

# 一种吞吐量稳定能量节省的 MAC 协议

齐 放<sup>1,2</sup>, 郭圣明<sup>1</sup>

(1. 中国科学院声学研究所水声环境特性重点实验室, 北京 100190; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100190)

**摘要:** 数据链路层协议是水声通信网研究的一个重要内容。海洋水声信道的传输条件十分恶劣, 是一个随时空频变、强多径干扰、长传输时延、高环境噪声、可用带宽非常有限的信道。传统的无线网络协议不能直接应用于水声环境中。T-Lohi 是为分布式、短距离、密集型网络设计的一种数据链路层协议。它采用唤醒信号来进行信道的预约, 防止数据的碰撞。理论分析和仿真结果表明, 对于分布式、短距离、密集型网络, T-Lohi 能提供吞吐量稳定、能量利用率高的网络服务。

**关键词:** T-Lohi; 唤醒信号; 信道预约

中图分类号: O429

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2010)-03-0272-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2010.03.007

## A stable energy-efficient MAC protocol

QI Fang<sup>1,2</sup>, GUO Sheng-ming<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Underwater Acoustic Environment, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;  
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** Data-link protocol is important in the study of underwater acoustic networks. Traditional wireless network protocols can't be used in underwater environment directly. T-Lohi is a data-link protocol designed for distributed, short-range, dense networks. To prevent collision, T-Lohi uses wake-up tone to reserve the channel. Simulations show that T-Lohi can provide stable and energy-efficient services for distributed, short-range, dense networks.

**Keywords:** T-Lohi; wake-up tone; channel reservation

## 1 引言

近年来, 随着世界各国海洋开发步伐的加快, 对水下传感器网络、水下监视系统、水声预警网络的需求愈来愈迫切, 水声通信网络成为了世界范围内的研究热点<sup>[1,2]</sup>。数据链路层协议是水声通信网研究的一个重要内容。与无线电波传输信道相比, 海洋水声信道的传输条件十分恶劣, 是一个随机时空频变、强多径干扰、长传输时延、高环境噪声、可用带宽非常有限的信道<sup>[3]</sup>。传统的无线网络协议不能直接应用于水声环境中。在设计水声网络协议时, 应该考虑水声通信的特点, 在网络延迟、传输成功率及能耗之间寻求一种好的折衷<sup>[1,2]</sup>。

T-Lohi 是为分布式、短距离、密集型网络设计的一种信道利用率有效、吞吐量稳定、低能耗的 MAC 层协议<sup>[4]</sup>。本文对 T-Lohi 的性能进行了理论分析和仿真, 并给出了仿真结果。

## 2 网络设计

水声通信网是借助声信号建立起来的无线网络。它一般由布放在海底或水层中的传感器节点、自治水下潜器(AUV)以及海面站节点等组成。通常假定在通信半径范围内的两个节点可以相互通信, 并且节点之间建立的是双向通信链路。每个节点仅有一部收发信号机, 工作在半双工模式, 节点有不同的本征号(ID)。

### 2.1 网络拓扑

本文讨论的网络是一个分布式网络拓扑结构。它是一个全连接对等网络, 网络中各节点间都能进行直接通信, 因此, 这种网络不需要路由选择算法, 要求每个节点的发射功率大, 适用于小范围的水下信息网络。

### 2.2 网络结构

本文研究的水声网络是一种分层结构, 与 ISO 参考模型类似, 分为物理层和数据链路层两层。物理层负责数据的调制解调, 在发送端把数字信息转换成能在水声信道中传输的声信号, 在接收端检测

收稿日期: 2009-12-03; 修回日期: 2010-03-25

作者简介: 齐放(1985-), 女, 湖北当阳人, 硕士研究生, 研究方向为水声通信。

通讯作者: 齐放, E-mail: qf1985@126.com

被噪声及其他信道失真畸变的信号并把信号恢复成数字信息。

物理层的上一层是数据链路层。该层的主要功能是成帧、差错控制和流量控制等。成帧就是规定分组的信息序列、同步序列、源地址、目的地址及其它控制信息。数据链路层的差错控制通常是通过循环冗余校验(CRC)来实现的,校验的冗余位添加在分组中,以便在接收机中校验收到的分组中的差错。下面讨论我们仿真研究的数据链路层协议——T-Lohi。

