编码，是UAC中的有效解决方法。在接收端使用接收阵列进行信号采集和处理^[15]，同样可以提升接收信噪比。

2. 带宽受限严重

不同于空气中无线电传播所具有的广阔频带资源，水下声传输受到能量吸收衰减的严重制约，如传输距离为10 km的理想可用信号带宽仅为数十千赫兹，传输距离为100 km时的可用信号带宽仅为1 kHz^[12]。可见，如此受限的通信带宽，严重制约了水下通信速率。

为了在有限带宽内最大限度地提高通信速率，UAC技术的发展历程为：从模拟通信技术向数字通信技术过渡，从非相干通信技术向相干通信技术过渡，从单载波通信过渡向多载波通信过渡，从单发单收向多发多收过渡。多发多收技术^[16,17]、同时同频全双工技术、非正交多址接入技术^[18]等的应用，同样可以提升通信速率、改善有限带宽内的频带利用率。

3. 多径时延扩展

海洋环境中的多径效应多由两种现象叠加导致。例如，声波在海洋波导环境中经由海面、海底反射，在传播过程中产生弯曲；造成声线弯曲的本质原因是海洋中的声速变化^[19]。在浅水中，温度和压力比较稳定，声速变化较小（相对恒定）；随着传播距离的增加，声波不断经由海面、海底反射形成多径^[20]，导致时延扩展、码间干扰增加。在深水中，除去海面、海底反射情况，声速关于深度而变化，声线同样在声道轴内的波导环境中不断“反射”，因而表现出较强的多径效应^[21]。声信道的时域冲击响应函数受反射影响，决定了传播路径的数量、强度和时延^[22]。

为了应对多径时延扩展引入的码间干扰，学术

界针对UAC技术进行了大量的研究。通过信道估计并结合迫零均衡、最小均方误差均衡等方式，可以消除码间干扰^[23]。单载波、多载波系统都可以结合更为先进的Turbo均衡技术^[24]，以消除符号间干扰、额外的噪声影响。正交频分复用（OFDM）等多载波信号，可引入循环前缀、零前缀等保护间隔来消除码间干扰^[25]。

4. 信道时变速度快

水声信道的时变性强，其成因包括季节性变化、每日潮汐等因素导致的缓慢大尺度变化，海面波浪、气泡等因素导致的快速小尺度变化^[21]。根据传输信号的持续时间对各种尺度变化进行区分，有助于提升通信质量。缓慢大尺度变化主要影响信号的平均功率，快速小尺度变化通过改变信道瞬时冲击响应来影响信号的瞬时水平。大尺度变化的建模分析支持信号的自适应功率控制以提升信号的信噪比，小尺度变化的建模分析支持实现信道估计和均衡等方面的自适应信号处理。

在缓慢大尺度变换上，由于时变性主要影响信号的功率，故自适应功率控制技术在功率节约、性能改进等方面^[25]都能产生较好的效果。在面对快速变化的小尺度时变影响时，自适应调制及解调技术是良好的解决手段^[26,27]。然而，任何尺度变化都需要收发两端具备反馈能力并形成反馈链路，从而使收发两端具备水下环境感知能力；从反馈技术中获得的性能改进，无论是自适应调制还是指令传输，取决于反馈给发射机的信道状态信息质量。

5. 多普勒效应严重

水下声速约为1500 m/s，水下声信号面对运动平台时具有较大的多普勒频移^[10]。UAC中信号带宽、中心频率的量级接近，故UAC一般属于宽带通信；面对较大的多普勒尺度因子时，各通信频点将遭受不均匀的非一致多普勒频移^[28]。多载波UAC系统面对非一致的大尺度多普勒频移时，会产生严重的信号畸变，进而恶化通信系统性能。

UAC中的多普勒频移表现为大尺度、非一致性，无法采用类似窄带无线电通信中的一致多普勒频移补偿方法，仅可采用载波相位跟踪、载波频率补偿等方式。UAC中一般需要先对大尺度多普勒因子进行估计，再使用频域插值、时域重采样等方法抵消水声多普勒效应^[28,29]。还可采用正交时频空调制等具有多普勒鲁棒性的新型多载波波形，代替传

统 OFDM 等波形进行水下信息传输^[30]。

各类通信场景需求催生了更多具有针对性的 UAC 技术。面向 UAC 对抗需求,通常在攻防两端应用 UAC 信号侦查与干扰^[31]、干扰背景下 UAC 干扰抑制^[32]等技术。面向水声隐蔽通信需求,较多应用仿鲸鱼或海豚等海洋生物的仿生通信^[33]、基于船舶辐射噪声的伪装通信^[34]等技术。

(二) 水下光通信技术

UAC 带宽受限严重,即使收发两端 UAC 机距离较近时的通信速率也难以提高。具有更高带宽潜力的水下无线光通信(UWOC)技术成为研究重点。然而,鉴于海洋水环境的复杂性,在建立可靠 UWOC 链路方面同样存在较高的技术挑战。

水对光波具有吸收作用,光谱内绝大部分光波在水中的能量衰减较大,因而在传播距离上无法与千米级 UAC 技术相比。然而,海水中光波传播特性研究发现,光谱中的蓝绿色波段是水下衰减相对弱的光学窗口,这为光波在水下实现短距离高速传输提供了理论基础^[35]。采用蓝绿色大功率激光发射器的 UWOC 机,在实验条件下最远可在水下传播数百米。目前,主要通过开发高性能发射机设备、融合增加系统带宽的新技术等,提高 UWOC 系统的传输速率和水下传输距离。在激光通信系统中,采用光注入锁定、光电反馈技术^[36]将外部光源注入,可显著增加通信系统调制带宽。对于发光二极管(LED)设备,倾向于采用氮化镓等新型材料、将单个大型 LED 改造为多像素 LED 阵列等设计^[37]来提高通信系统带宽和通信速率。

