

一种可靠的水下传感器网络传输策略

洪昌建 高阳 张凡 张磊

武汉第二船舶设计研究所 武汉 430205

摘要 针对 Layered-DBR 算法中网络节点需感知全网节点的剩余能量和邻居节点距离的局限性,提出一种可靠的水下传感器网络数据传输策略 RTS(Reliable Transmission Strategy),节点仅通过感知自身节点深度信息、剩余能量及网络分层间距来计算当前节点的能量因子和距离因子。制定了一种网络性能评估方法来平衡网络生命周期与数据丢包,并通过仿真实验确定能量因子和距离因子的占比,最终给出消息转发概率的计算公式。仿真对比实验表明,与 DBR,DMBR,Layered-DBR 等算法相比,RTS 算法能够有效控制网络冗余、减少数据丢包,同时网络具有较长的生命周期。

关键词: 水下传感器网络;能量因子;距离因子;转发概率;网络冗余;数据丢包

中图法分类号 TP393

Reliable Transmission Strategy for Underwater Wireless Sensor Networks

HONG Chang-jian,GAO Yang,ZHANG Fan and ZHANG Lei

Wuhan Second Ship Design and Research Institute,Wuhan 430205,China

Abstract Aiming at the limitation of network nodes needing to perceive the residual energy of the whole network nodes and neighbor node distance in the Layered-DBR algorithm,a reliable under water sensor network data transmission strategy RTS(Reliable Transmission Strategy) is proposed which calculates the energy and distance factors by current node depth information,residual energy and network layered spacing. This paper develops a network performance evaluation method to balance the network life cycle and data packet loss rate,to determine the proportion of energy factor and distance factor through simulation experiment,and finally gives the calculation method of the probability of message forwarding. The simulation comparison experiment shows that compared with DBR,DMBR,Layered-DBR,the RTS algorithm can effectively control network redundancy,reduce data packet loss,and has a long life cycle of the network.

Keywords Underwater sensor networks, Energy factor, Distance factors, Forwarding probability, Network redundancy, Data packet loss

1 引言

随着传感器技术的发展,无线传感器网络在水下环境的应用成为新的热点^[1-2]。水下传感器网络将采集到的水下环境数据发送给用户来辅助决策,在环境监测、资源勘探、灾难预警和潜艇探测等民用和军用领域均具有广阔的应用前景^[3-4]。水下传感器网络是由固定在海底的静态节点、悬浮在水中的动态节点和浮在水面的 sink 节点构成的三维监控网络。水下传感器网络采用水声通信,且节点无法感知全局位置信息,导致传统陆地无线传感器网络路由算法无法应用于水下环境,为水下传感器网络数据传输带来了极大的挑战。

目前水下传感器网络通常采用基于深度信息的数据传输策略,YAN 等^[5]提出了一种基于深度信息的路由(Depth Based Routing,DBR)算法,该算法通过节点携带的深度传感器获取节点当前的深度阈值,并保存在数据分组中,当数据转发时,只有节点深度小于该深度阈值时才能进行报文转发,否则丢弃报文。同时 DBR 算法利用深度阈值来控制网络副本,但缺少有效控制网络数据丢包的机制。LIU 等^[6]基于 DBR 算法的思想,提出了一种基于深度的多跳路由协议 DBMR

(Depth-Based Multi-hop Routing)。该算法中,每个节点采用多跳的方式进行数据转发,从而减少网络通信代价。然而该算法只考虑节点通信范围内最远的节点作为转发节点,虽然每一轮网络通信的能耗较低,但是网络能耗极不均匀,导致一部分节点提前能量耗尽。Peng 等^[7]基于水下深度信息提出一种分层的水下传感器网络路由算法 Layered-DBR,该算法通过感知全网节点的剩余能量和当前节点与邻居节点的距离,从而计算节点转发数据的概率,同时引入队列机制实现消息转发管理。

本文介绍了一种可靠的水下传感器网络传输策略,节点通过感知自己的深度信息、剩余能量和网络分层信息,减少节点与节点间不必要的数据通信,降低网络能量消耗的同时,具有较低的网络冗余和数据丢包率。

