



一种负载均衡且能量高效的水下传感网络分簇协议

李鑫滨, 高梦玲, 闫磊

(燕山大学工业计算机控制工程河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 针对水下无线传感网络能量效率低、生命周期短的问题, 提出了一种负载均衡且能量高效的水下分簇 (load balanced and energy efficient underwater clustering, LBEEUC) 协议。该算法在分簇过程中首先根据节点的经验负载来确定节点所在区域簇头的比例, 使经验负载大的区域分布较多的簇头, 分担数据转发的任务, 均衡网络的能耗; 其次在节点入簇时, 在簇内设置中继节点, 用于均衡远离簇头节点的传输能耗, 并提前进行数据融合, 减少数据冗余; 最后在建立簇间路由时, 利用 Q 学习算法根据路径消耗的总能量最小的原则选择最优传输路径。仿真结果表明, 本算法有效地均衡了网络的能耗, 提高了能量利用效率, 进而提高了网络的生存时间。

关键词: 水下传感网络; 分簇; 负载均衡; 能量效率

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016264

A load balanced and energy efficient underwater clustering protocol for UWSN

LI Xinbin, GAO Mengling, YAN Lei

Key Lab of Industrial Computer Control Engineering of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China

Abstract: Focused on the low energy efficiency and short lifetime of underwater wireless sensor network (UWSN), a load balanced and energy efficient underwater clustering (LBEEUC) protocol for UWSN was proposed. For cluster head settings, due to the consideration of load balanced, the proportion of cluster heads based on experience-load was set. The area with high experience-load could obtain more cluster heads than other areas to process data forwarding. And then, for intra-cluster communication, some relay nodes were set to save energy of long range data transmission between cluster head and nodes. Relay nodes also could be used to eliminate redundant information by advance data fusion. Finally, for inter-cluster routing, Q-learning algorithm was used to implement optimal path planning based on the criterion of least energy consuming. The simulation results demonstrate that the LBEEUC protocol can efficiently improve the energy utilization, prolong the network lifetime and balance the energy consumption of the network.

Key words: underwater wireless sensor network, clustering, load balance, energy efficiency

收稿日期: 2016-08-08; 修回日期: 2016-10-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61571387); 河北省研究生创新资助项目 (No.2016SJBS019)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61571387), Graduate Student Innovation Project of Hebei Province (No.2016SJBS019)

1 引言

随着海洋技术的不断发展,水下无线传感网络(underwater wireless sensor network, UWSN)的研究已经成为新的热点问题^[1,2],逐渐在海洋环境监测、海洋地质勘探、水下资源开发和灾难预警等领域得到广泛的应用^[3]。由于传统的无线电波信号在水中会迅速衰减,无法进行长距离的传输,UWSN 通常采用声学信道对水下数据进行传输。相较于陆地上的传统无线网络,水下传感网络有着其自身的特点,例如:水下环境中传感器节点的深度差别很大,不适合用传统的二维分簇算法进行分簇;GPS 信号在水下衰减严重,节点很难接收到定位信息^[4],水下节点位置信息未知;水声信道环境复杂多变,传输信号随距离的增加衰减得非常严重^[5],不适合长距离的通信。以上这些问题都为水下分簇路由协议的开发带来了极大的挑战。

能量效率是新一代无线通信的关键指标之一^[6,7],因此在设计水下无线传感网络路由协议时要着重考虑如何提高能量效率、均衡网络能耗等问题。DBR^[8]、RDBF^[9]、DBMR^[10]等协议虽为水下路由的建立提供了良好的解决方案,但都是平面路由协议,无法对网络资源进行统一的管理,大量的冗余数据和过多的跳数造成了资源的浪费,不适用于大规模的水下网络。而分簇策略能将网络节点划分为若干个簇,按照一定的规则为每个簇选择一个簇头节点管理本簇内的成员节点,并对数据进行融合,减少数据冗余量,进而提高整个网络的能量效率。LEACH 协议^[11]最早提出将分簇思想用于路由过程的建立,该协议采用分布式的簇首选举策略,各节点根据概率判断自己是否当选簇头,并采用数据压缩技术对簇内数据进行融合,在一定程度上提高了网络的能量效率,但在选举簇头的过程中未考虑节点的剩余能量,并且簇头节点传输数据到 sink 节点时使用单跳通信,使得远离 sink 节点的节点因数据传输能耗过高而过早死亡。DUCS 协议^[12]是针对水声环境提出的一种分簇协议,在选举簇头的过程中考虑了节点的剩余能量,并且簇间采用多跳通信,解决了远离 sink 节点的节点因能量过早耗尽而死亡的问题,但没有考虑负载均衡的问题,容易导致靠近 sink 节点的节点因转发过多的数据而死亡。以 LEACH 和 DUCS 为代表的均匀分簇协议,无论采用单跳还是多跳传输方式都会引起能量消耗不均衡的问题,即“热点”问题。

