

# M-TDMA: 基于 TDMA 协议的高效水下 传感器网络 MAC 协议

冯德海, 刘广钟

(上海海事大学 信息工程学院, 上海 201306)

**摘要:** TDMA 是基于固定分配的 MAC 协议, 网络中不需要控制信息就能避免节点间出现的数据碰撞问题, 是一种简单而成熟的信道分配机制。由于水下水传感器网络的高延时和网络传输的易干扰性, 使得水下水传感器网络信道的传输效率较低。文中提出一种新型的水下无线传感器网络数据发送传输协议(M-TDMA), 解决传统 TDMA 协议水下信道利用率不高的问题。同时对网络进行拓扑扩展, 拓展了网络的实际应用范围, 以及制定了可行的网络时钟同步机制。仿真实验表明, 该协议能有效提高水下信道的利用率, 具有更好的性能。

**关键词:** 水下水传感器网络; MAC 协议; TDMA 协议; 信道利用率

中图分类号: TP301

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2015)03-0023-05

doi: 10.3969/j.issn.1673-629X.2015.03.006

## M-TDMA: Efficient MAC Protocol for Underwater Sensor Network Based on TDMA Protocol

FENG De-hai, LIU Guang-zhong

(College of Information Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** TDMA is the MAC protocol based on a fixed allocation, the network can avoid data collision problems without control information, which is a simple and sophisticated channel allocation mechanism. Due to the high latency for underwater sensor network and the interference for network transmission, the transmission efficiency of the underwater sensor network channel is low. In this paper, present a new type of network data transmission protocol of the underwater wireless sensor, called M-TDMA, having solved the problem that the traditional TDMA protocol's underwater channel utilization rate is not high. In addition, it also extends the application scope of the network topology and has made a feasible network clock synchronization mechanism. The simulation experiments show that the protocol can effectively improve the utilization rate of the underwater channel with its better performance.

**Key words:** underwater sensor networks; MAC protocol; TDMA protocol; channel utilization rate

## 0 引言

随着人类科学技术的进步, 人们把眼光转向了海洋中丰富的资源。水下水传感器网络能在海洋和比较恶劣的水下环境中工作, 能够进行海洋数据采集、水下监控、环境监测以及军事安全预警等<sup>[1-4]</sup>。水下通信已经成为世界上的热门课题, 越来越多的学者和科学家关注这个领域<sup>[5-6]</sup>。水下水传感器网络既有高集成、自组织、低功耗、低成本等优点, 又有传输时延长、复杂的时变、空变、频变以及可用带宽窄、传播损失严重、多径和多普勒效应严重等缺点<sup>[7-8]</sup>, 这些劣势严重制约着

水下水传感器网络的发展。

现在的水声传感器网络的 MAC 协议可以分为两类: 一类是基于竞争的 MAC 协议; 另一类是基于调度的 MAC 协议<sup>[9]</sup>。基于竞争的 MAC 协议要求节点采用竞争的方式获得信道使用权限, 信息冲突不可避免, 主流的协议有 ALOHA 协议、CSMA 协议、S-MAC 协议、T-MAC 协议及改进协议; 基于调度的 MAC 协议通过控制数据的发送和接收, 可有效地避免数据冲突, 其主要包括 FDMA 协议、CDMA 协议、TDMA 协议及改进协议<sup>[10]</sup>。基于竞争的 MAC 协议, 需要很多的控

收稿日期: 2014-04-01

修回日期: 2014-07-07

网络出版时间: 2015-01-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61202370); 上海市教委科研重点创新项目(12ZZ151); 上海市浦江人才计划项目(11PJ1404300)

作者简介: 冯德海(1986-), 男, 硕士研究生, 研究方向为分布式系统与传感器网络; 刘广钟, 博士, 教授, CCF 高级会员, 研究方向为分布式数据库、计算机网络技术等。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20150120.2159.011.html>

制信息,在高延时的水下网络中,成本很高,使得网络的信道利用率不高。TDMA 协议不需要很多控制信息,且在一个良好的时钟同步网络中就能有效工作,比较适合水下传感器网络。文献[11]提出了基于 MACA 的多跳网络协议,但该方法应用范围非常有限。文献[12]的方法是采用每个节点随机选择时机发送同步信息,该协议利用小占空比减少数据冲突,仅适用于数据率低的情况。

