

基于空间唤醒的水声传感器网络节能路由协议

钟永信* 黄建国 韩晶

(西北工业大学航海学院 西安 710072)

摘要: 针对水声传感器网络高能耗的特点, 该文提出了基于空间唤醒的节能路由协议 ERBSW (Energy-efficient Routing protocol Based on Spatial Wakeup), 该协议将3维网络空间划分为唤醒层和睡眠层, 每个节点根据当前的深度信息, 动态地决定其处于唤醒或睡眠状态。另外, ERBSW 通过定期地广播 Hello 包来建立唤醒邻节点集合, 使得数据包由较高的唤醒层节点向较低的唤醒层节点传递, 从而避免了冗余节点因空闲侦听以及不必要的接收所产生的能量浪费。仿真结果表明, 在不同网络密度条件下, 该协议相比 VBF(Vector-Based Forwarding)能耗节省了约16%~48%。

关键词: 水声网络; 空间唤醒; 路由协议; 能量有效

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)06-1326-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.01090

Energy-efficient Routing Protocol Based on Spatial Wakeup for Underwater Acoustic Sensor Networks

Zhong Yong-xin Huang Jian-guo Han Jing

(College of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Considering the characteristic of high energy consumption in underwater acoustic sensor networks, an Energy-efficient Routing protocol Based on Spatial Wakeup (ERBSW) is presented. It divides three dimensional network space into wakeup layers and sleep layers, each node makes local decision on whether to wake up or to sleep according to its current depth. In addition, ERBSW gets wakeup neighbor sets by broadcasting Hello packets periodically, and delivers data from nodes in higher wakeup layer to nodes in lower wakeup layer, which avoids energy consumption caused by idle listening and unnecessary data reception of redundant nodes. Compared with the Vector-Based Forwarding (VBF) protocol, simulation tests show that the proposed protocol can save energy cost by about 16%~48% in various network density.

Key words: Underwater acoustic networks; Spatial wakeup; Routing protocol; Energy-efficient

1 引言

随着海洋事业的快速发展, 水声传感器网络以其在海洋资源勘探、灾难预警以及军事防御等众多领域的应用, 引起了研究学者的广泛关注^[1]。与空中无线信道相比, 海洋信道的传输条件十分恶劣, 低带宽、长时延、高错误率等特点降低了水声网络的通信效率^[2]。同时网络节点会因海水侵蚀、洋流漂移以及电池耗尽等因素产生失效, 为了维持网络的长期运行, 通常要求节点部署具有一定的冗余性。此外, 水声传感器网络中的数据收发需要更高的能耗, 而且电池难以补充和更换^[3], 因此在路由协议的设计方面必须考虑能量的有效性。

近年来, 许多水声传感器网络的路由协议被提出^[4], 其中基于位置信息的路由协议成为了研究重点。Yan 等人^[5]提出了 DBR (Depth-Based Routing) 协议, 该协议利用节点已知的深度信息进行数据包的路由传递, 随后 Hydrocast 协议对 DBR 进行改进以避免路由空问题的产生^[6], 但是 DBR 和 Hydrocast 协议均会出现多个转发节点传递同一个数据包的现象, 造成信息的冗余发送和节点能量的浪费。文献[7]通过对水声信道的传输特性进行分析, 提出了能量有效的路由协议。在此基础上, 文献[8]针对密集型网络, 提出了 FBR (Focused Beam Routing) 协议, 该协议采用限定发射角度的方法选取转发节点, 减少了控制包冲突的概率并降低了网络能耗, 但该方法需要调整节点天线的发射角度, 因此对硬件设备提出了额外的要求。VBF (Vector-Based Forwarding) 协议则通过在源节点和目的节点

2010-10-11 收到, 2011-01-13 改回

国家自然科学基金(61001153)和中国博士后科学基金(20080441183)资助课题

*通信作者: 钟永信 yongxin_zhong@126.com

之间建立虚拟的路由管道^[9],使数据包传输仅在管道内的节点间进行,从而节省了网络能耗,同时为了避免信息的冗余发送,每个节点在转发数据包之前需要等待一段时间用于侦听邻节点的发送情况,这样将会导致网络时延的增大。