针对“热点”问题,非均匀分簇的方法开始应用于路由建立的过程中,参考文献[13]提出的 UCMR 协议中各节点

根据到 sink 节点的距离确定自己的竞争半径,使得靠近基站的簇拥有较小的半径,从而含有较少的成员节点以平衡转发数据造成的能量消耗。参考文献[14]提出的 DEBUC 协议根据剩余能量计算广播时间竞选簇头,根据到 sink 节点的距离确定簇的大小,采用贪婪算法建立簇间多跳路由,有效地均衡了簇头的能耗,节约了单个节点的能量消耗。同样的还有 EEUC^[15]、ACOUC^[16]等协议都是根据到基站距离的远近建立大小不同的簇,通过减少簇成员节点的数量、调整簇内通信的能耗来均衡转发数据带来的能量消耗。但是仅仅根据与基站的距离确定成簇的大小有一定的局限性,如在大规模的水下无线传感网络中,当节点密度差别较大时,与基站距离相同的簇首可能承担的转发量差别很大,这严重影响了大规模水下网络能耗的均衡性。

在大规模无线传感网络中节点的传输功率随传输距离的增加衰减严重,中继传输可有效降低路径损耗,提高能量效率^[17,18]。参考文献[19]提出了一种带中继的多 sink 节点分簇路由协议,针对大规模簇结构,利用 Q 学习算法寻找数据传输的最优路径,形成了簇内多跳的通信方式,这为信号在水声信道中因衰减严重而无法长距离传输提供了很好的解决思路。但该算法没有选举簇头的阶段,只能用于簇范围已经确定的网络,或者需要依赖其他分簇协议提前确定各个簇的范围,在成簇过程中无法考虑负载均衡的问题,严重制约了协议的使用范围。参考文献[20]提出了一种多层分簇协议,在每个簇内选出 T 层簇头作为中继节点,数据逐层传递,每层簇头都要融合下层的数据。这种簇内数据提前融合的方式大大减小了数据冗余量,适合用于大规模的簇结构。但是过于严苛的层次限制引入了过多的控制开销,造成了不必要的资源浪费。

本文将中继技术引入水下节点的入簇过程,提出了一种负载均衡且能量高效的水下无线传感网络分簇协议,首先各节点根据所在区域转发数据的历史经验值确定本区域的簇头比例,然后成员节点采用两跳中继的方式入簇,并且在中继节点处提前进行数据融合,节约了数据传输能耗,最后利用 Q 学习算法以总能耗最小为目的建立簇间路由。仿真实验表明,与 LEACH 和 DUCS 相比,本协议在能量高效性、均衡性等方面均具有明显优势,有效地延长了网络的使用寿命。

2 系统模型

2.1 水下无线传感网络模型及假定

本文针对三维水下无线传感网络,对系统架构做如下



假设。

(1)所有传感器节点随机地部署在三维水下待监测区域中,且每个节点都具有唯一的ID,并且部署结束后进行抛锚固定,避免节点随水流运动离开监测区域,网络模型如图1所示。

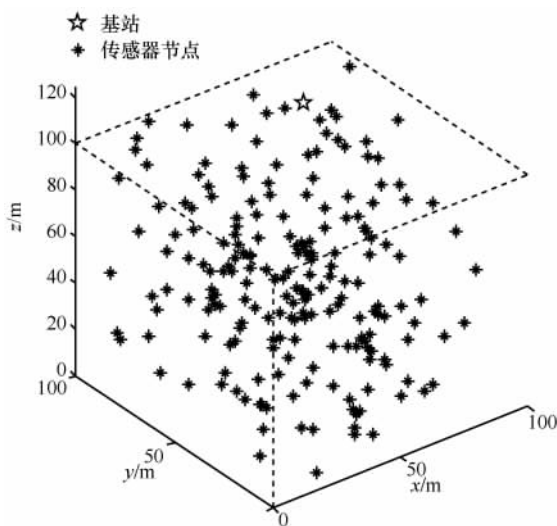


图1 水下传感网络模型

(2)节点能根据接收到的信号强度判断自己和发射节点之间的距离,并且数据传输链路对称。

(3)节点可以调整自己发射信号的功率。

(4)基站位于监测区域上方的中心位置,并且能量永远保持充足。

(5)所有节点同构,可以在成员节点和簇头节点间进行角色转换,并且具有相同的感知半径。

(6)采用布尔感知模型,认为所有节点的感知区域是以节点为圆心、半径为 R 的球型区域。

(7)节点周期性地对环境数据进行采集,并将采集到的数据传输给 sink 节点。

2.2 能量消耗模型

本文采用参考文献[21]中给出的能量消耗模型,以声波作为传输数据的媒介,当数据传输距离为 dis 时,传输功率的衰减表示为:

$$A(dis)=dis^{\lambda}\alpha^{dis} \quad (1)$$

其中, λ 为能量扩散因子(取1时表示能量圆柱形扩散,取2时表示能量球形扩散,实际情况下 λ 取1.5),参数 α 的大小取决于能量吸收系数 $\alpha(f)$,具体表达式为:

$$\alpha=10^{\alpha(f)/10} \quad (2)$$

其中,能量吸收系数 $\alpha(f)$ 由式(3)获得:

$$\alpha(f)=0.11\frac{f^2}{1+f^2}+44\frac{f^2}{4\ 100+f^2}+2.75\times10^{-4}f^2+0.003 \quad (3)$$

