

基于物理场协同的水下声传感器网络节能传输方案

邢光林, 胡召辉

(中南民族大学 计算机学院(人工智能学院), 湖北 武汉 430074)

摘要 针对水下声传感器网络中节点能量受限、通信能耗高的问题,提出了一种基于物理场协同的节能传输方案(PF-Cooper).从连续声学物理场角度对网络进行建模,通过构建以Sink节点为中心的场坐标系,实现节点的自适应分区与分簇;设计激励响应式簇头选择机制与仅依赖局部信息交换的分布式梯度协同算法,动态优化簇头节点发射幅度与相位,使信号在Sink处实现相干叠加,并建立包含相位调整与同步开销的协同能耗模型.仿真结果表明:与cDBR、EULC及GTC算法相比,该方案在延长网络寿命、降低能耗以及改善能量分布均衡方面具有一定优势.

关键词 水下声传感器网络;物理场协同;节能传输

中图分类号 TP393 文献标志码 A 文章编号 1672-4321(2026)06-0817-06

doi:10.20056/j.cnki.ZNMDZK.20260610

Energy-efficient transmission scheme for underwater acoustic sensor networks based on physical field cooperation

Xing Guanglin, Hu Zhaohui

(College of Computer Science(College of Artificial Intelligence), South-Central Minzu University,
Wuhan 430074, Hubei China)

Abstract To address the issues of limited energy of nodes and high communication energy consumption in underwater acoustic sensor networks, an energy-efficient transmission scheme based on physical field cooperation (PF-Cooper) is proposed. The scheme models the network from the perspective of continuous acoustic physical fields and achieves adaptive node partitioning and clustering by constructing a sink-centered field coordinate system. It designs an excitation-response-based cluster head selection mechanism and a distributed gradient cooperation algorithm that only relies on local information exchange, to dynamically optimize the transmission amplitude and phase of cluster head nodes, enabling coherent signal superposition at the sink. Furthermore, it establishes an energy consumption model including phase adjustment and synchronization overhead. Simulation results show that, compared with cDBR, EULC and GTC algorithms, the proposed scheme has certain advantages in extending network lifetime, reducing energy consumption and improving energy distribution balance.

Keywords underwater acoustic sensor networks; physical field cooperation; energy-efficient transmission

水下声传感器网络(Underwater Acoustic Sensor Networks, UASNs)为海洋信息获取与水下环境感知提供了重要支撑,在海洋环境监测、资源勘探以及海洋工程等领域具有广阔的应用前景^[1].受水下传播环境限制,节点之间主要依赖声波进行通信,其传播速率低且信号衰减随传播距离显著增加,使得数据传输过程能耗较高^[2].与此同时,节点通常采用

电池供电,一旦部署便难以补充能量,节点能量耗尽将会直接影响网络覆盖范围和数据获取能力^[3].因此,在能量受限条件下实现高效、可靠的数据传输,是保障UASNs长期稳定运行的关键所在.

为降低网络整体能耗并延长网络生命周期,基于分簇的路由机制被广泛应用于UASNs.这类方法将节点划分为若干簇,由簇头节点负责数据融合与

收稿日期 2026-01-31

作者简介 邢光林(1972-),男,副教授,博士,研究方向:网络优化方法,E-mail:glxing@scuec.edu.cn

转发,从而减少普通节点的通信能耗.现有工作主要围绕簇头选举策略、簇规模优化以及适应水下信道特征等方向展开.其中,LEACH协议和HEED协议^[4-5]分别采用随机选择与能量感知的方式实现簇头轮换;针对水下通信特性,cDBR^[6]和EULC^[7]等算法进一步引入了节点深度信息与非均匀分层机制,以提升网络在复杂水下环境中的能效表现.

此外,部分研究从簇规模控制和异构分簇等角度对网络能效进行了优化^[8-9],也有工作将强化学习或跨层设计思想引入聚类路由,以提升网络在复杂环境下的自适应能力^[10-12].博弈论方法近年来也被引入分簇路由设计中,通过构建节点效用函数与激励机制,对簇头选择与轮换过程进行建模与优化,如GTC算法^[13]在一定程度上改善了网络能耗的分布特性.然而,上述方法整体仍基于离散节点的建模视角,对声波传播过程在物理空间中的连续性特征以及多节点协同发送所带来的潜在能效增益关注不足.

