

基于节点休眠的水下无线传感器网络覆盖保持分簇算法

刁鹏飞^{*①②} 王艳娇^③

^①(东北林业大学工程技术学院 哈尔滨 150000)

^②(哈尔滨工程大学信息与通信工程学院 哈尔滨 150001)

^③(东北电力大学信息工程学院 吉林 132012)

摘 要: 为有效延长水下无线传感器网络的生命周期、保持网络覆盖率, 本文提出一种基于节点休眠的覆盖保持分簇算法。首先计算网络节点的覆盖冗余度, 并对覆盖冗余度高的节点执行休眠策略, 然后以网络覆盖率及节点能耗均衡性为目标, 采用多目标算法进行求解, 再利用 TOPSIS 法从非支配解集中选出较优解, 当有节点死亡时, 通过唤醒策略保持网络覆盖率。仿真结果表明, 与目前较好的网络规划算法相比, 该算法能够更好地降低网络能耗, 延长网络生命周期并保持网络对环境的覆盖率。

关键词: 水下无线传感器网络; 多目标优化; 节点休眠; TOPSIS

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)05-1101-07

DOI: 10.11999/JEIT170787

Coverage-preserving Clustering Algorithm for Underwater Sensor Networks Based on the Sleeping Mechanism

DIAO Pengfei^{①②} WANG Yanjiao^③

^①(College of Engineering and Technology, Northeast Forestry University, Harbin 150000, China)

^②(College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

^③(College of Information Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: A new network deployment algorithm is proposed for the problem of low network lifetime and low network coverage of underwater sensor networks. Firstly, the node which has a higher network coverage redundancy should be asleep. Then the network coverage and energy consumption will be set as the objective functions. And the multi-objective optimization algorithm will be adopted to optimize it. At last, the TOPSIS is used to select the best solution from the Non-dominated solution set. If any node is dead, the sleeping nodes in the near dead node will be waken up to preserve the coverage. The results demonstrate that the proposed algorithm outperform the existing algorithms in terms of various performance metrics including energy consumption and the coverage.

Key words: Underwater Wireless Sensor Network (UWSN); Multi-objective optimization; Node dormancy; TOPSIS

1 引言

由于人们对海洋探索需求的不断增大, 水下无线传感器网络 (Underwater Wireless Sensor Networks, UWSNs) 目前广泛应用在水下辅助导航、水下资源探测、水下环境监测等领域^[1-5], 已经成为目前的研究热点之一。

然而, 由于水下传感器自身携带能量有限, 且较难更换或补充电源, 因此延长网络工作时间并在此过程中保持网络的覆盖率是无线传感器网络的热点及难点问题之一。针对这一问题, 陆地无线传感器网络主要通过节点休眠策略^[6], 设计分簇协议^[7], 采用多目标均衡优化^[8-10]的方式降低网络节点能耗, 延长网络生命周期。但因为能耗模型与 UWSNs 差异较大且陆地无线传感器网络覆盖模型主要集中在 2 维平面上, 这与处于 3 维空间的水下传感器网络的覆盖模型是不匹配的, 所以不能将陆地传感器网络的研究成果直接应用于 UWSNs 上, 因此亟待加大对 UWSNs 覆盖及延长网络寿命等方面的研究力度。

收稿日期: 2017-08-04; 改回日期: 2018-01-15; 网络出版: 2018-03-14

*通信作者: 刁鹏飞 398317196@qq.com

基金项目: 东北林业大学“双一流”人才引进项目, 国家自然科学基金(61501107)

Foundation Items: Northeast Forestry University “Double Top” Talent Introduction Project, The National Natural Science Foundation of China (61501107)