其中, f 为声学信号的频率。

假设节点正常接收信息需要的最低功率是 P_0 ,那么为了保证节点可以正常接收到该信息,发射节点的发射功率至少应为 $P_0A(dis)$ 。

节点发送数据分组(长度为 l)消耗的能量为:

$$E_t=l\lambda_{dis}^{\eta}\alpha^{dis} \quad (4)$$

节点接收数据分组(长度为 l)消耗的能量为:

$$E_r=\lambda_l l \quad (5)$$

节点融合数据分组(长度为 l)消耗的能量为:

$$E_{im}=E_{DA}l \quad (6)$$

其中, λ_r 为接收能耗系数, λ_t 为发送能耗系数, E_{DA} 为常数。

3 LBEEUC 协议

在水下传感网络中,负载的不均衡性会导致“热点”区域的节点过早死亡,形成覆盖盲区,从而影响整个网络的性能。因此在分簇过程中应同时考虑负载的均衡性和能量的高效性。本节从簇首的选举、成员节点入簇、簇间结构建立3个方面,设计了一种适用于UWSN的负载均衡且能量高效利用的分簇算法。

3.1 簇头的选取

DUCS协议的初始阶段为所有节点设置一个当选簇头的初始概率 p ,首轮选举簇头时各节点产生一个0~1的随机数 $rand$ 与概率 p 进行比较,如果节点 i 满足 $p>rand$,则节点 i 当选簇头,并以最大功率发射一个CDMA消息告知网络中的其他节点。从第二轮开始,节点当选簇头的概率要考虑其所在区域的平均剩余能量 E_{av} ,使该区域剩余能量大的节点拥有更大的当选概率,新的概率计算式为:

$$p_{DUCS}=\frac{E(i)}{E_{av}}\times p \quad (7)$$

本文在DUCS协议基础上,提出了一种根据经验转发负载调整区域簇首比例的方法来均衡网络的能耗,节点的经验转发负载定义为节点所在区域转发其他簇头数据量的期望值,由式(8)得到。

$$x=\frac{\sum_{i=1}^{r-1}\frac{M(i)}{num(i)}}{r-1}\times num(r) \quad (8)$$

其中, $M(i)$ 表示第 i 轮节点所在的簇转发其他簇的数据量, $num(i)$ 表示第 i 轮整个网络的簇头数量, r 表示当前运行的轮数, 则 $\sum_{i=1}^{r-1} \frac{M(i)}{num(i)} / (r-1)$ 表示由节点所在区域转发数据量的历史经验值求得的期望概率。

下面给出根据经验转发负载 x 的值获取区域簇头比例的方法, 设网络中的节点数量为 n , 死亡节点数量为 $dead$, 网络期望的簇头比例为 p_0 (即各节点当选簇头的初始概率), 则簇头预期数量为 $N=n \times p_0$, 节点当选簇头的最小概率为 $p_{\min}$, 最大概率为 $p_{\max}$ 。为了使经验转发负载大的区域拥有更多的簇头, 承担数据转发的任务, 节点当选簇头的概率 y 应满足式 (9):

$$\frac{(p_{\max}-p_{\min})}{\frac{(n-dead) \times p_0}{2} - 1} = \frac{y-p_{\min}}{x-1} \quad (9)$$

得到节点当选簇头的概率为:

$$y = \frac{2 \times (p_{\max}-p_{\min})(x-1)}{(n-dead)p_0-2} + p_{\min} \quad (10)$$

用 y 代替式 (7) 中的 p , 得到新的簇头当选概率为:

$$p_{\text{new}} = \frac{E(i)}{E_{\text{av}}} \times \left(\frac{2 \times (p_{\max}-p_{\min})(x-1)}{(n-dead)p_0-2} + p_{\min} \right) \quad (11)$$

由式 (11) 可以看出, 剩余能量 $E(i)$ 和经验负载值 x 较大的节点拥有更大的当选簇头的概率, 从而使整个网络形成不均匀的簇结构, 以均衡网络的能耗。

3.2 簇的形成

3.2.1 Q 学习算法模型

Q 学习是一种与模型无关的强化学习算法, 其目的是寻找一个智能体和环境交互的策略 (最优 Q 表), 指导代理 (agent) 根据所处环境选择动作, 其模型如图 2(a) 所示,