### 2.3 协议概述

T-Lohi 协议是基于竞争的 MAC 层协议。它使用预约来防止数据包的碰撞,信道预约采用短的唤醒信号,预约过程是完全分布式的。通过运用短的唤醒信号和低功率的唤醒信号接收器,来达到节省能量的目的。

#### 2.3.1 基于唤醒信号的信道预约

图 1 显示了 T-Lohi 竞争发送的过程。每一帧数据的发送都需经过预约期(RP)和数据发送期。预约期包含了若干轮竞争期(CR)。竞争节点在一轮 CR 期间发送短的唤醒信号,并对这轮 CR 中收到的竞争信号的个数(CTC)进行计数。如果这轮 CR 结束,CTC 大于 1,它们就在 $[0,CTC]$ 间随机选择一个整数  $w$ ,回退  $w$  个 CR,重新竞争。如果一个节点在 CR 中没有接收到来自别的节点的竞争信号,那么 CTC 等于 1,它在竞争中获胜,RP 结束,获胜节点发送数据包。CR 要设置的足够长,使节点能完成信号的监听(CTD)和 CTC 的计数的工作。



图 1 T-Lohi 竞争发送的过程

Fig.1 The process of sending a frame in T-Lohi

当信道中有大量噪声的时候,噪声可能会被当作是竞争信号,从而延迟预约时间,降低吞吐量。

#### 2.3.2 数据传输

为了节省能量,在空闲状态,数据接收器和主 CPU 都尽可能地保持关闭状态,只有当低功率的唤醒接收器接收到唤醒信号的时候才会启动。在发送数据前,先发一个唤醒信号,让发送方来负责唤醒接收方。因此,即使在预约阶段,每个节点在接收到唤醒信号以后,需要检查数据信道有没有侦听到信号。如果没有,就认为这个信号是竞争信号;否则,节点解析出数据头,如果目标地址不是它,就

回到睡眠状态。

为了降低空间的不公平性,协议抑制竞争成功的节点连续发送数据。

#### 2.3.3 T-Lohi 的种类

T-Lohi 的预约机制处理了节点怎样竞争信道和获取信道的问题。回退机制解决了怎样利用 MAC 层的信息(如 CTC),竞争失败怎样行动以及新一轮的竞争怎样开始的问题。下面定义了三种 T-Lohi,它们实现的需求不同,因此,具体的预约机制不同,也导致了网络性能不同。

##### (1) 同步 T-Lohi(ST-Lohi):

ST-Lohi 假定所有的节点都是时间同步的。这个假定简化了每轮竞争在参考时间上的考虑。

ST-Lohi 将所有的通信时间(竞争以及数据传输)分成时隙。一轮竞争的持续时间是:

$$CR_{st} = t_{max} + t_{tone} \quad (1)$$

式中,  $t_{max}$  表示单程最长的传播延迟,  $t_{tone}$  表示节点要侦听到消息的反应时间。

竞争信号都只在每个 CR 的开始发送,所以它们在 CR 结束前都会到达其它节点然后被它们探测到,所以 ST-Lohi 可以收敛,提供无碰撞的数据传输。

##### (2) 保守非同步 T-Lohi(cUT-Lohi)

ST-Lohi 能够让我们简单地估计竞争者的行为。然而事实上,维持时间同步需要额外的运行时负载,也会增加协议的复杂度。因此,我们提出了保守的非同步协议。

在 cUT-Lohi 中,任何时间当节点有数据要发送并且信道空闲的时候,它就开始发送竞争信号。为了在同一轮 CR 中提供像 ST-Lohi 一样的探测保护,cUT-Lohi 必须保证:

$$CR_{cUT} = 2t_{max} + 2t_{tone} \quad (2)$$

考虑图 2 的情况,节点 C 在时间点  $t_c$  发送了一个竞争信号。在最坏的情况下,第二个竞争者 A 在  $t_c + t_{max} + t_{tone} - \epsilon$  (这是最长的 A 听不到 C 的竞争信号的时间)的时候发送了它的竞争信号。之后, A 的竞争信号就会在  $t_c + 2t_{max} + 2t_{tone} - \epsilon$  的时间被 C 侦听到。与 ST-Lohi 不同,cUT-Lohi 没有同步中的一轮竞争的概念。

