

文章编号: 2095-4980(2021)05-0934-05

基于拓扑感知的水下传感网络路由

王冬梅

(驻马店职业技术学院 信息工程系, 河南 驻马店 463000)

摘要: 由于水下传感网络的高时延、低带宽和高能耗等特性, 建立路由协议仍存在挑战。为此, 提出基于拓扑感知的水下传感网络路由(TAR)。TAR 路由先通过交互 Beacon 包, 使每个节点获取网络拓扑信息, 并建立邻居信息表。再依据节点剩余能量和链路的可靠性, 择优选择下一跳转发节点, 进而提高路由的稳定性, 平衡节点间能耗。仿真结果表明, 提出的 TAR 路由增强了路由稳定性, 并减少了节点的能耗。

关键词: 水下传感网; 路由协议; 拓扑感知; 邻居节点信息表; 能耗

中图分类号: TN914

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020019

Topology-aware routing in underwater sensor networks

WANG Dongmei

(Department of Information Engineering, Zhumadian Career Technical College, Zhumadian Henan 463000, China)

Abstract: It is challenging to build networking protocols for Underwater Sensor Networks(UWSNs) due to specific characteristics of UWSNs, such as high latency, low bandwidth, and high energy consumption. Therefore, Topology-Aware Routing(TAR) in Underwater Sensor Networks is proposed. TAR routing first makes each node obtain the network topology information through the interactive Beacon package, and establishes the neighbor information table. Then, based on the residual energy of the node and the reliability of the link, the next-hop forwarding node is selected to improve the stability of the route and balance the energy consumption among nodes. Simulation results show that the proposed TAR route enhances the routing stability and reduces the energy consumption of nodes.

Keywords: Underwater Sensor Networks; routing protocol; Topology-Aware; neighbor information; energy consumption

目前, 水下传感网络(UWSNs)受到广泛关注^[1-2]。人类利用 UWSNs 勘测水域、环境监测、科学考察、污染监测等。通过在水域内部署传感节点, 再由传感节点感测环境数据, 并将数据传输至控制中心, 进而实现对水域环境的监测。

由于电信号在水域中快速衰减, 水下需采用声通信。水下声速约 1.5×10^3 m/s, 而电信号的速度近光速 3.0×10^8 m/s。因此, 减少数据传输的端到端时延是 UWSNs 的一项挑战工作^[3]。此外, 能效也是 UWSNs 的关键技术。在水域环境, 声通信模型下的数据传输、数据接收消耗了节点大部分能量。而在水下给节点更换电池或者充电存在较多的客观难题。

实质上, 部署 USNs 的根本目的在于获取水域环境数据。而这些数据需传感节点以多跳方式传输至控制中心^[4-5]。而有效的路由协议可以提高数据传输效率, 缩短数据传输时延, 缓解传感节点的能耗。

为了提高数据传输效率, 拥有数据的节点(源节点)需选择下一跳转发节点。通常, 依据节点间距离和剩余能量, 决策下一跳转发节点^[6]。强化学习(Reinforcement Learning, RL)可提高系统的决策效率。通过对环境的学习, 能够作出符合环境的决策。

文献[7-8]采用了基于 RL 路由协议, 其考虑了能量和数据包传输时延这 2 个因素, 并利用这项信息对每个路由决策行为进行奖惩。在选择下一跳转发节点时, 先评估邻居节点成为转发节点的权值^[9], 再依据权值择优选择下一跳转发节点。

然而，这些协议在选择转发节点时，只考虑了能量或者距离信息，并没有考虑节点本身的拓扑结构。为此，提出基于拓扑感知的水下传感网络路由(TAR)。TAR 路由依据离信宿的跳数构建候选转发节点集，再从候选转发节点集中选择能量高和链路质量好的节点作为下一跳转发节点。仿真结果表明，TAR 路由提高了路由的稳定性，并降低了网络能耗。

1 系统模型及能耗模型

在水域内部署 N 个节点。这些节点部署于水下，它们利用声信号进行通信，如图 1 所示。 m 个信宿浮在水面。这些信宿既可以声通信，也可进行无线电通信。

令 $E_{tx}(k,d)$ 表示水域中节点传输一位比特数据所消耗的能量：

$$E_{tx}(k,d) = P_T(d) \times T_{tx} \tag{1}$$

式中： T_{tx} 为传输时间； $P_T(d)$ 为传输单位比特数据，传输距离为 d 所需的功率，且 $P_T(d) = 4\pi \times d^2 \times H \times I_T$ ， I_T 为离声源 1 m 处的信号功率值，单位为 $1 \mu Pa$ 。

