

势博弈与时变 Log-linear 分布式拓扑控制算法*

魏连锁, 韩建, 陈齐齐, 胡现成



(齐齐哈尔大学 计算机与控制工程学院, 黑龙江 齐齐哈尔 161006)

通讯作者: 魏连锁, E-mail: wlsaaaaa@163.com

摘要: 针对 UWSNs 由网络拓扑控制不稳定、频繁变化引起网络的能耗不均衡、网络生存周期短等问题,从分析传感器节点受水下不确定性因素对 UWSNs 的拓扑结构演化入手,构建分布式水下传感器节点状态变量描述模型,归纳出节点之间和节点与环境之间多目标交互、协同、决策的 UWSNs 拓扑控制优化问题,将多目标优化问题映射成博弈论优化问题,再利用势博弈与 Log-linear 分布式学习规则实现博弈中节点策略行为的更新过程,采用非齐次马尔可夫链理论证明网络拓扑控制目标函数的优化问题收敛到最大化势博弈函数的解,从而达到保持网络均衡、延长网络生存周期的目的。

关键词: 网络拓扑控制;势博弈;时变 Log-linear 模型;马尔可夫链;生存周期

中文引用格式: 魏连锁, 韩建, 陈齐齐, 胡现成. 势博弈与时变 Log-linear 分布式拓扑控制算法. 软件学报, 2019, 30(Suppl.(11)):82-93. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19009.htm>

英文引用格式: Wei LS, Han J, Chen QQ, Hu XC. Potential game and time-varying log linear distributed topology control algorithm. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2019, 30(Suppl.(11)):82-93 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19009.htm>

Potential Game and Time-varying Log Linear Distributed Topology Control Algorithm

WEI Lian-Suo, HAN Jian, CHEN Qi-Qi, HU Xian-Cheng

(School of Computer and Control Engineering, Qiqihar University, Qiqihar 161006, China)

Abstract: Aiming at the problems of UWSNs, such as unstable network topology control, unbalanced energy consumption caused by frequent changes and short network lifetime, this paper starts with the analysis of the evolution of topology caused by underwater uncertainties of sensor nodes, builds a state variable description model of distributed underwater sensor nodes, and concludes the multi-objective interaction and collaboration between nodes and environment. Topology control optimization problem for decision-making is mapped into game theory optimization problem. Then, potential game and Log-linear distributed learning rules are used to update the strategy behavior of nodes in the game. The non-homogeneous Markov chain theory is used to prove that the optimization problem of network topology control objective function converges to the solution of maximizing potential game function, so as to achieve guaranteeing. The purpose of maintaining network balance and prolonging network lifetime is to achieve the goal of maintaining network balance.

Key words: network topology control; potential game; time-varying Log-linear model; markov chain; lifetime

水下分布式网络拓扑控制是 UWSNs 研究领域的一个重要分支.由于水声信号的传输受水下复杂环境影响较大,存在误码率高、传播时延长、链路间歇性中断以及节点移动性等不确定性因素导致 UWSNs 的网络拓扑频繁变动、能效性差等问题.因此,综合考虑能耗均衡性、能效性等因素对高效能 UWSNs 的影响,进一步研究优化的网络拓扑控制算法不仅能够提高 UWSNs 的传感器节点通信效率还能延长整个网络生命周期,更是水下

* 基金项目: 国家自然科学基金(61571150, 61872204);黑龙江省自然科学基金(LH2019F037);研究生创新科研项目(YJSCX2018-ZD09).

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (61571150, 61872204); Heilongjiang Natural Science Foundation Project (LH2019F037); Postgraduate Innovative Research Project (YJSCX2018-ZD09).

收稿时间: 2019-09-15; 采用时间: 2019-10-24

传感器节点定位、时钟同步、Mac 协议等关键技术的基础,同时也为 UWSNs 的应用研究奠定理论支撑。

UWSNs 的拓扑控制是在满足网络连通与覆盖性基础上,通过功率控制和选取网络骨干节点,剔除网络中冗余的通信链路,提高传感器节点数据传输成功率,保持网络能耗均衡,延长网络生命周期及优化网络性能^[1-4]。目前,国内外学者对 UWSNs 网络拓扑控制算法已经做了相关研究并取得一些成果。Golen 等人提出了一种博弈论设计模型,该模型根据整个区域的声学特性变化划分为不同位置的声学特征扇区,通过求解极小极大矩阵博弈来确定节点对每个扇区的访问概率,依据各区域事件概率来计算将传感器节点分配到相对均匀的声学区域,可以有效地规划其部署位置,但没有给出具体合理的传感器节点部署方法^[5]。因此,如何利用最少节点对所监测区域进行无缝覆盖是目前要解决的关键问题。针对此问题, Yang 等人在保持网络连通性和最大通信覆盖率时,提出了一种基于水下分簇的部署方案^[6]。为了有效提高网络的覆盖率和连通性,吴克启等人提出了利用 3D-Voronoi 多面体和 K-means 算法来完成覆盖空洞的修复,但由于传感器节点受水下复杂环境变化导致 UWSNs 网络拓扑不稳定的因素有很多,仅利用网络的连通性和覆盖率来评价 UWSNs 的网络拓扑是不够的^[7]。因此,谭跃进等人引入了网络结构熵与节点连接度概念,并将网络结构熵、连通性、覆盖率作为网络性能的评价指标,可有效反映 UWSNs 拓扑生成的可靠性^[8]。但是,水下传感器节点受水流、鱼群等不确定因素的影响使原有网络拓扑局部失效引起网络瘫痪。为此,刘林峰等人提出将网络拓扑愈合转化为斯坦纳最小树问题,通过 AUV 选择最优移动位置,实现网络拓扑愈合时还能降低传输时延和能耗^[9]。高学江首先将网络拓扑控制目标覆盖性、连通性、网络能耗、通信链路延迟和传输成功率优化问题映射成为势博弈问题,构建一个多目标 QoS 优化的 UWSNs 拓扑控制模型,设计相应的分布式节点调节算法^[10]。进一步, Liu 等人利用复杂网络理论构建双簇头,保证簇头的连通性和覆盖性,以立体网络无标度分层模型入手,利用计算边缘概率随机产生初始拓扑,并优化网络的传输延迟和能量消耗^[11]。Zou 等人提出根据 AUV 收集附近相邻的信息,再利用 PSO 优化 AUV 规划路径并调整它的速度和方向,使 AUV 运动到空洞区域位置从而来保证网络的连通和覆盖性。但未考虑水下恶劣环境对 AUVs 的能量消耗、传输时延网络性能^[12]。Misra 等人针对稀疏的 UWSNs 缺少定位所需的参考节点,建立一主多从斯塔克伯格伺机定位的博弈拓扑控制算法,该算法网络的覆盖率高、能量消耗少。但该算法未能反映出实际节点移动性对传输时延的影响^[13]。