##### (3) 快速非同步 UT-Lohi(aUT-Lohi)

虽然 cUT-Lohi 完全避免了碰撞,但是它的长 CR 却降低了吞吐量。aUT-Lohi 遵循了 cUT-Lohi 的思想,但它将一轮竞争的时间降低为:

$$CR_{aUT} = t_{max} + t_{tone} \quad (3)$$

cUT-Lohi 长时间监听的目的是为了侦听到最坏情况的竞争信号。在 aUT-Lohi 中, 时间的延迟来源于信号的侦听(和前面的一样)、竞争信号和数据的碰撞以及数据和数据的碰撞, 这主要由发送者和接收者之间的相对距离来决定。

考虑图 2 的情况, 在  $CR_{aUT}$  内, A 不会听到来自 B 的竞争信号, 因此 A 假定它自己已经获得了信道的所有权并在  $t_{tx,c} + CR_{aUT}$  的时候开始发送数据。B 的信号和 A 的数据可能会在某个处于 A 的阴影区域中的节点处发生碰撞(信号与数据的碰撞), 但是会在其它节点被分别接收。同样, B 会听到 A 的信号并开始回退。文献[4]的仿真表明这种情况发生的概率很小, 只会丢失很少的包。

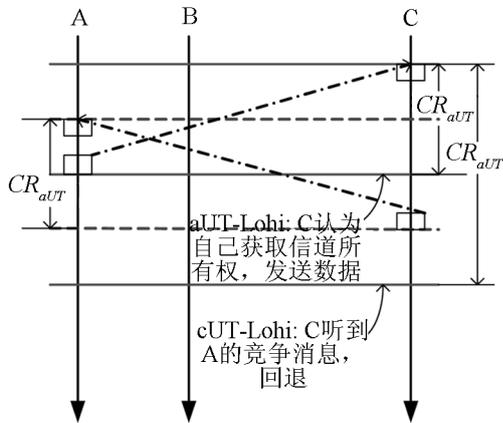


图 2 A 与 C 异步的情况

Fig.2 Asynchronous situation of node A and C

### 3 性能分析及仿真

仿真在 Mil3 的网络仿真软件 Opnet Radio Modeler 上进行。为了进行水下声信道条件下的网络仿真, 对 Radio Modeler 中的 pipeline stage 的相关参数进行了设置, 使其能体现水声信道长传输延时、强衰减等特点<sup>[5]</sup>。

仿真设计了一个传统的声通信网络, 并假定节点间已经预先时间同步好了。为了考察协议性能, 我们先暂时不考虑因为噪声和多途产生的包丢失的情况。我们将节点随机的布置在一个  $300m \times 400m$  的区域内。节点的通信半径为  $500m$ , 使得各节点间都能直接通信。仿真参数设置如下: 声调制解调器的数据速率设为  $8kb/s$ ; 数据包长度为  $650byte$ , 即包的发送时间是  $650ms$ ; 信号检测时间为  $5ms$ 。包的产生遵循 Poisson 分布。信号发送功率为  $2W$ , 数据接收功率为  $20mW$ , 唤醒信号接收功率为  $0.5mW$ 。

### 3.1 网络吞吐量

假定一个区域内有  $N$  个节点, 互相都可达。设协议运行平稳时,  $k$  个节点同时竞争发送的情况下, 整个网络成功发送一个包, 需平均回退  $sn_k$  个时隙。则有:

$$sn_N = \sum_{k=1}^{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} (PSuc_N^{k,i} * (i + sn_k)) + \sum_{i=1}^N (PSuc_N^{N,N} * (i + sn_N)) \quad (4)$$

