

水下移动无线传感器网络拓扑愈合与优化

何明¹, 梁文辉^{1,2}, 陈秋丽¹, 陈希亮¹, 王立辉³

(1. 解放军理工大学 指挥信息系统学院, 南京 210007; 2. 解放军 61345 部队, 西安 710004; 3. 东南大学 仪器科学与工程学院, 南京 210096)

摘要: 为解决水下移动无线传感器网络(MUWSNs)存在的拓扑失效问题, 考虑水流对MUWSNs网络拓扑的影响, 提出一种水下移动无线传感器网络拓扑愈合算法. 采用鱼群算法部署AUVs节点, 建立系统的失效感知机制、消息传递机制和移动愈合方案, 并在此基础上进一步设计鱼群启发的MUWSNs拓扑优化方案. 通过两组仿真实验分别验证了方案的可行性和算法的有效性. 实验结果显示, 拓扑愈合方案可确保网络对监测事件的覆盖度维持在90%左右, 且拓扑优化方案能够进一步提高网络覆盖度.

关键词: 水下移动无线传感器网络; 拓扑自愈; 失效感知

中图分类号: TP29

文献标志码: A

Topology self-healing algorithm of mobile underwater wireless sensor networks

HE Ming¹, LIANG Wen-hui^{1,2}, CHEN Qiu-li¹, CHEN Xi-liang¹, WANG Li-hui³

(1. College of Command Information Systems, PLA Science and Technology University, Nanjing 210007, China; 2. Unit 61345 of PLA, Xi'an 710004, China; 3. School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China. Correspondent: HE Ming, E-mail: review_paper@126.com)

Abstract: To restore the topology failure of mobile underwater wireless sensor networks(MUWSNs) brought by dynamic evolution features, a mobility model used to simulate the motion of underwater entities is constructed with considering the influence of water flow to MUWSNs network topology. For restoring topology failure of MUWSNs caused by mobility of underwater entities, a topology healing algorithm is proposed. The fish-swarm algorithm is used to deploy AUVs nodes, thus the system failure perception mechanism, messaging mechanism, and mobile healing scheme are constructed. On the basis of the healing algorithm, the fish inspired MUWSNs topology optimization scheme is designed. The two groups experimental results show the feasibility of this model and the effectiveness of the proposed algorithm. It is found in simulations that the algorithm can ensure network coverage maintained at about 90%, and topology optimization scheme can improve the network coverage.

Keywords: mobile underwater wireless sensor networks; topology self-healing; failure perception

0 引言

在水下复杂的环境中, 洋流运动, 水下生物等外界因素的干扰容易使水下移动无线传感器网络(MUWSNs)中的传感器发生位置迁移, 而且传感器的灵敏度易受高盐度海水的影响, 导致节点失效^[1]. 为此, 研究有效、可行的拓扑愈合算法已逐渐成为人们关注的热点. 相比于传统的传感器网络, MUWSNs最显著的特征是其利用声波进行通信. 考虑到水下特殊的环境, 高效的通信协议对愈合算法的正常运行具有

重要的影响^[2-3].

目前, 水声通信的总体质量较差. 针对拓扑失效问题, 学者们设计了水下 ARQ (auto repeat request)^[4]、AODV(ad-hoc on-demand distance vector)^[5]等协议, 但链接的失效往往在路由转发过程中才发现, 愈合时延较大. 文献[6]提出利用拓扑控制模块进行自愈, 但主要针对的是无线传感器网络, 难以适应于 MUWSNs 声通信的特点. 文献[7]基于水下自组织航行器 AUV (autonomous underwater vehicle) 节点, 提出

收稿日期: 2014-01-12; 修回日期: 2014-07-13.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61203192); 江苏省自然科学基金项目(BK2011124, BK2012326, BK2010129).

作者简介: 何明(1978—), 男, 副教授, 博士, 从事传感器网络、信息安全等研究; 梁文辉(1986—), 男, 硕士生, 从事水下移动传感器网络、物联网的研究.