2 水下传感器网络相关模型

2.1 网络拓扑模型

本文采用与文献[8]相同的网络拓扑模型,在网络初始状态, n 个传感器节点随机分布在一个 $M \times M \times N$ 的长方体内,多个 sink 节点均匀分布在监控领域的水面,如图 1 所示。

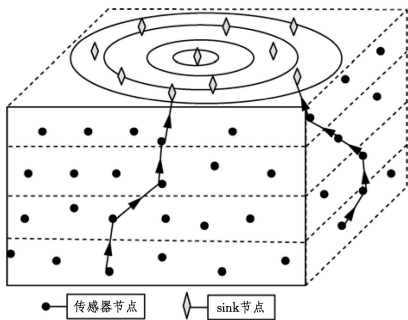


图1 水下传感器网络模型

Fig. 1 Underwater sensor network model

1) 网络自下向上等距离划分为多个网络分层。

2) 所有的节点都具有唯一的标志信息,且均匀地部署在监控区域;

3) 假设水面 sink 节点的数量足够多且均匀分布在水面,保证各个 sink 节点的距离不超过 10 m;

4) 节点受到水流的作用在一定范围内移动,且具有最大偏移距离 2 m;

5) 所有非 sink 节点采用相同可调的处理/通信能力,但无法通过水声信号来感知节点间距离;

6) 水下传感器节点采用水声通信的方式进行数据传递,数据包被发送到任意的 sink 节点,均表示数据被成功地采集;

7) 节点不具有位置信息的感知能力,却能够感知深度信息;

8) 节点周期性地数据进行数据采集任务,且始终有数据传送到 sink;

9) 网络生命周期为网络中第一个节点死亡的时间^[9]。

2.2 水声通信模型

本文采用文献^[10]描述的水声通信模型,节点发送 l bit 数据所需要的能量 E 为:

$$E = T_p P_o d^k 10^{\alpha(f)d/10} \quad (1)$$

其中, T_p 为传输时延; P_o 为数据接收的能耗; d 为消息传播距离; k 为水声传播模型的相关参数, k 取 1 时代表柱形传播模型, k 取 2 时代表球形传播模型,通常 k 取 1.5 来代表实际水声传播模型; f 为通信频率。能量吸收系数为:

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

2.3 节点运动模型

为了模拟水下传感器网络的动态性特点,本文假定节点在运动范围内采用 Random Waypoint 运动模型^[10]。

3 可靠的水下传感器网络传输策略 RTS

本文首先从网络冗余角度探讨了网络分层方法,确定了分层网络的分层间距。之后在分层网络的基础上,对节点转发数据的概率进行了论证,给出了节点转发数据的概率。网络的节点按照此概率进行数据传输。

3.1 网络分层间距 d 与网络冗余 ζ

根据文献^[7]相关定义,网络冗余 ζ 是一个与通信半径 R 与通信夹角 β 相关的关系函数 $\Gamma(R, \beta)$:

$$\Gamma(R, \beta) = (2 - 2 \cos \beta - \cos \beta \sin^2 \beta) \frac{\pi R^3 N}{3V_{\max}} \quad (3)$$

分层间距 d 依赖于通信半径 R 和网络冗余度 ζ 。设:

$$d = R \cos \beta = \Psi(\Gamma(R, \beta)) \quad (4)$$

在冗余度为 ζ 的水下传感器网络中,任意深度为 h 的传感器节点,其所在层(自上而下编号 $1, 2, \dots$)的层编号为 $L(h)$,其通信范围内接收节点的深度区间为 $I(h)$,其中 $\text{floor}(\cdot)$ 函数代表向下取整。

$$L(h) = \text{floor}(h/\Psi(\Gamma(R, \beta))) \quad (5)$$

$$I(h) = [h + \Psi(\Gamma(R, \beta)), h + R] \quad (6)$$

假定节点通信半径已知为 R ,根据实际应用需求假定网络允许的最大冗余度为 ζ ,可计算出对应的网络分层间距 d 和任意节点对应的下一跳邻居节点所在的深度区间 $I(h)$,在算法初始化阶段即对水下传感器网络的冗余进行初步控制。