为了解决 TDMA 信道利用率低的问题,文中提出了 M-TDMA(Mix terlearing TDMA, M-TDMA)协议。首先通过对三节点网络进行研究,利用水下传感器网络传输的高延时,合理安排节点的发送和传输,提高信道利用率;再对三节点网络进行环形网络拓扑扩展和制定可行的网络时钟同步机制;最后对 M-TDMA 协议进行仿真验证,验证该协议的可行性和有效性。

## 1 传统 TDMA 协议

传统的 TDMA 协议是基于调度的 MAC 协议。网络中有  $N$  个节点,节点间传输延时  $\tau$  和数据分组的发送时间  $t_{\text{data}}$  之和为  $T$ 。协议规定,网络中最长的  $T$  作为时隙,网络节点依次获得一个时隙来发送数据。这样就可以保证网络中被分配时隙的节点都能完成发送数据给相应节点而不发生冲突,且网络中的每个节点都有发送数据的机会。虽然这样设计能有效避免冲突和节省节点能量,但是一个时隙仅有一个节点发送一次数据,网络信道利用率低。

$$\delta_1 = \frac{t_{\text{data}}}{T} \times 100\%$$

水下传感器网络的通信环境通常是高延时  $\tau \gg t_{\text{data}}$ ,这就使得传统的 TDMA 协议信道利用率较低。

## 2 M-TDMA 协议设计

### 2.1 基本思想

为了提高传统 TDMA 协议的信道利用率,文中提出了一种新协议 M-TDMA。首先介绍两个概念。

(1)冲突:节点不能够同时发送和接收数据,不能够同时接收 2 个以上的数据分组,所有违反这 2 条原则的发送和接收均称为冲突。

(2)被干扰时间段:节点发送数据给接收节点,在某个时间段到达了除接收节点外的其他节点,此时间段为此节点的被干扰时间段。

因为节点间传输存在冲突和干扰,且水下传播的高延时,所以严重影响了水下节点的传输效率。文中先通过以下的例子来引入 M-TDMA 协议的基本思想。

例 1:节点  $A$  与  $B$  正在进行数据传输,节点有相同的数据发送时长  $t_{\text{data}}$ ,节点间传输延时为  $\tau$ 。在一个时间周期里,节点  $A$  和  $B$  发送一连串的数据分组,数据分组数量不能超过  $k$  个。在  $\tau$  后,每个节点开始接收对方的数据分组序列。

$$k = \left\lfloor \frac{\tau}{t_{\text{data}}} \right\rfloor$$

$$\Delta\tau = \tau - k \times t_{\text{data}}$$

$$\delta_2 = \frac{2(\tau - \Delta\tau)}{2\tau - \Delta\tau} \times 100\%$$

其中,  $\lfloor \cdot \rfloor$  表示取整;当  $\Delta\tau = 0$  时,信道的利用率为 100%。

例 2:假设节点  $A$ 、 $B$ 、 $C$  正在进行数据传输,节点发送数据的时长为  $t_{\text{data}}$ ,彼此之间的传输时延都为  $\tau = 3t_{\text{data}}$ 。若节点按照图 1 的传输方案进行传输,信道的理论利用率为 100%。