基于满 Steiner 树问题的拓扑愈合算法, 但该方法基于二维平面, 而且对于失效节点如何发现, AUVs 节点如何移动尚未进行具体研究。

综上所述, 目前已有的网络拓扑愈合算法主要存在以下问题:

1) 现有愈合方法基本都是基于二维平面的研究, 难以适用于水下三维拓扑。

2) 现有拓扑愈合算法对 MUWSNs 拓扑动态演化性考虑不够, 大多是在理想环境下进行的理论研究, 很难得到推广应用。

3) 目前的一些研究成果大都通过拓扑重组的方式实现 MUWSNs 的拓扑愈合, 经常性重组会使传感器节点产生很大能耗, 影响 MUWSNs 网络寿命^[8]。

针对上述问题, 本文在充分考虑 MUWSNs 的动态演化性的基础上, 提出一种拓扑愈合算法, 着重介绍了拓扑愈合过程中的通信协议运行过程, 并针对如何提升网络覆盖度的问题设计了拓扑优化方案。

1 网络建模

在目标监测区域, 随机非均匀部署传感器节点, 采用鱼群启发算法完成对 AUVs 节点的部署, 以保证

AUVs 分布密度与传感器节点分布密度相匹配。AUVs 部署过程中, 将每个 AUV 节点视为一条人工鱼, 传感器节点为食物。首先考虑每个传感器被 AUVs 覆盖的重数, 取一个 AUV 覆盖范围内所有传感器节点的覆盖重数的倒数为其适应度值, AUVs 模拟鱼群觅食、追尾和群聚行为, 最终完成部署。算法执行流程如图 1 所示。

觅食行为是指人工鱼搜寻食物多的地方并向其游动; 追尾行为是指当某条鱼发现食物较多且周围不太拥挤的区域时, 附近的人工鱼会迅速尾随; 聚群行为是指人工鱼在游动过程中会自然聚集成群, 以躲避危害。

网络连通性是 MUWSNs 获取并传输数据的基本要求。对三维空间内的无向图 $G(V, E_{dgc})$, 定义网络连通函数 $connectivity(G) : G(V, E_{dgc}) \rightarrow X$, X 为布尔逻辑数集合; 若网络中传感器节点 i_1 到传感器节点 i_k 的通信链路上要经过 k 个节点, 则对于链路 $i_1 \rightarrow i_2 \rightarrow \dots \rightarrow i_{k-1} \rightarrow i_k$, 通信时延记作 $delay(i_1, i_k)$, 用下式表示:

$$delay(i_1, i_k) = (k-1) \frac{L}{B} + \sum_{x=1}^{k-1} \frac{d(i_x, i_{x+1})}{V_t} \quad (1)$$

其中: $d(i_x, i_{x+1})$ 表示相邻节点 i_x 与 i_{x+1} 之间的欧氏距离, V_t 表示水下声传播速度, L 表示数据分组大小, B 表示数据传输率。

链接 (i_x, i_{x+1}) 上的能耗表示为 $cost(i_x, i_{x+1})$, 即

$$cost(i_x, i_{x+1}) = \beta d(i_x, i_{x+1})^\alpha \quad (2)$$

其中: α 表示能量衰减指数, 根据实验统计, 在水中通信时, 一般 α 取 $[2, 6]$; β 为常数。

对于 MUWSNs 而言, 由于传感器节点失效或受水流运动的影响使得网络拓扑出现断裂时, 应及时发现并选择距离失效位置最近的 AUV, 使其快速移动到断裂位置进行拓扑愈合, 使 $connectivity(G)$ 在尽可能短的时间内恢复为 1, 以确保 MUWSNs 覆盖率维持在较高范围内。为便于模型分析, 给出如下符合实际应用的假设。

假设 1 初始 MUWSNs 网络拓扑非均匀部署, 网络全局连通, 整个网络对目标事件集的覆盖率达到 90% 以上; AUVs 分布密度与传感器节点分布密度相匹配^[7]。

