

文章编号:1007-5321(2015)增-0107-04

DOI:10.13190/j.jbupt.2015.增.024

# 基于 CDMA 的水下传感器网络 MAC 协议设计

白 磊<sup>1</sup>, 冯振兴<sup>2</sup>, 田立勤<sup>1</sup>

(1. 华北科技学院 计算机学院, 北京 101601; 2. 青海师范大学 计算机学院, 西宁 810008)

**摘要:** 水下传感器网络(UWSN)中节点采用声波通信,水声信道的高误码率、长延迟、低带宽、多径效应、多普勒频散等技术,据此提出一种动态的、分布式的基于码分多址(CDMA)的水下传感器网络介质访问控制层(MAC)协议。该协议不但节能,还能够提高CDMA扩频码的重用率,并且能够适应网络拓扑的动态变化。同时,协议使用了功率控制机制,有效解决CDMA系统中普遍存在的“远-近”效应问题。仿真实验表明,与经典的静态编码分配协议和ALOHA相比,该协议在冲突率、交付率、端到端的延迟、能耗等方面具有更好的性能。

**关键词:** 水下传感器网络; 介质访问控制; 码分多址

中图分类号: TP393

文献标志码: A

## CDMA Based MAC Protocol for Underwater Sensor Networks

BAI Lei<sup>1</sup>, FENG Zhen-xing<sup>2</sup>, TIAN Li-qin<sup>1</sup>

(1. College of Computer Science, North China Institute of Science and Technology, Beijing 101601, China;

2. College of Computer Science, Qinghai Normal University, Xining 810008, China)

**Abstract:** According to the characteristics that the sensor nodes in underwater sensor network (UWSN) adopt acoustic communication, characterized by high error rate high delay, low bandwidth, multipath and Doppler shift, etc., the current communication protocols designed for radio channels are unsuitable for underwater. So, a new dynamic and distribute code division multiple access (CDMA)-based media access control (MAC) protocol for UWSN was proposed. The protocol not only can save the limited energy of mobile nodes, but also increase the CDMA code reusability. The protocol can be adapted to the dynamic topology of UWSN. At the same time, the design of power control can minimize the near-far effect inherit in CDMA. Simulation indicates that, compared with the static code assignment protocol and ALOHA, the performance of the protocol mentioned above is satisfied on delivery ratio and end-to-end delay.

**Key words:** underwater sensor network; media access control; code division multiple access

水下传感器网络(UWSN, underwater sensor network)作为一个新生的信息网络已逐步成为各国学者研究的热点,它在海洋环境监测、近海勘探、辅助航行、海啸预警以及海洋军事等领域具有广阔的应用前景<sup>[1]</sup>。由于UWSN中的节点长期处于恶劣的水下环境中,多径效应和衰减导致水声信道带宽低、高可变延迟、高误码率和连通性差等特点,导致传统的

地面通信介质访问控制层(MAC, media access control)协议无法直接应用水下。因此设计一个专门用于水下环境的媒体访问控制(MAC)协议是UWSN所面临的一个重要课题<sup>[2]</sup>。

提出一种新的基于改进的码分多址(CDMA, code division multiple access)的UWSN MAC协议,该协议采用基于节点对的方式为每一个节点分配扩频

收稿日期: 2014-08-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(61472137); 中央高校基本科研业务费(3142014085, 3142014100)

作者简介: 白 磊(1982—), 男, 讲师, E-mail: leib\_cn@163.com.

码,同时使用功率控制机制解决了 CDMA 系统中普遍存在的“远-近”效应问题. 该协议旨在实现以下 3 个目标:高数据交付率、低延迟、低能耗.

1 相关工作

现有的无竞争的 MAC 协议的解决方案大多数都是采用载波侦听多路访问 (CSMA, carrier sense multiple access) 或 CDMA<sup>[3]</sup>. 由于水声信道可用频带有限并且对多径效应和信号衰落非常的脆弱,美国 Sea web 计划研究表明频分多址 (FDMA, frequency division multiple access) 无法应用于 UWSN. 此外,时分多址 (TDMA, time division multiple access) 需要长时间的侦听信道,并且实现精确的时间同步非常困难<sup>[4]</sup>.

基于竞争的协议包括随机访问和冲突避免两种类型:随机访问协议会产生干扰;冲突避免协议将大大降低信道的利用率,增加端到端的延迟<sup>[5]</sup>.

扩频码的分配是基于 CDMA 的 MAC 协议的重要组成部分,它对协议的性能有很大的影响<sup>[6]</sup>. 虽然最优的正交码分配算法是一个非确定多项式 (NP, non-deterministic polynomial) 完全问题,但一些特定的编码冲突情况可以根据节点的发送或接收状态对其忽略.

