

DOI: 10.7652/xjtuxb201702006

生物友好的认知水声网络路由协议

金志刚, 王健, 苏毅珊

(天津大学电气自动化与信息工程学院, 300072, 天津)

摘要: 针对海洋生物与传感器节点共用水声信道、生物占用信道使传统水下路由机制失效的问题, 提出了水声网络跨层认知决策机制, 设计了生物友好的认知水声网络路由协议。该协议将海洋生物作为主用户, 确定生物-节点干扰区域, 支持信号定向发送并且采用绕路策略避免对海洋生物的干扰。实验结果表明, 与经典的矢量转发路由、多跳矢量转发路由等水下路由协议相比, 新协议下的数据包投递率分别提高了 52.6% 和 22.5%, 节点的能量消耗分别降低了 40.4% 和 56.8%, 端到端的延时性能有了较大改善, 解决了传统路由机制中仅通过传感器节点间的优化实现最短路由路径而没有考虑生物使建立的路由路径失效的问题。

关键词: 水声网络; 跨层认知; 绕路策略; 生物友好

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)02-0033-07

A Routing Protocol of Underwater Cognitive Acoustic Networks for Marine Mammals

JIN Zhigang, WANG Jian, SU Yishan

(School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A novel cross-layer cognitive decision mechanism and a related mammal-friendly detour routing protocol for underwater cognitive acoustic networks are proposed to overcome the interference among the marine mammals and the manmade acoustic system, which share the limited acoustic spectrum in ocean. The mammals are considered as the primary user and the interference region of mammals-nodes is determined. The routing protocol is designed to avoid the interference between the sensor nodes and the mammals. Simulation results and comparisons with the existing VBF and HHVBF routing protocols show that the proposed routing protocol increases the packet delivery ratio by 52.6% and 22.5% and reduces the energy consumption of a data packet by 40.4% and 56.8%, respectively. These results indicate that this scheme overcomes the routing failure problem caused by marine mammals' interference.

Keywords: underwater acoustic networks; cross-layer cognition; detour strategy; mammal-friendly

在众多新兴的海洋科技领域中, 水声传感器网络 (underwater acoustic sensor networks, UASN)

在水下资源勘探、灾难预防等方面的应用受到了研究者日益广泛的关注^[1-2]。然而, 水下通信环境极其

收稿日期: 2016-09-02。 作者简介: 金志刚(1972—)男, 教授, 博士生导师; 苏毅珊(通信作者), 男, 讲师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61571318); 青海省自然科学基金重点资助项目(2015-ZJ-904); 海南省重点研发计划资助项目(ZDYF2016153)。

网络出版时间: 2016-12-30 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20161230.1629.006.html>

恶劣,水声信道具有传播时延长、带宽低、时空不确定的特点^[3],这些特点给几乎所有的水下网络核心问题的研究和设计带来了困难和挑战,包括媒体接入控制、网路路由、节点定位、时钟同步、节点部署和可靠数据传输等。同时,水下频谱资源稀缺,UASN中的传感器节点、海洋生物以及其他占用水声信道资源的人工声学网络共存,它们共同使用稀缺的频谱资源,给UASN带来了巨大的挑战。为了使自然声学系统与人工声学系统和谐共存,并提高频谱资源的利用率,Luo等在陆地认知无线电的启发下,构建了环境友好的高效利用水声频谱资源的水下认知水声网络^[4](underwater cognitive acoustic networks,UCAN)。UCAN中的频谱决策、频谱分配、频谱接入、路由协议以及端到端传输问题都是目前UASN研究的关键技术。

解决UCAN中声学多系统共存的问题时,现有的方法都是从物理层与MAC层的功率控制、频谱分配等方面研究,通过限制条件求解节点的最优分配信道以及发送功率^[5]。但是,存在一定的特殊情形:当海洋生物位于传感器节点直线通信距离之间时,频谱分配中约束条件总是无法得到满足,此时,源节点与目的节点数据传输过程中端到端的问题就只能由网络层的绕路路由来解决。因此,本文针对该类问题在UCAN中应用认知水声网络跨层的思想,联合物理层、MAC层以及网络层,提出了生物友好的水声网络跨层认知决策机制(bio-friendly cross layer decision,BF-CLD),设计了生物友好的认知水声网络路由协议(bio-friendly cognitive underwater routing,BF-CAR)。