在空中无线传感器网络中已对唤醒协议进行了研究^[10,11],节点通过周期性的唤醒和睡眠机制可有效地降低网络能耗,但由于这些协议均采用基于时间唤醒的方式,因此通常要求节点间的同步或采用专门的唤醒信道以唤醒接收节点,并且由于水声信道的独有特点,空中无线网络中的唤醒协议无法直接应用于水声网络环境^[12]。本文提出了 ERBSW (Energy-efficient Routing protocol Based on Spatial Wakeup)路由协议,该协议首先对 3 维网络空间进行分层,每个节点利用已知的深度信息,决定其处于唤醒或睡眠状态;同时唤醒邻节点集合的建立使得数据包仅在唤醒层节点间传递;对于节点部署较为密集的网络,ERBSW 通过保持较低的唤醒率,避免了网络中大部分节点的空闲侦听以及数据收发,有效地节省了网络能耗。

2 网络模型

考虑用于水下数据采集的 3 维水声传感器网络,由水下传感器节点、网关浮标和舰船控制中心组成,如图 1 所示。其中,水下传感器节点装备着水声调制解调器,将采集的数据通过水声链路逐跳传递给水面的网关浮标;而浮标节点同时装备着水声和无线调制解调器,从水下节点获得数据后,可通过无线链路发送给舰船控制中心,最终由控制中心完成数据的分析和处理。

相对声信号传输的长时延(0.67 s/km),无线信号的传输时间是可以忽略的,因此本文假设当数据信息到达网关浮标后,可通过无线信道快速且成功地发送给控制中心,即认为水面浮标为虚拟的目的节点;进一步假设每个水下传感器节点装备着水压测量仪可确知自己的深度信息,从而能够实现数据包从水中位置较深的节点传递给位置较浅的节点,直至到达水面的浮标节点。

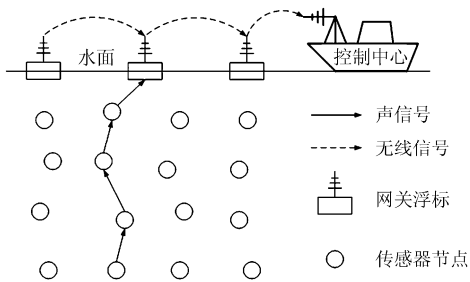


图 1 水声传感器网络模型

3 ERBSW 协议

ERBSW 协议为贪婪式的路由算法,节点选择距离水面最近的下一跳节点转发数据。然而由于水声网络高能耗的特点^[3],若所有节点均参与数据包的路由传递,则会因大量的信息收发导致网络能耗的急剧增加,因此 ERBSW 协议采用分层唤醒的方法。

3.1 分层

根据深度位置的不同,ERBSW 协议将 3 维网络空间 Ω 划分为唤醒层和睡眠层,设唤醒层的高度为 h_w ,睡眠层的高度为 h_s ,则整个层高度 $h = h_w + h_s$ 。以水面为基准,距离水面最近的水下网络空间为第 1 个唤醒层,紧邻第 1 个唤醒层的为第 1 个睡眠层,依此类推,可以将网络空间划分为 k 个唤醒层和睡眠层,如图 2 所示,同时将第 k 个唤醒层和睡眠层分别记为 w_k 和 s_k 。这里注意,如果整个网络空间的高度不能被 h 整除,则最后一个唤醒层或睡眠层的高度将小于 h_w 或 h_s ,但这并不影响 ERBSW 协议的执行。

