

一种用于格型拓扑的水声传感器网络 TDMA 协议

钟永信 黄建国 韩晶
(西北工业大学航海学院 西安 710072)

摘要: 由于海洋信道恶劣的传输条件, 使设计可靠且有效的水声传感器网络 MAC 协议面临极大的挑战。该文针对六角格型网络的结构特点提出了 G-TDMA 协议, 该协议通过对时隙的空间复用, 提高了信道资源的利用率; 并且在数据帧的发送过程中完成网络节点间的同步, 从而降低同步开销; 同时根据水声信道的高传输延时和起伏特性, 加入了保护时间以避免数据冲突。仿真结果表明, 在水声信道条件下该协议可有效地改善网络性能。

关键词: 水声传感器网络; 格型拓扑; MAC 协议; 时分复用

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)07-1774-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00980

A TDMA Protocol for Underwater Acoustic Sensor Networks with Grid Topology

Zhong Yong-xin Huang Jian-guo Han Jing

(College of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Challenges of designing reliable and efficient Medium Access Control (MAC) protocols are posed for underwater acoustic sensor networks, because of hostile seawater channel condition. For hexagonal grid topology networks, this paper presents G-TDMA protocol, which improves channel utility with spatial reuse of time slots and reduces synchronic overhead by synchronizing nodes in the process of packet transmissions. In addition, G-TDMA employs guard time to avoid packet collisions due to long propagation delay and channel fluctuations. Simulation tests show that the protocol improves network performances in underwater environment.

Key words: Underwater acoustic sensor networks; Grid topology; MAC protocol; TDMA

1 引言

水声传感器网络以其在海洋数据收集、污染监测以及灾难预警等众多领域的应用, 引起了学术界的高度重视^[1,2]。由于声信号在水中的传播速度为 1500 m/s, 比空中无线传输低了 5 个量级, 同时水声信道带宽非常有限, 通常为 1~10 kHz 量级, 这导致水声网络高的传输延时和低的数据率。此外网络中的节点能量有限且难以补充和更换。这些不利因素给水声传感器网络 MAC(Medium Access Control)协议的设计带来了极大的挑战。

水声传感器网络的 MAC 协议分为基于竞争和基于分配两类。基于竞争的 MAC 协议主要包括 ALOHA, CSMA, MACA 协议及其改进^[3-5], 但当网络数据流量较大时, 此类协议会造成节点间频繁的数据冲突和能量损耗。TDMA 则是一种基于分配的 MAC 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内在的节能特性。然而传统的 TDMA 协议通常对网络中的每个节点分配不同的时隙, 在长传输延时和低数据率的水声环境下, 将导致极低的信道利用率。Arisha 等提出的 Energy-aware TDMA-based MAC (ET-MAC) 根据负载进行时隙分配^[6], 即每个数据包在每跳节点分配不同时隙以节能, 但因此导致较多的时隙数。LMAC 采用时隙随机选择的方法会产生邻节点的数据冲突^[7], 为了降低冲突需时隙数大于网络的最大连接数。文献[8]针对水声信道高传输延时的特性, 采用延迟发送的方法来代替时隙分配, 可提高信道利用率, 但该方法仅适合于单跳式的网络。

本文提出了 G-TDMA 协议, 该协议根据格型网络拓扑结构的特点, 对 TDMA 时隙进行了空间复用, 缩减了数据的发送周期, 提高了信道利用率; 同时该协议适合于多跳式的网络, 可提高系统的扩展性; 不同于传统的主节点逐级扩散的同步方法, G-TDMA 将同步信息蕴涵在数据帧里面, 降低了同步开销; 此外考虑水声信道长传输延时及信道起伏的特性, 进行保护时间和节能方案的设计。

2009-07-07 收到, 2009-10-16 改回

国家自然科学基金(60572098)和教育部博士点基金(20070699020)资助课题

通信作者: 钟永信 yongxin_zhong@126.com

2 网络模型

本文提出的网络模型是由一些规则的六角格型结构组成,传感器节点布置在六角格型的顶点。此类网络通常应用于海洋数据收集和环境监测^[9],如图 1 所示,主节点 M 位于网络的中心位置,定义其为零级节点(最高级),节点 A, B, C 与主节点相邻为一级节点,节点 D, E 与一级节点 A 相邻为二级节点,依此类推。网络的数据收集方式是由低级节点向高级节点传递数据,直至主节点。

