

文章编号: 2095-4980(2020)05-0934-05

水下传感网络中基于链路质量和位置的协作路由

史玲华

(驻马店职业技术学院 信息工程系, 河南省 驻马店 463000)

摘要: 水下传感网络是开发水域环境的有效技术手段。但在水下环境传输数据, 信号衰减快, 通信链路质量差, 降低了数据包传递率。提出基于链路质量和位置的协作(LQLC)路由。LQLC路由引用协作路由思想, 利用链路质量和节点能量信息, 构建候选转发节点集; 再从候选转发节点集中选择具有最优链路质量的节点作为转发节点; 最后在候选转发节点集中选择离转发节点最近的节点作为协作节点。仿真结果表明, 提出的 LQLC 路由提高了数据包传递率。

关键词: 水下传感网; 协作路由; 转发节点; 协作节点; 信噪比

中图分类号: TN914

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019200

Link Quality and Location-based Cooperative routing in Underwater Sensor Networks

SHI Linghua

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

Abstract: Underwater Sensor Networks(USNs) technique is an effective way to develop water environment. However, when data is transmitted in the underwater environment, the signal attenuation is fast and the quality of communication link is poor, which reduces the packet transmission rate. Therefore, Link Quality and Location-based Cooperative(LQLC) routing is proposed. It refers to the idea of cooperative routing, which first uses the link quality and node energy information to build candidate forwarding node set, and then selects the node with the best link quality as the forwarding node from the candidate forwarding node set. The nearest node to the forwarding node is selected as the cooperative node in the candidate forwarding node set. Simulation results show that LQLC protocol has a good performance in terms of packet delivery ratio.

Keywords: Underwater Sensor Networks; cooperative routing; relay node; cooperative node; Signal to Noise Ratio(SNR)

随着科技的发展, 各国越来越重视海洋事业的发展。而水下传感网络(USNs)是探测水域和发展海洋事业的有效手段。目前, USNs 已在港口监控、污染监测、海域数据采集等领域得到广泛应用^[1-2]。

USNs 由大量的微型传感节点组成, 这些传感节点先感测水域内的环境数据, 再以水声通信方式将数据传输至水面上的节点^[3], 水面上的节点再以无线电或激光方式将数据传输到控制中心。通常, 水面上的节点为信宿, 它们收集水下传感节点的数据。但在水域环境内, 水声通道的时延大, 且信号衰减大, 误码率高, 对路由的设计提出了挑战。为此, 研究者将目光转向协作通信机制。协作路由^[4-5](Cooperative Routing, CR)是指由 2 个或以上节点转发同一个数据包, 使接收节点能够接收同一个数据包的多个复本, 进而提高数据传输成功率, 保证数据能够可靠传输至信宿^[6]。

WANG 等^[7]研究了水下声通信网络的异步协作传输, 并提出基于放大-转发(Amplify and Forward, AF)和解码转发(Decode and Forward, DF)2 个异步传输策略。胡君等^[8]提出基于链路质量和物理距离选择转发节点的协作路由(Selecting Relays based link quality indicator and physical distances Cooperative Routing, SRCR)。实质上, 协

收稿日期: 2019-06-14; 修回日期: 2019-09-11

基金项目: 2018 年度河南省重大科技专项资助项目(82102210100)

作者简介: 史玲华(1982-), 女, 硕士, 副教授, 主要研究方向为计算机网络技术、多媒体。email:wang_hhhu@21cn.com

作路由的关键在于如何选择下一跳转发节点以及协助转发节点转发数据的节点，此节点也称为协作节点。当源节点有数据需要传输时，先选择下一跳转发节点，然后，再选择协作节点，并由协作节点协作传输，将数据传输至下一跳转发节点，使转发节点能够正确接收从源节点传输的数据。

吴名星等^[9]研究了水下传感网络转发节点的选择问题，并提出基于节点剩余能量、链路可靠性和水压差值选择转发节点；徐晓晖等^[10]通过计算节点的归一化权值，构建转发节点簇，再从转发节点簇内选择转发节点。这些策略均是优化转发节点的选择，旨在通过选择最适宜的转发节点传输数据包，进而提高数据包传输成功率。为此，本文结合协作路由和优化转发节点的思想，提出转发节点优化 LQLC 路由。

1 水声信道及系统模型

考虑如图 1 所示的网络模型，传感节点部署于水域，而信宿浮于水面。令 N 表示整个网络的节点集，其由传感节点集 N_n 和信宿 N_s 集组成，即 $N = N_n + N_s$ 。

