

水声传感器网络簇头分层通信模式路由算法^①

马绅惟, 刘广钟

(上海海事大学 信息工程学院 上海 201306)

摘要: 路由协议在水声传感器网络研究领域扮演着非常重要的角色. 基于传统的 TEEN 协议路由算法, 提出了水声传感器网络中簇头分层通信模式的路由算法(HCM-TEEN). 新算法从簇头候选与淘汰过程入手, 设置新的阈值函数. 在簇头确定完成后, 在数据传输阶段引入簇头分层通信模式, 从距离和能量的角度上优化路由选择. 通过 Matlab 仿真实验显示, HCM-TEEN 算法与传统的算法相比在网络生命周期和节点平均剩余能量上都更具优越性.

关键词: 路由协议; 水声传感器网络; HCM-TEEN; 簇头候选与淘汰

Routing Protocol of Hierarchical Cluster-Communication Model in the Underwater Acoustic Sensor Network

MA Shen-Wei, LIU Guang-Zhong

(Shanghai Maritime University, Information Engineering College, Shanghai 201306, China)

Abstract: Routing protocol plays a very important role in underwater acoustic sensor networks. Based on the traditional TEEN protocol, a new routing protocol named HCM-TEEN(Hierarchical Cluster-communication Model on TEEN) has been put forward. The improved algorithm sets a new threshold function on the basis of the process of cluster candidate and the cluster elimination, and then introduces a Hierarchical Cluster-communication model in the period of data transmission to optimize the routing process. The experiment by the Matlab proved that HCM-TEEN performed better than the traditional algorithm on the network lifetime and the network average residual energy.

Key words: routing protocol; underwater acoustic sensor networks; HCM-TEEN; cluster candidate and elimination

水声传感器网络是无线传感器网络技术与水声环境结合的重要应用. 在海洋环境检测、仪器检测、气候监测等领域中都有广泛应用^[1], 在水声传感器网络多个方面的关键技术的研究也得到了人们越来越多的关注^[2-7]. 由于水下信道独有的复杂性, 以及传感器节点之间的通信和数据传输易受到环境噪声干扰, 水声传感器网络环境下的数据传输速率、通信信道的可靠性和网络生存时间等都受着严重影响. 人工作业在水下不易进行, 更换节点的电池模块则会更加困难. 因此, 在设计相应的水声传感器网络路由协议算法时, 应着重考虑节点的能量消耗, 注重网络的能耗均衡.

路由协议负责源节点到目的节点之间数据的传输线路, 传感器网络领域中有许多不同种类的路由协议.

如果按照网络拓扑结构分类, 可将其分为两大类: 一是平面路由协议, 例如 SPIN 协议(sensor protocols for information via negotiation)^[8] 和 DD 协议(directed diffusion)^[9]等, 二是分层路由协议, 如 LEACH(Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy)^[10]、TEEN (Threshold-sensitive Energy Efficient sensor network protocol)^[11]、APTEEN^[12]等.

TEEN 协议主要用于响应型应用环境中, 传感器节点在采集到相关数据时向 sink 节点发送数据, 其基本思想是利用过滤方式(设置阈值)来减少数据传输量^[13]. 水声传感器网络因特有的局限性, 导致在网络中数据传输时易产生较大的误码率、多径效应等影响. 尽管如此, 我们通过实验仿真可发现, 将 TEEN 协议

① 基金项目:国家自然科学基金(61202370);上海市教委科研重点创新项目(12ZZ151);上海市浦江人才计划(11PJ1404300)

收稿时间:2014-04-04;收到修改稿时间:2014-05-04

移植到水声传感器网络中,协议也能够适用.本文将针对 TEEN 协议应用于水声传感器网络在簇头建立阶段和数据传输阶段中的不足,提出一种水声传感器网络中簇头分层通信模式的路由算法(HCM-TEEN),实验仿真结果显示 HCM-TEEN 算法在网络生命周期和节点平均剩余能量上都更具优越性.

1 TEEN协议

TEEN 协议采用分簇策略,是一种分层路由协议,主要思想是将节点分为不同层次,簇头节点同时向簇内传感器节点广播两个阈值参数,即硬阈值和软阈值. TEEN 协议可分为建立阶段和传输阶段,在建立阶段协议的簇头选举阈值公式为:

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1 - p[r \bmod (1/p)]}, & n \in G \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

公式(1)中, r 表示当前轮数; p 是簇头所占百分比; G 表示 $1/p$ 轮中没有当过簇头的节点集合.