2 MAC 协议设计

2.1 网络模型与初始化

为了描述编码分配算法,可以将 UWSN 的网络模型定义为一个无向图  $G = (V, E)$ , 其中  $V$  是传感器节点的集合,  $E \subseteq V \times V$  是边的集合. 节点使用的是全向天线,工作在半双工模式,当节点的能量耗尽失效时与节点连接的链路失效分配给该节点的正交扩频码释放.

UWSN 中的每一个节点都需要维护一个邻居表,图 1 中节点 1 的邻居表如表 1 所示,记录两跳以内的邻居节点的信息如节点编号、地理坐标、剩余能

量、正交码索引等信息. 相邻节点之间可以相互交换邻居表中的信息,确保能够在邻居表中保存两跳以内的邻居节点的正交码信息.

表 1 节点 1 的邻居表

节点编号	地理坐标	能量	正交码
ID-2	$x, y, z$	Energy-2	2
ID-3	$x, y, z$	Energy-3	3
ID-4	$x, y, z$	Energy-4	4
ID-5	$x, y, z$	Energy-5	5
ID-6	$x, y, z$	Energy-6	6

2.2 正交扩频编码分配方式

该协议的基本思想,即通过判断请求分配扩频码节点的邻居节点处于发送还是接收状态,以提高 CDMA 正交扩频码的重用率,场景设置如图 2 所示.

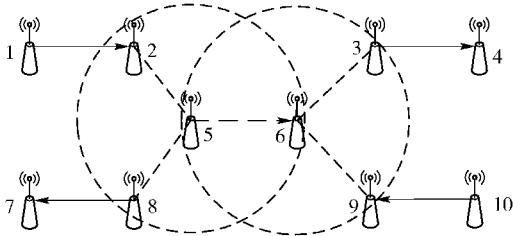


图 2 正交扩频编码分配场景

其中场景中的箭头实线表示正在进行的传输,虚线则表示两个端节点在彼此的通信半径之内. 例如节点 5 需要向 6 发送采集的数据,则 5 需要避免使用节点 2 和其他的相邻的接接收节点所使用的正交码,节点 6 则不能够使用节点 3 和其他处于发送状态的节点所用的正交码. 在这种情况下,节点对 5→6 发送数据可以使用 8→7 和 10→9 的扩频码.

CDMA 正交扩频编码分配过程大致可以分为以下 3 步.

1) 通过邻居表信息获取邻居节点所使用的正交扩频码. 无论节点是空闲或忙,各个节点必须周期性地与邻居节点交换其邻居表信息,从而确保及时获得相邻节点所使用的扩频码. 如果节点正在发送数据,则该节点必须将当前状态告知邻居节点.

2) 利用邻居表中的编码分配信息,确定可用的正交扩频码的集合. 当节点需要传输数据时,它将启动 CDMA 正交扩频编码的分配过程,并从中选择一个可用的扩频码. 发送节点可以通过邻居表中的信息获得已经使用的扩频码集合  $\alpha_x$ ,  $\chi$  为所有扩频码的集合,则未使用的扩频码集合可以表示为:  $\beta_x = \chi - \alpha_x$ . 发送节点通过 RTS 控制包将  $\beta_x$  中的扩频码

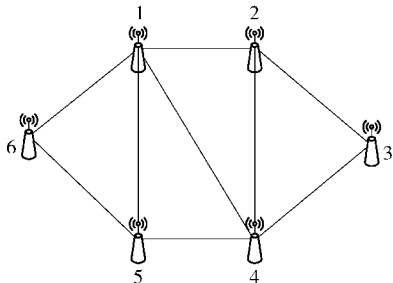


图 1 邻居节点示意图

信息发送到目的节点,目的节点根据  $\beta_x$  和自身的  $\beta_y = \chi - \alpha_y$  的交集,从中随机选择一个可用的扩频码  $\beta_{x \cap y} = \beta_x \cap \beta_y$ ,随后通过 CTS 将选择的扩频码发送到源节点。

### 3) 开始进行数据传输

发送节点使用目的节点回复的 CTS 中的正交码开始进行数据的传输。传输开始之后为了降低能耗以及邻居节点之间的相互干扰,发送节点可以根据两者之间的距离适当地调整发送功率。

## 2.3 功率控制机制

由于基于 CDMA 的系统中普遍存在“远-近”效应,即由于各个节点到基站距离不同,有的节点距离基站近,有的比较远,当采用统一的功率发送数据时,造成各个节点发送的无线信号不同程度的衰减,则距离基站近的节点的信号会对较远节点信号的接收质量产生影响。所以提出功率控制机制,发送节点可以根据与目的节点距离适当地调整发送功率。尤里克模型给出了水声信道的路径损耗模型:

$$T_{ij} = d_{ij}^{\xi} \times 10^{[\alpha(f) \cdot d_{ij} + A]/10} \quad (1)$$

其中: $\xi$  为几何扩散,深水环境  $\xi = 2$ ,浅水环境是  $\xi = 1$ ;  $A$  为传输异常,是信号在传输过程中由于多径效应、折射、衍射以及散色所造成的信号强度衰减,  $A \in [0, 5]$  dB;  $d_{ij}$  为节点  $i$  和  $j$  间的距离;  $\alpha(f)$  为吸收系数 dB/km。

