



基于交叉传输的水声通信网络 MAC 协议

张 曦¹, 闫 涛², 王红卫¹, 钟永信³

(1.空军工程大学航空航天工程学院 西安 710038;

2.空军第一航空学院 信阳 464000; 3.94850 部队 衢州 324000)

摘 要:为了解决传统 TDMA 协议在水下环境信道利用率低的问题,提出了交叉传输的 TDMA(I-TDMA)协议。该协议利用水声信道长传输时延的特性,采用数据分组交叉传输的方法改善信道利用率,同时引入了拓扑扩展和循环同步机制,增强了网络系统的可扩展性。仿真结果表明,该协议与传统的 TDMA 协议相比减少了数据分组时延以及同步开销,具有更好的性能。

关键词:水声通信网络;MAC 协议;TDMA;交叉传输

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2013.04.021

A MAC Protocol Based on Interleaving Transmission for Underwater Acoustic Network

Zhang Xi¹, Yan Tao², Wang Hongwei¹, Zhong Yongxin³

(1.Aeronautics and Astronautics College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

2.The First Aeronautic Institute of Air Force, Xinyang 464000, China;

3. Unit 94850, PLA, Quzhou 324000, China)

Abstract: In order to solve the problem of low channel utilization in the traditional TDMA protocol, an interleaving TDMA (I-TDMA) protocol was presented, which took advantage of the long propagation delay in underwater channels and improved channel utilization by interleaving data packets in empty time axis. Moreover, the topology extension and circle synchronization schemes was adopted to strengthen the expansibility of network systems. Simulation results indicate that I-TDMA has lower delay and synchronic overhead than those of the traditional TDMA protocol, and can achieve better performance.

Key words: underwater acoustic network, MAC protocol, TDMA, interleaving transmission

1 引言

随着海洋开发和海洋安全技术等的快速发展,水声通信网络在海洋数据采集、环境监测、灾难预警与军事安全等多方面获得应用,引起了学术界和工业界的高度关注^[1-3]。然而水声信道具有复杂多变、传输时延长、可用带宽窄、多径和多普勒效应严重等需要克服的难点,同样也是水声通信网络研究的热点。

水声传感器网络的 MAC 协议通常分为基于竞争和基于分配两类。基于竞争的 MAC 协议要求节点采用竞争的方式获取信道,因此不可避免地会产生信息冲突,从而导致网络能量的浪费,其主要包括 ALOHA、CSMA、MACA 协议及其改进;基于分配的 MAC 协议通过对信道资源进行提前分配,可有效地避免数据冲突,其主要包括 FDMA、CDMA 和 TDMA 协议。由于水声信道的可用带宽非常有限,FDMA 采用频带分割的方法并不适用于水声通信网络

的应用;CDMA 则因扩频码字的使用,一方面降低了数据信息的传输效率,另一方面出现了难以克服的远近效应问题。Chirdchoo N 等人提出的 Aloha-AN 协议^[4]能够减少数据冲突,提高吞吐量。参考文献[5]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。参考文献[6]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,仅适用于低数据率的情况应用。Molins 和 Stojanovic 提出的 Slotted FAMA^[7]协议采用时隙分配和握手机制减少冲突的发生,但时隙的增加会导致吞吐量的降低。参考文献[8]利用握手机制和 CDMA 技术减少数据冲突,但该方法在水声信道有限的带宽条件下会影响数据的吞吐量。

TDMA 对系统时间进行时隙划分,通过调度节点在不同时隙内收发数据,避免了数据碰撞且具有节能特性。然而传统的 TDMA 协议通常要求节点在每个周期内只发送一次数据,在长传输时延的水声网络环境下,将导致极低的信道利用率。为了解决该问题,本文提出了交叉传输的 TDMA (interleaving TDMA, I-TDMA) 协议,该协议首先针对三节点网络进行设计,利用水声信道长传输时延的特点,采用数据分组交叉传输的方法,提高了信道资源利用率;同时引入了拓扑扩展和循环同步机制,可适用于节点数量较多的环型或矩型网络结构,具有良好的系统扩展性;最后通过仿真验证了 I-TDMA 协议的有效性。

