

# 三维网络拓扑结构的水声传感器网络 MAC 协议<sup>①</sup>

张迎迎<sup>1</sup>, 刘广钟<sup>2</sup>, 徐 明<sup>3</sup>

<sup>1</sup>(上海海事大学 信息工程学院, 上海 201306)

<sup>2</sup>(复旦大学 上海市智能信息处理重点实验室, 上海 201306)

**摘 要:** 水声传感器网络 Underwater Acoustic Sensor Network(UWASN)由于其广阔的应用前景, 近年来逐渐被人们关注. 然而由于水下环境的限制性, 水声传感器网络具有其一些独特性. 例如, 与二维的陆地传感器网络不同, 水声传感器网络是三维的. 如今, 现有的介质访问控制 Medium Access Control(MAC)协议大多是针对二维无线传感网络, 很少有基于三维水声传感器网络的 MAC 协议. 针对水下三维网络, 提出了基于三维网络拓扑结构的水声传感器网络 MAC 协议. 该协议将网络中的节点生成树结构, 并利用子节点与父节点之间的关系, 通过动态节点算法实现三维动态的水声传感器网络. 此外, 详细分析了节点间的碰撞并有效解决各种碰撞, 从而大大提高了信道利用率. 通过仿真软件对比不同协议在同一网络拓扑中的实验结果, 证实文中协议能够有效节约大量能源.

**关键词:** 水声传感器网络; 三维拓扑结构; MAC 协议; 树结构; 节点动态算法

## Three Dimensional Topology Based MAC Protocol for Underwater Acoustic Sensor Networks

ZHANG Ying-Ying<sup>1</sup>, LIU Guang-Zhong<sup>2</sup>, XU Ming<sup>3</sup>

<sup>1</sup>(College of Information Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

<sup>2</sup>(Shanghai Key Laboratory of Intelligent Information Processing, Fudan University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** Due to underwater acoustic sensor networks' (UWASN) broad application prospects in recent years, it catches people's attention gradually. However, due to restrictive underwater environment, acoustic sensor network has some uniqueness. For example, unlike two-dimensional terrestrial sensor networks, underwater acoustic sensor network is three-dimensional. Today, the most existing Medium Access Control (MAC) protocol are designed for the two-dimensional wireless sensor networks, instead of wireless networks based on 3D rarely. In this paper, we proposed a three-dimensional network topology based underwater acoustic sensor network MAC protocol. Nodes in the network will be placed to tree structure according to this protocol. This protocol uses the relationship between the child and its parent, to achieve dynamic three-dimensional networks through dynamic node algorithm. In addition, we analyze and effectively resolved the collision between the nodes, greatly improving the channel utilization. Through the simulation software contrast experimental results of different protocols on the same network topology, it confirms that our protocol can effectively save a lot of energy.

**Key words:** underwater acoustic sensor networks; three-dimensional topology; MAC protocol; tree structure; node dynamic algorithm

地面传感器网络已成功用于多种应用, 如环境监测、监视和跟踪、采矿、生物医学应用、交通监控、气象和地震监测. 地球是一个水的星球, 并且水下环

境在很大程度上影响地球上的生命. 由于水下传感器网络可以实现各种应用程序, 如污染监测、海洋数据收集、海上勘探和战术监视应用程序. 因此, 水下活动

① 基金项目:国家自然科学基金(61202370);上海市教委科研重点创新项目(12ZZ151)

收稿时间:2014-10-24;收到修改稿时间:2014-12-01

需要广泛的监测<sup>[1]</sup>.

与地面无线信道相比, UWASN 的水声信道具有一些独特的性质. 由于水下采用声波作为传播介质, 而声波的传输速度为 1500m/s, 相比陆地上以广播和无线电作为传输介质, 水下传输具有较长的传播延迟. 除此以外高能耗和有限的可用带宽, 所有这些因素给 MAC 协议设计带来了巨大挑战.