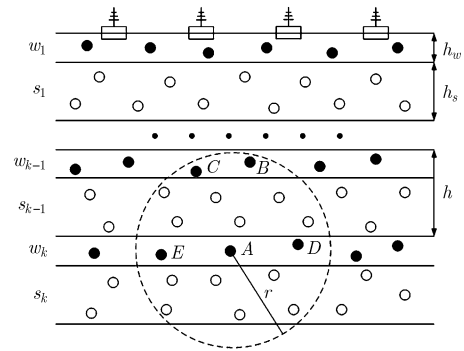


图 2 ERBSW 协议网络分层结构

对网络空间进行分层之后,网络中的每个节点可根据深度信息确定其所属的层。水面的网关浮标为目的节点,其深度为 0,因此可定义浮标节点属于第 0 层。而任意水下传感器节点 i ,其当前的深度为 d_i ,则该水下节点所对应的层 l_i 为

$$l_i = \begin{cases} w_k, & (k-1)h < d_i \leq (k-1)h + h_w \\ s_k, & (k-1)h + h_w < d_i \leq kh \end{cases} \quad (1)$$

若 $l_i = w_k$,表示此刻节点 i 处于唤醒层,该节点需保持唤醒状态等待数据的接收和发送;反之,若 $l_i = s_k$,则表示此刻节点 i 处于睡眠层,该节点需保持睡眠状态以避免空闲侦听以及不必要的数据接收。此外,由于传感器节点随着水流不断运动,因此每个节点的唤醒或睡眠状态并不是固定的,当处于睡眠状态的节点移动进入唤醒区域,该节点开启

水声收发机, 参与到网络的数据传递; 同样当处于唤醒状态的节点移动到睡眠区域, 则该节点关闭水声收发机以节能。这样可避免某些节点的能量快速耗尽, 在一定程度上均衡了网络能量的消耗。

3.2 邻节点信息交换

由于网络中每个节点仅知道自己的深度信息, 因此要进行数据包的路由传递, 首先需获取邻节点的深度以及所属的层数。ERBSW 协议通过唤醒层节点周期性地广播 Hello 包来完成邻节点的信息交换。当节点 i 从睡眠层移动进入唤醒层, 其开始广播 Hello 包, 包中含有该节点的地址、当前的深度信息 d_i 以及其所属的唤醒层数 l_i , 之后若节点 i 仍然处于唤醒状态, 则每隔 T 时间广播一次 Hello 包, 因传感器节点随着水流作低速运动, 所以 Hello 包的广播间隔可以较长。当节点 i 进入到睡眠层, 其再次广播 Hello 包通知邻节点自己进入睡眠状态, 随后该节点停止广播, 直到下一次进入唤醒层。

根据邻节点的 Hello 包信息, 每个节点可得到两个唤醒邻节点集合, 分别为低层邻节点集合 S_1 和同层邻节点集合 S_2 。考虑处于第 k 个唤醒层的节点 j , 即 $l_j = w_k$, 收到来自节点 i 的 Hello 包, 提取包中节点 i 所对应的唤醒层数 l_i , 若 $l_i = w_{k-1}$, 则将节点 i 归入节点 j 的低层邻节点集合, 即 $i \in S_1(j)$; 若 $l_i = w_k$, 则表示节点 i 属于节点 j 的同层邻节点集合, 即 $i \in S_2(j)$ 。这里注意, 如果节点 j 在 $T + \tau$ (τ 为最大传输时延) 时间内没有再次收到节点 i 的 Hello 包, 则判断节点 i 移出其发送范围或进入睡眠层处于睡眠状态, 因此需在相应的邻节点集合列表中删除节点 i 所对应的条目。

3.3 数据包传递

为了节省能耗, ERBSW 协议要求睡眠层节点不参与数据信息的路由传递, 数据包由较高的唤醒层节点传向较低的唤醒层节点。如图 2 所示, 处于 w_k 层的节点 A 为数据发送节点, 根据邻节点广播的 Hello 包信息, 节点 A 可得到低层邻节点集合 $S_1(A) = \{B, C\}$, 以及同层邻节点集合 $S_2(A) = \{D, E\}$ 。此时节点 A 在低层邻节点集合中选择深度最小的节点转发数据包, 即选取 B 作为转发节点, 原因是在同一层中深度最小节点的通信球与其较低唤醒层所形成相交区域的体积最大, 因此该节点找到下一个转发节点的概率最大。之后节点 B 在其低层邻节点集合中继续选择深度最小的节点转发数据包, 直至数据包到达水面的浮标节点。