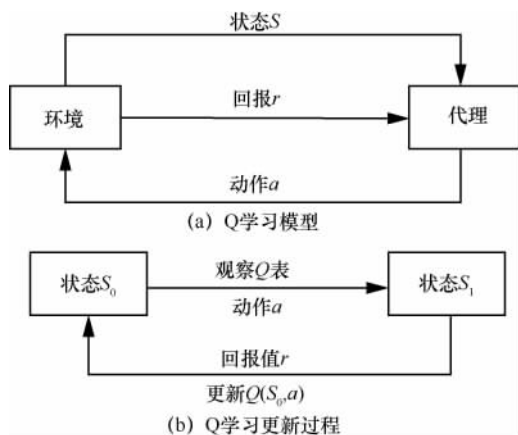


图 2 Q 学习基本原理

代理根据当前的状态 S 选择动作 a 进入新的状态, 同时获得回报值 r 用来更新 Q 列表。具体更新过程如图 2 (b) 所示, 每个状态动作对 (S, a) 都对应一个 Q 值 $Q(S, a)$ 用来评估当前动作获得的未来累积回报, 这些 Q 值都存储在 Q 列表中, 在 Q 学习的过程中, 状态 S_0 根据 $Q(S_0, a)$ 值选择动作 a_0 进入新的状态 S_1 , 并反馈瞬时回报值 r 用来更新 $Q(S_0, a_0)$, 然后观察状态 S_1 , 再选择动作 a_1 进入状态 S_2 更新 $Q(S_1, a_1)$, 直到满足结束条件为止, Q 学习典型的结束条件是 Q 表收敛或者学习的循环次数达到设定值, 本文为学习过程设定学习次数作为结束条件。

Q 值更新函数如式 (12) 所示, r 是状态动作对 (S, a) 的立即回报值, $\gamma E(S')$ 指时延回报的期望值, β 是学习率, 参数满足 $0 \leq \beta, \gamma \leq 1$ 。

$$Q(S, a) = (1-\beta) \cdot Q(S, a) + \beta(r + \gamma \cdot E(S')) \quad (12)$$

本文采用 Q 学习算法用于形成水下传感网络的簇结构, 将选择下一跳节点建模为 Q 学习过程的下一个动作选取, 并根据不同的网络需求设置回报函数 (成员节点入簇阶段考虑距离和剩余能量, 簇间结构建立阶段考虑能量消耗), 通过迭代产生具有最大 Q 值的动作列表, 即最优的数据传输路径。

3.2.2 成员节点入簇过程

簇头竞争结束后进入成员节点入簇阶段, 节点 i 选择簇头 j 加入的权值计算式为:

$$W(i, j) = E_j / d_{ij} \quad (13)$$

其中, E_j 代表节点的剩余能量, d_{ij} 表示两个节点间的距离, 各节点根据上述权值计算式选择簇头加入。

为了解决水声信道中节点传输功率随传输距离的增加衰减严重的问题, 同时减少数据冗余、节省能量消耗, 本文提出了带中继且中继可融合的节点入簇方式, 设簇 C 中所有成员节点到簇头的最大距离为 $d_{\max}$, 最小距离为 $d_{\min}$, 取标准距离 $d_0 = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{2}$, 如果成员节点 i 到簇头 j 的距离满足 $d_{ij} > d_0$, 则节点 i 为到簇头 c 的两跳节点, 否则为一跳节点。一跳节点以 d_0 为半径广播一条 CDMA 信息 (包括所属簇的信息、剩余能量、到簇头的距离、节点 ID), 两跳节点根据自己收到的信息建立 Q 表, 初始值设为 0。

为使一跳节点和两跳节点均衡承担数据传输的任务, 并选择剩余能量大的节点作为中继节点, 回报函数综合考虑距离和剩余能量两种因素, 节点 i 选择节点 j 作为下一跳节点的回报函数为:



$$r = -a(D(i,j)/d_0) + b(E(j)/E_0) \quad (14)$$

其中, $D(i,j)$ 表示两个节点的距离, $E(j)$ 表示节点 j 的剩余能量, E_0 是节点的初始能量, a, b 是和为 1 的常数, 分别表示距离因素和能量因素的权重。将回报函数代入 Q 学习的更新式 (12) 中, 同时为简单起见, 令 $\beta, \gamma=1$, 最终得到式 (15) 所示的更新函数:

$$Q(S,a) = r + E(S') \quad (15)$$

3.2.3 簇间路由的建立

在簇间路由建立的开始阶段, 所有簇头发布一条 CDMA 信息 (自身节点 ID、与其他簇头的距离) 给 sink 节点, 由 sink 节点运行 Q 学习算法确定最优传输路径, 并在算法运行完成后将路由信息发送给各个簇头节点进行数据传输。

