

## 水下无线信息-能量协同传输技术综述

周述增, 王文龙, 孙文祺, 姜兆祯, 刘明, 曲威宇

(中国人民解放军海军潜艇学院, 山东 青岛 266199)

**摘要:** 随着海洋物联网的蓬勃发展, 水下通信网络节点面临着严峻的“能源受限”与“通信孤岛”双重瓶颈。水下无线信息-能量协同传输技术通过复用同一物理场实现能量与信息的并行传输, 成为解决上述问题的关键技术。首先从系统架构层面, 深入剖析了时间切换、功率分割、空间切换及频率分割 4 类接收机理的运作模式与利弊。其次, 依据传输介质的物理特性, 将现有技术按照物理场划分为三大主流路线并进行详细阐述: 基于水下电磁波、基于水下光学和基于水下声学的无线信息-能量协同传输技术。最后, 以研究现状为基础, 分析了不同传输技术的适用场景和技术难点, 并展望了未来水下无线信息-能量协同传输技术的发展趋势, 为水下通信网络建设及海洋物联网规模化实现提供了理论支撑与技术参考。

**关键词:** 海洋物联网; 水下通信网络; 无线信息-能量协同传输; 反向散射通信

**中图分类号:** P733.24

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2026043

## Review of underwater simultaneous wireless information and power transfer technology

Zhou Shuzeng, Wang Wenlong, Sun Wenqi, Jiang Zhaozhen, Liu Ming, Qu Weiyu

PLA Naval Submarine Academy, Qingdao 266199, China

**Abstract:** With the rapid advancement of the Internet of underwater things (IoUT), underwater communication network nodes are confronted with severe dual bottlenecks characterized by “energy constraints” and “communication isolation”. Underwater simultaneous wireless information and power transfer (U-SWIPT) technology, which achieves parallel transmission of energy and information by multiplexing the same physical field, is regarded as a key solution to these challenges. Firstly, from the perspective of system architecture, the operational modes and trade-offs of four receiver mechanisms—time switching, power splitting, spatial switching, and frequency switching—were deeply analyzed. Secondly, based on the physical characteristics of transmission media, existing technologies were classified into three mainstream routes according to physical fields and were elaborated in detail: underwater electromagnetic-based, underwater optical-based, and underwater acoustic-based U-SWIPT technologies. Finally, based on the current research status, the applicable scenarios and technical challenges of different transmission technologies were analyzed. Ultimately, the future development trends of U-SWIPT technology are prospected, whereby theoretical support and technical references are provided for the construction of underwater communication networks and the large-scale implementation of the IoUT.

**Keywords:** Internet of underwater things, underwater communication network, simultaneous wireless information and power transfer, backscatter communication

收稿日期: 2025-11-21; 修回日期: 2026-02-09

通信作者: 王文龙, wilon7521@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(No.52401410); 山东省重点研发计划基金资助项目(No.ZFJH202305)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China Youth Science Fund Project (No.52401410), The Key Research and Development Program of Shandong Province (No.ZFJH202305)

## 0 引言

海洋物联网 (Internet of underwater things, IoUT) 是一个集海洋监测<sup>[1]</sup>、信息传输<sup>[2]</sup>、数值预报<sup>[3]</sup>、能量交换<sup>[4]</sup>等多种功能于一体的海洋信息综合网络。近年来,随着全球气候变化和资源枯竭的加剧,海洋探测等水下技术开发和应用逐渐兴起<sup>[5]</sup>。为得到多元、综合、实时的海洋信息,海洋物联网概念被提出以满足海洋行业各类需求<sup>[6]</sup>,而稳定可靠的通信网络是构造海洋物联网的基础<sup>[7]</sup>。

然而,水下通信网络普遍面临着能源严重受限、维护成本高的瓶颈。以水声传感网络 (underwater acoustic sensor network, UWASN) 为例,其作为海洋物联网的重要组成部分,以“声信号”为核心载体,由部署在水下的多个传感器节点、中继节点及 Sink 节点 (如浮标、基站) 组成的分布式感知与通信网络,是实现海洋环境监测、资源勘探等水下应用的关键技术载体<sup>[8]</sup>。水声传感网络在应用和发展中面临的主要挑战之一是传感器的能量限制<sup>[9]</sup>,包括水下声学传感器和水下无人航行器 (autonomous underwater vehicle, AUV) 等无人探测节点。水下声学传感器和 AUV 等水下探测节点可以通过物联网协议进行互联,以覆盖和探索拓展区域<sup>[10]</sup>。为了尽可能延长 UWASN 的寿命,目前已在物理层<sup>[11]</sup>、媒体访问控制 (media access control, MAC) <sup>[12]</sup>和路由协议<sup>[13]</sup>中开发了大量的节能方案。但这些方法基本是通过降低能耗和提高水声传感器网络的能量效率来实现节能,未从根本上解决传感器电池能量耗尽的问题。同时,由于复杂的水下环境,为传感器充电和更换电池的维护工作成本高昂、操作难度大,甚至难以实现<sup>[14-15]</sup>,一旦电池能量耗尽,传感器就将失效从而被废弃,带来了巨大

的运行成本和资源浪费,也对海洋环境治理造成负面影响。对于 AUV 等无人潜航器,尽管存在通过可再生能源 (太阳能、风能等) 供能的方案<sup>[4]</sup>,但这种方案提供的能量具有难以预测、不可控和间歇性的特点,不仅限制其使用范围,产生的能量也难以以为潜航器的运行提供稳定支撑。而能源一旦耗尽,只能通过船只打捞后进行有线充电才能再次利用。

为解决该难题,无线信息-能量协同传输 (simultaneous wireless information and power transfer, SWIPT) 技术的概念在业界内首次被提出<sup>[16]</sup>。该技术是一种利用声、光、电磁等介质或通过耦合器件,同时实现无线能量传输 (wireless power transfer, WPT) 和无线信息传输 (wireless information transfer, WIT) 的技术<sup>[17-18]</sup>。与上述传统能源供应方法对比,SWIPT 使终端能够从相对可控的人造信号源中收集能量<sup>[19]</sup>,为能量受限的无线通信网络提供持久、确定、可靠和按需的能量。此外,人造信号源在传输能量的同时能够携带信息,实现无线通信和无线能量传输的结合,从而充分利用信号和网络基础设施<sup>[20]</sup>。因此,SWIPT 是水下传感器和无人潜航器能量受限问题的最佳解决方案。尽管陆地 SWIPT 技术已在理论模型与实际应用中取得了显著进展,但将其直接移植至水下环境却面临着物理机制层面的根本性挑战。

陆地 SWIPT 和水下 SWIPT 技术对比如表 1 所示。在信道特性方面,陆地 SWIPT 主要依赖射频信号,空气介质提供了相对稳定的低损耗传输环境。然而,水下介质具有极高的复杂性:高频电磁波在海水中会迅速衰减,导致射频 (RF) 电磁波-SWIPT 方案在水下仅能维持厘米级的传输距离。

表1 陆地 SWIPT 和水下 SWIPT 技术对比

对比维度	陆地 SWIPT	水下 SWIPT
主导传输介质	RF	声波、可见光、电磁感应
信道核心挑战	多径衰落、阴影效应	声: 高时延、多普勒频移严重 光: 散射、吸收、湍流 电磁: 涡流损耗、极高衰减
能量-信息权衡	侧重于提高数据速率	侧重于延长网络寿命和提高能量收集效率
物理层安全	中等 (RF 易被窃听, 需复杂加密)	声: 低 (易被远距离监听) 光: 极高 (视距传输, 难被截获)
信道状态信息 (CSI)	易于获取, 反馈延迟低	获取极难, 反馈延迟高
典型应用限制	距离与功率的平衡	浑浊度 (光)、盐度/导电率 (电磁)、带宽 (声)

而水声信道虽传输距离较远,但面临着严峻的带宽受限与高传播时延问题,这使得陆地上基于瞬时信道状态信息的算法难以在水下实时收敛<sup>[21]</sup>。此外,水下光信道虽然带宽巨大,但极易受到水体浑浊度、散射及湍流引起的指向性误差影响,信道的随机性远超陆地大气光通信。在能效指标上,陆地系统通常假设能量源电力无限,而水下发射端(如浮标或母船)自身的能源也是有限的,这对收发两端的“端到端能效”提出了更严苛的优化要求<sup>[22]</sup>。

目前水下无线信息-能量协同传输技术可通过传输载体分为:基于电磁波的协同传输、基于水下光通信的协同传输和基于水下声学的协同传输。本文针对无人潜航器和水下传感器的无线充电和信息传输应用场景,介绍了基于水下电磁波的协同传输、基于水下光学的协同传输和基于水下声学的协同传输3种无线信息-能量协同传输技术,通过上述技术的最新研究进展,对比分析了不同技术的优缺点和技术难点,展望了其发展趋势。

## 1 水下无线信息-能量协同传输原理

本节从系统架构出发,深入剖析水下节点如何从单一或混合的物理场中同时提取信息与能量。与陆地无线电环境不同,水下环境的高时延(声学)和高衰减(光学/电磁)特性,决定了接收机架构必须在硬件复杂度与传输效率之间寻找独特的平衡。

### 1.1 总体系统架构

水下 SWIPT 系统通常由控制中心(如水面浮标、母船)、下行链路发射机和水下接收节点(如 AUV、传感器节点等)组成,其架构如图 1 所示。

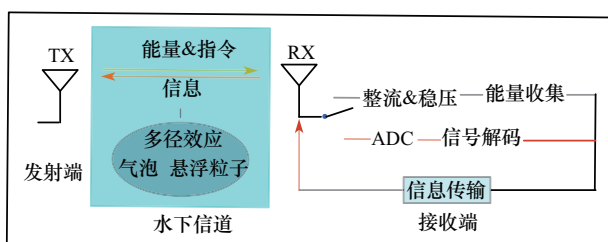


图1 水下无线信息-能量协同传输系统架构

水下 SWIPT 系统架构主要由发射端(TX)、水下信道和接收端(RX)3个部分组成。发射端通常为控制中心的湿端,其负责将能量信号和信息信号进行联合调制,在传输能量的同时将设备识别和

信号传输的指令发送给接收端。常见的调制策略包括叠加编码和波形设计,以适应水下信道的非线性特征。由于海水复杂的水下环境,信号传输面临着多径效应、气泡和水中悬浮粒子等因素的干扰。接收端作为水下 SWIPT 系统的核心组件,功能集成度较高,一般包含能量收集模块、信息采集模块和信号调制解调模块,在收集发射端发射信号能量时,先通过整流稳压电路获得稳定电流,再利用超级电容等进行能量收集;在进行信息传输时,先通过模数转换器(analog to digital converter, ADC)对信号进行模数转换,再对数字信号进行解码。

### 1.2 接收端协同传输机理

就现有的技术而言,能量收集过程会破坏携带信息的信号波形,因此接收端难以直接对同一信号同时进行全功率解码和能量收集,从而必须在接收端采取能量分割的策略,这也是水下 SWIPT 系统的核心技术。

#### 1.2.1 时间切换

时间切换(time switching, TS)作为最经典的协同传输协议之一,其核心是将传输信号在时域上进行分割,从而将能量传输和信息传输阶段分割开,避免其相互干扰<sup>[23]</sup>。这种方法不需要复杂的能量分割器件,而是仅通过一个简单的射频开关或者模拟开关,在两个不同功能的电路之间进行切换。假设一个完整的传输周期为 $T$ ,TS协议引入了一个核心参数:时间切换因子,通常记为 $\alpha$ 。在能量收集阶段( $\alpha T$ ),接收端将发送端发送的信号用于能量收集,此时接收机无法解调任何数据;在信息解码阶段( $(1-\alpha)T$ ),发送端发送的信号携带相关数据,接收端停止充电,消耗之前积累的能量进行信号处理和信号传输。

这里分析一下通信速率和能量传输之间的关系,假设接收到的信号功率为 $P_{rx}$ ,噪声功率为 $\sigma^2$ ,能量转换效率为 $\eta$ ,工作带宽为 $B$ ,则收集到的能量 $E_{ts}$ 和可达信息速率 $R_{ts}$ 可以表示为

$$\begin{cases} E_{ts} = \eta \cdot P_{rx} \cdot (\alpha T) \\ R_{ts} = (1 - \alpha) \cdot B \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{P_{rx}}{\sigma^2} \right) \end{cases} \quad (1)$$

从式(1)可以看出, $\alpha$ 越大,收集到的能量越多,但是与此同时 $(1-\alpha)$ 越小,会极大地限制通信速率。因此如何设计这个时间切换因子,对于平衡信息传输和能量收集有着重要的作用。

同时, 尽管TS作为一种简单有效的能量分割策略, 但也面临着同步和信道时变性的难题。相较于陆地无线信息-能量协同传输大多采用光速的电磁波而言, 由于海水对于电磁波较强的衰减作用, 水下主流的远距离传输手段还是以声学为主, 而海水中声速仅约1 500 m/s。如果采用TS协议, 发射机和接收机必须高度时间同步。水声传播存在巨大的时延, 接收机很难精确获得切换开关的时机, 从而发生二者时间不同步, 导致本该用于解码的数据包导入了能量电路发生丢包。且目前TS的策略通常是固定或基于长周期的, 动态调整的灵活性不高。在实际应用中,  $\alpha$ 不应是一个固定值。未来的研究趋势是结合强化学习, 根据当前的水下信道状态信息和电池剩余电量, 动态调整下一帧的 $\alpha$ 。例如, 当AUV电量极低时, 强制增大 $\alpha$ 牺牲通信速率保活; 当湍流导致信道信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)极差时, 通信误码率过高, 则可以将更多时间分配给能量收集。