1 相关工作

近年来,无线电认知技术和跨层技术已广泛应用于路由协议中,Malik等提出了一种基于认知的路由协议,改善了传统路由中不能适应网络拓扑变化与用户移动性的问题^[6]。Ramzi等在文献[7]中介绍了跨层路由协议,联合物理层的信道感知,提高了网络吞吐量和稳定性。但是,由于水声传感器网络环境的特殊性,陆地无线电技术并不能直接应用于水下通信环境中。

现有的水声路由协议可分为主动路由、按需路由和地理路由3种。主动路由协议和按需路由协议使得网络开销、维护开销较大。地理路由由本身效率高、代价小,成为研究的热点。近年来,研究者提出了各类地理路由协议^[8],其中也有许多水声传感器

网络的路由协议,例如,Xie等提出矢量转发路由^[9](vector-based forwarding,VBF)协议,只有在源节点和目的节点之间建立的圆柱形路由通路里的节点可以转发数据,但是在节点稀疏的情况下,虚拟管道中可能没有合适的转发节点,而且该路由协议也没有考虑通信链路的质量问题。文献[10]在VBF协议的基础上提出了多跳矢量转发的路由协议(hop-by-hop vector-based forwarding,HHVBF),在各个转发节点和目的节点之间建立虚拟的圆柱形路由管道,HHVBF协议在面对稀疏节点时数据包的交付率要比VBF协议好,但是虚拟管道的半径对路由的性能有很大的影响。Yan等提出了基于深度的路由协议(depth-based routing,DBR)^[11],该协议利用节点水下深度信息进行数据包的路由传递,但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[12]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。Jornrt等提出了聚焦路由(focused beam routing,FBR)协议^[13],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。这些已有的水声路由协议大多只是以路由最短路径以及可达性为原则,并没有考虑认知水声技术以及海洋生物与传感器节点之间的互相干扰造成水声网络连通性差的问题。

2 跨层认知决策机制

UCAN中海洋生物与传感器节点共存,生物间的交流与传感器节点间的通信都会占用水下稀缺的频谱资源。当传感器节点与海洋生物均位于对方的通信范围内时,传感器节点发送功率增大势必会干扰海洋生物的生活行为,同时,海洋哺乳动物间发声交流对正在通信的节点也属于噪声。本文将海洋生物作为认知声学中的主用户(primary user,PU),传感器节点作为次级用户(secondary user,SU),联合动态功率控制和信道分配技术,充分利用海洋生物的频谱空洞,避免传感器节点通信对海洋生物干扰的同时实现了PU和SU信道共享,从而提高水下稀缺频谱资源的利用率。

然而,当海洋生物位于两个互相通信的传感器节点之间时,现有的频谱分配方法通过功率控制与信道分配技术无法避免传感器节点通信对海洋生物的影响,为此本文提出了生物友好的水声网络跨层

认知决策机制,如图 1 所示。

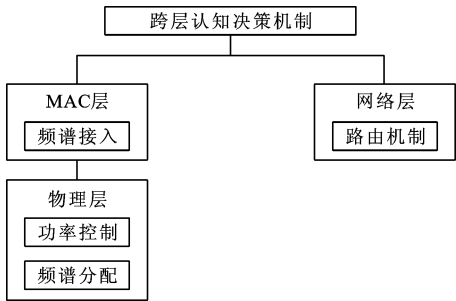


图 1 水声网络跨层认知决策机制

生物友好的水声网络跨层认知决策机制位于 MAC 层与网络层之间,应用 MAC 层及物理层的频谱分配与频谱接入无法实现海洋生物与传感器节点共存时向上层提出要求,通过设计生物友好的路由协议,从源节点到目的节点选路过程中既要保证水下传感器节点能量损耗低,又要减小海洋生物与传感器节点的互相干扰,因此路由协议的设计过程中需要规避海洋生物与传感器节点的干扰区域,选取合理的绕路路由路径。