本协议在簇间路由建立阶段以最小化网络能耗为目标, 选取能耗最小的路径传输数据, 所以回报函数设定时只考虑两节点传输信息的能耗, 如式 (16) 所示:

$$r = -E(i, j) \quad (16)$$

Q 值更新函数中 β, γ 同样均取为 1, 则 Q 值直接表示消耗总能量的相反数, 更新函数同样如式 (15) 所示。

4 协议分析及仿真

4.1 仿真方法和参数选取

为了验证本协议的分簇性能, 使用 MATLAB 对 LEACH 协议、DUCS 协议和本协议在相同的水声条件下进行了仿真, 并对多项性能进行了对比, 网络模型和能耗模型已经在第 2 节进行了描述, 具体参数的设置在表 1 中列出。

表 1 仿真参数设置

参数	取值
检测范围/m	(0,0,0)~(100,100,100)
节点数量/个	200
基站坐标	(50,50,125)
数据分组大小/bit	4 000
控制分组大小/bit	100
频率/f/kHz	10
节点感知半径/m	15
最低接收功率/mW	3
节点初始能量(E_0)/J	10
融合单位数据能耗(E_{ds})/(nJ·bit ⁻¹)	5

4.2 仿真结果分析

在第 4.1 节给出的网络模型下, LBEEUC 成簇算法形成的簇结构如图 3 所示, 可以看出转发数据多的区域分布有更多的簇数量, 并且所成的簇拥有较小的几何结构。

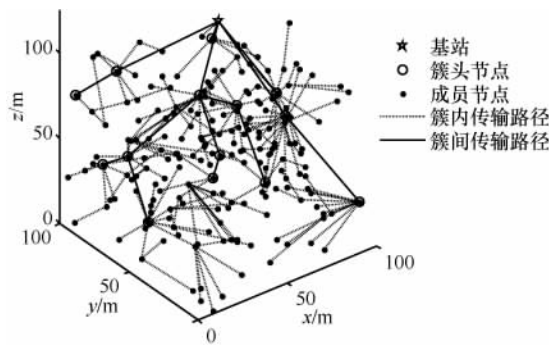


图 3 LBEEUC 协议成簇效果

本文协议的最终目的是延长网络的运行时间, 所以仿真时主要从节点存活数量和网络覆盖质量两个方面验证 3 种协议的生存周期。存活节点数量和网络运行时间的生命曲线如图 4(a) 所示, 网络覆盖质量和网络运行时间的生命曲线如图 4(b) 所示, 由仿真结果可以看出, LEACH 协议和 DUCS 协议分别在网络运行 400 轮和 500 轮左右节点就已

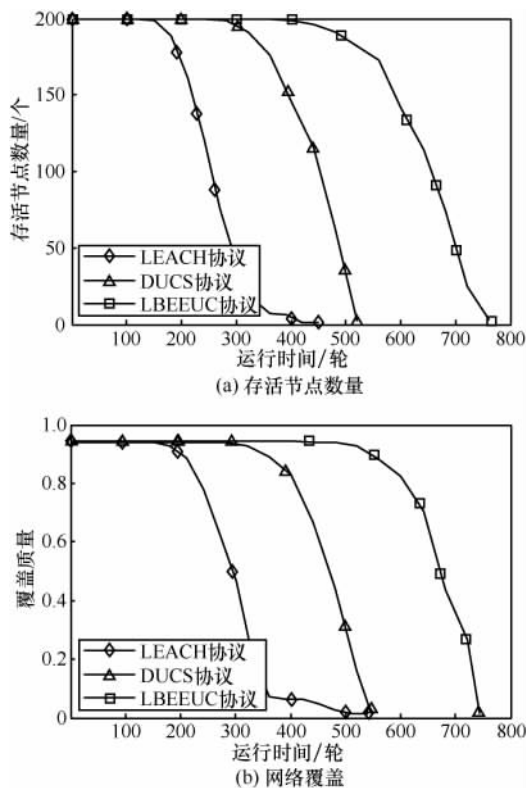


图 4 存活节点数量/网络覆盖质量和网络运行时间的生命曲线

经完全死亡,而本文提出的协议网络运行时长可以达到 750 轮,大幅度提高了网络的生存时间。

LBEEUC 协议在节点入簇阶段引入了参数 a 、 b ,表示距离和能量两个因素的权重($a+b=1$),对于不同规模的网络, a 和 b 的取值不同,会对网络的生存时间产生影响。针对本文给出的网络模型,对不同的 a 值进行了仿真实验,结果如图 5 所示,大约 $a=0.7$ 时网络的生存时间最长。