协同通信技术通过多节点在物理层进行协同发射,使信号在接收端实现相干叠加,能够在保证接收质量的同时显著降低对单节点发射功率的要求,为突破传统分簇路由机制的能效上限提供了新的思路^[14].尽管如此,现有研究大多聚焦于协同本身带来的增益,而对节点间相位同步与参数协调所产生的额外能耗探讨有限^[15].受限于水下信道特性与节点能量、计算及通信能力的约束,如何在分簇架构中实现分布式、低复杂度的协同通信控制,仍面临诸多挑战;同时,在大规模网络场景下,仅依赖局部信息的优化方法如何保持整体性能仍有待进一步探索^[16].

综上,本文从物理场协同的角度出发,对水下声传感器网络进行连续化建模,提出一种基于物理场协同的节能传输方案PF-Cooper.该方案的主要贡献包括:(1)构建基于物理场协同的UASNs系统框架,建立以Sink节点为中心的场坐标系与自适应分区模型;(2)设计基于物理场激励响应的簇头动态选择与轮换机制;(3)提出一种仅需局部信息交换的分布式梯度协同算法,优化簇头节点发射参数以实现信号相干叠加;(4)建立包含相位调整与同步开销在内的完整协同能耗模型.

1 系统模型

1.1 网络与能耗模型

考虑一个空间尺寸为 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 的

三维水下监测区域.网络中随机部署 N 个静态节点, Sink节点位于水面中心位置,其能量充足不受约束.节点间采用声波通信,最大通信半径为 R_0 .各节点初始能量均为 E_{initial} ,并周期性采集信息,生成长度为 l 的数据包.图1展示了三维UASNs网络结构图.上述网络与能耗模型为后续的分区与协同传输提供了统一的建模基础.

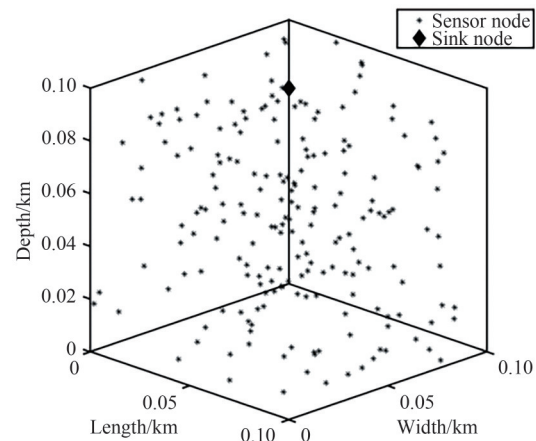


图1 三维UASNs网络结构

Fig. 1 3D UASNs structure

节点能耗根据水下声通信能耗模型^[3],节点发送 l bits 数据至距离 d 处的能耗为:

$$E_{\text{transmit}}(l, d) = P_0 \cdot A(d) \cdot T_l, \quad (1)$$

其中 P_0 为参考发射功率, T_l 为发送时间, $A(d)$ 为与距离相关的功率衰减系数.

节点的接收能耗与数据融合能耗分别为:

$$E_{\text{receive}}(l) = l \cdot E_1, E_{\text{fusion}}(l) = l \cdot E_2, \quad (2)$$

其中 $E_1 = 50 \text{ nJ/bit}$, $E_2 = 5 \text{ nJ/bit}$.

1.2 物理场协同框架与信道模型

从物理层角度出发,将整个网络抽象为连续的三维声学能量场.簇头节点 i 发射的信号为 $s_i(t) = A_i \cos(2\pi f_0 t + \phi_i)$, Sink 处的合成信号为所有参与协同的簇头节点信号的叠加.通过协同调整幅度 A_i 和相位 ϕ_i ,可使合成信号功率达到目标值 P_{target} ,同时降低网络整体发射功率开销.

信道增益依据水声传播模型^[2],节点 i 到 Sink 节点的信道增益为:

$$H_{i,s}^{\text{base}} = \frac{1}{4\pi d_{i,s}} \exp(-[\alpha(f) + jk]d_{i,s}), \quad (3)$$

其中 $d_{i,s}$ 为节点 i 到 Sink 节点的距离, $\alpha(f)$ 为频率相关的吸收系数, k 为波数.