每个节点的通信距离是与其临近的 3 个节点的距离,并定义该通信距离为 1,且假设在该通信距离之外的节点无法接收该节点的信息也不会因此产生干扰。如节点 M 只能与节点 A, B, C 进行通信,其他节点则处于节点 M 的通信范围之外,也不会因 M 的信息发送产生干扰。此时若节点 D 或 E 要给主节点 M 传送信息,则必须通过中继节点 A 才能够到达 M 。

3 G-TDMA 协议

3.1 时隙分配

G-TDMA 协议的时隙分配在网络的初始化过程中完成。根据网络模型,每个节点与其周围的 3 个邻节点进行通信,因此每个 TDMA 周期至少需要 4 个时隙。不失一般性,假定主节点的发送时隙为 1;接着主节点以广播的方式分别给 3 个一级节点分配发送时隙 2, 3, 4;后续的时隙分配根据对角时隙相同的原则,即六角格型结构对角节点分配相同的时隙,并依次逐级展开,直至网络最外层的节点,图 2 给出了 G-TDMA 节点发送时隙分配。注意在对角时隙分配过程中,节点的通信距离扩大为 2,以便对角节点能接收时隙分配信息。

依照对角节点分配相同的时隙,六角格型网络将不会产生数据冲突。

证明 网络中的任意两个节点 $i, j (i \neq j)$, 其分配的发送时隙分别为 s_i 和 s_j 。由于节点的发送距离为 1, 则如果网络存在着数据冲突, 须满足以下

任意一个条件: (1) $s_i = s_j$, 并且节点 i 和 j 相邻。(2) $s_i = s_j$, 并且节点 i 和 j 有一个共同的邻节点。按对角时隙相同的分配原则, 在 $s_i = s_j$ 的情况下, 节点 i 和 j 只能是对角节点(既非相邻节点也没有一个共同的邻节点), 因此无法满足条件(1)或者条件(2), 即网络无数据冲突。证毕

G-TDMA 协议采用多跳的信息传递方式, 当网络规模需要扩大时, 只需在网络外层按六角格型结构布置新的节点(如图 2 虚线部分所示), 新节点进行对角时隙分配后即可参与网络的正常运行。因此 G-TDMA 协议具备良好的系统可扩展性, 适合于较大规模的网络需求。

3.2 同步和协议描述

为了降低同步开销, G-TDMA 协议把同步信息蕴涵在数据帧中, 即在每个发送数据包前面加入短的同步信息, 通过高级节点的数据帧发送来完成对低级节点的同步, 则数据帧的发送时间 T_f 包括数据包的发送时间 T_{data} 和同步信息的发送时间 T_{sync} , 即 $T_f = T_{data} + T_{sync}$; 由于水声信道长的传输延时, 每个时隙长度 T_s 必须包含数据帧的发送时间以及节点间的传输延时 τ , 表示为 $T_s = T_f + \tau$; 而每个 G-TDMA 周期 T_p 由 4 个时隙组成, 即 $T_p = 4 \times T_s$; 时隙为 $s_i (s_i \in \{1, 2, 3, 4\})$ 的节点 i , 其在第 $k (k = 1, 2, 3, \dots)$ 个周期的发送开始时刻为 $t_{tx} = (k - 1) \times T_p + (s_i - 1) \times T_s$, 该信息的接收开始时刻为 $t_{rx} = t_{tx} + \tau$ 。

以图 1 的节点为例来说明 G-TDMA 协议的执行过程, 如图 3 所示。在一个周期内, 由于主节点不发送数据包, M 在其分配的时隙 1 发送同步信息给一级节点 A, B, C , 在时隙 2, 3, 4 分别接收来自节点 A, B, C 的数据帧, 因网络是由高级节点向次级节点同步, 因此主节点接收到一级节点 A, B, C 的同步信息之后不需要进行时间校正。节点 A 在时隙 1 接收主节点的同步信息, 进行时间校正, 在时隙 2 发送数据帧给主节点的同时完成对其次级节点 D, E 的时间校正, 并且在时隙 3, 4 接收节点 D, E 的数据帧。而节点 D, E 在同步接收时隙 2 仅接收节点 A 的同步信息, 无需接收 A 给 M 的数据包。这样网络中的节点接收其高级节点的同步信息和次级节点的数据帧, 发送数据帧给高级节点并完成对次级节点的同步。

3.3 保护时间

上述的分析是假定传输延时不变的理想情况。而在实际情况中, 水声信道因温度、盐度、压力等因素的变化引起信道起伏, 从而使得节点间的传输延时并不是固定的, 因此需要根据传输延时的变化