然而由于水下节点移动, 使得网络拓扑发生改变, 因此有可能导致在发送节点的低层邻节点集合中不存在转发节点的现象, 此时 ERBSW 协议采用

数据包同层转移的方法, 即发送节点将数据包传递给同层邻节点集合中深度最小的节点, 如图 2 所示, 如果节点 A 的低层邻节点集合 $S_1(A) = \emptyset$ (\emptyset 表示空集), 则 A 转移数据包给 $S_2(A)$ 中深度最小的节点 D , 之后 D 在其低层邻节点集合中选择下一跳节点继续转发数据包。若数据包在同一层的转移次数达到 N , 发送节点仍未找到低层转发节点, 则丢弃该数据包。

3.4 协议分析

从 3.1 节的描述可知, ERBSW 协议对 3 维网络空间进行分层, 其中每个唤醒层高度为 h_w , 睡眠层高度为 h_s , 则整个层高度为 $h = h_w + h_s$ 。在此定义唤醒层高度 h_w 占层高度 h 的比率为唤醒率 η , 即

$$\eta = h_w / h \quad (2)$$

由于睡眠层节点处于睡眠状态并不消耗能量, 而唤醒层节点保持空闲侦听且负责数据包的接收和发送, 因此唤醒率 η 的选取将影响到网络的性能。唤醒率越高, 网络中的唤醒节点数越多, 从而提高数据包的传递率以及减小时延, 但会导致网络能耗的增大; 反之, 降低唤醒率可节省网络能耗, 但同时也降低了数据包的传递率以及增大网络时延。

根据 ERBSW 协议, 数据包由较高的唤醒层节点向较低的唤醒层节点传递。在传感器节点通信距离 r 固定的情况下, 层高度 h 的选取也会对网络的传递率和时延产生不同的影响。如图 3 所示, 首先考虑单跳的情况, 数据包从 w_k 层的发送节点 A 传递给 w_{k-1} 层的转发节点, 设节点 A 到 w_k 层底部的距离为 x ($0 \leq x < h_w$), 要使数据包转发成功, 则至少有一个节点位于 A 的通信球和 w_{k-1} 层的相交区域。对于节点均匀部署的网络, 至少有一个节点位于该相交区域的概率为^[13]

$$P = 1 - \exp^{-\rho v} \quad (3)$$

其中 ρ 表示单位体积的节点密度, v 表示该相交区域的体积。如果层高度 h 选取过大, 当 $r + x \leq h$ 时, 该相交区域的体积 $v = 0$, 此时节点 A 无法找到下一个转发节点; 随着 h 减小, 当 $h < r + x \leq h + h_w$ 时, 该相交区域为一个球冠, 如图 3(a) 所示, 可计算该球冠的体积为

$$v_1 = (\pi/3)(2r - x + h)(r + x - h)^2 \quad (4)$$

对 h 求导后得到 $v_1' = \pi[(h - x)^2 - r^2]$, 由于此时 $h - x < r$, 因此可得到 $v_1' < 0$, 这说明相交区域的体积随着 h 的减小而增大; 若层高度 h 进一步减小, 当 $r + x > h + h_w$ 时, 如图 3(b) 所示, 该相交区域为两个球冠之差, 体积为

$$v_2 = \pi[(1/3)h^3 - (1/3)(h + h_w)^3 + r^2h_w - h_w x^2 + (h_w^2 + 2hh_w)x] \quad (5)$$

