

基于运动预测的水下传感器网络 MAC 协议

金志刚 苏毅珊 刘自鑫 窦飞*
(天津大学电子信息工程学院 天津 300072)

摘要: 在海洋环境的影响下, 水下无线传感器网络(UWSN)节点始终处于运动状态; UWSN 采用声信号通信, 缓慢的节点移动也会造成 UWSN 现有的多址接入技术(MAC)协议冲突避免机制失效。该文建立了水下节点的运动模型, 基于 AR 运动预测模型减小水下节点的时空不确定性对于 MAC 协议的影响, 提高发送信息在预约时隙到达的概率。仿真结果表明, 采用 AR(5)预测可以减小 74.8%的时延探测误差。提出了基于预测的预约 MAC 协议: P-MAC。NS-2 仿真结果表明该协议在海浪运动场景下能提高收包成功率(PRR)10%-15%。

关键词: 水下无线传感器网络(UWSN); 多址接入技术(MAC)协议; 运动预测; 环境适应

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)03-0728-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.00970

Motion Prediction Based MAC for Underwater Wireless Sensor Networks

Jin Zhi-gang Su Yi-shan Liu Zi-xin Dou Fei

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

Abstract: Due to marine dynamics, sensor nodes of Underwater Wireless Sensor Networks (UWSN) are always in a state of constant motion. Together with low propagation speed of acoustic signal, nodes mobility brings challenge to UWSN MAC. A motion model of underwater node is established to solve the multiple access problems for underwater mobile networks. Based on AR mobility prediction algorithm, the negative effect of space-time uncertainty can be reduced and the probability that sending information arrives in the reservation slot can be improved. The simulation results show that AR(5) algorithm can decrease 74.8% of delay detection error. A new contention-based MAC protocol: P-MAC is proposed. NS-2 simulation results show that P-MAC can get a 10% -15% higher Packet Reception Rate (PRR) under the circumstance of wave motion.

Key words: Underwater Wireless Sensor Network (UWSN); MAC protocol; Mobility prediction algorithm; Circumstances accommodation

1 引言

水下无线传感器网络(UWSN)因其在环境监测、气象预报和国防安全等方面的应用受到通信界的广泛关注^[1-3]。但由于 UWSN 受到延迟、能耗、带宽等方面因素的制约, 其多址接入技术(MAC)与陆地传感器网络存在很大差异^[4]: 一方面, 水下声信号大延时特性对 MAC 协议的设计产生不利影响; 另一方面, 多数的陆地传感器网络是基于静态网络特性设计的, 即使网络中部分节点移动, 对网络性能的影响也并不明显。而对于 UWSN, 因其受到外界自然环境影响, 整个网络始终处于运动状态, 这是水下网络 MAC 协议设计的重要挑战。

目前针对 UWSN 的 MAC 协议的设计思想主要是克服时延对 MAC 协议的不利影响, 这些协议可划分为竞争与非竞争类^[4,5]。后者如 TDMA, FDMA, CDMA 的应用分别受限于同步、带宽、编码等困难, 未能成为水下网络 MAC 协议的主流。前者可分为随机多址类和基于信道预约类协议。随机多址协议^[6-8]结构简单, 实现方便, 具有较好的时延特性, 但这类协议中数据包的冲突概率随业务流量增长呈指数增加, 不利于突发数据场景中的使用; 基于信道预约机制的 MAC 协议, 如 R-MAC^[9], HCR^[10], 这类协议虽然冲突避免机制复杂, 网络延迟较大, 但在突发数据网场景中有更为突出的吞吐量性能表现^[11]。

对于水下 MAC 设计的重要问题——节点运动造成的不可靠接入问题, 目前的研究与解决方案不多。少数协议如 R-MAC 可以通过周期性探测邻节点信息在一定程度上缓解了节点运动造成的位置信

2012-07-25 收到, 2012-10-22 改回

国家自然科学基金(61162003)和青海省科技计划项目(2012-ZR-2989)资助课题

*通信作者: 窦飞 doufei1990@126.com

息的不确定性对于 MAC 协议的影响。并通过研究水下物体的运动特性设计有效的运动预测算法，提出基于运动预测的预约协议 P-MAC(Prediction based MAC)。

