

水下滑翔机组网的动态 MAC 机制

金志刚^① 吴 婷^① 苏毅珊^{*①} 羊秋玲^②

^①(天津大学电气自动化与信息工程学院 天津 300072)

^②(海南大学信息学院 海口 570208)

摘 要: 水下滑翔机的运动导致滑翔机位置和相对距离的变化, 引起了滑翔机间的信号传输时间改变, 进而导致水下滑翔机间通信可靠性的下降。传统水下媒体接入控制(MAC)协议面向静态拓扑网络, 不适用于动态变化的网络拓扑。该文提出一种水下滑翔机组网的动态 MAC 机制。新机制利用水下滑翔机运动模型进行位置预测, 根据预测结果和相邻滑翔机间的位置共享动态计算时隙长度, 并进行分配和预约收发, 水下滑翔机在收发过程中以团队协作方式避免冲突。实验结果表明, 该机制的数据包投递率与运动预测 MAC(P-MAC)和预约 MAC(R-MAC)协议相比分别提高了 12%和 25%, 更适用于由水下滑翔机组成的动态网络。

关键词: 水下滑翔机组网; 动态媒体接入控制机制; 团队协作

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)05-1108-07

DOI: 10.11999/JEIT170590

Dynamic MAC Mechanism for Underwater Glider Networks

JIN Zhigang^① WU Ting^① SU Yishan^① YANG Qiuling^②

^①(School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

^②(College of Information Science & Technology, Hainan University, Haikou 570208, China)

Abstract: The movement of the underwater gliders leads to the change in the position and relative distance among the gliders, which causes a change in the propagation delay of packets between gliders, and then it leads to a decrease in the reliability of communication between underwater gliders. The traditional underwater Media Access Control (MAC) protocols are for static topology networks and do not apply to dynamically varying network topology. Thus, a new MAC mechanism for the underwater glider networks is proposed. It predicts location based on underwater glider motion model. It calculates time slots dynamically according to the predicted results and the shared position information of underwater gliders. Then, it allocates time slots and reserves to the send and the receive. Underwater gliders avoid collisions with teamwork in the process of sending and receiving. Simulation results show that in this mechanism, the packet received rate increases by 12% and 25% comparing to the Prediction based MAC (P-MAC) protocol and Reservation based MAC (R-MAC) protocol, respectively. The result indicates that the new mechanism is more suitable for the dynamic network composed of underwater gliders.

Key words: Underwater glider networks; Dynamic Media Access Control (MAC) mechanism; Teamwork

1 引言

水声无线传感网络(Underwater Acoustic Wireless Sensor Networks, UAWSNs)^[1]在海洋资源勘探、海洋环境监控等方面中发挥重要作用。水声

信道具有带宽窄、传输时延大及时空不确定性^[2,3]等特点, 给 UAWSNs 的研究带来诸多挑战。此外, UAWSNs 在部署和应用中也面临如检测区域固定、节点投放与回收难度大等问题。水下滑翔机^[4]的加入, 提高了水下传感器网络对海洋物理现象及目标的跟踪和探测能力。与一般海洋监测所具有的广阔性相比, 单个水下滑翔机活动区域有限, 而多滑翔机网络可扩大任务区域, 多滑翔机编队还可以完成协同探测及其他复杂任务。

传统水下媒体接入控制(Media Access Control, MAC)协议^[5]针对节点固定的静态水下传感网络, 如预约MAC(Reservation MAC, R-MAC)协议^[6], 在网

收稿日期: 2017-06-20; 改回日期: 2018-02-27; 网络出版: 2018-03-20

*通信作者: 苏毅珊 yishan.su@tju.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61571318, 61701335), 青海省自然科学基金重点项目(2015-ZJ-904), 海南省重点研发计划项目(ZDYF 2016153)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61571318, 61701335), The Key Project of Qinghai Province on Science and Technology (2015-ZJ-904), The Key Project of Hainan Province on Science and Technology (ZDYF2016153)

络拓扑不变的基础上采用预约/休眠方法进行信道分配,节约能量。而水下滑翔机的运动导致网络拓扑的改变,若将此类协议直接用于水下滑翔机组网(Underwater Glider Network, UGN),会造成不可靠的信道分配。目前,对水下滑翔机组成的传感网络的研究取得了一定进展。文献[7]提及利用水下滑翔机运动轨迹的可预测性,弥补普通节点位置不确定的缺点,提出一种模型区域统计方法,确定水下滑翔机位置的置信区域。为了应对洋流的影响和水声信道特性引起的不可靠通信,使用多个水下滑翔机协同工作也是当前研究的热点,文献[8]中提出一种控制算法,使多个水下滑翔机形成特定的几何形状,以便团队协作,这种方式在应对洋流及其他通信障碍方面的影响时具有很强的鲁棒性,且这种编队设计为下文动态MAC机制中的水下滑翔机团队协作模式提供了理论依据。