2 传统 TDMA 协议

传统的 TDMA 协议为时域划分的多址接入方式,网络中的每个节点被分配不同的时隙,节点数量以及时隙长度决定了 TDMA 协议的周期 T 。当属于某一个节点的时隙来临时,该节点发送数据分组,同时为了避免数据冲突,TDMA 协议通常要求每个节点在一个周期内仅发送一次数据信息。

传统的 TDMA 协议结构如图 1 所示,网络由 A、B、C 3 个节点组成,并且彼此之间的距离相等。按 TDMA 协议的方法给每个节点分配一个发送时隙,在水声通信网络中,时隙长度 T_s 应包含数据分组的发送时间 t_{data} 和节点间的传输时延 τ 。现在,节点 A、B 和 C 在各自分配的时隙分别发送数据分组给节点 B、C 和 A,相应的接收节点接收数据信息,而非接收节点则会同时受到数据干扰。例如当节点 A 发送数据分组给 B 时会对节点 C 产生干扰,因为节点 C 并不需要节点 A 的数据。根据传统的 TDMA 协议,其

信道利用率 δ_1 可以表示为:

$$\delta_1 = \frac{t_{\text{data}}}{t_{\text{data}} + \tau} \times 100\% \quad (1)$$

在长传输时延的水声信道环境中,通常有 $\tau \gg t_{\text{data}}$,因此导致传统的 TDMA 协议信道利用率较低。

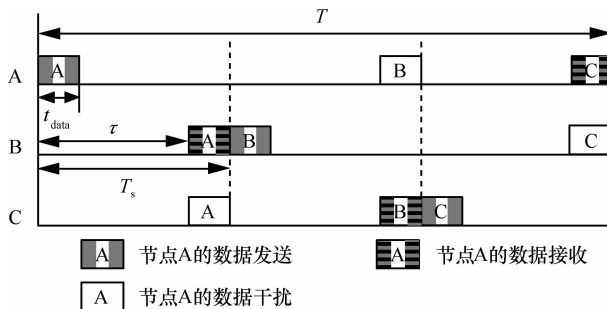


图 1 传统的 TDMA 协议结构

3 I-TDMA 协议设计

3.1 基本思想

为了克服传统 TDMA 协议信道利用率低的问题,本文提出了 I-TDMA 协议。首先通过两节点数据双向交换引入 I-TDMA 的基本思想。考虑节点 A 与 B 正在进行双向数据交换,为了便于说明,假设两个节点具有相同的数据分组发送时间 t_{data} ,并且知道节点间的传输时延 τ ,然后可以计算:

$$k = \left\lfloor \frac{\tau}{t_{\text{data}}} \right\rfloor \quad (2)$$

$$\Delta\tau = \tau - k \times t_{\text{data}} \quad (3)$$

其中, $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示取整函数。

两节点间的数据双向交换结构如图 2 所示,节点通过周期性地发送数据分组以改善信道利用率。根据水声信道的长传输时延,在一个时间周期里,节点 A 和 B 可发送一连串的数据分组,同时为了避免数据冲突,节点发送的数据分组数量不能超过 k 个,在延时 τ 之后,每个节点开始接收对方的数据分组序列。由于传输时延 τ 不一定恰好是数据分组发送时间 t_{data} 的整数倍,因此在节点的发送序列和接收序列之间将存在着 $\Delta\tau$ 的空余时间。综上所述,采用数据分组双向交换的方式,信道利用率可以表示为:

$$\delta_2 = \frac{2(\tau - \Delta\tau)}{2\tau - \Delta\tau} \times 100\% \quad (4)$$

根据式(2)和式(3)的计算得知 $0 \leq \Delta\tau < t_{\text{data}}$,当 $\Delta\tau=0$ 时,可实现最高的信道利用率 100%,明显高于传统 TDMA