对此,文献[11]采用异构的方式通过引入可移动节点弥补网络中出现的覆盖空洞并延长网络寿命,但水下环境较复杂,节点移动的精确性有待提高且移动节点将耗费较大能量。文献[12]采用动态分层机制周期性地对网络节点进行分簇,该算法虽然能在一定程度上延长网络生命周期,但没有考虑节点死亡对网络覆盖率的影响;LEACH-Coverage-U^[13]算法是在陆地传感器网络LEACH算法的基础上,建立起的周期性选择簇头的算法,该算法虽能在一定程度上延长网络生命周期,但频繁的选择簇头会为网络带来较大的能量损耗,且该算法不能有效保证网络覆盖率;文献[14]提出的基于分簇的水下传感器网络覆盖保持路由算法,与LEACH-Coverage-U相比能够在延长网络生命周期的同时,较好地保持了网络的覆盖率,但簇与簇之间、簇与SINK节点之间易出现不连通现象,进而导致局部网络中断,且靠近SINK节点的簇头节点负载较大,其寿命较短易过早死亡,进而影响整个网络的生命周期。文献[15]提出一种分布式的网络不均匀分层的覆盖保持路由算法,即根据节点距离SINK节点的不同距离将网络分层以减小靠近SINK节点的节点通信能耗,并基于网络覆盖冗余度的方式选择簇头,该算法虽然能较好地延长网络寿命并保持网络覆盖率,但易出现簇头节点含有较多簇成员的情况,因此不能较好地均衡网络能耗,其延长网络生命周期并保持网络覆盖率的能力仍有待进一步提高。

基于以上分析,为延长网络寿命、保持网络覆盖率,借鉴陆地无线传感器网络拓扑结构的设计方式。一方面休眠策略在保持一定的网络覆盖率的前提下,休眠一些节点可以有效地减少网络节点尤其是靠近簇头节点的能耗;另一方面多目标均衡策略可以较好地均衡网络节点的能量消耗,给出更优的节点通信方式。因此本文将结合这两者,提出一种基于节点休眠的覆盖保持分簇算法(Coverage-Preserving Clustering Algorithm for underwater wireless sensor networks based on the Sleeping Mechanism, CPCA-SM)。该算法首先计算网络节点的覆盖冗余度,对冗余度较大的节点执行休眠策略以降低网络节点的负载,以降低每轮通信中网络节点的能耗;其次,以网络能耗均衡和网络覆盖率为目标建立函数优化模型,并采用目前求解2目标问题在解集多样性和分布性表现较好的MOGSA/D算法^[16]对其进行优化求解,以得到较优的节点通信方案;然后采用TOPSIS^[17]从多目标算法得到的非支配解集中选出较优的分簇方案,最后再根据得到的最优方案计算各节点的剩余能量等信息并通过唤醒睡眠节点的方式保持网络覆盖率。

2 系统模型

设 N 个传感器节点随机分布在一个3维水下区域内,SINK节点随机部署在监测区域水面上,各个节点将监测信息发送到SINK的过程称为一轮通信,此外网络还存在以下假设。

- (1)若任意节点 i 的感知半径为 R_s ,则节点 i 的感知区域是以该节点所在位置为圆心、 R_s 为半径的球体。
- (2)所有节点都相同且每个节点都有唯一的标识。
- (3)传感节点可通过三边定位技术获得位置信息。
- (4)作为节点的集合定义为 $G = \{g_1, g_2, \dots, g_M\}$ 。
- (5)comrange表示节点间通信的最大距离。
- (6)当节点与基站的距离小于其通信距离时,则节点直接将信息发送给基站。
- (7)全部节点死亡时的寿命也即网络的工作寿命。
- (8)覆盖冗余度指的是网络节点的覆盖区域能被其它节点取代的程度,若该节点可完全被其它节点取代,则称该节点覆盖冗余度较高。

本文采用以声波为媒介的水下传感器网络数据通信能耗模型^[1],水下声信号衰减模型如式(1)所示。

$$A(d) = d^\lambda \alpha^d \quad (1)$$

$$10 \lg \alpha(f) = 0.11 \frac{f^2}{1+f^2} + 44 \frac{f^2}{4100+f^2} + 2.75 \times 10^{-4} f^2 + 0.003 \quad (2)$$

其中, f 表示载波频率, d 表示节点间的数据传输距离, λ 为能量扩散因子(圆柱形扩散为1,实际情况为1.5,球形扩散为2),节点消耗的能量 E 如式(3)所示。

$$E = E_{\text{send}} + E_{\text{rec}} + E_{\text{intg}} \quad (3)$$

$$E_{\text{send}} = lP_0A(d), E_{\text{rec}} = lP_r, E_{\text{intg}} = lE_{\text{da}} \quad (4)$$