UWOC 对水体浊度^[38]、海洋湍流、悬浮气泡等水文条件具有较高的要求^[39]。海洋湍流通常由海水的温度、盐度、压力变化以及水体中的悬浮气泡引起,可以持续较长时间。水下无线激光通信系统对光束定位、捕获、跟踪都有严格要求,而海洋湍流以及悬浮气泡的存在将导致光束波动以及进一步的光束失调,因而维持光束跟踪能力尤为困难。海洋湍流同样会引发光信号产生随机变化(闪烁),导致光子在水体介质中的传播方向发生随机变化,而光束方向出现的微小变化也会产生严重的信号衰减^[40]。分析并建模水下湍流的统计特征^[41]以及对光传播的影响,有助于缓解湍流造成的性能恶化。闪烁效应随着光波波长的增加而显著降低,使用较大

的波长可以增强应对水下湍流的通信能力^[42]。使用更宽的光束也可以提高水下光通信链路的性能^[43],如波束扩展、多发多收系统中的空间分集^[44]。

常用的光电探测器仅有很小的有效检测区域,需要进行精确对准,否则无法建立无线光通信的链路,这就导致多数无线光通信系统只能在视距范围内进行通信。海水环境的快速变化,水下湍流、混浊度、水下障碍物等因素,使视距 UWOC 系统的链路失调难以避免。利用具有强散射特性的光束进行水面反射或散射传输,采用与专用光学系统相关的同步及信道估计算法构建非视距 UWOC 系统,是提高发射机覆盖面积、缓解链路失配的有效方式^[45]。

光通信介质具有可视性,因而 UWOC 的隐蔽性相对差。高功率的光源发射器会引发光污染,对于海洋生物日常活动有不利影响,也构成了海洋生态环境的潜在威胁。

(三) 水下电磁波通信技术

尽管水下光通信具有较高的通信速率,但在跨介质通信场景中,光波不易通过空气-水界面,通常还需中继器进行信号转发。相比声/光通信系统,水下电磁波通信具有优势:电磁波可直接从发射基站发出并与水下目标进行通信,顺利通过空气-水界面,显著扩展了应用范围,利于建立跨介质空间的综合信息网络系统^[46];电磁波面对水体湍流、浊度等具有更高的鲁棒性^[47]。在部署水下电磁波通信系统时,需要着重优化通信速率、天线设计、发射功率强度等设计参数。

与光波的水下传输类似,电磁波在海水中的传输衰减同样较大,也表现出明显的频率相关性^[48]。例如,常见的 2.4 GHz 无线蓝牙模块在水下仅能传播数十厘米。水下环境具有独特的物理特征,盐浓度、压力、温度、风浪等因素导致海水中的电磁波衰减较为严重(且衰减程度随着电磁波频率的增加而急剧增加),因而电磁波在水下的传播距离受限^[49]。尽管超低频电磁波(30~300 Hz)可在海水中传输超过 100 m,但需要大规模的发射天线基站、大尺寸的接收天线,对于体积较小的水下平台而言并无实用价值^[50]。为了提升电磁波通信的应用性,改进磁性天线设计是最可能的方案,也可使用电偶极子天线来传输横向电磁波^[51]。除去衰减因素,射

频信号面临环境噪声的不利影响^[52]，需要将信道估计、噪声抑制等功能模块进行整合设计。

（四）水下磁感应通信技术

水下磁感应通信（UMIC）作为一种新兴的UWC方式，近十年来获得了广泛关注。2001年，磁感应理论与电磁波理论的本质区别得以明确，建立了磁感应通信领域理论构建的基础^[53]。磁感应通信的优势在于水下传播过程经历的信道具有弱多途、弱多普勒干扰、可跨介质传输的特点。线圈辐射电阻远小于电偶极子的辐射电阻，只有极少数能量通过磁感应通道辐射到远场并形成多径，即为弱多途^[5]；传播速度接近于光速，几乎不存在多普勒干扰^[54]。海水的温度、浊度、盐度等影响声、光、电磁波的水下传输，但海水的磁导率几乎与空气相同^[55]，因而磁感应波的信道响应更加稳定且可预测，也使磁感应通信具有良好的跨介质应用前景。磁感应通信的传输和接收都是通过小尺寸的法拉第线圈来完成，故磁感应技术可实现设备小型化、提升通信隐蔽性；但与光、电磁波的水下传输类似，仅能实现数十米距离的UWC^[56]。

在UMIC过程中，线圈方向的频繁变化导致接收信噪比不可控，因而UMIC解调性能的可靠性不佳。相关研究重点是设计对线圈方向不敏感的天线，逐步从传统单向磁感应天线向多向磁感应天线发展，如三向磁感应天线、超材料增强磁感应天线、球形线圈阵列封闭环路天线^[57]。在优化水下天线设计、尽可能保证传输质量及可靠性后，磁感应通信在水下“传得远、传得快”成为关注重点。对于以水下平台和潜标系统的远程监控为代表的远距离、大规模互通互联的水下应用而言，UMIC实际应用的传输距离是关键指标。为了解决UMIC传输距离的不足，可在发射端、接收端之间部署中继单元，构建多跳磁感应传输网络^[58,59]。根据中继是否需要额外的电源和处理单元，磁感应中继传输可分为无源多线圈磁感波导传输^[59]、有源主动中继传输^[58]两类。UMIC固有带宽受限、涡流能量损耗严重，相应数据传输速率偏低。通常采用多波段扩展谐振器、空间域多收发天线阵列的方式来提高通信速率。从技术角度看，现有方法大致分为扩展通信带宽的多频段磁感应通信^[60]、多输入多输出磁感应通信^[61]两类。

三、国内外水下无线通信装备发展现状

（一）水声通信装备

1. 国外水声通信装备

国外UAC装备已经历了从UAC技术研究到原理样机研发、再到谱系化装备制造的发展过程。美国Teledyne Marine公司研制的ATM谱系化水声通信机，采用相移键控、多频键控（MFSK）、跳频等通信调制方式，实现从80 bps（>6 km）到15.4 kbps（>2 km）的通信速率。美国LinkQuest公司研制的SoundLink UWM系列水声通信机，水平通信距离超过10 km，使用场景包含浅海和深海，能以极低的误码率实现近程UAC（最大速率为38.4 kbps）。德国Evologics公司研制的S2C-R系列、S2C-M系列、S2C-T系列水声通信机，通过中高频通信频带覆盖了中远程通信距离，最远水平通信距离超过10 km。英国Sonardyne公司研制的Modem 6系列水声通信机，能以9 kbps的有效通信速率覆盖5 km以内的范围；与各类水下环境感知传感器配套，可进行长时间、大范围的监测，水下工作时间达4 a。