通过上述 UWSNs 拓扑控制算法相关研究文献可以得出目前对网络拓扑控制研究仍存在以下难题:

(1) 网络拓扑模型构建未能充分考虑水下复杂环境因素对网络拓扑控制的影响,如受限能量与带宽、变化的传输时延特性、声信号的衰减,特别是节点的移动性;

(2) 现有的 UWSNs 网络拓扑控制算法多数只考虑连通性、覆盖性部分优化目标,还没有从整体上分析权衡多目标优化网络拓扑控制问题。

(3) 由水下传感器节点具有移动性或某些关键节点失效时,都会引起 UWSNs 拓扑结构频繁变化,造成网络通信链路间歇式中断,使网络通信不能正常工作;因此,需要所提出的网络拓扑控制算法应该具有自我网络拓扑修复与维护功能。

因此,本文以构建较为真实的面向复杂水环境的动态演化网络模型,充分考虑节点移动性,设计包括网络的连通性、覆盖性、平均能量消耗、动态拓扑反应性能、传输延迟以及数据传输成功率等多个优化目标的 UWSNs 网络拓扑控制算法,并进行拓扑维护,进而在确保网络覆盖率和连通性的同时,保持能耗均衡,延长网络寿命,提高数据传输成功率。

1 网络模型及假设

在 UWSNs 中,三维水下空间 Ω 可映射成无向图 $G(V,E)$,其中 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_N\}$ 表示随机部署在长方体 $\Omega = L \times W \times H$ 水体中的 N 个水下传感器节点的集合; $E = \{e_i^j, i \in V, j \in V, i \neq j\}$ 表示节点与节点 j 之间的链路集。在水下监测区域 Ω 中,随机部署 N 个传感器节点对其监测,在 Ω 水面上随机部署 m 个 Sink 节点,当所有节点将监测信息传输到基站的过程称为 UWSNs 一轮成功通信,为了方便问题研究对 UWSNs 做如下约束:

(1) 水下传感器节点根据自身压力传感器可以调节悬浮在任何深度;节点感知范围是球状,在球的内部能

够精准感知,而在球外部无法感知.

(2) 传感器节点之间工作模式是半双功模式,节点 i 的通信范围是指以节点 v_i 为圆心,以 R_i 半径的球体,而节点 i 的感知范围是以 R_S 为半径的球体($R_S \leq R_i$).

(3) 在 UWSNs 中,每个传感器节点都有唯一 D_i 标识.

(4) 首节点只能与簇内成员节点通信,簇首与簇首之间可以进行通信,Sink 节点只与簇首节点通信.

(5) 部节点死亡时的寿命也即网络的工作寿命.

由于水下环境复杂,对节点的效益难以量化,为了真实反映网络情况,本文从以下几方面考虑效益函数 U :

1) 节点 a_i, a_j 的覆盖性.设覆盖函数:

$$C(a_i, a_j) = \begin{cases} 1 & \text{覆盖} \\ 0 & \text{不覆盖} \end{cases} \quad (1)$$

2) 节点的连通性.设函数:

$$F(a_i, a_j) = \begin{cases} 1 & \text{连通} \\ 0 & \text{不连通} \end{cases} \quad (2)$$

3) 节点平均剩余能量模型

UWSNs 的传感器节点负载 $L_i(t)$ 是指单位时间内节点 i 自身需要发送数据的负载 $L_1(t)$ 和转发其他节点数据负载 $L_2(t)$ 两部分,则节点 i 的负载 $L_i(t)$ 为:

$$L_i(t) = L_1(t) + L_2(t) \quad (3)$$

$$L_2(t) = D_i^p L_1(t) \quad (4)$$

其中, D_i^p 为节点结构负载,与节点的度成正比.

结合传播损耗函数和噪声及水声能耗模型得节点 i 在负载 $L_i(t)$ 下的能耗为:

$$E_i(L_i(t), d) = E_e \times (L_1(t) + D_i^p L_1(t)) + \alpha(f)^d \times (L_1(t) + D_i^p L_1(t)) \times d^2 \quad (5)$$

$$E_r(L_i(t)) = E_e \times (L_1(t) + D_i^p L_1(t)) \quad (6)$$

$$E_r(i) = E_0 - (E_i(L_i(t), d) + E_r(L_i(t))) \quad (7)$$

$$\overline{E_i(a_i)} = \frac{1}{n} \sum_{j \neq i} \frac{E_0}{E_r(j)}, j \in Ne(i) \quad (8)$$

其中,

$$L_1(t) = lE_r + \frac{l}{R_{ij}} C_h z e^{\tilde{\alpha}(f) R_{ij} R_i^3} \quad (9)$$

$$C_h = 2\pi \cdot \frac{P^2}{\rho c_{\text{等效}}} \cdot 10^{0.1(TL + snr + NL)} \quad (10)$$

$$\tilde{\alpha}(f) = 0.0001 \cdot \alpha(f) \cdot \ln 10 \quad (11)$$

其中, d 为节点距离, z 为水深(m), R_{ij} 为节点水下通信半径, ρ 为水的密度, $c_{\text{等效}}$ 为等效声速, TL 为传播损耗, snr 信噪比, NL 为噪声功率谱密度, R_{ij} 为传输速率 bit/s, E_e 为发送、接收 1bit 数据所消耗的能量, l 为比特位数, $\alpha(f)$ 为介质吸收系数, α 为传播扩散系数因子.

在深水域特别是海洋,其与温度、深度及盐度均有关系,水声传播速度随着深度变化呈非线性变化.声波方程本文采用在淡水和海水中通用的 Chen-Millero-Li 声波方程:

$$C = c_w(T, P) + c_c(T, P)S + A(T, P)S + B(T, P)S^{3/2} + D(P)S^2 \quad (12)$$

其中, $c_w(T, P)$ 为纯水中的声速, $c_c(T, P)$ 为校正因子, $A(T, P)$ 、 $B(T, P)$ 、 $D(P)$ 为声速因子, S 为盐度.