2 数据包发送的时空不确定性对 MAC 协议的影响

在陆地无线传感器网络中，碰撞问题近似认为是时间的 1 维函数。在水下环境中，由于声信号传播速度远低于电磁波信号，碰撞问题是时间和空间的 2 维函数， $P_{cls} = f(t, d)$ 即不同节点发送的数据包是否碰撞不仅与收、发节点间发包的时间有关，而且与双方的欧式距离有关。

图 1 中 A, C 节点同时向 B 发送数据包，但与 B 的距离不同，所以在经过不同的延迟后并未在 B 发生冲突；图 2 中 A, C 节点不同时发包，但经过延迟后可能在 B 发生碰撞。

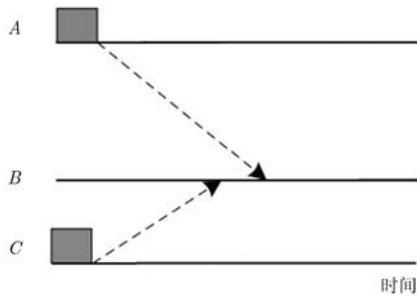


图1 空间不确定性影响MAC

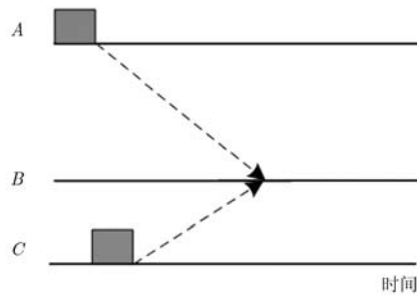


图2 时间不确定性影响MAC

运动的加入增加空间的不确定性，使得冲突避免机制的设计复杂化。在预约类 MAC 协议中，控制包需要在接收节点的监听窗口内到达，当节点受运动影响，可用的接收窗口减小，导致控制包碰撞概率增加，预约失效概率增加。此外，由于运动还会导致一些控制包不能在指定的时隙内到达目的节点，致使预约失败。

3 水中物体的运动模型与位置预测算法

水面/水下传感器节点受到海流和海浪的影响，运动特性遵循洋流运动和波浪运动理论。

3.1 海流运动理论^[11]

海流一般平行于海面，并且在同一深度的流速相同，一般可以用下面的方程进行描述：

$$V_s(z) = V_{s1} \cdot e^{jz} \quad (1)$$

当海流方向与 x 轴的夹角为 θ 时，海流速度在整体坐标系中的矢量形式为

$$V_s = [V_{s1}e^{jz} \cos \theta, V_{s1}e^{jz} \sin \theta, 0]^T \quad (2)$$

3.2 海浪运动理论

海浪可以认为是重力波，水质点做有规律的往复震荡运动。对重力波的边界条件进行简化，忽略边界条件下的非线性项，采用线性波理论进行分析，将海浪运动简化为规则行进波，其特征参数有

$$\eta = h_w \cos(k_w x - wt) / 2 \quad (3)$$

式中 T_w 为周期； h_w 为水波高； $\lambda_w = gT_w / 2\pi$ 为波长； $k_w = 2\pi / \lambda_w$ 为波数； $w = 2\pi / T_w$ 为波频率。

设定海浪运动方向为 x 轴正向，由于真实环境情况更接近于 N 个速度矢量的叠加，则根据海水质点的运动速度矢量求解形式，经过了大量简化，修正波浪方程的速度矢量表达式为

$$V_w = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^N A_i \cos(k_{wi} x - wt) \\ 0 \\ \sum_{i=1}^M B_i \sin(k_{wi} x - wt) \end{pmatrix}, A = \frac{\pi h_w}{T_w} \exp(k_w z) \quad (4)$$

由此认为真实场景中复杂的波浪是由 $N(M)$ 个简单规则波叠加而成。

3.3 浮体运动 Morison 理论^[12]

对于圆柱体物体所受波浪力，按其尺寸大小采取两种计算方法，对于小尺寸物体(物体直径与海浪波长之比 $D/L \leq 0.15$)，采用半经验半理论的 Morison 公式；对于大尺寸物体采用绕射理论。本文的水下节点参照 UWM1000 水声 MODEM，属于小尺寸物体。

当入射波由 x 轴正向传来时，作用在水下物体的波浪扰动力为

$$f = \frac{dF}{dz} = C_D A \rho \frac{u}{2} |u| + C_M \frac{\pi}{4} D^2 \rho u \quad (5)$$