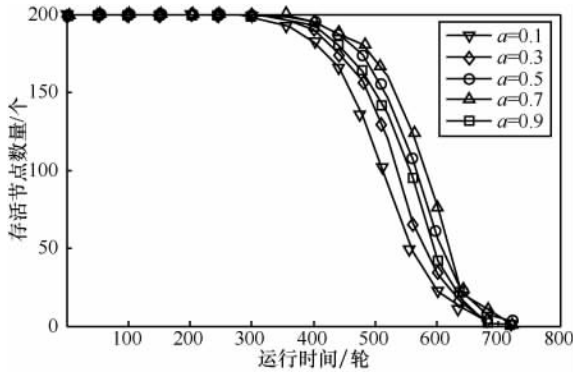


图 5 参数 a 、 b 对网络性能的影响

图 6 对比 3 种协议网络平均剩余能量随运行轮数变化的曲线,由仿真结果可以看出,本文提出的协议大大减小了网络平均剩余能量曲线的斜率,即本协议有效地减少了网络能量消耗速度,从而显示出了较长的运行时间。

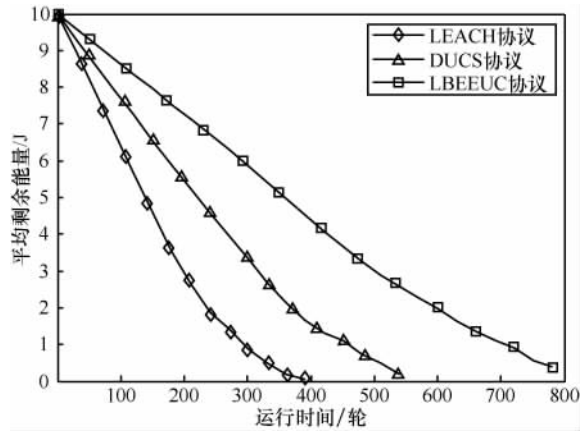


图 6 网络平均剩余能量随运行轮数变化的曲线

在能耗均衡方面,图 7 显示了 3 种协议 50%、75% 的节点死亡时死亡节点的分布($\circ$ 代表死亡节点),为了更直观地显示分布情况,网络中所有节点按水平方向投影在 zOy 方向,仿真结果以二维图像的形式显示,从图 7 中可以看出,本文所提出的协议死亡节点分布与 LEACH 协议和 DUCS 协议相比更加均匀,展现出了良好的均衡性。

同时本文还对网络的覆盖质量进行了仿真分析,在计算网络覆盖质量时,本文将覆盖区域分成 8 个立方体网格,每个网格的覆盖质量参照参考文献[22]中给出的方法计算,最后取平均值后,获得每个网格在节点死亡 50% 和 75% 时的覆盖质量,如图 8 所示,仿真结果显示当节点死