2. 国内水声通信装备

我国开展UAC技术研究较晚，以20世纪70年代研制的模拟通信声呐、20世纪80年代完成的数字UAC技术原理研究为标志，开启了国产UAC装备的发展历程^[2]。当前，海洋强国建设提升到新的高度，领域内的科研院所、高校、企业积极开展UAC技术研究和UAC装备开发，如中国船舶集团有限公司第七一五研究所、中国科学院声学研究所，哈尔滨工程大学、西北工业大学、浙江大学、厦门大学，深圳市智慧海洋科技有限公司、苏州桑泰海洋仪器研发有限责任公司、北京联合声信海洋技术有限公司等。目前，我国具备较为完善的UAC装备自主研发能力，实现了从UAC技术理论到科研样机、再到试验样机的平稳过渡，研制的UAC装备通过了各类湖试、海试验证。

针对“蛟龙号”载人潜水器的通信需求，研制了具有数据、文字、语音、图像传输功能的水声通信机，在5000米级、7000米级海试中分别实现了10 kbps通信速率下的 10^{-3} 误码率、 10^{-4} 误码率的UAC传输^[62]。针对“奋斗者号”载人潜水器的深海垂直通信需求，研制了全海深声学通信系统，在12.8 km的斜距上实现了包括图像在内的数据及指

令的无线传输^[63]。哈尔滨工程大学研究团队拥有 MFSK、扩频、单载波、多载波等 UAC 体制的设备研制经验，发展的高可靠超远程扩频水声通信机实现了 100 km 的水平传输距离，误码率达到 10^{-4} ，适用于海洋潜标信息实时回传、水下无人潜航器遥控指令传输等场景^[15]；研制的水声高速通信系统，搭载于“悟空号”全海深水下无人航行器，在马里亚纳海沟实现了 2 kbps × 15 km 的通信指标，达到国际先进水平^[64]。西北工业大学研究团队主要采用单载波、多载波通信体制，完成近/中/远程 UAC 场景下的理论研究：在远程稳健 UAC 方面，完成了丹江口远程 UAC 试验，在 10.8 km 距离上实现了 3 kbps、4.5 kbps 的无误码通信速率^[65]；近程高速 UAC 通过了湖试、海试验证。

我国 UAC 装备的谱系化发展仍有较大空间。深圳市智慧海洋科技有限公司研制了包含多个通信频段、覆盖浅/深水域、执行近/中程水声传输的谱系化商用 UAC 装备，具有通信导航一体化和组网扩展功能，良好水文条件下的理论误码率为 10^{-4} 。

（二）水下光通信装备

1. 国外水下光通信装备

国外较早启动了 UWOC 研究，完成了从技术理论研究到原理样机、再到谱系化装备制造的进程。2008 年，在实验室环境下利用 1064 nm 波段的近红外光，由激光发射器实现了 2 m 距离的水下传输，传输速率达到 1 Gbps，验证了水下光传输的可行性。采用激光作为 UWOC 的媒介（激光发射器的发射功率一般较大），可以实现水下可见光的高速率、远距离无线传输；但激光通信存在相干闪烁等固有不足，通信过程中收发两端需要精确对准且无遮挡，使得实用性较差。基于蓝绿 LED 光源的 UWOC 装备较多采用非相干光源，无需严格的精确对准，加之 LED 光源兼顾照明和通信功能，显著提高了 UWOC 的可行性和便利性。因此，研发 LED 光源的 UWOC 装备是当前的主流选择。

英国 Sonardyne 公司研制的 BlueComm 100 型 UWOC 机，采用 450 nm 蓝光作为光源，适用于各种水下光照条件，可在 15 m 范围内提供 5 Mbps 的传输速率；可实现水下视频实时传输的 BlueComm 200 系列 UWOC 机，采用 450 nm 蓝光、400~800 nm 波段白光作为光源，在水下高环境光干扰条件下可

在 150 m 范围内实现 2.5 Mbps 以上的传输速率；研制的 BlueComm 200 UV 型水下光通信机，采用紫外线作为光源，对自然环境光的抗干扰能力更强，适用于靠近水面强光环境进行作业的水下平台。瑞士 Hydromea 公司研制的 LUMA X 系列 UWOC 机，包含适合深水环境使用的 LUMA X 型蓝光通信机、适合近水面环境使用的 LUMA X-UV 型紫外线通信机，通信距离较短（最大仅为 50 m），但最大通信速率达到 10 Mbps。

2. 国内水下光通信装备

2017 年，浙江大学研究团队使用频谱高效的正品频分复用技术，在 10 m 长度的水下通道中实现了基于红绿蓝三色光、速率为 9.51 Gb/s 的聚合数据传输，误码率符合前向纠错的标准^[66]；复旦大学研究团队构建了基于绿光激光二极管的 UWOC 系统，使用非归零开关键控（NRZ-OOK）调制，实现了距离为 34.5 m、速率为 2.7 Gbps 的数据传输^[67]。这些技术进展都表明，水下激光通信确实可以实现极高的通信速率，尽管传输距离有待提升。

在 UWOC 原理样机、商用设备研制方面，中国科学院西安光学精密机械研究所、武汉六博光电技术有限责任公司等代表了国内领先水平。中国科学院西安光学精密机械研究所研制的水下蓝绿光通信工程样机，已经用于水下潜器间高速数据传输、海底观测网高速数据回收；2020 年，11 000 m 全海深高速无线蓝绿光通信工程样机支持了“奋斗者号”载人潜水器全球首次万米海底电视直播。武汉六博光电技术有限责任公司研制的 30 系列、50 系列、75 系列水下光通信机产品，最远通信距离分别为 50 m、80 m、100 m。

（三）水下电磁波通信装备

1. 国外水下电磁波通信装备

第一次世界大战期间法国将电磁波通信用于潜艇通信试验，是水下电磁波通信技术的早期研究与应用。目前，潜艇采用的电磁波通信频段多为超低频、甚低频频段。超低频在海水中的穿透深度超过百米，便于潜艇在较深水域接收信息，因而超低频通信具有重大价值。美国、俄罗斯的超低频通信分别采用 76 Hz、82 Hz 的中心频率，可通过电磁波实现无中继跨介质、对水下超过 80 m 的潜艇进行指挥通信。然而，超低频通信具有明显的缺点：通信