其中, E_{da} 表示数据融合能耗, E_{send} 表示节点的发送数据能耗, E_{rec} 表示节点的接收数据能耗, E_{intg} 表示接收数据能耗和数据融合能耗, l 表示节点发送数据包大小, P_0 为节点可以接收到单位数据包需要的最小功率, P_r 是常数表示节点接收1bit数据消耗的能量。

3 基于节点休眠的覆盖保持分簇算法

水下无线传感器网络是指对指定水下区域大量布撒节点以实现区域的有效监测,由于网络节点的能量有限,因此通常采用分簇的方式均衡网络的

能量消耗以延长网络的最大生命周期。不同的分簇方式使网络节点的负载不同,进而导致率先死亡的节点不同,若不同节点的覆盖冗余度差异较大,则其死亡后带来的网络覆盖率上的变化也存在较大差异。因此在设计网络通信链路的过程中需要同时考虑最大化网络生命周期及网络覆盖率。其中,最大化网络生命周期需要网络节点尤其是靠近簇头节点的能耗尽量小,此时节点休眠的越多,则网络生命周期越长;最大化网络覆盖率则需要网络中节点覆盖的面积最大化,也即所有节点都不休眠时网络的覆盖率是最大的。因此,最大化网络生命周期和最大化网络覆盖率是一对冲突的目标函数。对此,将采用 MOGSA/D 求得两个目标函数的一组折中解。

基于以上分析,本文提出了基于节点休眠的覆盖保持分簇算法,该算法主要分为节点休眠阶段、多目标优化决策阶段以及节点唤醒阶段,下面进行详细介绍。

3.1 节点休眠及唤醒策略

水下传感器网络通过大量布撒节点实现对监测区域的有效覆盖,随着节点密度的逐渐增大,节点间彼此重叠覆盖的区域也将逐渐增大,甚至一些节点的监测区域能够完全被其它节点覆盖,此时若休眠这些节点,则可以在保持网络覆盖率的同时降低网络簇头节点的负载能耗。基于以上分析,休眠策略的具体过程描述如下。

(1)当完成对网络的节点布撒后,计算当前网络的覆盖率,记为 mc 。

(2)对网络中的任意节点 i ,计算该节点被休眠后的网络覆盖 c_i ,若此时 c_i 与 mc 的值相同,则说明节点 i 的覆盖冗余度较大,其获得的监测信息可完全被其它节点取代,因此将该节点休眠。

采用休眠策略可有效减少网络中的工作节点,降低网络的负载消耗。当网络中有节点因能量较低而死亡时,为保持网络覆盖率,从休眠节点中唤醒与该死亡节点存在覆盖重叠的节点,则具体过程描述如下。

(1)由几何定义可知,两个球体若相交则这两个球体球心间的距离小于其半径的距离和。因此在休眠节点中找出与死亡节点距离小于 $2R_s$ 的节点,并将其全部唤醒。

(2)计算此时的网络覆盖率,并再次对网络执行休眠策略以减少网络中覆盖冗余度较高的节点。

3.2 基于 TOPSIS 法的多目标优化决策

当监测区域较大时,节点不能直接将信息发送给 SINK,因此为延长网络生命周期,常采用分簇的方式均衡网络能耗,考虑到不同的分簇方案最终将

导致不同节点的死亡,而这又将给网络覆盖率带来不同的影响,因此在设计网络通信方式时,需要同时考虑网络生命周期与网络覆盖率。

基于以上分析,本文以网络覆盖率及网络能耗均衡性为目标,采用 MOGSA/D 进行优化,具体的目标函数表达形式描述如下。

目标函数 1:网络的寿命取决于簇头节点的寿命,而网络中簇头节点的总能量是固定的,因此只有均衡网络能耗差异,才能保证在网络寿命最大化的前提下,最小化网络的总能耗,所以本文将网络簇头节点的能耗标准差作为算法的目标函数,如式(5)所示。

$$\sigma_Q = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \{\mu_Q - Q(j)\}^2} \quad (5)$$

$$\mu_Q = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m Q(j) \quad (6)$$

其中, σ_Q 表示簇头节点在每轮通信中能耗的标准差, m 表示簇头节点的个数, μ_Q 表示簇头节点的能耗均值,具体表示如式(6)所示。 $Q(j)$ 表示第 j 个节点在每轮通信中的能耗,计算方式如式(3)所示。