水下传感器包括各种测量水质的传感器, 如温度、密度、盐度、含氧量等等<sup>[1]</sup>. 这些传感器由电池供电, 在水下环境中不可替换或者替换不易. 在多跳路由协议中传感器节点充当路由器, 通过多跳将遥感数据传输到位于海洋的表面或在岸上的基站. 水下环境复杂, 由于洋流、腐蚀等原因传感器会脱离原本的网络, 而当文中新加入一个节点时, 也会改变该网络的结构. 所以, 水下的网络是一个动态的传感器网络. 文中, 文中通过动态节点算法实现该动态网络.

与安置在地面上二维的传感器网络不同, 由于传感器节点通常漂浮在海洋的不同深度, 所以水下的传感器网络是三维的. 目前, 已经有许多针对 UWASN 的 MAC 协议. 如 UWASN-MAC<sup>[2]</sup>、MACA-MN<sup>[3]</sup>、Ordered CSMA<sup>[4]</sup>、Slotted FAMA<sup>[5]</sup>、等, 这些协议大多是针对二维静态网络的, 因此并不适用于三维动态传感网络, 何俊在文献[6]中, 对这些协议做了详细的分类说明. 所以, 文中提出基于三维网络拓扑结构的水声传感器网络 MAC 协议(Three Dimensional Topology Based MAC protocol for underwater acoustic sensor networks, 简称 TDTB MAC). TDTB MAC 不仅能实现三维动态网络, 同时能够避免节点之间的数据碰撞, 从而提高信道利用率.

文中组织如下: 在第二节中介绍一些相关工作, 在第三节中, 文中详细解释 TDTB MAC 协议, 接下来在第四节中给出该协议的仿真结果, 最后在第五节中, 文中给出总结.

关键词库的结合大大提高了信息抽取算法的准确性和通用性, 基于 Web 信息抽取的混合交通出行方案生成与表示系统的成功实验也证明了本文提出的 Web 信息抽取算法的实用性.

## 1 相关工作

### 1.1 体系结构

在这一节中, 主要介绍三维水声传感器网络的体

系结构<sup>[1]</sup>和三维水下监视传感器网络体系结构.

在三维水声传感器网络中, 传感器节点悬浮在水中不同深度来监测数据. 如图 1 所示, 每个传感器安置在可以将传感器推向水面的浮标上, 底部用缆线连接锚, 通过调节连接传感器和锚的绳长可调整传感器节点在水下的深度.

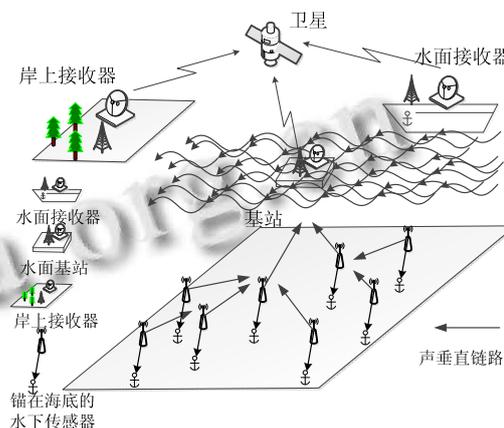


图 1 三维水下传感器网络

刘华峰在三维水下监视传感器网络的拓扑算法<sup>[7]</sup>中提出一种三维水下监视传感器网络体系结构. 在该体系结构中, 一个水下监视设备由三部分组成, 分别为: 浮标、传感器节点和锚. 如图 2 所示, 初始阶段, 传感器与浮标均漂浮在海面上. 随后根据相关的控制算法调整浮标与节点之间缆线的长度, 将节点调整到一定深度.

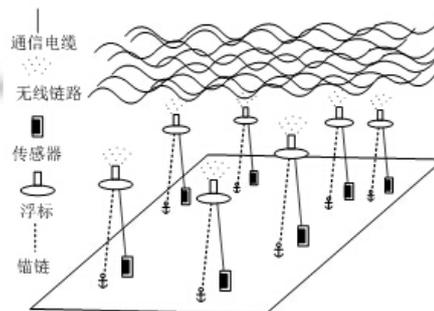


图 2 三维水下监视传感器网络体系结构

### 1.2 三维传感网中 MAC 协议挑战

水声传感器网络的组网形式很特殊, 其传播介质是水, 传播工具为声波, 与陆地的介质为空气或电磁波不同. 例如, 水下声波的传播速率比电磁波的速率低 5 个数量级, 传输时延为 0.67s/km. 除此以外, 由于海水声速的变化, 以及水下多路径, 这些都降低了传