当数据传输长度不变时,传感器节点处理数据的时延受传输速率大小影响;同时,当声波信号从发送节点可经过多条链路传送到海岸控制中心会产生多径传输时延;而端到端的传输时延与传输信号的链路质量密切相关.因此,综合分析水的物理性质和网络传输特点对传输时延的影响,接收节点到发送节点的端到端时延为:

$$t = T_{i \rightarrow j}^D = k_s \left(\frac{L}{R_{ij}} + \frac{D_{ij}(t)}{c} + \Delta\tau_k \right) \quad (13)$$

其中: k_s 为数据包重传的次数, L 为数据包的长度, R_{ij} 为传输速率; D_{ij} 为 t 时刻节点 i 到节点 j 所经过的距离, c 为式(12)中声波的传播速度方程. $\Delta\tau_k$ 为数据包第 k_s 次重传时多径传播引起的最大多径传播时延差.

5) 节点间传输成功率函数:

$$T(s_i) = (\prod_{j \in ne(i)} S(p_i, p_j))^{1/k_s} \quad (14)$$

6) 链路权重函数 $\lambda_{ij}(t)$ 为:

$$\lambda_{ij}(t) = \chi_1 d(i, j)^\zeta + \chi_2 \frac{1}{E_r(t)} \quad (15)$$

这里, $\chi_1 + \chi_2 = 1$,其中, ζ 为链路质量调节因子, $d(i, j)$ 为节点通信距离, $E_r(t)$ 为节点剩余能量.

2 多目标群体博弈模型

对于网络的覆盖性、连通性、平均能耗、动态拓扑反应性能、传输成功率是 UWSNs 的主要优化目标,由于这些目标的多重性及目标之间的相互矛盾,使这些目标性能均达到最优状态是很难实现的.因此,现将分布式多目标优化转化为博弈求解,利用反复博弈过程,实现对分布式多目标优化问题的动态求解.

- (1) 将互相竞争网络资源的分布式多目标优化问题中的节点决策集合映射为博弈模型中的节点集合;
- (2) 将网络分布式多目标优化问题求解空间映射成为博弈模型中传感器节点策略组合空间;
- (3) 将网络分布式多目标优化问题中决策目标函数映射为博弈中节点的效用函数,同时,再将网络分布式多目标优化问题中的全局优化函数映射为势博弈函数;
- (4) 将网络分布式多目标优化问题中的节点之间决策交互信息映射为博弈模型中的节点状态空间;
- (5) 将网络分布式多目标优化问题中的优化算法映射为博弈中的策略学习算法,满足分布式可选策略收敛于最优 Nash 均衡解,达到整个 UWSNs 综合性能最优的目的.

2.1 多目标群体博弈的加权模型

本文建立的多目标群体博弈的加权模型,在 UWSNs 中,水下传感器节点集、解的收索空间和节点目标函数与博弈模型中的参与者、策略空间和效用函数一一对应,其中:

- 1) 博弈参与者 $V = \{1, 2, \dots, N\}$ 对应为 UWSNs 中的传感器节点集.
- 2) 策略空间集 $A = \{A_i | i \in N\}$, 这里 A_i 为参与者(节点) i 可选择的策略.
- 3) 效用函数 $U_i: A \rightarrow B$, 这里 $B = \prod_{j \in N} A_j$ 为策略组合集, $a = (a_1, a_2, \dots, a_n) \in A$ 称为一个策略组合.

定义 1. 空间网络博弈: 设博弈 $G = \{N, A, \{U_i\}_{i=1}^n\}$ 中任意节点的收益值 U_i 只依赖于一部分博弈参与节点, 则称为空间网络博弈.

定义 2. 多目标群体博弈加权模型: $F: X \rightarrow \mathfrak{R}^N$ 是一个多目标群体博弈, 其中对每一群体 $p \in P$, 参与者选择一个策略决策 k^p 个目标. 引入相应一个 k^p 的权向量 λ^p , 定义:

$$(U_\lambda^p)_i(x) = \lambda^p U_i^p(x), \forall x \in X \quad (16)$$

即 $(U_\lambda^p)_i(x)$ 为给定的权向量 $\lambda^p \in \mathfrak{R}^{k^p}$, 在节点状态 $x \in X$, 策略 $i \in S^p$ 对应的加权支付函数.

定义 3. 设 $G = \langle N, A, \{(U_\lambda^p)_i\}_{i=1}^n \rangle$ 是具有权值的势博弈的充要条件是存在函数 $\phi: A \rightarrow \mathfrak{R}^{k^p}$, 当任意博弈节点 $i \in N$, 使任意两个不同策略组合 $a_i^1, a_i^2 \in A_j$, 及 $a_{-i} = (a_1, \dots, a_{i-1}, a_{i+1}, \dots, a_n) \in \prod_{j \neq i} A_j$, 则:

$$(U_\lambda^p)_i(a_i^1, a_{-i}) - (U_\lambda^p)_i(a_i^2, a_{-i}) = \lambda_i [\phi(a_i^1, a_{-i}) - \phi(a_i^2, a_{-i})] \quad (17)$$

式中, ϕ 为势函数.

由于水下环境复杂多变, UWSNs 拓扑控制算法不但要考虑网络的覆盖性、连通性, 而且还要考虑数据传输成功率、节点负载能耗等多个目标进行优化. 因此, 我们综合考虑节点剩余能量对保持网络均衡的影响, 运用线

性加权标量化法将多目标群体博弈化为单目标群体博弈模型,其效用函数为:

$$(U_{\lambda}^p)(a_i, a_{-i}) = C(a_i, a_{-i}) \times F(a_i, a_{-i}) \times \left(\lambda_1 E_i^{TX \max} \frac{E_o(i)}{E_i(i)} + \lambda_2 T(a_i) \overline{E_i(a_i)} + \lambda_3 \frac{E_o(i)}{E_i(i)} \right) - \chi E_i^{TX}(a_i, a_{-i}) \frac{E_o(i)}{E_i(i)} \quad (18)$$

式中, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \chi \in [0, 1]$ 为权重因子, $E_i^{TX \max}$ 为最大传输能耗, $E_o(i), E_r(i)$ 分别为初始和剩余能量, $E_i^{TX}(a_i, a_{-i})$ 为当前节点 i 传输消耗能耗。

定理 1. 博弈模型 $G = \langle N, A, U(a) \rangle$ 为具有权值的势博弈, 定义加权势函数 $\phi(a_i, a_j)$:

$$\phi(a_i, a_j) = \sum_{i \in N} C(a_i, a_j) \times F(a_i, a_j) \times \left(\lambda_1 E_i^{TX \max} \frac{E_o(i)}{E_i(i)} + \lambda_2 T(a_i) \overline{E_i(a_i)} + \lambda_3 \Delta(a_i, a_j) \frac{E_o(i)}{E_i(i)} \right) - \chi E_i^{TX}(a_i, a_j) \frac{E_o(i)}{E_i(i)} \quad (19)$$