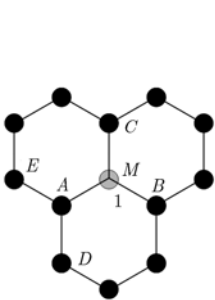


图 1 六角格型网络结构

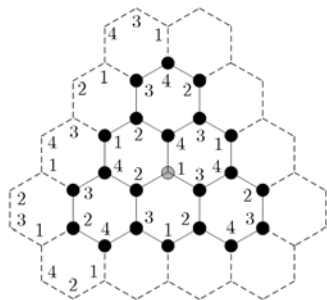


图 2 G-TDMA 节点发送时隙分配

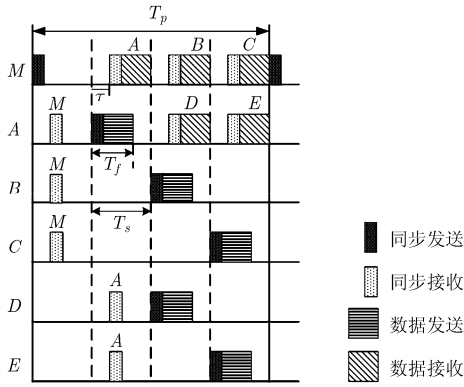


图 3 G-TDMA 协议执行

情况选择不同的保护时间，以避免相邻数据帧的冲突。

如图 4 所示，节点 C 在其相邻的两个时隙分别接收来自节点 A, B 的数据帧，当传输延时固定时，节点 C 的接收情况如图 4(a)所示，即不产生接收冲突且相邻的两个数据帧之间存在 τ 的时间间隔。但由于水声信道起伏，节点 A, B 的数据帧可能提前或滞后到达节点 C，这里假定提前到达的时间为 τ_e ，滞后到达的时间为 τ_l ，那么接收相邻两个数据帧最有可能引起冲突的情况是前一个时隙的数据帧滞后到达，后一个时隙的数据帧提前到达。若 $\tau_e + \tau_l \leq \tau$ ，如图 4(b)所示，相邻数据帧不会产生冲突，此时无需额外的保护时间；但当 $\tau_e + \tau_l > \tau$ ，如图 4(c)所示，数据帧因变化的传输延时产生冲突，因此保护时间 T_g 设定为

$$T_g = \begin{cases} 0, & \tau_e + \tau_l \leq \tau \\ \tau_e + \tau_l - \tau, & \tau_e + \tau_l > \tau \end{cases} \quad (1)$$

则相应的时隙长度变化为 $T_s = T_f + \tau + T_g$ ，同时节点的空闲监听时间需设置为 $[t_{rx} - \tau_e, t_{rx} + \tau_l]$ ，因为该段时间内数据帧随时可能到达。 τ_e 和 τ_l 的大小是由水声信道条件决定的，一般考虑其不会超过节点间的传输延时，即 $0 \leq \tau_e \leq \tau, 0 \leq \tau_l \leq \tau$ 。

3.4 节能

水声传感器网络中的节点采用电池供电，能量

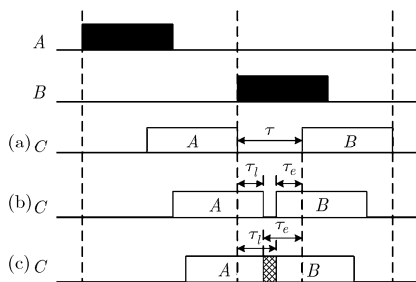


图 4 变化的传输延时对数据帧接收的影响

的高效使用可维持网络的长期运行。表 1 给出了传感器节点不同状态下的功率消耗^[10]，从中可以看出水声传感器相比于无线传感器具有更高的发送和接收功率，因此网络节点的有效收发显得尤为重要，G-TDMA 协议通过时隙划分消除邻节点间的数据冲突，从而避免数据重发所导致的能源浪费。

表 1 传感器节点不同状态的功率消耗(W)

节点类型	发送	接收	空闲	睡眠
水声传感器	10	3	0.08	0
无线传感器	2.24	1.35	1.35	0.075

此外 G-TDMA 协议采用适时的睡眠机制进行网络节能。处于发送时隙的节点，在信息发送完毕之后，进入睡眠状态以节约能量；同样处于接收时隙的节点，若完成信息接收时该时隙仍未结束，可关闭节点收发机，要注意的是节点在同步接收时隙，只接收同步信息，而无需接收发给高级节点的数据包，可减少接收机的能量消耗；另外当网络负载较低时，节点并非在每个发送时隙都有数据发送，此时若接收节点一直处于空闲监听状态，将导致节点的能量浪费，因此我们设置接收时隙的前一部分作为空闲监听时间，如节点在 $t_{rx} + \tau_l$ 时刻仍未接收到数据帧，可进入睡眠状态以节能。