生物友好的水声网络跨层认知决策机制执行过程中,当节点有数据请求发送时需要判断是否考虑海洋生物与传感器节点共存的问题,如果是在两者共存的网络中,则需判断源节点与目的节点之间是否存在海洋生物干扰区域,如果没有干扰区域,则通过 UCAN 中的动态功率控制与信道分配技术为传输节点分配空闲信道来完成数据的发送。如果传输节点间存在生物干扰区域则向网络层提出需求,确定生物干扰区域并设计绕路路由来实现无干扰传输。

生物友好的水声网络跨层认知决策机制旨在解决海洋生物与传感器节点和谐共存的问题。源节点到目的节点之间寻求最短路径的多跳过程中,当遇到海洋生物时则需要设计一条绕路路由路径以避免海洋生物与传感器节点之间的相互干扰。将物理层、MAC 层与网络层整体设计和联合优化,设计生物友好的认知水声网络路由协议,通过认知技术感知信道以及海洋生物干扰信息,从 MAC 层融合的定位算法以及认知技术中获取传感器节点和水声生物的定位信息来指导路由协议,使多跳转发过程能定向地发送数据包,同时绕过生物与节点的干扰区域来实现生物友好的水声传感器网络通信。

3 路由协议设计

水声传感器网络中使用跨层认知决策机制的关键是设计一种生物友好的认知水声网络路由协议,

避免传感器节点对海洋哺乳动物的干扰,同时能够实现源节点与目的节点之间数据包的准确传输。在路由协议实现的过程中,要规避海洋哺乳动物与传感器节点的干扰区域,在源节点与目的节点间建立一条最稳定、最短的路由路径。

3.1 问题描述

UCAN 中传感器节点与海洋哺乳动物共存。从两者的行为上考虑,传感器节点间进行数据的收集、转发、通信工作与海洋哺乳动物依靠声音信号进行觅食、定位、交流等日常活动会相互干扰;从发声特性上分析,传感器节点与海洋哺乳动物共享水下稀缺的频谱资源,根据海洋哺乳动物声音信号的不同功能以及频率参数,其声音信号主要分为通信信号、回声定位信号和应急突发信号 3 类。回声定位信号频率一般较高,大都集中在 50 kHz 以上,与水声通信所占用的频带几乎没有交叠;应急突发信号只有在应急情况下才会出现,出现概率低;通信信号占用的频率大部分集中在 3~15 kHz 之间,考虑到 UASN 工作占用的频带通常在 1~40 kHz 范围内,因此,海洋哺乳动物通信的 whistle 信号所占用的频段与 UASN 通信占用的频段有较大范围的交叠,如图 2 所示。

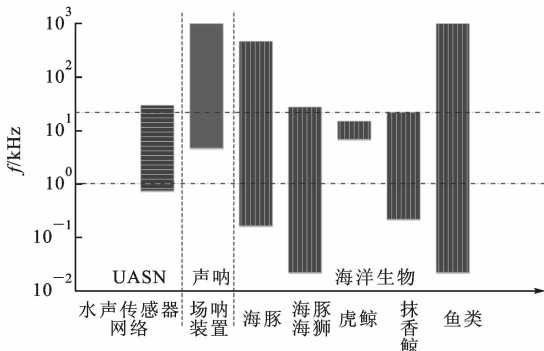


图 2 水声系统频谱资源分配图

3.2 水声传感器网络模型

水声传感器网络模型中考虑海洋哺乳动物,因此考虑二维水声传感器网络并将整个平面划分为若干网格,每个网格的面积为 1 km×1 km,网络中部署传感器节点,海洋哺乳动物也在网络中随机游走。假设传感器节点随波浪的运动幅度较小,在一定时间内传感器节点间相对静止;海洋哺乳动物到达某一随机位置后,表现出特定的行为,行为采用 on-off 模型。网格中的传感器节点定义为网格节点,每个节点都能够感知、接收和转发数据包,当节点不需要工作时就会处于休眠状态以节约能量,节点及海洋哺乳动物的分布如图 3 所示。