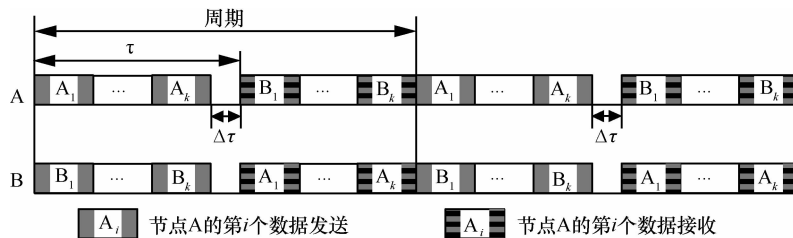


图2 两节点数据双向交换

协议的信道利用率。

3.2 协议描述

根据两个节点数据双向交换的思想,考虑如何在水声通信网络情况下高效地收发数据。以三节点网络为例,观察图1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。I-TDMA 协议充分利用这些空闲时间交叉传输更多的数据分组,在不引起数据碰撞的情况下提高了信道利用率。因为 I-TDMA 以 T 为周期进行循环数据发送,下面描述该协议在一个周期内的执行步骤。

(1)与传统的 TDMA 协议相同,每个节点 $i(i=1,2,3)$ 首先在自己分配时隙的开始时刻发送第一个数据分组,并将该时刻记为 t_{i1} 。

(2)为了避免与接收节点的数据发送产生冲突,节点 i 在自己分配的时隙内采用间隔 t_{data} 的方式增加发送数据分组,且在该时隙内最多增加的数据分组数量 m 由节点间的传输时延 τ 决定,即有:

$$m = \left\lceil \frac{\tau}{2t_{\text{data}}} \right\rceil \quad (5)$$

其中, $\lceil \cdot \rceil$ 为取整函数。进而可以得到节点 i 发送第 j 个数据分组的开始时刻为:

$$t_{ij} = t_{i1} + 2(j-1)t_{\text{data}} \quad (6)$$

其中, $1 \leq j \leq m+1$ 。

(3)节点在步骤(1)和步骤(2)中已经发送了 $m+1$ 个数

据分组, I-TDMA 协议的目标是让每个节点在一个周期内发送 $k+1$ (k 按式(2)计算得到)个数据分组,剩余的 $k-m$ 个数据分组通过相应接收节点的分配时隙进行发送,同时要避开接收节点的发送时间,因此节点 i 发送剩余 $k-m$ 个数据分组的开始时刻为:

$$t_{ij} = t_{i1} + T_s + t_{\text{data}} + 2(j-m-2)t_{\text{data}} \quad (7)$$

其中, $m+2 \leq j \leq k+1$ 。

下面以图3为例说明 I-TDMA 协议的执行过程。此时设数据分组的发送时间为 t_{data} , 节点间的传输时延 $\tau = 3.5t_{\text{data}}$, 通过式(2)、式(3)和式(5)的计算可以得到 $k=3$ 、 $\Delta\tau = 0.5t_{\text{data}}$ 和 $m=1$ 。根据 I-TDMA 协议的执行步骤,每个节点在其分配时隙内,采用间隔 t_{data} 的方式共能发送 $m+1=2$ 个数据分组,如节点 A 在第一个时隙发送了数据分组 A_1 和 A_2 ,延时 τ 后分别在节点 B 和 C 上形成数据接收和数据干扰时间。然后剩余的 $k-m=2$ 个数据分组通过接收节点的分配时隙进行发送,如数据分组 A_3 和 A_4 在节点 B 的分配时隙进行发送。这里注意,数据分组 A_4 的发送时间在数据分组 B_1 的干扰时间内,但由于节点 A 不需要 B 的数据,因此并不影响 A 此时的数据发送。此外,由于节点的发送时间存在着周期对称关系,图3中将数据分组 C_3 和 C_4 的发送时间移入第一个时隙,以便于更好地说明节点间的数据交叉传输而不会造成信息冲突。