假设 2 传感器节点具有辅助定位系统, 能知道自身位置及邻居节点位置, 可获取邻居节点的邻居集合。

假设 3 每个 AUV 可以直接通过水面基站与其他 AUVs 通信, 并获取各自的位置信息。

假设 4 愈合时间远小于网络可靠性运行时间, 愈合过程中不会发生新失效。

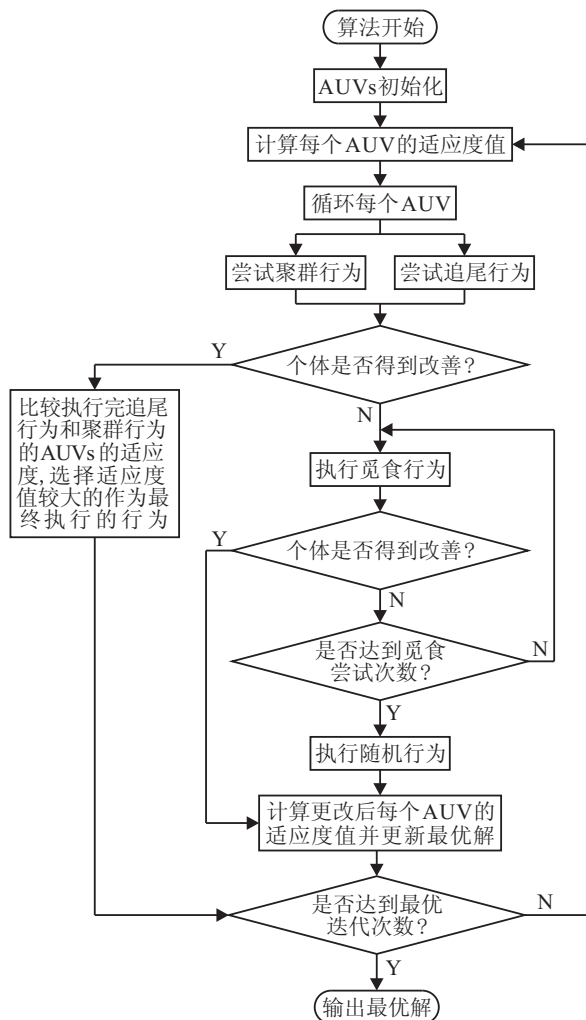


图 1 鱼群启发的 AUVs 部署流程

2 拓扑愈合研究

在水下传感器节点部署完毕, AUVs 节点也已采用鱼群启发算法部署在相应位置的前提下, 采用本文愈合算法. 具体分为 3 个阶段: 传感器分组编号; 发现失效位置; AUVs 执行愈合.

2.1 传感器分组编号

2.1.1 传感器分组

SN 表示传感器节点自身编号, GN 表示传感器节点所在组号. 对传感器节点进行编号分组, 能更加快速有效地进行失效感知.

随机选择某个节点作为 1 号节点, 即 $SN = 1$, 且令其 $GN = 1$, 表示 1 号节点为 GN_1 组组长. 将其邻居节点集合内的节点 SN 从 2 开始按序编号, 且 GN 均为 1, 表示从属于 GN_1 组. 1 号节点编组完成, 告知 2 号节点 GN_1 中最大 SN 号, 为其编号起始值, 2 号节点将自身邻居节点集合内已经编入 GN_1 组的节点排除, 对剩余邻居节点编号, 令其 $GN = 2$. 2 号节点编组完成后, 将自身组员的最大 SN 号告知组长 1 号节点, 再由 1 号节点向 3 号节点发送编号起始值, 则 3 号节点开始新一轮的编组, 依次重复.

2.1.2 传感器从属编号

传感器分布密度与 AUVs 分布密度相匹配. 为保证拓扑失效时, 愈合时间最短, 确保离失效位置最近的 AUV 实施愈合, 需对每个传感器进行从属编号, 确定各自的唯一管理 AUV.

1) 由于 AUVs 的数量远小于传感器, 为节省交互信息量, 由每个 AUV 向其覆盖范围内的传感器发送身份标识报文, 发送报文次数与其覆盖的传感器节点总数相同.

2) 传感器节点 S_i 收到来自 AUV1 的身份标识

报文后, 查询自身标识, 若未被标识, 则将标识改为 AUV1, 并向 AUV1 发送回复报文; 若已被标识, 则表明该传感器节点已从属于其他 AUV 管理.

3) 重复上述过程, 直到每个 AUV 报文发送完毕, 完成传感器的从属编号.

2.2 发现失效位置

当 MUWSNs 拓扑受故障节点或水流影响发生拓扑局部失效, 造成拓扑分割时, 如何及时发现失效位置并告知相应的 AUV 节点是失效感知阶段要解决的问题, 处理过程分为如下两种情况.

1) $SN = GN$, 组长发生移动, 判定是否失效.

这种情况较为简单, 由于水下传感器硬件条件要求较高, 部署在 MUWSNs 网络中的节点数量相对互联网小很多, 且水声通信信息量较少, 故由多径衰落引发的时延一般由节点之间的距离决定^[9]. 基于 MAC 协议, 为减少通信消耗, 进行以下改进.

