

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2015.07.017

引用格式:薛宸.一种用于水声传感网的MAC层协议[J].电讯技术,2015,55(7):802-806.[XUE Chen. A MAC Protocol for Clustered Underwater Acoustic Sensor Networks[J]. Telecommunication Engineering, 2015, 55(7): 802-806.]

一种用于水声传感网的MAC层协议*

薛宸**

(北京邮电大学国际学院,北京 102209)

摘要:针对分簇的水声传感网,提出了一种基于时分多址(TDMA)的MAC层协议——Cluster-TDMA。该协议主要由规划阶段和传输阶段组成。规划阶段,首先由网关节点规划能造成簇间干扰的子节点的传输,其次由各簇头节点分别规划本簇内其他子节点的传输;传输阶段,子节点根据规划表周期性地向簇头节点发送数据,这些数据最终汇聚到网关节点。该协议简单有效地解决了引起簇间干扰子结点的传输规划问题。C++仿真实验表明,该协议具有良好的吞吐率和能量效率性能。

关键词:水声传感网;时分多址;MAC层协议;簇间干扰

中图分类号:TN915.04 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2015)07-0802-05

A MAC Protocol for Clustered Underwater Acoustic Sensor Networks

XUE Chen

(International School, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 102209, China)

Abstract: This paper proposes a MAC protocol based on time-division multiple-access (TDMA) for clustered underwater acoustic sensor networks (UW-ASN), which is named Cluster-TDMA (C-TDMA). C-TDMA mainly consists of scheduling stage and transmission stage. In scheduling stage, the transmissions of sensor nodes causing inter-cluster interference are scheduled first by the gateway node. Then cluster head nodes separately schedule the transmissions of other nodes in their own clusters. In transmission stage, sensor nodes periodically send data packets which finally converge to the gateway node to cluster head nodes according to schedule table. C-TDMA simply and effectively solves the problem of scheduling the transmissions of sensor nodes causing inter-cluster interference. The C++ simulation results show that C-TDMA works well in terms of throughput and energy efficiency.

Key words: underwater acoustic sensor network; TDMA; MAC protocol; inter-cluster interference

1 引言

随着硬件技术的发展,水声传感网(Underwater Acoustic Sensor Network, UW-ASN)被应用在多个领域,例如环境监测、矿产开采以及海岸保护等^[1-3]。由于声波在水中的传播速度的典型值为1500 m/s,且相邻传感器之间的距离多为数公里,导致 UW-ASN 中存在着很长的传播延时。加之 UW-ASN 的带宽(典型值为十几 kHz)受限,使得传统无线传感器网络

中的 MAC 层协议不能直接应用在 UW-ASN 中。

在设计 UW-ASN 的 MAC 层协议时,需考虑传播延时的影响。但正是由于存在着传播延时,两个被同时发送的数据包可能不会引起冲突,设计者可利用这一特点来提高网络的吞吐率。此外,由于传感器的电池难以更换,能量效率是必须要考虑的一个因素^[4]。

近年来,应用在 UW-ASN 中的 MAC 层协议层

* 收稿日期:2015-05-28;修回日期:2015-07-16 Received date:2015-05-28;Revised date:2015-07-16

** 通讯作者:1595523911@qq.com Corresponding author:1595523911@qq.com

• 802 •

出不穷,大致可分为竞争协议和非竞争协议两类。采用竞争协议的节点通过随机或交换控制报文的方式接入信道,虽然灵活,但是吞吐率和能量效率受限。一些协议通过在控制报文中加入预约信息的方法,显著提高了信道利用率^[5-6]。非竞争协议中以时分多址(Time-division Multiple-access, TDMA)类协议居多。TDMA 类协议有较高的吞吐率和能量效率性能,且能方便地进行休眠/唤醒控制。早期的 TDMA 协议如 ST-MAC^[7],侧重于在给定网络拓扑和流量的情况下,如何规划网络节点的传输时间,使得吞吐率到达较优的状态。而较新的 TDMA 协议,则更多地关注如何解决 TDMA 协议固有的一些问题,例如 RE-TDMA^[8]主要解决了时钟同步、中心节点的能量效率等问题。