其中 u 为海水流体质点的速度； C_M ， C_D 分别为质量系数和阻力系数。

因为水质点的运动并不是随机的，而是存在周期性，由此可知，在海流和海浪作用下的水下传感器节点的运动也具有一定的周期性，针对式(4)中的波浪矢量表达式，这里可以得到水下水声 MODEM 的运动速度矢量表达式：

$$\mathbf{V}_{\text{MODEM}} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^N C_i \cos(k_{w_i}x - wt) \\ 0 \\ \sum_{i=1}^M D_i \sin(k_{w_i}x - wt) \end{pmatrix} \quad (6)$$

即水下物体的运动方程可简化为 $N(M)$ 个简单规则周期运动方程的叠加。对于本文的实验场景, 因为水声 MODEM 是系泊在海面浮标之下的, 其在 z (深度) 方向的运动速度和位移对于时延的影响可以忽略, 因此, 可以将式(6)的速度矢量进一步简化为式(7)。

$$\mathbf{V}_{\text{MODEM}} = \begin{pmatrix} A \cos(\omega_a t) + B \cos(\omega_b t) + C \cos(\omega_c t) \\ + D \cos(\omega_d t) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

3.4 线性预测算法

由上述的运动模型可以认为理想的水下节点运动具有半周期性特征, 由此考虑借助 AR 模型与线性预测算法估计节点的运动位置, 进而减小运动节点的空间不确定性。

通过上述节点运动特性的分析, 这里采用全极点模型对节点运动进行预测, 即采用 AR 模型预测。首先将时间划分为多个预测窗口, 每个窗口作为一个预测单元, 其长度设为 T_w 。考虑到物体的半周期性运动规律, 这里假设在相邻的预测窗口中, 物体的运动方式基本保持不变, 即 AR 模型的系数不变。由此可以借助当前以及过去窗口的速度预测未来的速度。

所谓线性预测是指未来预测速度是过去窗口速度矢量的线性组合, 即

$$\mathbf{V}(i) = \sum_{m=1}^l a_m \mathbf{V}(i-m) \quad (8)$$

$\mathbf{V}(i)$ 为第 i 个预测单元的速度矢量, 它由前面的 l 个预测窗口的速度矢量决定。 a_m 为预测系数, 在本文中通过 Levison-Durbin 算法求解。

由此, 两点间距离与时延的预测算法如式(9)和式(10):

$$D_T = \int_{T_0}^{T_0+T} \mathbf{V}(t) dt + D_0 \quad (9)$$

$$DL = D_T / V_{sd} \quad (10)$$

4 运动预测协议 P-MAC

在 P-MAC 中, 采用交换预约包的方式完成信息交换。为了节能, 节点周期性监听/休眠, 每个节

点任意设定开启时间, 避免了全网同步对定时的精确要求。节点通过周期广播的方式通知邻节点自己的开启策略。节点通过周期探测与预测相结合的方式存储并更新邻节点信息表。P-MAC 的实现分为 3 步: 周期性运动预测与更新时延表; 周期广播; 周期操作。

4.1 周期性运动预测与更新时延表

P-MAC 算法能减小节点运动对多址接入影响的核心在于, 节点在发送控制包时, 首先要获得节点间的时延信息, 保证控制包能在接受节点的监听窗口的响应时刻到达。节点间的时延信息(表 1 中的 DL)通过式(8)-式(11)的运动预测算法获得。

表 1 邻节点时延与速度信息表

邻节点 ID	当前距离 / 时延	速度矢量
N_1	D_1/DL_1	$\mathbf{V}_{x1}(i-m) _{m=1}^j, \mathbf{V}_{y1}(i-m) _{m=1}^j$
N_2	D_2/DL_2	$\mathbf{V}_{x2}(i-m) _{m=1}^j, \mathbf{V}_{y2}(i-m) _{m=1}^j$
N_3	D_3/DL_3	$\mathbf{V}_{x3}(i-m) _{m=1}^j, \mathbf{V}_{y3}(i-m) _{m=1}^j$
...