位于水域内的传感节点具有声通信能力，而位于水面的信宿既有声通信能力，又具有无线电通信能力。收到数据后，信宿以无线电方式将数据传输至控制中心。

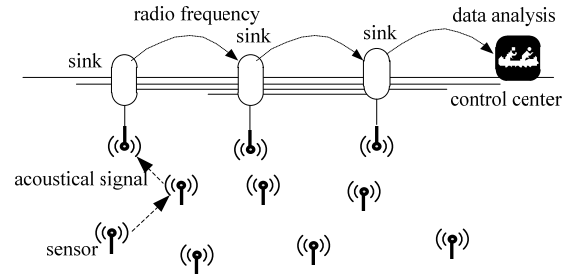


Fig.1 Network model
图 1 网络模型

1.1 水声信道容量

令 $a_s(f)$ 表示单位距离下频率—信号误差系数^[11]，其满足式(1)：

$$10\log a_s(f) = \frac{0.11f^2}{1+f^2} + \frac{44f^2}{4100+f^2} + \frac{2.75f^2}{10^4} + 0.003 \quad (1)$$

式中 f 为声信号频率，且 $100 \text{ Hz} < f < 3 \text{ kHz}$ 。

传输媒介和噪声均衰减了信号能量。令 $B_T(d, f)$ 表示信号随距离 d 的衰减^[12]，如式(2)：

$$B_T(d, f) = d^{s_c} \alpha_s(f)^\alpha \quad (2)$$

式中： s_c 为扩展因子； α 为误差指数。

令 $N(f)$ 表示环境噪声，主要由湍流噪声 $N_w(f)$ 、船舶运输噪声 $N_{sh}(f)$ 、海洋状态噪声 $N_{ss}(f)$ 、分子噪声 $N_{ma}(f)$ 组成，如式(3)所示：

$$N(f) = N_w(f) + N_{sh}(f) + N_{ss}(f) + N_{ma}(f) \quad (3)$$

可分别依据式(4)~式(6)和式(7)计算 $N_w(f)$ 、 $N_{sh}(f)$ 、 $N_{ss}(f)$ 和 $N_{ma}(f)$ 。

$$10\log N_w(f) = 17 - 30\log(f) \quad (4)$$

$$10\log N_{sh}(f) = 40 + 20(s_{af} - 0.5) + 26\log(f) - 60\log(f + 0.03) \quad (5)$$

$$10\log N_{ss}(f) = 50 + 7.5\sqrt{W_s} + 20\log(f) - 40\log(f + 0.04) \quad (6)$$

$$10\log N_{ma}(f) = -17 + 20\log(f) \quad (7)$$

式中： s_{af} 为船舶活动因子，且 $s_{af} \in [0, 1]$ ； W_s 为风速，单位为 m/s 。

最终，可依式(8)计算从发送端至接收端的信噪比(SNR)^[13]：

$$R_{SN}(d, f) = \frac{P / B_T(d, f)}{N(f)B} \quad (8)$$

式中： P 为发射功率，单位为 W ； B 为带宽，单位为 Hz 。

1.2 能耗模型

令 $P_T(d)$ 表示从水深 H 处传输单比特、且传输距离为 d 时所消耗的能量：

$$P_T(d) = 4\pi \times d^2 \times H \times I_T \quad (9)$$

式中 I_T 为离声源 1 m 处的信号功率值，单位为 μPa 。因此，传输 k 比特所消耗的能量为 $E_{TX}(k, d)$ ：

$$E_{TX}(k, d) = P_T(d) \times T_{TX} \quad (10)$$

式中 T_{TX} 为传输 k 比特数据所需的时间，单位为 s 。

2 LQLC 路由

LQLC 路由主要由候选转发节点集、转发节点和协作节点的选择 3 个阶段组成。

2.1 候选转发节点集

当节点 i 有数据要传输时, 就向邻居节点广播数据请求包(Data Request, DRT), 其包含节点 i 的 ID 号和位置矢量 \mathbf{x}_i 。邻居节点 j 收到 DRT 包后, 回复 ACK 包。ACK 包携带了节点 j 的 ID、位置矢量 \mathbf{x}_j 和剩余能量 E_j 。

收到来自邻居节点回复的 ACK 包, 节点 i 记录接收此 ACK 包信号的 SNR 值、邻居节点的剩余能量以及距离^[14], 构建一个邻居表。如, 节点 i 共收到 2 个节点 (j, k) 回复的 ACK 包, 即 $NB(i) = \{j, k\}$ 。据此, 节点 i 可建立如表 1 所示的邻居表。然后, 节点 i 依据邻居节点的能量和信噪比信息, 从 $NB(i) = \{j, k\}$ 中选择节点作为候选转发节点, 进而构成转发节点集 $PB(i)$ 。算法 1 描述了产生 $PB(i)$ 的过程。其中 R_{TSN}, E_{th} 分别表示选择候选转发节点的信噪比、能量阈值。