4 仿真与讨论

4.1 参数设置

本文对 G-TDMA, ET-MAC, LMAC, MACAW 和 ALOHA 协议的吞吐量、可靠性、时延以及能量消耗进行仿真比较。网络的仿真模型如图 2 所示，由 6 个六角格型结构组成，共 22 个静态节点，相邻节点间距为 1 km，网络路由由提前设定并且固定不变。数据包长度选取为 2048 bit，同步帧以及各个控制帧的长度为 100 bit。节点在发送、接收、空闲侦听和睡眠状态的功率消耗与表 1 相同，分别为 10 W, 3 W, 0.08 W 和 0 W。保护时间设置为 0 s 和 0.67 s 两种情况： $T_g = 0$ s 表示不考虑信道起伏，数据信息能够准确到达的理想情况(图中用 G-TDMA1 表示)； $T_g = 0.67$ s 则表示 $\tau_e = \tau_l = \tau$ 时，保护时间等于节点间的传输延时(图中用 G-TDMA2 表示)。节点收、发机的数据率采用 2000 bps，声信号在水下的传播速率固定为 1500 m/s，网络负载为符合泊松分布的数据流。

4.2 性能分析

图 5 给出了不同网络负载条件下各种协议的吞吐量比较，这里的吞吐量指的是单位时间内主节点

收到的数据包数目。由图 5 可见, G-TDMA 协议通过对信道资源进行时隙划分避免数据冲突, 并且因时隙的空间复用得到最高的吞吐量。保护时间的加入增加了每个时隙的长度, 使得吞吐量下降, 而 ET-MAC 根据负载进行时隙分配以及 LMAC 时隙的随机选择都要求更大的时隙数量, 因此得到更低的吞吐量。在长传输延时的水声信道中, MACAW 协议采用的握手机制使得每次数据包交换需要很长的时间, 导致网络吞吐量很低, 而 ALOHA 协议由于缺乏任何冲突避免机制, 在吞吐量达到峰值之后急剧下降。

图 6 为可靠性随网络负载的变化情况。从中得知基于分配的 TDMA 协议在指定时隙进行数据收发以避免冲突, 使得 G-TDMA 和 ET-MAC 的可靠性接近 100%, 而 LMAC 的性能略差, 因相邻节点随机选择同一个时隙时会产生数据碰撞。基于竞争的 MACAW 和 ALOHA 可靠性随网络负载的增加而降低, MACAW 相比 ALOHA 具有冲突避免的握手机制, 可靠性相对较高。

图 7 为时延随网络负载变化的性能曲线。从中可以看出, ALOHA 在数据产生时立刻发送可得到最小的时延。G-TDMA 在低负载区域, 延时相对较小, 主要由信道传输时间和时隙等待引起; 在高负载区域, 网络的数据传输达到饱和, 数据包在发射缓冲区较长的等待时间导致时延急剧上升, 同时加

入保护时间的 G-TDMA 协议因时隙长度增加, 时延高于未加保护时间的理想情况。而 ET-MAC 和 LMAC 由于时隙数的增加, 数据包需等待更长的时间导致时延的增大。MACAW 由于在网络负载较低时就进入了饱和状态, 时延最大。

图 8 为网络能耗随负载的变化情况。G-TDMA 协议在低负载区域, 网络能耗随负载的增大而略微下降, 这是因为当负载很低时, 维持节点间的同步能耗作用明显, 当负载增大时, 由于接收的数据包数目增大, 使得同步能耗被平均, 整体能耗下降; 随着负载的进一步增大, 网络达到饱和导致能耗增加。保护时间的加入增加了节点的空闲监听时间, 同时 ET-MAC 和 LMAC 采用更多的时隙数也使得空闲监听时间增加, 导致网络的能耗增大。而 ALOHA 和 MACAW 协议由于数据冲突和长时间的信道监听, 因此产生很大的能耗。

5 结束语

本文针对格型水声传感器网络的特点, 提出了 G-TDMA 协议, 通过时隙的空间复用可提高信道利用率。对角节点分配相同时隙的原则以及保护时间的采用, 确保网络无数据冲突, 并在一定程度上提高了系统的可扩展性。根据仿真结果, G-TDMA 协议具有较高的网络吞吐量, 较低的延时和能量消耗, 因此适合于格型水声传感器网络的应用。