每个节点保存有如表 1 的邻节点信息表。当节点间需要发送控制包/数据包时, 发送方查询两节点之间的时延数据, 以保证发送的数据包能在指定时刻到达目的节点。

通过运动预测的方式可以保证在短时间内节点间距离/延迟信息的精度, 但随着时间的增加, 环境因素有可能发生变化, 此时需要通过发送时延探测包更新距离/时延信息与速度矢量信息。

4.2 周期广播

周期广播的目的是通知所有邻节点自身的监听/休眠周期。当节点接收到广播包后记录下其所有邻节点的监听/休眠时间表, 如表 2 所示。

表 2 邻节点监听/休眠表

邻节点 ID	ON/OFF
N_1	$T1_{on}/T1_{off}$
N_2	$T2_{on}/T2_{off}$
...	...

通过周期运动预测与周期广播监听/休眠时间表, 当节点需要发送控制包/数据包时, 可以通过查询表 1 和表 2, 保证所发包在要求的时隙内到达目的节点。

例如节点 N_1 需要向节点 N_2 发送一个数据包，并且希望数据包在 N_2 开启时即刻到达，如图 3 所示。 N_1 通过查询表 1 获取 N_1 与 N_2 的延迟 DL_2 ，查询表 2 获取 N_2 的开启时间 $T2on$ ，可以计算出 N_1 应该在： $t = (T2on - DL_2)$ 时刻发送该数据包。

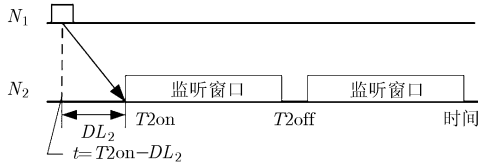


图3 数据包发送时间计算

4.3 预约发送

与基于预约类的其他协议类似，P-MAC 协议是通过 REV/ACK-REV/DATA/ ACK-DATA 这 4 类包的交换完成通信过程。下面将介绍这 4 类包以及发送流程。

(a)REV(Reservation packet)

当一个节点有数据需要传输时，首先通过发送 REV 包进行预约，发送 REV 包时需要通过图 3 中的算法保证该包能够在目的节点的监听窗口到达。包格式参见图 4。

帧控制 4 bit	缓存区数据包长度 4 bit	目的地址 12 bit	源地址:12 bit	校验码 8 bit
-----------	----------------	-------------	------------	-----------

图4 REV包格式

(b)ACK-REV(Acknowledge-Reservation packet)

它是所有控制包中优先级最高的，因为 ACK-REV 的丢失很可能造成后续的数据包发送时发生碰撞，它包含有后续 DATA 包发送时间的信息。所有节点的监听窗口中预留第 1 个时隙供 ACK-REV 包使用，目的节点发送的 ACK-REV 包通过图 3 中时延算法保证在该时隙到达所有节点，收到 ACK-REV 的节点(除源节点)将停止发送数据。包格式参见图 5，目的节点需要向每一个邻节点发送 ACK-REV 包。

(c)DATA(DATA packet)

收到自身发出的 REV 的确认后，源节点将按照目的节点在 ACK-REV 包中安排的时间发送 DATA。

帧控制 4 bit	开始接收数据时间 4 bit	目的地址 12 bit	源地址:12 bit	校验码 8 bit
-----------	----------------	-------------	------------	-----------

图5 ACK-REV包格式

(d)ACK-DATA(Acknowledge-DATA packet)

目的节点接收到数据包后，向源节点发送 ACK-DATA 进行确认，一次完整的通信过程完成。

图 6 是 P-MAC 预约发送的流程图。

5 实验与仿真

5.1 仿真场景设定

参照文献[12]中近海环境中水下物体运动实测速度，结合式(7)，本文后续试验的运动模型设置如式(11)。水下物体运动模型是 4 个简单规则波叠加，周期均值分别为 15 s, 5 s, 1 s, 0.5 s。水下物体运动仿真方程如式(11)：

$$V_{MODEM} = \begin{pmatrix} A \cos(\omega_a t) + B \cos(\omega_b t) + C \cos(\omega_c t) \\ + D \cos(\omega_d t) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (11)$$

其中的 $A, B, C, D, \omega_a, \omega_b, \omega_c, \omega_d$ 为随机变量，服从标准正态分布。

本文参照 LinkQuest^[13] 的 UWM1000 水声 MODEM 的参数设定传感器节点：发送功率 2 W，接收功率 0.75 W，休眠功率 8 mW。比特率 10 kbps，休眠-监听周期 1 s，其中监听时间 100 ms。控制包长度 5 Byte，数据包长度 60 Byte。网络拓扑采用星型结构，如图 7 所示。其中 N_0 是数据汇集节点，只接收数据； N_1-N_4 是数据采集节点，只发送数据。图 7 中坐标表示节点初始位置。