速率仅为0.01 bps量级，不能满足复杂指令的传递需求，通常仅作为通知潜艇进行收报作业的“振铃”功能；超低频率信号通常需要采用大尺寸收发天线，相关系统的地基天线长度为数十千米，拖曳天线长度超过1 km，发射功率为兆瓦级，显著增加了实际应用难度^[4]。甚低频也是潜艇水下通信的常用频段，对海水的穿透能力通常大于20 m，潜艇可以在潜望深度或潜航状态下通过拖曳天线进行通信。但同样由于可用带宽极为有限，甚低频只能传输低速电报和指令信息，无法满足水下高速传输信息的需求^[4]。即使电磁波通信存在弊端，但因其能够在没有地面中继器的情况下便捷地进行远距离跨介质传输，国外仍在继续研发小型化的水下电磁波通信装备。

2016年，美国启动了水下通信技术的系列研发项目，以推动水下无线电通信、水下光通信、水下网络通信技术的发展。例如，美国国防高级研究计划局（DARPA）提出了基于机械天线的微型轻质无线电发射机项目，开发应用于无人潜航器、潜艇、水面船、蛙人之间进行水下信息互通互联的微型无线电装备^[68]；利用强电场、强磁场特殊材料的机械振动产生电磁波，以显著减小无线发射机的体积并实现设备小型化。

2. 国内水下电磁波通信装备

国内从事水下电磁波通信装备研制的机构较少，现有的相关研究集中在可行性理论分析、仿真模拟等，从装备研发到实际应用尚有一定的差距。海军航空大学、海军工程大学研究团队针对水下不同频率电磁波的传播特性、水下环天线设计、天线辐射特性等完成了仿真分析^[69]。国防科技大学研究团队针对水下电磁波通信技术、基于深海直射波模型的水下电磁波通信系统等进行了较全面的研究^[70]。西北工业大学研究团队采用电流法建立了水下电磁波高速通信系统模型并通过水槽测试，分别在0.5 m、0.8 m、1 m距离上实现了最高1 Mbps速率的无误码高速通信^[71]。

（四）水下磁感应通信装备

1. 国外水下磁感应通信装备

UMIC技术是新兴的水下通信方式，国外正在经历从理论研究到原理样机研制的发展过程。在早期，UMIC主要通过试验手段验证磁场在水下传输

信息的可行性。2001年，用于浅水通信的UMIC系统在空气与水混合跨介质的250~400 m传输范围内实现了100~300 bps的通信速率^[53]。2010年，英国研究团队发展了基于磁感应通信的潜水员语音通信系统（中心频率为12 kHz），实现了水面、空气、水下潜水员之间的跨介质传输（距离为30 m）。UMIC具有不可听、不可视的特征，目前尚不存在反制侦察手段，因而军用前景良好，得到了发达国家的高度重视。美国的大学研究团队在实验室环境条件下实现了水下磁感应高速通信^[72]；利用磁感线圈、通用软件无线电、MSP432微控制器，开发了适配于无人遥控潜水器的磁感通信机模型，与水面遥控船进行了二进制相移键控通信^[56]。

2. 国内水下磁感应通信装备

国内的UMIC研究同样处于理论和试验验证阶段，高校是主要的研究力量。海军工程大学研究团队完成了UMIC阵列天线设计、天线特性及磁场仿真等研究。中国矿业大学研究团队针对水下安全监测场景，就UMIC的路径损耗、实物系统构建等进行了仿真和方案设计^[73]。哈尔滨工程大学研究团队基于通用软件无线电外设模块设计了收发端通信电路，构建了UMIC系统，在混合介质传输、收发端线圈为20 m条件下实现了10 kbps的无误码通信传输^[55]。

四、水下无线通信装备未来发展趋势

（一）基于声、光、电、磁多模互补的高速稳健水下通信系统

通过声、光、电、磁多模互补，提升水下通信系统的可靠性与传输速度，增强各类型运载平台的水面/水下机动航行和作业能力，是未来水下通信系统的重要发展方向。集成水声、光学、电磁等通信手段，深入研究跨介质磁感应通信、近程可见光通信、远程UAC等通信模式的耦合机制，在通信时延、速率、距离、功耗方面形成互补优势。根据实际通信场景需要，灵活选择各类通信模式，使水下通信系统具有跨介质的通信能力，实现水下平台与岸基之间的信息高效互通互联。

（二）水声“探通导”功能一体化装备架构

当前的水声探测、UAC、声学定位导航设备多

为独立设计和应用,相关设备的体积占用、功耗、频带资源分配等受到严格约束,不利于在小型水下平台上部署使用。然而从功能角度看,水声探测、UAC、声学定位导航系统的工作原理、系统架构、信号处理、工作频带等具有相似之处,为“探通导”功能一体化装备设计创造了可行性。随着海洋信息网络的发展壮大,各类型水下平台呈现出协同作业的应用趋势;集成探测、通信、导航定位技术,开展一体化装备架构设计,是实现水下平台资源共享、提升作业效率、增强隐蔽性能、降低平台体积与功耗的重要发展方向。

(三) 面向水下物联网的智能多模一体化及低功耗通信网络

万物互联是数字时代的发展主题,将物联网部署到水下环境成为未来水下通信网络的重要发展趋势,也是构成“空天海地”一体化信息物联网的关键环节。水下物联网区别于传统水下通信网络的主要特征有小型化、低功耗,多模态通信体制有机耦合,智能化服务,加之面临水下恶劣环境的多重挑战,因而成为未来水下无线通信装备技术突破的关键方向之一。传统的声学单模式通信网络存在传输时延高、速率低,应用场景受限等固有缺陷,需要发展智能多模一体化水下通信网络。① 针对变化的信道环境、繁杂的通信场景,可以智能进行选择与调整,利用多模式融合的方式,构建从海底到空气的跨介质通信链条,为稳定高效的网络服务提供物理层支撑基础。② 网络节点智能化可提升水下通信网络对复杂环境的自适应能力,深度强化学习等算法支持训练系统在与工作环境交互过程中寻找最优策略,从而根据时变环境进行自适应调整,优化部署决策。③ 各节点及网络整体的低功耗水平对于水下通信网络的长周期、大范围覆盖服务至关重要,共享收发两端的传感器基阵、采用通用部件方案并结合低复杂度算法,可以达到降低节点功耗的目的。④ 研究适应水下通信环境的低功耗网络路由协议,优化传播路径规划,支持低时延、低能耗的信息收集及传输。