3.2 消息转发概率

本文结合网络分层间距和节点所在的深度范围,提出一种无需感知全网节点能量和邻居节点距离的相对深度距离和相对剩余能量计算方式。节点仅根据自身初始能量、当前剩余能量、所在的深度范围与当前所处深度,即可计算数据转发概率,主要包括 3 部分内容。

1) 距离因子的求解:在水下传感器网络中,任意一节点 i 进行一次消息的转发,节点所在网络分层的深度范围为 $[d_1, d_2]$ (与式(6)对应),节点 i 的相对深度距离如式(7)所示:

$$r_d(i, j) = (d_i - d_2)/(d_1 - d_2) \quad (7)$$

其中, d_i 为节点 i 的当前的深度信息。相对深度距离 r_d 和距离 d_i 呈线性增长关系,不适合直接作为距离因子参与消息转发概率的计算。为了保证距离较远的节点具有优先转发权,减少网络冗余,对 r_d 进行一次非线性变换,使距离越远的节点更容易被选为下一跳转发节点,距离因子的具体定义如下:

$$P_d = 1 - e^{(-rd)^5} \quad (8)$$

2) 通过分析可以看出随着 d_i 的增长, P_d 先是较缓慢地增长,随后迅速增长,表明深度越小,越接近水面的节点具有较高的转发概率,从而达到减少网络冗余的目的。

3) 能量因子的求解:水下传感器网络中,假设节点 i 的初始能量为 E_o , E_i 为节点当前剩余能量,定义能量因子如下:

$$P_e = E_i/E_o \quad (9)$$

4) 消息转发概率的求解:在水下传感器网络中,某节点进行一次数据转发,其作为转发节点的概率依赖于距离因子和能量因子,节点 i 作为转发节点的概率为 $p_i = \alpha P_d + \beta P_e$,其中 $\alpha + \beta = 1$ 。

根据消息转发概率的计算方法可知,节点 j 转发节点 i 的概率为:

$$P(i, j) = \alpha(1 - e^{r_d(i, j)^5}) \times (1 - \alpha) P_e(i, j) \quad (10)$$

4 实验与仿真

本文实验在 Matlab 平台上进行,机会路由策略不仅需要网络的寿命因素,还需要考虑网络数据丢包率和网络冗余。在取不同 α 值的情况下,首先对 RTS 算法在网络寿命、网络数据丢包率和网络冗余等方面的性能表现作了实验对比。之后提出一个综合了网络寿命和网络丢包率的网络性能的最优评价标准,并给出了最优网络性能下 α 的最优取值。在 α 的最优取值下,后续实验实现了 RTS, DMBR, DBR 和 Layered-DBR 等算法在网络寿命、网络数据丢包率和网络冗余等方面的网络性能对比。在本节仿真实验中,采用的相关网络参数以及缺省值如表 1 所列。

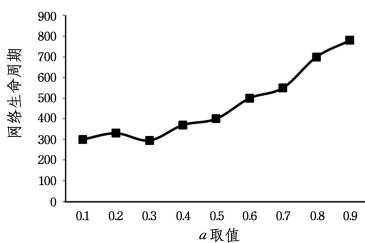
表1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

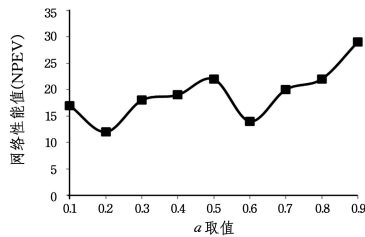
参数(单位)	取值
Minimum receiving power consumption P_o /mW	3
Packet length l /bit	4000
Node throughput/kB/s	0.25
Frequency f /kHz	10
Energy Spread Model K /m	1.5
Maximum spacing of Sink nodes/m	10

4.1 α 取值对网络性能的影响

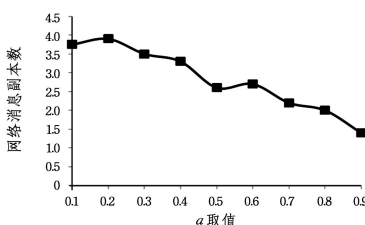
在 $50\text{m} \times 50\text{m} \times 210\text{m}$ 的区域部署了 50 个节点, 节点初始能量为 0.5J , 节点的通信半径 $R=80\text{m}$ 。假定网络理论冗余度为 2, 根据 4.1 节中式(3)一式(6), 计算得出当前网络被分为 3 层, 分层间距为 70m 。网络寿命根据网络中第一个节点死亡的网络周期性采集数据的次数来衡量。图 2 给出了网络寿命随着 α 取值增大时的变化趋势。可以看出随着 α 取值的增大, 网络的寿命出现局部波动但总体上呈增长趋势。