在协同传输中,多个节点信号相干叠加,实际信道受相位误差、节点数、节点间距等因素的影响.为此,引入局部协同效率因子 η_c 来修正等效信道增

益幅度,其模型为:

$$\eta_c = \eta_0 \cdot \exp\left(-\frac{\sigma_\phi^2}{2\sigma_0^2}\right) \cdot \frac{1}{1 + \frac{N_i - 1}{N_0}} \cdot \exp\left(-\frac{\bar{d}}{d_0}\right), \quad (4)$$

其中理论最大增益 η_0 、相位容差 σ_0 、最优协同节点数 N_0 及相干距离 d_0 依据典型水下协同场景的仿真与拟合确定.各因子的物理依据说明:相位误差项 $\exp(-\sigma_\phi^2/2\sigma_0^2)$ 反映正态分布假设下的相干性损失;节点数项 $\frac{1}{1 + (N_i - 1)/N_0}$ 刻画节点数超过 N_0 后增益增长趋缓的特性;间距项 $\exp(-\bar{d}/d_0)$ 描述节点间距增大导致的波前相干性衰减.修正后的等效信道增益幅度为 $|H_{i,s}| = |H_{i,s}^{\text{base}}| \sqrt{\eta_c}$.基于该模型,第2节将进一步设计场自适应分区和分布式协同算法.

2 基于物理场协同的节能传输方案

2.1 场自适应分区

为实现高效的簇间协同,需将空间位置与信道特性相近的节点组织在同一簇中.具体步骤如下:

(1)场坐标转换:将节点的直角坐标系 (x, y, z) 转换为以Sink为中心的极坐标系 (r_i, θ_i, z_i) ;

(2)方位角扇区划分:将 360° 水平面划分为 K 个扇区;

(3)深度分层:依据节点深度范围划分为 L 层;

(4)自适应调整:根据各分区内节点的数量,对过稀或过密分区进行合并或拆分,使最终分区规模保持相对均衡.

通过以上步骤,每个分区内的节点在方位与深度上具有相似性.基于上述分区,将邻居集合 N_i 定义为其相邻方位扇区同层及同扇区相邻层的簇头(不超过4个,水平方向最多2个相邻扇区,垂直方向最多2个相邻层),为后续分布式协同传输奠定拓扑基础.

2.2 激励响应式簇头选举

每轮开始时,Sink节点广播激励信号 $s_{\text{excite}}(t) = \cos(2\pi f_0 t + \phi_0^{(t)})$,参考相位每轮递增 $\Delta\phi$,以实现自然轮换.

节点 i 收到信号后,根据信道增益 $|H_{i,s}|$ 、相位匹配误差 $\Delta\phi_i$ 及剩余能量比例计算综合响应值 R_i :

$$R_i = \frac{|H_{i,s}|}{1 + \beta \cdot (\Delta\phi_i)^2} \times \frac{E_i^{\text{current}}}{E_i^{\text{initial}}}, \quad (5)$$

其中 β 为惩罚系数.

设定动态选举阈值:

$$T_{\text{elect}}^{(t)} = T_{\text{base}} \left(1 + \gamma \cdot \frac{\bar{R}^{(t-1)} - R_{\text{target}}}{R_{\text{target}}} \right), \quad (6)$$

其中基础阈值 $T_{\text{base}} = 0.5 \cdot \max(R_i)$, $\bar{R}^{(t-1)}$ 为上一轮的平均响应值, R_{target} 为目标响应值, γ 为调整系数.响应值高于阈值的节点成为候选簇头,通过退避竞争,最终各分区选举出一个簇头.由于参考相位周期性变化,簇头也随之自然轮换.

2.3 分布式梯度协同传输

协同传输的目标是在分布式环境下,仅通过簇头节点之间交换局部信息,协同优化发射参数,使得Sink处的接收功率逼近 P_{target} .为此,为每个簇头节点构建仅依赖自身及邻居信息的局部代价函数:

$$J_i = \lambda_1 \cdot (\hat{P}_i - P_{\text{target}})^2 + \lambda_2 \cdot A_i^2, \quad (7)$$

其中 λ_1 和 λ_2 为权重因子, $\hat{P}_i$ 为节点 i 基于邻居信息对Sink处接收功率的局部估计:

$$\hat{P}_i = A_i^2 \left| H_{i,s} \right|^2 + 2 \sum_{j \in N_i} A_i A_j \left| H_{i,s} \right| \left| H_{j,s} \right| \cos(\phi_i - \phi_j + \theta_{ij}), \quad (8)$$

其中 θ_{ij} 为相位差, N_i 为节点 i 的邻居簇头集合.

基于场自适应分区所形成的局部强信道相关性,簇头节点之间的协同作用主要体现在其物理邻域内.簇头节点仅需通过与其邻居交换局部信息构建代价函数并进行并行优化,逐步逼近整体最优的协同传输状态,从而满足分布式环境下的协同传输需求.