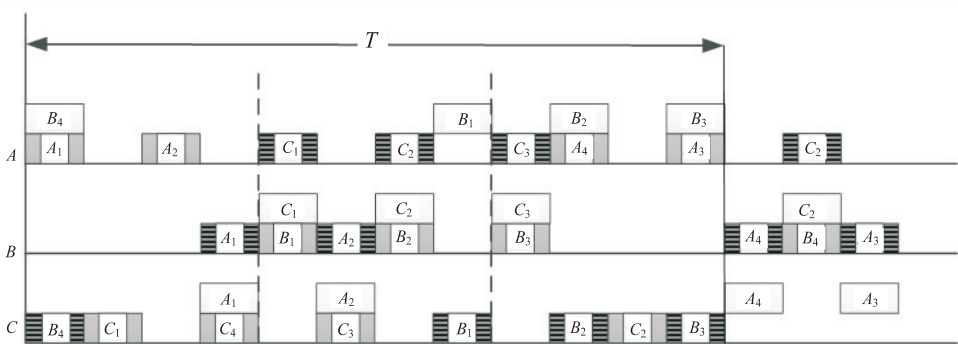


图 1 三节点传输实例

### 2.2 协议描述

通过上面的例子,可以发现,由于水声信道的长传输时延,使得在每个节点分配的时隙中存在着大量的空闲时间。M-TDMA 协议合理地安排节点发送和接收数据分组,大大提高了信道的利用率。下面介绍一个 3 节点网络,节点之间传输延时:  $A \rightarrow B$  为  $\tau_1 = lt_{\text{data}}$ ,

$B \rightarrow C$  为  $\tau_2 = mt_{\text{data}}$ ,  $C \rightarrow A$  为  $\tau_3 = nt_{\text{data}}$ ,节点在水下的传播速度是固定的,所以节点间的干扰延时:  $B \rightarrow A$  为  $\tau_1 = lt_{\text{data}}$ ,  $C \rightarrow B$  为  $\tau_2 = mt_{\text{data}}$ ,  $A \rightarrow C$  为  $\tau_3 = nt_{\text{data}}$ ,用  $\{l, m, n\}$  表示。 $l, m, n$  满足三角形构成原则,即两边之和大于第三边,两边之差小于第三边。为了描述方便,表达式  $F_A = \{ \text{发送} = 0t_{\text{data}}, [m]t_{\text{data}}, \text{接收} = lt_{\text{data}}, (l +$

$[m])t_{\text{data}}$ , 干扰  $= nt_{\text{data}}, ([m] + n)t_{\text{data}}$ 。  $F_A$  的下标“ $A$ ”表示节点  $A$  是发送节点。式子中分为 3 个部分, 依次分别表示发送节点的发送、接收节点的接收以及第三个节点收到干扰的时间段( $A$  发送时,  $B$  接收而  $C$  受到干扰;  $B$  发送时,  $C$  接收而  $A$  受到干扰;  $C$  发送时,  $A$  接收而  $B$  受到干扰)。上式表示, 节点  $A$  在  $t = 0t_{\text{data}}$  时刻开始发送, 直到  $t = [m] \times t_{\text{data}}$  时刻发送结束, 因每个数据包发送时长为  $t_{\text{data}}$ , 共发送  $[m]$  个数据包; 节点  $B$  在  $t = l \times t_{\text{data}}$  时开始接收, 收到  $[m]$  个数据包, 到  $t = (l + [m]) \times t_{\text{data}}$  时接收结束; 节点  $C$  在  $t = n \times t_{\text{data}}$  时开始受到节点  $A$  的干扰, 到  $t = ([m] + n) \times t_{\text{data}}$  时干扰结束,  $t_{\text{data}}$  为时间单位, 文中作为计量单位, 可省略, 简写为  $F_A = \{\langle 0, [m] \rangle, \langle l, (l + [m]) \rangle, \langle n, [m] + n \rangle\}$ 。下面介绍 M-TDMA 协议在一个周期  $T$  内的执行步骤:

①节点  $A$  在时隙开始  $t = 0$  时发送  $[m]$  个数据包:

$$F_A = \{\langle 0, [m] \rangle, \langle l, (l + [m]) \rangle, \langle n, [m] + n \rangle\}。$$

②节点  $C$  在  $t = (l + [m] - m)t_{\text{data}}$  时发送数据:

$$F_C = \{\langle l + [m] - m, l + [m] - m + [l + m - n] \rangle, \langle l + [m] - m + n, l + [m] - m + [l + m - n] + n \rangle, \langle l + [m], l + [m] + [l + m - n] \rangle\}$$

③节点  $B$  在  $t = (l + [m])t_{\text{data}}$  时开始发送数据:

$$F_B = \{\langle l + [m], l + [m] + [l + n - m] \rangle, \langle l + m + [m], l + m + [m] + [l + n - m] \rangle, \langle 2l + [m], 2l + [m] + [l + n - m] \rangle\}$$