UWAN-MAC^[9]中,各节点首先发送同步报文,告知邻居节点其传输数据的时间点。而后,各节点周期性地向邻居节点广播数据。如果没有数据要发送或者接收,节点将进入休眠状态来节省能量。在同步报文发送阶段如果出现冲突,将通过协调的方式进行解决。各节点的能量消耗是平等的,不存在个别节点能量消耗过快而影响网络整体寿命的问题。不过,该协议的性能会受到占空比的影响。

T-Lohi^[10]中,节点通过发送 tone 竞争接入信道。在发送 tone 之后的一段固定时间内,节点会监听信道。如果收到其他节点发送的 tone,则放弃传输,反之则竞争成功。收到的 tone 的数目可以在一定程度上反应同一时间段内网络中竞争者的数目,然而由于 UW-ASN 中长延时的存在,这种估计可能过于粗略。

ROSS^[11]适用于树状结构的网络,采用分布式的方法进行传输时间表的规划,从根节点到叶子节点,逐层发布自己的休眠/工作时间,包括向上层传输数据的时间以及下层各子节点传输数据的时间。一旦属于不同父节点的同层子节点发生冲突,则同层的父节点会进行协调或向更高层发送协调请求。分布式的方法具有一定的灵活性,然而生成时间表的算法的收敛速度与节点的部署有关。

Hybrid MAC Protocol^[12]和 Large Scale MAC Protocol^[13]都是针对分簇网络的。在 Hybrid MAC Protocol 中,簇内节点将自身的状态信息报告给簇头节点,由簇头节点综合各种因素后安排传输时间,而簇头节点与网关节点之间的通信则采用 CSMA/CA 的

方式。在 Large Scale MAC Protocol 中,簇内节点的传输依然由簇头节点安排,并且相邻的簇被安排在不同的时隙,相隔较远的簇可以共享同一时隙,类似于手机蜂窝网,网络可支持数百到数千个传感器。Hybrid MAC Protocol 综合了 TDMA 和 CSMA/CA 的优点,然而并没有考虑簇间干扰的情况。Large Scale MAC Protocol 适用于大规模的网络,在只有几个簇的小规模网络中会浪费带宽资源。

本文提出的协议 Cluster-TDMA (C-TDMA) 是针对分簇网络设计的。在一个典型的分簇网络中^[1],底层传感器采集到的数据经过簇头节点的中继,最终被海面上的设备(通常称之为网关节点)接收。C-TDMA 有这样几个特点:适用于小规模分簇网络,且考虑了簇间干扰问题;由网关节点和簇头节点协作完成传输时间的规划,避免了高复杂度的全局规划^[14];采用时间转换的方法,无需进行全网时钟同步^[8,15];引入了休眠/工作机制。

2 协议设计与性能分析

2.1 网络拓扑

C-TDMA 协议主要适用于分簇网络。网络由一个网关节点 (Gateway Node, GN) 和若干簇 (Cluster) 组成。每个簇由一个簇头节点 (Head Node, HN) 和若干子节点 (Sub Node, SN) 组成。分簇网络的示意图见图 1,虚线代表两个节点可以直接进行通信。在网络中,SN 将采集到的数据传给相对应的 HN,而 HN 负责把这些数据上传至 GN。一般情况下,同一个簇的 SN 之间不进行通信,并且不同簇的节点之间也不进行通信。但是因为信号是以广播的形式传播的,所以一个节点会收到来自邻近节点的干扰信号。在本文中,假设各节点的位置是固定的,且 SN 采集数据包的速度也是固定的。HN 和 SN 之间的通信,双方采用相同的发送功率。

