

# 水声通信与信号处理：经略海洋不可或缺的利器 ——写在“水声通信与信号处理”专题付梓之际

陈友淦 鄢社锋 瞿逢重 余华 安良 何成兵 韩笑

## 一 背景说明

“深空、深海、深地、深蓝”是人类对世界未知领域的新探索方向。随着海洋强国战略的推进实施，海洋信息技术的重要性日益凸显。陆地物联网技术的突破，为物联网在海洋领域的应用提供了契机。水下物联网(IoUT)是整合空-天-地-海网络的泛在物联网研究中最具挑战性和最为薄弱的部分。目前，声波依然是水下进行远距离信息传输最有效的载体。在IoUT应用背景下，水声通信与信号处理面临数据可靠高效传输、海量数据存储与处理、数据安全与维护、硬件部署与维护成本等诸多挑战。挖掘人工智能、大数据和区块链等潜在可应用于IoUT和智慧海洋的技术，均是水声通信和信号处理相关的前沿课题研究。

为展示国内在水声通信与信号处理领域的最新研究成果，2021年6月，作为新时代从事水声技术研究的一线工作者，我们深感肩负使命之光荣，决定与《电子与信息学报》编辑部策划推出一期“水声通信与信号处理”专题，得到了国内水声前辈的鼓励指导和青年同行的普遍欢迎。

## 二 总体情况

本期专题共收到来自23家高校和科研院所的59篇来稿，经过180名同行专家的匿名审稿和编辑部全体同仁的严格把关，共录用22篇稿件，内容涵盖深度学习、仿生通信、水声信道均衡、船舶辐射噪声分类、AUV路径规划等诸多方面，充分展示了当前水声通信与信号处理领域的最新成果。下面举部分示例以飨读者：

**1. 在结合深度学习与水声通信方面：**针对索引调制滤波器组多载波水声通信系统中传统索引信息检测方法计算复杂度高且准确度较低的问题，王彪等结合双向长时记忆网络(BLSTM)对时序信号进行特征提取的优势，将深度学习理论引入水声信号处理的概念，提出一种基于多层BLSTM的水声通信信号索引检测方法。该方法将传统索引检测问题转化为数据驱动的多元分类问题，在提高估计性能的同时降低了计算复杂度。基于湖试测得的水声信道数据仿真验证了该方法的优越性和鲁棒性，可作为索引调制机制下的一种通用检测手段。

**2. 在声电协同水声网络方面：**针对水声链路本身存在的高时延和高误码率等不足，陈芳炯等提出声电协同网络技术，旨在充分利用水面无线电链路弥补水声通信系统的性能局限，提升网络的整体性能。团队在ns-3中设计并实现了声电浮标节点与声电协同网络协议栈，搭建了声电协同网络的仿真平台，并探讨了以AODV协议为代表的被动式路由在声电协同网络中的应用。结果表明，在投递率、传输时延、网络吞吐量、能效和路由响应速度等方面，声电协同网对比水声通信网有较大提升。同时，以AODV为代表的被动路由协议，相比于以OLSR为代表的主动路由协议更适用于声电协同网络。

**3. 在仿生水声通信技术方面：**针对水下隐蔽声通信的需求，刘淞佐等人提出一种基于频移键控的仿海豚哨声水声通信方法，通过模拟海豚哨声以降低通信信号被发现的概率，从而实现水下隐蔽声通信。该方法将信息调制生成的基带信号以一定比例与海豚哨声信号时频谱轮廓曲线相加获得合成哨声时频谱，再生成合成哨声作为仿生通信信号。接收端提取接收到的合成哨声与本地生成的存在固定频差的海豚哨声相干相乘，经过低通滤波获得频移键控信号进行信息解调，实现仿生通信。仿真与海试试验结果表明，当码元宽度为0.1 s时可在2 km距离上实现有效通信，且时频相关系数不低于0.99。该方法具有一定的隐蔽性，系统实现中资源消耗少，易于工程实现。

**4. 在水声信道均衡方面：**针对水声信道均衡中高计算复杂度限制实际应用的问题，鄢社锋等基于Kalman滤波和Turbo均衡提出了一种迭代Kalman均衡器，实现了基于软符号的迭代信道估计与迭代Kalman均衡，且复杂度较常规方法降低约一个数量级。同时，针对单一均衡算法和单一方向Turbo均衡器存在的误差传递现象，设计了基于迭代Kalman均衡器与改进成比例归一化LMS自适应均衡器相结合的混合双向Turbo均衡器，提高了自适应均衡器的收敛速度和均衡性能，并通过双向均衡结构带来的增益改善了符号估计误差传递的现象。理论分析与仿真实验验证了所提算法的有效性。