④节点  $A$  在  $t = (l + [m] - m + [l + m - n] + n)t_{\text{data}}$  时继续发送数据, 周期  $T = (2m + [l + n - m])t_{\text{data}}$ :  $F_A = \{\langle g_1, g_1 + g_2 \rangle, \langle g_3, g_3 + g_2 \rangle, \langle g_4, g_4 + g_2 \rangle\}$ , 为了书写简单,  $g_1, g_2, g_3, g_4$  如下所示:

$$g_1 = l + [m] - m + [l + m - n] + n$$

$$g_2 = [3m + [l + n - m] - l - [m] - n - [l + m - n]]$$

$$g_3 = 2l + [m] - m + [l + m - n] + n$$

$$g_4 = l + [m] - m + [l + m - n] + 2n$$

下面通过一个例子来说明 M-TDMA 的执行过程。3 个节点之间传输延时为:  $A \rightarrow B$  为  $\tau_1 = 4.4t_{\text{data}}$ ,  $B \rightarrow C$  为  $\tau_2 = 7.1t_{\text{data}}$ ,  $C \rightarrow A$  为  $\tau_3 = 6.2t_{\text{data}}$ , 则周期为  $T = 17.2t_{\text{data}}$ 。

首先, 节点  $A$  先发送 7 个单位的数据, 则  $F_A = \{\langle 0, 7 \rangle, \langle 4.4, 11.4 \rangle, \langle 6.2, 13.2 \rangle\}$ 。

节点  $B$  和节点  $C$  分别在  $t = 11.4t_{\text{data}}$  和  $t = 4.3t_{\text{data}}$  时发送数据,  $F_B = \{\langle 11.4, 14.4 \rangle, \langle 18.5, 21.5 \rangle, \langle 15.8, 18.8 \rangle\}$  和  $F_C = \{\langle 4.3, 9.3 \rangle, \langle 10.5, 15.5 \rangle, \langle 11.4, 16.4 \rangle\}$ 。

节点  $A$  从  $t = 15.5t_{\text{data}}$  时开始发送数据,  $F_A = \{\langle 15.5, 16.5 \rangle, \langle 19.9, 20.9 \rangle, \langle 21.7, 22.7 \rangle\}$ 。

由于  $T = 17.2t_{\text{data}}$ , 可以得到一个周期内  $A, B, C$  三个节点的发送、接收以及受到干扰的情况, 如图 2 所示 (图中一个虚线间隔为  $5t_{\text{data}}$ , 作为参考线)。

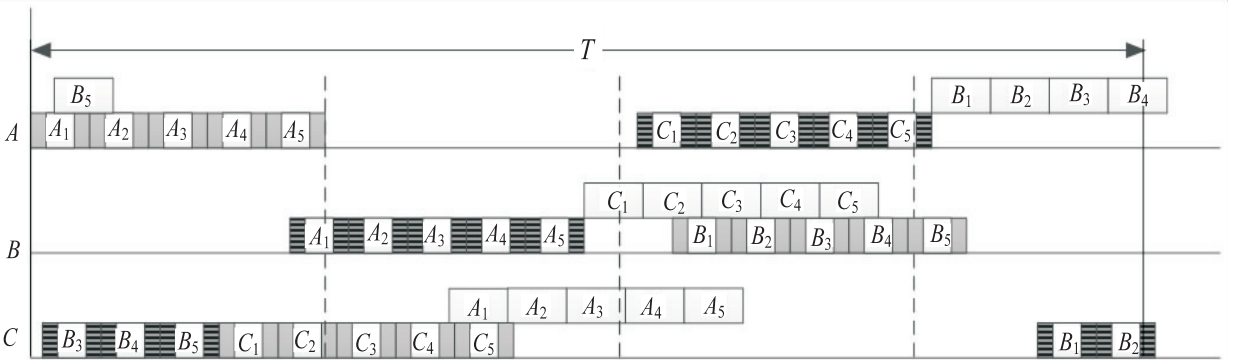


图 2 M-TDMA 协议示意图

### 2.3 拓扑扩展

上面得出的是一个 3 节点网络的数据发送接收情况, 但是实际水下传感器网络为了覆盖一片区域, 通常会使用很多传感器节点。可以在 3 节点的通信情况上进行网络扩展, 满足实际的通信要求。M-TDMA 协议拓展的原则是一个节点有两个相邻的节点, 且一个节点的发送区域和干扰区域内都只有一个目标节点。以节点  $B$  为例, 节点  $C$  是节点  $B$  的发送目标节点,  $A$  是  $B$  的干扰目标节点, 且在节点  $B$  的发送和干扰区域内只有节点  $C$  和节点  $A$  这 2 个节点。