### 1.2.2 功率分割

相比较为固定的时间切换而言, 功率分割(power splitting, PS)通过将接收到的连续信号流的功率按照一定比例 $\rho$ 分流。 $\rho$ 为功率分割因子, 代表流向能量收集电路的能量比例, 剩下的 $(1 - \rho)$ 则流向信号解码电路, 实现能量收集电路和信息解码电路同时供给。这种策略消除了TS需要精准时间同步的缺点, 且能更加精细地进行能量管理, 性能上限极高<sup>[24]</sup>。PS收集到的能量 $E_{ps}$ 和可达信息速率 $R_{ps}$ 为

$$\begin{cases} E_{ps} = \eta \cdot \rho \cdot P_{rx} \cdot T \\ R_{ps} = B \cdot \text{lb} \left( 1 + \frac{(1 - \rho) P_{rx}}{\sigma_{ant}^2 + \sigma_{cov}^2} \right) \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $\sigma_{ant}^2$ 为信号进入接收电路之前接收天线采集到的环境噪声功率,  $\sigma_{cov}^2$ 为后续信息解码电路自身产生的噪声功率。与传统通信系统不同, SWIPT中的功率分配器会随信号一同衰减天线噪声, 但对电路噪声无任何影响, 这意味着SNR与功率分割因子 $\rho$ 并非线性相关, 这一点在环境噪声占主导的水下场景中尤为显著。在低信噪比环境下, 会使用较小的 $\rho$ , 以保证通信的稳定连接; 当为了收集更多能量而增大 $\rho$ 时, 有用信号会变小, 但是天线噪声 $\sigma_{ant}^2$ 也会随之变小, 而电路噪声 $\sigma_{cov}^2$ 不变, 所以

在信噪比较低时, PS性能可能不如TS。

在水下环境中, 水下光学协同传输系统可以通过分光镜或者半透半反镜较为简单地实现“一部分光传至太阳能板, 一部分光传至光电二极管”, 或利用太阳能板自身的非线性效应, 直接提取交流信号为信息, 直流分量作为能量。然而在水下声学协同传输系统中, 尚无成熟的“声波分束器”, 只能先将声波转为电信号, 再利用电路板进行PS。实际应用中, 固定的 $\rho$ 无法应对复杂的水下环境, 需要根据接收机实时检测到的信道状态信息, 对 $\rho$ 进行动态调整, 如信号较强时, 增大 $\rho$ 以存储更多能量; 信号较弱时, 减小 $\rho$ 以保证通信不断联。

总体而言, PS通过在功率域的权衡, 避免了时间资源的浪费, 理论上能够获得比TS更大的速率-能量区域。然而, 在水下实际部署中, PS对硬件电路的非线性敏感度更高, 且在声学系统中面临着复杂的阻抗匹配挑战。

### 1.2.3 空间切换

与TS和PS不同, 空间切换(spatial switching, SS)利用了多输入多输出(multiple-input multiple-output, MIMO)技术, 其核心思想是切换硬件<sup>[25]</sup>。SS要求接收端必须配备多个接收元件, 其不对单一信号进行分割, 而是将接收阵列中的 $N$ 个元件分为两组: 一组 $L$ 个元件为能量收集组, 将接收到的信号全部导入整流电路进行充电; 另一组 $(N - L)$ 个元件将接收到的信号全部导入解调电路进行通信, 其中 $i$ 表示为第 $i$ 个元件。这就使得SS不需要复杂的功率分割器, 也不需要高精度的时间同步, 只需要在每个元件上接一个选通开关。不妨假设接收端共有 $N_r$ 个接收天线, 其中 $L$ 个被划分到能量收集组, 可得SS收集的能量和可达信息速率表达式为

$$\begin{cases} E_{ss} = \eta \cdot T \cdot \sum_{i \in \Omega_{EH}} P_{rx,i} \\ R_{ss} = B \cdot \text{lb} \Delta \left( \mathbf{I} + \frac{1}{\sigma^2} \mathbf{H}_{ID} \mathbf{Q} \mathbf{H}_{ID}^H \right) \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $\Omega_{EH}$ 为被选为能量接收的天线集合,  $\mathbf{H}_{ID}$ 是信息天线组的信道矩阵,  $\mathbf{Q}$ 为发射端的发射信号协方差矩阵。可以通过调节 $\mathbf{H}_{ID}$ 来调节MIMO的复用增益和分集增益, 若信息天线数量减少, 会使MIMO的自由度降低, 导致信息传输速率下降。

在实际应用中, SS对于水下声学和光学的协

同传输而言意义重大。在水下声学协同传输中，由于声波的波长较长，换能器之间一般需要隔开一段距离才能避免相互干扰，从而可以赋予处于强弱路径上的换能器不同的功能，以决定整体系统的侧重功能。在水下光学协同传输中也是同样，光束可能因为湍流等干扰因素而发生偏移，只照射到了阵列的部分阵元，此时可以控制被照射到的阵元进行通信，其他阵元用于收集背景光能。

SS 可以完美解决 TS 的同步难问题，同时也避免了 PS 的电路噪声干扰问题，但是 SS 要求的多阵元可能会增加系统制作成本以及硬件的规模。

### 1.2.4 频率分割

频率分割 (frequency switching/splitting, FS) 是指发射机在不同的载波频率上分别调制信息和能量，接收机通过带通滤波器将特定频率的信号导向能量收集电路，另一部分频率的信号导向信息解码电路。由于不同频率之间是正交的，在理论上信息和能量传输互不干扰，实现了真正的“并行协同” [26]。

假设系统总带宽为  $W$ ，划分为  $K$  个子载波。集合  $K_{EH}$  分配给能量， $K_{ID}$  分配给信息，则收集到的能量和可达信息速率为

$$\begin{cases} E_{fs} = \eta \cdot T \cdot \sum_{k \in K_{EH}} |h_k|^2 P_k \\ R_{fs} = \sum_{k \in K_{ID}} \Delta f \cdot \text{lb} \left( 1 + \frac{|h_k|^2 P_k}{\sigma^2} \right) \end{cases} \quad (4)$$

其中， $P_k$  为第  $k$  个子载波的发射功率。FS 允许在信道增益  $|h_k|^2$  最高的频率上集中发送能量实现频率分集增益，通过分析可达信息速率可以决定如何在信号和能量的子载波上进行功率分配。FS 在水下光学、声学 and 电磁感应协同传输中都具有广阔的应用前景。在光学中，由于可见光频率范围非常宽，允许使用如功率高的红光 (650 nm) 进行能量传

输，利用衰减少的蓝光 (450 nm) 进行数据传输，甚至在接收端只需要利用成本极低的滤光片即可实现。在声学中，为了对抗多径效应，水声通信广泛采用正交频分复用 (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 技术。在电磁感应中，可以利用低频进行能量传输，用高频 (带宽大) 进行数据传输。

最后，FS 还有一个不得不考虑的问题是较高的峰值平均功率比 (peak-to-average power ratio, PAPR)，即信号的最大功率与平均功率的比值，描述了一个信号的波形波动程度。对于信号传输而言，高 PAPR 会导致发射端的发射功率超出范围进入饱和，使信号被削顶从而导致非线性失真，进而使得误码率飙升。为了防止这种失真，必须让发射机工作在低功率状态，这会极大抑制其传输速率。尤其是对于水下光学传输来说，较高的 PAPR 还极易触碰到光学元件如 LED 等的最大电流和最小开启电压，导致更加严重的信号失真。而对于能量收集而言，较高的 PAPR 更容易在低功率的情况下达到接收端电路中二极管的开启电压，实现低功率下能量的收集，且在平均接收功率相同的情况下，高 PAPR 的信号能收集到更多的能量。

SWIPT 的 4 种典型能量分割策略的对比如表 2 所示。从表 2 可以看出，4 种策略各有其优缺点，具体应用时应针对不同的水下 SWIPT 系统，采取不同的分割策略。如在水下声学 SWIPT 系统中，水下声学信道的高时延，使用 TS 会导致时间同步困难，而对于近场电磁 SWIPT 系统而言，使用 TS 则是较为简单易行的办法。

## 2 基于水下电磁波的协同传输

基于电磁波的水下 SWIPT 技术分为近场的电容耦合式无线能量传输 (CPT)、感应耦合式无线能量传输 (IPT)、磁谐振耦合式无线能量传输和远

表 2 SWIPT 的 4 种典型能量分割策略的对比

特性	TS	PS	SS	FS
硬件核心	开关	分割器	多天线	滤波器/棱镜
干扰管理	完全隔离	自身引入干扰	空间隔离	频谱隔离 (正交)
PAPR 问题	低	中	低	高 (OFDM 的峰均比问题是难点)
非线性影响	小	大	小	极大 (整流器非线性对多载波非常敏感)
水下最佳场景	简单传感器	理论研究	大型基站	OFDM 水声/双工光通信

场射频辐射技术,其原理如图2所示。该技术将传输距离限制在几十厘米以内的短距离,通过电磁感应极大提高了能量转换效率和充电速度,且电磁频段较高的带宽可以在短距离内实现较高的通信速率,为水下无人潜航器的SWIPT提供了可靠的解决方案。

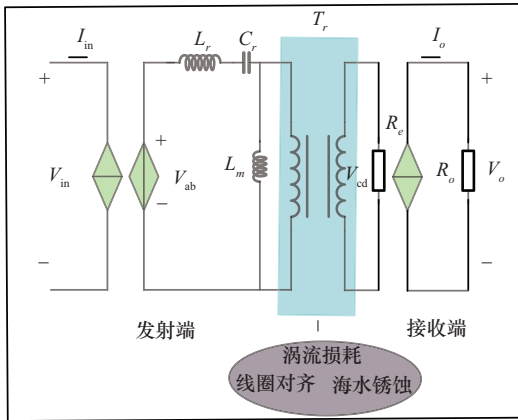


图2 近场电磁SWIPT系统等效电路

## 2.1 电容耦合式

CPT是一种近场无线供电技术,其利用高频电场作为能量载体,通过金属极板电容耦合实现无线信息-能量协同传输。对周围环境电磁干扰较小,尤其是当耦合极板之间或周围存在金属导体时,不易产生涡流损耗,具有简易轻薄、形状易变、重量轻、成本低等特点。且电容耦合式能量传输技术设计灵活、效率高、拓展性好、抗偏移能力强、无多径效应、环境兼容性好,这使得空中电容耦合电能传输已被广泛应用于千瓦级场景,然而水下电容耦合电能传输目前仍然处于起步阶段。由于水的介电常数较高,CPT耦合器能产生高效的耦合电容,这使得其在水下AUV充电和数据传输方面的发展前景尤为广阔<sup>[27-28]</sup>。以下是目前学者针对CPT存在问题进行的相关研究。

### 2.1.1 自电容与互电容权衡

对于CPT系统设计而言,自电容和互电容的物理特性存在天然制约。自电容决定系统的功率损耗和补偿网络复杂度。自电容过大时,需更大体积的补偿电感/电容抵消容抗,增加系统成本与损耗<sup>[29]</sup>;而互电容直接决定能量传输能力,互电容过小会导致耦合系数降低,进而引发效率下降。Liu等<sup>[30]</sup>针对现有CPT系统中耦合器存在的自电容和互电容设计权衡问题,提出了一种交错电容耦合

器。该装置利用多层极板结构兼顾了大自电容和互电容,并形成天然屏蔽,同时通过非悬浮状态的中间层极板抑制了交叉耦合。实验验证表明,在相同耦合空间、补偿方案和输出功率下,该系统实现最高效率,且不需要额外并联电容,兼顾可靠性与低成本。Rong等<sup>[31]</sup>针对该问题提出一种六极板混合介质电容耦合器,利用水与空气的介电常数差异显著降低了自电容与互电容比值,在不增大体积的前提下将耦合系数提升至0.52,远高于传统均匀介质耦合器UDC-10的0.20和UDC-50的0.31。在淡水环境、传输距离60 mm时实现87.2%的直流-直流量效率,且具备优异的抗错位性能(方向偏移50 mm时效率为84.3%)和距离适应性(传输距离100 mm时效率为81.4%)。

### 2.1.2 耦合电容稳定性

耦合电容受距离等参数影响严重,系统对耦合电容值的变化敏感,需要设计良好的耦合机构,保证耦合电容值稳定。Ieperen等<sup>[32]</sup>针对单发射多接收配置下,耦合系数因距离对准变化导致系统最优功率传输和效率难以维持的问题,提出一种基于频率分段的频率切换模式,证明在次级谐振频率下可实现近耦合无关的功率与效率;通过1 MHz主频的实验装置(1个发射端、2个接收端)验证,结果显示该模式在效率下降不足5%的情况下,输出功率提升超过4倍。

### 2.1.3 边缘效应制约

Da等<sup>[33]</sup>提出一种水下单电容耦合SWIPT系统,采用双金属板单电容耦合结构,解决传统四极板CPT的边缘效应问题,实现1 m距离下水下功率300 W与数据500 kbit/s的协同传输。Da等<sup>[34]</sup>还提出一种水下电容耦合SWIPT系统,基于单电容耦合原理,发射侧为水下电站,接收侧为多台AUV,实现同步充电与双向数据交互,60 mm距离时系统效率为71.27%,抗水平/垂直偏移能力优异,填补了水下多负载SWIPT的空白。

在高功率传输下,电容耦合式无线功率传输的电极板会产生焦耳热,同时强电场存在漏电和击穿介质风险,从而对设备造成损坏,极大限制了其功率提升空间;在数据传输方面,AUV在上传数据时为避免并联阻抗分流导致数据增益下降,需物理断开未上传接收端,不适用于动态AUV集群的SWIPT。