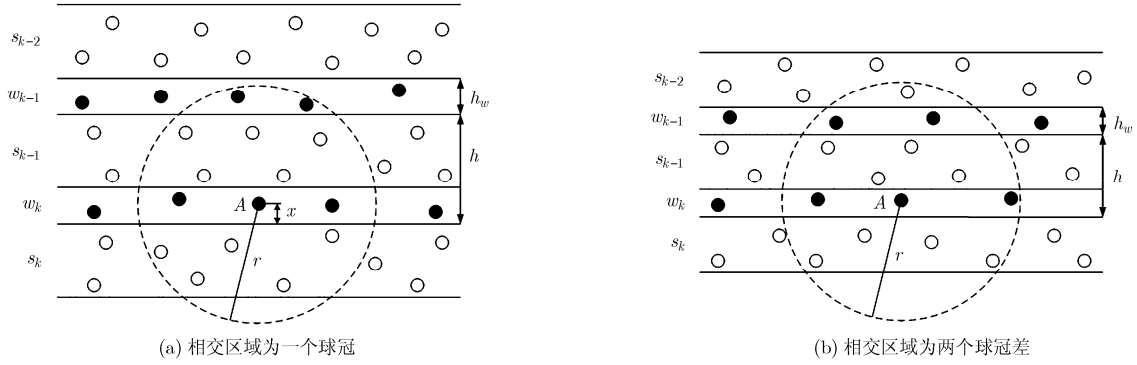


图 3 变化的层高度对相交区域的影响

将 $h_w = \eta h$ 代入式(5), 并通过导数求极值的方法令 $v'_2 = 0$, 得到单跳情况下的最优层高度为

$$h_{op} = \left[x\eta^2 + 2x\eta + \sqrt{(x\eta^2 + 2x\eta)^2 + [(1 + \eta)^3 - 1](r^2\eta - x^2\eta)} \right] / [(1 + \eta)^3 - 1] \quad (6)$$

此时 v_2 达到最大值。

综上所述, 数据包从 w_k 层发送到 w_{k-1} 层, 即在单跳的情况下, 当 $h \geq h_{op}$ 时, 相交区域的体积 v 随着层高度 h 的减小而增大, 并在 $h = h_{op}$ 时达到最大值; 当 $h < h_{op}$ 时, 相交区域的体积 v 随着 h 的减小而减小。要注意的是, 尽管当 $h \geq h_{op}$ 时, 减小层高度可增大相交区域的体积, 从而使得数据包的单跳传递率增加, 但同时随着 h 的减小, 网络的层数增加, 即数据包的跳数增加, 因此导致网络传递率的下降和时延的增大。而且观察式(6)发现, 单跳情况下的最优层高度 h_{op} 与发送节点的初始位置 x 有关, 由于网络中的节点移动导致初始位置 x 具有一定的随机性, 因此无法通过理论推导出最优的层高度, 本文将在第 4 节通过仿真对最优的层高度作进一步分析。

4 仿真与讨论

为了评估协议的性能, 本文通过 OPNET 仿真平台对 ERBSW 协议的传递率、平均时延以及平均能量消耗进行仿真分析, 其中传递率是指浮标节点成功接收的数据包数量占源节点所发送的数据包数量的比率; 平均时延是指数据包从源节点发出后到达浮标节点所需时间的平均值; 平均能量消耗是指成功传递单位数据包网络所消耗能量的平均值。

4.1 参数设置

在网络的初始化阶段, 传感器节点均匀布放在 $5 \text{ km} \times 5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$ 的 3 维空间, 25 个浮标作为目的节点均匀布放在水面, 并假定浮标节点在部署之后位置固定, 而每个传感器节点则在以其初始位置

为中心的 1 km^3 范围内作随机运动, 移动速度设置为 1 m/s 。为了增加路由跳数, 源节点随机出现于网络的最底层且每隔 3 s 产生一个新的数据包, 长度为 2048 bit , Hello 包的广播间隔 $T = 50 \text{ s}$, 包长为 50 bit , 数据包的最大同层转移次数 $N = 2$ 。节点收、发机的数据率采用 2000 bps , 通信距离 $r = 1 \text{ km}$, 发送、接收、空闲侦听和睡眠的功率分别设置为 10 W , 3 W , 0.08 W 和 0 W ^[3]。由于节点随着水流作低速运动, 使得其在唤醒和睡眠状态切换的频率较低, 因此在仿真过程中不考虑水声收发机的开关能耗。声信号在水中的传播速度固定为 1500 m/s 。