根据上述原则, 给出一个经典的环形拓扑结构, 如

图 3 所示。

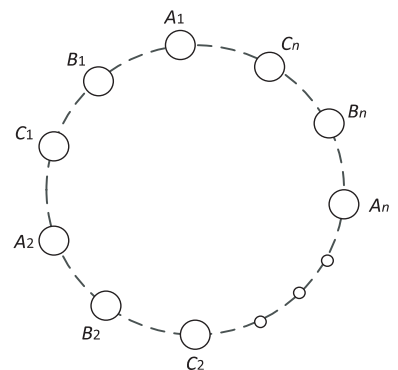


图 3 环形拓扑结构

现在有  $3n$  个节点,相邻的 3 节点构成一组,第  $i$  组表示为  $A_i, B_i, C_i$ ,取最大的  $T$  为整个网络的时隙  $T$ ,其余的节点通信通过平移扩展到时隙  $T$ ,扩展满足节点之间互不冲突和干扰。它们是这样工作的:第  $i-1$  组的  $C_{i-1}$  不再发送给第  $i-1$  组的  $A_{i-1}$ ,而是发送给第  $i$  组的  $A_i$ ;同理,第  $i$  组的  $C_i$  发送给第  $i+1$  组的  $A_{i+1}$ ,最后一组,即第  $n$  组的  $C_n$  发送给第一组的  $A_1$ ,这样就构成了一个封闭的环形网络。

## 2.4 时间同步

基于 TDMA 协议的水下传感器网络,网络时钟同步是非常重要的。然而水下传感器受很多因素的影响,给网络时钟同步带来一些困难。M-TDMA 协议为了避免冲突和干扰,需要节点工作在高精度时钟同步网络中,严格控制节点的发送和接收时间。

根据 M-TDMA 协议的特点,采用周期性洪泛的方式对网络中的时钟进行动态同步<sup>[13]</sup>。参照环形拓扑图,时钟同步由网络中的某个节点发起(可以由任意节点发起),这里不妨假设由  $A_1$  发起,规定同步周期为  $N$  个  $T$ 。首先节点  $A_1$  发出同步信息给节点  $B_1$ ,当节点  $B_1$  收到节点  $A_1$  的同步信息,根据同步信息数据,调整自己的时钟。然后节点  $B_1$  发出同步信息给节点  $C_1$ ,依次类推,直至整个网络完成同步。如果某个节点在进行同步的时候有数据要发送,则遵循同步信息优先的原则,先发送同步信息,然后再发送数据。因此,只要满足环形拓扑网络结构的 M-TDMA 协议,都可以使用上述时钟同步方法进行同步。

## 3 M-TDMA 协议仿真

### 3.1 仿真条件

M-TDMA 协议采用静态环形网络结构进行仿真<sup>[14]</sup>,网络中的节点分别设置为 3、6、9 个,三种节点数网络,按照上述的环形网络进行拓扑。设置 3 组  $A$ 、 $B$ 、 $C$  的传输延时,分别为  $\{3, 2, 4\}$ 、 $\{2, 3, 4\}$ 、 $\{3, 3, 2\}$ 。数据分组的长度为 1 000 bit,同步信息的长度为 100 bit,节点的发送和接收速率为 1 000 bit/s,水下传播速度为 1 500 m/s,根据这些信息可以设置上述 3 组节点的距离(实际情况,是先得到节点的距离,再算出节点间的传输延时)。网络中的同步信息周期设置为  $T$ 、 $5T$ 、 $10T$ 。每个节点按泊松分布产生数据,节点的数据分组队列最大存储空间为 5 个数据分组,在队列已满的情况下新产生的数据分组将被丢弃。

### 3.2 结果分析

M-TDMA 协议从 3 个方面进行仿真对比。

(1) 比较进行环形网络拓扑前后,网络的吞吐量;