发送节点  $i$  要满足以下两点:1) 足够大的发送功率,确保接收端  $j$  能够正常接收信号;2) 避免影响到正在进行的通信,如图 2 中的 1→2 和 3→4 等;这些约束条件可以分别表示为

$$\frac{P_{\text{noise}} + P_{\text{MAI}}^j}{P_{ij}/T_{ij}} \leq \omega_{ij} \psi_j \quad (2)$$

$$\frac{P_{\text{noise}} + P_{\text{MAI}}^k + P_{ij}/T_{ij}}{P_{\text{rec}}^k} \leq \omega_{ik} \psi_k, \forall k \in K_i \quad (3)$$

其中: $P_{\text{noise}}$  为平均噪声功率,  $P_{\text{MAI}}^j$  和  $P_{\text{MAI}}^k$  为节点  $j$  和  $k \in K_i$  处的多址干扰 (MAI, multiple address interference),  $K_i$  为发送节点  $i$  可能会影响到的正在通信的节点的集合,  $\omega_{ij}$  和  $\omega_{ik}$  为节点  $i \rightarrow j$  和  $i \rightarrow k$  通信的带宽扩频因子,  $P_{\text{rec}}^k$  是节点  $k$  处的接收功率,  $\psi_x = \Phi(B_x)$  为多址干扰门限值,根据接收节点的误码率 ( $B$ ) 确定其值。

由式(2)和式(3)合并整理可得

$$\left. \begin{aligned} & \frac{(P_{\text{noise}} + P_{\text{MAI}}^j) T_{ij}}{\omega_{ij} \psi_j} \leq P_{ij} \\ & \min k \in K_i \{ [P_{\text{rec}}^k \omega_{ik} \psi_k - (P_{\text{noise}} + P_{\text{MAI}}^k)] T_{ik} \} \geq P_{ij} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

由式(4)可得最佳的发送功率  $P_{ij}^{\text{opt}}$  为

$$P_{ij}^{\text{opt}} = \frac{(P_{\text{noise}} + P_{\text{MAI}}^j) T_{ij}}{\omega_{ij} \psi_j} \quad (5)$$

## 3 性能评估

对提出的改进的 CDMA 协议的性能进行评估,并同 UWSN 中现有的 MAC 协议静态编码分配协议和 ALOHA 协议进行对比。选择 NS-2 作为实验仿真平台。从冲突节点概率、平均端到端的延迟、平均能耗和数据包的交付率等方面对协议的性能进行评估。仿真参数设置如表 2 所示。

表 2 仿真场景参数设置

参数类型	参数值
带宽/(kbit·s <sup>-1</sup> )	20
声速/(m·s <sup>-1</sup> )	1 500
传播半径/m	1 000
背景噪声/W	0.01
频率/kHz	25
空闲功率/W	0.01

静态编码分配方式与改进的 CDMA (P-CDMA) 中的编码分配方式冲突概率对比如图 3(a) 所示;平均端到端的延迟如图 3(b) 所示;每比特的能耗 (J/bit) 如图 3(c) 所示,数据包的交付率,即目的节点成功接收的数据包与源节点发送的全部数据包数量之比,如图 3(d) 所示。

与静态编码分配方式相比,由于 P-CDMA 协议通过判断请求分配扩频码节点的邻居节点的发送-接收状态和通过源节点和目的节点的共同协商所确定,则在相同的冲突节点数的条件下 P-CDMA 的编码分配方式提高了扩频码的重用率。从图 3(a) 可以看出,根据图像所围的面积得 P-CDMA 在降低冲突率上要优于静态方式约 30%。另外,由于 P-CDMA 协议采用功率控制机制,能够根据传输距离的需要适当地调整发送功率以减少不必要的能耗,同时功率控制还可以降低“远-近”效应和强弱信号之间的干扰,从图 3(b) ~ (d) 可以看出,该协议在平均延迟、能耗和数据包的交付率上要优于现有协议。同时,还可以看出其他两种协议受节点数量影响性能指标变化比较大,而 P-CDMA 协议采用扩频码进行通信,使用不同扩频码的节点可以同时进行通信而不产生干扰并且一个接收节点可以同时收到多个使用不同扩频码的源节点发送的数据,因此相