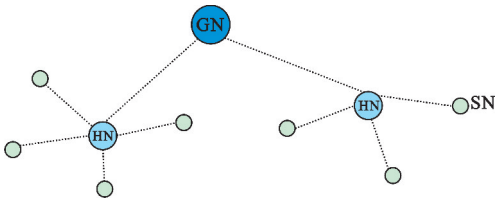


图 1 网络结构示意图
Fig. 1 Network structure

C-TDMA 协议包含以下几个阶段:首先是网络拓扑信息收集阶段;其次由 GN 和 HN 负责规划传输时间;最后是传输阶段,节点按照规划好的时间表周期性地发送数据,在每个周期内,节点会在休眠和工作状态间进行切换。下面将分别介绍这三个阶段。

2.2 收集阶段

为了给规划阶段做准备,在该阶段需要收集的信息有:

- (1)SN 与相对应的 HN 之间的时钟偏移(Clock Offset,CO)以及各 HN 与 GN 之间的时钟偏移,这样可以避免进行高复杂度的全网时钟同步;
- (2)SN 与相对应的 HN 之间的传播延时(Propagation Delay,PD),因为 SN 之间不会进行通信,所以 SN 之间的传播延时无需收集;
- (3)如果其他簇的 HN 在 SN 的传播范围内,则需收集 SN 与该 HN 之间的传播延时,因为 SN 发送的数据会对该 HN 接收的数据造成干扰;
- (4)HN 与 GN 之间的传播延时。

根据文献[8,15],CO 和 PD 的收集可以同时进行。首先进行 HN 与 GN 之间信息的收集。由 GN 发送一条广播消息,各 HN 在收到消息后,随机等待一段时间,然后向 GN 发送一条应答消息。其次进行 HN 与各 SN 之间的信息收集。过程类似,各 HN 选择一个随机的时间点发送广播消息,其簇内的 SN 以及在传播范围内的其他簇的 SN 在收到消息后,随机等待一段时间,然后向发送者传输一条应答消息。一个 HN 与 SN 之间的信息收集实例参见图 2。其中,SN1 和 SN2 为簇内节点,SN3 为其他簇的节点。HN 在 t_0 时刻发送消息,SN1 在 t_1 时刻接收到该消息,等待一段时间后,SN1 在 t_2 时刻对该消息进行应答,HN 在 t_3 时刻收到应答消息。则根据这 4 个时间点,HN 计算出 SN1 和它之间的传播延时为

$$T_{PD} = \frac{(t_4 - t_1 - (t_3 - t_2))}{2}, \tag{1}$$

时钟偏移为

$$T_{CO} = T_{SN1} - T_{HN} = \frac{(t_2 - t_1 - (t_4 - t_3))}{2}. \tag{2}$$

式中, T_{SN1} 和 T_{HN} 分别为 SN1 和 HN 的时钟。在收集完这些信息之后,HN 和 GN 会将这些信息广播出去,便于网络中的节点进行时钟映射和传输规划。此外,HN 还会将在自己传播范围内的其他簇的节

点识别码报告给 GN,这些引起簇间干扰的节点的传输由 GN 统一规划。

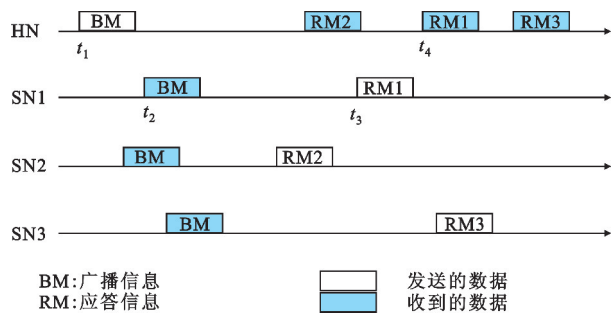


图 2 收集阶段实例
Fig.2 Illustration of collection stage

2.3 规划阶段

在 C-TDMA 中,SN 负责采集和传输数据,HN 负责将 SN 的数据聚合之后传给 GN。在规划阶段,GN 和 HN 负责规划数据包开始传输的时间,并把规划好的时间表广播给下层节点。各节点在收到时间表后,会利用之前收到的时钟偏移信息,将上层节点计算出的时间转换为本地时间,以确定数据包传输的本地时间。如前文所述,传输阶段以周期的形式进行。假设周期为 T ,规划时间为 $t_{schedule}$,则节点的传输时间为 $t_{trans} = t_{schedule} + T_{CO} + kT, k = 0, 1, \dots$ 。