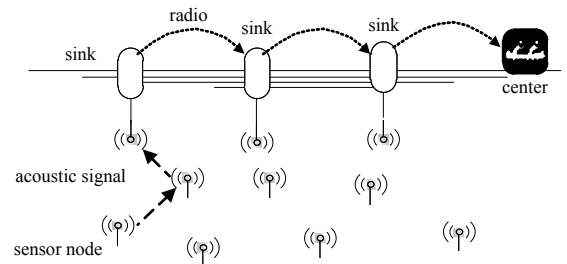


Fig.1 Network model
图 1 网络模型

2 TAR 路由

2.1 初始阶段

最初广播 Beacon 包，其包含信宿位置和该 Beacon 包的编号 Seq。每个 Beacon 包是唯一的。邻居节点收到后，将判断是否第 1 次接收该数据包。若是第 1 次，就提取信息，建立邻居信息表，再转发。若已接收该编号 Seq 的包，就直接丢弃。

通过 Beacon 包的传递，每个节点能够获取离信宿的跳数 LV 的值，并建立自己一跳邻居集：

$$B_i = \{s_k \mid d(i,k) \leq R\} \tag{2}$$

式中： B_i 为节点 s_i 的一跳邻居节点； $d(i,k)$ 为节点 s_i 离节点 s_k 的距离； R 为节点最大的通信距离。

信宿先广播 Beacon 包，节点 2,3 先接收此包，它们提取信息，再转发，如图 2 所示。重复上述过程，网络内节点能够知晓离信宿的跳数和一跳邻居节点集。

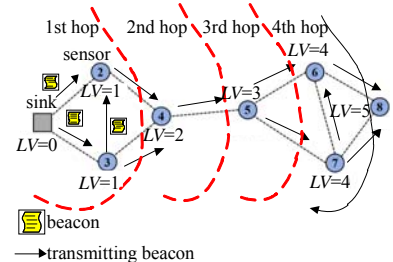


Fig.2 Example of network topology
图 2 网络拓扑示例

2.2 候选转发节点

初始阶段完成后，每个节点从一跳邻居节点中选择节点构建候选转发节点集^[10]。具体而言，令 C_i 为节点 s_i 的候选转发节点集(Node-Forwarder, NF)，定义为：

$$NF_i = \{s_j \mid s_j \in B_i, LV_j \leq LV_i\} \tag{3}$$

式中 LV_j, LV_i 分别表示节点 s_j, s_i 的跳数值。式(3)约束了 2 个条件：第 1 个条件 $s_j \in B_i$ 规定：加入候选节点集的节点必须是一跳邻居节点；第 2 个条件 $LV_j < LV_i$ 规定：加入候选节点集的节点离信宿的跳数小于自己离信宿的跳数。

最初，各节点的候选转发节点集为空。依据式(3)建立邻居节点信息表。仍以图 2 所示网络拓扑结构为例，图 3 显示了节点 5,6,7 和 8 的邻居节点信息表。

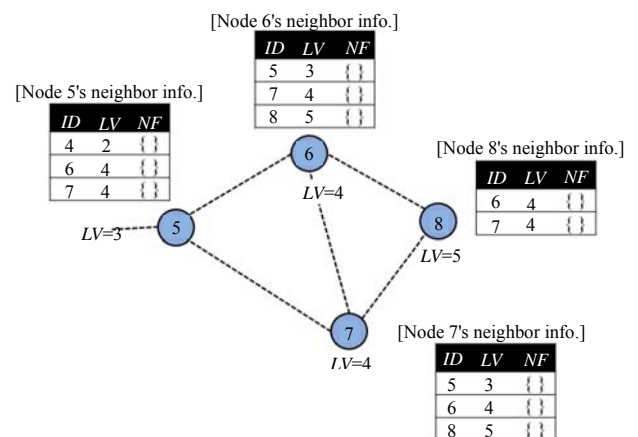


Fig.3 Finding neighbor table
图 3 构建邻居节点信息表

当节点建立了邻居节点信息表后，再依据式(3)构建 NF。以图 2 为例，假定节点 8 首先建立 NF。对于节点 8 而言，它的邻居节点 {6,7} 都满足式(3)，节点 8 的候选节点集 $NF_8 = \{6,7\}$ 。其他节点采用同样的方法，可构建自己的候选节点集，如图 4 所示。每个节点均建立自己的候选节点集，最终形成完整的邻居节点表。

2.3 下一跳转发节点的选择

利用节点的能量信息和链路可靠性，选择下一跳转发节点。首先，利用节点传输数据包成功次数和失败次数估计链路的可靠性。由于 USNs 的恶劣环境，并非每个数据包都能够成功传输至目的节点。当然，若采用确认重传机制^[11]，可以保证数据包的成功传输，但这增加了通信开销。