输速率和提高了误码率。再次,水声信道的复杂环境,如:强噪声、多普勒频移、多途干扰限制了可靠通信的带宽和范围。因此,这给水声传感器网络的 TDTB-MAC 协议设计带来了挑战。

三维水声传感网络中,节点分布在横向和纵向的三维空间中,节点如何形成合适的网络拓扑结构,这是 TDTB-MAC 协议设计的难点之一。

最后,由于三维水声传感网络中,节点是动态的,整个网络也是动态的,因此会产生大量的碰撞和重发,这将浪费许多能耗。如何处理退出或加入网络的节点这也是 TDTB-MAC 协议设计所要解决的。

在传统的二维水声传感网络 MAC 协议中,并没有有效解决三维传感器网络节点动态所产生的碰撞和适合的通信方式。另外,二维传感器网络的网络拓扑并不适用于三维。

TDTB-MAC 协议能够有效解决这一切。

## 2 TDTB MAC协议设计

在这一节中详细介绍 TDTB MAC 协议,首先文中引入该算法的网络模型,接着给出实现该网络的节点动态算法,最后介绍该网络的信道划分技术和碰撞类型及各种碰撞类型对应的解决方案。

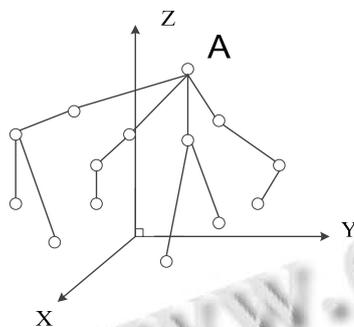


图3 TDTB MAC 协议的网络模型

### 2.1 网络模型

TDTB MAC 协议的网络模型如图 3 所示。不同于 Lu Hong 等人在<sup>[5]</sup>中提出的二维静态的树网络拓扑结构,文中提出的是一个动态的三维的树网络拓扑结构。在该网络结构中,根节点为基站如图中 A 节点,其他为传感器节点。

### 2.2 网络的动态实现

网络的动态实现主要分为两种情况,分别为节点加入和节点退出,具体实现如算法 1 所示。

#### A. 节点加入

首先,文中假设 10m 左右为一层,该参数可根据实际情况改变。声波在水中的传播速度为 1500m/s,则  $10m \div 1500m/s \approx 0.0067s = 6.7ms$  以图 3 中节点 D 加入网络为例,D 节点向 A 发送数据包, $t$  为 D 发送数据包到 A 所需的时间, $(t/6.7+1)$  即节点 D 之所在的层数,且新加入节点皆为叶子节点。

#### B. 节点退出

文中以图 3 为例,介绍传感器节点离开网络的三种情况,以及不同情况下,网络对应的解决方案。

##### (1) A(根)失去功能;

每个节点中有一个计数器,记录了成功发送数据包的数目 counter, A 从网络离开时,查看 B 和 C 的计数器,计数器数值大的一方代替 A,例如 B 代替 A,则 c 成为 B 的孩子节点。与 D、E 成为兄弟。

##### (2) B(中间)失去功能;

D、E 节点中的计数器值,相对较大者代替 B 节点。假设 D 节点的计数器值大于 E,则 D 代替 B,而 E 则成为 D 孩子节点。

##### (3) D(叶子)失去功能;

由于 D 为叶子节点,所以 D 直接退出网络,不需要其他操作。

#### 算法 1

---

```

1: when a node want to join the net
2:  $L = (t/6.7+1)$ ;
3: set node in the L layer;
4: unset all nodes' counter;
5: when a node want to wipe off the net
6: if the node is the root node
7:   root = root .child[MAX counter];
8: else if the node is inter node
9:   inter = inter .child [MAX counter];
10: else if the node is leaf node
12:   wipe off directly;
```

---

### 2.3 碰撞解决和信道划分

在文中的 TDTB MAC 协议中,信道划分采用 TDMA 技术。在树结构的每一层中,按照计数器大小设定级别。例如 b 的计数器比 c 大,则 b 为一级, c 为二级。在发送过程中, b 先发, c 迟发一个时隙。若有其他兄弟以此类推。父节点收到信息后发送 ACK 确认信息给子节点,然后子节点的计数器加 1。因为每一层

与父节点相距 10m 左右, 一个时隙  $\tau$  = 收/发时间 + 节点间传播时延, 发送机制如图 4 所示.