5.2 节点运动对MAC协议的影响

从第 2 节的分析可以得出，节点运动会造成控制包碰撞概率的增加和预约失效等一系列问题，利用 NS-2 仿真软件模拟运动场景下预约类协议的网络的性能(以 R-MAC 为例)。图 8 对比了静态网络和动态网络的两种场景下的收包成功率(PRR)，从图中可以看到，受运动影响的网络其 PRR 值明显低于静态网络。当发包速率小于 0.1 packet/s 时，两者相差约 30%，随着发包速率的增加，差距有所减小，后稳定于 20%左右。这是因为随着发包速率的增加，业务趋于吞吐量上限，丢包率受到节点运动及网络吞吐量两个因素制约，可以看到在相同的发包速率下，节点运动造成的位置的不确定性，最终会导致约 20%的额外丢包率。

5.3 线性预测算法性能

这一节的实验主要是对 AR 模型线性预测算法的精度做出评价。对于式(10)采用 Levison-Durbin 递推算法得到其 AR 模型预测系数，预测窗口根据运动模型分别设定为 15 s 和 20 s，预测阶数 L 为 5。图 9(a), 9(b)分别是由运动方程式(10)产生的随机运

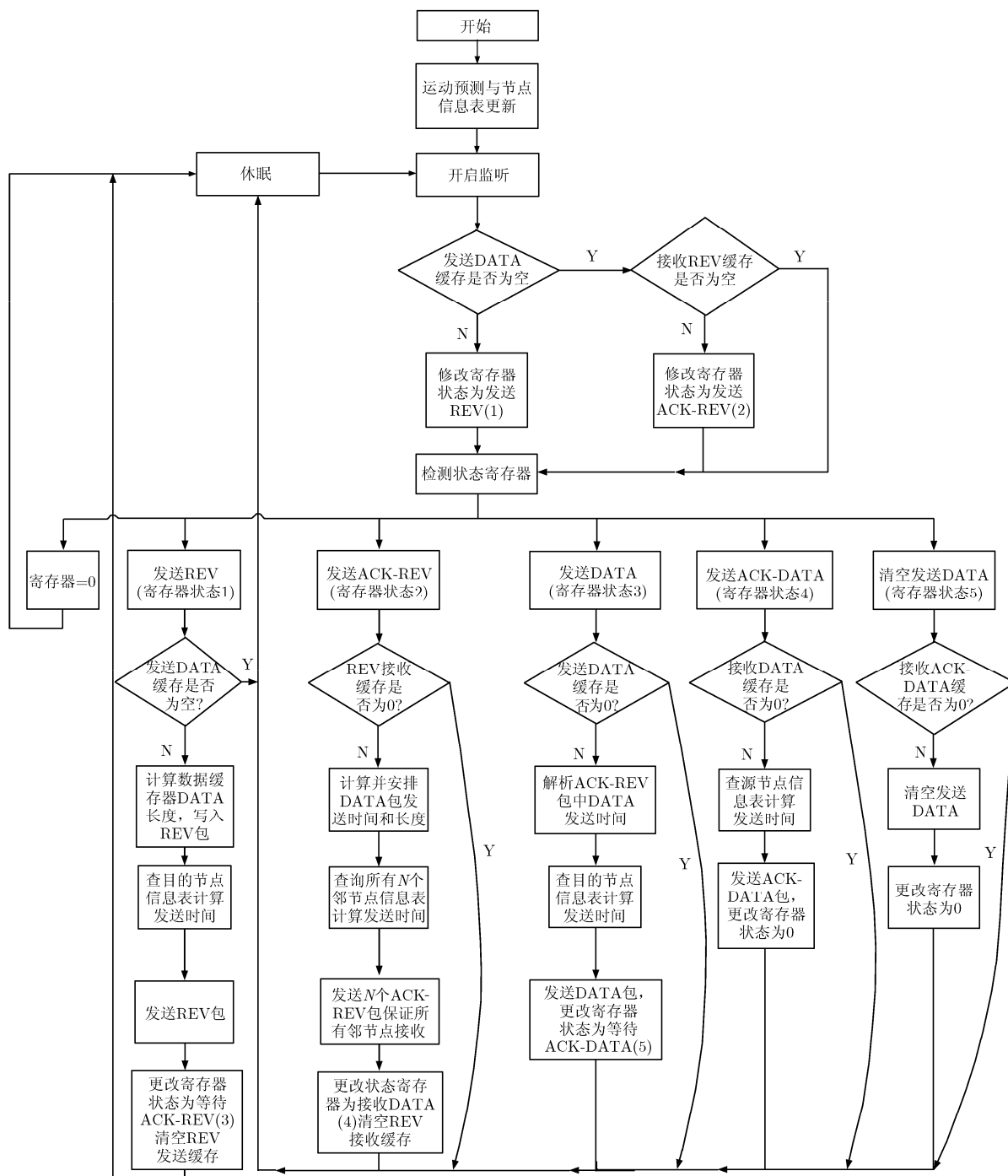


图6 P-MAC 协议流程图