**5. 在水下声源深度分辨方面:** 针对水中声源深度分辨问题, 安良等提出一种基于干涉条纹斜率分布的声源深度分辨方法。该方法建立了辐射噪声干涉条纹分布随声源深度变化的模型, 分析了水面和水下声源激发的辐射噪声干涉条纹斜率分布差异性的物理机理。利用图像处理算法, 将该差异表征为辐射噪声干涉图像Radon变换矩阵列方差向量的峰值个数, 并据此进行水面和水下目标辨别。仿真和海试验证结果证明, 所提方法可应用于存在负跃层的浅海波导中, 能有效分辨水面和水下目标, 且与传统方法相比, 不需要声源距离与海洋声学环境参数的先验信息。

**6. 在船舶辐射噪声分类方面:** 针对水声目标信号获取困难、样本量不足和不均衡等导致机器学习算法进行舰船目标分类模型识别效果不佳的问题, 殷敬伟等提出一种基于条件卷积生成对抗网络的船舶噪声数据分类方法。该方法利用生成对抗学习理论, 生成相比于传统数据增强算法非线性特征更强、特征差异更丰富的伪DEMON调制谱数据, 以缓解训练样本量不足的问题; 之后将传统生成对抗网络中的全连层输出替换成更善于解决小样本问题集成分类器, 从而降低分类器对于数据量的依赖程度, 进一步提高分类模型性能。基于真实样本的实验结果表明, 相比于传统数据增强算法和卷积生成对抗网络, 所提方法能够更有效提高在样本不足条件下的模型分类性能。

**7. 在北极水域匹配场处理方面:** 北极水域信道特殊, 匹配场处理作为一类可结合环境信息进行信号处理的目标定位方法, 在模型匹配时可以准确估计出声源位置, 但存在环境变化复杂且信息了解少的问题, 导致模型很难完全匹配, 从而出现位置估计不准确的问题。黄海宁等提出建立一种改进的压缩匹配场模型, 并基于相位归一化原理对稀疏模型进行优化, 利用归一化阵元域信息进行匹配, 以消除声源频谱的影响, 提高压缩匹配场的定位准确度。仿真结果表明, 改进后方法比改进前方法的定位准确率更高; 试验数据处理表明, 单快拍下改进后方法比改进前方法在目标位置估计上误差更小, 比常规匹配场方法的分辨率更高。

**8. 在海洋内孤立波环境下的匹配场定位方面:** 海洋内孤立波的存在会引起海水混合, 温盐结构改变, 从而导致声速在时间和空间上的不均匀分布, 而在匹配场定位中则表现为声速失配, 定位不准确。杨益新等提出一种内孤立波下稳健的降阶自适应匹配场定位方法, 在传统自适应匹配场定位算法的基础上, 融合了主分量抑制波束形成方法, 通过特征分解对拷贝协方差矩阵进行降阶, 抑制噪声空间, 同时采用抑制系数和权重因子来计算匹配过程中的权向量, 监测失配的拷贝向量。结果表明: 在南海内孤立波环境下的声源定位实验中, 距离估计误差为3.7%, 深度估计误差为1.6%, 验证了该算法在实际海洋内孤立波环境下的有效性。

**9. 在水下物联网方面:** 海洋环境的复杂性严重的限制了水下物联网(IoUT)节点间的数据传输性能, 需要一个高效的路由协议以适用于复杂的信道环境。无状态几何路由(G-STAR)是一种采用贪婪转发模式的地理路由协议, 在大多数三维物联网情景中能够找到合适的数据传输路径, 然而水下环境中存在诸多不利因素制约了G-STAR的性能。对此, 闫磊等提出一个混合G-STAR协议, 在保有G-STAR优势的基础上对协议在水下环境中的适应性进行了针对性设计。仿真结果显示混合G-STAR协议相较于基准G-STAR协议有着更好的路由性能, 并且在物理层能够取得更低的误比特率。

**10. 在AUV辅助定位动态路径规划方面:** 水声传感器网节点布放后由于洋流等因素长时间作用会出现位置偏移, 需要修正其位置信息。为进一步提高AUV辅助定位过程中的能量利用率, 王易因等提出一种面向水声传感网的AUV辅助定位动态路径规划方法。该方法中将节点位置修正过程看成节点位置信息熵减少的过程。在AUV动态路径规划时根据定位过程中当前节点位置信息和预计AUV能耗, 规划AUV下一步移动目标位置。具体使用贪婪算法选取使信息增益期望和移动消耗能量比值最大的位置作为AUV下一步移动目标位置。仿真结果表明, 该算法能够在保证节点定位精度的基础上有效提高AUV能量利用率。

限于篇幅, 我们不再一一列举。

### 三 总结思考

我们怀着对水声通信与信号处理领域的敬畏之心, 第一次与《电子与信息学报》编辑部合作, 第一次开展这样的专题征稿工作。感谢所有投稿作者对我们的信任, 感谢审稿专家饱含深情、十二分负责任的工作。

在未来的日子里, 在“把论文写在祖国大地上”的新时代背景下, 我们期待着国内中文期刊可以发表更多可比肩国际优秀外文期刊的学术论文。希望能够继续得到大家的支持与关心!