对比图1和图3发现,传统的 TDMA 协议在一个时间周期内,每个节点只能发送一个数据分组,而 I-TDMA 协议

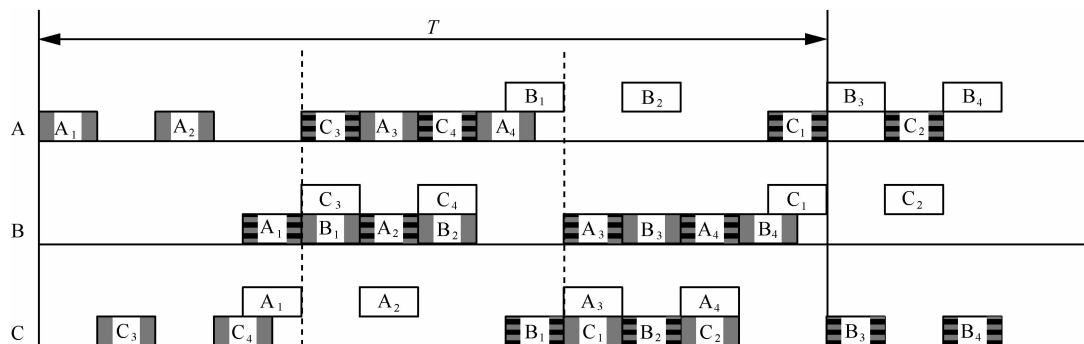


图3 I-TDMA 协议示意

通过在时间轴上进行数据分组交叉传输,允许每个节点发送 $k+1$ 个数据分组,因此极大地改善了信道利用率,其表示为:

$$\delta_3 = \frac{t_{\text{data}} + \tau - \Delta\tau}{t_{\text{data}} + \tau} \times 100\% \quad (8)$$

如果 $\Delta\tau=0$, I-TDMA 协议的信道利用率将达到 100%。

3.3 拓扑扩展

考虑到实际的水声通信网络应用中,由 3 个节点组成的网络覆盖范围非常有限,因此在保留 I-TDMA 协议工作原理的基础上,对网络拓扑结构进行扩展。I-TDMA 协议拓扑扩展的基本原则是网络节点能构成一个封闭式的环路,每个节点具有两个相邻的节点,同时要求网络中的节点数量为 3 的整数倍,且节点间的距离相等。

根据上述的扩展原则,图 4 和图 5 给出了两个典型的网络拓扑扩展结构,分别为环型拓扑和矩型拓扑。以图 4 为例,节点 $A_1, B_1, C_1, A_2, B_2, C_2, \dots, A_n, B_n, C_n$ 组成了一个环型网络,共包含 $3n$ 个节点,每个节点的通信范围为其相邻的两个节点,且邻节点间均具有相同的距离。为了符合三节点网络中高效数据分组收发的方式,将环型拓扑中的节点划分为 n 组,每一组中包含 A_i, B_i 和 C_i 3 个节点,这 3 个节点的时隙分配和数据分组交叉传输方式分别对应于三节点网络中的节点 A、B 和 C,这样网络中的每一组节点可同时进行数据收发,从而提高网络的吞吐量。与三节点网络不同的是,环型拓扑中节点 A_i 并非接收 C_i 的数据,而是接收节点 C_{i-1} 的数据(节点 A_1 接收 C_n 的数据除外),但由于所有的 C_i 节点均具有相同的数据分组发送时间,因此并不影响 I-TDMA 协议的执行,数据分组

的交叉传输将不造成信息冲突。同样,图 5 中的矩型拓扑结构情况类似。

3.4 循环同步

在基于 TDMA 的水声通信网络 MAC 协议中,节点间的时钟同步显得尤为重要。然而由于时钟漂移等因素的影响,给网络同步带来了一定的困难。I-TDMA 协议控制节点在指定时间收发数据,为了避免相邻的数据信息产生冲突,要求网络中节点的时间具有统一性。

根据 I-TDMA 协议拓扑扩展的特点,采用周期性循环同步的方法完成节点间的时钟同步。首先在网络中选择某个节点作为时间参考节点,以该节点的时间为基准用于校正其他节点的时钟。如图 4 中的环型拓扑网络,不失一般性,选择节点 A_1 为参考节点,根据网络中节点的时钟稳定程度,节点 A_1 每隔一定的协议周期 T 发送同步信息给其接收节点 B_1 ,当 B_1 收到该同步信息,调整自己的时钟与 A_1 一致;然后节点 B_1 选择其最近的数据发送时刻转发同步信息给节点 C_1 ,如果此时节点 B_1 仍然有数据要发送,则采取同步信息优先发送的原则,暂时延迟该数据分组的发送。依次类推,节点 C_1 完成时钟校正之后发送同步信息给其接收节点 A_2 ,直到同步信息到达最后的节点 C_n 。因此,只要网络结构满足 I-TDMA 协议拓扑扩展要求,均可以采用循环同步方法对网络中的节点进行时钟同步。