则 $\phi(a_i, a_j)$ 为有权值的势博弈函数。

定理 2. 博弈模型 $G = \langle N, A, \{(U_{\lambda}^p)_i\}_{i=1}^n \rangle$ 必存在加权 Nash 平衡点。

证明:反证法:设 $a^{\#} = (a_1^{\#}, a_2^{\#}, \dots, a_n^{\#})$ 是最优效用函数(17)的解。若 $a^{\#}$ 不是 $G = \langle N, A, \{(U_{\lambda}^p)_i\}_{i=1}^n \rangle$ 加权 Nash 平衡点, 则 $\exists a_i^N$ 使得 $(U_{\lambda}^p)_i(a_i^{\#}, a_{-i}^{\#}) < (U_{\lambda}^p)_i(a_i^N, a_{-i}^{\#})$ 成立; 由定理 3 知 $G = \langle N, A, \{(U_{\lambda}^p)_i\}_{i=1}^n \rangle$ 是势博弈, 有 $\phi(a_i^{\#}, a_{-i}^{\#}) < \phi(a_i^N, a_{-i}^{\#})$ 成立。这与 $a^{\#}$ 不是(17)的加权 Nash 平衡点与假设矛盾, 所以 $a^{\#}$ 是 $G = \langle N, A, \{(U_{\lambda}^p)_i\}_{i=1}^n \rangle$ 一个加权 Nash 平衡点。

定理 3. 博弈模型 $G = \langle N, A, \{(U_{\lambda}^p)_i\}_{i=1}^n \rangle$ 必存在纯 Nash 均衡策略。

证明:公式(18)是运用线性加权标量化法将多目标群体博弈化为单目标群体博弈模型的效用函数。由定理 1 得知, $G = \langle N, A, \{(U_{\lambda}^p)_i\}_{i=1}^n \rangle$ 是有关值的势博弈, 再由定理 2 得知, 该模型存在加权 Nash 平衡点, 又由于 $(U_{\lambda}^p)_i(x)$ 中的支付函数为连续的, 所以博弈模型 G 必存在 Nash 平衡点, 即博弈模型 G 存在纳什均衡。对任意节点 $i \in N$ 的能量是有限的, 即节点 i 的可选策略集 A_i 也是有限的, 所以一定 $\exists j \in N$ 使得 $j = \max(\prod_{j \in N} A_j)$, 也就是 Nash 平衡点, 所以此策略组合为博弈模型 G 的解。

2.2 基于Log-linear模型的分布式学习规则

博弈模型 $G = \langle N, A, \{(U_{\lambda}^p)_i\}_{i=1}^n \rangle$ 存在的 Nash 均衡解是 UWSNs 节点分布式执行拓扑控制优化问题(18)的最优解, 也是 UWSNs 性能达到最优状态的近似最优解。因此, 如何设计学习规则满足传感器节点的分布式可选策略收敛于最优 Nash 均衡解, 达到整个 UWSNs 综合性能最优的目的。本文采用 Log-linear 模型设计学习规则, 实现博弈中节点策略行为的更新过程, 利用非齐次马尔可夫链理论证明网络拓扑控制目标函数的优化问题收敛到最大化势博弈函数的解。

针对博弈模型 $G = \langle N, A, \{(U_{\lambda}^p)_i\}_{i=1}^n \rangle$, 设计 UWSNs 节点 Log-linear 学习规则:

(1) Log-linear 模型。假设传感器节点分布服从玻尔兹曼分布, a_i 为节点 i 的选择策略, A_i 为可行策略集。在决策时刻 t 时, $a_i \in A_i$ 被选择的概率为 $p_{a_i(t)}^i$:

$$p_{a_i(t)}^i = \frac{\exp(\beta(U_{\lambda}^p)_i(a_i, a_{-i}(t-1)))}{\sum_{a_i \in A_i} \exp(\beta(U_{\lambda}^p)_i(a_i, a_{-i}(t-1)))} \quad (20)$$

式中, β 为玻尔兹曼分布参数, $a_{-i}(t-1)$ 为在 $t-1$ 时刻节点 i 以外的其他节点的策略组合。

(2) 更新规则。令传感器节点集 N 的所有节点策略组合 $B = \prod_{j \in N} A_j$ 为状态空间, 在 t 时刻所有传感器节点策略组合 $a(t) = (a_i(t))_{i \in N}$ 的状态是 Markov 状态, 则策略更新规则是一个 Markov 过程。

(3) Log-linear 学习规则。由规则(1)和规则(2)可知, Log-linear 学习过程是一个 Markov 链 M_{β} :

$$M_{\beta} = \{ \{a(t)\}, B, P \} \quad (21)$$

式中, $a(t)$ 是状态变量, B 为状态空间, P 为状态转移矩阵。

当 B, P 与时间 t 无关时, M_{β} 是关于时间 t 的齐次 Markov 链, 若按式(20)计算规则, 则 Markov 链 M_{β} 具有唯一的稳态分布 $\sigma(a)$ 为:

$$\sigma(a) = \frac{\exp(\beta\phi(a))}{\sum_{a_i \in A} \exp(\beta\phi(a_i))} \quad (22)$$

当 β, P_t 与时间 t 有关时, M_β 是关于时间 t 的非齐次 Markov 链, 若满足:

$$\beta(t) = \frac{\ln(\gamma t + 1)}{c} \quad (23)$$

$$\forall t > 0, sp(P_t, c) = sp(\Pi_t^{t+c-1} P_t) = \min_{i,j} \sum_k \min(p_{i,k}^{t,c}, p_{j,k}^{t,c}) > 0 \quad (24)$$

式中 $\gamma \geq 1, c$ 为状态转移步数, $P_{t,c}$ 为 t 时刻 c 步转移矩阵, $p_{i,k}^{t,c}$ 为 t 时刻 c 步转移矩阵第 i 行第 k 列元素. 则非齐次 Markov 链 $M_\beta = \{\{a(t)\}, B, P_t\}$ 是一个弱 Markov 链.

因此, Log-linear 学习算法是一个弱可遍历的 Markov 链, 由此可得如下定理:

定理 4. 设博弈模型 $G = \langle N, A, \{(U_\lambda^p)_i\}_{i=1}^n \rangle$, ϕ 为势博弈函数, 传感器节点集合 $N = \{1, 2, \dots, n\}$, 策略空间集 $A = \{A_i | i \in N\}$, $(U_\lambda^p)_i$ 为效用函数. 若博弈节点按公式(27)Log-linear 学习规则, 则该算法收敛于最大化势博弈函数的解.