规划阶段,节点被分为 3 类:HN、引起簇间干扰的 SN(Special SN,SSN)以及普通的 SN(General SN,GSN)。首先由 GN 统一规划 SSN 的传输时间,并将时间表广播给各 HN。其次,HN 在收到时间表之后,避开会影响到自己接收数据的 SSN 的传输时间,安排簇内 GSN 的传输时间,并计算出完成数据收集的时间点,然后把该时间点报告给 GN。最后,GN 计算出时间点的最大值 T_1 ,在 T_1 之后,GN 安排各 HN 的传输时间,并将时间表广播给 HN。一个簇最终的时间规划示意图如图 3 所示。

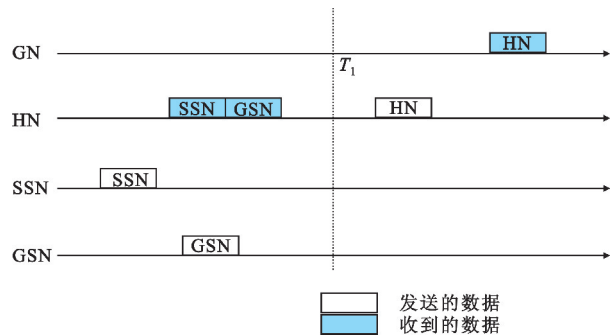


图 3 时间规划示意图
Fig.3 Illustration of scheduling stage

2.4 传输阶段

在传输阶段,各节点按照之前规划好的时间表进行传输。在一个周期内,SN 在不进行数据传输时会进入休眠状态,而 HN 则在其他 HN 向 GN 传输数据时进入休眠状态。之所以 HN 不在 T_1 之前进入休眠,是因为休眠和工作之间频繁的切换会降低能量效率^[11]。一个 HN 在一个周期内的工作/休眠情况示意图如图 4 所示。一般情况下,接收端成功收到数据后会向发送端发送确认信息,此时,数据包和确认信息可以起到收集阶段广播信息和应答信息的作用,即可完成对传播延时和时钟偏移的及时修正^[8]。

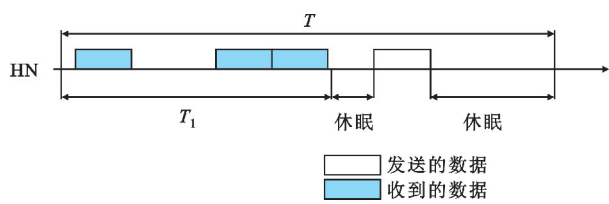


图 4 工作/休眠情况示意图
Fig. 4 Illustration of work/dormant

2.5 性能分析

因为其他簇的 SSN 会对 HN 接收数据造成干扰,所以本簇 SN 的数据包不能连续地到达 HN,使得性能有所下降,即协议的性能会受到节点部署策略的影响。当全网 SSN 的数目为 0 时,各簇可以完全并行地完成 SN 的数据传输工作,此时吞吐率达到上限。设共有 n 个簇,每个簇有 m 个 SN,则忽略掉传播延时,一个周期内完成全部数据传输任务所需的时间最少为 $m \times (n+1) \times \text{packet_size} \times \text{data_rate}$,其中 packet_size 为数据包的大小,而 data_rate 为数据率。考虑到 GN 收到的数据量为 $m \times n \times \text{packet_size} \times \text{data_rate}$,则吞吐率的上限(用 data_rate 进行归一化)为