因此,结合水下滑翔机已有的研究技术,本文提出一种适用于UGN的MAC机制(UGN-MAC),在该机制中,结合水下滑翔机运动特点,将水下滑翔机运动产生的距离变化考虑在内,并考虑3维网络环境下水下滑翔机间的收发包过程,对水下滑翔机运动过程建模。基于水下滑翔机的运动预测模型,设计了一种基于UGN的动态信道分配算法(Glider-MAC),新算法在收发包过程中需动态计算时隙。同时,新机制利用水下滑翔机的团队协作方式对丢包和冲突的解决方法进行改进处理。

2 动态 MAC 机制设计

为适应UGN的动态变化,本文提出的UGN-MAC将源和目的滑翔机位置变化及引起的收发包所需时间变化的因素考虑在内,采用水下滑翔机编队的形式,如图1所示,3组水下滑翔机在不同的垂直面做锯齿形运动,3台水下滑翔机组成一组,呈三角形,每组水下滑翔机有一个领队来控制水下

滑翔机间的任务协同、对外通信及维持队形,每组的领队滑翔机不固定,可在3台水下滑翔机之间根据任务需求进行切换,各组滑翔机间的距离(如 D_1 和 D_2)用两组中负责通信的水下滑翔机之间的距离来表示。

2.1 MAC 机制概述

UGN-MAC分为水下滑翔机位置预测和信道分配两部分,信道分配算法包括时隙计算、冲突避免策略。其中,在时隙计算部分,每一轮收/发所分配的时隙均基于动态距离计算所得,故UGN-MAC是一种动态MAC机制。该机制实现如下:首先水下滑翔机收到时刻 t 时所有邻居发送的传感器角度和浮心速度矢量数据,并以此进行位置预测,由预测结果和水下滑翔机间的位置共享获得距离并计算时隙,距离的改变导致时隙长度不固定,由传输时长和传播时长构成,再分配时隙开始收发包工作,若收发期间遇其它任务请求信号,采用基于领队切换的冲突避免策略,保证收发包的正常进行。

UGN-MAC旨在解决以下问题:UGN中水下滑翔机的运动导致通信距离变化,收发包所耗时长随之变化,且通信时间有限;有限的通信时间内,为解决冲突问题,需要规划一个任务冲突避免方案。本文将水下滑翔机位置预测、动态的信道分配结合起来,设计一种动态Glider-MAC算法。

2.2 MAC 机制工作流程

UGN-MAC机制在执行过程中,收发包采用分时隙的请求/确认形式,如图2所示。当A组水下滑翔机要向B组水下滑翔机发送数据时,在一个时隙起始发送REQUEST请求信号,在该时隙内,B完成接收REQUEST的过程,在下一个时隙开始向A回复CLEAR信号确认接收,只要A接收到CLEAR信号,在下一时隙开始发送数据包。若中途出现丢包现象,如A发送REQUEST之后,在接下来的2个时隙内一直没有接收到回复的