表 1 节点 i 的邻居表

Table1 Neighbor list of node i

$NB(i)$	j	k
position	\mathbf{x}_j	\mathbf{x}_k
energy	E_j	E_k
signal-noise ratio	$R_{SNj \rightarrow i}$	$R_{SNk \rightarrow i}$

算法 1: 产生候选转发节点集

输入: $NB(i)$

输出: $PB(i)$

step1: when source i receives a ACK packet sent from neighbor j

step2: if $R_{SNj \rightarrow i} \geq R_{TSN} \ \& \ E_j \geq E_{th}$ then

$PB(i) \leftarrow j$

end

2.2 下一跳转发节点的选择

LQLC 路由旨在提高数据包的传输成功率。而链路质量对数据包传输成功率有直接影响。为此, LQLC 从候选转发节点集中选择具有最大信噪比的节点作为转发节点。算法 2 描述了选择转发节点的过程, 其中 $RR(i)$ 表示节点 i 的下一跳转发节点。

算法 2: 产生下一跳转发节点

输入: $NB(i)$

输出: $RR(i)$

for $j \in PB(i)$ do

if $R_{SNj \rightarrow i} = \max \{ R_{SNj \rightarrow i} \}$ then

$RR(i) \leftarrow j$

end if

end for

2.3 协作节点的选择

首先, 协作节点既要是转发节点的邻居节点, 又要是源节点的邻居节点。同时, 考虑传输距离, 选择离转发节点近的节点作为协作节点。算法 3 描述了选择协作节点的过程。其中 $NB(RR(i))$ 表示转发节点的邻居节点。

而 $d_{j \rightarrow RR(i)}$ 表示节点 j 离转发节点的距离, 即 $d_{j \rightarrow RR(i)} = \|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_{RR(i)}\|$ 。

算法 3: 选择协作节点

输入: $NB(i), NB(RR(i)), PB(i)$

输出: $CR(i)$

for $j \in NB(i) \cap NB(RR(i)) \cap PB(i)$ do

if $d_{j \rightarrow RR(i)} = \min \{ d_{j \rightarrow RR(i)} \}$ then

$CR(i) \leftarrow j$

end if

end for

3 性能分析

3.1 仿真环境

利用 OPNET 16.0 仿真软件建立仿真平台。在 $500\text{ m} \times 500\text{ m} \times 500\text{ m}$ 区域内部署 100 个声通信节点和一个信宿。信宿位于水面。所有节点最大通信半径为 100 m。信号频率 $f = 30\text{ kHz}$ 。所有节点的初始能量均为 1 kJ。最大的传输功率为 0.5 W。数据包尺寸为 200 bit，数据率为 10 kbps。具体的仿真参数如表 2 所示。

选择 SRCR 和文献[15]提出的能效—深度的(Energy-Efficient Depth-based Routing, EED)路由作为参照，并分析它们的性能。

3.2 端到端传输时延

首先分析 LQLC 路由的端到端传输时延。端到端传输时延是指数据包从源节点传输至目的节点所消耗的平均时延。

图 2 为 3 个路由的传输时延。从图 2 可见，提出的 LQLC 路由的时延性能并不优于 SRCR 和 EED 路由。原因在于：LQLC 路由引用了协作路由概念，增加了数据处理时延。此外，从图 2 不难发现，当运行至 150 轮左右时，3 个路由的传输时延趋于稳定，波动甚小，这也说明它们的路由性能较稳定。