3 UWSNS 节点分布式布式拓扑控制算法

在博弈模型 $G = \langle N, A, \{(U_\lambda^p)_i\}_{i=1}^n \rangle$ 基础上, 提出基于 Log-linear 学习规则设计的 UWSNs 节点分布式执行拓扑控制算法. 算法分为网络的网络拓扑构建、拓扑博弈、拓扑维护与修复 3 个阶段.

3.1 网络拓扑构建

分析节点间通信距离和链路质量的基础上, 初始化传感器节点 i 的最大通信半径为 R_C , 感知半径为 R_S . 节点 i 向周围节点广播信息包 NCK, 其中, $NCK = \{ID_i, P_i, E_i^r\}$, ID 为 i 标识码, P_i 为 i 的位置坐标, E_i^r 为 i 的剩余能量. 当传感器节点 j 接收到节点 i 信息包 NCK 后, 节点 j 向节点 i 发送信息包 ACK, 其中, $ACK = \{ID_j, P_j, E_j^r, E_i^{t,j}, \Delta, r_{ij}, (U_\lambda^p)_i\}$ 这里 Δ 动态拓扑反应能力, r_{ij} 节点 i 到 j 的路径传输成功率, $(U_\lambda^p)_i$ 为效用函数. 当节点 i 收到周围节点 j 的确认信息包 ACK 后, 则节点 i 将节点 j 添加至节点 i 邻居信息表中. 然后以通信半径 R_C 为初始策略, 由公式(20)~公式(23)及定理 2~定理 4 得均衡策略组合, 通过公式(18)效用函数的最大值和节点邻居信息表确认簇首及簇内成员, 并构建 UWSNs 分簇层次型网络拓扑结构. 这里规定: 在最大通信半径内有双向通信链路的邻居节点不能选为簇首, 簇首只与簇内成员连通, 簇首与簇首不连通.

3.2 网络拓扑博弈执行阶段

博弈模型 $G = \langle N, A, \{(U_\lambda^p)_i\}_{i=1}^n \rangle$ 的初始化状态下, 每个节点以公式(5)和公式(6)确定自己的能耗, 由公式(17)进行博弈, 每次调整一个节点的能耗, 其余节点保持其能耗不变, 按照 Log-linear 学习算法, 实现博弈中传感器节点决策行为, 每个节点按公式(20)、公式(21)进行更新策略; 当通信半径较小时, 如果传感器节点所选择策略的效用函数 $(U_\lambda^p)_i$ 较大时, 则通过调整传感器节点的通信半径来更新邻居节点信息表, 否则保持策略不变, 这样重复迭代, 最终达到网络拓扑控制优化的均衡解.

3.3 网络拓扑维护修复

当 UWSNs 中节点出现失效或能量耗尽达到一定阈值时, 将会影响整个网络生命周期. 因此, 需要考虑均衡网络节点的能量消耗, 分析影响动态拓扑反应能力重要因子, 设计网络拓扑修复与重构算法.

首先设定能量阈值 τ_E 和触发机制, 若 $\tau_E < \frac{E_o(i)}{E_r(i)}$ 时, 则启动网络拓扑修复机制; 另外, 当网络拓扑中有新的节点加入或者失效时, 先判断网络是否连通, 若连通, 则网络拓扑不变, 否则执行拓扑修复机制, 具体情况描述如下:

- (1) 初始化能量阈值 τ_E , 计算节点的剩余能量 $E_r(i)$, 确定冗余节点;
- (2) 当节点剩余能量 $E_r(i) < \tau_E$, 依据冗余节点进行调整, 均衡网络能量, 完成拓扑修复. 否则返回情况(1);
- (3) 当节点加入、节点失效时, 对网络连通性和网络覆盖率无影响, 则返回情况(1). 否则执行拓扑修复算法.

3.4 PG-LTCA算法实现

PG-LTCA 算法的伪代码见表 1.

Table 1 Pseudo-code of PG-LTCA algorithms

表 1 PG-LTCA 算法的伪代码

| PG-LTCA 算法 | |
|------------|---|
| input: | $V, N, H, R_c, E_o(i)$ |
| output: | NO |
| 1 | Initializes: //初始化网络参数 |
| 2 | Node(i) broadcast(R_c) NCK(ID,(x,y,z), E_r) //每个节点以 R_c 广播信息包 NCK |
| 3 | Update Neighbor node information table(T_{Ni})//每个节点收到 NCK 返回 ACK 包更新当前的 T_{Ni} |
| 4 | Each Node(i) $\in V$, $h=0$, $R_c = \max\{R_c(i)\}$ |
| 5 | $\forall i \in Na_{-i} = R_c(i)$ $\{a_{-1}, a_{-2}, \dots, a_{-N}\}$ Node_R = $\{a_{-1}, a_{-2}, \dots, a_{-N}\}$ //节点 i 根据 T_{Ni} 中与邻居节点 j 的距离确定策略 |
| 6 | do |
| 7 | For all $i \in N$ do |
| 8 | $k=k+1$ |
| 9 | $a_{-i} = \arg \max_{a_{-i} \in R_c(i)} u_i(a_{-i})$ |
| 10 | endif |
| 11 | while (Node_R=C) //当节点策略无变化时 |
| 12 | get T_{Ni} and connect Matrix //确定最佳策略组合生成网络邻居信息表 |
| 13 | get the cluster heads //选择簇头并分簇 |
| 14 | For j cluster heads do |
| 15 | the second game process |
| 16 | round=0 |
| 17 | using formula (2-5)、(2-13)、(2-15) |
| 18 | calculate E_i, D_{ij}, T //计算网络通信能耗、平均端到端时延、传输成功率 |
| 19 | count=0, round = round+1 $n=n+1$ |
| 20 | if $E_i < E_o \times 0.1$ && $F(a_i, a_j) = 0$ |
| 21 | restart |
| 22 | end if |
| 23 | end while |

4 仿真实验与结果分析

4.1 仿真实验环境参数设置

Table 2 Parameter setting of simulation environment

表 2 仿真环境参数设置

| 仿真实验参数 | 参数说明 | 初始值 |
|-------------------------|----------|----------------|
| N | 节点数量 | 300 |
| V | 节点分布区域 | 400m×400m×400m |
| $E_o(J)$ | 初始能量 | 50J |
| $\alpha(f)$ | 介质吸收系数 | 0.002 |
| L | 数据长度 | 50 B |
| BE(i, j) | 链路带宽 | (100,200)kbps |
| v | 水下声速 | 1500m/s |
| $E_i^{TX}(a_i, a_{-i})$ | 当前节点传输能耗 | 0.05mj/bit |
| ζ | 链路质量调节因子 | 1 |
| χ_1 | 调节系数 | (0.5,1) |

4.2 算法性能评价指标

这里为便于理解仿真过程,我们给出实验仿真的性能评价指标为:

(1) 网络拓扑的健壮性:以网络连通性为主要目标,当网络某条链路出现中断时,网络可以选择其他链路快速传送数据,即网络的连通性越好,网络的健壮性也就越强.