TEEN 协议通过两个门限值(硬、软阈值)的设置大范围地减少了数据传输量和传送次数,但考虑到水声传感器网络的特性,以及 TEEN 协议本身的问题,我们对 TEEN 协议的缺陷分析如下:

1) TEEN 协议选择簇头时,根据阈值函数 $T(n)$, 具有较大的随机性,易造成簇头分布的不平衡.

2) 硬阈值和软阈值的设定情况易影响数据传输.

3) 数据在水声传感器网络传输时,由于水声信道的特殊性,使易受路径损失、多径等影响.

2 系统模型

本文相关模型定义如下:

2.1 网络模型

考虑一个由 n 个分布在监测区域的水声传感器节点组成的二维静止水声传感器网络,假设:

1) 网络中传感器节点是静止的,具有相同的初始能量,而且每个节点都有惟一的 ID 标识;

2) 每个水声传感器节点根据位置信息都能计算出自己的二维坐标 (x,y) , 并且这些节点都具有相同大小的水声通信半径 r .

3) 汇聚节点 sink 处于一个固定部署好的位置,我们假设 sink 节点处于中心,其他常规的节点围绕 sink 节点所分布.并且, sink 节点的能量是不受限制的,不会受电池容量影响;

4) 链路对称,节点同构并具有测距和数据整合功能,节点可以根据通信距离调整发射功率;

5) 所有的传感器节点能够从外部设备中采集数据,可通过一跳或者多跳传输的方式将采集到的数据聚焦到 sink 节点上.

2.2 能量模型

水声通信的信息交换主要通过声波传输来完成.本文采用参考文献[14]给出的水声传感器节点数据传输的能量模型,即水下声信号的衰减模型.该模型以量化网络能耗为目的,考虑信号衰减(误差),确定了节点传输数据所消耗能量的计算方法.能量模型定义如下:

P_0 为数据包能被接收端正常接收的最低功率水平,功率对距离 d 的衰减为 $A(d)$, 则发送节点发送的最低功率 $p=p_0 A(d)$, $A(d)$ 与消息发送方式(柱形或球形)及发送频率有关,表示为:

$$A(d) = d^m \alpha^d \quad (2)$$

公式(2)中, m 为能量几何扩展系数,与声信号传播条件有关,当 $m=1$ 时,表示柱面波传播, $m=2$ 时,表示球面波传播,本文仿真实验,考虑到计入海底声吸收情况下的浅海声传播,取 $m=1.5$; $\alpha = 10^{\frac{a(f)}{10}}$, α 与频率有关,由 $a(f)$ 获得,

$$a(f) = \frac{0.11f^2}{1+f^2} + \frac{44f^2}{4100+f^2} + \frac{2.75f^2}{10000} + 0.003 \quad (3)$$

公式(3)中 $a(f)$ 为吸收系数,单位为 dB/km; f 是频率,单位为 kHz.

节点发送长度为 b 的数据包,传输距离为 d 时发射端所消耗能量 $E_s = bp = bp_0 A(d) = bd^m \alpha^d$.

节点接收长度为 b 的数据包,需要消耗的能量为: $E_r = bp_r$, 其中 p_r 为一个常数,取决于设备.

节点进行数据融合时,所消耗的能量为(数据长度为 b): $E_f = bE_{DA}$, 其中 E_{DA} 是常数值.

3 改进后的算法HCM-TEEN

TEEN 协议在簇头选举时具有较大的随机性,易使簇头分布不平衡.协议采用与 LEACH 协议相同的(1)式阈值函数 $T(n)$, 没有考虑到水下传感器节点的剩余能量以及节点与 sink 节点的距离问题.这易使得在簇头候选阶段中,一些不适合当选簇头的节点被纳入 G 的范围,从而造成更多的能量损耗以及簇头节点、簇内节点的分布不平衡. HCM-TEEN 协议在创建阶段中,

将簇头节点的选择问题分为 2 个过程(簇头候选和候选簇头淘汰)进行分析与改进。

3.1 簇头候选过程

在簇头候选过程中,通过改进阈值函数 $T(n)$,将满足条件的传感器节点划入簇头候选群。

首轮,每个节点具有相同初始能量,因此采用原有的 $T(n)$ 阈值函数来筛选节点。

首轮结束后采用新阈值函数(4)进行筛选,每一轮结束将得到新的簇头候选群 G_{new} 。 $T(n)$ 如下:

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - p[r \bmod (1/p)]} \times W, & n \in G \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

新的阈值函数 $T(n)$ 重点考虑节点的剩余能量以及节点与 sink 节点的距离问题,公式(4)中,引入了权值因子 W ,

$$W = \omega \frac{E_{cur}}{E_{avg}} + (1 - \omega) \frac{r}{r + d_{sink}} \quad (5)$$