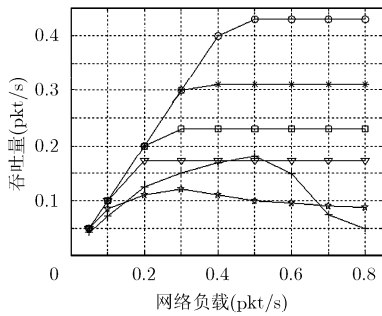


图 5 吞吐量-网络负载曲线

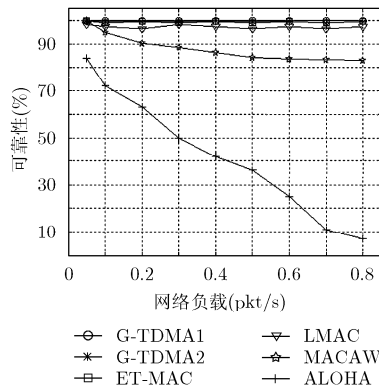


图 6 可靠性-网络负载曲线

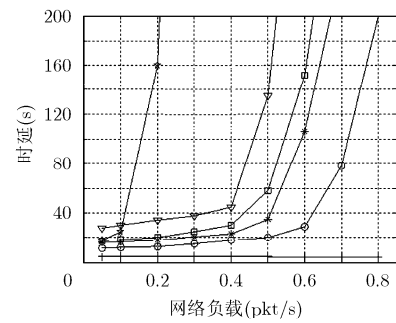


图 7 时延-网络负载曲线

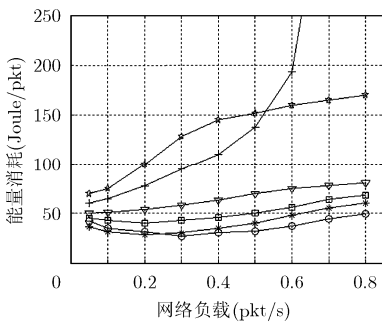


图 8 能量消耗-网络负载曲线

参考文献

[1] Chitre M, Shababuddeen S, and Stojanovic M. Underwater acoustic communications and networking: recent advances and future challenges[J]. *Marine Technology Society Journal*, 2008, 42(1): 103-116.

[2] Rodoplu V and Gohari A A. MAC protocol design for underwater networks: challenges and new directions[DB/OL]. <http://www.ece.ucsb.edu/rodoplu/publications.html>, 2008, February.

- [3] Chirdchoo N, Soh W S, and Chua K C. Aloha-based MAC protocols with collision avoidance for underwater acoustic networks[C]. IEEE INFOCOM'07, Anchorage, USA, 2007: 2271-2275.
- [4] Chen Yin-jun and Wang Hao-li. Ordered CSMA: A collision-free MAC protocol for underwater acoustic networks[C]. IEEE OCEANS'07, Vancouver, Canada, 2007: 1-6.
- [5] Chirdchoo N, Soh W S, and Chua K C. MACA-MN: a MACA-based MAC protocol for underwater acoustic networks with packet train for multiple neighbors[C]. Vehicular Technology Conference, Singapore, 2008: 46-50.
- [6] Arisha K, Youssef M, and Younis M. Energy-aware TDMA-based MAC for sensor networks[C]. IEEE Workshop on Integrated Management of Power Aware Communications Computing and Networking, New York, 2002: 69-74.
- [7] Van Hoesel L F W and Havinga P J M. A lightweight medium access protocol (LMAC) for wireless sensor networks: reducing preamble transmissions and transceiver state switches[C]. First International Conference on Networked Sensing Systems, Tokyo, 2004: 205-208.
- [8] Hong Lu, Hong Feng, and Guo Zhong-wen, *et al.* A TDMA-based MAC protocol in underwater sensor networks[C]. the 4th Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, Dalian, China, 2008: 1-4.
- [9] Akyildiz I, Pompili D, and Melodia T. State-of-the-art in protocol research for underwater acoustic sensor networks[C]. the 1st ACM International Workshop on Underwater Networks, Los Angeles, USA, 2006: 7-16.
- [10] Harris A F, Stojanovic M, and Zorzi M. When underwater acoustic nodes should sleep with one eye open: idle-time power management in underwater sensor networks[C]. the 1st ACM international workshop on underwater networks, Los Angeles, USA, 2006: 105-108.
- 钟永信: 男, 1980年生, 博士生, 研究方向为水声传感器网络.
- 黄建国: 男, 1945年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为水声通信与阵列信号处理.
- 韩晶: 男, 1980年生, 博士后, 研究方向为水声通信与水声通信网络.