4 I-TDMA 协议性能仿真

4.1 仿真条件

I-TDMA 协议仿真采用静态的环型拓扑结构,如图 4 所示,网络节点数 N 分别选取为 3 个、6 个和 9 个,数据分组采用逆时针传输方式,即前一个节点发送数据给后一个节点。相邻节点间距分别设置为 2 km 和 5 km,每个节点的通信范围为其邻近的两个节点。数据分组长度固定为 1 000 bit,同步信息的长度为 100 bit。网络每隔一定的协议周期 T 进行节点时钟同步,同步间隔分别为 $T, 5T$ 和 $10T$ 。节点收、发机的数据率采用 1 000 bit/s,声信号在水中的传播速率为 1 500 m/s。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。

4.2 结果分析

I-TDMA 协议的仿真过程具体分为 3 个部分。首先比较了节点数量对网络吞吐量的影响,以说明 I-TDMA 协议拓扑扩展的有效性;其次分析了不同的同步间隔对网络吞

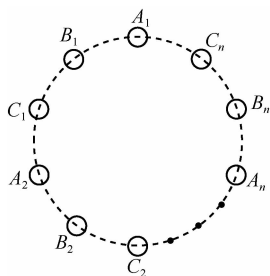


图4 I-TDMA 环型拓扑扩展

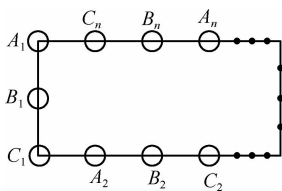


图5 I-TDMA 矩型拓扑扩展



吐量和同步开销的影响；最后对节点间距分别为 2 km 和 5 km 情况下的 I-TDMA 协议和传统的 TDMA 协议在吞吐量、同步开销和时延方面进行仿真比较,仿真结果如图 6~图 11 所示。