## 2.2 电磁感应式

相较于 CPT, IPT 的发展和應用都更成熟。IPT 通过电磁感应定律工作, 拥有更高的传输效率、更强的安全性以及更低的传输频率, 更加适合水下环境<sup>[35]</sup>。近年来, 感应式无线电能传输技术飞速发展, 已经广泛应用于电子设备、生物医疗设备和电动汽车充电。在水下领域, 感应式无线电能传输也已经应用于水下机器人<sup>[36]</sup>、船舶<sup>[37]</sup>、水下传感器<sup>[38]</sup>以及自主水下航行器<sup>[39]</sup>的充电。然而, IPT 仍然面临许多挑战, 如传输效率低、系统性能较差, 以及环境适应性差等问题, 诸多学者也对这些问题进行了针对性的研究。

### 2.2.1 海水涡流损耗

海水环境下, 水下 SWIPT 的涡流损耗严重影响传输效率。通过合理设计电路、拓扑结构和线圈, 能够提高传输效率。Futagami 等<sup>[40]</sup>提出 4 层螺旋利兹线线圈结构, 通过密集绕组减少海水涡流损耗, 提升了装置在盐水中的传输效率; Yang 等<sup>[41]</sup>设计了带铁氧体磁芯且适度重叠的单层平面线圈阵列, 减少了 95% 的涡流损耗; Zeng 等<sup>[42]</sup>设计了平面螺旋线圈叠加锥形线圈的混合发射端装置, 提升传输性能与抗错位能力的同时, 使传输效率提升 10%~15%。Chen 等<sup>[43]</sup>通过实验研究中距离水下非对称 WPT 系统, 发现减小初级平衡电阻可使 50 cm 距离、410 kHz 频率下的负载电压和传输效率接近对称系统的 2 倍, 提出含复阻抗和复互感的电路模型解释该现象, 验证了模型有效性; 并发现负载电阻为 90  $\Omega$  时效率最高 (30.9%), 适用于优先考虑传输距离的场景。Zhang 等<sup>[44]</sup>设计了自适应水下无线供电系统, 采用类 D 驱动和串-串谐振拓扑, 不需要额外无线接口即可调节输出电压, 在简化硬件的同时提升了系统效率。Goncalves 等<sup>[45]</sup>提出了匹配网络新型拓扑, 在宽负载范围内提升功率传输与效率。Zhang 等<sup>[46]</sup>设计了“双发射线圈-接收线圈”的 1×1×1 立体线圈结构, 通过线圈磁场叠加抵消部分海水涡流效应, 提升了功率传输效率。Tamura 等<sup>[47]</sup>设计了高效轻量化磁耦合器, 通过优化线圈绕制方式、选用低密度磁芯材料, 在降低重量的同时提升耦合系数。

选择合理的传输频段也能提升传输效率。Yan 等<sup>[48]</sup>基于麦克斯韦方程建立涡流损耗解析模型, 明确 215.5~248.4 kHz 频段效率稳定, 为频率选择

提供依据以降低涡流损耗。Lopes 等<sup>[49]</sup>针对 AUV 电池充电设计了一套低频 (0.5~5 kHz) IPT。该系统的核心是采用分离铁芯变压器, 针对 AUV 对接时分离铁芯变压器 (transformador de núcleo separado, TNS) 气隙 (5~8 mm) 变化导致系统效率下降, 且传统最大效率点跟踪算法依赖主次侧通信、不适用深水环境的问题, 优化补偿电容与工作频率, 并提出仅需测量分离铁芯变压器原边电压电流即可调整励磁频率的最大伪效率点跟踪算法。实验验证, 该系统在气隙 5 mm 时系统效率达 92.91%, 气隙增至 8 mm 后效率下降至 89.77%, 经最大伪效率点跟踪算法调整频率后, 效率回升至 90.03%, 且 TNS 在空气与海水环境性能一致, 可实现 AUV 电池恒流充电, 该频段的涡流损耗比文献<sup>[48]</sup>中明确的 215.5~248.4 kHz 稳定频段降低 40%。

### 2.2.2 线圈错位问题

水下环境中, 线圈错位和软硬件兼容性等因素都会影响系统性能。Cai 等<sup>[50]</sup>采用有限元分析设计高抗错位磁耦合器, 搭建 600 W 原型机, 实验验证其在较大错位范围内效率稳定, 适配 AUV 动态对接场景。Qiao 等<sup>[51]</sup>设计开放式弧形磁耦合器, 发射端采用弧形结构适配 AUV 外壳, 接收端采用 H 形铁氧体磁芯增强垂直方向磁场耦合, 使系统自感稳定性提升 20%, 抗错位能力显著增强。Cai 等<sup>[52]</sup>设计了一种基于感应无线电力传输技术的高兼容性水下无线电力传输站。该站采用电感-电容-电容-串联 (indu-capacitor-capacitor-series, LCC-S) 补偿网络, 最大输出功率为 100 W, 最大传输效率为 61%, 并能兼容圆形和方形接收线圈, 实现了均匀的磁场分布和良好的错位容忍度, 可稳定为多种海底观测设备供电。Lin 等<sup>[53]</sup>设计水下双向 SWIPT 系统, 采用双控制器实现功率流双向控制, 增加了系统功能的灵活性。Yan 等<sup>[54]</sup>设计适配 AUV 圆柱形外壳的卷曲线圈, 优化线圈重量, 解决了传统平面线圈与 AUV 兼容性差的问题。

### 2.2.3 深海环境适应性

海水的高导电性和信道复杂特性等对 IPT 系统影响显著。Jenkins 等<sup>[55]</sup>分析海水环境下 IPT 系统线圈的电学特性, 对比不同电阻公式及不同介质中线圈电阻差异, 为水下线圈设计提供基础。Hayslett 等<sup>[56]</sup>分析海水环境下 IPT 面临的挑战, 提出添加谐振电路、优化线圈绕组等应对措施。Wang 等<sup>[57]</sup>采

用铁基纳米晶合金软磁材料设计弧形磁耦合器,在减少接收端重量与体积的同时,在10 MPa压强下磁导率仅下降5%,传统Mn-Zn铁氧体下降20%,解决了传统磁耦合器在深海环境的不足。Orekan等<sup>[58]</sup>提出基于k近邻算法的最大功率-效率跟踪技术,通过自适应转换器控制,实现效率>85%,可动态跟踪最大效率点,适配海水环境参数波动,确保系统在不同环境下高效运行。Yang等<sup>[59]</sup>设计SWIPT共享信道系统,采用时分复用和频移键控(frequency shift keying, FSK)调制,简化硬件集成,提升了系统在数据和功率传输方面的适应性。

#### 2.2.4 同步信息传输

目前传统的水下信息和能量无线传输技术,主要通过在时间维度上将能量和信息传输阶段分开,避免二者信号相互干扰,然而要提高传输效率,实现同步无线信息-能量传输是必须克服的一道难题。Li等<sup>[60]</sup>提出一种适用于水下应用的同时无线电力和数据传输系统,该系统集成全双工MIMO通信信道,通过在功率线圈上设置抽头加载高频载波,构建2×2 MIMO通信信道,实现每个信道1 Mbit/s的全双工数据传输,总速率达2 Mbit/s,同时支持1.1 kW的电力传输。系统采用分布式补偿策略将收发器端口电压应力从150 V降至50 V,其提出的简化降阶模型解决了高阶通信电路设计难题。实验验证该系统能在60 mm传输距离下实现直流-直流效率达93.4%,且在80 mm距离仍能稳定通信,同步信息传输可以极大增强水下通信和充电效率。

相较于电容耦合式无线传输技术,电磁感应式无线传输通过线圈感应将传输距离限制在更短的范围,实现了更高的能量传输效率。但其能量传输效率高度依赖于线圈的对接准度,对线圈偏移的抗性较差,从而对设计和操作要求更高。

### 2.3 磁耦合谐振式

磁耦合谐振式无线功率传输技术相较于CPT和IPT具有高效稳定功率传输、时分复用低干扰数据传输以及环境适应性强的特点,适用于水下中短距离的无线信号和功率传输。Silva等<sup>[61]</sup>设计基于磁共振耦合的功率逆变器,通过线圈两侧串联电容,构建全桥逆变器类DE工作模式,提升了逆变器在动态负载下的稳定性,优化了功率传输性能。Wang等<sup>[62]</sup>提出了一种适用于AUV的

水下同时无线电力与数据传输系统,采用双边双电感双电容(inductor-inductor-capacitor-capacitor, LLCC)补偿拓扑有效抑制功率通道对数据通道的共模干扰,通过将数据收发器连接到耦合线圈的最后一匝,利用线圈自谐振产生两个谐振频率实现高速全双工通信,同时降低数据通道的电压应力。实验搭建的518 W原型机验证了系统可行性,其功率传输效率达92%,正向数据速率500 kbit/s,反向数据速率700 kbit/s。Yang等<sup>[63]</sup>聚焦水下应用场景,提出了一种基于时分复用技术的水下磁耦合无线功率与数据传输系统。该系统采用共享耦合线圈通道,通过时分复用在同一传输周期内的不同时间段分别传输功率与数据,避免二者干扰。该系统功率传输工作频率为86 kHz,数据采用频移键控(frequency-shift keying, FSK)调制,载波频率分别为1 MHz和2 MHz。硬件上采用GaN全桥逆变器实现直流到高频交流的转换,现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)完成FSK调制解调,电路设计为初级侧串联补偿、次级侧无补偿结构,有效降低耦合线圈相互作用对数据传输的干扰。实验验证显示,在空气环境中线圈间距为4 cm时,系统传输200 W功率的效率达91.3%,数据传输率为200 kbit/s;在电导率为5.30 S/m的盐水池环境中,可实现自主水下航行器充电,并同步传输电池电压、电流、温度等状态信息,充电功率100 W时效率81.2%,且系统在空气、淡水、海水环境中均能稳定工作,兼顾了高功率传输效率与高数据传输可靠性。Li等<sup>[64]</sup>聚焦水下场景需求,提出一套具备1 Mbit/s全双工通信能力的水下同时无线功率与数据传输系统。系统采用磁耦合谐振式传输架构,功率与通信共享耦合线圈通道,不需要额外通信线圈。功率通道基于双边电感-电容-电容(indu-capacitor-capacitor, LCC)补偿拓扑,通过谐振特性抑制功率干扰,适配水下设备的非理想耦合场景。通信通道突破传统依赖局部电感-电容谐振的设计思路,从高阶电路全局视角构建,利用耦合线圈抽头注入/提取高频数据载波(前向8.75 MHz、反向5.91 MHz),在简化电路结构的同时保持高设计自由度,且通信中心频率不随传输距离偏移,具备抗偏移能力,解决了传统水下SWIPT系统电路复杂、通信速率低、抗偏移能

力弱的问题, 实现高功率传输效率与高数据可靠性的协同优化。

3种近场水下感应式 SWIPT 无线传输技术对比如表 3 所示。从表 3 可以看出, 3种技术在传输距离、传输效率及抗错位能力方面各有优劣, 在实际应用中应当根据其应用场景来确定合适的技术方案。

## 2.4 射频辐射技术

射频辐射技术通过能量辐射天线和整流天线将微波能量转化为直流电, 同时天线接收到发射机发射的射频信号, 可以实现较高速率通信, 如现有的 Wi-Fi 和射频标签识别等技术。尽管 RF 技术采用的高频电磁波在水下衰减极快, 但是 RF 是唯一能较好穿透“水-空界面”和“水-泥沙界面”的波束。如果 AUV 需要浮出水面传输数据, 或者与埋在海底泥沙下的传感器通信, RF-SWIPT 是有优势的。相比前文介绍的 3种近场电磁波 SWIPT 系统而言, RF-SWIPT 传输效率更低, 无线信息传输距离更远, 更适合较远场的具有介质变化的无线信息-能量协同传输。

Shinohara 等<sup>[65]</sup>针对传统近场波束功率密度不均匀导致整流天线射频-直流转换效率低下的问题, 提出一种适用于多旋翼无人机辅助无线无电池传感系统的简易平波束生成方法, 实现了空气介质中的近场微波无线电力传输。Liu 等<sup>[66]</sup>通过等离子体激励水箱, 实现了微波沿水表面的无线电力传输, 但是传输效率受制于海水盐度, 海水盐度从 30‰ 增至 35‰ (近海典型范围) 时, 微波沿水表面传输效率从 15% 降至 8%, 需通过 1.2 kV 激励电压、2.4 GHz 频率的等离子体参数优化缓解衰减, 且传输效率随距离衰减严重。

尽管面临传输距离短、抗干扰能力弱、介质和涡流损耗强、对准要求高等诸多问题, 但对于 AUV 等水下无人平台充电应用场景下的高信息传输速率和高能量传输功率要求而言, 基于电磁波的 SWIPT 仍是最具潜力的技术。

## 3 基于水下光学的协同传输

### 3.1 水下光信道特性与传输机理

水下光学 SWIPT 系统利用海水在蓝绿光波段 (450~550 nm) 的低衰减窗口, 能够实现 Gbit/s 级的高速通信与毫瓦级的能量传输, 具有传输速率高、能量收集效率高、安全性强以及抗干扰能力强的特点, 具有可观的应用前景。然而, 不同于陆地光通信, 水下光信道被认为是目前已知最复杂的无线通信信道之一<sup>[67]</sup>, 不同于陆地自由空间光通信, 水下光传输链路性能同时受到吸收与散射<sup>[68]</sup>、光学湍流<sup>[69]</sup>以及几何指向误差<sup>[70]</sup>的三重制约。