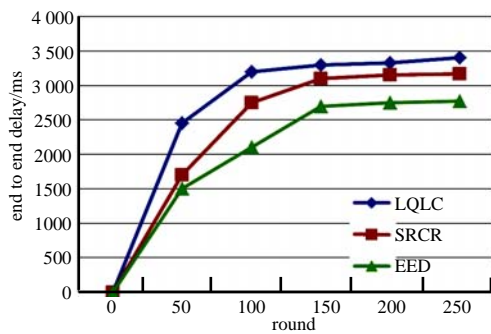


Fig.2 End to end delay
图 2 端到端传输时延

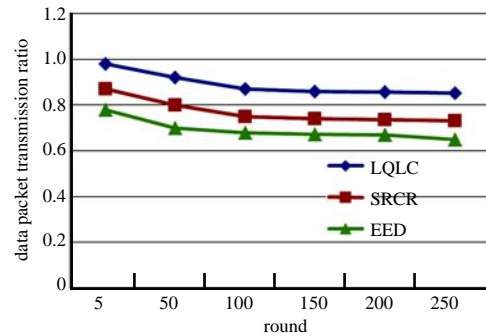


Fig.3 Data packet transmission ratio
图 3 数据包传递率

3.3 数据包传递率

数据包传递率是指源节点发送的数据包个数与信宿所接收的数据个数之比。数据包传递率越高，性能越好。图 3 为 LQLC, SRCR 和 EED 路由的数据包传递率。从图 3 可知，LQLC 路由的数据包传递率最高，因为 LQLC 路由引用了协作路由机制，通过协作传输，提高了数据包传输成功率。此外，注意到，当运行一段时间后，3 个路由的数据包传递率下降速度提升。原因在于：经过一段时间后，多数节点能量消耗殆尽，无法继续转发数据。

3.4 能量消耗

最后，分析 LQLC, SRCR 和 EED 路由的节点平均能耗。从图 4 可知，相比 EED，LQLC 路由并没有有效控制节点能耗。但相比 SRCR 路由，LQLC 路由能耗降低。3 个路由的平均能耗相差并不大。此外，从图 4 可知，3 个路由的节点平均能耗随轮数的增加而上升。

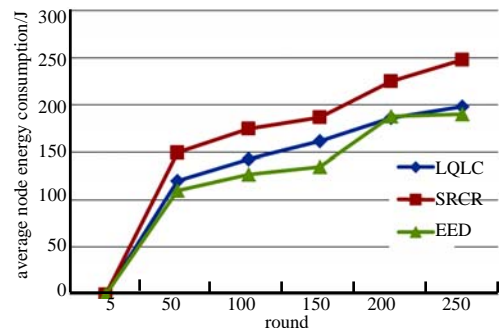


Fig.4 Energy consumption
图 4 能量消耗

4 结论

考虑到水下传感网络内声通信的快速衰减和多径衰落，提出 LQLC 路由。LQLC 路由利用信噪比表征链路质量，并依据链路质量选择候选转发节点集，再从中选择最优的转发节点和协作节点，进而提高数据包传递率。仿真数据证实，提出的 LQLC 路由能够提升数据包传递率。

后期,将研究转发节点和协作节点的功率分配问题以及转发节点与协作节点间通信传输的干扰问题。这将是未来的研究方向。

参考文献:

- [1] 吕嘉美,金光,江先亮,等. 基于 NS2 的水下无线传感网络路由协议研究[J]. 无线通信技术, 2017,3(8):21-26. (LYU Jiamei, JIN Guang,JIANG Xianliang,et al. Research on underground wireless sensor network routing protocol based on NS2[J]. Wireless Communication Technology, 2017,3(8):21-26.)
- [2] KHAN A, JAVAID 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.
- [3] 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, 2017,11(10):4844-4864.)
- [4] 刘觉夫,王建旭,王作航. 基于博弈论的多跳认知无线网络协作路由算法[J]. 计算机工程与设计, 2017,38(5):1136-1143. (LIU Juefu,WANG Jianxu,WANG Zuohang. Cooperative routing algorithm in multi-hop cognitive radio networks based on game theory[J]. Computer Engineering and Design, 2017,38(5):1136-1143.)
- [5] 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.
- [6] 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.)
- [7] WANG Ping,ZHANG Lin,LI V K. Asynchronous cooperative transmission for three-dimensional underwater acoustic networks[J]. IET Communications, 2014,7(4):286-294.
- [8] 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.)
- [9] 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.)
- [10] 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 wireless sensor networks[J]. Modern Electronics Technique, 2017,40(3):17-23.)
- [11] BREKHOVSKIKH L M,LYSANOV Y. Fundamentals of ocean acoustics[M]. 3rd ed. [S.l.]:Springer, 2013.
- [12] URICK R J. Principles of underwater sound for engineers[Z]. 1967.
- [13] PHAM T L,KIM D S. Efficient forwarding protocol for dual-hop relaying wireless networks[J]. Wireless Personal Communications, 2016,89(1):165-180.
- [14] 刘炎,王涛,陈凡胜,等. 基于时域信噪比的红外弱小目标检测[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019,17(1):118-123. (LIU Yan,WANG Tao,CHEN Fansheng,et al. Infrared small target detection algorithm based on spatial signal to noise ratio[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019,17(1):118-123.)
- [15] WAHID A S,JEONG L H,KIM D. EEDBR:energy-efficient depth-based routing protocol for underwater wireless sensor networks[J]. Advanced Computer Science and Information Technology, 2012,195(10):223-234.