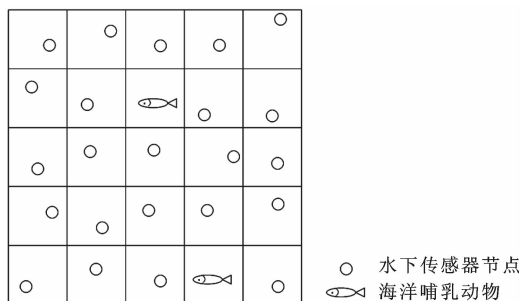


图3 水下传感器节点与海洋哺乳动物分布示意图

数据包从源节点转发到目的节点需要经过多个中间节点,出于对节点能量消耗的考虑,多跳节点的选择基于最短路径原则。在生物与传感器节点共存的网络中,节点通信与动物发声干扰时的情景定义为生物-节点干扰。

当出现生物-节点干扰的时候,为避免传感器节点通信与海洋哺乳动物活动的互相干扰,定义生物-节点干扰区域,该区域边界的确定如图4所示,遵循以下步骤:

步骤1 通过水声认知技术感知海洋哺乳动物的位置信息、发声功率以及发声范围半径 R_1 等信息;

步骤2 通过已有的定位技术确定网络中所有与海洋哺乳动物相邻的传感器节点的位置信息以及最大传播范围半径 R_2 ;

步骤3 以海洋哺乳动物为圆心,以 $R_1 + R_2$ 为半径的圆形区域即为生物-节点干扰区域,该区域中的传感器节点在生物发声过程中处于休眠状态。

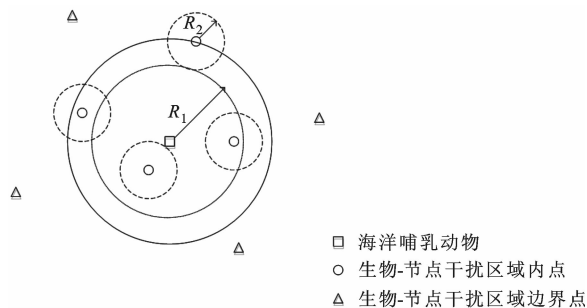


图4 生物-节点干扰区域确定示意图

3.3 生物-节点干扰区域边界点的确认

假设划分 $L \times L$ 个网格,定义左下角的网格节点坐标为 $[0,0]$,其他网格节点确定其坐标 $[x,y]$ 。生物-节点干扰区域边界点的坐标范围按照如下方式确认。

步骤1 确定生物节点干扰区域的坐标范围为 $(a \leq x \leq b, c \leq y \leq d)$,找到该坐标范围内所有传感器节点作为一个传感器节点集合 N 。

步骤2 将 $(a-1 \leq x \leq b+1, c-1 \leq y \leq d+1)$, $(a-1 \leq x \leq b+$

$1, d+1)$, $(a-1, c-1 \leq y \leq d+1)$, $(b+1, c-1 \leq y \leq d+1)$ 坐标点定义为生物-节点干扰区域候选边界点 C 。

步骤3 将步骤2得到的候选边界点 C 中的 $(a-1, c-1)$, $(a-1, d+1)$, $(b+1, c-1)$, $(b+1, d+1)$ 点从候选边界点 C 中去除。

步骤4 将此时得到的集合 N 与集合 C 中的传感器节点进行比较、筛选:当集合 N 中的某个节点与集合 C 中的某个节点横坐标相同时,比较他们的纵坐标,如果 N 中节点的纵坐标与 C 中节点的纵坐标相差1,则把 C 中的节点从候选边界点 C 中删除;当集合 N 中的某个节点与集合 C 中的某个节点纵坐标相同时,比较他们的横坐标,如果 N 中节点的纵坐标与 C 中节点的横坐标相差1,则把 C 中的节点从候选边界点 C 中删除。比较筛选后,将集合 N 中的节点全部列入候选边界点 C 中。