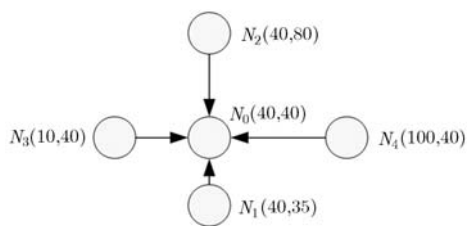


图7 网络拓扑图

动轨迹和由采用五阶 AR 全极点模型预测算法预测的运动轨迹图的对比。试验预测了从当前时刻到未

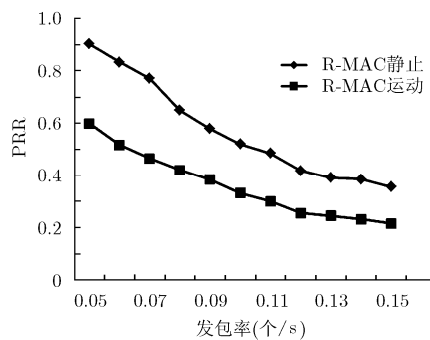


图8 运动场景对 R-MAC 协议的影响

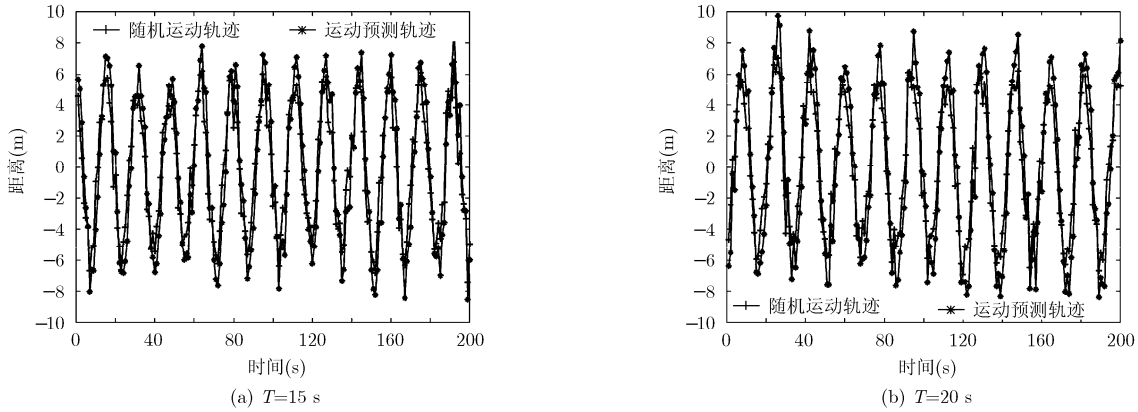


图9 随机运动轨迹与预测轨迹

来 200 s 的运动轨迹。

通过对上述两种周期运动轨迹的随机运动轨迹图和预测轨迹图的对比可以看出，采用五阶 AR 模型预测算法能反映水下物体周期性运动的规律。通过对 100 次随机仿真结果的统计表明，预测 15 s 海浪周期，其单步预测的平均绝对误差值为 1.042 m；单步预测平均绝对时间误差值为 0.695 ms；单步距离预测平均绝对百分比误差为 2.17% (平均距离 50 m)；而未采用预测算法的对应 3 个值分别为：3.915 m, 2.610 ms 和 7.89%，时延探测精度提高了 74.8%。所以从上述 3 个具有关键意义的统计数值可知，AR 模型预测算法可以在很大程度上减小节点间时延计算误差，以及减小节点空间不确定性的不利影响。