其中,  $PSuc_N^{k,i}$  表示  $N$  个节点中有  $k$  个节点在第  $i$  个时隙竞争成功的概率:

$$PSuc_N^{k,i} = C_N^k * (\frac{1}{N})^k * (\frac{N-i}{N})^{N-k} = \frac{C_N^k * (N-i)^{N-k}}{N^N} \quad (5)$$

简化式(4), 可得:

$$sn_N = \frac{\sum_{k=1}^{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} (C_N^k * (N-i)^{N-k} * (i + sn_k)) + \frac{N * (N+1)}{2}}{N^N - N} \quad (6)$$

设  $t_{slot}$  为一轮 CR 所需的时间,  $n_{data}$  为数据发送期所占的时隙数, 则平均吞吐量(单位: packet/s)可以表示为:

$$th_N = \frac{1}{(1 + sn_N + n_{data}) * t_{slot}} \quad (7)$$

取  $t_{slot} = 0.4s$ ,  $n_{data} = 3$ , 由  $sn_1 = 0$  递归计算, 得到的节点数和网络稳定时的平均吞吐量的关系图如图 3 所示。从图 3 可以看出, 即使节点数增多到 100 个, 网络的平均吞吐量仍能稳定到 0.378 以上。

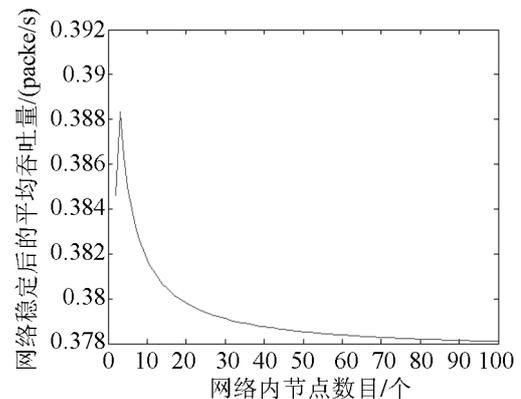


图 3 区域内的节点数和网络吞吐量的关系图

Fig.3 Theoretical throughput as N varies

分别仿真区域内有 3 个节点和 8 个节点的网络, 得到的负载和平均吞吐量的关系图如图 4。可以看出, 不管是 3 个节点还是 8 个节点, 当负载增大到满负荷运行时, 吞吐量都能稳定在 0.38 左右, 与前面的理论计算结果相符。

### 3.2 能量利用率

设协议运行平稳时,  $k$  个节点同时竞争发送的情况下, 整个网络每成功发送一个包, 平均碰撞  $cn_k$

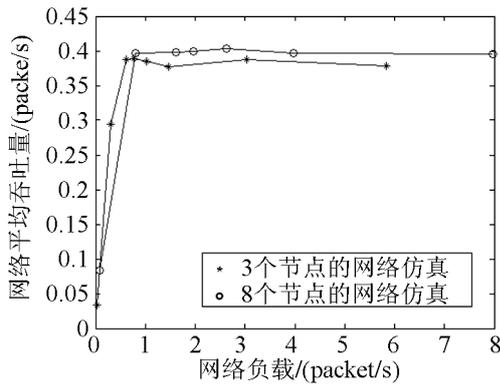


图4 网络负载和平均吞吐量的仿真关系图  
Fig.4 Throughput as load varies in simulation

次, 则有式(8):

$$cn_N = \sum_{k=1}^{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} (PSuc_N^{k,i} * (k + cn_k)) + \sum_{i=1}^N (PSuc_N^{N,N} * (N + cn_N)) \quad (8)$$

简化之, 可得:

$$cn_N = \frac{\sum_{k=1}^{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} (C_N^k * (N-i)^{N-k} * (k + cn_k)) + N^2}{N^N - N} \quad (9)$$