步骤5 最终将查找到的候选边界点集合 C 中的传感器节点定义为生物-节点干扰区域的边界点,边界点组成的集合定义为集合 B ,边界点的查找如图5所示。

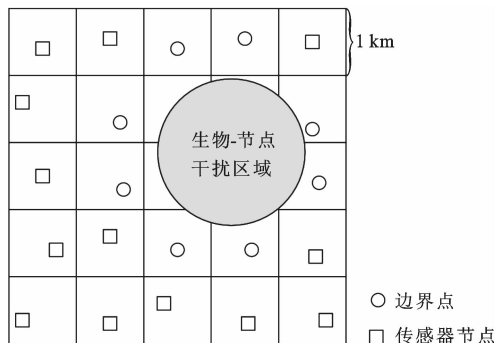


图5 生物-节点干扰区域边界点查找示意图

设置边界初始点,按照右手规则,由最靠近 $[0,0]$ 的边界点开始向其相邻的边界点转发干扰区域边界检测 (interference region boundary detection, IRBD) 数据包,包含各边界点的位置信息等。当邻节点收到 IRBD 包后,将自身节点信息及位置信息插入 IRBD 包中继续转发给下一个边界点。

3.4 生物友好的认知水声网络路由协议

各传感器节点通过已有的定位技术获得自身及其邻节点的地理位置信息。根据源节点 S 发送功率范围,将可作为源节点下一跳节点的邻节点组成的节点集合定义为 E ,集合 E 中所有邻节点均在一个以 S 为圆心,分别以 S 到最近的可接收数据包邻节点 A 的距离 r 和 S 到最远的可接收数据包邻节点 F 的距离 R 为半径所组成的圆环 W 内。通过集

合 E 中的传感器节点 M 计算 $\angle MSD$ 的大小,使得 $\angle MSD$ 最小的节点 M 作为下一跳节点,数据转发过程如图 6 所示。按照此方式,源节点 S 可定向单播数据包信息给 M ,数据包信息完整接受后,按照此方式转发至下一跳节点。

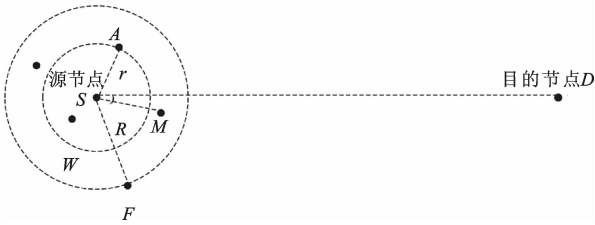
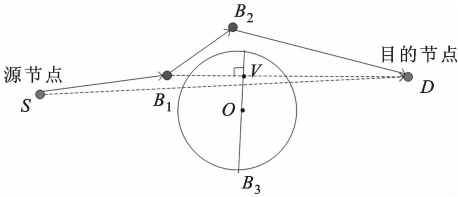
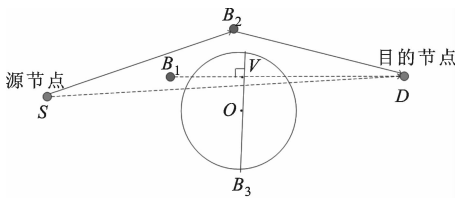