图 2 α 取值对网络生存周期的影响Fig. 2 Impact of value α on life cycle of network

在相同的网络环境下对网络的数据丢包率做了实验仿真。网络数据的丢包率作为衡量机会路由的一个重要指标, 指的是数据在网络运行过程中丢包的比例。从图 3 可以看出, 随着 α 取值的增大, 网络的丢包率出现局部波动但总体上呈增长趋势。其中在 α 取 0.2 和 0.6 时网络具有相对较小的数据丢包率。

图 3 α 取值对网络数据丢包率的影响Fig. 3 Impact of value α on data loss rate of network

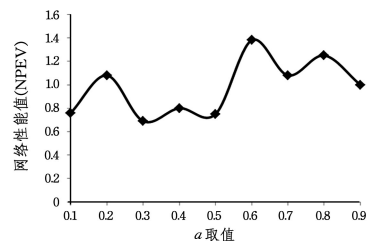
网络的冗余作为评估机会路由性能中的另一个较为重要的指标, 可以通过网络中消息副本的数量来衡量, 从图 4 可以看出, 随着 α 取值的增大, 网络冗余出现局部波动但总体上呈下降趋势。

图 4 α 取值对网络冗余的影响Fig. 4 Impact of value α on redundancy of network

结合图 2 和图 4 可以看出, 随着 α 取值的增加, 网络寿命提高的同时网络冗余也在相应地降低。这表明 α 取值导致网络寿命较长时, 网络本身具有低冗余的特性。因此, 若网络同时具有较高的网络寿命和较低的网络数据丢包率, 则既能保证网络具有较低的冗余, 同时网络的综合性能也最好。式(11)给出了网络性能的评估值 $NPEV$:

$$NPEV = \frac{NL}{PL} \quad (11)$$

其中, NL 为网络寿命, PL 为丢包率, 网络寿命越长, 丢包率越低, 即 $NPEV$ 值越大, 则网络综合性能最好。图 5 给出了不同 α 取值下对应的不同网络性能。可以看出, 当 α 取 0.6 时 $NPEV$ 的值最大, 网络综合性能表现最优, 因此在后续的仿真实验中均取 $\alpha=0.6$ 。

图 5 α 取值对网络综合性能的影响Fig. 5 Impact of value α on comprehensive performance of network

4.2 不同算法间的网络性能对比

在 $50\text{m} \times 50\text{m} \times 210\text{m}$ 的区域部署了 50 个节点, 节点初始能量为 0.5J , 节点的通信半径 $R=80\text{m}$ 。针对 RTS, DMBR, DBR 和 Layered-DBR 等算法, 分别从网络生命周期、网络冗余、网络丢包率等方面开展了对比实验。

从图 6 可以看出第一个节点死亡时不同算法下的网络生命周期。由于 DMBR 和 DBR 均依赖最远节点进行消息的接收转发, 虽然网络的总能耗较低, 却加剧了较远节点的快速死亡, 因而 DMBR 和 DBR 算法相对于机会路由 RTS 与 Layered-DBR 算法最早出现节点死亡。而 DMBR 采用多跳方式进行数据传输, 相对 DBR 算法能够延缓第一个节点死亡的时间。

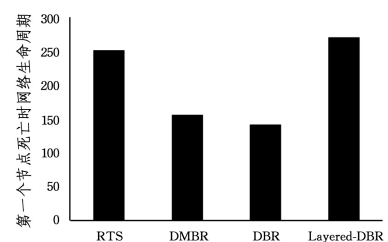


图 6 网络寿命对比

Fig. 6 Comparison of network life

图 7 给出了网络冗余情况随着网络运行周期的变化趋势。图 8 给出了网络丢包率随着网络运行周期的变化趋势。由于 DMBR 算法要求只有通信范围内最远的节点为转发节点, 所以其算法在理论上丢包率为 0, 且无网络冗余。但是该算法存在着较大的缺陷, 并没有提出适应于移动节点的解决方案因而比较适合准静态的网络, 算法的可行度是较差的。