(2) 节点平均度:在水下传感器网络中,每个传感器节点度的和与网络节点总数之比值被称为节点平均度

D_{av} ,即:

$$D_{av} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i^{\alpha} \quad (25)$$

式中, d_i^{α} 为节点的连通度, N 为网络节点总数.

(3) 通信链路平均长度:在 UWSNs 中,节点间每条通信链路长度之和与网络链路总数目之比被称为链路平均长度 l_{av} ,即:

$$l_{av} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N_i} l_{ij} \quad (26)$$

其中, l_{ij} 为节点 i 和 j 之间的通信链路长度, L 为网络的链路总数.

(4) 网络生命周期:在水下传感器网络中,首个节点出现死亡节点的时刻与网络开始工作的时刻之差被称为网络的生命周期 T_L ,即:

$$T_L = T_D - T_B \quad (27)$$

其中, T_D 为首个节点出现死亡的时刻, T_B 网络开始工作的时刻.

4.3 PG-LTCA鲁棒性分析

本节选取两种基于博弈论的水下网络拓扑控制算法 EFPCA、PGTCA 与本文提出的 PG-LTCA 算法进行对比.首先,对 3 种算法生成的网络拓扑结构进行对比;在三维监测区域(400×400×400)的内随机生成 50 个节点,在相同的仿真环境中,随着传感器节点数量从 30 变化到 150 时,比较 EFPCA、PGTCA 与本文提出的 PG-LTCA 的最大节点度和节点平均度,进而验证 PG-LTCA 算法的网络拓扑鲁棒性.

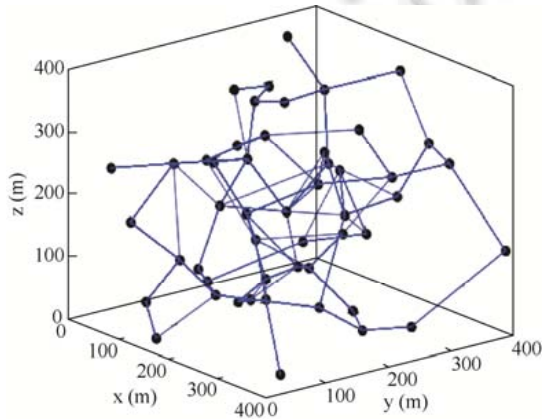


Fig.1 EFPCA algorithm network topology

图 1 EFPCA 算法网络拓扑

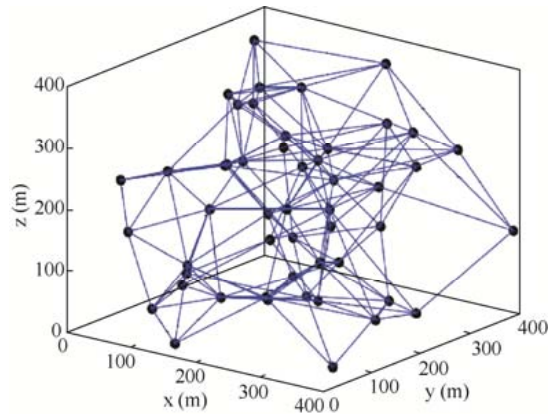


Fig.2 PGTCA algorithm network topology

图 2 PGTCA 算法网络拓扑

图 1 展示了 EFPCA 算法采用博弈理论均衡节点能耗方法构建网络拓扑结构,可以看出存在较多剩余能量少的瓶颈节点,从而导致不能完全保证网络全覆盖以及网络的连通性问题;图 2 展示了 PGTCA 算法利用势博弈模型均衡网络的耗能构建网络拓扑结构,虽然有效减少了瓶颈节点,但是节点度过高,导致传感器节点间信息传输产生冲突,造成不必要的能量消耗.

图 3 展示了 PG-LTCA 算法利用势博弈和 Log-linear 模型相结合即考虑节点负载能耗又兼顾均衡网络能耗优化网络拓扑结构,将剩余能量多的节点作为数据中继转发节点,使关键节点和边缘节点由于能量消耗过快导致过早死亡现象得到缓解,进而有效延长了网络生命周期.

图 4、图 5 展示了 EFPCA、PGTCA 与本文提出的 PG-LTCA 算法的节点的最大度与平均度对比图.总体展示了 3 种算法都是随着节点数量的增加而节点的最大度和平均度也增大,当节点数达到一定量时达到相对稳定状态.具体来看 PG-LTCA 算法最大节点度数相对 EFPCA、PGTCA 较低,PG-LTCA 的最大节点度约为 5,节点

平均度约为 2.32;EFPCA、PGTCA 最大节点度分别约为 10.2 和 6.5,节点平均度约为 2.35 和 2.31,由于 PG-LTCA 最大与节点平均度相差较小,所以由 PG-LTCA 生成的网络拓扑结构稳健性好.