4.2 结果分析

图 4 给出了网络密度为 1000 个节点时, 层高度 h 对网络性能的影响。根据第 3 节的分析, 相交区域的体积随着层高度 h 的变化存在着最大值, 使得数据包的传递率也相应地存在着最大值, 并且该最大值与唤醒率 η 有关。如图 4(a)所示, 当 $\eta = 0.45$, $\eta = 0.4$ 和 $\eta = 0.35$, 传递率在层高度 $h = 800 \text{ m}$ 时达到最大值, 而当 $\eta = 0.3$ 和 $\eta = 0.25$, 传递率在 $h = 750 \text{ m}$ 时达到最大值。观察图 4(b)发现, 随着层高度的增加, 网络的层数减小, 使得平均时延降低, 当层高度 $h = 800 \text{ m}$ 时, 网络具有最低的平均时延, 而当 $h > 800 \text{ m}$ 时, 虽然网络的层数更少, 但由于较低的传递率导致数据包同层转移的次数增加, 从而产生更大的时延。按以上分析, 当 $\eta = 0.3$ 和 $\eta = 0.25$ 时, 层高度 $h = 800 \text{ m}$ 的传递率略小于 $h = 750 \text{ m}$ 的传递率, 在其他情况下, 层高度 $h = 800 \text{ m}$ 均能得到最大的传递率和最小的时延, 因为本文选取 $h = 800 \text{ m}$ 作为最优的层高度用于后续的仿真。

图 5 为传递率随网络密度的变化曲线。从中可以看出, 传递率随节点数的增加而增大, 并且在相同网络密度的情况下, 随着唤醒率 η 的增大, 使得唤醒节点数增加, 从而得到更高的传递率。进一步

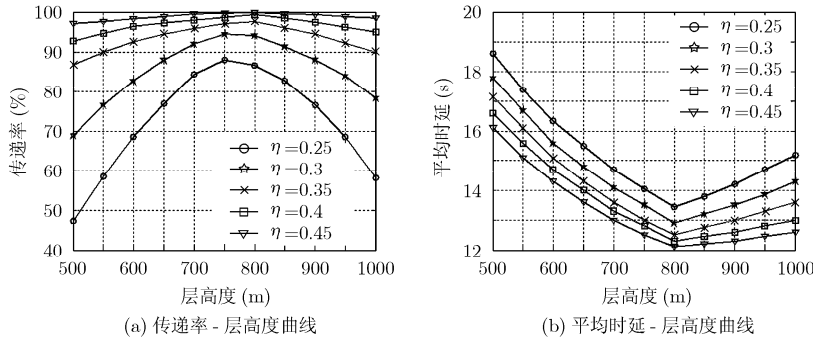


图 4 层高度 h 对网络性能的影响

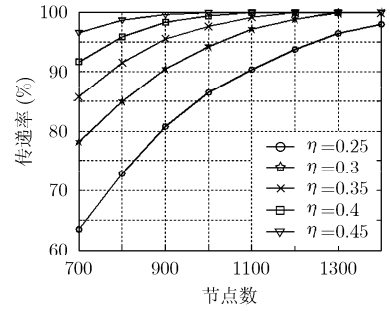


图 5 传递率与网络密度的关系

观察图 5 发现, 当网络密度达到一定程度, 继续增大唤醒率对数据包的传递率提升不大, 但唤醒率的增大会导致网络能耗的迅速增加, 因此本文选取 95% 为传递率门限, 在某一个网络密度条件下, 定义传递率达到 95% 以上的最低唤醒率为最优唤醒率 η_{op} , 根据图 5 的仿真结果, 给出了各种网络密度情况下所对应的最优唤醒率, 如表 1 所示。