图 6 数据转发过程示意图

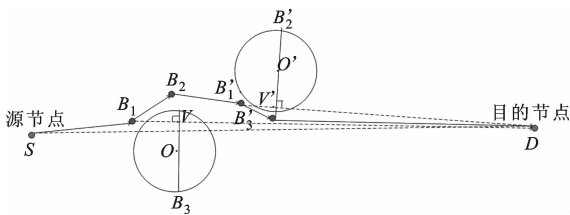
数据包转发到最靠近向量 $\overrightarrow{SD}$ 的干扰区域边界点 B_1 时,通过生物-节点干扰区域的圆心做向量 $\overrightarrow{B_1D}$ 的垂线,交向量于点 V ,交干扰区域于点 B_2 和点 B_3 。如果 $VB_2 < VB_3$,则向 B_2 方向转发,否则向 B_3 方向转发,最后由 B_2 或 B_3 转发至目的节点 D 。因此,数据包的转发路径为 $S-M_1-B_1-M_2-B_2-M_3-D$ ($S-M_1-B_1-M_2-B_3-M_3-D$),其中 M_1, M_2, M_3 均代表下一跳节点,转发路径如图 7a 所示。第一次转发完成后,为了达到最短路径与节约能量的要求,接下来的转发路径可以为 $S-M_1-B_2-M_2-D$,转发路径如图 7b 所示,转发的路由路径用直线代替。



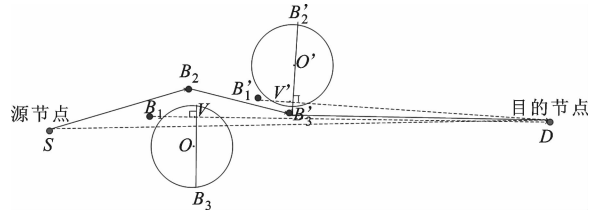
(a) 首次转发路径



(b) 二次转发路径



(c) 多生物-节点干扰区域首次转发路径



(d) 多生物-节点干扰区域二次转发路径

图 7 数据转发路径示意图

当源节点与目的节点之间存在多个生物-节点干扰区域时,需要多次使用生物友好的认知水声网络路由转发协议以避开干扰区域,最终到达目的节点。转发路径如图 7c、图 7d 所示。

4 仿真与性能评价

为验证本文提出的路由算法的有效性,将从数据包的投递率、能量消耗、端到端延时 3 个方面加以验证。通过对相关文献的分析,并未发现已有的认知水声网络路由协议,因此,将本文提出的 BF-CAR 路由协议与已有的 HHVBF 以及 VBF 水下路由经典协议进行仿真对比。

实验的场景设置如图 3 所示,选用软件 Aqua-Sim^[14] 进行仿真实验,传感器节点分布在 $5\text{ km} \times 5\text{ km}$ 的二维平面中,该区域被划分为 25 个 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 的子区域,海洋哺乳动物与传感器节点共存并随机分布在这些子区域中,源节点的数据包产生速率服从泊松分布,且所有节点的传输速率与带宽都是相同的。设置比特速率为 9 kb/s ,数据包长度为 200 B,节点最大传输距离为 1 500 m。

图 8 表明,BF-CAR 协议明显优于 HHVBF 和 VBF 协议,当节点数增加到一定程度时,与 HHVBF 和 VBF 协议相比,BF-CAR 协议数据包的投递率分别提高了 52.6% 和 22.5%。

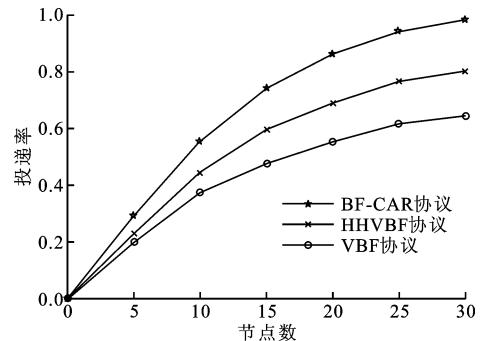


图 8 数据包投递率的对比

图 9 给出了水下网络中使用 3 种不同路由协议节点的能量消耗。随着时间的增加,节点能量消耗

逐渐增加。在开始的时间段内 BF-CAR 协议能量消耗比 HHVBF 和 VBF 协议能量消耗高,这是因为节点转发数据过程中遇到生物-节点干扰区域时需要绕路转发,导致能量消耗较高,但由于转发过程中数据定向发送,且数据包在第一次转发之后的第二次及其之后的转发过程中路径得到改进,也使能耗的增加速率较其他算法明显降低,与 HHVBF 和 VBF 协议相比,BF-CAR 协议的能量消耗分别降低了 40.4%和 56.8%。