(四) 全模式频谱一体化协同精准对抗网络

为应对未来水下通信对抗需求,水下通信对抗装备应具备通信体制全覆盖、高度协同一体化、攻

防对抗精准化等能力。在战场通信环境复杂程度增加后,单一通信体制的对抗装备不再满足应用需要,具备声、光、电、磁融合特征的通信装备成为发展趋势。未来通信对抗装备同样需要集成各类通信模式、覆盖全频域的对抗能力,以实现无差别的干扰与防御。面对快速变化的战场对抗态势,提高水下通信对抗装备的综合应用效能成为重点方向;构建一体化的协同信息网络,支持缩短决策时间,提高指令传达的时效性,形成一体化、网络化、智能化装备体系,增强对抗体系联合指控能力。在装备数量、对抗网络规模同步扩大的场景下,进一步加强水下通信对抗装备在态势感知、敌我识别等方面的精准程度,有助于提高水下非对称信息制衡能力。

五、我国水下无线通信装备面临的发展困境

(一) 整体差距

整体上,我国UAC装备领域因起步较晚,在产品化和成熟度上滞后于发达国家约5年;国内机构在传播距离、误码率性能、装备可靠性、产品谱系化等方面也落后于国际先进水平。需要深化UAC算法、网络协议、试验与应用等研究,加强换能器、数字系统的硬件开发,推进UAC谱系化产品研制。

在水下光通信装备领域,国产装备主要在可靠性、小型化、集成度、制作工艺等方面与国外产品存在差距,尚未形成小型水下移动平台专用的UWOC装备体系,较多停留在试验验证、样机设计阶段。

在水下电磁波装备领域,研制实际可用的微型水下电磁波通信机,将无线通信和数据传输扩展到海底、地下和其他尚不具备无线通信能力的环境中,实现跨介质通信并增强应用能力,是国外新兴发展方向。相比之下,国内尚未启动类似研究,亟需布局水下电磁波通信技术研发项目,支持相关技术创新应用的发展。

在磁感应通信领域,目前国内外均处于理论研究和试验验证阶段,没有形成实际可用的水下通信装备。鉴于磁感应通信在跨介质、隐蔽性、通信速率等方面的固有优势,需加强磁感应通信装备研发,加速磁感应通信装备的水下实际应用。

（二）底层共性问题

传统海洋装备强国已在核心传感器体系、处理器芯片上实现模块化、数字化、标准化、谱系化、智能化发展，相关产品在国际市场上占据了主导地位。在我国，“探通导”装备所需的核心传感器、处理器芯片等较多依赖进口，面临着潜在的垄断、封锁和禁运风险；虽然多数常规传感器基本实现国产化，但是实际应用较少，导致国内市场上仍以进口产品为主，深远海场景所需的高端传感器表现得尤为突出。

国产传感器的准确性、稳定性、适应性等依然存在不足。在UWOC装备上，国产高性能光器件的成熟度不及进口产品，无法满足水下高速无线通信的实际需求；需着重发展高速大功率的氮化镓LED器件，据此解决UWOC系统“传不远、传不快”的瓶颈问题。突破此类新型材料器件的核心技术，加快产品化及产业化进程，才能真正摆脱进口依赖现状，切实提高国产深远海通信装备发展水平。

对于深远海条件下的耐压、密封等工艺，开展系统性设计所需的底层理论分析能力依然缺乏，有关数值模拟的广度和深度亦有不足。在扎实提高基础研究能力之后，才能筑牢技术攻关、工程研制的基础。

（三）顶层体系

目前，我国深海通信装备领域的发展重点仍然以高速和远程数据传输、装备稳定性及可靠性、数据安全与隐私保护、装备能源供应及维护等为主，而相关顶层体系不够清晰，行业发展的方向性不强。深海通信装备、深海平台的发展耦合程度高，尽管部分深海通信装备完成了样机研制和相关试验，但在平台应用上较国际先进水平还有一定的差距。需要通过体系牵引，梳理技术基础，制定装备规划，确定重点技术方向及中长期发展目标。

六、我国水下无线通信装备发展建议

（一）攻关基础机理与共性问题

开展各类通信介质的传播机理研究并建立相应的数学物理模型，为UWC装备高质量发展提供坚实的理论基础。针对高端传感器研制中的薄弱环节，部署海洋传感器材料、工艺方面的技术攻关类

项目，着力解决海洋传感器制约UWC装备发展的共性问题。立足自主创新，支持UWC装备基础性、原创性研究，开展新材料开发及应用、新原理与新方法融合、新工艺等方面的攻关，提高传感器结构设计、材料开发、共性通用等方面的研究水平，攻克制约UWC装备发展的“卡脖子”问题。

（二）聚焦突破行业核心方向

UWC装备研发与应用具有投资大、周期长、需求少的特殊性，也因相关应用市场不成熟而使企业的活跃度及参与度偏低。建议采用多元化筹资模式，设立水下通信装备研发与风险投资基金，瞄准UWC装备的重点发展方向，集中行业力量开展关键核心技术攻关，健全UWC装备产业链。重点增强UWC装备智能化环境感知、水下各类信息装备间的水面-水下跨域通信、水下多模态信息的大规模交互通信组网、“探通导”一体化的多维信息融合、水下攻防智能无人化网络对抗等能力。

（三）明晰装备顶层体系架构

面向深远海通信需求，开展深远海UWC装备领域的顶层设计，形成深远海UWC装备与技术的中长期发展规划；以平台设计需求为牵引，精准开展UWC装备研制和技术攻关，再以相关装备和技术发展来推动平台能力提升，构建可持续发展机制。相应发展策略为：研制独立的UWC装备，开展各类型平台应用，形成独立的功能系统；进行平台UWC装备的智能化、网络化功能升级，构建包含深海警戒、观测、通信、导航定位等功能在内的深远海信息综合系统；形成立体多维的深海信息体系，拓展我国深海装备应用范围。