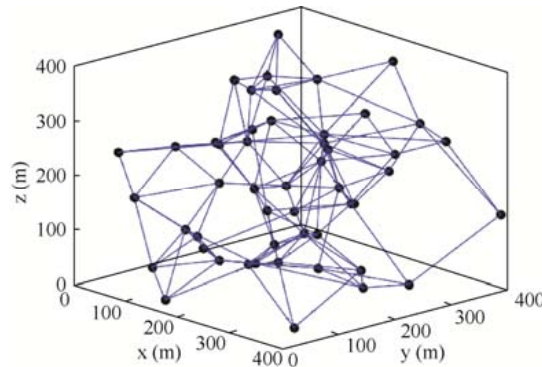


Fig.3 PG-LTCA algorithm network topology

图 3 PG-LTCA 算法网络拓扑

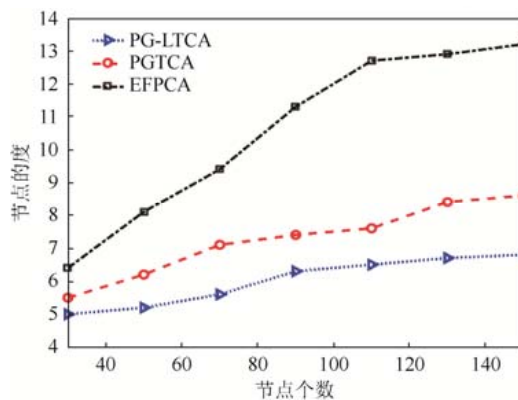


Fig.4 Max node degree contrast graph

图 4 最大节点度对比图

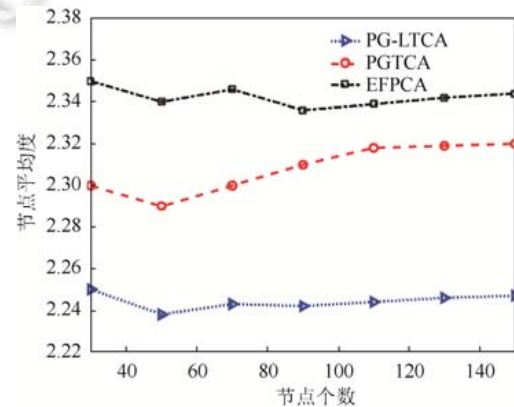


Fig.5 Node average degree contrast graph

图 5 节点平均度对比图

4.4 PG-LTCA链路质量分析

本节在上述实验仿真环境下,通过改变节点的个数来对比分析 EFPCA、PGTCA 和 PG-LTCA 算法的平均链路长度,以及在调节系数 χ_1 不同条件下,分析 PG-LTCA 算法的链路质量.

图 6 展示了 EFPCA、PGTCA 与本文提出的 PG-LTCA 算法随着节点数从 50 增加到 150 的网络拓扑平均链路长度变化情况,由 EFPCA 构成拓扑结构平均链路长度最长,即在节点相等时,EFPCA 算法生成的网络拓扑链路质量差、能耗高;另外,PGTCA 算法的平均链路长度比 EFPCA 算法小,但比 PG-LTCA 算法大,这表明 PG-LTCA 算法生成的网络拓扑的链路通信质量优于 EFPCA 和 PGTCA 两种算法.

图 7 展示了当节点数量不变时,随着调节系数 χ_1 逐渐变小,EFPCA、PGTCA 与本文提出的 PG-LTCA 算法的链路平均长度略有增加,通信链路质量也变得稍差些,但是从图 6 可以看出 3 种算法链路平均长度增加幅度不大;这里由于 $\chi_1 + \chi_2 = 1$,当 χ_1 减少, χ_2 是增大时,PG-LTCA 算法均衡能耗效果增大.因此,用 PG-LTCA 算法可以牺牲少量通信质量去延长网络寿命是可行的.

4.5 PG-LTCA均衡能耗分析

均衡节点之间的能耗既要考虑节点间的剩余能量,又要兼顾节点本身的负载情况.在上述相同实验仿真环境下,通过链路权值函数在均衡剩余能量方面的优劣对比分析 EFPCA、PGTCA 和 PG-LTCA 算法的在网络运行过程中均衡能耗.

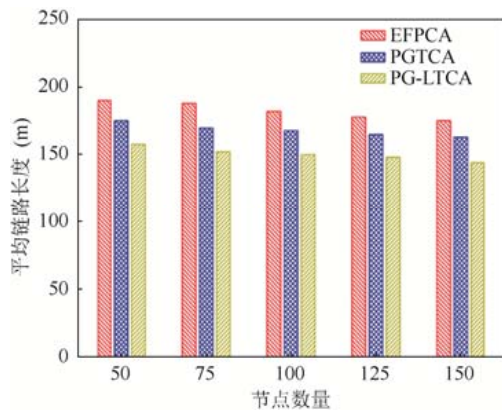


Fig.6 Average link length with different of nodes link

图 6 节点数不同的平均链路长度对比图

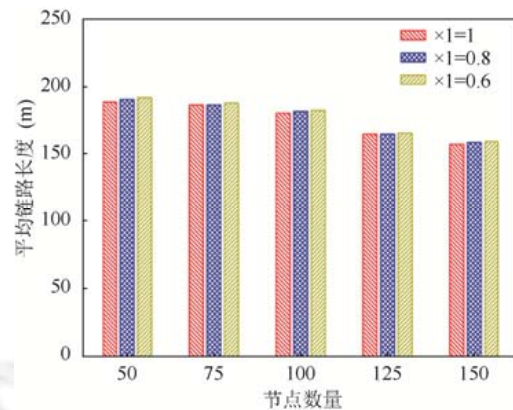


Fig.7 Contrast diagram of average length with variation of adjustment coefficient χ_1

图 7 调节系数 χ_1 变化的平均链路长度对比图

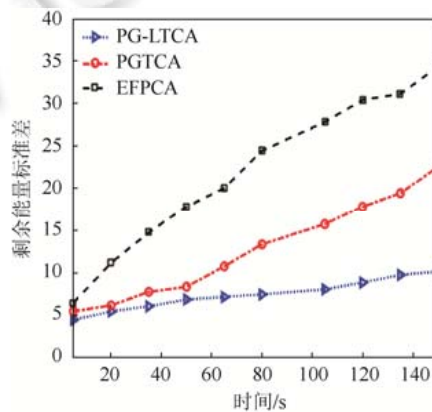


Fig.8 Contrast diagram of standard deviation of node remaining energy

图 8 节点剩余能量标准差的对比图

图 8 展示了 EFPCA、PGTCA 和 PG-LTCA 算法在网络拓扑重构 150 次时,随着节点数量逐渐增大,对 3 种算法的节点剩余能量标准差做了比较,由于 EFPCA 算法未考虑节点的负载能耗,所以该算法剩余能量标准差上升的速度较快,部分节点能量消耗大,能量消耗不均衡程度高;PGTCA 算法通过节点博弈策略让剩余能量多的节点做转发节点,节点剩余能量标准差增长速度相对较慢,网络能耗均衡能力相对较好,但由于未考虑传感器节点自身能量消耗情况,所以使传感器节点剩余能量标准差大于 PG-LTCA 算法.

4.6 PG-LTCA延长网络生存周期效果分析

本节验证 PG-LTCA 算法延长网络生存周期是能耗均衡的主要目标.因此,在上述相同实验仿真环境下,通过利用链路权值函数重构网络拓扑进行对比分析 EFPCA、PGTCA 和 PG-LTCA 算法的网络生存周期.