公式(5)中,系数 ω 是根据能量来调整的一个自适应权值,取 $\omega = \frac{1}{1 + \gamma}$,定义系数 $\gamma = \frac{E_{cur}}{E_{int}}$; E_{cur} 为节点当前能量, E_{avg} 为所有节点能量的平均值, E_{int} 为节点的初始能量。 r 为节点的通信半径, d_{sink} 是当前节点与 sink 节点的直线距离。由距离公式计算可得到 $d_{sink} = \sqrt{(x_{sink} - x)^2 + (y_{sink} - y)^2}$, x_{sink} 和 y_{sink} 是汇聚节点的二维坐标,是固定不变的, x 和 y 为当前节点的坐标值。

新阈值函数 $T(n)$ 与节点在 $(0,1)$ 之间产生的随机数进行比较,当阈值 $T(n)$ 大于节点产生的随机数,该节点便进入簇头候选群 G_{new} 。而后通过定义好的候选簇头的淘汰机制,确定每一轮的簇头节点。

3.2 候选簇头淘汰过程

在候选簇头淘汰阶段,通过淘汰机制有效地确定簇头。一方面,可以减少簇头过多而引起的节点能量损耗;另一方面,可以平衡簇头在网络中的位置,使簇头在水声传感器网络中尽可能均匀分布。

通过前面的网络模型设定,每个水声传感器网络的节点都有一个固定的通信半径 r ,该通信半径可以通过一跳或多跳的方式传递到下一个节点或汇聚节点。具体的候选簇头淘汰机制定义如下:

1) 确定首个簇头节点

在每一轮的簇头确定过程中,以 sink 节点为圆心向外依次确定簇头节点,从候选簇头节点群 G_{new} 中随

机确定一个候选簇头节点作为簇头。在这里,取 d_{sink} 最小值的节点作为第一簇头,即与汇聚节点距离最短的候选簇头节点。

2) 依次确定簇头节点

首个簇头节点确定后,该簇头以 r 为半径形成一个圆形簇区域,而下一个簇头节点应满足节点自身不处于任何一个圆形簇区域内,从而依次确定每一个满足条件的簇头,不满足条件的候选节点放弃竞争机会,成为非簇头节点,等待加入圆形簇区域。

3) 形成簇区域

每个候选节点依次遍历完成后,得到最终确定完成的簇头节点群。在簇头群中,簇头节点依次向全网广播自己当选簇头的消息,而非簇头节点会根据收到的簇头广播信息的信号强弱决定要加入哪个圆形簇区域。候选簇头淘汰机制过程如图 1 所示。

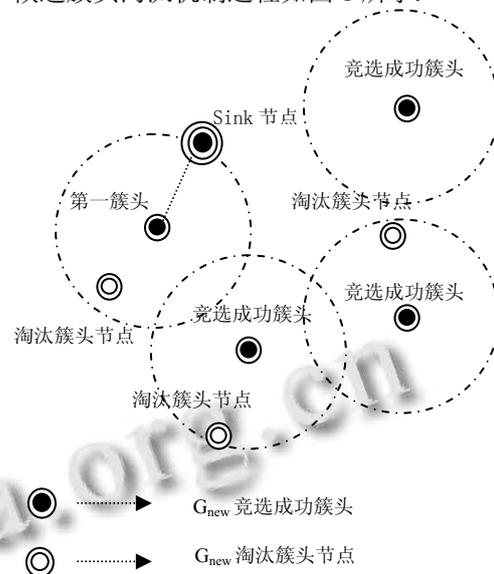


图 1 TEEN 协议淘汰机制

3.3 数据传输

在数据传输阶段,传统的 TEEN 协议采用单跳路由机制,使网络能量的整体损耗大大增加,导致网络规模受限于簇头节点的通信距离。因此,在通信路由的选择上,根据文献[15],算法采用多跳路由机制改进。多跳路由机制可根据不同标准进行多跳传输数据,以往的协议研究中,有根据跳数、链路能量剩余大小、簇头节点距离代价^[16]等多方面。

HCM-TEEN 根据节点通信半径和方程式(5)中的权值因子 W ,设计了簇头分层通信模式。在该模式中,

簇内节点与簇头直接通信,而簇间通信则采用该模式机制.具体机制如下:

每个簇头节点 C_i 与汇聚节点 S 都维护一张以自己为中心,半径为通信距离 r 的圆形区域内包含的簇头节点信息表 $CList$. 所有的节点信息附加定义一个标签 tag 位和父层节点 $parentx$ 和 $parenty$ 位,节点是簇头节点 C_i 时,都初始化为 0. 节点为非簇头节点 N_i 时, $Tag=0$, $parentx$ 和 $parenty$ 分别设定为节点所属簇头节点的 x 、 y 坐标值. 具体实现如下:

1) Sink 节点 S 与自己维护的 $CList$ 表内 C_i 直接通信,这些节点命名为首层通信节点. 即 $Tag=1$, $parentx=X_{sink}$, $parenty=Y_{sink}$;

2) 每一个首层节点在遍历 $CList$ 内 $tag=0$ 的簇头节点 C_i (未被选定为链路上路由节点的簇头),将这些节点命名为二层通信节点, $Tag=2$. 此时应注意两个问题,一是当标签位 $Tag=0$ 的簇头节点不仅被一个首层通信节点选定时,选择两者距离更短的作为父层节点,二是距离相等,则根据权值因子,选择 W 较大的作为父层节点. 同时更新 $parentx$ 和 $parenty$.

3) 依此类推,直到所有簇头的父层节点位有唯一的一跳二维坐标信息.

4) 本轮结束后,所有节点将标签 Tag 位和父层节点位的值重新初始化,以便下一轮路由选择.

4 实验仿真

本文采用 Matlab 平台对 TEEN、TEEN-PE^[17]和 HCM-TEEN 在网络生命周期和节点平均剩余能量上的性能进行了仿真实验. TEEN-PE 同样是在 TEEN 协议的基础上,通过簇头数量优化改进过的协议. 水声传感器网络的相关参数设置如下:

100m² 的监测区域中随机分布 100 个水声传感器网络节点,汇聚节点部署在中心,位置固定且能量不限. 每个节点具有初始能量 1500J 和唯一的 ID.

根据能量模型,取能量扩展系数 $m=1.5$, 频率 $f=10\text{KHz}$. 节点接收单位数据的能耗为 0.001J, 数据融合单位长度时的能耗同样设置为 0.001J. 节点每发送一个数据包的大小是 4 个单元. 声波在水中的传播速度为 1500m/s. 通信半径 $r=20\text{m}$.

4.1 网络生命周期

在水声传感器网络中,随着网络运行时间的增长,网络能耗越大. 网络中的节点由于能量完全消耗,便

将结束工作,即节点死亡. 节点存活数,是网络生命周期的状态指标. 节点存活越少,说明协议对部分节点或大部分节点的能耗性不能控制,也必然使局部网络提前失效,使网络寿命将大大减少.

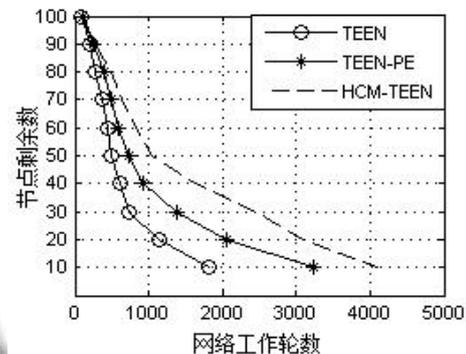


图 2 三种协议的节点剩余数对比

图 2 比较了三种算法在水声传感器网络中随着工作轮数的增加,节点剩余数量的变化情况,即网络生命周期的变化情况. 从图 2 可以看出,传统的 TEEN 协议由于自身的局限性,在 1800 轮左右,节点死亡率已达到 90%; TEEN-PE 协议算法则在 3200 轮左右,节点几乎死亡. 而新算法则在 4000 轮左右,整个网络才不能维持正常工作. TEEN-PE 相比 TEEN 而言,增加了最佳簇头设定,一定程度延长了生命周期. HCM-TEEN 提出了权值因子,考虑了能量和距离因素,采用了簇头分层通信模式,便能够更加充分地均衡水声传感器网络的节点簇头分布及能耗,从而延长了水声传感器网络的生命周期.

4.2 节点平均剩余能量

水声通信节点能量受限,一个网络的能耗是否均衡,节点能量利用率是否高效,对网络运行很关键. 网络节点的平均剩余能量数据能直观地反应出当前网络中节点的剩余能量、能量消耗情况.

图 3 比较了三种算法随着水声传感器网络工作轮数的增加,网络中节点平均剩余能量的变化情况. 从图 3 可以看出,TEEN 协议在 1800 轮左右时,由于节点几乎死亡,导致能量迅速下降,几近为 0; TEEN-PE 相比 TEEN 而言,则在 2500 轮左右节点平均能量消耗殆尽;而 HCM-TEEN 算法在 3500 轮左右时,节点的平均剩余能量才趋向于 0,在性能上比前两者提升了分别有 92%和 40%. 由此可见,在节点的平均能耗上,改进后的算法 HCM-TEEN 也能够具有比较客观地优

越性.