基于 $\hat{P}_i$,节点 i 可近似计算代价函数 J_i 关于其可控参数 A_i 和 ϕ_i 的梯度.根据式(7)和式(8)分别对 A_i 和 ϕ_i 求偏导数,可得梯度分量为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial J_i}{\partial A_i} &= 2\lambda_1 (\hat{P}_i - P_{\text{target}}) \cdot \frac{\partial \hat{P}_i}{\partial A_i} + 2\lambda_2 A_i, \quad \frac{\partial J_i}{\partial \phi_i} \\ &= 2\lambda_1 \cdot (\hat{P}_i - P_{\text{target}}) \cdot \frac{\partial \hat{P}_i}{\partial \phi_i}, \end{aligned} \quad (9)$$

随后,采用梯度下降法更新发射参数:

$$A_i^{\text{new}} = A_i^{\text{old}} - \eta_A \frac{\partial J_i}{\partial A_i}, \quad \phi_i^{\text{new}} = \phi_i^{\text{old}} - \eta_\phi \frac{\partial J_i}{\partial \phi_i}, \quad (10)$$

其中 η_A 、 η_ϕ 为学习率.

2.4 场协同能耗模型

节点总能耗包括传统能耗与协同新增能耗:

$$E_{\text{total}} = E_{\text{tradition}} + E_{\text{field}}, \quad (11)$$

其中传统能耗 $E_{\text{tradition}}$ 包括数据接收、融合与发送能耗,按式(1)与式(2)计算.在协同传输中,簇头节点

的发送能耗为式(1)计算值的 A_i^2 倍,普通节点仍按式(1)计算发送能耗。

协同新增能耗 E_{field} 是为实现物理场协同而引入的额外开销,主要包括以下两项:

(1)相位调整能耗:建模为 $E_{\text{phase}} = \beta_{\phi} \cdot |\Delta\phi|^2$,比例系数 $\beta_{\phi} = 100 \text{ nJ/rad}^2$;

(2)同步开销能耗:簇头与邻居交换同步信息(相位、幅度)的能耗。

3 仿真结果与分析

为验证本方案(PF-Cooper)的性能,使用MATLAB进行仿真,并与cDBR^[6]、EULC^[7]和GTC^[13]三种分簇路由算法进行性能对比。其中cDBR代表基于深度信息的分簇基础方法,EULC代表能量感知的非均匀分层路由,GTC代表博弈论在簇头选举中的典型应用,三者从不同角度体现了UASNs能耗优化的主流思路,具有较好的代表性。节点随机分布在 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 网络区域。经场自适应分区后,各分区节点数量基本均衡,簇头选举结果在空间上分布均匀(未出现局部聚集)。仿真参数如表1所示。

表1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

参数	取值
网络区域	$100 \text{ m} \times 100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$
节点数	200
Sink 位置	(50, 50, 100)
初始能量	0.5 J
数据包大小	2000 bits
广播包大小	200 bits
通信半径	20 m
声波频率	10 kHz

3.1 网络生命周期对比

网络生命周期是衡量节能效果的关键指标之一,图2反映了每轮存活节点数对比情况。整体来看,PF-Cooper方案在首节点死亡时间(FND)与网络完全失效时间(LND)上优于对比算法。cDBR由于采用基于深度的转发策略,能量消耗集中,节点数量下降最早且速度较快,在约600轮时存活节点已显著减少;EULC通过能量感知机制优化簇头选择,网络生存时间得以延长,但在约1000轮时,由于节点仍采用独立高功率发射模式,节点数量也开始出现明显下降;GTC利用博弈论均衡了簇头选举的分布,进一步延缓了节点失效进程。相比之下,PF-Cooper

通过场自适应分区和簇头轮换分散了通信负载,同时利用物理场协同降低了簇头节点发送能耗,避免了部分节点因持续高功率发射而提前死亡,因此在整个运行过程中能够维持更长的网络存活时间。