需要说明的是, 组建水声传感器网络时通常已知网络的节点密度, 进而最优唤醒率可在节点部署前进行初始设置。当网络运行较长一段时间后, 若系统需要对最优唤醒率作出调整, 则舰船控制中心通过网关浮标将调整的唤醒率发送至距离水面最近的唤醒层节点, 之后水下节点将最优唤醒率信息蕴含在 Hello 包中, 即利用邻节点进行周期性信息交换的同时, 完成最优唤醒率参数在节点间的扩散传递, 因此并不会给网络带来额外的开销。

图 6 为 ERBSW 与 VBF 协议的传递率比较。其中 $\eta = \eta_{op}$ 表示 ERBSW 协议在各种网络密度条件下采用最优唤醒率的情况, 而 $\eta = 1$ 则表示不采用睡眠机制, 网络中所有节点始终处于唤醒状态的情况。从图 6 中得知, VBF 协议要求数据包在路由管道内传递, 因管道内的节点数量随着网络密度的增加而增大, 从而使得数据包的传递率增加。在 ERBSW ($\eta = 1$) 的情况中, 由于网络中的所有节点均可参与数据信息的路由过程, 因此得到很高的传递率; 而 $\eta = \eta_{op}$ 仅让唤醒层节点参与数据信息的路由过程, 因此传递率要低于 $\eta = 1$ 的情况。尽管采用最优唤醒率的 ERBSW 协议的传递率有所降低, 但其根据节点密度调整唤醒率, 依然能保持 95% 以上

的传递率, 并且 ERBSW 协议的设计目标是保持较高传递率的同时, 尽可能地减少网络能量的消耗。

图 7 和图 8 分别给出了 ERBSW 与 VBF 协议网络平均时延和能耗比较。观察发现, 随着网络密度的变化, ERBSW ($\eta = \eta_{op}$) 通过调整最优唤醒率, 使得网络中唤醒节点的数量变化不大, 因此可得到较为稳定的网络时延和能耗。而唤醒率 $\eta = 1$ 时, 由于网络中更多唤醒节点参与数据包的路由传递, 因此可得到较小的时延, 但能耗上也将随着网络节点数的增加而迅速增大。VBF 协议采用路由管道内传递数据包的方法, 在一定程度上减少了网络能量的消耗, 但为了避免数据包的冗余发送, 要求节点在转发数据包之前等待一段时间用于侦听邻节点的发送情况, 因此导致较大的网络时延。根据图 8 的仿真结果, 在不同网络密度条件下, 采用最优唤醒率的 ERBSW 协议相比不采用睡眠机制的方法能耗节省了约 30%~68%, 而相比 VBF 协议能耗节省了约 16%~48%。

5 结束语

本文提出了基于空间唤醒的节能路由协议 ERBSW, 节点利用已知的深度信息可动态地调整其唤醒或睡眠状态。数据包的路由方式为较高的唤醒层节点向较低的唤醒层节点传递, 从而避免了网络中睡眠层节点的空闲侦听以及数据收发。根据仿真结果, 与 VBF 协议相比, ERBSW 在确保较高传递率的同时减少了网络时延, 并且节省了约 16%~48% 的能耗, 因此更加适合于水声传感器网络的应用。

表 1 各种网络密度所对应的最优唤醒率

节点数	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
最优唤醒率 η_{op}	0.45	0.4	0.35	0.35	0.3	0.3	0.25	0.25
传递率 (%)	96.5	95.8	95.5	97.6	97.1	98.8	96.4	98.0