假如由组长节点 S1 定时给自身从属 AUV1 发送签到报文, 携带 S1 节点的位置信息和邻居集合信息. 若其所属 AUV1 节点时段 1 内未收到 S1 的签到报文, 则向全网广播对 S1 的寻找报文; 若 S1 收到寻找报文, 则向 AUV1 返回报文重组报文, 包含 S1 及其原邻居节点调整后的邻居集合及编组; 若时段 2 内 AUV1 节点未找到 S1, 则表明 S1 发生拓扑失效, AUV1 将主动进行愈合.

2) $SN \neq GN$, 组员发生移动, 判定是否失效. 具体实例的通信协议交互过程如图 2 和图 3 所示.

① 组员节点 S5 以周期 T 向其组长 S2 发送签到报文, 且告知 S5 从属于 AUV1.

② 若组长 S2 在时段 1 内未收到组员 S5 的签到报文, 则向全网广播对 S5 的寻找报文, 该报文包含 S2 和 S5 的 (SN, GN).

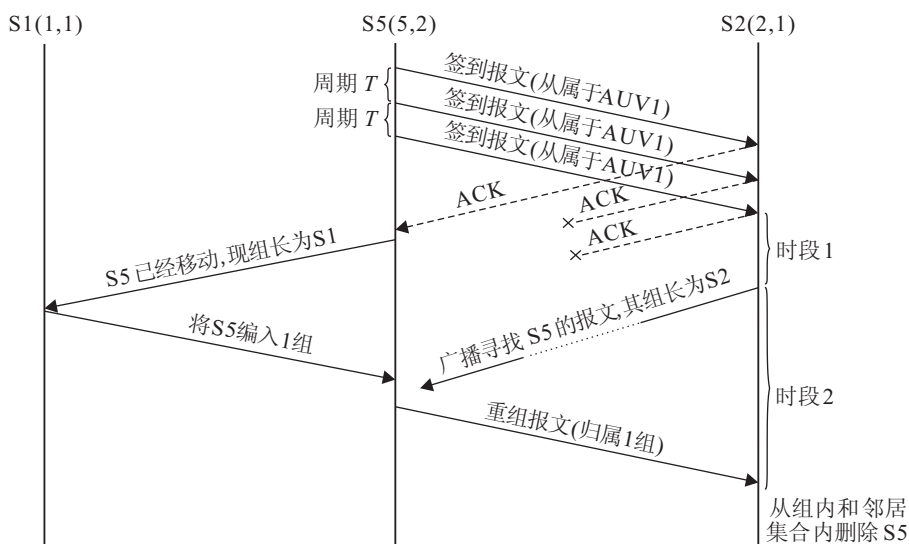


图 2 传感器节点 ($SN \neq GN$) 移动但未失效示例

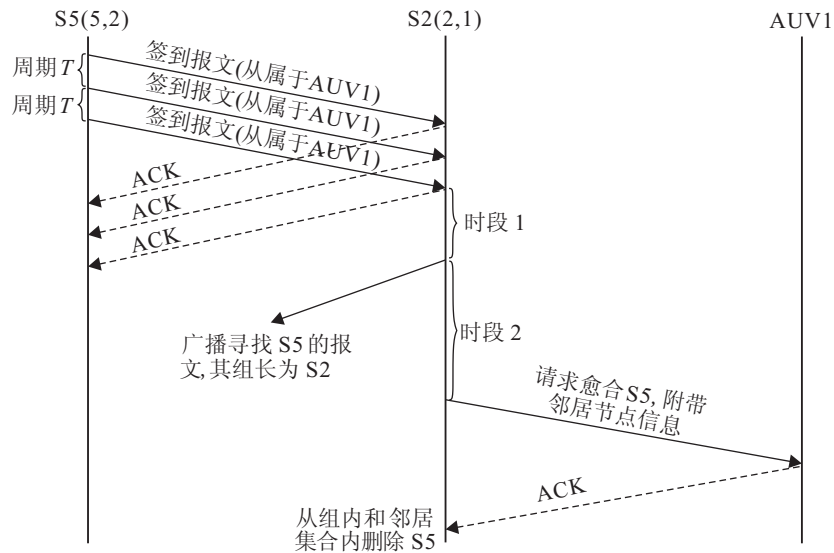


图3 传感器节点(SN ≠ GN)失效示例

③若S5收到该报文,则向S2回报文重组报文,告知S2,经过移动S5现已加入1组,组长为S1。S2收到S5的重组报文后,在组成员列表及邻居集合中将S5删除,如图2所示;若在时段2内S2未收到S5的重组报文,则表明S5处已发生了拓扑失效,S2向S5原所属的AUV1发送愈合请求报文,包含S5原位置信息和原邻居集合信息,同时,S2在组成员列表及邻居集合中删除S5,如图3所示。