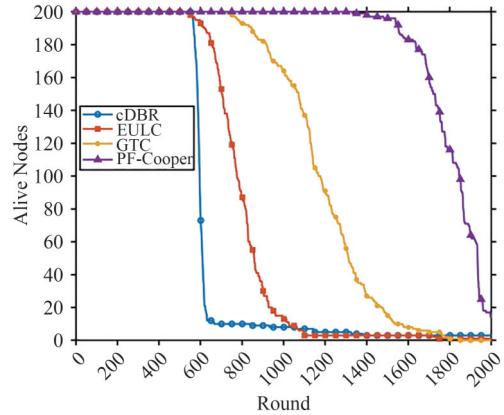


图2 存活节点数对比

Fig. 2 Comparison of number of alive nodes

3.2 节点平均剩余能量对比

图3反映了节点平均剩余能量随轮次的变化曲线。可见,PF-Cooper的平均剩余能量始终高于其他三个算法,且下降过程较平缓,说明其能量消耗节奏更加均衡。以第600轮为例,PF-Cooper平均剩余能量为0.35 J,GTC、EULC、cDBR分别为0.22 J、0.04 J、0.01 J;各算法到600轮的单轮平均能量损耗依次为0.00025 J、0.00047 J、0.00077 J、0.00082 J,PF-Cooper能量消耗速率最低。对于cDBR,位于关键路径的节点因长期承担转发任务,其能量快速下降;EULC虽然考虑了节点剩余能量,但由于缺乏传输层面的协同,能量消耗速率依然较高;GTC方案优化了簇结构内的能量分配,但未对传输过程进行能效提升。PF-Cooper的优势在于其分布式梯度协同算法,该算法使得参与协同的簇头节点能够动态调整发射功率,从而将能量消耗更均匀地分摊到多个节点与更长的时间尺度上。

3.3 单轮通信能耗分析

图4为单轮能量消耗对比情况。可以看到,cDBR和EULC出现明显的能耗波动,GTC通过博弈论进行簇头选举使得单轮能耗相对稳定;在前50轮稳定传输阶段,PF-Cooper的平均单轮能耗为0.058 J,波动范围 $\pm 0.003 \text{ J}$;而cDBR和EULC的平均单轮能耗分别约为0.18 J和0.16 J,波动范围分别超过 $\pm 0.07 \text{ J}$ 、 $\pm 0.06 \text{ J}$ 。PF-Cooper保持较低的单轮能耗,虽然该方案为实现簇头协同引入了相位调整与同步开销,但这部分额外消耗被多节点相干叠加带来的发射功

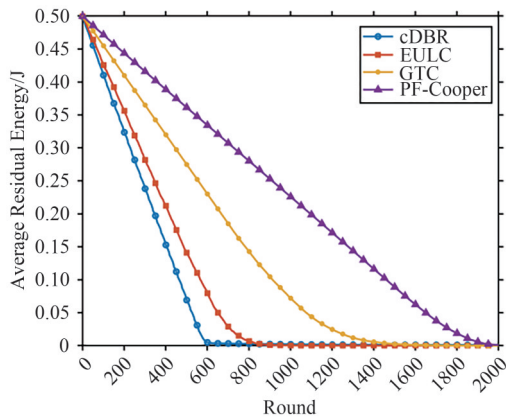


图3 节点平均剩余能量对比

Fig. 3 Comparison of average residual energy of nodes

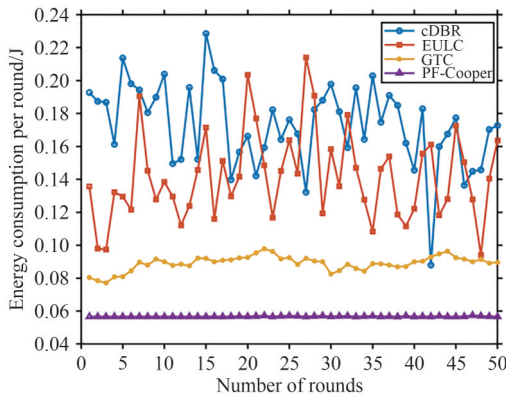


图4 单轮能量消耗对比

Fig. 4 Comparison of energy consumption per round

率增益所抵消,最终使得整体单轮能耗始终维持在较低水平。

3.4 网络能量均衡性分析

为进一步验证能量消耗是否在空间上呈现均衡分布,图5给出了网络中50%节点死亡时,各算法下死亡节点的三维空间分布情况。从分布结果可以

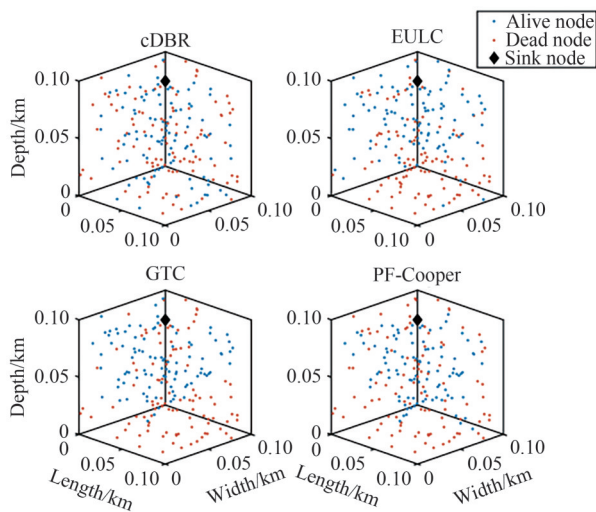


图5 节点死亡空间分布对比(50%节点死亡率)