图 9 展示了 EFPCA、PGTCA 和 PG-LTCA 算法在不同节点数量时,对这 3 种算法的网络生存周期做了比

较,从图中可以看出,PG-LTCA 算法随着节点数逐渐增大,均优于仅使用通信距离作为链路权值函数的 EFPCA 算法和综合考虑通信距离和剩余能量作为链路权值函数的 PGTCA 算法,这是由于 PG-LTCA 算法既使用了通信距离、剩余能量,又使用了节点负载作为链路权值函数去重构网络拓扑来延长网络生存周期。

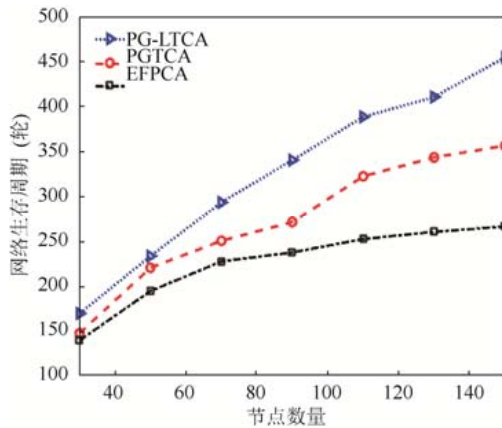


Fig.9 Network life cycle contrast graph with different number of nodes
图9 不同节点数的网络生存周期对比图

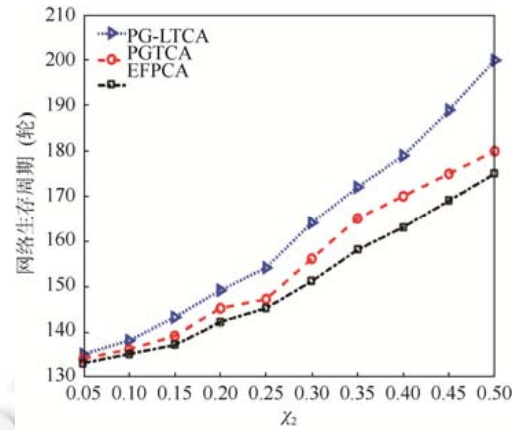


Fig.10 Comparison of network life cycle with different regulating coefficients χ_2
图10 不同调节系数 χ_2 的网络生存周期对比图

图10展示了EFPCA、PGTCA和PG-LTCA算法在调节系数 χ_2 取不同数值时,网络生存周期的变化情况;可以看出,EFPCA算法由于存在较多的瓶颈节点,使某些节点过早死亡,从而影响网络的生存周期;而PGTCA算法虽然考虑了网络均衡能耗的调节系数 χ_2 ,但它并没有考虑节点负载情况,这将导致由于个别节点负载能耗过高造成节点过早死亡,从而也影响网络的生命周期;PG-LTCA算法根据节点的剩余能量与负载能耗动态调整网络的拓扑结构,使网络生存周期随 χ_2 值增加而明显比PGTCA的网络生存周期长。

5 结论

本文提出了一种基于势博弈与时变Log-linear学习分布式UWSNs拓扑控制算法,首先,分析UWSNs优化目标:覆盖率、连通性、平均能耗、平均端到端时延和平均传输成功率对网络拓扑控制的影响,并将多目标优化问题映射成博弈问题,构建网络势博弈模型.在势博弈模型基础上,进一步利用机器学习中的Log-linear设计学习规则,提出基于势博弈与Log-linear的网络拓扑控制模型,满足传感器节点的分布式可选策略收敛于最优Nash均衡解,从而达到保持网络能耗均衡、延长网络生命周期的目的.同时,传感器节点受水流等不确定性因素影响,采用周期性重构网络拓扑控制保证网络的连通性。

References:

- [1] Huang H, Zheng YR. Node localization with AoA assistance in multi-hop underwater sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 2018,78: 32-41.
- [2] Shetty S, Pai RM, Pai MMM. Energy efficient message priority based routing protocol for aquaculture applications using underwater sensor network. *Wireless Personal Communications*, 2018(3):1-24.
- [3] Ming X, Ling L. SenseVault: A three-tier framework for securing mobile underwater sensor networks. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2018.
- [4] Yildiz HU. Maximization of underwater sensor networks lifetime via fountain codes. *IEEE Trans. on Industrial Informatics*, 2019.
- [5] Golen EF, Mishra S, Shenoy N. An underwater sensor allocation scheme for a range dependent environment. *Computer Networks*, 2010,54(3):404-415.

- [6] Yang G, Wei Z, Cong Y, *et al.* Analysis of security and threat of underwater wireless sensor network topology. In: Proc. of the SPIE 4th Int'l Conf. on Digital Image Processing (ICDIP 2012). 2012.
- [7] Wu KQ, Zheng RG, Wang ZS. Coverage method for 3D underwater WSNs. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2018(1):25–27,31 (in Chinese with English abstract).
- [8] Tan YJ, Wu J. Network structure entropy and its application to scale-free networks. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2004,24(6):1-3 (in Chinese with English abstract).
- [9] Liu LF, Liu Y. Study of topology recovery algorithm based on full Steiner minimum tree problem in underwater wireless sensor networks. *Journal on Communications*, 2010,31(9):30–37,45 (in Chinese with English abstract).
- [10] Gao XJ. Topology control algorithms for QoS-gurtanteed in UWSN and reasearch on the monitoring system of water quality [MS. Thesis]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2017 (in Chinese with English abstract).
- [11] Liu L, Wang R, Fu X. Topology control algorithm for underwater wireless sensor networks using GPS-free mobile sensor nodes. *Journal of Network & Computer Applications*, 2012,35(6):1953–1963.
- [12] Zou J, Gundry S, Kusyk J, *et al.* Bio-inspired topology control mechanism for autonomous underwater vehicles used in maritime surveillance. *IEEE Int'l Conf. on Technologies for Homeland Security*. 2014,10(5),201–206.
- [13] Misra S, Ojha T, Mondal A. Game-Theoretic topology controlfor opportunistic localizationin sparse underwater sensor networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2015,14(5):990–1003.

附中文参考文献:

- [7] 吴克启,郑润高,王忠思.三维水下无线传感器网络覆盖方法.传感器与微系统,2018(1):25–27,31.
- [8] 谭跃进,吴俊.网络结构熵及其在非标度网络中的应用.系统工程理论与实践,2004,24(6):1–3.
- [9] 刘林峰,刘业.基于满 Steiner 树问题的水下无线传感器网络拓扑愈合算法研究.通信学报,2010,31(9):30–37,45.
- [10] 高学江.面向 QoS 保障的 UWSN 拓扑控制算法及水质在线监测系统的研究[硕士学位论文].杭州:浙江理工大学,2017.



魏连锁(1975—),男,黑龙江齐齐哈尔人,副教授,CCF 专业会员,主要研究领域为水下传感器网络,信息处理



胡现成(1990—),男,硕士生,主要研究领域为水下传感器网络,信息处理.



韩建(1995—),男,硕士生,主要研究领域为水下传感器网络,信息处理.



陈齐齐(1996—),男,硕士生,主要研究领域为水下传感器网络,信息处理.