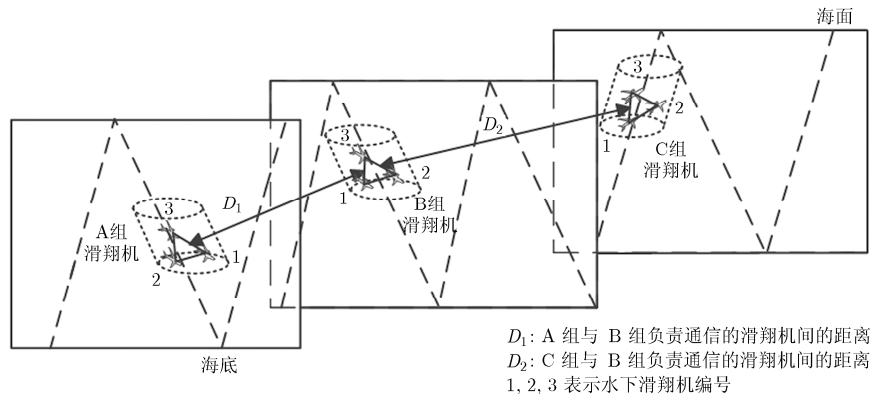


图1 UGN水下运动模型

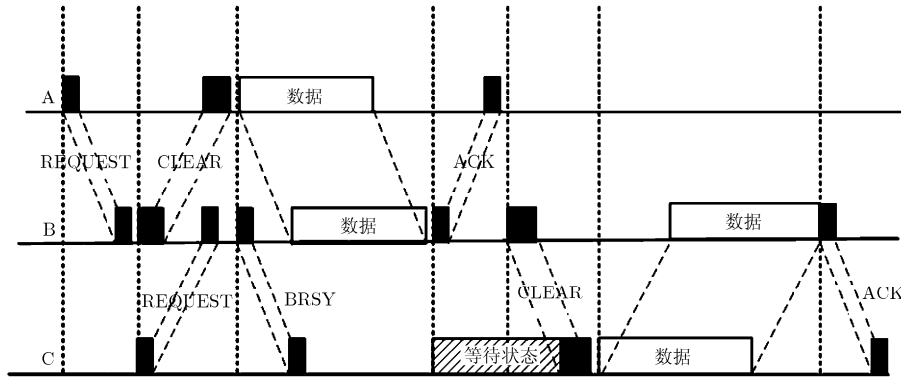


图 2 收发包时序安排(A 与 B 和 B 与 C)

CLEAR 信号, 则判定为丢包, 进行重发 REQUEST。数据包接收完成后, B 在下一时隙开始向 A 发送 ACK 信号确认接收。而如果在 A 和 B 收发过程中, C 组水下滑翔机欲向 B 通信, 发送 REQUEST 信号, B 在新时隙回复 C 一个 BUSY 信号, 则 C 进入等待状态, 直至 B 与 A 通信结束后, C 收到 B 发来的 CLEAR 信号, 退出等待状态, 进入正常通信过程, 在下一时隙向 B 发送数据包。

上述过程中各组水下滑翔机间的通信由它们的领队水下滑翔机完成, 领队的切换过程如图 3, 各组水下滑翔机的领队默认由水下滑翔机 1 担任。A 组的水下滑翔机 1 担任领队在新时隙初向 B 组发送请求信号, 到达 B 组后由 B 组领队负责接收处理。后续时隙 A 组领队与 B 组领队相互通信, 该过程由图中由双箭头表示。当 C 组领队向 B 组发送 REQUEST 信号, B 组内由 2 号水下滑翔机负责接收, 并向 C 领队发送 BUSY 信号, 以防止 A 组与 B 组之间的通信受到影响。由图 2 可知, C 会进入等待状态, 直至某一时隙 A 与 B 通信结束, 此时 B 组内的领队由 2 号水下滑翔机担任, C 组收到 B 组的 CLEAR 信号退出等待状态, B 组与 C 组进入正常通信。

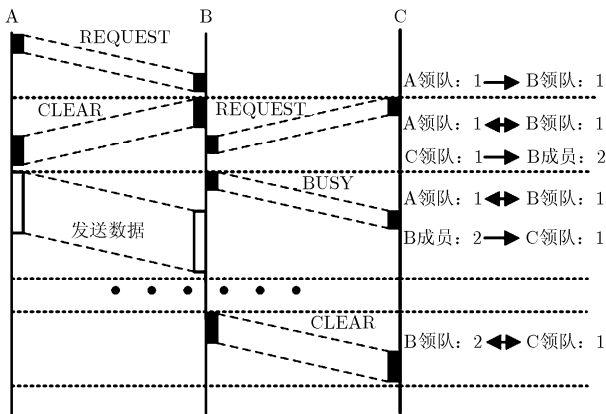


图 3 基于领队切换的冲突避免策略

3 信道分配算法

为实现上述 UGN-MAC, 本节设计了一种时隙实时计算的信道分配算法(Glider-MAC)。首先基于水下滑翔机的运动方程, 采用 AR 预测的方法进行位置估计, 然后结合上述的时序收发安排得到收发包所耗时长关系式, 根据距离和时间的约束条件得到时隙的最优解, 分配时隙进行收发, 提高时间资源利用率。并且在 UGN 中采用团队协作方式避免任务冲突。

3.1 水下滑翔机位置预测

本文采用的水下滑翔机为“海燕”号^[9], 该水下滑翔机的最大水平滑翔速度是 0.5 m/s, 最大深度为 1500 m。由文献[9]可知, “海燕”号内有各个角度传感器, 可以获得各方向的夹角数据, 该水下滑翔机的速度矢量方程为

$$\begin{cases} \dot{X} = u \cos \theta \cos \psi + v \sin \psi \sin \phi - v \sin \theta \cos \psi \cos \phi \\ \quad + w \sin \psi \cos \phi + w \sin \theta \cos \psi \sin \phi \\ \dot{Y} = u \sin \theta + v \cos \theta \cos \phi - w \cos \theta \sin \phi \\ \dot{Z} = -u \cos \theta \sin \psi + v \cos \psi \sin \phi + v \sin \theta \sin \psi \cos \phi \\ \quad + w \cos \psi \cos \phi - w \sin \theta \sin \psi \sin \phi \end{cases} \quad (1)$$