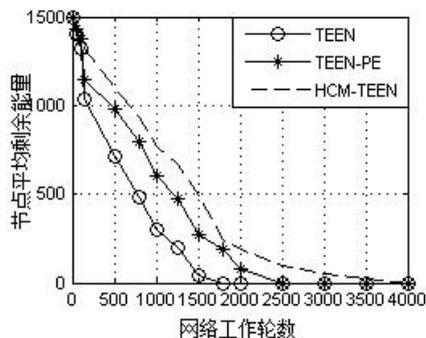


图3 三种算法的节点平均能量对比

5 结语

本文针对水声传感器网络特有的能量消耗和传播特点,将传统的陆地上无线传感器网络 TEEN 协议算法移植到水声传感器网络中,并在此协议算法的基础上,提出了簇头分层通信模式的改进路由算法 HCM-TEEN. 该算法通过更加全面地考虑能量和距离问题,提出了权值因子,将其考虑进了新的阈值函数,并将簇头选定分为簇头候选和簇头淘汰两个过程,从而限制节点过多地成为簇头,使簇头节点分布更加均衡. 通过引入簇头分层通信模式,优化了路由选择,从综合层面上,可平衡网络中各节点的能量消耗,延长网络生命周期. 实验仿真的结果表明, HCM-TEEN 算法在节点平均剩余能量和网络生存时间上都要明显优于原有算法.

参考文献

- 1 Heidemann J, Stojanovic M, Zorzi M. Underwater sensor networks: applications, advances and challenges. *Philosophical Trans. of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2012, 370(1958): 158-175.
- 2 Zuba M, Yang TC, Cui JH. The impact of intensity fluctuations on network throughput on selected MAC. *Proc. of the 8th ACM International Conference on Underwater Networks and Systems*. ACM. 2013. 28.
- 3 Nakano I, Ishida H, Deguchi I. Measurement system for acoustic monitoring of rip currents. *Proc. of the 8th ACM International Conference on Underwater Networks and Systems*. ACM. 2013. 8.
- 4 Tomasi B, Preisig JC. Energy efficient transmission scheduling for non-stationary underwater acoustic channels. *Proc. of the 8th*

ACM International Conference on Underwater Networks and Systems. ACM. 2013. 27.

- 5 Zhao Q, Lambert A, Benson C R. Performance validation of MAC protocols in underwater acoustic networks. *Proc. of the 8th ACM International Conference on Underwater Networks and Systems*. ACM. 2013. 5.
- 6 Liang G, Pang F, Zhang G. Influences of sound scattering on the measurement of vector sensors by different installation locations under a cylindrical baffle. *Proc. of the 8th ACM International Conference on Underwater Networks and Systems*. ACM. 2013. 23.
- 7 Guo J. Design of underwater robots for live exhibition in a museum of marine science and technology. *Proc. of the 8th ACM International Conference on Underwater Networks and Systems*. ACM. 2013. 42.
- 8 Heinzelman WR, Kulik J, Balakrishnan H. Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks. *Proc. of the 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking*. ACM. 1999. 174-185.
- 9 Intanagonwiwat C, Govindan R, Estrin D. Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks. *Proc. of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*. ACM. 2000. 56-67.
- 10 Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. *Proc. of the 33rd Annual Hawaii Int'l Conf. on System Sciences*. Maui. IEEE Computer Society, 2000, 6. 3005-3014.
- 11 Manjeshwar A, Agrawal DP. TEEN: A routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks. *IPDPS*. 2001, 1: 189.
- 12 Manjeshwar A, Agrawal DP. APTEEN: A hybrid protocol for efficient routing and comprehensive information retrieval in wireless sensor networks. *IPDPS*. 2002, 2: 48.
- 13 张少军. 无线传感器网络技术及应用. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- 14 Sozer EM, Stojanovic M, Proakis JC. Underwater acoustic networks. *IEEE Communication Magazine*, 2001, 39(11): 114-119.
- 15 孙利民, 叶驰, 廖勇. 传感器网络的路由机制. *计算机科学*, 2004, 31(3): 54-57.
- 16 徐佳, 金宁, 楼喜中. 一种响应型无线传感器网络路由算法. *电视技术*, 2013, 37(19): 118-121.
- 17 沈永增, 陈宣扬, 贾莲莲. 一种事件驱动型无线传感器网络的分层路由算法. *计算机系统应用*, 2011, 20(8): 81-85.