#### 3.1.1 吸收与散射特性

光在水下传播时, 会与水分子及悬浮颗粒发生相互作用, 导致能量耗散和方向偏折。该过程通常由比尔-朗伯定律描述, 接收光功率和传输距离  $d$  的关系可表示为

$$P_{\text{rx}} = P_{\text{tx}} \eta_{\text{opt}} e^{-c(\lambda)d} \quad (5)$$

其中,  $\eta_{\text{opt}}$  为能量转换效率,  $c(\lambda)$  为总衰减系数, 单位为  $\text{m}^{-1}$ , 由吸收系数  $a(\lambda)$  和散射系数  $b(\lambda)$  共同决定:

$$c(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda) \quad (6)$$

在实际应用中, 吸收损失主要由水分子、叶绿素和有色溶解有机物引起, 将光能转化为热能, 导致信号能量的直接损失; 散射损失主要由悬浮颗粒引起, 改变光的传播路径, 不仅造成能量损失还会引起多径效应, 导致码间干扰, 限制通信带宽。故而在深海或清澈水域, 可以选择衰减系数最小的蓝光 (450~480 nm) 进行传输; 在沿岸或浑浊水域, 浮游生物和有机物对蓝光吸收效应过强, 选择绿光 (520~550 nm) 波段更为合适。

#### 3.1.2 水下光学湍流

除了吸收和散射等静态衰减因素, 水下光学 SWIPT 系统还面临着由水下温度梯度、盐度梯度以及气泡运动引起的水体折射率波动, 从而导致水下光学信道产生扰动的动态因素, 称之为水下光学

表 3 3种近场水下感应式 SWIPT 无线传输技术对比

技术方案	传输距离/mm	传输效率	抗错位能力	适用场景
电容耦合式	10~100	71%~87%	强	轻量化、低成本、近距离
电磁感应式	5~80	61%~93%	弱	大功率、紧耦合 (AUV 对接)
磁谐振式	40~150	81%~92%	中	中短距离、需一定自由度

湍流<sup>[71]</sup>。这种水下光学湍流会导致以下现象。①光强闪烁:接收端的光斑亮度忽明忽暗,导致SNR剧烈波动,造成突发误码;②波束漂移:光束整体偏离接收孔径中心;③波束扩展:光斑面积变大,导致进入接收机的能量密度降低。

要消除水下光学湍流的影响,目前主流的做法是采用统计模型进行数据拟合。在弱湍流环境下,光强波动通常服从对数正态分布;在中强湍流环境下,伽马分布能更好地拟合实验数据,涵盖了由大尺度涡旋(折射)和小尺度涡旋(散射)引起的双重效应。

### 3.1.3 指向性误差与对准难题

从前文可以看出,常用的水下声学传输频段在蓝绿光频段,而由于蓝绿激光具有极高的方向性,水下光学SWIPT系统对收发对准程度极其敏感。而在实际应用中,系统不可避免会受到洋流冲击、AUV自身的推进器震动,以及平台机动导致的视轴抖动,这对系统的指向性误差修复提出了更高要求。未对准不仅意味着通信中断,更意味着能量收集链路的彻底失效(能量收集通常需要比通信更高的接收光强阈值)。因此,高精度的捕获、跟踪与瞄准机制是水下光学SWIPT系统实用化的关键。

## 3.2 接收机硬件架构设计

接收机架构是解决“速率-能量”权衡的核心。目前主流设计分为两类:一体化接收和分离式接收。一体化接收如Kim等<sup>[72]</sup>通过实验演示了水下光学SWIPT系统,以激光二极管作为发射机,对比了光电二极管和太阳能电池作为接收机的性能,实现了1 m内2%的能量转换效率。分离式接收如Lim等<sup>[73]</sup>设计并实现了一种水下光学SWIPT原型系统,其接收端结合多晶硅太阳能电池板与雪崩光电二极管(photodiode, PD),以同时提升能量收集(energy harvesting, EH)和信息解码(information decoding, ID)性能。其通过空间分割有效解耦了信息与能量通道,实现了能量收集在7 m距离达1.2 mW, ID有效距离8 m,并提出两种运行策略:一是在不考虑意外移动时,确定最优收发距离以最大化EH和ID;二是为PD选择合适参考电压,以准确区分数字信号。

## 3.3 传输协议与资源分配策略

水下光学SWIPT系统仍面临光波信息和功率传输之间的相互干扰问题,当下主流的资源分配策

略是通过TS或PS来实现二者相对独立工作。Ye等<sup>[74]</sup>研究了基于水下光学SWIPT系统的双跳水下光无线通信系统,通过TS方法将传输分为信息传输、能量传输和转发3个阶段,时间切换因子 $\alpha$  ( $0 < \alpha < 1$ )表示能量收集阶段占总传输周期的比例。通过优化TS因子和中继位置,在满足能量收集和传输速率约束下最小化平均误码率(bit error ratio, BER),实现了在有效感光区域直径 $D_r = 5$  cm, BER= $10^{-6}$ 时,带中继通信距离高达27.4 m。Uysal等<sup>[75]</sup>研究水下光无线通信(underwater optical wireless communication, UOWC)系统中的同步光波信息与功率传输(simultaneous lightwave information and power transfer, SLIPT)技术,考虑TS、PS和时间-功率分割(TS-PS)3种SLIPT方法,将分割/切换因子作为优化参数;通过推导平均收集能量、BER和频谱效率的闭式表达式,控制“硬件参数精细化设计-信道参数场景化模拟-SWIPT因子优化”的3层参数,在满足给定BER和频谱效率阈值的前提下最大化收集能量。最终在满足BER= $10^{-6}$ 和不同目标频谱效率 $\eta_{th}$ 约束下,实现TS-PS方法的收集能量-频谱效率区域最大,比基准自适应动态采样方法提升25%~40%的能量收集效率,且在复杂水下环境(沿岸水、强湍流)中仍能保持优势,显著延长水下传感器寿命。Kim等<sup>[76]</sup>提出一种基于TS的水下光学SWIPT方案,考虑多层湍流诱导的水下光信道(各层湍流独立且非均匀分布),针对确定性和随机性能量收集率两种情况,构建凹优化问题以最大化目标数据率下的能量收集,推导最优时间分割比的解析表达式,证明时间分割比小于0.5时性能更高效。

## 3.4 中继辅助与网络拓展

由于光波信息在水下环境中衰减较快,水下SLIPT系统的传输距离受到极大限制,如需将其应用到海洋物联网建设中,必须采用中继节点的解决方案来延长通信和能量传输距离。引入中继节点会衍生许多新问题,如中继节点通信失准、中继节点供电,以及物理安全等。Palitharathna等<sup>[77]</sup>提出一种结合光波功率传输的全双工(full duplex, FD)非正交多址(non-orthogonal multiple access, NOMA)水下光学SWIPT系统,考虑中继失准等实际因素;优化瞬时时间分割参数以最大化上行可达速率,实现FD模式比半双工(half duplex, HD)

模式平均可达速率高 70%，NOMA 比正交多址 (orthogonal multiple access, OMA) 在高发射功率下速率高 40%~50%；同时提出两种补偿方案以缓解中继失准导致的速率下降，两种补偿方案分别恢复 20%~25%、32%~40% 的速率。

Li 等<sup>[78]</sup>研究了并行中继辅助的水下光学 SWIPT 系统结合能量效率优化问题，中继节点配备能量收集装置，从源节点发送信号的直流分量获取能量，采用解码转发策略将信号传输至目的节点；利用高斯-拉盖尔求积公式推导各中继节点的收集能量，通过梅耶尔广义超几何函数推导中断概率，构建能量效率最大化问题并提出三级迭代算法优化偏置电流，实现了最优偏置电流下系统能量效率远高于固定偏置方案，且理论结果与蒙特卡罗模拟高度吻合；两个中继节点（特定位置）时能量效率达峰值，小光束发散角（6°）比大角度（12°）更利于提升效率。Kottilingal 等<sup>[79]</sup>提出一种基于激光的水下光 SWIPT 系统，实现对水下节点的无线充电和数据采集；搭建实验平台，采用蓝、蓝绿、红 3 种波长激光，评估系统在不同水下条件（盐度、悬浮颗粒浓度、温度、信道长度）下的性能，通过电池充电监测器测量充电电流评估节点能量效率。Li 等<sup>[80]</sup>提出含人工噪声的垂直中继水下光学 SWIPT 系统，推导可靠中断概率、保密中断概率与有效保密吞吐量（effective secrecy throughput, EST），通过交替优化（alternating optimization, AO）算法优化功率分割比，实现显著效果：理论推导与蒙特卡罗模拟高度吻合，验证了性能表达式的正确性；AO 算法优化后的 EST 远高于固定功率分割比方案，有效平衡系统可靠性与安全性，避免 EST 随发射功率升高而下降的问题；明确水型、湍流、指向误差等对性能的影响；人工噪声（artificial noise, AN）能有效抑制窃听，优化后系统在动态水下环境中仍保持高 EST，为系统物理层安全提升提供实用方案。

总体而言，水下光信道面临的挑战中，光信号较强的指向性使得水下光学 SWIPT 系统的对准要求高，且水下湍流、悬浮颗粒、盐度、温度等因素会显著影响光信号传输和能量收集效率，这也导致水下光学 SWIPT 的环境耐受性不如水下电磁 SWIPT 系统，但是水下光学 SWIPT 系统仍然是在中等距离上最具有潜力的传输系统。

## 4 基于水下声学的协同传输

水下声学传感器作为海洋物联网的重要组成部分，具有拓展性强的特点，通过水下节点组网能完成海洋环境监测、水下预警探测、水下定位导航和水下目标识别等功能。然而，电磁波在水下衰减严重，且频率越高衰减越快<sup>[81]</sup>。因此在水下，水下电磁 SWIPT 系统和水下光学 SWIPT 系统都难以满足远距离水下传感器节点供能与通信的要求。水下传感器节点由于功耗更低、分布更广，因此对能量传输距离的要求远高于对传输效率的要求，这种情况下声学 SWIPT 系统成了最优解。以接收机是否主动发射声波进行信息传输为标准，可以将水下声学 SWIPT 系统分为两类：主动式超声波协同传输和反向散射通信技术。

### 4.1 主动式超声波协同传输

主动式超声波协同传输是指发射端主动发射携带能量的高功率声波，接收端利用压电换能器将声压转换为电能并进行信息解码的技术。然而，水下 SWIPT 系统仍然面临着许多关键问题：一是水下声学信道因多径效应存在严重时频弥散，导致码间干扰显著且信道带宽有限；二是海洋环境的复杂性导致水下无线传感器节点充电难度大、电池寿命受限；三是传统 NOMA 技术难以直接适配水下场景，存在载波频偏敏感、能量消耗高等问题。如何在保证通信质量的同时最大化能量收集效率成为研究的核心挑战。

#### 4.1.1 时间反转与非正交多址

水声信道最显著的特征是严重的多径效应，导致接收信号出现时频弥散和严重的码间干扰（intersymbol interference, ISI）。传统的均衡技术虽然能消除 ISI，但往往会消耗接收端宝贵的能量。针对该问题，Esmail 等<sup>[82]</sup>提出“时间反转 NOMA”传输方案，将被动时间反转（time reversal, TR）技术与单输入多输出 NOMA 结合，同时集成同时无线信息-能量传输技术，使水下节点能从下行传输信号中收集能量。该方案建立 TR-NOMA 的平均 BER 数学框架，推导成对错误概率公式，设计含信息解码与能量收集模块的整流天线接收机，并通过 MATLAB 蒙特卡罗仿真（ $10^6$  随机比特）对比传统非协作 NOMA、协作 NOMA 的性能。该研究解决了水下信道时频弥散问题，从理论和算法上缓解了水下节点供电难题，提升了水下通信的频谱效率与抗载波频

偏能力,且仿真验证了TR-NOMA在BER、中断概率及能量收集量上显著优于传统NOMA。

#### 4.1.2 无电池节点设计

在硬件实现层面,传统水下节点面临的最大难题是电池维护成本高且充电时间长。设计无电池且能快速“冷启动”的接收机架构是主动式SWIPT的重要方向。Guida等<sup>[83]</sup>设计了首个基于超声波无线供电的无电池水下传感器节点,提出包含能量管理单元(含整流器、阻抗匹配网络)、供电单元和组网通信单元的系统架构。其突出特征如下。①超级电容器储能:节点采用超级电容器组(充电时并联以快速储能、供电时串联以满足12 V电压需求)替代传统电池,超级电容器的快充特性(1 m距离、1 W功率下充电时间<5 min)满足了节点快速补能需求;②换能器复用:通过复用同一超声换能器(AirmarP58)实现能量接收与数据通信,降低了节点体积与成本,并通过水箱实验测试了系统功率传输效率、整流效率、充电时间及有效数据率,验证了超声波无线能量传输在水下的可行性。该研究解决了水下设备对传统电池的依赖,避免了高成本的电池维护操作,利用超声波在水下衰减低的特性实现了比传统电磁感应WPT更长的传输距离,收集的能量可支持传感器完成数据采集与数据包(6 144 bit)传输。

#### 4.1.3 网络层协议改进

当点对点传输扩展到UWASN时,核心挑战转变为如何通过协议设计缓解多跳网络中靠近汇聚节点的传感器因转发任务重而过早耗尽能量的问题。Yi等<sup>[84]</sup>将无线信息与能量协同传输(wireless information and power transfer, WIPT)技术整合到UWASN中,设计了含能量收集(energy harvesting, EH)与信息解码(information decoding, ID)单元的WIPT水下声调制解调器模块,提出无线供电UWASN和同时无线信息-能量传输UWASN两种传输模型及对应部署场景(如油气管道监测、海洋环境数据采集),还研究了适配水下的时间切换、功率分裂、天线切换3种接收架构以及能量/联合信息能量/安全多天线波束成形以及基于放大转发的协作通信协议等关键技术。其解决了UWASN的可持续能量补充难题,避免了电池更换操作,缓解了多跳网络中的“能量空洞”问题,同时提升了信息传输效率、能量传输距离及系统安全性。