式(1)的 $(\dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z})$ 表示水下滑翔机浮心在地面坐标系的速度矢量, (u, v, w) 为浮心处速度矢量在体坐标下的坐标, ϕ, ψ 和 θ 分别为滚动角、俯仰角和航偏角。对式(1)积分可得水下滑翔机运动轨迹。

水下滑翔机的所有邻居向其发送时刻 t 下的传感器角度和浮心速度矢量, 水下滑翔机接收后, 可根据式(1)得到地面坐标系下的速度矢量, 根据 AR 模型预测方法, 以之前的速度矢量为基础, 分别从 X, Y 和 Z 方向对未来的速度矢量进行预测, 即

$$V_{\gamma}(i) = \sum_{m=1}^l a_m V_{\gamma}(i-m) \quad (2)$$

R_γ 为自相关函数。模型的预测参数 a_m 可由 Levinson-Durbin 算法求解。

由此可得到 l 阶 AR 预测模型的 l 个预测参数, 记为 $a_l(i), i = 1, 2, \dots$ 。

代入最佳阶数的预测系数, 对该预测速度进行积分:

$$S_m = \int_{t_0}^{t_1} V_\gamma(t) dt + S_0 \quad (3)$$

即可得到邻居水下滑翔机的位置信息, 该位置信息在后文用于水下滑翔机距离的确定以及时隙的动态计算。

3.2 收发时序

水下滑翔机可通过上述的速度矢量方程和预测方法得到其邻居水下滑翔机及其本身的位置信息。每次收发包中每组水下滑翔机只有一台水下滑翔机参与, 设置两组水下滑翔机之间负责通信的水下滑翔机的阈值距离为 μ , 某一水下滑翔机欲向其邻居发送信息, 若距离小于 μ , 则正常通信, 反之, 水下滑翔机等待, 直到距离满足条件。在时刻 t 时, 水下滑翔机的位置为 $(X(t), Y(t), Z(t))$ 。如图 1, A 组水下滑翔机与 B 组水下滑翔机内负责通信的水下滑翔机之间的距离 D_1 可以求得:

$$D_1 = \sqrt{S_X(t)^2 + S_Y(t)^2 + S_Z(t)^2} \quad (4)$$

其中, $S_X(t)$, $S_Y(t)$ 和 $S_Z(t)$ 分别为各方向上水下滑翔机坐标之差。满足 D_1 小于 μ 的时间区间 $[T_1, T_2]$ 为 A 组水下滑翔机与 B 组水下滑翔机之间可收发包的通信时间。

各组水下滑翔机之间收发包采用 REQUEST/CLEAR 形式: A 组源水下滑翔机需要向 B 发包, 则先发 REQUEST 请求, B 收到 REQUEST 之后, 回复 A 组 CLEAR 确认信号, 一旦 A 接收到 CLEAR 信号后, 立即发送数据包。B 组目的水下滑翔机接收数据后, 回复 ACK 信号, 完成一次通信, 表示如式(5):

$$\left. \begin{aligned} \frac{L_{\text{REQUEST}}}{V_S} + \frac{D_{\text{REQUEST}}}{1500} + \frac{L_{\text{REQUEST}}}{V_R} &= T_{\text{REQUEST}} \\ \frac{L_{\text{CLEAR}}}{V_S} + \frac{D_{\text{CLEAR}}}{1500} + \frac{L_{\text{CLEAR}}}{V_R} &= T_{\text{CLEAR}} \\ \frac{L_{\text{DATA}}}{V_S} + \frac{D_{\text{DATA}}}{1500} + \frac{L_{\text{DATA}}}{V_R} &= T_{\text{DATA}} \\ \frac{L_{\text{ACK}}}{V_S} + \frac{D_{\text{ACK}}}{1500} + \frac{L_{\text{ACK}}}{V_R} &= T_{\text{ACK}} \\ T_{\text{REQUEST}} + T_{\text{CLEAR}} + T_{\text{DATA}} + T_{\text{ACK}} + \varepsilon &< T_2 - T_1 \end{aligned} \right\} (5)$$

其中, V_S 为发送速度, V_R 为接收速度, L_{REQUEST} , L_{CLEAR} , L_{DATA} 和 L_{ACK} 分别为 REQUEST 包、