由于所有节点均能监听网络流量，节点可通过监听下一跳转发是否转发数据包，判断数据包是否传输成功^[12]。如果下一跳转发节点转发数据包，则表明其已成功将数据包传输至下一跳转发节点。每个节点传输数据包后，先缓存，直到监听下一跳转发节点转发了数据包，才把该数据包从缓存中删掉。

如图 5 所示，节点 0 向节点 1 传输了数据包 Data，然后就监听，节点 1 是否转发数据包 Data。若监听到，节点 0 就认为已成功将数据包 Data 传输至节点 1。

若在规定时间内没有监听转发数据包，就进行重传。令 $N_i(j)$ 表示节点 s_i 向节点 s_j 单一数据包的传输次数。为了避免无限止地重传数据包，设定最大的重传次数 N_{max} 。显然， $N_i(j)$ 越小，链路质量越好。

令 $L_{i,j}$ 表示节点 s_i 与节点 s_j 的通信链路质量，其定义：

$$L_{i,j} = 1 - \frac{N_i(j) - 1}{N_{max} - 1} \quad (4)$$

利用式(4)将链路质量进行归一化处理，使 $0 \leq L_{i,j} \leq 1$ 。若只传输一次，即 $N_i(j) = 1$ ，则 $L_{i,j} = 1$ 。然后，考查节点能量影响因子。引用能量比例 E_j^r ，其等于节点 s_j 的剩余能量与节点的初始能量之比：

$$E_j^r = \frac{E_j}{E_0} \quad (5)$$

式中 E_0, E_j 分别表示节点 s_j 的初始能量、剩余能量。

再利用链路质量和剩余能量比例构建节点权值：

$$W_j = \lambda_1 L_{i,j} + \lambda_2 E_j^r \quad (6)$$

式中： W_j 为节点 s_j 的权值； λ_1, λ_2 为权重系数。

最后，节点 s_i 就从候选转发节点集 NF_i 中选择具有最大权值节点作为下一跳转发节点。

$$Next_node(i) = \left\{ s_k \mid \max_{s_k \in NF_i} W_k \right\} \quad (7)$$

图 6 给出了传输数据包的过程。信宿先广播 Beacon 包，节点间相互转发 Beacon 包，进而构建一跳邻居节点集，再相继依式(3)、(6)构建转发节点集、下一跳转发节点。最终，向下一跳转发节点传输数据。