I-TDMA 协议以 3 个节点为一组对网络拓扑进行扩

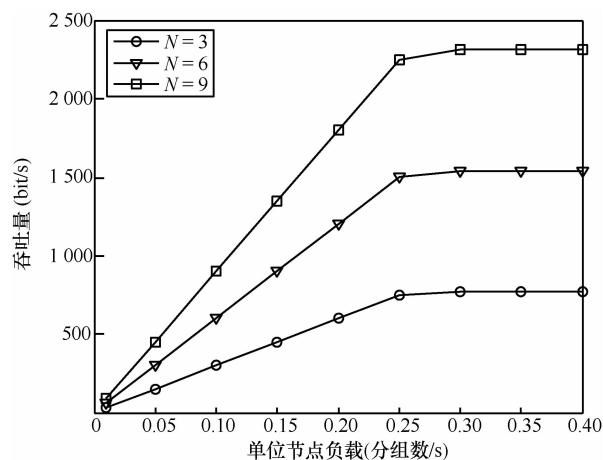


图 6 节点数量对网络吞吐量的影响

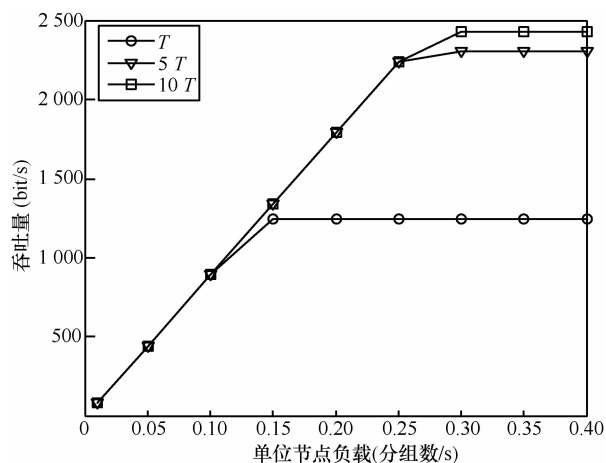


图 7 同步间隔对网络吞吐量的影响

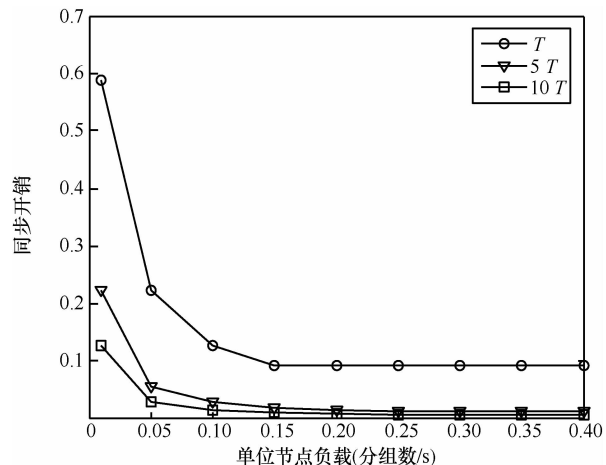


图 8 同步间隔对同步开销的影响

展,图 6 给出了节点间距为 2 km、同步间隔为 $5T$ 情况下,不同的网络拓扑扩展程度引起吞吐量的变化。从图中可以看出,吞吐量随着节点负载的增加而增大,当负载增加到一定程度时,网络吞吐量达到饱和状态且趋于恒定值。同时网络的吞吐量也随着节点数量的增加而增大,原因是

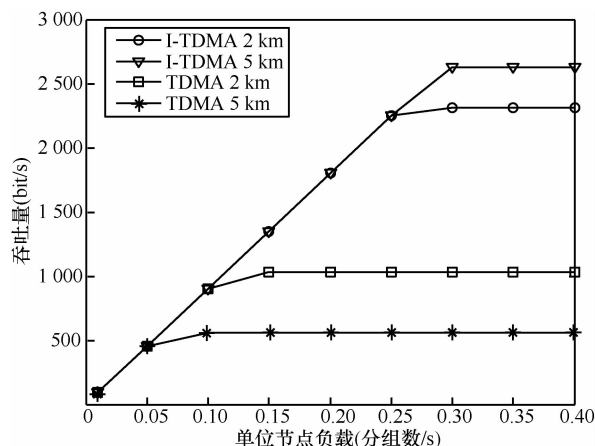


图 9 I-TDMA 和 TDMA 协议吞吐量比较

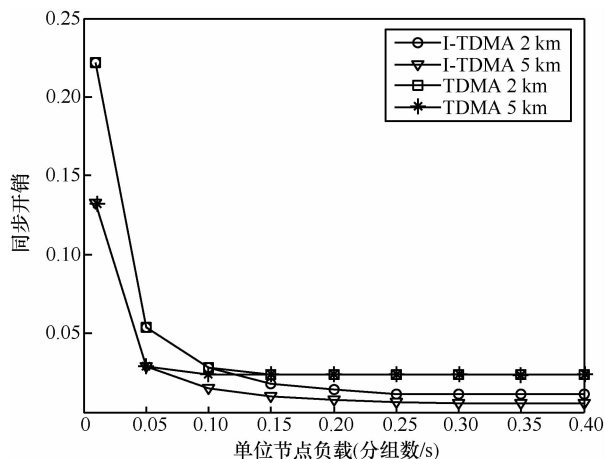


图 10 I-TDMA 和 TDMA 协议同步开销比较

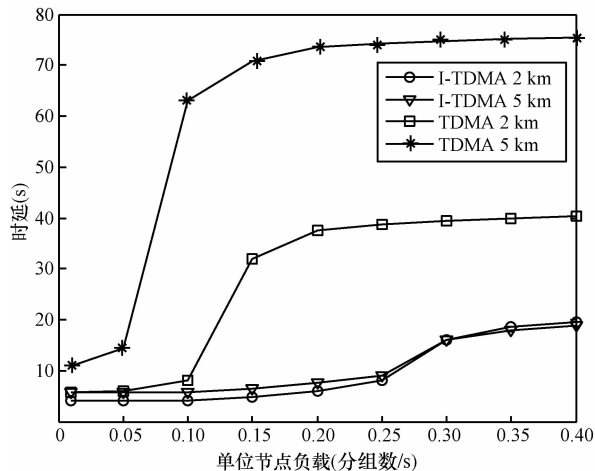


图 11 I-TDMA 和 TDMA 协议时延比较

I-TDMA 协议进行拓扑扩展后, 各组节点在互不干扰的前提下可同时进行数据传输, 因此使得网络的吞吐量增大, 这也说明了 I-TDMA 协议可在三节点网络的基础上进行拓扑扩展且具有良好的可扩展性。在接下来的仿真中均固定网络的节点数量 $N=9$ 。