CLEAR 包、DATA 包和 ACK 包的长度, D 表示发送一个包时, 源水下滑翔机的位置与接收到该包时目的水下滑翔机位置之间的距离, ε 为误差允许时间。由式(5)可知, 每一阶段发 REQUEST, CLEAR 或 DATA 等包的所耗时间并不相同, 这不仅与包本身长度有关, 也因为水下滑翔机的运动导致在发送、传输、接收过程中水下滑翔机之间的距离发生改变, 影响传输时间, 故需要动态地确定时隙的大小。

UGN-MAC 分时隙完成分组的传送, 由于时隙是动态计算的, 受距离的影响, 故水下滑翔机在发送控制包时, 首先要根据邻节点时延与速度信息表, 来获得所需参考的传播时延长度, 再根据由 3.3 节所述方式计算时隙, 保证其能在新时隙开始时发包。

每组水下滑翔机均保存有如表 1 的信息表, 当某个水下滑翔机要发送分组时, 首先查询该表中的数据, 获得节点间距离与时延数据, 动态计算时隙长度。

表 1 邻节点传播时延与速度信息表

邻节点 ID	当前距离/传播时延	速度矢量
1	D_1/PD_1	$V_{\gamma 1}(i-m) _{m=1}^j$
2	D_2/PD_2	$V_{\gamma 2}(i-m) _{m=1}^j$
...

3.3 时隙确定和冲突避免

一个包的传输和传播所耗时长记为一个时隙 τ , 其组成部分如图 4 所示, t_s 为传输时间, t 为传播时间, 故一个时隙可表示为

$$\tau \geq t_s + t \quad (6)$$

其中, $t_s = L/V_S$, L 为包长。

由于每次的发送都是在新时隙初始, 故为避免等待时间过长, 设开始发送的时刻已知为 t_0 , 接收结束时刻记为 t_1 , 时隙最小化的优化问题表示为式(7):

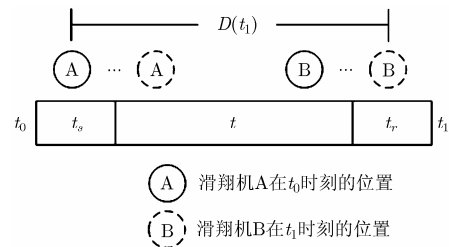


图 4 时隙组成结构

$$\left. \begin{array}{l} \min \quad \tau, \tau \geq t_1 - t_0 - t_r \\ \text{s.t.} \\ \text{C1} \quad t_s + \frac{D(t_1)}{V_i} + t_r = t_1 - t_0 \\ \text{C2} \quad t_1 - t_0 > 0 \end{array} \right\} \quad (7)$$

其中, t_r 表示接收时间, V_i 是声音在水中的传播速度, 记为 1500 m/s, $D(t_1)$ 表示从开始发送到结束接收时水下滑翔机之间的距离, 它由 $[t_0, t_1]$ 时间内源点移动 D_s 、目的点移动 D_d 及 t_0 时两点间初始距离 D_0 计算得到。约束条件 C1 是一个关于 t_1 的表达式, 将该优化问题应用混合整数规划方法求解。

水下滑翔机向目的水下滑翔机发包, 希望目的水下滑翔机在信号接收结束时时隙 τ 即将耗尽, 故需要告知目的滑翔机开始发送时刻 t_0 及时隙 τ 的长度, 方便接收者及时在新时隙开始发送信号, 减少不必要的等待时间。故数据包和控制包中均包含 t_0 和 τ 的信息, 控制包格式如图 5 所示。



图 5 控制包格式

冲突碰撞与网络分布有关。在传统的静态节点网络分布拓扑中, 一个节点有多个邻居节点, 所以在与目的节点的通信过程中, 存在与邻居节点冲突碰撞的各种问题。而在本文中的由多组水下滑翔机组成的网络结构中, 可参考图 1, 垂直方向上不存在邻居节点, 而水平方向各组水下滑翔机分布比较稀疏, 如文献[10], 做近似圆周运动, 只要保证通信距离即可, 故同一方向的且在能够感知的允许通信范围内的水下滑翔机只有一个。

4 仿真与性能评价

为验证 UGN-MAC 机制的有效性, 本节对 Glider-MAC 协议进行仿真, 仿真实验将从数据包的端到端时延、投递率和吞吐量这 3 个方面进行验证。

4.1 仿真实验条件

本实验选用 Aqua-Sim^[11]进行仿真, 实验场景俯视图如图 6。仿真网络是一个 5.0 km × 5.0 km × 1.5 km 的 3 维空间, 两组水下滑翔机在该网络中做水平方向的圆周运动和垂直方向的潜浮运动。每组水下滑翔机的运动都是相对独立的, 负责通信的水下滑翔机的数据包产生速率是 100 s/包, 水下滑翔机以 0.5 m/s 匀速运动。设置数据包长 500 Byte,