5.4 P-MAC 算法性能

鉴于 P-MAC 主要解决水下网络可靠多址接入的问题，这里将收包成功率 (PRR) 作为衡量 P-MAC 协议的重要指标。实验中采用 R-MAC 作为比较对象。仿真时间 2000 s，比较在不同发包率条件下两个协议的 PRR 值。

图 10, 图 11 表明, P-MAC 始终具有比 R-MAC 更高的 PRR 值。根据图 10 中给出的 PRR 曲线进行分析, 在数据率较低的初始阶段, 两类协议的 PRR 值相差约 15%, 随着发包率的增加, 采用两类

协议的网络分别达到其网络吞吐量的上限, 其 PRR 值差值在 10% 左右。虽然对比于静态网络 20% 的差值仍有差距, 但通过采用预测算法后的 P-MAC 协议已经在一定程度上减小了节点运动对网络造成的不利影响。

P-MAC 之所以较 R-MAC 协议在 PRR 的统计上有 10%~15% 的提高, 是因为通过节点自身的位置预测算法, 其时延探测和数据包收发的时间策略安排上的精度大大提高, 使控制包和数据包以更高的概率落入预约时隙, 更接近于静态网络性能, 在很大程度上避免了运动造成的预约失效和数据碰撞问题。

图 12 是模拟 20 s 海浪周期下 P-MAC 协议与 R-MAC 协议 PRR 仿真图, 其中加入了 15 s 海浪周期的 P-MAC 作为对比 (虚线表示)。从图中可以看出, 新协议仍然比现有的 R-MAC 协议获得高 10% 以上的收包成功率。同时还可以看到, 20 s 周期下 P-MAC 的收包成功率比 15 s 周期下略有提高, 这是因为周期增大使得物体运动状态变化减缓, 降低了预测难度; 另一方面, 周期增大导致预测窗口和预测周期增大, 从而提高了预测精度。

5.5 能耗与复杂度分析

仿真表明, 新协议与 R-MAC 协议相比在数据

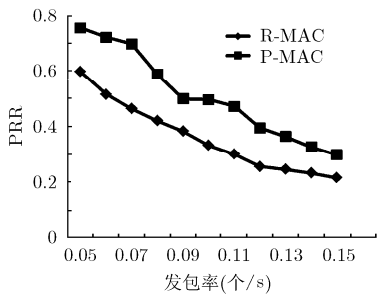


图10 R-MAC和P-MAC网络收包成功率对比(T=15 s)

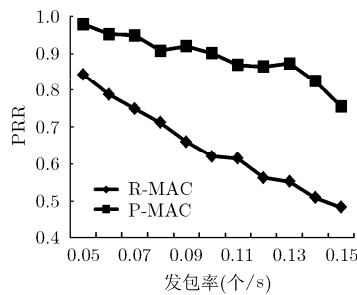


图11 R-MAC和P-MAC Node2收包成功率对比

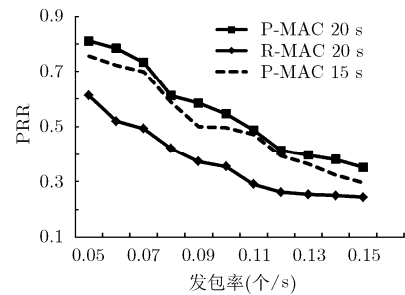


图12 R-MAC和P-MAC网络收包成功率对比(T=20 s)

包发送成功率上有明显提高,这得益于运动预测算法的采用。但另一方面,由于周期性的运行预测算法,势必会增加系统的复杂度以及更多的计算能耗。由于采用相对成熟的 L-D 预测算法,并且较低的预测阶数即能够获得较好的预测精度,同时鉴于水下传感器节点采用高性能的 DSP 芯片,预测算法的复杂度远小于信道估计等所需计算消耗,所以预测计算开销并不会大幅度增加系统负担。从能耗方面,虽然复杂的计算会增加系统能耗,但另一方面,更高的发包成功率又大大节约了能量,从这个角度来说,这是一个比 R-MAC 更节能的协议。