Fig. 5 Comparison of spatial distribution of dead nodes at 50% mortality

看出,PF-Cooper表现出均匀的空间分布,未出现明显的能量“热区”,表明所提方案能够有效分散高能耗负载。该结果进一步验证了场自适应分区与簇头轮换机制在抑制局部能量集中方面的作用,也从空间分布角度说明了物理场协同传输对网络能量均衡性的积极影响。

4 结语

本文从物理场协同的角度出发,提出了一种适用于水下声传感器网络的节能传输方案。通过连续声场建模、场自适应分区、激励响应式簇头选举以及分布式梯度协同传输机制,实现了信号在Sink处的相干叠加与网络能耗的整体优化。仿真结果表明,相较于对比算法,该方案在延长网络寿命、降低能耗及改善能量分布均衡方面具有一定优势。未来工作将研究节点移动下的协同保持机制、复杂信道下的算法鲁棒性增强及与上层路由协议的深度融合等。

参考文献

- [1] Akyildiz I F, Pompili D, Melodia T. Underwater acoustic sensor networks: Research challenges[J]. *Ad Hoc Networks*, 2005, 3(3): 257-279.
- [2] Stojanovic M, Preisig J. Underwater acoustic communication channels: Propagation models and statistical characterization[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2009, 47(1): 84-89.
- [3] Sozer E M, Stojanovic M, Proakis J G. Underwater acoustic networks[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2000, 25(1): 72-83.
- [4] Heinzelman W B, Chandrakasan A P, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2002, 1(4): 660-670.
- [5] Younis O, Fahmy S. HEED: A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2004, 3(4): 366-379.
- [6] Khan T, Ahmad I, Aman W, et al. Clustering depth based routing for underwater wireless sensor networks[C]//2016 IEEE 30th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA). Crans-Montana: IEEE, 2016: 506-515.
- [7] Hou Rui, He Liuting, Hu Shan, et al. Energy-balanced unequal layering clustering in underwater acoustic sensor networks[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 39685-39691.

- [8] Liu Y, Xu H, Li Q, et al. A novel uneven clustering algorithm based on energy optimization for underwater acoustic sensor networks [J]. *Ad Hoc Networks*, 2022, 127: 102776.
- [9] Han Duoliang, Du Xiujuan, Liu Xiuxiu, et al. Fuzzy C-means clustering and improved arithmetic optimization algorithm-based layering cooperative routing protocol for UASNs [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24 (15) : 24810-24824.
- [10] Zheng Y, Li J, Chen C, et al. Collaborative deep reinforcement learning for target tracking in underwater acoustic sensor networks [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023, 10(12): 10567-10578.
- [11] Lakshmi K, Hossain A, Mummaneni K. An improved 3D distributed clustering algorithm for underwater wireless sensors [J]. *International Journal of Information Technology*, 2025, 17(2): 859-868.
- [12] Jin Zhigang, Wang Ying, Liang Jiawei, et al. Energy-efficient nonuniform cluster-based routing protocol with Q-learning for UASNs [J]. *Ad Hoc Networks*, 2025, 173: 103797.
- [13] Xing Guanglin, Chen Yumeng, Hou Rui, et al. Game-theory-based clustering scheme for energy balancing in underwater acoustic sensor networks [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(11): 9005-9013.
- [14] Khan M S, Petroni A, Biagi M. Cooperative communication based protocols for underwater wireless sensors networks: A review [J]. *Sensors*, 2024, 24(13): 4248.
- [15] Nelavalli S, RammohanReddy D, Neelima G, et al. Balancing energy efficiency with robust security in wireless sensor networks using deep reinforcement learning-enhanced particle swarm optimization [J]. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2025, 84(1): 9-26.
- [16] Jiang Zhe, Zheng Bingbing, Ning Weijie, et al. Feature-level data aggregation for underwater acoustic networks based on distributed function approximation and cross-layer design [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(17): 28164-28177.

(责编 曹东,校对 雷建云)