控制包长 10 Byte, 比特率 1000 bps, 水下滑翔机之间最大通信距离为 1000 m。

为了进一步验证 Glider-MAC 协议对于水下滑翔机的有效性, 仿真将继续在原网络中添加若干节点, 随机分布在水下滑翔机周围, 来模拟实际水下环境中可能出现的静态节点与水下滑翔机并存的场景, 如图 6 所示。节点遵循传统水下 MAC 协议, 进行侦听信道和发包, 作为对水下滑翔机通信过程的干扰。水下滑翔机和节点间可正常通信, 静态节点默认位置保持不变。

4.2 仿真指标及仿真结果

4.2.1 端到端时延 端到端时延可分为传输时延、传播时延、处理时延和排队时延 4 个部分。在本文中, 端到端时延是指数据包在源水下滑翔机处开始发送的时刻到目的水下滑翔机的接收时刻之差, 可定义为 $\Delta t = t_1 - t_0$, 式中, t_1 为接收时刻, t_0 为发送时刻, 它主要由传输时延和传播时延两部分组成。

图 7 表示在图 6 所示场景下(无静态节点)两组水下滑翔机间通信时数据包的端到端时延。端到端时延随着两组水下滑翔机运动导致的距离变化而变化, 端到端时延的增加表明水下滑翔机间的距离增加, 时延的降低表明水下滑翔机间的距离在减小。通过对上文端到端时延的定义可发现, 本文的时隙长度 τ 与端到端时延从原理上是等价的, 故从图 7 中可看出时隙长度的确随着距离的改变而动态地计算, 所得时隙用于包的收发中。并且中间部分端到端时延曲线的缺失, 表明随着两组水下滑翔机的距离因为运动超过通信范围时, 两组水下滑翔机之间停止通信。图 8 表示在增加节点与各组水下滑翔机通信的干扰后, 两组水下滑翔机间通信的端到端时延。与图 7 比较可知, 在增加节点的通信干扰后, 两组水下滑翔机间的总体通信过程较之前并未改变。

4.2.2 投递率吞吐量 数据包投递率(Packet Received Rate, PRR)是指在仿真实验时间内接收端水下滑翔机成功收到包的个数与发送端水下滑翔机发送包的个数的比值, 可用式(8)表示:

$$p = h/(rT) \quad (8)$$

式中, r 表示发包速率, h 表示 T 时间内实际成功收到的包的总数。在 NS2 的 trace 文件分析中, 根据包的编号, 即 0, 1 数字来识别收包与否。

图 9 表示改变数据包发送速率时成功投递率的变化情况。图中分别描绘了使用 3 种不同 MAC 协议的数据包投递率。随着发包率的增加, 数据包投

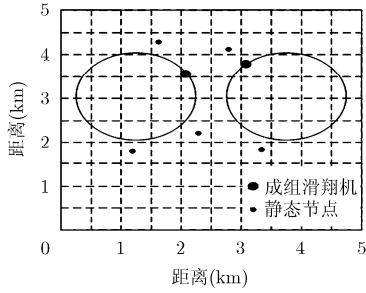


图 6 水下滑翔机平面运动示意图

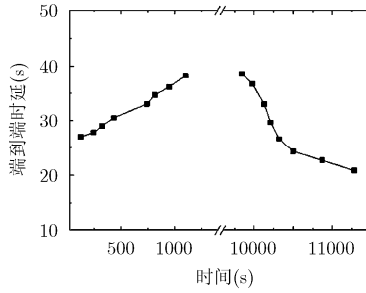


图 7 无节点场景下端到端时延

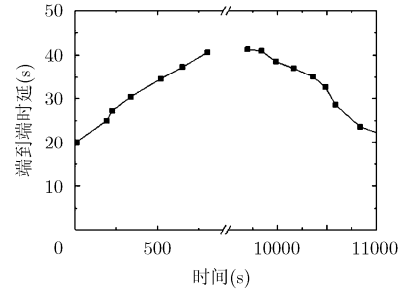


图 8 增加节点影响的场景下端到端时延

递率均有所减少，但是 Glider-MAC 协议的数据包投递率一直稳稳高于其他两种 MAC 协议，这是因为 UGN 中水下滑翔机间的通信是一对一进行，遇到水下滑翔机收发任务冲突的情况，可采用基于团队协作的冲突避免策略。在发包率较低的初始阶段，Glider-MAC 协议与 P-MAC^[12]协议的投递率相差 12%，与 R-MAC 协议相比提高了 25%，且未因发包率的增加而大幅下降。将图 7 中缺失的中间部分端到端时延曲线和图 9 中 Glider-MAC 协议的较高投递率结合起来可知，两组水下滑翔机感知通信距离大于通信阈值后，就不再发送 REQUEST 请求信号，直至它们再次接近，减少不必要的发包造成的能量浪费。