目标函数 2:为便于计算网络覆盖率,首先将连续空间离散化,即对监测区域建立 3 维直角坐标系,每隔 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 选取一个离散点,从而连续区域覆盖的问题就转化为区域离散点集的覆盖。设监测区域离散后对应的点集为 S ,所有至少被一个传感器节点覆盖的点集为 Q ,则区域覆盖率 mc 定义如式(7)。

$$mc = Q/S \quad (7)$$

由于 MOGSA/D 只能对连续问题进行求解,而本文中节点之间的通信选择属于离散问题,因此需要将离散问题映射到连续区间上。对此,本文采用文献[18]描述的映射方式,即将节点序号的选择问题,映射为在区间[0,1]内的概率区间选择问题,然后再采用 MOGSA/D 在解空间范围内对两个目标函数进行优化求解。当 MOGSA/D 完成对两个目标函数的寻优后,可得到一组互不支配解集,此时需要从中选出较优解。对此, TOPSIS 法^[17]对多目标算法得到的非支配解集进行评估排序前,先在目标空间定义一个测度,以度量各个非支配解靠近理想解和远离负理想解的程度,即按照问题的需要先选定一个理想解和一个负理想解,再根据非支配解到理想解和负理想解的距离,对其进行排序从而选出较优解。因此本文将选择 TOPSIS 法选择最优解。

基于 TOPSIS 法的多目标优化决策具体过程描述如下:

(1)基于节点通信距离为节点 i 建立可连接通信

矩阵,且矩阵中的节点按照欧氏距离从小到大进行排序;

(2)节点 i 从其通信矩阵中选择下一跳节点属于对离散点的选择,将其映射为在区间 $[0,1]$ 内的概率选择^[18];

(3)在 $[0,1]$ 区间内随机产生 N 个粒子,设当前网络中的工作节点数为 D ,则解空间的维数为 D ,每个粒子即代表一种路由连接策略,种群个体 $X_{i,d}$ 表示第 i 个粒子第 d 个簇头在选择下一跳簇头时的概率值,具体的转换方式参见文献[18];

(4)以式(5)和式(7)为目标函数,初始化 MOGSA/D 中的参数,设置种群规模 N 及种群最大迭代次数 T ,然后通过判断理想前沿面的形状生成相应的权重向量,再采用 GSA 依次优化分解得到的子问题,最终得到一个非支配解集;

(5)构造目标矩阵 $H = (h_{ij})_{m \times n}$,即将由非支配解集得到不同的目标组合;

(6)将目标函数矩阵归一化,则归一化矩阵可表示为式(8)形式。

$$Y = (y_{ij})_{m \times n} = \left[h_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^m h_{ij}^2} \right]_{m \times n} \quad (8)$$

(7)理想解和负理想解:理想解表示由静态多目标算法优化得到的非支配解集在各目标函数上的最优值,计算方式如式(9)所示,负理想解各目标的最差值,计算方式如式(10)所示;

$$V^* = \left\{ \left(\max_{1 \leq i \leq m} y_{ij} \mid j \in J^+ \right), \left(\min_{1 \leq i \leq m} y_{ij} \mid j \in J^- \right) \right\} \\ = \{y_1^*, y_2^*, \dots, y_n^*\} \quad (9)$$

$$V^- = \left\{ \left(\min_{1 \leq i \leq m} y_{ij} \mid j \in J^+ \right), \left(\max_{1 \leq i \leq m} y_{ij} \mid j \in J^- \right) \right\} \\ = \{y_1^-, y_2^-, \dots, y_n^-\} \quad (10)$$

其中, $J^+ = \{\text{各目标函数最优值}\}$, $J^- = \{\text{各目标函数最差值}\}$;

(8)计算各方案到理想解和负理想解的距离,其中到理想解的距离如式(11),到负理想解的距离如式(12)。

$$S_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^n (y_{ij} - y_j^*)^2} \quad (11)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (y_{ij} - y_j^-)^2} \quad (12)$$