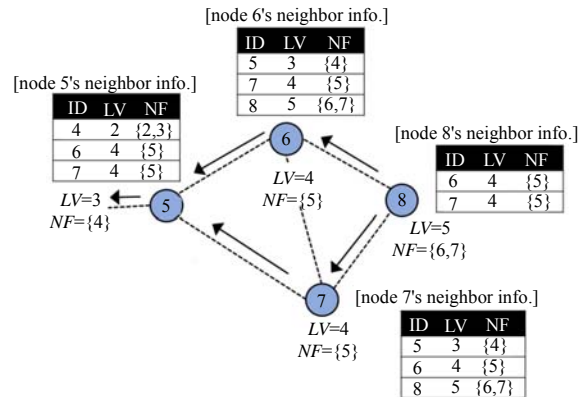


Fig.4 Example of finding next-forwarder candidates
图 4 构建候选转发节点集示例

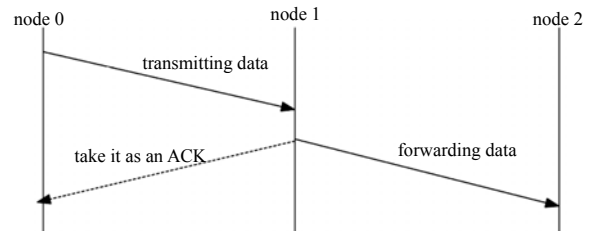


Fig.5 Example of listening packet
图 5 监听数据包示例

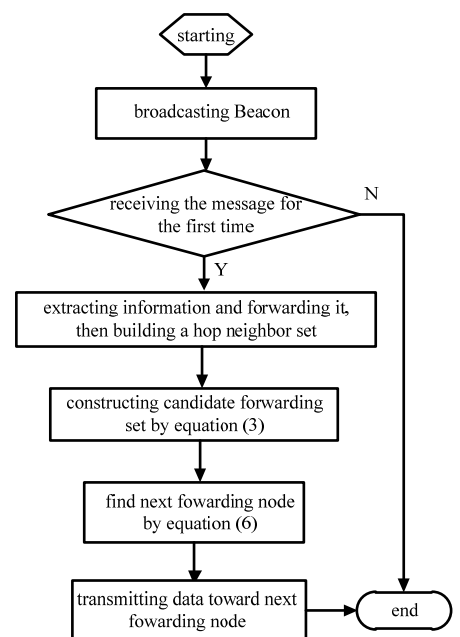


Fig.6 Flow of transmitting packet
图 6 数据包传输流程

3 性能分析

3.1 仿真环境

通过 Matlab 建立仿真平台。在 200 m×200 m×200 m 空间内部署 125 个节点。信宿位于水面。考虑到节点在水中会浮动，因此，假定节点会移动，且最大的移动速度为 1 m/s，节点传输半径为 75 m。声传输的发射功率、接收功率和空闲功率分别为 10 W,3 W 和 30 mW。最大传输次数 $N_{max}=5$ 。

为了更好地分析 TAR 路由，选择 QELAR 路由、基于向量的转发(Vector Based Forwarding, VBF)和文献[8]中的 QLDAR 路由(Q-Learning-Based Delay-Aware Routing, QLDAR)作为参照，并比较它们的能量效率、路由效率性和每传输一个数据包所参与的平均节点数(Average Number of Nodes Involved, ANNI)。能量效率等于总的传输数据包数与所消耗的总能量之比，而路由效率等于每跳平均传输时延的倒数，传输时延越短，路由效率越高。

3.2 ANNI 性能

首先分析 ANNI 性能，如图 7 所示。从图 7 可知，提出的 TAR 路由的 ANNI 最小。这归功于 TAR 路由选择了最短路径，减少了参与路由的节点数。相比于 QELAR 路由、VBF 路由和 QLDAR 路由，TAR 路由通过选择最短路径，控制了参与路由的节点数。而 QLDAR 路由的 ANNI 最大，原因是其旨在控制传输时延，并没有考虑到路径长短问题。

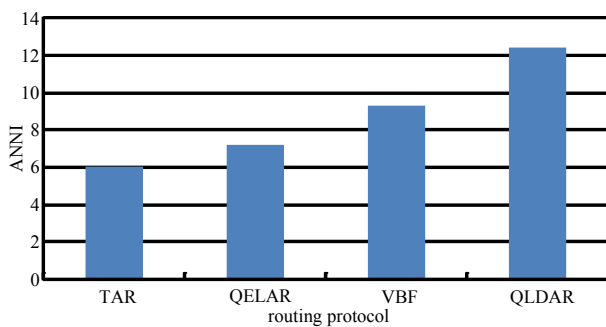


Fig.7 ANNI performance
图 7 ANNI 性能

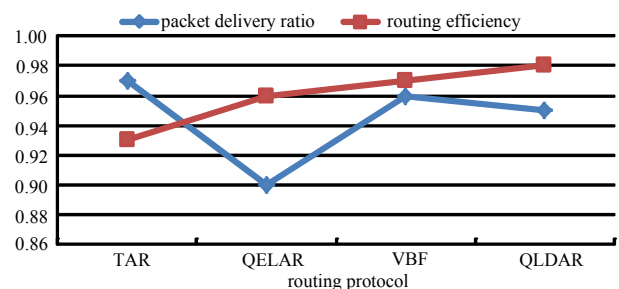


Fig.8 Routing efficiency and packet delivery ratio
图 8 路由效率及数据包传递率

3.3 路由效率及数据包传递率

图 8 显示了各路由协议的路由效率和数据包传递率，其中数据包传递率是信宿所接收的数据包数与节点传输的数据包数之比。

从图 8 可知，TAR 路由具有较高的数据包传递率，但其路由效率较低。而 QLDAR 路由具有高的路由效率，但是其数据包传递率低。相比于 QELAR 和 VBF，TAR 路由仍保持较好的路由性能。

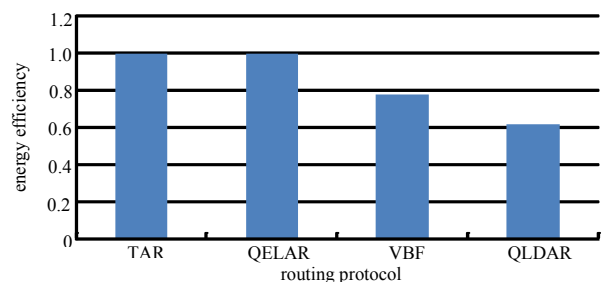


Fig.9 Energy efficiency
图 9 能量效率

3.4 能量效率

最后，分析 TAR,QELAR,VBF 和 QLDAR 路由的能量效率。从图 9 可知，TAR 路由和 QELAR 路由的能量效率达到 1，而 VBF 和 QLDAR 路由的能量效率只有 0.8 和 0.4。这说明，TAR 和 QELAR 路由有效地利用了能量，并利用这些能量传递数据包。