(2) 比较按照不同周期进行网络同步,给网络带来的影响,并确定最佳同步周期;

(3) 比较在最优节点和同步周期下的 M-TDMA 协议与传统的 TDMA 协议。

仿真图如图 4~6 所示。

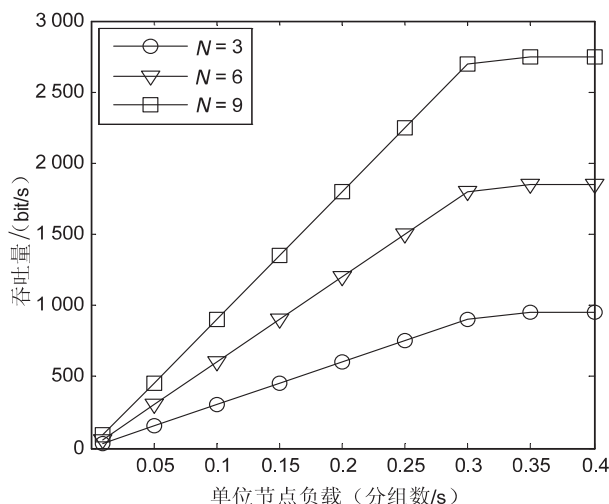


图 4 节点数量对网络吞吐量的影响

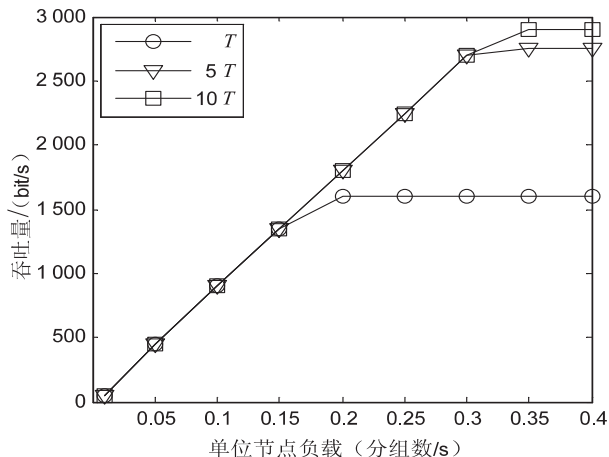


图 5 同步间隔对网络吞吐量的影响

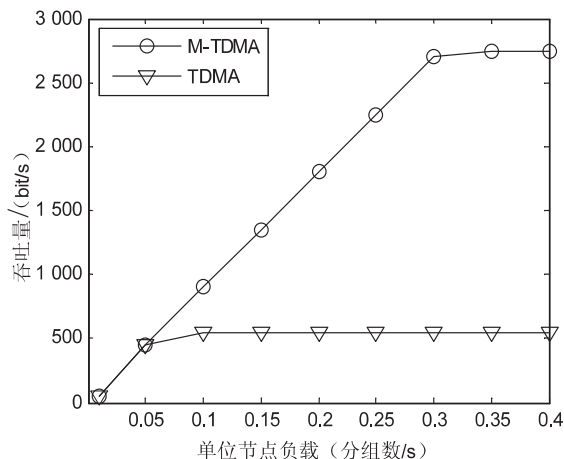


图 6 M-TDMA 与 TDMA 协议吞吐量比较

图 4 给出的是网络节点数分别为 3、6、9 个且同步间隔为  $5T$  时,网络工作在 M-TDMA 协议下,网络的吞吐量。从图中可以看出,开始的时候,吞吐量随着节点的负载增加而增加,一段时间后,网络的吞吐量达到稳定。网络的吞吐量表现为 9 节点网络大于 6 节点网络



大于3节点网络。因为开始时,节点组数更多的网络,有更多的节点进行数据发送,直至网络达到吞吐量饱和,吞吐量保持恒定。这说明,环形网络拓扑有很好的效果,具有良好的扩展性。接下来的几个仿真都使用9节点网络进行实验。

图5给出了不同的同步周期对网络吞吐量带来的影响。可以看出,同步周期越长,节点用于发送同步信息的时间越少,发送有效数据分组的时间越多,有利于提高网络吞吐量。由于同步周期越长,对网络影响越小,而同步周期越短,网络同步精度越高,所以同步周期取中值 $5T$ 。