图 7 和图 8 分别给出了节点间距为 2 km 的条件下, 变化同步间隔对网络吞吐量和同步开销的影响。网络同步间隔越长, 节点发送同步信息的时间越少, 则有更多的时间用于发送数据分组, 从而提高网络的吞吐量并降低同步开销。观察图 8 发现, 当网络负载较低时, 节点发送同步信息的比例较大, 导致较高的同步开销; 而随着负载的增加, 发送的数据分组数量增多, 使得同步开销迅速降低。此外, 同步间隔为 $5T$ 和 $10T$ 的情况下, I-TDMA 协议均能保持较高的吞吐量和较低的同步开销, 而采用 $5T$ 的同步间隔使得网络时钟校正周期更短, 节点同步更加精确, 因此设定同步间隔为 $5T$ 用于后续的仿真。

图 9 比较了 I-TDMA 和传统 TDMA 协议的吞吐量。由于 I-TDMA 协议利用了水声信道长传输时延的特性, 采用了数据分组交叉传输的方法, 因此获得更高的吞吐量, 在 2 km 和 5 km 节点间距情况下, 最大吞吐量分别提高了约 125% 和 375%。进一步观察发现, 传统的 TDMA 协议时隙长度与节点间距成正比, 导致网络的吞吐量随着节点间距的增加而降低; 而 I-TDMA 协议在 5 km 条件下的吞吐量要高于 2 km 的情况, 这是因为 $\Delta\tau$ 空闲时间的存在, 使得节点间距为 5 km 时 I-TDMA 协议的信道利用率更高, 从而获得更高的网络吞吐量。

图 10 为 I-TDMA 和 TDMA 协议的同步开销比较。当网络节点负载较低时, I-TDMA 和 TDMA 协议具有相同的同步开销, 随着负载的增大, I-TDMA 协议中的节点通过在单位时间内交叉传输更多的数据分组, 可得到更低的同步开销。另外在低负载区域, 节点间距为 2 km 的协议周期要小于 5 km 的协议周期, 从而导致 2 km 的同步开销更高; 在高负载区域, 不同的节点间距并不影响传统 TDMA 协议的同步开销, 因为在相同周期内节点发送的数据分组数和同步信息数的比例固定, 而 5 km 条件下 I-TDMA 协议具有更高的信道利用率, 因此同步开销低于 2 km 的情况。

图 11 给出了两个协议的时延比较。在低负载区域, 时延主要由数据分组的传输时延所引起; 当网络吞吐量达到饱和, 数据分组在队列中较长的等待时间导致数据分组时延迅速增大。传统的 TDMA 协议在节点间距较远的情况

下, 需要更长的数据分组传输时间和等待时间, 从而使得时延随着节点间距的增加而增大; I-TDMA 协议尽管在节点间距为 5 km 时传输时延更长, 但较高的信道利用率缩短了数据分组在发送队列中的等待时间, 因此在高负载区域网络时延略小于 2 km 的情况。

5 结束语

传统的 TDMA 协议通过调度节点在不同时隙内收发数据, 避免了数据碰撞且具有节能特性, 然而由于水声信道的长传输时延, 使得 TDMA 协议的信道利用率较低。针对该问题本文提出了交叉传输的 MAC 协议 (I-TDMA), 它利用水下环境长传输时延的特性, 采用数据分组交叉传输的方法改善信道利用率, 同时引入了拓扑扩展和循环同步机制, 增强了网络系统的可扩展性。仿真结果表明, 该协议相比传统的 TDMA 协议减少了数据分组时延以及同步开销, 在节点间距为 2 km 和 5 km 的情况下, 最大吞吐量分别提高了约 125% 和 375%。