此外，表 1 显示了在 40 h 内各时间段的死亡节点数。死亡节点数越多，能耗的速度越快，路由的能耗性能越差。从表 1 可知，TAR 路由在各时间段死亡节点数最少，低于 QELAR,VBF 和 QLDAR 路由。这表明，TAR 路由通过平衡节点间能耗，缓解了节点能耗，减少了死亡节点数。

表 1 死亡节点数

hours	number of dead nodes			
	TAR	QELAR	VBF	QLDAR
0-10	3	5	9	6
11-20	6	13	15	14
21-30	10	17	20	22
31-40	11	21	25	24

4 结论

考虑到水下传感网络严苛的通信环境,提出拓扑感知的水下传感网络路由 TAR。TAR 路由从离信宿跳数、能量以及链路质量三个方面选择下一跳转发节点。通过在网络内交互 Beacon 包,使节点获取网络拓扑信息,并利用转发数据包的成功次数判断链路质量。仿真结果表明,提出的 TAR 路由有效提高了路由的稳定性,并缓解了节点的能耗。

参考文献:

- [1] 谭艳春,樊海红,刘目磊. 基于盲源分离算法的水下无线传感网络信号重建[J]. 计算机仿真, 2018,35(2):173-177. (TAN Yanchun,FAN Haihong,LIU Mulei. Signal reconstruction of underwater wireless sensor networks based on blind source separation[J]. Computer Simulation, 2018,35(2):173-177.)
- [2] 尚亚丽. WSNs 基于能效感知的任播路由[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019,17(6):1012-1016. (SHANG Yali. An energy-efficient anycast routing in wireless sensor network[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019,17(6):1012-1016.)
- [3] 张忠利. 水下传感网络拓扑结构的稳定性控制方法[J]. 舰船科学技术, 2018,41(2):110-114. (ZHANG Zhongli. Stability control method for underwater sensor network topology[J]. Ship Science and Technology, 2018,41(2):110-114.)
- [4] 胡君,莫峥嵘. 水下传感网络中有效选择转发节点的协作路由[J]. 传感技术学报, 2019,32(3):458-463. (HU Jun,MO Zhengrong. Efficient relay selection algorithm for cooperative routing in underwater sensor networks[J]. Chinese Journal of Sensor and Actuators, 2019,32(3):458-463.)
- [5] 吴名星,康松林,陶志勇,等. 采用转发优先级的水下传感网络的机会路由[J]. 传感技术学报, 2019,32(1):133-139. (WU Mingxing,KANG Songlin,TAO Zhiyong,et al. Forwarding priority-based opportunistic routing in underwater sensor networks[J]. Chinese Journal of Sensor and Actuators, 2019,32(1):133-139.)
- [6] 徐晓晖,吴立华,张春海. 基于地理-机会的水下传感网的混合路由[J]. 现代电子技术, 2017,40(3):17-23. (XU Xiaohui, WU Lihua,ZHANG Chunhai. A geographic-opportunistic hybrid routing for underwater sensor networks[J]. Modern Electronics Technique, 2017,40(3):17-23.)
- [7] HU T,FEI Y. QELAR:a machine-learning-based adaptive routing protocol for energy-efficient and lifetime-extended underwater sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2010,9(5):796-809.
- [8] JIN Z,MA Y,SU S. A Q-Learning-based delay-aware routing algorithm to extend the lifetime of underwater sensor networks[J]. Sensors, 2017,17(6):65-78.
- [9] 付如彬,李亮,徐成,等. 基于强化学习的仿生机器鱼节能研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2019,55(3):405-410. (FU Rubin,LI Liang,XU Cheng,et al. Studies on energy saving of robot fish based on reinforcement learning[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2019,55(3):405-410.)
- [10] PHAM T L,KIM D S. Efficient forwarding protocol for dual-hop relaying wireless networks[J]. Wireless Personal Communications, 2016,89(1):165-180.
- [11] KHAN A,JAVID N,ALI I,et al. An energy efficient interference-aware routing protocol for underwater WSNs[J]. KSII Transactions on Internet and Information Systems, 2017,11(10):4844-4864.
- [12] BLETSAS A,KHISTI A,REED D P. A simple cooperative diversity method based on network path selection[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016,24(3):659-672.

作者简介:

王冬梅(1981-),女,河南省驻马店市人,双学士,副教授,主要研究方向为计算机应用及物联网技术.email: shi_yibin89@yeah.net.