#### 4.1.4 技术局限

这些研究为水下传感器节点供电和通信提供了可行的解决方案,但仍存在一些不足。如文献[82]仅采用线性能量收集模型,未考虑实际场景中的非线性因素,可能导致实际应用效果与仿真偏差较大;文献[83]中复用换能器并未实现同步信息-能量传输,节点在充电阶段无法进行数据通信,且当传输功率超过1.28 W时,换能器可能因空化效应达到性能饱和,导致接收功率不再提升。另外,利用声波对水下传感器节点进行充电时,水下传感器节点吸收声波能量,再主动产生声信号,对能量传输效率和功率要求较高。

#### 4.2 反向散射通信技术

针对上文提到的主动式超声波协同传输技术对节点和发射机的功率效率要求较高的情况,被动式的反向散射通信技术作为水下SWIPT技术的一种,通过简单地调制并反射接收到的声信号,可以很好地解决这个问题。反向散射通信技术起源于无线电射频通信,由于其相较于传统通信技术超低的功耗水平,被广泛应用于超低功耗通信网络<sup>[85]</sup>。无线电反向散射传感器可以通过简单地反射环境中的无线电信号,以接近零的功率进行无线通信<sup>[86]</sup>。将反向散射通信技术推广到水声通信领域中,反射节点以特定方式反射声源的声信号,具备超低功耗特性,从而消除对电池的需求,极大节约成本,并使得长期稳定的水下通信组网成为可能,有望应用于低功耗海洋物联网建设<sup>[87]</sup>。

##### 4.2.1 反向散射通信理论研究

###### 1) 反向散射通信原理

水下反向散射通信系统如图3所示,该系统由声学发射机Tx、水听器接收机Rx和压电反射节点PAB(piezo-acoustic backscatter)组成。与射频反向散射通信系统相似,PAB接收到来自发射机持续发射的声信号后,声信号由于压电效应转化为电信号。当PAB处于能量收集状态时,开关断开,电信号经过整流变成直流信号被收集存储在电容中,用于节点信号调制供电;当PAB处于反射状态时,开关闭合导致短路,电信号通过回路再次作用到压电陶瓷上,由于逆压电效应,电信号转化为压电陶瓷的机械振动,从而激励压电陶瓷振动将声信号反射到接收机上。节点通过控制回路不同的阻抗状态和切换周期可以控制反射信号的幅度和频率,实现

反射声信号的不同调制,接收机通过解调信号,可以得到反射节点存储的信息,从而实现通信功能。

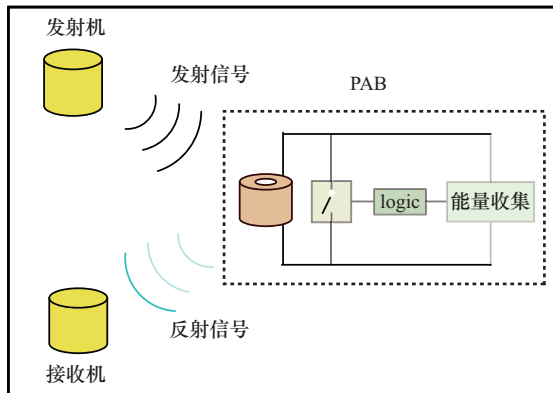


图3 水声反向散射通信系统

## 2) 反向散射信道研究

水声信道具有衰减严重、多径效应和频散效应的特性<sup>[88]</sup>,使得其相比空气中的无线电通信更为复杂。要将水声反向散射通信从理论拓展到实际应用,必须建立水声反向散射通信的信道链路模型。射频反向散射链路模型已经建立,并广泛应用于表征和研究射频反向散射网络<sup>[89]</sup>。然而,由于水下反向散射节点的机电特性,射频反向散射链路模型无法直接应用于水下反向散射通信。而传统的水声通信链路模型不依赖反射进行通信,因此也无法表征水下反向散射通信<sup>[90]</sup>。

为此,Akbar等<sup>[91]</sup>提出了第一个完备的端到端链路预算分析模型来表征水下反向散射的理论极限,该模型通过水下反向散射声信道研究,对系统的下行链路和上行链路模型进行了相关参数推导,定义了通用表达式来匹配声学换能器的机电耦合特性,并将推导出的反射声源级(backscatter level, BL)转化成了实际应用中的SNR。通过COMSOL建立有限元模型进行数值仿真,对理想球形换能器以及实际使用的封装圆柱形换能器进行了分析对比,结果显示,链路模型和数值计算结果都非常匹配,充分验证了该链路预算模型的准确性。最后,通过该链路模型分析了输入电功率、传感器指向性和传播损失对于实际作用距离的影响,以6 dB作为解码SNR的极限阈值,得出反向散射系统的理论极限通信距离可以达到千米量级。

然而,该信道链路模型较为简单,并未考虑到水声环境的多径效应,对于浅海情况适用性不强。

Lin等<sup>[92]</sup>提出了5阶段反向散射模型,并推导了反向散射系数表达式,基于该模型提出了反向散射声通信在浅海中的信道模型,充分考虑了海面和海底的反射。根据压缩感知理论将浅海水声信道估计问题建模为稀疏向量恢复问题,并利用正交匹配追踪(orthogonal matching pursuit, OMP)算法得到信道估计器。通过仿真实验,对比了OMP算法和传统的最小二乘(least square, LS)法和稀疏贝叶斯学习(sparse Bayesian learning, SBL)的数值结果,实验验证了其提出的OMP算法在估计精度和复杂度上分别优于LS法和SBL<sup>[93]</sup>。

## 4.2.2 水下反向散射通信研究进展

水下反向散射声通信技术自2019年被提出以来,由于其超低功耗的特点,在短短几年时间内便展现出了良好的发展势头和可观的应用前景。但其仍有许多不可忽视的缺陷,如数据吞吐量较低、工作带宽较窄、通信距离过短等。针对以上缺陷,许多研究人员进行了相关改进工作。

### 1) 反向散射通信节点样机PAB

Jang等<sup>[87]</sup>利用聚氨酯对圆柱形压电陶瓷进行封装,并设计电路板以控制电极的开关,制作出了反向散射通信节点样机PAB,并在封闭水箱中进行了相关性能测试。实验结果表明,PAB实现了高达3 kbit/s的数据吞吐量和10 m的通信范围,并将最高功耗控制在500  $\mu$ W,这个结果显示出了PAB作为反向散射通信节点的可行性和巨大应用潜力。

翟喜洋等<sup>[94]</sup>也对反向散射节点进行了设计和封装制作,在此基础上提出了一种基于直接序列扩频的水声反向散射通信系统多节点接入方法,为每个通信节点分配不同的伪随机序列,并用不同频率方波调制开关键控的频率,从而实现码分多址和频分多址,在不增加伪随机序列长度和个数的前提下进一步提高可接入节点的数量。随后相关实验验证了该方案的有效性。采用该方案能在发射机功率为4 W, Bn距Rx为25 cm时,实现500 bit/s的通信速率。

### 2) 高阶调制反向散射传感器PAB-QAM

PAB的信号调制方案仅能实现压电节点在反射与吸收之间的状态切换,对应反射信号的“1”和“0”状态。该方案过于简单,导致其数据吞吐量被限制在1~3 kbit/s,从而极大限制了PAB的使用场景。高阶调制可以提高数据吞吐量,从而使系统突

破原有的限制<sup>[95]</sup>。Afzal等<sup>[96]</sup>提出了第一个能够实现高阶调制的水下反向散射传感器设计——PAB-QAM。该系统通过正交幅度调制,实现了多种不同的反射状态,从而实现了反向散射的高阶调制。PAB-QAM如图4所示,该系统利用压电换能器的机电耦合特性,改变负载阻抗以实现不同的反射状态。电路使用微控制器,控制系统根据所需传输的比特切换负载阻抗,从而控制反向散射状态。接收机感知不同的反射状态,并以此解码发送的消息。通过实验发现,对于超过10 dB的所有SNR值,PAB-QAM在相同速率下实现了与现有水下反向散射调制方案相比两倍的吞吐量。而对于某些低信噪比值(0~5 dB),采用二进制相移键控(binary phase shift keying, BPSK)可能比QAM更可取。

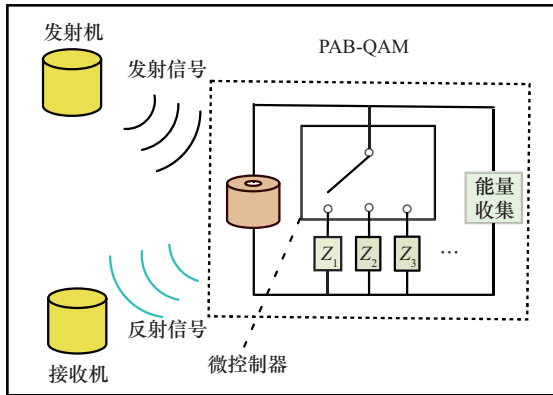


图4 PAB-QAM

### 3) 超带宽反向散射传感器U<sup>2</sup>B

PAB的另一个缺陷是其工作带宽较窄,这是由于压电材料通常只在其谐振频率附近发生共振<sup>[97]</sup>。当工作频率偏离其谐振频率时,振幅急剧下降,导致能量转换效率降低。而通常压电材料的谐振频率范围较窄,使得节点的工作带宽被限制在较窄的范围,从而严重限制了通信速率。

对此,Ghaffarivardavagh等<sup>[98]</sup>通过创新硬件设计,提出了一种超带宽水下反向散射(ultra-wideband underwater backscatter, U<sup>2</sup>B)节点,该系统将超带宽(ultra-wideband, UWB)技术的优势带到了水下反向散射通信中。超带宽技术是射频中的一项成熟技术,在此基础上利用并发传输可以拓展通信范围、提高吞吐量和扩展无线通信网络<sup>[99]</sup>。如图5所示,U<sup>2</sup>B通过在内外两层谐振频率不同的压电材料之间填充聚氨酯,使内外层压电材料形成耦合,

极大拓宽了换能器节点的工作带宽,从而使单个换能器节点表现出宽带特性。

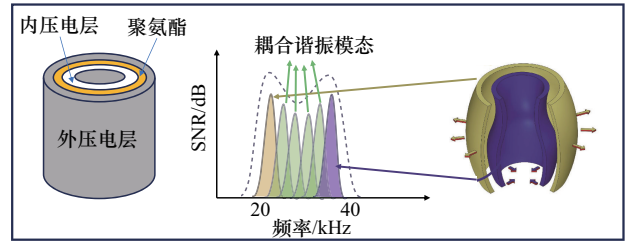


图5 U<sup>2</sup>B 谐振频率

较宽的带宽使得U<sup>2</sup>B节点不需要通过扩展多个节点就可以实现频分多址(frequency division multiple access, FDMA),从而消除了多节点反射信号之间的干扰。为最小化下行链路和上行链路信号之间的相互干扰,该团队<sup>[98]</sup>还提出了一种滤波方案。即在反射过程中通过节点施加其他频率的信号,将反射散射信号和直达信号在频域上区分开,再用陷波滤波器进行滤波可以得到仅剩反向散射信号的频域信号。通过水箱实验(淡水环境、发射功率3 W)证明,U<sup>2</sup>B可以实现62 m通信范围、高达20 kbit/s的通信速率,且支持最多10个节点的频分多址接入。

### 4) Van Atta 反向散射结构

PAB的反射信号传播方式为球面拓展,能量损失较大,无法实现远距离传输。针对该缺陷,Eid等<sup>[100]</sup>中提出了一种新型的范阿塔反向散射(van atta acoustic backscatter, VAB)节点。VAB节点结构如图6所示,其参考无线电通信中的RF天线结构,通过引入基于变压器的匹配网络和交叉极化差分开关机制,协调信号在任意两个连接的压电节点之间的传输。在保持其各自高性能特性的同时,使一对VAB节点的反射信号在信号入射方向同相叠加,得到与主动波束类似的效果,实现方向回溯。

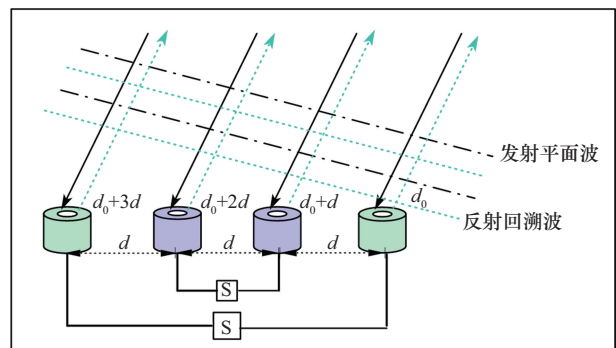


图6 VAB节点结构

通过扩展 VAB 节点对的数量, 该装置能实现更高的 SNR 增益。在空间上将节点相互交错, 可以有效抑制节点自身体积导致的相互遮挡。最后通过实际环境中的大量实验, 验证了 VAB 的性能, 对 4×2 的 VAB 阵列而言, 能在 150 m 通信范围、标准吞吐量 (2 kbit/s) 和较低功率 (1.8 W) 时得到能够保障水声通信的误码率水平 ( $10^{-3}$  数量级)。

上述水声反向散射通信装置对比如表 4 所示。从表 4 可以看出, 随着对 PAB 原有缺陷针对性的改进, PAB-QAM、U<sup>2</sup>B 节点和 VAB 节点在通信速率和通信距离等性能指标上有了显著提升, 充分说明了水声反向散射通信技术在实际应用中的巨大潜力。