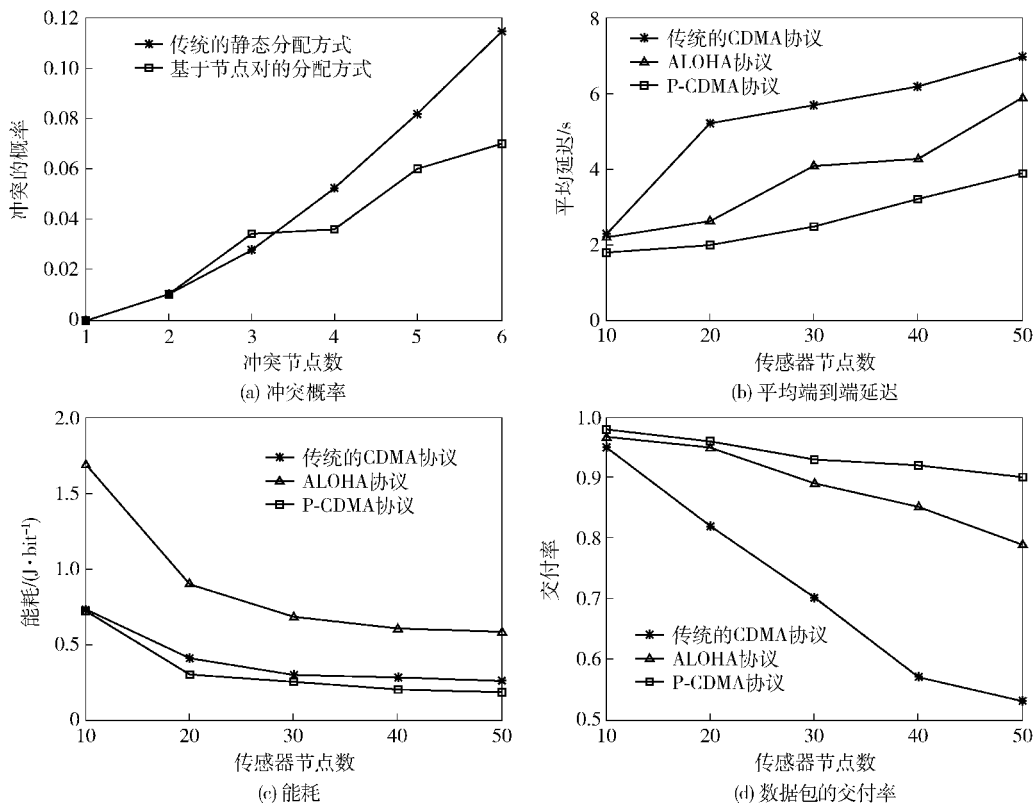


图3 P-CDMA 的性能

对比较稳定。

## 4 结束语

提出了一种基于 CDMA 的 UWSN MAC 协议, 该协议通过源节点和目的节点配合完成扩频码的分配, 提高了扩频码的重复利用率。同时, 为了解决 CDMA 系统中普遍存在的“远-近”效益问题, 提出了功率控制机制。传感器节点可以根据发送-接收节点的距离选择合适的发送功率, 提高了数据的交付率和信道的利用率。仿真实验表明, 提出的协议在降低节点的冲突率、数据包的交付率、端到端的延迟和能耗等方面具有较好的性能。

## 参考文献:

- [1] 刘功亮, 王雪, 康文静. 基于压缩感知的水下传感器网络预约多址接入协议[J]. 计算机应用研究, 2013, 30(6): 3469-3471.  
Liu Gongliang, Wang Xue, Kang Wenjing. Reservation multiple access protocol in underwater sensor networks based on compressed sensing [J]. Application Research of Computers, 2013, 30(6): 3469-3471.

- [2] Domenico A D, Strinati E C. A survey on MAC strategies for cognitive radio networks [J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2012, 14(1): 21-44.
- [3] 王静, 陈建峰, 张立杰, 等. 水下无线传感器网络[J]. 声学技术, 2009, 28(2): 89-95.  
Wang Jing, Chen Jianfeng, Zhang Lijie, et al. Underwater sensor networks[J]. Technical Acoustics, 2009, 28(2): 89-95.
- [4] 罗涛, 赵明, 李静叶, 等. 认知无线电自组织网络 MAC 协议[J]. 计算机学报, 2013, 36(7): 1337-1348.  
Luo Tao, Zhao Ming, Li Jingye, et al. MAC protocols in cognitive radio Ad Hoc networks[J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 36(7): 1337-1348.
- [5] 张德升, 李金宝, 郭龙江. 异步多信道无线传感器网络 MAC 协议[J]. 软件学报, 2012, 23(3): 613-628.  
Zhang Desheng, Li Jinbao, Guo Longjiang. Asynchronous multi-channel MAC protocol for WSN [J]. Journal of Software, 2012, 23(3): 613-628.
- [6] Chen Qian, Liang Yingchang. A two-level MAC protocol strategy for opportunistic spectrum access in cognitive radio networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(5): 2164-2180.