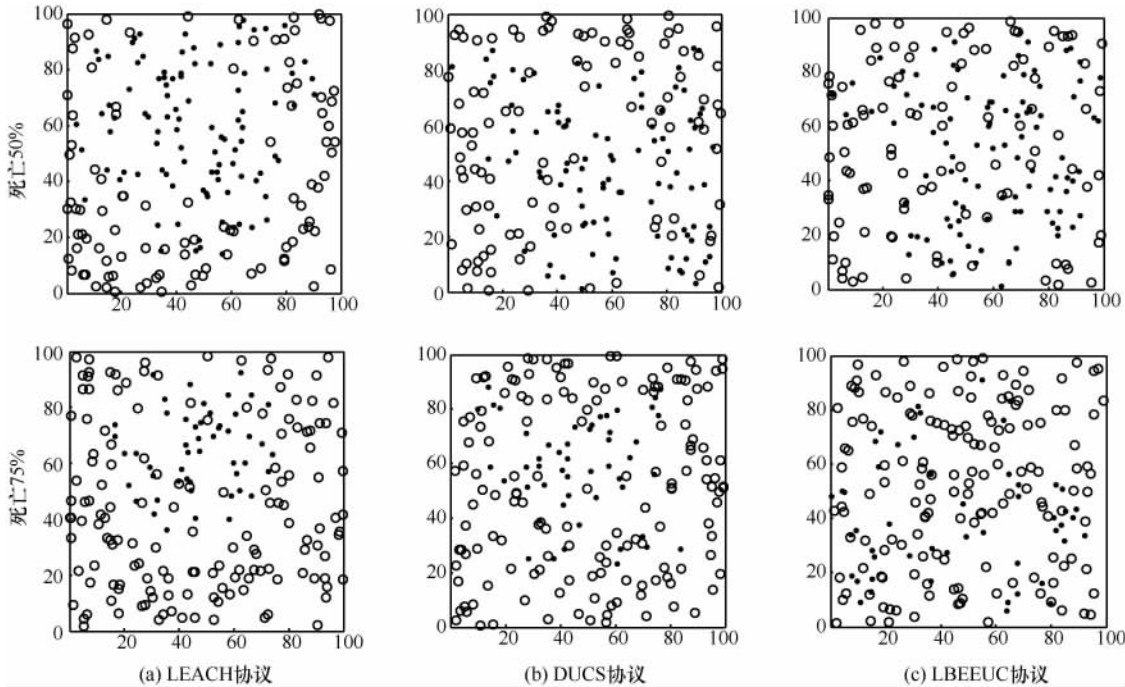


图 7 死亡节点分布

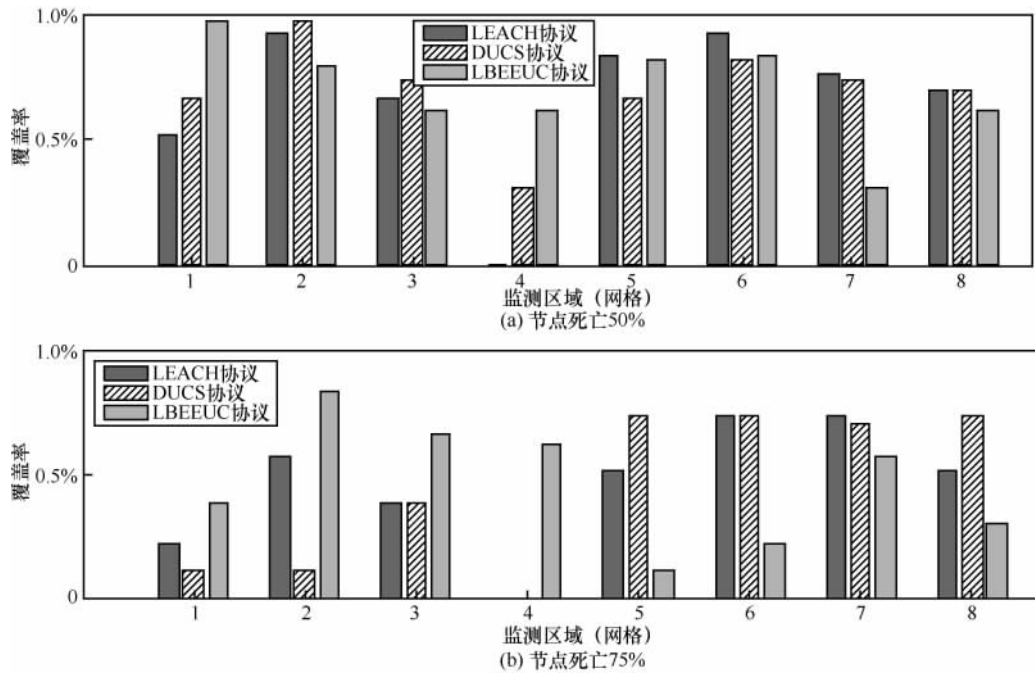


图8 网络覆盖率随节点死亡率变化的变化曲线

亡 50%时,LEACH 协议的第 4 个网格已经完全成为覆盖盲区,当节点死亡 75%时 LEACH 和 DUCS 协议都有完全覆盖盲区,而本文提出的协议 8 个网格均有节点覆盖。图9 是 3 种协议网络覆盖情况随节点数量变化的对比,网络覆盖值用 8 个网格覆盖质量的乘积表示,结果显示,本文提出的分簇协议在相同存活节点数量下具有最大的覆盖质量,因此,本文提出的协议在提高网络覆盖质量方面同样具有明显的优势。

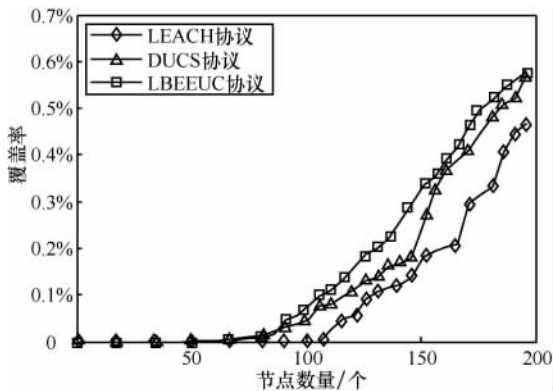


图9 网络覆盖数量随节点数变化的变化曲线

5 结束语

本文提出了一种可用于大规模水下无线传感网络的

分簇算法,同时考虑了能耗的高效性和均衡性,在选举簇头阶段根据节点所在区域转发数据的历史期望值确定当选概率,使得转发数据量大的区域拥有较多的簇头承担数据转发的任务。成员节点入簇时,考虑到大规模传感网络簇的几何范围较大,数据直接进行远距离传输水声信号衰减严重的问题,提出了一种带中继可融合的节点入簇方式,解决了信号衰减问题的同时降低了簇内数据冗余度,节约了能耗。簇间路由的建立阶段从能量高效的角度出发,利用 Q 学习算法寻找能耗最小的数据传输路径,提高了能耗利用率。仿真表明,本文提出的 LBEEUC 协议有效地节约了节点的能量,均衡了网络能耗,延长了网络生存时间。

参考文献:

- [1] JIANG Z. Underwater acoustic networks-issues and solutions[J]. International Journal of Intelligent Control and Systems, 2008, 13(3): 152-161.
- [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.
CUO Z W, LUO H J, HONG F, et al. Current progress and research issues in underwater sensor networks [J]. Journal of Computer Research and Development, 2010, 47(3): 377-389.
- [3] AKYILDIZ I F, POMPILI D, MELODIA T. Underwater acoustic sensor networks: research challenges[J]. Ad Hoc Networks, 2005, 3(3): 257-279.