由各个方案到理想解和负理想解的距离可计算出各方案的相对贴近度如式(13)。

$$C_i = S_i^- / (S_i^- + S_i^*) \quad (13)$$

(9)将各个方案按相对贴近度排序,并选择贴近度最好的方案为当前网络的分簇方式。

当通过 TOPSIS 法从非支配解中选出较优解后,可通过其对应的网络连接方式计算出它的生命周期以及各节点的剩余能量,若此时网络中节点 i 的能量低于工作的阈值,则判定该节点死亡,同时为保持网络覆盖率,从休眠节点中选出与该节点距离在 $2R_s$ 范围内的节点,并将这些节点唤醒,计算此时的网络覆盖率,然后对这些节点执行休眠策略,减少不必要的节点降低网络负载能耗。若此时网络节点 i 的能量高于工作的阈值,且节点的剩余能量减去其每轮通信能耗小于工作阈值,则标记该节点使其在以后的分簇过程中不再充当簇头节点。

3.3 基于节点休眠的路由分簇算法步骤

设网络中节点的个数为 D ,种群规模为 N ,则基于节点休眠的覆盖保持分簇算法的具体操作步骤如下。

步骤1 节点休眠策略:

(a)向监测区域随机布撒 D 个节点,并将监测区域每隔 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 取一点,将连续区域的监测问题转化为对离散点集的问题;

(b)根据节点的感知范围 R_s ,计算网络对离散点集的覆盖率,记为 mc ;

(c)依次计算每个节点被休眠后网络覆盖率的变化情况,若不发生变化说明该节点网络覆盖冗余度较大,则休眠该节点。

步骤2 基于 MOGSA/D 的覆盖保持分簇策略:

(a)初始化 MOGSA/D 中的相关参数以及最大迭代次数 T ,设此时网络中的工作节点数目为 D ,在 $[0,1]$ 区间内初始化一个规模为 N 维数为 D 的种群;

(b)以网络覆盖率和节点的网络能耗标准差为目标函数,采用 MOGSA/D 进行优化求解,再将算法计算得到的非支配解,通过 TOPSIS 选出较优解。

步骤3 节点唤醒策略:

(a)根据 TOPSIS 选出的较优解,建立网络的链接拓扑结构;

(b)计算此时各个节点的剩余能量及网络生命周期,若有节点低于工作阈值则判定为死亡,若此时休眠节点集不为空,则唤醒与该死亡节点距离小于 $2R_s$ 的全部节点,以保持网络覆盖率,再采用节点休眠策略,降低网络负载能耗;若网络节点未死亡,则比较当前网络中各节点与其每轮通信能耗的大小,若每轮能耗大于剩余能量,则标记该节点在以后的分簇中不再担任簇头节点。若此时休眠节点集为空,则无法保持该节点死亡带来的覆盖空洞;

步骤4 若网络节点未全部死亡则转到步骤1,否则终止算法。

4 实验结果与分析

所有实验在硬件配置为 Intel Core 2 Duo CPU P7570 2.26 GHz, 2 G 内存、2.27 GHz 主频的计算机上进行, 开发环境为 Matlab2010.b。实验中将 100 个传感器节点随机部署在 $100\text{ m} \times 100\text{ m} \times 50\text{ m}$ 的水下 3 维监测区域中, SINK 节点的坐标为 (50, 50, 0), 即水平面中心。为计算网络覆盖率, 将区域划分为 $10 \times 10 \times 5$ 个立方格, 每个立方格的大小为 $10\text{ m} \times 10\text{ m} \times 10\text{ m}$, 并选择目前效果较好的 NULCPR^[15] 进行比较, 实验中的相关参数如表 1 所示。

表 1 参数设置

节点初始能量 E_{mit}	10 J
节点感知半径 R_s	15 m
数据接收功率门限 P_r	3 mW
数据融合能耗 E_{da}	8 nJ/bit
数据包长度 L	1000 bit
载波频率 f	15 kHz
能量扩散因子	1.5
节点能量阈值 E_{th} ^[15]	0.001 J
数据传输速率 R_b	15 kbps
融合效率	0.95
κ	($-1.0\text{e-}3, 1.0\text{e-}3$)
引力常数 G_0	100
变量 a	20
最大迭代次数 T	50
子种群数目 H	32