2.3 AUVs 执行愈合

为了保证耗时最短,派遣距离失效位置最近的AUV执行自愈算法。首先,计算失效节点邻居集合中所有节点的中心位置,使得用于愈合的AUV节点向中心位置移动;随后,当该AUV节点移动到指定位置后,为降低能耗,可根据失效位置周围的传感器节点的功率大小,将用于愈合的AUV节点的功率大小调整为与周围传感器功率一致,保证通信即可;最后,由AUV节点向水面基站发送愈合完成消息,水面基站收到该消息后,将该AUV节点从AUVs集合中删除,并重新进行预处理,将该AUV节点作为1号节点重新对传感器进行编组和从属编号。

3 拓扑优化研究

为进一步减少拓扑失效,受鱼群启发,对修复后的MUWSNs覆盖度进一步优化。此时,将传感器节点当作人工鱼,目标监测区域内的事件当作食物,整个过程与AUVs部署过程一致。确保传感器分布密度与目标事件分布密度相匹配,实现每个目标事件都能被覆盖。

1) 统计各传感器节点探测范围内的监测事件,若传感器节点探测到的监测事件为0时,则判断在该传感器节点的通信范围内是否有邻节点。

2) 若传感器 s_i 的邻节点数为0,则执行觅食行为。

随机选择向任意方向移动不超过 l_{step} 的步长,觅食结束后判断 s_i 探测范围内的监测事件数目,若大于0,则表示觅食成功,否则,觅食失败。

3) 若 s_i 邻节点数大于0,则先确定众多邻节点的中心位置 s_c ,计算出中心位置覆盖的监测事件数量和拥挤程度;若不拥挤且 s_c 覆盖的监测事件数量多于 s_i ,则进行群聚行为,将 s_i 向 s_c 处移动一步;若移动后 s_i 探测范围内的监测事件数目增加,则群聚成功,否则,群聚失败。

若传感器节点探测到的监测事件不为0时,则将 s_i 移动至所覆盖事件的中心位置,然后按1)、2)、3)执行。目标区域内每个传感器节点均按上述步骤执行,经过多轮迭代,MUWSNs覆盖度优化过程结束。

4 实验分析与仿真实证

在 $800\text{ m} \times 800\text{ m} \times 800\text{ m}$ 的水下监测区域,随机布置100个目标事件,50个互通的传感器节点,10个AUVs自移动节点。经前期部署处理,保证传感器节点对目标事件覆盖90%以上,AUVs节点覆盖密度与传感器节点覆盖密度保持一致。当拓扑失效,所有AUVs均已用于愈合时,一轮仿真结束。利用Matlab实验仿真平台进行100轮仿真,其中:能量衰减指数 $\alpha = 3$,单位流量费用函数系数 $\beta = 2 \times 10^{-8} \text{ J}/(\text{kB} \cdot \text{m}^3)^{[10]}$ 。

4.1 拓扑愈合仿真分析

图4是对采用AUVs愈合和不采用AUVs愈合两种情况下事件覆盖度随时间变化曲线的比较。这里所说的事件覆盖度是指目标监测区域内被传感器节点覆盖的事件占所有事件总数的百分比。

由图4可以看出:在有AUVs愈合算法的情况下,事件覆盖度基本保持在0.9左右,仅有几次低于0.9的情况也会很快恢复到0.9以上;而没有加入愈合算法的情况下,事件覆盖度会随着时间逐渐降低,不能保

证监测任务的完成.