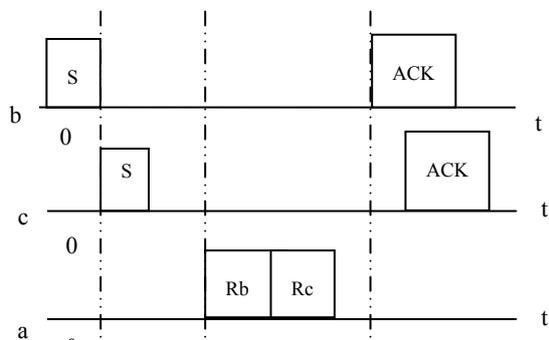


图 4 TDMA 机制-S:发送, R:接收, ACK:确认

由于无线收发器通常工作在半双工模式下, 因此, 在一个单一的信道中, 节点不能同时收发数据包, Lu Hong 等人在<sup>[8]</sup>树结构网络模型中介绍了三种冲突情况, 分别如图 5(a)、(b)和(c)所示, 文中中也给出这三种冲突情况, 但文中提出了不同的解决策略.

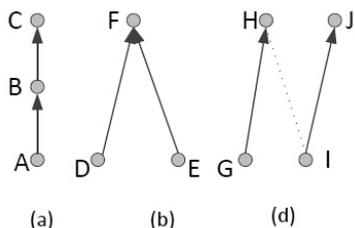


图 5 三种冲突情况

假设 B 有 m 个孩子, 则 B 的发送时间=孩子节点中最早的发送时间 +  $m * \tau$ . 所以(a)的冲突情况可以解决. 由于兄弟节点间相隔 1 个时间间隙发送, 所以(b)的冲突情况可以解决. 在每个数据包的头部加入了该节点的父亲、孩子节点信息. 例如: H 收到 I 发送的信息后, 发现 I 不是自己的孩子节点便丢弃 I 的数据包, 所以(c)的冲突可以解决.

若 t 时间过后子节点没有收到 ACK 确认, 则计数器维持原样, 并且将数据缓存下个周期再次发送, 一共三次. 若三次都没发成功则丢弃该数据包.

### 3 TDTB MAC协议仿真结果

在这一节中, 将会给出 TDTB MAC 协议的仿真结果, 并且文中选取 MATLAB 作为仿真工具. 在仿真过程中, 文中将 64 个传感器节点置于长 2000m, 宽

2000m、高 700m 的长方体中, 这些节点随机分布在长方体的水平方向和垂直方向. 设定网络带宽为 10kps, 数据包大小为 2400bit, 声波在水中的传播速度为 1500m/s, 节点间的通信半径和干扰半径均为 500m.

作为对比, 文中选取同样使用 TDMA 技术的 ST-MAC<sup>[9]</sup>和 ROSS 与文中的 TDTB MAC 协议一起进行仿真. 仿真过程中文中主要考虑在 10 个周期里网络的吞吐量, 以及节点加入和退出网络时由于碰撞而产生的能耗.

如图 6 所示, 为该网络中的吞吐量仿真结果. 其中, x 轴为时间周期, y 轴为吞吐量. 文中容易得到 TDTB MAC 协议具有最大吞吐量, 随后是 ROSS 和 ST-MAC. 并且, 随着时间的推移三者均呈现先上升后下降最后平稳的趋势, 这是因为网络中的数据收发逐渐平稳.