图 1 和图 2 分别是节点通信半径为 30 m 和 40 m 时, 由 NULCPR^[15] 算法和 CPCA-SM 算法优化的网络覆盖率随网络工作寿命变化的对比情况。

从图 1 和图 2 可以看出: (1) 两种算法在网络运行之初对监测区域的覆盖率都相同, 但随着网络的不断运行, 两种算法的网络覆盖率都在不断地下降, 这是因为网络节点随时间不断消耗能量, 由于簇头节点的负载能耗较大因此更容易率先耗尽能量死亡, 此时易使其簇成员成为不连通节点而无法将监测信息发送到 SINK, 进而降低了网络覆盖率。(2) 在不同的节点通信半径下, CPCA-SM 的网络工作寿命都大于 NULCPR, 且本文算法的变化曲线总体上较 NULCPR 缓慢。这是因为一方面本文算法采用节点休眠与唤醒策略, 在保持网络覆盖率不变的前提下, 休眠了覆盖冗余度较高的节点, 因此降低了网络的负载能耗, 采用 MOGSA/D 优化网络的覆

盖率与网络生命周期, 较好地均衡了网络节点的能耗, 延长了节点的死亡时间, 因此在每轮通信中, 本文算法优化的网络总能耗较低也即具有更大网络寿命。(3) 在图 1 中, 当网络运行到 150 轮左右时, CPCA-SM 的网络覆盖率下降幅度较大。这是因为 NULCPR 通过分层的方式分簇并基于覆盖冗余度选择簇头, 该策略可以较好地延长网络簇头的生命周期, 但因节点通信距离有限, 网络中易出现无法寻找簇头的孤立节点, 因而前期网络覆盖率下降速度较本文算法快, 但过多的节点过早成为孤立节点在一定程度上减少了网络的负载, 因而随着网络的运行其覆盖率下降速度的变化不会很剧烈, 本文算法通过节点休眠唤醒策略和多目标优化策略降低了网络节点的负载并较好地均衡了节点间的能耗差异, 因此前期较好地保持了网络覆盖率, 网络覆盖率的下降曲线较缓慢, 但当网络运行到一定时间后, 簇头节点大量死亡, 致使网络覆盖率快速下降。

图 3 给出的是由 NULCPR 算法和 CPCA-SM 算法优化的网络存活节点随网络工作寿命变化的对比情况, 其中节点通信距离为 30 m。

从图 3 中可以看出, 随着网络运行轮数的增多, 网络中节点的数目逐渐减少, 并且 CPCA-SM 的网络寿命大于 NULCPR 的网络寿命。在网络运行到 125 轮之前, CPCA-SM 的网络存活节点数目大于 NULCPR, 这是因为本文算法采用休眠策略, 减少了网络节点尤其是充当簇头的节点能耗, 因此网络节点的生命周期更长; 当网络运行次数超过 125 轮后, CPCA-SM 的网络节点数目小于 NULCPR, 这是因为虽然前期网络节点死亡数较少, 但也为簇头节点带来了较多能耗, 因此当网络运行到一定阶段后, 簇头节点开始逐渐死亡, 致使一部分节点沦为不连通节点, 因此网络存活节点数快速下降。

图 4 给出的是由 NULCPR 和 CPCA-SM 的网络覆盖率随死亡节点数变化的对比情况, 其中节点通信距离为 30 m。

综上所述可以看出, CPCA-SM 相比 NULCPR 能够有效地延长网络寿命, 并在网络运行过程中较好地保持了网络覆盖率, 验证了 CPCA-SM 的有效性和先进性。

5 结论

针对水下无线传感器网络的覆盖问题及网络工作时长问题, 本文提出一种基于节点休眠的覆盖保持分簇算法。首先休眠覆盖冗余度较高的节点以降低网络节点的能耗, 其次以最大网络覆盖率及节点间的能耗差异为目标, 采用 MOGSA/D 进行优化求