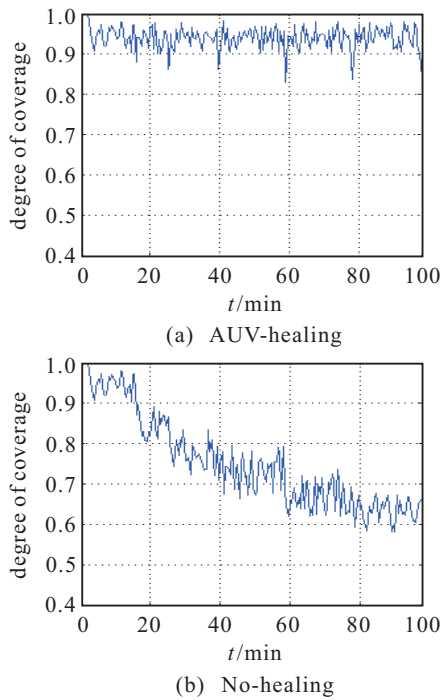


图4 事件覆盖度比较

4.2 拓扑优化仿真分析

图5为不同移动步长下网络覆盖度随迭代次数增加的变化曲线.可以看出:3条曲线的覆盖度均得到了优化,但移动步长取较小值和较大值时收敛速度较慢,分别经过17轮和18轮的迭代才达到收敛;而取随机步长时,经过13轮迭代便达到收敛.

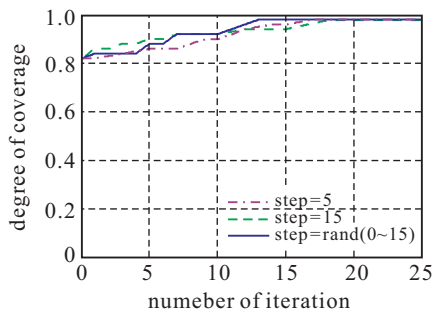


图5 优化过程中覆盖度曲线变化

5 结论

水下环境的动态演化性,在一定程度上降低了网络拓扑的可靠性.为使MUWSNs能够应用于更加广泛的领域,本文提出了一种水下移动无线传感器网络拓扑愈合算法.针对传感器节点移动引起的拓扑失效,利用AUV节点及时感知并进行快速愈合;同时,引入优化策略,以减少传输时延,提高能耗效率和延长网络生命周期,达到增强网络可靠性的目标.

参考文献(References)

- [1] 何明, 梁文辉, 陈国华, 等. 水下移动无线传感器网络拓扑[J]. 控制与决策, 2013, 28(12): 1761-1770.
(He M, Liang W H, Chen G H, et al. Topology of mobile underwater wireless sensor networks[J]. Control and Decision, 2013, 28(12): 1761-1770.)
- [2] Liao E-H, Huang C. SF-MAC: A spatially fair MAC protocol for underwater acoustic sensor networks[J]. IEEE Sensors J, 2012, 12(6): 1686-1694.
- [3] Hong L, Hong F, Guo Z, et al. ECS: Efficient communication scheduling for underwater sensor networks[J]. Sensors, 2011, 11(3): 2920-2938.
- [4] Haining Mo, Lina Pu, Yibo Zhu, et al. Evaluating selective ARQ and slotted handshake based access in real world underwater networks[C]. Wireless Algorithms, Systems, and Applications(WASA). Berlin: Heidelberg, 2013: 206-220.
- [5] Xu Dong, Liu Bailong, Zhang Rubo. Research on energy conservation route maintenance of multiple AUVs[C]. Int Conf on Computing, Information and Control(ICCC). Wuhan, 2011: 39-46.
- [6] Liu Linfeng, Wu Jiagao, Zou Zhiqiang, et al. Topology self-cure algorithm aiming at node failure problem in wireless sensor networks[J]. J of Southeast University, 2009, 39(4): 695-699.
- [7] Liu Linfeng, Liu Ye. Study of topology recovery algorithm based on full Steiner minimum tree problem in underwater wireless sensor networks[J]. J on Communications, 2010, 31(9): 30-37.
- [8] Azar Z, Manzuri M T. A latency-tolerant MAC protocol for underwater acoustic sensor networks[C]. 2010 Int Conf on Control Automation and Systems(ICCAS). Gyeonggi-do: IEEE, 2010: 849-854.
- [9] Melike Erol-Kantarci, Hussein T Mouftah, Sema Oktug. A survey of architectures and localization techniques for underwater acoustic sensor networks[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials COMSUR, 2011, 13(3): 487-502.
- [10] Junfeng Xu, Keqiu Li, Geyong Min. Reliable and energy-efficient multipath communications in underwater sensor networks[C]. IEEE Trans on Parallel and Distributed Systems, 2012, 23(7): 1326-1335.

(责任编辑: 曹洪武)