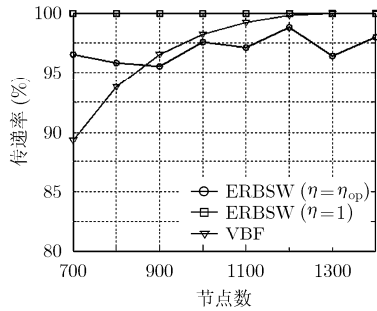


图6 ERBSW与VBF传递率比较

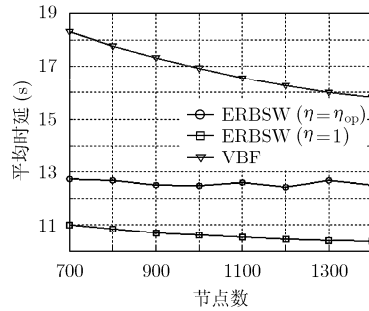


图7 ERBSW与VBF平均时延比较

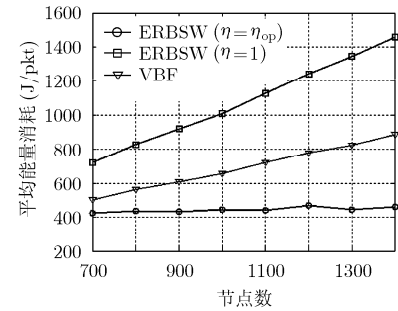


图8 ERBSW与VBF平均能耗比较

参考文献

- [1] Chitre M, Shababuddeen S, and Stojanovic M. Underwater acoustic communications and networking: recent advances and future challenges[J]. *Marine Technology Society Journal*, 2008, 42(1): 103-116.
- [2] Pompili D and Akyildiza I F. Overview of networking protocols for underwater wireless communications [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2009, 47(1): 97-102.
- [3] Harris A F, Stojanovic M, and Zorzi M. When underwater acoustic nodes should sleep with one eye open: idle-time power management in underwater sensor networks[C]. The First ACM International Workshop on Underwater Networks, Los Angeles, USA, 2006: 105-108.
- [4] Ovaliadis K, Savage N, and Kanakaris V. Energy efficiency in underwater sensor networks: a research review[J]. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 2010, 3(1): 151-156.
- [5] Yan H, Shi Z J, and Cui J H. DBR: depth-based routing for underwater sensor networks[C]. Proceedings of IFIP Networking, Singapore, 2008: 72-86.
- [6] Lee U, Wang P, and Noh Y, *et al.* Pressure routing for underwater sensor networks[C]. IEEE INFOCOM, San Diego, USA, 2010: 1-9.
- [7] Zorzi M and Casari P. Energy-efficient routing schemes for underwater acoustic networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2008, 26(9): 1754-1766.
- [8] Jornet J M, Stojanovic M, and Zorzi M. Focused beam routing protocol for underwater acoustic networks[C]. The Third ACM International Workshop on Underwater Networks, San Francisco, USA, 2008: 75-82.
- [9] Xie P, Cui J H, and Li L. VBF: vector-based forwarding protocol for underwater sensor networks [C]. Proceedings of IFIP Networking, Coimbra, Portugal, 2007: 228-235.
- [10] Lu G, Sadagopan N, and Krishnamachari B, *et al.* Delay efficient sleep scheduling in wireless sensor networks[C]. IEEE INFOCOM, Miami, USA, 2005: 2470-2481.
- [11] Sun Y, Du S, and Gurewitz O, *et al.* DW-MAC: a low latency, energy efficient demand-wakeup MAC protocol for wireless sensor networks[C]. ACM MobiHoc, New York, USA, 2008: 53-62.
- [12] Harris A F, Stojanovic M, and Zorzi M. Idle-time energy savings through wake-up modes in underwater acoustic networks[J]. *Ad Hoc Network*, 2009, 7(4): 770-777.
- [13] Lee U, Kong J, and Park J S, *et al.* Time-critical underwater sensor diffusion with no proactive exchanges and negligible reactive floods[J]. *Ad Hoc Networks*, 2007, 5(6): 943-958.

钟永信: 男, 1980年生, 博士生, 研究方向为水声传感器网络。
 黄建国: 男, 1945年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为水声通信技术、信号处理和传感器网络等。
 韩晶: 男, 1980年生, 博士后, 研究方向为水声通信技术和传感器网络。