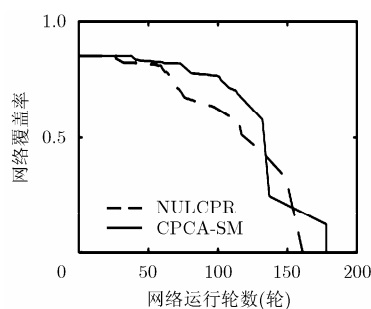


图1 通信半径为 30 m 网络覆盖率随网络运行轮数对比图

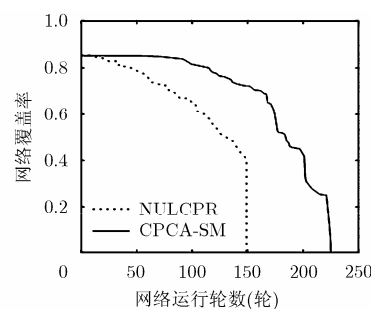


图2 通信半径为 40 m 网络覆盖率随网络运行轮数对比图

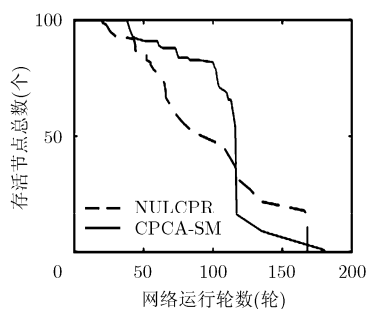


图3 网络存活节点数目对比图

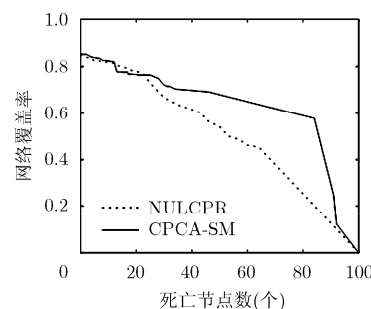


图4 网络覆盖率随死亡节点数变化对比图

解,再采用 TOPSIS 法从非支配解集中选出较优解,最后再采用唤醒策略保持网络覆盖率。仿真实验表明,CPCA-SM 在不同的网络通信半径下相比目前效果最好的覆盖保持路由策略,能有效延长网络的工作时长、保持网络的覆盖率。

参考文献

- [1] AKYILDIZ I F, POMPILI D, and MELODIA T. Underwater acoustic sensor networks: research challenges[J]. *Ad Hoc Networks*, 2005, 3(3): 257-279. doi: 10.1016/j.adhoc.2005.01.004.
- [2] 郭忠文, 罗汉江, 洪锋, 等. 水下无线传感器网络的研究进展[J]. *计算机研究与发展*, 2010, 47(3): 377-389.
GUO Zhongwen, LUO Hanjiang, and HONG Feng. Current progress and research issues in underwater sensor networks[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2010, 47(3): 377-389.
- [3] 洪锋, 张玉亮, 杨博真. 水下传感器网络时间同步技术综述[J]. *电子学报*, 2013, 41(5): 960-965. doi: 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.05.020.
HONG Feng, ZHANG Yuliang, and YANG Bozhen. Review on time synchronization techniques in underwater acoustic sensor networks[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2013, 41(5): 960-965. doi: 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.05.020.
- [4] GUERRA F, CASARI P, and ZORZI M. World ocean simulation system (WOSS): A simulation tool for underwater networks with realistic propagation modeling[C]. ACM International Workshop on Underwater Networks, California, USA, 2009: 1-8. doi: 10.1145/1654130.1654134.
- [5] TAN H P, DIAMANT R, and SEAH W K G. A survey of techniques and challenges in underwater localization[J]. *Ocean Engineering*, 2011, 38(14): 1663-1676. doi: 10.1016/j.oceaneng.2011.07.017
- [6] 温涛, 张冬青, 郭权. 无线传感器网络冗余节点休眠调度算法[J]. *通信学报*, 2014, 35(10): 67-80. doi: 10.3969/j.issn.1000-436x.2014.10.009
WEN Tao, ZHANG Dongqing, and GUO Quan. Wireless sensor network redundancy node sleep scheduling algorithm [J]. *Journal on Communications*, 2014, 35(10): 67-80. doi: 10.3969/j.issn.1000-436x.2014.10.009
- [7] 符修文, 李文锋. 基于局域世界的无线传感器网络分簇演化模型[J]. *通信学报*, 2015, 36(9): 204-214. doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2015157.
FU Xiuwen and LI Wenfeng. Evolutionary model of heterogeneous clustering wireless sensor networks based on local world theory[J]. *Journal on Communications*, 2015, 36(9): 204-214. doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2015157.
- [8] CHEN Zhi, LI Shuai, and YUE Wenjing. Memetic algorithm based multi-objective coverage optimization for wireless sensor networks[J]. *Sensors*, 2014, 14(11): 20500-20518. doi: 10.3390/s141120500.
- [9] 金杉, 金志刚. 基于量子狼群进化的多目标汇聚节点覆盖算法[J]. *电子与信息学报*, 2017, 39(5): 1178-1184. doi: 10.11999/JEIT160693.
JIN Shan and JIN Zhigang. Multi-objective sink nodes coverage algorithm based on quantum wolf pack evolution[J].

- Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(5): 1178-1184. doi: 10.11999/JEIT160693.
- [10] OZDEMIR S, ATTEA B A, and KHALIL O A. Multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition for energy efficient coverage in wireless sensor networks[J]. *Wireless Personal Communications*, 2013, 71(1): 195-215. doi: 10.1007/s11277-012-0811-3.
- [11] LATIF K, JAVAID N, AHMAD A, *et al.* On energy hole and coverage hole avoidance in underwater wireless sensor networks[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(11): 4431-4442. doi: 10.1109/JSEN.2016.2532389.
- [12] 洪昌建, 吴伟杰, 唐平鹏. 动态分层的水下传感器网络分簇路由算法[J]. *电子与信息学报*, 2015, 37(6): 1291-1297. doi: 10.11999/JEIT141182.
- HONG Changjian, WU Weijie, and TANG Pingpeng. Dynamic layered clustering routing algorithm in underwater sensor networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(6): 1291-1297. doi: 10.11999/JEIT141182.
- [13] TSAI Y R. Coverage-preserving routing protocols for randomly distributed wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2007, 6(4): 1240-1245. doi: 10.1109/TWC.2007.05821.
- [14] 蒋鹏, 阮斌锋. 基于分簇的水下传感器网络覆盖保持路由算法[J]. *电子学报*, 2013, 41(10): 2067-2073. doi: 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.10.030.
- JIANG Peng and RUAN Binfeng. Cluster-based coverage-preserving routing algorithm for underwater sensor networks[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2013, 41(10): 2067-2073. doi: 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.10.030.
- [15] 蒋鹏, 王兴民. 网络分层的水下传感器网络覆盖保持路由算法[J]. *电子学报*, 2016, 44(5): 1240-1246. doi: 10.1016/j.eswa.2015.11.007.
- JIANG Peng and WANG Xingmin. Network layered coverage preserving routing algorithm for underwater sensor networks[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2016, 44(5): 1240-1246. doi: 10.1016/j.eswa.2015.11.007.
- [16] 毕晓君, 刁鹏飞, 王艳娇. 结合分解技术的多目标引力搜索算法[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2015, 47(11): 69-75. doi: 10.11918/j.issn.0367-6234.2015.11.012.
- BI Xiaojun, DIAO Pengfei, and WANG Yanjiao. Multi-objective gravitational search algorithm based on decomposition[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2015, 47(11): 69-75. doi: 10.11918/j.issn.0367-6234.2015.11.012.
- [17] TAVANA M, LI Z, MOBIN M, *et al.* Multi-objective control chart design optimization using NSGA-III and MOPSO enhanced with DEA and TOPSIS[J]. *Expert Systems with Applications*, 2016, 50(5): 17-39. doi: 10.1016/j.eswa.2015.11.007.
- [18] 毕晓君, 刁鹏飞. 基于引力搜索算法的异构无线传感器网络路由分簇算法[J]. *控制与决策*, 2017, 32(3): 563-569. doi: 10.13195/j.kzyjc.2016.0111.
- BI Xiaojun and DIAO Pengfei. Routing and clustering algorithm heterogeneous wireless sensor networks based on gravitational search algorithm[J]. *Control and Decision*, 2017, 32(3): 563-569. doi: 10.13195/j.kzyjc.2016.0111.
- 刁鹏飞：男，1987年生，博士，讲师，研究方向为智能优化、无线传感器网络。
- 王艳娇：女，1985年生，博士，副教授，研究方向为智能优化、无线传感器网络。