表 4 水声反向散射通信装置对比

装置	通信距离/m	通信速率 (BER≤ 10 <sup>-3</sup> ) / (kbit·s <sup>-1</sup> )	功率/μW
PAB	10	3	≈500
PAB-QAM	10	6	120~500
U <sup>2</sup> B	62	20	≈500
VAB	150	2	≈1 000 (阵列)

#### 4.2.3 水下反向散射通信技术应用

##### 1) 水下定位系统

水下定位技术在环境、工业和国防等领域因其具有极为重要的科学研究价值和军事战略意义, 已成为世界各国争相发展的核心设施与关键技术<sup>[101]</sup>。传统的水下定位技术主要通过测量两个节点之间的到达时间来计算距离差 (time of arrival, ToA), 但由于反向散射节点通过采集声能进行工作, 会存在无法确定的唤醒时间, 因此无法直接采用 ToA 进行定位估计。

Ghaffarivardavagh 等<sup>[102]</sup>提出了一种水下反向散射定位 (underwater backscatter localization, UBL) 系统。UBL 系统采用时频方法来估计 ToA, 通过执行跳频收集频域特征, 将不同频率的信道串联, 再对信道进行反傅里叶变换, 获得时域信道表达式。这种方法从信道估计值中获得不同节点的到达时间, 能够完全消除唤醒滞后时间这种先验信息未知对 ToA 估计的影响。采用上述方法进行实验, 验证了 UBL 系统对于浅水环境下 4 m 处静态目标的分辨率能够达到 10 cm。

##### 2) 水下声学地标

目前水下反向散射通信技术受通信距离和节点

拓展的限制, 要将其定位功能扩展到潜艇等远距离长航程目标存在较大难度。但水声反向散射通信技术较高的定位精度, 对于 AUV 等越来越多用于小规模或有限任务 (大约几十米) 和复杂的环境的平台而言具有重要意义<sup>[103]</sup>。利用该技术开发纯被动声学设备, 将其用作声学标志, 称为具有独特反向散射特征的声学识别 (acoustic identification, AID)<sup>[104]</sup>标签。AID 工作原理如图 7 所示, 通过反射入射声呐信号, 发出唯一且可被 AUV 仪器识别的信号, 这些信号中可以存储地标的位置信息, 再通过多个声学地标进行交叉定位可以得到 AUV 和地标的相对位置, 从而解算出 AUV 的位置信息。这种方法优势在于其多功能性和无源性, 但由于它们的被动设计, 它们所能提供的信息内容有限。

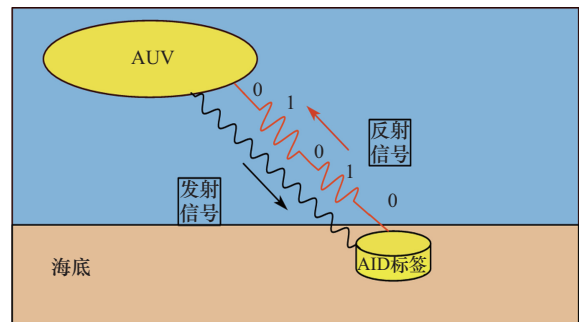


图 7 AID 工作原理

Bhardwaj 等<sup>[105]</sup>利用多层压电阻抗匹配超声换能器<sup>[106]</sup>, 设计了主动、无电池的声学辅助标签。该设计通过多层压电阻抗匹配设计实现了传感器的带宽拓展<sup>[106-107]</sup>, 克服了现有方法的能量、服务和信息内容限制。在超声宽带上利用频域复用技术, 可实现声能采集 (1.3 MHz 左右) 和反向散射通信 (600~800 kHz) 同时进行。这种频域复用提高了能量效率, 减少了与高振幅内载波的带内自干扰, 在改善了通信质量的同时带来了更高的通信速率。实验结果显示, 在目标频带 (600~800 kHz) 和 6 m 的有限通信范围内, 入射宽带脉冲的反射系数幅度调制超过 50%, 同时还实现了最高 200 kbit/s 的通信速率, 在可实现的数据传输速率和低信噪比方面超过了最先进的性能。

Bhardwaj 等<sup>[108]</sup>基于先前的 AID 标签概念, 提出了一种用于短距离水下通信的宽带无线无电池声学识别标签。该研究基于压电换能器技术, 设计了工作在 200~500 kHz 宽带超声范围的反向散射标

签,通过声学与电阻抗匹配优化,实现了源到标签的电效率超2% (6 m距离),并在6 m处达成>83.3 kbit/s的数据速率与>170 dB声压级的反向散射通信性能,理论分析其工作范围可达10 m。研究详细阐述了压电元件选型、阻抗匹配设计及电路优化过程,通过水箱实验验证了标签在能量收集、高速通信及抗失准场景下的性能,为自主水下航行器的短距离高精度导航与通信提供了低功耗解决方案。

### 3) 水下无线成像技术

水下成像在海洋学、海洋生物学、气候学以及国防领域都有重要应用。尽管现有的水下无线成像技术近年来取得了重大进步,但现有成像装置都依赖具有固有寿命的电池供电<sup>[109]</sup>,使得水下观测面临难以长期、实时、原位成像的困难。Afzal等<sup>[110]</sup>提出了一种可以实现大规模部署的低功耗水下反向散射成像系统,并基于该系统制作了水下反向散射成像装置。该成像装置在PAB的基础上增加了主动照明装置和一种超低功耗的互补金属氧化物(CMOS)图像传感器,使其既能进行被动成像,也能进行主动照明工作。装置采用可编程逻辑芯片控制,避免了超低功耗CMOS图像传感器(Mbit/s级)和水下声学通信信道(kbit/s级)之间的带宽

不匹配问题。为提高能量收集效率,该装置利用两个传感器将能量收集和数据传输过程隔开,同时设置了一个电压分位器,防止电容器过早向电子元件供电导致电源提前耗尽。在实验中,该装置完全依靠收集的能源进行主动多色照明及成像工作,在受控的有光环境及黑暗环境中均成功实现了水下无线成像。实验结果表明,利用接收机上的决策反馈均衡器(decision feedback equalizer, DFE)可以稳健地解码40 m以内的数据包,且其功耗比传统有源的水下无线成像方法低5个数量级。

水下反向散射声通信技术具有无电池设计,不需要主动产生和发射信号,因此具有良好的功耗控制水平,并且能够实现能量收集和通信同步进行,为水下声学SWIPT系统提供了巨大潜力的方案。主动式与被动式声学SWIPT对比如表5所示。

## 5 技术难点与发展趋势

上文详细探讨了基于电磁波、光学及声学的3类水下无线信息-能量协同传输技术,这3类技术的对比情况如表6所示。综合来看,这3种技术路线受制于水下物理场特性的不同,展现出了截然不同的性能边界与应用场景,形成了互补的格局。

表5 主动式与被动式声学SWIPT对比

对比维度	主动式声学SWIPT	被动式声学SWIPT
工作原理	节点主动产生声信号并由功放驱动发射	节点不产生信号,仅通过调制反射信号
节点能耗	较高,通常为瓦级,需超级电容或电池	极低,微瓦级,可实现完全无源运行
有效传输距离	远,可达数百米甚至数千米	中等,通常为10~150 m(受双程损失限制)
数据传输速率	高,支持OFDM等复杂调制	低,通常为1~20 kbit/s
硬件复杂度	高,需要模数转换、功放等器件	低,仅需简单逻辑电路和压电陶瓷换能器
典型适用场景	水声通信	水下定位信标

表6 3类SWIPT对比

对比维度	水下电磁SWIPT	水下光学SWIPT	水下声学SWIPT
主要物理机制	近场电磁耦合	远场光辐射	压电效应
典型传输距离	极短(5~150 mm)	中/短(数米到数十米)	远(百米~千米级)
能量传输效率	高(60%~93%)	中(2%~15%)	极低(<1%且随距离指数衰减)
数据传输速率	中(kbit/s~Mbit/s)	极高(Mbit/s~Gbit/s)	低(bit/s~kbit/s)
信道核心挑战	涡流损耗、线圈错位	浑浊度/散射、湍流闪烁、对准误差	多径效应、高时延、多普勒频移
抗干扰/鲁棒性	强	弱(极易受遮挡和环境光干扰)	中(受环境噪声和多径干扰)
安全性	高(近场约束,难以窃听)	高(视距传输,波束窄)	低(广播特性,易被监听)
典型应用场景	AUV等水下基站对接充电	数据中心高速互联、近距离采集	传感器网络唤醒、长效监测

## 5.1 技术难点

### 5.1.1 复杂环境的传输损耗和干扰强

海水对于电磁信号的衰减能力极强，在浑浊水域时蓝绿激光和射频信号散射严重；而水下声学信道复杂，水下声信号存在长传播时延（数百毫秒至秒级）、严重多普勒频移、多径效应，且路径损耗随频率变化，非白环境噪声（湍流、船舶、波浪噪声叠加）进一步降低信噪比，对无线信息传输产生较大干扰。对于反向散射通信技术而言，反射节点仅通过反射调制接收到的信号，水下障碍物（如礁石）和生物活动（如鱼群）会导致信道多径效应增强，使信噪比降低 8~12 dB。

对于感应式无线传输而言，海水的高导电性会导致感应耦合系统产生涡流损耗和辐射电阻，且损耗随频率平方增加；海洋微生物在线圈表面堆积附着也会增加 Tx-Rx 间隙；海底高压环境会降低铁氧体磁导率，导致磁通量屏蔽减弱；低温环境（深海常年在 4° 左右）会增加电池内阻，降低电池充电效率；洋流还可能导发射机和接收机线圈错位，降低耦合系数，影响传输效率。

### 5.1.2 能量-信息传输协同难

传统同时无线信息-能量传输系统中，功率与通信信道易相互干扰。目前针对无线信息-能量传输的系统大多采用的是时间切换，时间切换接收机需严格时间同步（水下同步误差超过 100 ms），否则会导致能量收集阶段和信息传输阶段在时间上紊乱，从而降低信噪比和能量传输效率；同时超声 WPT 与通信共用换能器时，需设计切换机制，如金属-氧化物-半导体场效应晶体管（MOSFET），但 MOSFET 开关切换延迟（约 10  $\mu$ s）易导致信息传输帧丢失，需通过 FPGA 预同步控制缩短延迟，确保通信连续性，切换延迟易导致通信中断或能量损失。反向散射通信中逻辑控制开关对接收信号进行频繁反射调制和吸收会增加能耗。文献[83]提出通过“频域分割”区分能量收集（1.3 MHz 频段）与信息传输（600~800 kHz 频段）区间，可将能量收集效率提升 15%，同时避免信号干扰，但是这种解决方案对于硬件本身的工作频率带宽要求很高。

### 5.1.3 材料限制与硬件设计瓶颈

一是 AUV 壳体集成困难：螺旋线圈虽耦合系数高（比螺旋管线圈高 20%），但在 AUV 弧形壳体上难以集成，而矩形线圈漏磁多，且材料消耗大。

二是深海环境对设备性能要求高：深海设备需耐压壳体（如 SiALON 陶瓷），但会导致磁耦合效率损失 >2%；海水盐度导致线圈腐蚀，目前传统的 Mn-Zn 铁氧体在高频段（>200 kHz）磁损耗明显，铜线圈的交流电阻随频率升高而增大，需依靠 Litz 线降低损耗但成本较高<sup>[111]</sup>；锂电池低温充电时间延长，680 W 系统仅需 6 min 便能传输满足 AUV 巡航 1 h 所需的电量。三是储能设备设计难度高：反向散射节点需利用超级电容进行储能调节逻辑切换开关，采用“并联充电-串联供电”切换，硬件复杂度较高。

### 5.1.4 系统适配性与协议标准化问题

一是信道状态信息获取与资源分配难：水下信道动态波动，CSI 反馈需要占用额外带宽，限制了通信速率<sup>[35]</sup>；在全双工多节点同时信息传输时，下行功率传输中远距离节点功率传输效率较低，上行功率节点需发射更高功率，从而导致不同距离用户吞吐量不同，对资源分配提出了较高要求。二是跨层协议不兼容：UWASN 中 IPT 与传统无线信息传输（wireless information transmission, WIT）的 MAC 协议并未协同，需要协调能量收集与信息传输时序，导致现有协议在水下长延迟场景下信道利用率不足 50%<sup>[84]</sup>。三是行业标准缺失：IPT 系统的谐振频率、线圈尺寸和安全规范无统一标准，不同厂商 AUV 充电设备互操作性差，也对 IPT 技术的发展造成了一定制约。

### 5.1.5 安全性挑战

AUV 的紧凑布局要求 WPT 系统必须采用高频电磁波，而这种高频电磁波会干扰 AUV 上的声呐等传感器，同时还可能改变海洋生物行为，相关的屏蔽技术尚不成熟。电容耦合式无线信息-能量传输还存在高功率传输时会在电极板上产生显著的焦耳热，同时强电场存在漏电和击穿介质的风险，从而对设备造成损坏。