$$\frac{m \times n}{m \times (n+1)} = \frac{n}{n+1} \quad (3)$$

3 C++仿真实现

利用 Visual Studio 2012 平台对 C-TDMA 协议进行仿真,仿真中各参数的设置如表 1 所示。

表 1 仿真参数设置
Table Simulation parameter setting

参数	取值
声速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	1500
传播范围/km	1.5
数据率/($\text{kb} \cdot \text{s}^{-1}$)	16
发送功率/mW	80
接收功率/mW	10
闲时功率/mW	10
簇数目	3

当簇内 SN 的数目分别为 3、5、8 时,吞吐率和能量消耗随流量(即 T 时间内各 SN 产生的数据量)的变化如图 5 和图 6 所示。由图 5 可知,吞吐率随着流量的增长呈现上升的趋势,且当流量为 1 时达到稳定的状态,并且 SN 数目为 8 时的性能要明显优于 SN 数目较小的情况。而在能量消耗上,随着流量的增长,能量消耗在流量为 0.5 时就趋于平稳。不同的节点数目在达到平稳之前能量消耗略有差异,但稳定之后却相差不大。当固定簇内 SN 的数目为 8、改变全网 SSN 的数目时,得到吞吐率随流量的变化如图 7 所示。当 SSN 数目为 0 时,无簇间干扰,吞吐率接近 0.75,与式(3)相符。

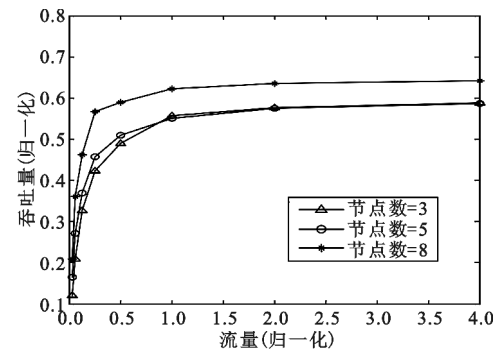


图 5 不同节点数目的吞吐率性能
Fig. 5 Throughput performance in different node numbers

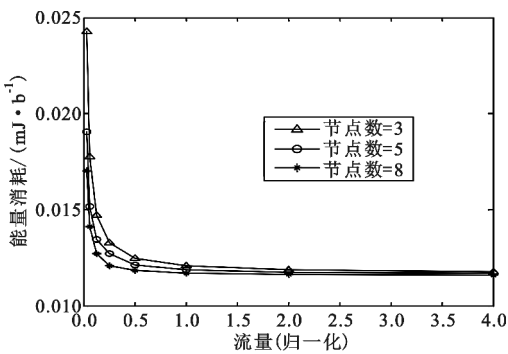


图 6 不同节点数目的能量效率性能
Fig. 6 Energy efficient in different node numbers

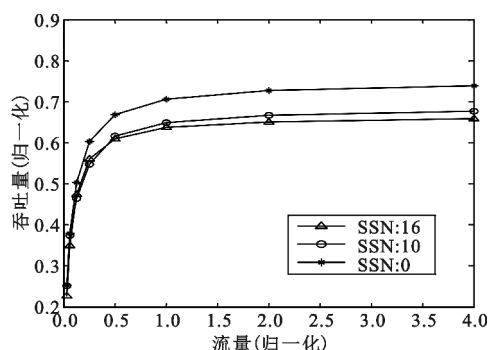


图7 不同SSN数目的吞吐率性能

Fig.7 Throughput performance in different SSN numbers

4 小 结

本文提出的 MAC 层协议适用于小规模的分簇水声传感网。在传输时间规划方面,由网关节点和簇头节点协作完成,消除了簇间干扰。休眠机制的引入可以有效地提高能量效率,而时间转换的方法也避免了高复杂度的全网时钟同步。

参考文献:

- [1] Akyildiz I F, Pompili D, Melodia T. Underwater Acoustic Sensor Networks: Research Challenges [J]. Elsevier Journal of Ad Hoc Networks, 2005, 3(3): 257-279.
- [2] Heidemann J, Li Y, Syed A, et al. Underwater sensor networking: Research challenges and potential applications [C]//Proceedings of 2006 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Las Vegas, Nevada, USA: IEEE, 2006: 1-5.
- [3] Heidemann J, Stojanovic M, Zorzi M. Underwater sensor networks: applications, advances and challenges [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2012, 370 (1958): 158-175.
- [4] Zheng J, Jamalipour A. 无线传感器网络 [M]. 张杰,唐宏,雷洋,等,译.北京:国防工业出版社,2014. Zheng J, Jamalipour A. Wireless Sensor Networks [M]. Translated by ZHANG Jie, TANG Hong, LEI Yang, et al. Beijing: National Defense Industry Press, 2014. (in Chinese)
- [5] Yu Y, Shi J, He K. A Multichannel MAC Protocol for Underwater Acoustic Sensor Networks [C]//Proceedings of the International Conference on Underwater Networks & Systems. Rome, Italy: ACM, 2014: 1-5.
- [6] Zhao Q, Lambert A, Benson C R. FS-MACA: A Future Scheduling MAC Protocol in Underwater Acoustic Networks [C]//Proceedings of the International Conference on Underwater Networks & Systems. Rome, Italy: ACM, 2014: 1-4.

- [7] Hsu C C, Lai K F, Chou C F, et al. ST-MAC: Spatial-temporal mac scheduling for underwater sensor networks [C]//Proceedings of 2009 IEEE International Conference on Computer Communication. Rio de Janeiro, Brazil: IEEE, 2009: 1827-1835.
- [8] Zhang J, Qiao G, Zhou F. A relative clock based and energy sense MAC protocol for underwater acoustic communication networks [C]// Proceedings of OCEANS 2014. Taipei: IEEE, 2014: 1-5.
- [9] 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.
- [10] Syed A, Ye W, Heidemann J. T-Lohi: A new class of MAC protocols for underwater acoustic sensor networks [C]// Proceedings of the 27th International Conference on Computer Communications. Phoenix, AZ, USA: IEEE, 2008: 1-5.
- [11] Hong L, Hong F, Yang B, et al. ROSS: receiver oriented sleep scheduling for underwater sensor networks [C]//Proceedings of the Eighth ACM International Conference on Underwater Networks and Systems. Kaohsiung, Taiwan: ACM, 2013: 1-4.
- [12] Jagannath J, Saji A, Kulhandjian H, et al. A hybrid MAC protocol with channel-dependent optimized scheduling for clustered underwater acoustic sensor networks [C]//Proceedings of the Eighth ACM International Conference on Underwater Networks and Systems. Kaohsiung, Taiwan: ACM, 2013: 1-3.
- [13] Kleunen W, Meratnia N, Havinga P J M. Mac scheduling in large-scale underwater acoustic networks [C]// Proceedings of 2011 International Conference on Wireless Information Networks and Systems. Seville, Spain: IEEE, 2011: 27-34.
- [14] Kredo K, Mohapatra P. Distributed scheduling and routing in underwater wireless networks [C]// Proceedings of 2010 Global Telecommunications Conference. Miami, Florida, USA: IEEE, 2010: 1-6.
- [15] Xie P, Cui J H. R-MAC: An energy-efficient MAC protocol for underwater sensor networks [C]// Proceedings of 2007 International Conference on Wireless Algorithms, Systems and Applications. Chicago, IL: IEEE, 2007: 187-198.

作者简介:



薛 宸(1994—),男,江苏人,主要研究方向为电信工程及管理。

XUE Chen was born in Jiangsu Province, in 1994. His research concerns telecommunications engineering with management.

Email: 1595523911@qq.com