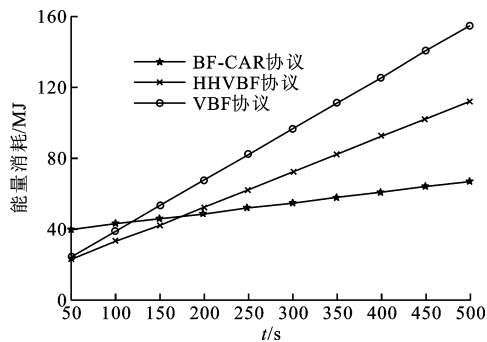


图 9 能量消耗对比

上述能量消耗实验中的网络结构和拓扑是静止不变的,所以能量消耗是相对比较理想情况下的结果,能量消耗为 66.9MJ。与此同时,实验中还加入了海洋哺乳动物与传感器节点低速和中速变化的情况。低速变化情况是实验过程中拓扑结构变化 3 次以内,能量消耗为 81.6 MJ;中速变化情况是实验过程中拓扑结构变化 3 次以上、5 次以内,能量消耗为 98.3 MJ。因此,拓扑在低速、中速变化的情况下,即使这个过程中相比于静止的拓扑结构会有定位信息交互引入的能耗,但是应用本文提出的 BF-CAR 路由协议在这两种情况下产生的能耗仍然比经典的 VBF、HHVBF 协议的能耗小。

图 10 给出了水下网络中使用 3 种不同路由协议数据包发送过程中端到端延时变化。与 HHVBF 和 VBF 路由协议相比,BF-CAR 协议明显降低了端

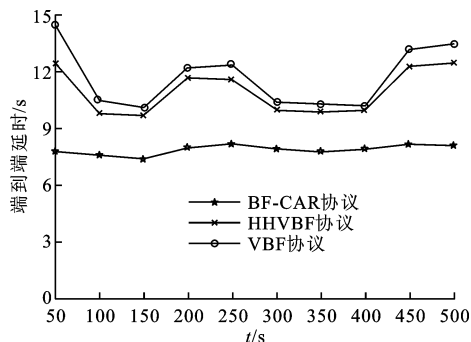


图 10 端到端延时仿真图

到端延时,而且当遇到生物-节点干扰区域时,BF-CAR 协议中端到端延时波动较小,而其他两种算法则具有较大的波动。

实验结果表明,BF-CAR 协议的数据包的投递率、能量消耗、端到端延时都有了较大的改善,见表 1。

表 1 3 种路由协议仿真参数的对比

协议	数据包投递率/%	能量消耗/MJ	端到端延时/s
BF-CAR	98.0	66.9	8.1
HHVBF	80.1	112.2	12.5
VBF	64.1	154.9	13.5

5 结 论

针对海洋哺乳动物与传感器节点在 UASN 中和谐共存的问题,为避免或减小水声传感器网络工作与海洋哺乳动物之间的相互影响,联合物理层、MAC 层以及网络层,应用认知声学结合水声网络跨层决策机制,联合网络层提出了生物友好的认知水声网络路由协议,实现了源节点与目的节点之间数据包的高效传输。仿真实验表明,与 HHVBF 和 VBF 经典水声路由协议相比,本文提出的生物友好的认知水声网络路由协议使得数据包的投递率、节点的能量消耗以及端到端延时等性能都得到了较大的改善。

参考文献:

- [1] 郭忠文,罗汉江,洪锋,等. 水下无线传感器网络的研究进展[J]. 计算机研究与发展, 2010, 47(3): 377-389.
GUO Zhongwen, LUO Hanjiang, HONG Feng, et al. Current progress and research issues in underwater sensor networks [J]. Journal of Computer Research and Development, 2010, 47(3): 377-389.
- [2] HEIDEMANN J, STOJANVIC M, ZORZI M. Underwater sensor networks: applications, advances and challenges [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society: A Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2012, 370(1958): 158-175.
- [3] LIU J, WANG Z, PENG Z, et al. Suave: swarm underwater autonomous vehicle localization [C] // Proceedings of the 2014 IEEE Conference on Computer Communications. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014: 64-72.
- [4] LUO Y, PU L, ZUBA M, et al. Challenges and opportunities of underwater cognitive acoustic networks [J]. IEEE Transactions on Emerging Topics in Com-