图 10 描绘了 UGN 中未加静态节点前和添加静态节点后两组水下滑翔机之间数据包投递率的变化。场景 1 表示未加入节点前的网络中的投递率，场景 2 表示加入节点之后的投递率。如图 10 所示，在初始发包率较低时，场景 2 的投递率比场景 1 只低 2%，但总体投递率依旧优于 P-MAC 和 R-MAC 协议，这是因为 Glider-MAC 协议是基于时隙预约收发，时隙的分配和收发调度安排是结合水下滑翔机的运动进行规划的，具有较强的应用对象针对性，且对可能发生的冲突问题在本文中也提及了解决方案，故丢包率大大降低。

图 11 表示 Glider-MAC 和 P-MAC 的数据包投递率受传输距离的影响而发生的变化。从图中可看

出，在传输距离较小时，投递率随着传输距离的增大而提高，在传输距离分别为 1.8 km 和 1.7 km 时，投递率最高。当传输距离继续增加时，投递率开始降低。这是因为，当节点间传输距离较小时，传输所需的跳数增加，整个网络的连通性降低。当节点间距离较大时，发送分组需要更长的传播时间，若先前的分组收发过程还未完全结束，新的分组可能已经产生了，这就导致网络中大量的分组未到达目的节点，使得 h 值减小，总体投递率降低。此外，由于 P-MAC 中目的节点只能在监听窗口中接收分组，故受监听窗口长度的限制，其最优传输距离小于 Glider-MAC。

图 12 表示不同时延下的吞吐量变化情况，该实验建立在低发包率的场景下，尽可能降低因竞争造成的吞吐量变化，突出由同步等问题带来的时延对吞吐量的影响。从图中可看出，吞吐量随着时延的增加而降低，这是因为时延的存在导致网络中节点的本地时钟不统一，使得节点对邻节点的位置判断产生误差，由此也影响了后续的时隙划分。而解决该问题的关键就是减小时延，使得不对网络造成明显影响。结合水下滑翔机可定期浮出水面进行无线通信的特性，且当前使用的晶振频率已达到较高水平，可能产生的时间误差非常小。又由于无线通信耗时较短，故水下滑翔机只需要定期地少量几次浮出水面完成同步和位置更新即可，且基本不影响水下滑翔机的正常业务通信。

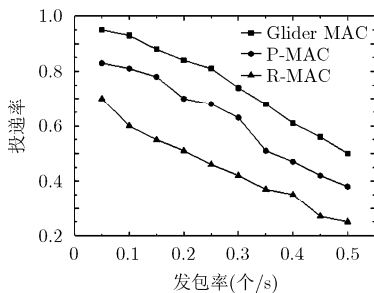


图 9 无节点场景下 3 种协议投递率对比

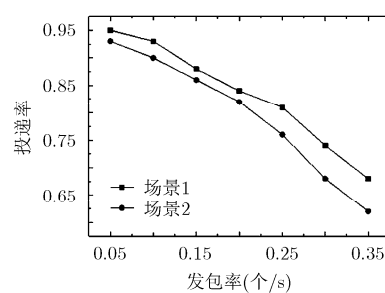


图 10 有节点和无节点场景下的投递率对比

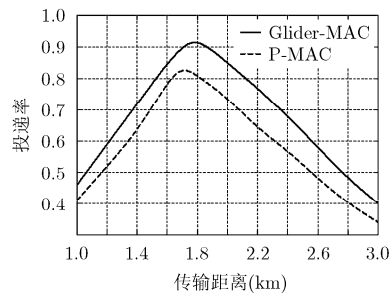


图 11 投递率受传输距离影响的变化情况

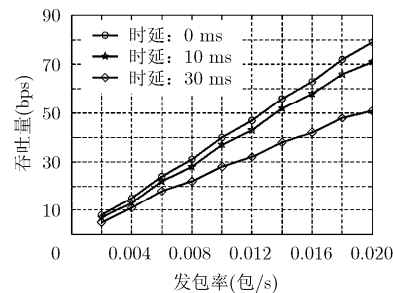


图 12 不同时延下的网络吞吐量

5 结束语

本文讨论了 UGN 中, 水下滑翔机的运动对数据包传输过程的影响, 即滑翔机位置的变化会引起通信时间的改变, 易导致不可靠的信道分配。为克服此问题, 在本文所述的 UGN-MAC 机制中, 首先利用水下滑翔机模型运动特点进行 AR 预测, 得到最佳阶数的预测系数, 通过积分得到水下滑翔机的位置信息; 然后根据位置信息求得水下滑翔机之间通信时间所受的约束条件, 建立时隙的最优化模型; 在解出每次通信所需的最优时隙长度后, 可进行动态分配时隙和预约收发。收发过程中利用团队协作的方式避免冲突。仿真结果表明, 该 MAC 机制应用在水下滑翔机通信的情况下, 能结合水下滑翔机运动特点, 避免无效的发送行为, 减少时隙资源的浪费, 提高数据包投递率。