参考文献

- Chitre M, Shahabudeen S, Stojanovic M. Underwater acoustic communications and networking: recent advances and future challenges. *Marine Technology Society Journal*, 2008, 42(1): 103~116
- Pompili D, Akyildiz I F. Overview of networking protocols for underwater wireless communications. *IEEE Communications Magazine*, 2009, 47(1): 97~102
- Aldawibi O. A review of current routing protocols for Ad Hoc underwater acoustic networks. *The First International Conference on Applications of Digital Information and Web Technologies*, Ostrava, Czech, 2008: 431~434
- Chirdchoo N, Soh W S, Chua K C. Aloha-based MAC protocols with collision avoidance for underwater acoustic networks. *IEEE INFOCOM '07*, Anchorage, USA, 2007: 2271~2275
- 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. *Proceedings of VTC*, Singapore, 2008
- Park M K, Rodoplu V. UWAN-MAC: an energy-efficient MAC protocol for underwater acoustic wireless sensor networks. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2007(32): 710~720
- Molins M, Stojanovic M. Slotted FAMA: a MAC protocol for underwater acoustic networks. *Proceedings of IEEE OCEANS'06 Asia Conference*, Singapore, 2006
- Meng T, Shi H S, Wang Y. A MAC protocol for underwater sensor networks. *Proceedings of the Eighth ICEMI*, Xi'an, China, 2007: 144~148

- 4 ISO/IEC JTC 1/SC 27. <http://www.jtc1sc27.din.de/>
- 5 ISO/IEC JTC 1/SC 27. Working Group 5 Identity Management and Privacy Technologies within ISO/IEC JTC 1/SC 27-IT Security Techniques, 2007
- 6 OMA Privacy Requirements for Mobile Services. http://www.openmobilealliance.org/technical/release_program/privacy_v1_0.aspx, 2007
- 7 3GPP TR 22.949. Study on a Generalized Privacy Capability, 2012
- 8 GSMA Mobile Privacy Initiative. <http://www.gsma.com/mobile-and-privacy/>
- 9 GSMA Mobile Privacy Principles. http://www.gsmworld.com/documents/GSMA_Privacy_Principles_UPDATED.pdf, 2011
- 10 GSMA Privacy Design Guidelines For Mobile Application Development. http://www.gsmworld.com/documents/privacy_design_guidelines.pdf, 2011
- 11 W3C Privacy Interest Group Charter. <http://www.w3.org/2011/07/privacy-ig-charter.html>
- 12 W3C Tracking Protection Working Group. <http://www.w3.org/2011/tracking-protection/>
- 13 W3C Device APIs and Policy Working Group. <http://www.w3.org/2009/dap/>
- 14 W3C Device API Privacy Requirement. <http://www.w3.org/TR/2010/NOTE-dap-privacy-reqs-20100629/>, 2009
- 15 W3C Web Application Privacy Best Practice. <http://www.w3.org/TR/2011/WD-app-privacy-bp-20110804/>, 2011
- 16 W3C Privacy Ruleset. <http://dev.w3.org/2009/dap/privacy-rulesets/>, 2009
- 17 Corby M J. The case for privacy. Information Security Journal: A

Global Perspective, 2002, 11(2):9~14

- 18 刘恒. 普适计算环境下基于位置服务的隐私保护若干技术研究. 电子科技大学博士学位论文, 2010

[作者简介]



高枫,女,博士,中讯邮电咨询设计院有限公司工程师,主要研究方向为 3GPP 标准和 EPC 技术。



张峰,男,北京邮电大学博士研究生,主要研究方向为移动网络和智能信息处理。



周伟,男,博士,中讯邮电咨询设计院有限公司高级工程师,主要研究方向为 3GPP 标准和移动互联网。

(收稿日期:2013-02-05)

(上接第 111 页)

张曦,男,空军工程大学航空航天工程学院讲师,主要研究方向为信息网络对抗技术等。

闫涛,男,博士,空军第一航空学院讲师,主要研究方向为信息通信网络等。

王红卫,男,博士,空军工程大学航空航天工程学院副教授、主任,主要研究方向为信息对抗技术等。

钟永信,男,博士,94850 部队工程师,主要研究方向为水声传感器网络等。