（四）完善保障措施与扶持政策

建议组建UWC装备公共试验平台，为行业内的高校、科研机构、企业提供一致的试验保障条件。统筹开发UWC设备共享管理平台，解决用户实际应用需求并提高装备利用率，广泛获取一线用户的反馈，形成UWC装备良性循环发展模式。依据UWC装备体系发展规划，采取“产学研用”协同方式制定行业标准与规范，提高UWC装备制造及应用的标准化水平。发布长期稳定的激励性政策，扶持UWC装备制造业发展，深化国内应用与

高水平“走出去”并举，壮大我国UWC装备产业。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: February 27, 2024; **Revised date:** March 25, 2024

Corresponding author: Jiao Huifeng is a research fellow from the China Ship Scientific Research Center. His major research fields include underwater platform detection and operation equipment. E-mail: jiaohuifeng@163.com

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Research on Deep-Sea Equipment Technology Systems and Development Strategy” (2023-XZ-06)

参考文献

- [1] 金永明. 中国建设海洋强国的成就与任务 [J]. 中国海洋大学学报(社会科学版), 2022 (3): 1–3.
Jin Y M. Achievements and tasks of building China into a maritime power [J]. Journal of Ocean University of China (Social Sciences), 2022 (3): 1–3.
- [2] 朱敏, 武岩波. 水声通信技术进展 [J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(3): 289–296.
Zhu M, Wu Y B. Development of underwater acoustic communication technology [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(3): 289–296.
- [3] 夏庆生. 水下可见光通信技术发展与应用 [J]. 水雷战与舰船防护, 2016, 24(2): 37–42.
Xia Q S. Developments and applications of visible light communication technology [J]. Mine Warfare & Ship Self-Defence, 2016, 24(2): 37–42.
- [4] 陶雯, 陈鼎鼎, 何宁宁. 国外海军潜艇通信技术与装备发展 [J]. 通信技术, 2015, 48(4): 375–381.
Tao W, Chen D D, He N N. Development of foreign navy submarine communication technology and equipment [J]. Communications Technology, 2015, 48(4): 375–381.
- [5] Akyildiz I F, Wang P, Sun Z. Realizing underwater communication through magnetic induction [J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(11): 42–48.
- [6] 李梅菊. 水下无线传感器网络综述 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2016, 30(8): 92–98, 121.
Li M J. Overview of underwater wireless sensor networks [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2016, 30(8): 92–98, 121.
- [7] 刘伯胜, 黄益旺, 陈文剑, 等. 水声学原理 [M]. 北京: 科学出版社, 2019.
Liu B S, Huang Y W, Chen W J, et al. Principles of hydroacoustics [M]. Beijing: Science Press, 2019.
- [8] 贾宁, 黄建纯. 水声通信技术综述 [J]. 物理, 2014, 43(10): 650–657.
Jia N, Huang J C. An overview of underwater acoustic communications [J]. Physics, 2014, 43(10): 650–657.
- [9] 杨健敏, 王佳惠, 乔钢, 等. 水声通信及网络技术综述 [J]. 电子与信息学报, 2024, 46(1): 1–21.
Yang J M, Wang J H, Qiao G, et al. Review of underwater acoustic communication and network technology [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2024, 46(1): 1–21.
- [10] Zhou S L, Wang Z H. OFDM for underwater acoustic communications [M]. New York: John Wiley & Sons, Ltd., 2014.
- [11] Hodges R P. Underwater acoustics: Analysis, design and performance of sonar [M]. New York: John Wiley & Sons, Ltd., 2011.
- [12] Dhanak M R, Xiros N I. Springer handbook of ocean engineering [M]. Cham: Springer Cham, 2016.
- [13] Huang J, Zhou S L, Willett P. Nonbinary LDPC coding for multi-carrier underwater acoustic communication [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(9): 1684–1696.
- [14] Chen R, Wu W, Zeng Q, et al. Construction and application of polar codes in OFDM underwater acoustic communication [J]. Applied Acoustics, 2023, 211: 109473.
- [15] 马璐, 李梦瑶, 刘淞佐, 等. 多波束分集深海远程正交频分复用水声通信 [J]. 声学学报, 2022, 47(5): 579–590.
Ma L, Li M Y, Liu S Z, et al. A multi-beam space diversity method for long-range underwater acoustic OFDM communication in deep water [J]. Acta Acustica, 2022, 47(5): 579–590.
- [16] 王巍. MIMO-OFDM 水声通信关键技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学(博士学位论文), 2014.
Wang W. The study of the key technologies for underwater acoustic communication based on MIMO-OFDM [D]. Harbin: Harbin Engineering University (Doctoral dissertation), 2014.
- [17] 赵云江, 乔钢, 刘淞佐, 等. 带内全双工水声通信技术研究现状与展望 [J]. 数字海洋与水下攻防, 2021, 4(3): 195–205.
Zhao Y J, Qiao G, Liu S Z, et al. Research status and prospect of In-band full-duplex underwater acoustic communication technology [J]. Digital Ocean & Underwater Warfare, 2021, 4(3): 195–205.
- [18] 马璐. 多用户 OFDM 水声通信技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学(博士学位论文), 2016.
Ma L. Study on multiuser OFDM-based underwater acoustic communication [D]. Harbin: Harbin Engineering University (Doctoral dissertation), 2016.
- [19] Qarabaqi P, Stojanovic M. Statistical characterization and computationally efficient modeling of a class of underwater acoustic communication channels [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2013, 38(4): 701–717.
- [20] Jensen F B, Kuperman W A, Porter M B, et al. Computational ocean acoustics [M]. New York: Springer New York, 2011.
- [21] Stojanovic M, Preisig J. Underwater acoustic communication channels: Propagation models and statistical characterization [J]. IEEE Communications Magazine, 2009, 47(1): 84–89.
- [22] Etter P C. Underwater acoustic modeling and simulation [M]. Boca Raton: CRC Press, 2018.
- [23] 乔钢, 王巍, 刘淞佐, 等. 改进的多输入多输出正交频分复用水声通信判决反馈信道估计算法 [J]. 声学学报, 2016, 41(1): 94–104.
Qiao G, Wang W, Liu S Z, et al. An improved decision feedback channel estimation algorithm for multiple-input multiple-output orthogonal frequency division multiplexing underwater acoustic communication [J]. Acta Acustica, 2016, 41(1): 94–104.
- [24] 许浩, 朱敏, 武岩波. 一种水声通信中的多阵元 Turbo 均衡算法 [J]. 电子与信息学报, 2014, 36(6): 1465–1471.