## 5.2 发展趋势

针对上述技术难点和目前水下 SWIPT 技术的成熟度，可以对未来 5~10 年技术的发展路径进行预测和概括，具体技术发展路线如图 8 所示。

### 5.2.1 近期突破：硬件及物理层优化

1~3 年内需要解决“能传”的问题。其中，AUV 对接技术和传感器唤醒在水下电磁波 SWIPT 系统中已基本解决，点对点的同步通信协议也已经

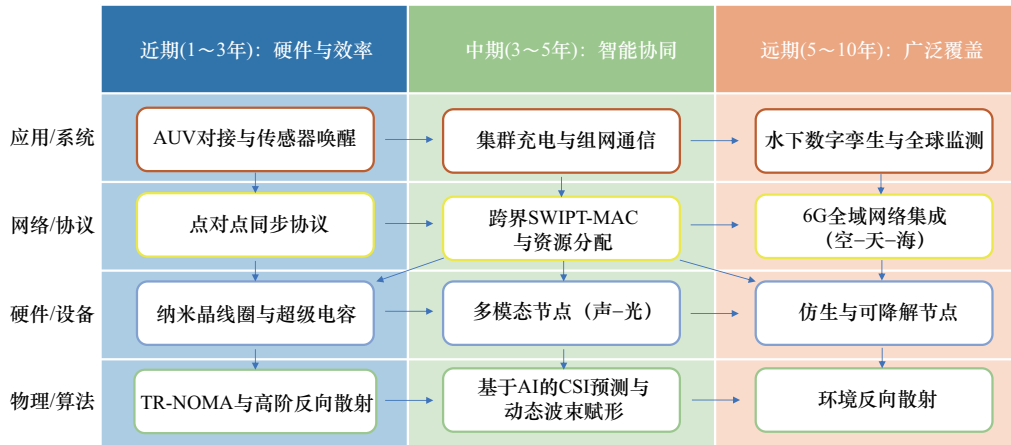


图8 水下SWIPT技术发展路线

较为成熟。在物理层面上,可以通过发展时间反转技术将多径信道转化为类冲激响应,降低码间干扰,功率分裂接收机实现能量接收与信息解码协同。同时通过高阶调制的反向散射技术,提升反向散射通信的速率,使其能够基本满足应用要求。

在硬件层面上,硬件设计水平如材料、设计工艺等决定了传输系统的性能上限。对电磁波SWIPT系统而言,通过设计弧形铁基纳米晶合金线圈,可以提高错位下的传输效率并减轻系统重量,更加适配AUV弧形壳体。同时可以利用多发射-多接收的复合线圈架构,通过优化阻抗参数建模来优化阻抗匹配,以提高传输效率和覆盖范围。另外,由于深海的高压环境,无论是哪种传输系统都有耐压和耐污的要求。通过采用新型材料、外壳结构改进和防生物附着涂层,可以让传输系统在高压环境下仍然具备较高的传输效率,提升系统整体稳定性。

### 5.2.2 中期发展:智能协同与跨介质互联

解决了“能传”问题之后,要解决“传好”的问题。对于海洋物联网的节点如AUV等,要实现集群充电和通信组网的难点。在协议与系统集成层面,核心是围绕水下环境高衰减、多径干扰、时延波动的传输特性,构建“跨层协同、资源共享、标准统一、智能适配”的一体化体系。从协议设计来看,需突破传统陆地协议局限,提出专用的SWIPT-MAC协议,利用好前文提到的SWIPT的4种分割机制,重点解决信息-能量传输的时序与频率资源冲突,实现动态时隙调度、自适应信道编码与多模态传输的协议互通。从算法层面来看,通

过强化学习最大效率跟踪以及将轻量化AI模型集成到系统中,压缩CSI估计模型参数,减少数据传输量,从而降低节点能耗,提高通信速率。同时针对水下三维空间部署、节点能量受限等特点,优化路由决策的能效与可靠性,融入抗干扰与差错控制机制以应对信道动态变化。从系统集成来看,需采用分层解耦与跨层协同结合的架构,推动物理层、数据链路层与应用层的深度适配,实现无线充电与信息传输模块的硬件一体化设计,避免空间与频率资源浪费。同时,需加快行业标准化进程,统一不同技术的协议接口与安全规范,解决不同设备间的兼容性问题。

### 5.2.3 远期愿景:6G驱动的全域感知

通过水下信息-能量协同传输一体化技术,以浮标/AUV作为中继,以水声通信为主要通信手段,将水下通信网络连接到水面和陆基通信节点,从而构建起“深海-水面-空天”无缝衔接的全域通信与供能体系,解决传统水下节点续航难题,支撑百万级传感器组成的深海监测网络。最终,在6G框架下,将实现从深海万米到近地轨道的全域覆盖,为智慧海洋、深海资源开发、全球应急通信等场景提供泛在、高效、安全的技术支撑。

## 6 结束语

本文系统综述了水下无线信息-能量协同传输技术的研究现状。从核心架构出发,深入剖析了TS、PS、SS、FS及反向散射五大技术路线的机理,并详细探讨了声、光、电磁3种物理场在水下环境中的异同与适配性。研究表明,尽管水下SWIPT面临着信道环境复杂、协同机制难、硬件

适配差等严峻挑战,但随着新材料(如铁基纳米晶)、新算法(如时间反转、强化学习)及新架构(如无源反向散射)的不断涌现,其技术成熟度正在快速提升。未来,朝着“智能化、多模态、全域覆盖”方向演进的水下 SWIPT 技术,将成为构建长效、绿色、泛在的海洋物联网的关键基石。

### 参考文献:

- [1] Wang C L, Peng Y H, Wu J J, et al. Deterministic scheduling and reliable routing for smart ocean services in maritime Internet of things: a cross-layer approach[J]. *IEEE Transactions on Services Computing*, 2024, 17(6): 3387-3399.
- [2] Huo Y M, Dong X D, Beatty S. Cellular communications in ocean waves for maritime Internet of Things[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(10): 9965-9979.
- [3] Sun T Y, Feng Y, Li C, et al. High precision sea surface temperature prediction of long period and large area in the Indian Ocean based on the temporal convolutional network and Internet of Things[J]. *Sensors*, 2022, 22(4): 1636.
- [4] Teeneti C R, Truscott T T, Beal D N, et al. Review of wireless charging systems for autonomous underwater vehicles[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2021, 46(1): 68-87.
- [5] Zeng Z Q, Fu S, Zhang H H, et al. A survey of underwater optical wireless communications[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 19(1): 204-238.
- [6] 瞿逢重, 付雁冰, 杨劲坚, 等. 应用于海洋物联网的水声通信技术发展综述[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2023, 44(11): 1937-1949.  
Qu F C, Fu Y B, Yang S J, et al. An overview of the development status of underwater acoustic communication technology applied to ocean Internet-of-things[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2023, 44(11): 1937-1949.
- [7] Yan J, Guan X P, Yang X, et al. A survey on integration design of localization, communication, and control for underwater acoustic sensor networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2025, 12(6): 6300-6324.
- [8] Rahmati M, Pompili D. UNISec: inspection, separation, and classification of underwater acoustic noise point sources[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2018, 43(3): 777-791.
- [9] Liou E C, Kao C C, Chang C H, et al. Internet of underwater things: Challenges and routing protocols[C]//*Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Applied System Invention (ICASI)*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1171-1174.
- [10] Ali M F, Jayakody D N K, Chursin Y A, et al. Recent advances and future directions on underwater wireless communications[J]. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2020, 27(5): 1379-1412.
- [11] Aijun S Milica S, Mandar C. Editorial underwater acoustic communications: where we stand and what is next?[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2019, 44(1): 1-6.
- [12] Jiang S M. State-of-the-art medium access control (MAC) protocols for underwater acoustic networks: a survey based on a MAC reference model[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(1): 96-131
- [13] Darchshoorzadeh A, Boukerche A. Underwater sensor networks: a new challenge for opportunistic routing protocols[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(11): 98-107.
- [14] Goyal N, Dave M, Verma A K. Protocol stack of underwater wireless sensor network: classical approaches and new trends[J]. *Wireless Personal Communications*, 2019, 104(3): 995-1022.
- [15] Sendra S, Lloret J, Jimenez J M, et al. Underwater acoustic modems[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(11): 4063-4071.
- [16] Diamantoulakis P D, Karagiannidis G K, Ding Z G. Simultaneous lightwave information and power transfer (SLIPT)[J]. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2018, 2(3): 764-773.
- [17] Hossain M A, Md Noor R, Yau K A, et al. A survey on simultaneous wireless information and power transfer with cooperative relay and future challenges[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 19166-19198.
- [18] Yao Y S, Sun P F, Liu X S, et al. Simultaneous wireless power and data transfer: a comprehensive review[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2022, 37(3): 3650-3667.
- [19] Chen X M, Zhang Z Y, Chen H H, et al. Enhancing wireless information and power transfer by exploiting multi-antenna techniques[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(4): 133-141.
- [20] Clerckx B, Zhang R, Schober R, et al. Fundamentals of wireless information and power transfer: from RF energy harvester models to signal and system designs[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2019, 37(1): 4-33.
- [21] Wibisono A, Alsharif M H, Song H K, et al. A survey on underwater wireless power and data transfer system[J]. *IEEE Access*, 2024, 12: 34942-34957.
- [22] Omeke K G, Mollé M, Shah S T, et al. Toward a sustainable Internet of underwater things based on AUVs, SWIPT, and reinforcement learning[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(5): 7640-7651.
- [23] Ghosh P, Sharma S, Roy S D, et al. Energy harvesting assisted-cooperative non orthogonal multiple access (NOMA) using time switching relaying (TSR) protocol[C]//*Proceedings of the 2022 IEEE Calcutta Conference (CALCON)*. Piscataway: IEEE Press, 2022: 113-116.
- [24] Hasan W K, Ahmad I, Phung Q V, et al. Energy-efficient resource allocation for mission-critical applications in underwater acoustic networks[J]. *IEEE Access*, 2025, 13: 151681-151695.
- [25] Jamali M V, Salehi J A, Akhouni F. Performance studies of underwater wireless optical communication systems with spatial diversity: MIMO scheme[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2017, 65(3): 1176-1192.
- [26] Wu J, Feng K, Jin N, et al. A simultaneous wireless information and power transfer system with independent channel for information transfer[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 125610-125619.
- [27] Yang L, Zhang Y Q, Li X, et al. Comparison survey of effects of hull on AUVs for underwater capacitive wireless power transfer system and underwater inductive wireless power transfer system[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 125401-125410.
- [28] Zhang H, Lu F. Insulated coupler structure design for the long-distance freshwater capacitive power transfer[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(8): 5191-5201.
- [29] Lu F, Zhang H, Hofmann H, et al. A double-sided LCLC-compensated capacitive power transfer system for electric vehicle charging[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 30(11): 6011-6014.
- [30] Liu Y P, Wu T, Fu M F. Interleaved capacitive coupler for wireless power transfer[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, 36(12): 13526-13535.
- [31] Rong E G, Sun P, Qiao K H, et al. Six-plate and hybrid-dielectric capacitive coupler for underwater wireless power transfer[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2024, 39(2): 2867-2881.

- [32] Ieperen A, Derammelaere S, Minnaert B. Coupling-independent capacitive wireless power transfer with one transmitter and multiple receivers using frequency bifurcation[J]. *IEEE Open Journal of Power Electronics*, 2024, 5: 891-901.
- [33] Da C L, Li F, Wang L F, et al. Analysis and implementation of underwater single capacitive coupled simultaneous wireless power and bidirectional data transfer system[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2024, 71(12): 15674-15684.
- [34] Da C L, Li F, Nie M, et al. Undersea capacitive coupled simultaneous wireless power and data transfer for multiloop applications[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2025, 40(1): 2630-2642.
- [35] Mohsan S A H, Khan M A, Mazinani A, et al. Enabling underwater wireless power transfer towards sixth generation (6G) wireless networks: opportunities, recent advances, and technical challenges[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, 10(9): 1282.
- [36] Allotta B, Pugi L, Reatti A, et al. Wireless power recharge for underwater robotics[C]//*Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [37] Guidi G, Suul J A, Jensen F, et al. Wireless charging for ships: high-power inductive charging for battery electric and plug-in hybrid vessels[J]. *IEEE Electrification Magazine*, 2017, 5(3): 22-32.
- [38] Yoshioka D, Sakamoto H, Ishihara Y, et al. Power feeding and data-transmission system using magnetic coupling for an ocean observation mooring buoy[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2007, 43(6): 2663-2665.
- [39] Orekan T, Zhang P. Overview of the smart ocean energy converter[C]//*Underwater Wireless Power Transfer: Smart Ocean Energy Converters*. Berlin: Springer, 2019: 1-17.
- [40] Futagami D, Sawahara Y, Ishizaki T, et al. Study on high efficiency WPT underseas[C]//*Proceedings of the 2015 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC)*. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-4.
- [41] Yang C J, Wang T L, Chen Y H. Design and analysis of an omnidirectional and positioning tolerant AUV charging platform[J]. *IET Power Electronics*, 2019, 12(8): 2108-2117.
- [42] Zeng Y Q, Rong C C, Lu C H, et al. Misalignment insensitive wireless power transfer system using a hybrid transmitter for autonomous underwater vehicles[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2022, 58(1): 1298-1306.
- [43] Chen Y C, Niu W Q, Yang Y H, et al. Experimental results and analysis of midrange underwater asymmetric wireless power transfer[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2024, 12(4): 567.
- [44] Zhang F, Hackworth S A, Fu W N, et al. Relay effect of wireless power transfer using strongly coupled magnetic resonances[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2011, 47(5): 1478-1481.
- [45] Goncalves F, Duarte C, Pessoa L M. A novel circuit topology for underwater wireless power transfer[C]//*Proceedings of the 2016 International Conference on Systems Informatics, Modelling and Simulation (SIMS)*. Piscataway: IEEE Press, 2016: 181-186.
- [46] Zhang K H, Zhang X Y, Zhu Z B, et al. A new coil structure to reduce eddy current loss of WPT systems for underwater vehicles[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(1): 245-253.
- [47] Tamura M, Murai K, Fujii D. Lightweight and high-efficiency coupler suitable for underwater WPT system[C]//*Proceedings of the 2019 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 7-9.
- [48] Yan Z C, Song B W, Zhang K H, et al. Eddy current loss analysis of underwater wireless power transfer systems with misalignments[J]. *AIP Advances*, 2018, 8(10): 101421.
- [49] Lopes I F, Lacerda Valle R, Azevedo Fogli G, et al. Low-frequency underwater wireless power transfer: maximum efficiency tracking strategy[J]. *IEEE Latin America Transactions*, 2020, 18(07): 1200-1208.
- [50] Cai C W, Qin M, Wu S, et al. A strong misalignment tolerance magnetic coupler for autonomous underwater vehicle wireless power transfer system[C]//*Proceedings of the 2018 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC)*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-5.
- [51] Qiao K H, Sun P, Rong E G, et al. Anti-misalignment and lightweight magnetic coupler with H-shaped receiver structure for AUV wireless power transfer[J]. *IET Power Electronics*, 2022, 15(16): 1843-1857.
- [52] Cai T H, Lyu F, Wang T Z, et al. Design of a highly compatible underwater wireless power transfer station for seafloor observation equipment[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, 11(6): 1205.
- [53] Lin M W, Zhang F, Yang C J, et al. Design of bidirectional power converters coupled with coils for wireless charging of AUV docking systems[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2022, 27(2): 873-886.
- [54] Yan Z C, Zhang Y M, Zhang K H, et al. Underwater wireless power transfer system with a curly coil structure for AUVs[J]. *IET Power Electronics*, 2019, 12(10): 2559-2565.
- [55] Jenkins A, Bana V, Anderson G. Impedance of a coil in seawater[C]//*Proceedings of the 2014 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI)*. Piscataway: IEEE Press, 2014: 625-626.
- [56] Hayslett T M, Orekan T, Zhang P. Underwater wireless power transfer for ocean system applications[C]//*Proceedings of the OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey*. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-6.
- [57] Wang D A, Cui S M, Zhang J T, et al. A novel arc-shaped lightweight magnetic coupler for AUV wireless power transfer[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2022, 58(1): 1315-1329.
- [58] Orekan T, Zhang P, Shih C. Analysis, design, and maximum power-efficiency tracking for undersea wireless power transfer[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2018, 6(2): 843-854.
- [59] Yang L, Li X J, Zhang Y Q, et al. Underwater wireless power and data transfer system with shared channel[C]//*Proceedings of the 2021 IEEE 1st International Power Electronics and Application Symposium (PEAS)*. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [60] Li T, Sun Z C, Wang Y J, et al. Simultaneous wireless power and data transfer system with full-duplex MIMO communication channels for underwater applications[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2024, 20(4): 6382-6393.
- [61] Silva M, Duarte C, Goncalves F, et al. Power transmitter design for underwater WPT[C]//*Proceedings of the OCEANS 2019 - Marseille*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-5.
- [62] Wang Y J, Li T, Zeng M, et al. An underwater simultaneous wireless power and data transfer system for AUV with high-rate full-duplex communication[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2023, 38(1): 619-633.
- [63] Yang L, Bu Z X, Xing D R, et al. Time-sharing transmission method for an undersea magnetically coupled wireless power and data transfer system[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2025, 13(5): 6660-6675.
- [64] Li T, Sun Z C, Wang Y J, et al. An underwater simultaneous wireless