- puting, 2014, 2(2): 198-211.
- [5] YAO G, JIN Z, SU Y. An environment-friendly spectrum decision strategy for underwater wireless sensor networks [C]//Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Signal Processing for Communications. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2015: 6370-6375.
- [6] MALIK T S, HASBULAH H B. QoS routing for cognitive radio Ad-Hoc networks: challenges and issues [C]//Proceedings of the 2014 International Conference on Computer and Information Sciences. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014: 1-5.
- [7] SAIFAN R, KAMAL A E, GUAN Y. A cross-layer routing protocol (CLRP) for cognitive radio network [C]//Proceedings of the 2013 IEEE Global Communications Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2013: 896-901.
- [8] 李琳琪, 杨新宇. 一种新型的半固定地理路由 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(2): 7-12.
LI Linqi, YANG Xinyu. A novel semi-permanent geographic routing [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(2): 7-12.
- [9] XIE P, CUI J H, LAO L. VBF: vector-based forwarding protocol for underwater sensor networks [M]//Networking. Berlin, Germany: Springer, 2006: 1216-1221.
- [10] NICOLAOU N, SEE A, XIE P, et al. Improving the robustness of location-based routing for underwater sensor networks [C]//Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Oceans. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 1-6.
- [11] YAN H, SHI Z J, CUI J H. DBR: depth-based routing for underwater sensor networks [C]//Proceedings of the 7th International IFIP-TC6 Networking Conference on Ad Hoc and Sensor Networks, Wireless Networks, Next Generation Internet. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2008: 72-86.
- [12] ZORZI M, CASARI P. Energy-efficient routing schemes for underwater acoustic networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(9): 1754-1766.
- [13] JORNRT J M, STOJANOVIC M, ZORZI M. Focused beam routing protocol for underwater acoustic networks [C]//Proceedings of the 3rd ACM International Workshop on Underwater Networks. New York, USA: ACM, 2008: 75-82.
- [14] Underwater Sensor Network Lab. Aqua-Sim [EB/OL]. (2014-02-17)[2016-06-27]. <http://obinet.engr.uconn.edu/wiki/index.php/Aqua-Sim>.

(编辑 武红江)

(上接第5页)

- [5] 孙立远, 周亚东, 管晓宏. 利用信息传播特性的中文网络新词发现方法 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(12): 59-64.
SUN Liyuan, ZHOU Yadong, GUAN Xiaohong. A method of discovering new Chinese words from internet based on information propagation [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(12): 59-64.
- [6] LESKOVEC J, BACKSTROM L, KLEINBERG J. Meme-tracking and the dynamics of the news cycle [C]//Proceedings of the 15th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. New York, USA: ACM, 2009: 497-506.
- [7] XIONG F, LIU Y, ZHANG Z, et al. An information diffusion model based on retweeting mechanism for online social media [J]. Physics Letters: A, 2012, 376(30): 2103-2108.
- [8] HEESTERBEEK J A P. Mathematical epidemiology of infectious diseases: model building, analysis and interpretation [M]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2000: 31-39.
- [9] YANG J, LESKOVEC J. Modeling information diffusion in implicit networks [C]//Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Data Mining. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 599-608.
- [10] FARAJTABAR M, GOMEZ-RODRIGUEZ M, WANG Y. Co-evolutionary dynamics of information diffusion and network structure [C]//Proceedings of the 24th International Conference on World Wide Web. New York, USA: ACM, 2015: 619-620.
- [11] BOURIGAULT S, LAMPRIER S, GALLINARI P. Representation learning for information diffusion through social networks: an embedded cascade model [C]//Proceedings of the 9th ACM International Conference on Web Search and Data Mining. New York, USA: ACM, 2016: 573-582.

(编辑 武红江)