本文的工作为提出一种动态 UGN 的 MAC 层解决方案。在未来的工作中, 研究将致力于功率控制研究, 以调整水下滑翔机收发所用功率, 结合本文的动态 MAC 机制, 减少通信过程中能量的损耗, 延长网络生存周期。

参考文献

- [1] CLIMENT S, SANCHEZ A, CAPELLA J V, *et al.* Underwater acoustic wireless sensor networks: Advances and future trends in physical, MAC and routing layers[J]. *Sensors*, 2014, 14(1): 795–833. doi: 10.3390/s140100795.
- [2] LIU J, WANG Z, ZUBA M, *et al.* DA-Sync: A Doppler-assisted time-synchronization scheme for mobile underwater sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2014, 13(3): 582–595. doi: 10.1109/TMC. 2013.13.
- [3] 黄梅, 孙海信, 程恩, 等. 水声 OFDM 系统多普勒频移和信道的联合估计[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2013, 52(3): 326–332. doi: 10.6043/j.issn.0438-0479.2013.03.008.
HUANG Mei, SUN Haixin, CHENG En, *et al.* Joint estimation of Doppler shift and channel in underwater acoustic OFDM system[J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2013, 52(3): 326–332. doi: 10.6043/j.issn. 0438-0479.2013.03. 008.
- [4] RUDNICK D L, DAVIS R E, and SHERMAN J T. Spray underwater glider operations[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2016, 33(6): 1113–1122. doi: 10.1175/JTECH-D-15-0252.1.
- [5] SONG L and CHI E. A traffic adaptive asynchronous media access control protocol of wireless sensor networks[C]. 3rd International Conference on Systems and Informatics (ICSAI), Shanghai, China, 2016: 669–673.
- [6] CHEN K, MA M, CHENG E, *et al.* A survey on MAC protocols for underwater wireless sensor networks[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2014, 16(3): 1433–1447. doi: 10.1109/SURV.2014.013014.00032.
- [7] CHEN B and POMPILI D. Modeling position uncertainty of networked autonomous underwater vehicles[J]. *Ad Hoc Networks*, 2015, 34(1): 184–195. doi: 10.1016/j.adhoc.2014. 09.003.
- [8] XUE D, WU Z, and WANG S. Dynamical analysis of autonomous underwater glider formation with environmental uncertainties[J]. *Procedia IUTAM*, 2015, 13(1): 108–117. doi: 10.1016/j.piutam.2015.01.007.
- [9] 刘方. 混合驱动水下滑翔机系统设计与运动行为研究[D]. [博士学位论文], 天津大学, 2014.
LIU Fang. System design and motion behaviors analysis of hybrid underwater glider[D]. [Ph.D. dissertation], Tianjin University, 2014.
- [10] LEONARD N E, PALEY D A, DAVIS R E, *et al.* Coordinated control of an underwater glider fleet in an adaptive ocean sampling field experiment in Monterey Bay[J]. *Journal of Field Robotics*, 2010, 27(6): 718–740. doi: 10.1002/rob.20366.
- [11] SU Y, ZHU Y, MO H, *et al.* A joint power control and rate adaptation MAC protocol for underwater sensor networks[J]. *Ad Hoc Networks*, 2015, 26(1): 36–49. doi: 10.1016/j.adhoc. 2014.10.01.
- [12] 金志刚, 苏毅珊, 刘自鑫, 等. 基于运动预测的水下传感器网络 MAC 协议[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(3): 728–734. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.00970.
JIN Zhigang, SU Yishan, LIU Zixin, *et al.* Motion prediction based MAC for underwater wireless sensor networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(3): 728–734. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.00970.

金志刚: 男, 1972 年生, 教授, 博士生导师, 研究领域为水下传感器网络、网络系统性能评价、下一代宽带无线通信系统、网络管理与安全等。
吴婷: 女, 1993 年生, 硕士生, 研究领域为水下传感器网络。
苏毅珊: 男, 1985 年生, 讲师, 研究领域为水下传感器网络、传感器网络协议设计与性能评价等。
羊秋玲: 女, 1981 年生, 副教授, 研究领域为水下传感器网络。