- power and data transfer system with 1-Mbit/s full-duplex communication link[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2024, 20(2): 2620-2631.
- [65] Shinohara N, Kamiyoshikawa N. Study of flat beam in near-field for beam-type wireless power transfer via microwaves[C]//*Proceedings of the 2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*. Piscataway: IEEE Press, 2017: 780-782.
- [66] Liu L W Y, Thành S N. Towards the feasibility of long range wireless power transfer over an ocean surface[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(17): 8751.
- [67] Elfikky A, Boghdady A I, Mumtaz S, et al. Underwater visible light communication: recent advancements and channel modeling[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2024, 56(10): 1617.
- [68] Mukhtar M S, Wan Hassan W H, Nazri Dagang A, et al. The impact of absorption and scattering on underwater optical wireless communication (UOWC) channel in the South China Sea: a simulation study[J]. *Jurnal Kejuruteraan*, 2025, 37(5): 2191-2203.
- [69] Ghassemlooy Z, Popoola W, Rajbhandari S. *Optical Wireless Communications: System and Channel Modelling with MATLAB®*[M]. Second edition. Boca Raton: CRC Press, 2019.
- [70] Weng Y, Matsuda T, Sekimori Y, et al. Pointing error control of underwater wireless optical communication on mobile platform[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2022, 34(13): 699-702.
- [71] Elamassie M, Uysal M. Vertical underwater visible light communication links: channel modeling and performance analysis[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(10): 6948-6959.
- [72] Kim S M, Choi J M, Jeong H W. Experimental demonstration of underwater optical wireless power transfer using a laser diode[J]. *Optics Express*, 2018, 16(8): 1-5.
- [73] Lim H, Park Y, Song Y. Underwater SLIPT prototype system with a combined solar panel-photodiode receiver: design, implementation, and operation strategy[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2024, 13(12): 3673-3677.
- [74] Ye K, Zou C, Yang F. Dual-hop underwater optical wireless communication system with simultaneous lightwave information and power transfer[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2021, 13(6): 7300107.
- [75] Uysal M, Ghasvarianjahromi S, Karbalayghareh M, et al. SLIPT for underwater visible light communications: performance analysis and optimization[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(10): 6715-6728.
- [76] Kim Y, Arya S, Chung Y H. An optimal energy harvesting scheme for simultaneous lightwave information and power transfer over multi-layer turbulence-induced underwater channel[J]. *Optics Communications*, 2021, 501: 127382.
- [77] Palitharathna K W S, Suraweera H A, Godaliyadda R I, et al. Lightwave power transfer in full-duplex NOMA underwater optical wireless communication systems[J]. *IEEE Communications Letters*, 2022, 26(3): 622-626.
- [78] Li G, Shang T, Kong W Q, et al. Energy efficiency optimization in a parallel relay-assisted UWOC system with simultaneous lightwave information and power transfer[J]. *Applied Optics*, 2024, 63(4): 999-1006.
- [79] Kottilingal R K, Nambath N. Underwater optical wireless data and power transfer system for Internet of underwater things[C]//*Proceedings of the 2025 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*. Piscataway: IEEE Press, 2025: 1-5.
- [80] Li G, Shang T, Tang T, et al. Maximizing effective secrecy throughput in SLIPT-based underwater wireless optical communication systems with artificial noise[J]. *Applied Optics*, 2025, 64(18): 5027-5036.
- [81] 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.
- [82] Esmail H, Qasem Z A H, Sun H X, et al. Wireless information and power transfer for underwater acoustic time-reversed NOMA[J]. *IET Communications*, 2020, 14(19): 3394-3403.
- [83] Guida R, Demirors E, Dave N, et al. Underwater ultrasonic wireless power transfer: a battery-less platform for the Internet of underwater things[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2022, 21(5): 1861-1873.
- [84] Feng Y Z, Ji F. Wireless information and power transfer in underwater acoustic sensor networks[J]. *China Communications*, 2024, 21(10): 1-11.
- [85] RODRIGUEZ O. *Pushing the limits of RF and underwater backscatter systems*[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2022.
- [86] Tang X Q, Xie G H, Cui Y Q. Self-sustainable long-range backscattering communication using RF energy harvesting[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(17): 13737-13749.
- [87] Jang J, Adib F. *Underwater backscatter networking*[C]//*Proceedings of the ACM Special Interest Group on Data Communication*. New York: ACM, 2019: 187-199.
- [88] 魏莉, 许芳, 孙海信. 水声信道研究与仿真[J]. *声学技术*, 2008, 27(1): 25-29.
- Wei L, Xu F, Sun H X. Research and simulation on underwater acoustic communication channel[J]. *Technical Acoustics*, 2008, 27(1): 25-29.
- [89] Griffin J D, Durgin G D. Complete link budgets for backscatter-radio and RFID systems[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2009, 51(2): 11-25.
- [90] Stojanovic M. On the relationship between capacity and distance in an underwater acoustic communication channel[J]. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 2007, 11(4): 34-43.
- [91] Akbar W, Allam A, Adib F. The underwater backscatter channel: theory, link budget, and experimental validation[C]//*Proceedings of the 29th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*. New York: ACM Press, 2023: 1-15.
- [92] Lin J L, Wang G P, Zheng Z J, et al. Modeling and channel estimation for piezo-acoustic backscatter assisted underwater acoustic communications[J]. *China Communications*, 2022, 19(11): 297-307.
- [93] Hu G J, Lin J L, Wang G P, et al. Sparse reconstruction based channel estimation for underwater piezo-acoustic backscatter systems[C]//*Proceedings of the 2021 IEEE 93rd Vehicular Technology Conference (VTC2021-Spring)*. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-5.
- [94] 翟喜洋. 水声反向散射通信多节点接入研究与实现[D]. 广州: 华南理工大学, 2023.
- Zhai X Y. Research and implementation of multi-node access in underwater acoustic backscatter communication[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2023.
- [95] Ma C F, Wang L, Gao J Q, et al. Time of arrival estimation for underwater acoustic signal using multi-feature fusion[J]. *Applied Acoustics*, 2023, 211: 109475.
- [96] Afzal S S, Ghaffarivardavagh R, Akbar W, et al. Enabling higher-order modulation for underwater backscatter communication[C]//*Proceedings of the Global Oceans 2020: Singapore - U.S. Gulf Coast*. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [97] Bhuyan S, Sivanand K, Panda S K, et al. Resonance-based wireless en-

- ergizing of piezoelectric components[J]. IEEE Magnetics Letters, 2011, 2: 6000204.
- [98] Ghaffarivardavagh R, Afzal S S, Rodriguez O, et al. Ultra-wideband underwater backscatter via piezoelectric metamaterials[C]//Proceedings of the Annual Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication on the Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication. New York: ACM Press, 2020: 722-734.
- [99] Huang X J, Lowe D, Gandia R, et al. An impulse ultra-wideband system capable of concurrent transmission and reception, part I: requirements and innovations[C]//Proceedings of the 2006 International Conference on Communications, Circuits and Systems. Piscataway: IEEE Press, 2006: 1251-1255.
- [100] Eid A, Rademacher J, Akbar W, et al. Enabling long-range underwater backscatter via van Atta acoustic networks[C]//Proceedings of the ACM SIGCOMM 2023 Conference. New York: ACM Press, 2023: 1-19.
- [101] 阳凡林, 辛明真, 姜放, 等. 高精度水声定位技术的发展现状及关键问题[J]. 长春工程学院学报(自然科学版), 2021, 22(2): 40-45.  
Yang F L, Xin M Z, Jiang F, et al. The development status and several key issues of high precision underwater acoustic positioning technology[J]. Journal of Changchun Institute of Technology (Natural Science Edition), 2021, 22(2): 40-45.
- [102] Ghaffarivardavagh R, Afzal S S, Rodriguez O, et al. Underwater backscatter localization: toward a battery-free underwater GPS[C]//Proceedings of the 19th ACM Workshop on Hot Topics in Networks. New York: ACM Press, 2020: 125-131.
- [103] Watson S, Duecker D A, Groves K. Localisation of unmanned underwater vehicles (UUVs) in complex and confined environments: a review[J]. Sensors, 2020, 20(21): 6203.
- [104] Satish A, Sabra K G. Passive underwater acoustic identification tags using multi-layered shells[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2021, 149(5): 3387-3405.
- [105] Bhardwaj A, Allam A, Erturk A, et al. Ultrasound-powered wireless underwater acoustic identification tags for backscatter communication[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2024, 71(2): 304-313.
- [106] Allam A, Sabra K, Erturk A. Piezoelectric transducer design for simultaneous ultrasonic power transfer and backscatter communication[J]. Smart Materials and Structures, 2022, 31(9): 095003.
- [107] Goll J H, Auld B A. Multilayer impedance matching schemes for broadbanding of water loaded piezoelectric transducers and high Q electric resonators[J]. IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, 1975, 22(1): 52-53.
- [108] Bhardwaj A, Erturk A, Sabra K G. Broadband wireless battery-free acoustic identification tags for high data-rate underwater backscatter communication[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2025, 157(1): 445-458.
- [109] Lam K, Bradbeer R S, Shin P K S, et al. Application of a real-time underwater surveillance camera in monitoring of fish assemblages on a shallow coral communities in a marine park[C]//Proceedings of the OCEANS 2007. Piscataway: IEEE Press, 2007: 1-7.
- [110] Afzal S S, Akbar W, Rodriguez O, et al. Battery-free wireless imaging of underwater environments[J]. Nature Communications, 2022, 13: 5546.
- [111] Martínez de Alegría I, Rozas Holgado I, Ibarra E, et al. Wireless power transfer for unmanned underwater vehicles: technologies, challenges and applications[J]. Energies, 2024, 17(10): 2305.

## [作者简介]



周述增(2001-),男,湖南邵阳人,中国人民解放军海军潜艇学院博士生,主要研究方向为水下反向散射通信技术。



王文龙(1990-),男,山东青岛人,博士,中国人民解放军海军潜艇学院副研究员,主要研究方向为水下无人探测技术。



孙文祺(1998-),男,山东烟台人,中国人民解放军海军潜艇学院研究实习员,主要研究方向为小型水面无人平台设计、船舶水动力性能等。



姜兆祯(1996-),男,辽宁大连人,博士,中国人民解放军海军潜艇学院助理研究员,主要研究方向为移动机器人路径规划、目标跟踪技术等。



刘明(1994-),男,山东青岛人,中国人民解放军海军潜艇学院讲师,主要研究方向为MEMS声学传感器、信号处理和惯性导航等。



曲威宇(2000-),男,山东威海人,中国人民解放军海军潜艇学院博士生,主要研究方向为阵列信号处理。