- [4] DOMINGO M C, PRIOR R. Design and analysis of a gps-free routing protocol for underwater wireless sensor networks in deep water [C]// International Conference on Sensor Technologies and Applications, Oct 14–20, 2007, Valencia, Spain. New Jersey: IEEE Press, 2007: 215-220.
- [5] DOMINGO M C, PRIOR R. Energy analysis of routing protocols for underwater wireless sensor networks [J]. Computer Communications, 2008, 31(6): 1227-1238.
- [6] LI C, SUN F, CIOFFI J M, et al. Energy efficient MIMO relay transmissions via joint power allocations [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2014, 61(7): 531-535.
- [7] LI C, WANG J, SUN F, et al. Energy-efficient transmission for decode-and-forward dual-hop networks with asymmetric traffic demands[J]. IET Communications, 2015, 9(14): 1781-1787.
- [8] YAN H, SHI Z J, CUI J H. DBR: depth-based routing for underwater sensor networks [C]//International Conference on Research in Networking, March 18–20, 2008, Singapore. New York: ACM Press, 2008: 72-86.
- [9] LI Z, YAO N, GAO Q. Relative distance based forwarding protocol for underwater wireless networks [J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2014, 27(1): 83-105.
- [10] LIU G, LI Z. Depth-based multi-hop routing protocol for underwater sensor network[C]// 2010 2nd International Conference on Industrial Mechatronics and Automation (ICIMA), May 30–31, 2010, Wuhan, China. New Jersey: IEEE Press, 2010: 268-270.
- [11] HEINZELMAN W R, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks[J]. Ad Hoc & Sensor Wireless Networks, 2000(18): 8020.
- [12] DOMINGO M C. A distributed energy-aware routing protocol for underwater wireless sensor networks [J]. Wireless Personal Communications, 2011, 57(4): 607-627.
- [13] HARI U, RAMACHANANDRAN B, JOHNSON C. An unequally clustered multihop routing protocol for wireless sensor networks[C]// IEEE International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI), August 22-25, 2013, Mysore, India. New Jersey: IEEE Press, 2013: 1007-1011.
- [14] 蒋畅江, 石为人, 唐贤伦, 等. 能量均衡的无线传感器网络非均匀分簇路由协议[J]. 软件学报, 2012, 23(5): 1222-1232.
- JIANG C J, SHI W R, TANG X L, et al. Energy-balanced unequal clustering routing protocol for wireless sensor networks[J]. Journal of Software, 2012, 23(5): 190-200.
- [15] LI N C, YE N M, CHEN N G, et al. An energy-efficient unequal clustering mechanism for wireless sensor networks[C]// IEEE International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems Conference, Nov 7, 2005, Washington, DC, USA. New Jersey: IEEE Press, 2005: 8.
- [16] ZHANG R B, CAO J F. Uneven clustering routing algorithm for wireless sensor networks based on ant colony optimization[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(6): 33-38.
- [17] LI C, YANG H J, SUN F, et al. Multiuser overhearing for cooperative two-way multiantenna relays[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(5): 3796-3802.
- [18] LI C, LIU P, ZOU C, et al. Spectral-efficient cellular communications with coexistent one-and two-hop transmissions[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 65(8): 1.
- [19] FÖRSTER A, MURPHY A L. CLIQUE: role-free clustering with Q-learning for Wireless Sensor Networks [C]// The 29th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems, June 22–26, 2009, Montreal, QC, Canada. New Jersey: IEEE Press, 2009: 441-449.
- [20] JIN Y, WANG L, KIM Y, et al. EEMC: an energy-efficient multi-level clustering algorithm for large-scale wireless sensor networks[J]. Computer Networks, 2008, 52(3): 542-562.
- [21] SOZER E M, STOJANOVIC M, PROAKIS J G. Underwater acoustic networks[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2000, 25(1): 72-83.
- [22] 王换招, 孟凡治, 李增智. 高效节能的无线传感器网络覆盖保持协议[J]. 软件学报, 2010, 21(12): 3124-3137.
- WANG H Z, MENG F Z, LI Z Z. Energy efficient coverage conserving protocol for wireless sensor networks[J]. Journal of Software, 2010, 21(12): 3124-3137.

[作者简介]



李鑫滨(1969–),男,博士,燕山大学电气工程学院教授、博士生导师,主要研究方向为水声通信网络、认知无线电及应用、智能信息处理及故障诊断方法等。



高梦玲(1990–),女,燕山大学电气工程学院硕士生,主要研究方向为水下无线传感网络。



闫磊(1989–),男,燕山大学电气工程学院博士生,主要研究方向为水声协作通信网络。