- Xu H, Zhu M, Wu Y B. An algorithm of multi-array turbo equalization of underwater acoustic communication [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(6): 1465–1471.
- [25] Ahmed R, Stojanovic M. Joint power and rate control with constrained resources for underwater acoustic channels [C]. Washington DC: OCEANS 2015–MTS/IEEE Washington, 2015.
- [26] Radosevic A, Ahmed R, Duman T M. Adaptive OFDM modulation for underwater acoustic communications: Design considerations and experimental results [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2013, 39(2): 357–370.
- [27] 赵亮, 朱维庆, 朱敏. 一种用于水声相干通信系统的自适应均衡算法 [J]. *电子与信息学报*, 2008, 30(3): 648–651.
- Zhao L, Zhu W Q, Zhu M. An adaptive equalization algorithm for underwater acoustic coherent communication system [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(3): 648–651.
- [28] Li B S, Zhou S L, Stojanovic M, et al. Non-uniform Doppler compensation for zero-padded OFDM over fast-varying underwater acoustic channels [C]. Aberdeen: OCEANS 2007–Europe, 2007.
- [29] Li B S, Zhou S L, Stojanovic M, et al. Multicarrier communication over underwater acoustic channels with nonuniform Doppler shifts [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2008, 33(2): 198–209.
- [30] Feng X, Esmail H, Wang J, et al. Underwater acoustic communications based on OTFS [C]. Beijing: 2020 15th IEEE International Conference on Signal Processing (ICSP), 2020.
- [31] 赵云玲. 水声通信OFDM信号侦察与干扰技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学(硕士学位论文), 2020.
- Zhao Y L. Research on reconnaissance and interference technology of underwater acoustic communication OFDM signal [D]. Harbin: Harbin Engineering University (Master's thesis), 2020.
- [32] 董阳泽, 张刚强, 印明明. 网络化水声对抗技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- Dong Y Z, Zhang G Q, Yin M M. Networked underwater acoustic countermeasure technology [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012.
- [33] 刘淞佐, 乔钢, 尹艳玲. 一种利用海豚叫声的仿生水声通信方法 [J]. *物理学报*, 2013, 62(14): 291–298.
- Liu S Z, Qiao G, Yin Y L. Bionic underwater acoustic communication using dolphin sounds [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(14): 291–298.
- [34] 王彪, 刘光杰, 戴跃伟. 一种基于船舶辐射噪声的水声隐蔽通信方法及系统: CN201210403996.1 [P]. 2013-02-06.
- Wang B, Liu G J, Dai Y W. An underwater acoustic covert communication method and system based on ship radiation noise: CN201210403996.1 [P]. 2013-02-06.
- [35] Frank H, Stojan R. High bandwidth underwater optical communication [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(2): 277–283.
- [36] Lu H H, Li C Y, Lin H H, et al. An 8 m/9.6 gbps underwater wireless optical communication system [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(5): 1–7.
- [37] Tsai C L, Lu Y C, Chang S H. InGaN LEDs fabricated with parallel-connected multi-pixel geometry for underwater optical communications [J]. *Optics Laser Technology*, 2019, 118: 69–74.
- [38] Cochenour B, Mullen L, Laux A. Phase coherent digital communications for wireless optical links in turbid underwater environments [C]. Vancouver: OCEANS 2007, 2007.
- [39] 林木泉, 杨少程. 水下光通信技术发展现状 [J]. *广东通信技术*, 2023, 43(11): 75–79.
- Lin M Q, Yang S C. Development status of underwater optical communication technology [J]. *Guangdong Communication Technology*, 2023, 43(11): 75–79.
- [40] Sun X B, Kang C H, Kong M W, et al. A review on practical considerations and solutions in underwater wireless optical communication [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(2): 421–431.
- [41] Zedini E, Oubei H M, Kammoun A, et al. Unified statistical channel model for turbulence-induced fading in underwater wireless optical communication systems [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2019, 67(4): 2893–2907.
- [42] Oubei H M, Sun X B, Ng T K, et al. Scintillations of RGB laser beams in weak temperature and salinity-induced oceanic turbulence [C]. Lercici: 2018 Fourth Underwater Communications and Networking Conference, 2018.
- [43] Oubei H M, ElAfandy R T, Park K H, et al. Performance evaluation of underwater wireless optical communications links in the presence of different air bubble populations [C]. Orlando: 2017 IEEE Photonics Conference, 2017.
- [44] 张立妍, 蒋锐, 张龙, 等. 水下无线光通信中MIMO技术研究现状 [J]. *光通信研究*, 2023 (4): 14–20, 72.
- Zhang L Y, Jiang R, Zhang L, et al. Research status of MIMO technology in underwater wireless optical communication [J]. *Study on Optical Communications*, 2023 (4): 14–20, 72.
- [45] Liu W H, Zou D F, Xu Z Y, et al. Non-line-of-sight scattering channel modeling for underwater optical wireless communication [C]. Shenyang: 2015 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems, 2015.
- [46] Al-Shamma'A A I, Shaw A, Saman S. Propagation of electromagnetic waves at MHz frequencies through seawater [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2004, 52(11): 2843–2849.
- [47] 窦智, 张彦敏, 刘畅, 等. AUV水下通信技术研究现状及发展趋势探讨 [J]. *舰船科学技术*, 2020, 42(3): 93–97.
- Dou Z, Zhang Y M, Liu C, et al. Research status and future development trend of AUV underwater communication technology [J]. *Ship Science and Technology*, 2020, 42(3): 93–97.
- [48] Palmeiro A, Martin M, Crowther I, et al. Underwater radio frequency communications [C]. Santander: OCEANS 2011 IEEE–Spain, 2011.
- [49] 王毅凡, 周密, 宋志慧. 水下无线通信技术发展研究 [J]. *通信技术*, 2014, 47(6): 589–594.
- Wang Y F, Zhou M, Song Z H. Development of underwater wireless communication technology [J]. *Communications Technology*, 2014, 47(6): 589–594.
- [50] Ali M F, Jayakody D N K, Perera T D, et al. Underwater communications: Recent advances [C]. Bhutan: International Conference on Emerging Technologies of Information and Communications, 2019.
- [51] Che X H, Wells I, Dickers G, et al. Re-evaluation of RF electromagnetic communication in underwater sensor networks [J].