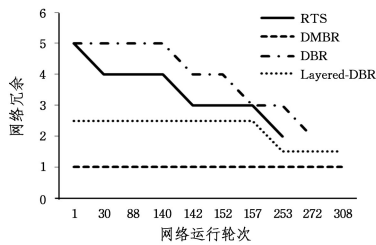


图7 网络冗余情况对比

Fig. 7 Comparison of network redundancy

Layered-DBR 算法出现第一个节点死亡的时间最晚(见图6),且有效控制了网络冗余(见图7)。但从图8可以看出,Layered-DBR 随着网络的运行,网络丢包率逐渐增大,网络不稳定。严重的数据丢包率导致 Layered-DBR 算法数据传输的可靠性较差。

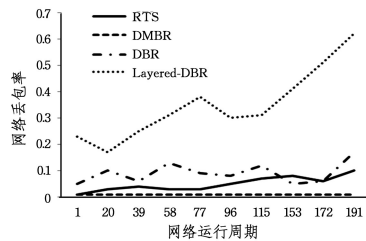


图8 网络丢包情况对比

Fig. 8 Comparison of network data loss

经过上述分析,DMBR 算法、DBR 算法未考虑移动性对网络通信带来的影响,仅适用于准静态网络而导致算法可靠性较差。Layered-DBR 算法具有较长的网络寿命与较低的网络冗余,但全网络生命周期内的数据丢包情况严重,从而导致网络数据采集的可靠性较差。RTS 算法在保证网络冗余与数据丢包的同时,具有较长的生命周期,且能够适应移动的水下网络环境,算法可靠性高。

结束语 针对水下传感器网络,本文提出了一种可靠的水下传感器网络的分层路由策略 RTS。该策略考虑水下网络环境的动态性,传感器节点仅通过自身剩余能量、所在深度和网络分层情况计算转发消息的概率。该算法有效控制了网络冗余和数据丢包,同时能够保证较长的网络生命周期。

参 考 文 献

[1] LI W T, WANG D, WANG P. Insider attacks against multi-factor authentication protocols for wireless sensor networks[J].

- Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2019, 30(8): 2375-2391.
- [2] HUANG M G, HUANG Y C, YU B, et al. Software-Defined wireless sensor networks: A research survey[J]. Ruan Jian Xue Bao, 2018, 29(9): 2733-2752.
- [3] ALI M F, JAYAKODY D N K, CHURSINY et al. Recent Advances and Future Directions on Underwater Wireless Communications[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2020, 27(5): 1379-1412.
- [4] BEENISH A, ALASTAIR A, MARIAN W. Dynamically Reconfigurable Routing Protocol Design for Underwater Wireless Sensor Network[J]. International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems, 2020, 7(5): 1-5.
- [5] YAN H, CUI J H. DBR: depth-based routing for underwater sensor networks[C]// The 7th International IFIP-TC6 Networking Conference. Singapore, 2008: 72-86.
- [6] LIU G Z, LI Z B. Depth-based multi-hop routing protocol for underwater Sensor Network[C]// 2010 2nd International Conference on Industrial Mechatronics and Automation. 2010: 268-270.
- [7] PENG J, HONG C J, LIU T, et al. Strategy of routing based on layered for underwater wireless sensor networks[J]. Journal on Communications, 2014(6): 25-31.
- [8] HONG C J, WU W J, TANG P P. A Dynamic Layered Clustering Routing Algorithm in Underwater Sensor Networks[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015(6): 1291-1297.
- [9] LIU T, PENG J, CHEN G, et al. Avoidance of Energy Hole Problem Based on Density Control Mechanism for Wireless Sensor Networks[J]. Chinese Journal of Computers, 2016, 39(5): 993-1006.
- [10] SOZER E M, STOJANOVIC M, PROAKIS J G. Underwater acoustic networks[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2000, 25(1): 72-83.



HONG Chang-jian, born in 1988, post-graduate. His main research interest include UWSN and so on.