图6给出了网络运行在M-TDMA协议与传统的TDMA协议的网络吞吐量对比。M-TDMA协议数据发送与接收更合理,能够有更好的吞吐量表现,最大吞吐量提高了约375%。

4 结束语


传统TDMA协议虽然利用不同节点在不同时段内发送和接收数据,来避免冲突,达到数据的有效传输,但是由于水下传感器网络传输的高延时性,使得协议的效率很低。文中针对水下传感器网络高延时的特点,提出了M-TDMA协议,它通过合理安排数据的发送和接收,有效避免节点数据冲突,结合文中提出的网络拓扑和时钟同步机制,对传统的TDMA协议进行了很大的改进。仿真数据结果表明,M-TDMA协议比传统的TDMA协议有更高的信道利用率和更小的同步开销,在文中提到的9节点网络中,最大吞吐量提高了375%。

参考文献:

[1] 李彦,罗续业. 海洋监测传感器网络概念与应用探讨[J]. 海洋技术,2006,25(4):33-35.  
[2] 李淑秋,李启虎,张春华. 第六讲水下声学传感器网络的发展和应用[J]. 物理,2006,35(11):945-952.  
[3] Aldawibi O O. A review of current routing protocols for ad hoc underwater acoustic networks[C]//Proc of first international conference on the applications of digital information and web

technologies. Ostrava:IEEE,2008:431-434.  
[4] Chirdchoo N,Soh W S,Chua K C. Aloha-based MAC protocols with collision avoidance for underwater acoustic networks[C]//Proc of 26th IEEE international conference on computer communications. Anchorage:IEEE,2007:2271-2275.  
[5] 任丰原,黄海宁,林闯. 无线传感器网络[J]. 软件学报,2003,14(7):1282-1291.  
[6] 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.  
[7] Harris III A F,Stojanovic M,Zorzi M. When underwater acoustic nodes should sleep with one eye open: idle-time power management in underwater sensor networks[C]//Proceedings of the 1st ACM international workshop on underwater networks. [s.l.]:ACM,2006:105-108.  
[8] 许俊. 水声语音通信研究[D]. 厦门:厦门大学,2001.  
[9] Shah G A. A survey on medium access control in underwater acoustic sensor networks[C]//Proc of international conference on advanced information networking and applications workshops. Bradford:IEEE,2009:1178-1183.  
[10] Kredon II K B,Mohapatra P. A hybrid medium access control protocol for underwater wireless networks[C]//Proceedings of the second workshop on underwater networks. [s.l.]:ACM,2007:33-40.  
[11] Chirdchoo N,Soh W S,Chua K C. MACA-MN: a MACA-based MAC protocol for underwater acoustic networks with packet train for multiple neighbors[C]//Proc of 67th IEEE vehicular technology conference. Singapore:IEEE,2008:46-50.  
[12] Park M K,Rodoplu V. UWAN-MAC: an energy-efficient MAC protocol for underwater acoustic wireless sensor networks[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering,2007,32(3):710-720.  
[13] Ganeriwal S,Çapkun S,Han C C,et al. Secure time synchronization service for sensor networks[C]//Proceedings of the 4th ACM workshop on wireless security. Cologne:ACM,2005:97-106.  
[14] 石为人,黄河,鲜晓东,等. OMNET++与NS2在无线传感器网络仿真中的比较研究[J]. 计算机科学,2008,35(10):53-57.

M-TDMA：基于TDMA协议的高效水下载感器网络MAC协议

作者：[冯德海](#)，[刘广钟](#)，[FENG De-hai](#)，[LIU Guang-zhong](#)  
作者单位：[上海海事大学 信息工程学院, 上海, 201306](#)  
刊名：[计算机技术与发展](#)  
英文刊名：[Computer Technology and Development](#)  
年，卷(期)：2015(3)

引用本文格式：[冯德海](#).[刘广钟](#).[FENG De-hai](#).[LIU Guang-zhong](#) [M-TDMA：基于TDMA协议的高效水下载感器网络MAC协议](#)[期刊论文]-[计算机技术与发展](#) 2015(3)