6 结束语

本文讨论了受到自然环境影响的动态 UWSN 中节点运动对传统 MAC 协议的冲突避免机制的破坏作用,通过理论和仿真实验证明了水声通信条件下,节点运动对网络 PRR 性能有较大影响。为了克服水下 MAC 协议对于环境的依赖性,提出了采用运动预测方式减小数据包发送的时空不确定性对 MAC 协议的影响,提高了数据包在预约时隙到达目的节点的概率。通过实验证明了 AR 模型运动预测算法可以大大减小节点位置信息的不确定性;并在此基础上提出了基于运动预测的 P-MAC 协议。新协议采用预测算法周期性更新节点位置信息,保证了节点间位置信息的精度,同时保留了现有水下网络预约类协议优点。实验结果表明,采用运动预测方式的 P-MAC 协议能有效减小由运动造成的丢包问题,同时通过设置不同运动周期,模拟了不同自然条件下 P-MAC 的性能,以此证明了新的协议能够在多种自然环境下获得比现有 MAC 协议更高的收包成功率。

本论文研究的运动模式主要是受自然因素影响,运动速度较低,不确定性大。未来随着 AUV (Autonomous Underwater Vehicle), UUV (Unmanned Underwater Vehicle) 的广泛使用,UWSN 运动模型趋向多样化、复杂化,其网络运动模式既包含了受自然环境作用的被动运动,又将包含节点自身的主动运动,这种混合网络的运动预测难度也将加大,需要更高效的预测算法,相信采用了更为有效的运动预测算法后将对新网络的性能提升有更大贡献。

参 考 文 献

- [1] Cui J-H, Kong J, Gerla M, *et al.* The challenges of building scalable mobile underwater wireless sensor networks for aquatic applications[J]. *IEEE Network*, 2006, 20(3): 12-18.
 - [2] Macias Elsa, Suarez Alvaro, Chiti Francesco, *et al.* A hierarchical communication architecture for oceanic surveillance applications[J]. *Sensors*, 2011, 11(12): 11343-11356.
 - [3] Heidemann J, Ye Wei, Wills Jack, *et al.* Research challenges and applications for underwater sensor networking[C]. Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Las Vegas, USA, 2006: 228-235.
 - [4] 罗武胜, 翟永平, 鲁琴. 无线多媒体传感器网络研究[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(6): 1511-1516.
Luo Wu-sheng, Zhai Yong-ping, and Lu Qin. Study on wireless multimedia sensor networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(6): 1511-1516.
 - [5] Keshtgary Manijeh, Javidan Reza, and Mohammadi Reza. Comparative performance evaluation of MAC layer protocols for underwater wireless sensor networks[J]. *Modern Applied Science*, 2012, 6(3): 65-72.
 - [6] Chen Kai, He Jianhua, and Guan Haibing. Enhanced slotted aloha protocols for underwater sensor networks with large propagation delay[C]. Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Yokohama, Japan, 2011: 1-5.
 - [7] Vieira L F M, Kong J, Lee U, *et al.* Analysis of aloha protocols for underwater acoustic sensor networks[OL]. http://wuwnet.engr.ucom.edu/wiposters/luiz_aloha.pdf, 2012.
 - [8] Peng Zheng, Zuba M, and Cui Jun-hong. Improving aloha via backoff tuning in underwater sensor networks[C]. Communications and Networking in China (CHINACOM), Harbin, China, 2011: 1038-1043.
 - [9] Xie P and Cui J-H. R-MAC: an energy-efficient MAC protocol for underwater sensor networks[C]. Proceedings of the Wireless Algorithms, Systems and Applications, Chicago, USA, 2007: 187-198.
 - [10] Hong Lu, Hong Feng, and Guo Zhong-wen. HCR: a hybrid MAC protocol for underwater sensor networks using channel reservation[J]. *International Journal of Computers and Applications*, 2011, 33(2): 154-159.
 - [11] 文圣常, 余宙文. 海浪理论与计算原理[M]. 北京: 科学出版社, 1984: 24-26.
Wen Sheng-chang and Yu Zhou-wen. Ocean Waves Theory and Calculate Principle[M]. Beijing: Science Press, 1984: 24-26.
 - [12] Morison J R, O'Brian M P, Johnson J W, *et al.* The forces exerted by surface waves on piles[J]. *Petroleum Transactions, AIME*, 1950, 189: 149-157.
 - [13] LinkQuest[OL]. <http://www.link-quest.com/>, 2012.
- 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。
- 苏毅珊: 男, 1985 年生, 博士生, 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。
- 窦 飞: 女, 1990 年生, 硕士生, 研究领域为水下传感器网络、网络设计与优化等。