- IEEE Communications Magazine, 2010, 48(12): 143–151.
- [52] Gussen C M G, Diniz P S R, Campos M L R, et al. A survey of underwater wireless communication technologies [J]. Journal of Communication and Information Systems, 2016, 31(1): 242–255.
- [53] Sojdehi J J, Wrathall P N, Dinn D F. Magneto-inductive (MI) communications [C]. Honolulu: MTS/IEEE Oceans 2001, 2001.
- [54] Huang H, Zheng Y R. Node localization in 3-D by magnetic-induction communications in wireless sensor networks [C]. Anchorage: OCEANS 2017–Anchorage, 2017.
- [55] 朱睿超, 高俊奇, 毛智能, 等. 基于磁感应的跨介质通信技术研究 [J]. 数字海洋与水下攻防, 2022, 5(4): 335–341.
Zhu R C, Gao J Q, Mao Z N, et al. Research on cross-medium communication technology based on magnetic induction [J]. Digital Ocean & Underwater Warfare, 2022, 5(4): 335–341.
- [56] Wei D B, Soto S S, Garcia J, et al. ROV assisted magnetic induction communication field tests in underwater environments [C]. Shenzhen: Proceedings of the 13th International Conference on Underwater Networks & Systems, 2018.
- [57] Guo H Z, Sun Z, Wang P. Multiple frequency band channel modeling and analysis for magnetic induction communication in practical underwater environments [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(8): 6619–6632.
- [58] Kisseleff S, Sackenreuter B, Akyildiz I F, et al. On capacity of active relaying in magnetic induction based wireless underground sensor networks [C]. London: 2015 IEEE International Conference on Communications, 2015.
- [59] Gulbahar B, Akan O B. A communication theoretical modeling and analysis of underwater magneto-inductive wireless channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(9): 3326–3334.
- [60] Sun Z, Akyildiz I F, Kisseleff S, et al. Increasing the capacity of magnetic induction communications in RF-challenged environments [J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(9): 3943–3952.
- [61] Li S, Sun Y J, Shi W J, et al. Capacity of magnetic-induction MIMO communication for wireless underground sensor networks [J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2015: 42632.
- [62] 朱维庆, 朱敏, 武岩波, 等. 载人潜水器“蛟龙”号的水声通信信号处理 [J]. 声学学报, 2012, 37(6): 565–573.
Zhu W Q, Zhu M, Wu Y B, et al. Signal processing in underwater acoustic communication system for manned deep submersible “Jiaolong” [J]. Acta Acustica, 2012, 37(6): 565–573.
- [63] 朱敏, 杨波, 刘焯瑶. “奋斗者”号全海深载人潜水器声学系统研制 [J]. 科技成果管理与研究, 2021, 16(9): 76–78.
Zhu M, Yang B, Liu Y Y. Development of Struggler full-sea deep-sea manned submersible [J]. Management and Research on Scientific & Technological Achievements, 2021, 16(9): 76–78.
- [64] “悟空号”再创潜深纪录 [J]. 船舶工程, 2021, 43(11): 1.
“Wukong” set another record for diving depth [J]. Ship Engineering, 2021, 43(11): 1.
- [65] 席瑞, 党谦谦, 何成兵, 等. 低复杂度单载波频域 Turbo 均衡水声通信技术 [J]. 水下无人系统学报, 2018, 26(5): 395–402.
Xi R, Dang Q Q, He C B, et al. Underwater acoustic communication technology adopting low complexity single carrier frequency-domain turbo equalization [J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2018, 26(5): 395–402.
- [66] Kong M W, Lyu W C, Ali T, et al. 10 m 9.51 Gb/s RGB laser diodes-based WDM underwater wireless optical communication [J]. Optics Express, 2017, 25(17): 20829–20834.
- [67] Liu X Y, Yi S Y, Zhou X L, et al. 34.5 m underwater optical wireless communication with 2.70 Gbps data rate based on a green laser diode with NRZ-OOK modulation [J]. Optics Express, 2017, 25(22): 27937–27947.
- [68] 孙雷, 韩峰. 便携式 ULF/VLF 机械通信天线技术的研究进展 [J]. 电讯技术, 2021, 61(3): 384–390.
Sun L, Han F. Research progress of portable mechanically based antenna project for ULF/VLF communication [J]. Telecommunication Engineering, 2021, 61(3): 384–390.
- [69] 郑强, 杨日杰, 陈佳琪. 海水中环天线的辐射特性研究 [J]. 舰船电子工程, 2012, 32(10): 126–128.
Zheng Q, Yang R J, Chen J Q. Research on radiated properties of a loop antenna in sea [J]. Ship Electronic Engineering, 2012, 32(10): 126–128.
- [70] 王俊. 水下窄带高速电磁波通信技术研究 [D]. 长沙: 国防科技大学(硕士学位论文), 2019.
Wang J. Research on underwater narrowband high-speed electromagnetic wave communication technology [D]. Changsha: National University of Defense Technology (Master's thesis), 2019.
- [71] Wu Z Q, Xu J D, Li B. A high-speed digital underwater communication solution using electric current method [C]. Wuhan: 2010 2nd International Conference on Future Computer and Communication, 2010.
- [72] Lin S C, Akyildiz I F, Wang P, et al. Distributed cross-layer protocol design for magnetic induction communication in wireless underground sensor networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(7): 4006–4019.
- [73] 孙彦景, 潘东跃, 徐华, 等. 水下安全监测无线磁感应通信 3D 路径损耗 [J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48(3): 616–623.
Sun Y J, Pan D Y, Xu H, et al. Wireless magnetic-induction communication 3D path loss for underwater safety monitoring [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2019, 48(3): 616–623.