设发送、接收唤醒信号和数据所需要的能量分别表示为  $en_{tx\_tone}$ 、 $en_{tx\_data}$ 、 $en_{rv\_tone}$ 、 $en_{rv\_data}$ , 则能量利用率(单位: %)可以表达为:

$$en_N = \frac{(en_{tx\_data} + en_{rv\_data}) / ((N + cn_N) * (en_{tx\_tone} + (N-1) * en_{rv\_tone}) + en_{tx\_data} + (N-1) * en_{rv\_data})}{1} \quad (10)$$

取  $en_{tx\_tone} = 2mJ$ 、 $en_{tx\_data} = 1.3J$ 、 $en_{rv\_tone} = 0.5 * 10^{-3} mJ$ 、 $en_{rv\_data} = 13mJ$ , 由  $cn_1 = 0$ , 递归计算, 得到的节点数和网络稳定时的能量利用率的关系图如图5所示。由图5可见, 即使节点数增多到100个, 网络的能量利用率仍能稳定到92%以上。

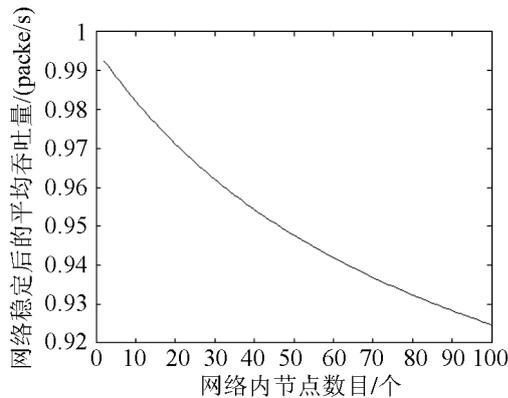


图5 区域内的节点数和能量利用率的关系图  
Fig.5 Theoretical energy utilization as N varies

分别仿真区域内有3个节点和8个节点的网络, 得到的负载和能量利用率的关系图如图6。可以看出, 当负载增大到满负荷运行时, 三节点网络的能量利用率稳定在99%左右, 八节点网络的能量利用率稳定在98.6%左右, 与前面的理论计算结果相符。

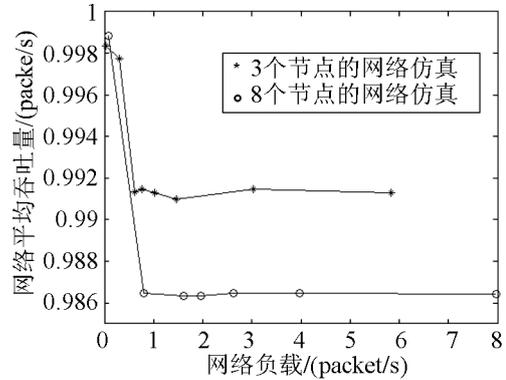


图6 网络负载和能量利用率的仿真关系图  
Fig.6 Energy utilization as load varies in simulation

## 4 结论

T-Lohi 协议是一种分布式的基于竞争的 MAC 层协议。它通过信道预约来防止数据包的碰撞, 运用短的唤醒信号和低功率的唤醒信号接收器来达到节省能量的目的。理论分析和仿真结果表明, 对于分布式、短距离、密集型网络, T-Lohi 能提供吞吐量稳定、能量利用率高的网络服务。

### 参 考 文 献

- [1] Ethem M. Sozer, Milica Stojanovic, John G. Proakis. Underwater acoustic networks[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2000-01, 25(1): 72-83.
- [2] Rice J, Creber B, Fletcher C, et al. Evolution of seabed underwater acoustic networking[A]. Oceans 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition[C]. Providence, RI, 2000-09, 3(11-14): 2007-2017.
- [3] Urlick R. Principles of underwater sound[M]. New York: McGraw-Hill, 1983. 1-424.
- [4] Affan A Syed, Wei Ye, John Heidemann. T-Lohi: A new class of MAC protocols for underwater acoustic sensor networks[A]. To appear in Proceedings of the IEEE Infocom[C]. Pheonix, AZ, 2008-04,
- [5] Ethem M. Sozer, Milica Stojanovic, John G. Proakis. Design and simulation of an underwater acoustic local area network[A]. OP-NETWORK'99[C]. Washington, DC, 1999-08. 1-5.