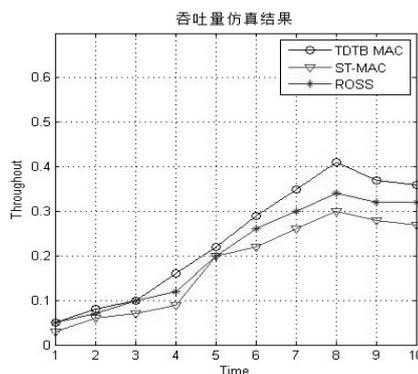


图 6 三种协议吞吐量对比

如图 7 所示, 这是在没有传感器网络节点加入或者退出网络的情况下, 碰撞造成的平均能量消耗. 其中, x 轴为时间周期, y 轴为碰撞造成的平均能量消耗. 显然 TDTB MAC 具有显著优势, 这是因为 TDTB MAC 有效的解决了在三维网络中的节点碰撞问题.

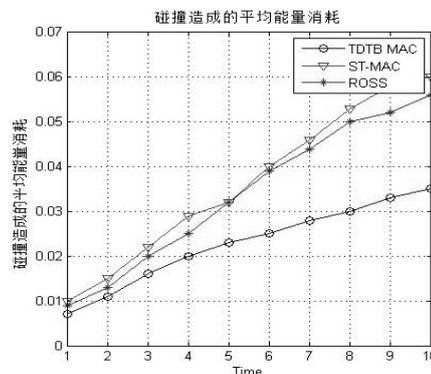


图 7 碰撞造成的平均能量消耗图

当节点中有一个节点加入时,网络中的碰撞造成的平均能量消耗如图 8 所示, x 轴为时间周期, y 轴为碰撞造成的平均能量消耗. 在前四个周期内, 碰撞较多网络不稳定, 造成的能源消耗也相对较大, 因为, 此时网络中的节点动态较大, 网络并没有稳定. 随着时间的推移网络逐渐稳定, 能量消耗也逐渐平稳. 在三种协议中, 可见, TDTB MAC 协议具有较高性能. 节点退出时, 网络中碰撞引起的能量消耗与此相似, 这里不再赘述.

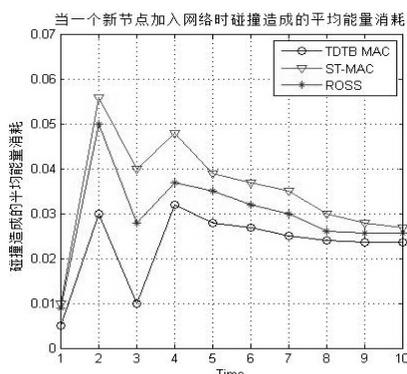


图 8 节点加入时碰撞造成的平均能量消耗总结

#### 4 结语

在这篇文章中, 文中提出了基于三维动态传感器网络的 MAC 协议, 即 TDTB MAC 协议. 不同于以往针对二维静态网络的 MAC 协议, 文中通过动态算法给出了网络动态实现的过程, 并且详细介绍了三维网络的体系结构. 在信道划分过程中文中采用无竞争的 TDMA 技术, 并给出了三种碰撞模型以及其相应的解决方案. 在仿真结果中可以看到, 文中提出的协议具有一定优越性. 在未来的工作中, 将进一步研究水下三维动态网络中, 基于竞争的 MAC 协议.

#### 参考文献

- Xiao Y. Underwater acoustic sensor networks. National Defense Industry Press, 2012.
- Park MK, Rodoplu V. UWASN-MAC: An energy-efficient MAC protocol for underwater acoustic wireless sensor networks. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2007, 32(3): 710-720.
- Chirdchoo N, Soh WS, Chua KC. MACA-MN: A MACA-based MAC protocol for underwater acoustic networks with packet train for multiple neighbors. Department of Electrical & Computer Engineering, IEEE, 2008: 46-50.
- Chen YJ, Wang HL. Ordered CSMA: A collision-free MAC protocol for underwater acoustic networks. MTS/IEEE Oceans 2007, Vancouver, BC, September. 29 2007-October. 4 2007. 1-6.
- Molins M, Stojanovic M. Slotted FAMA: a MAC protocol for underwater acoustic networks. The OCEANS'06 Asia Pacific IEEE-Singapore conference/exhibition (IEEE OCEANS'06). Asia Conference, Singapore. May, 2006. 1-7.
- He J. Analysis and comparison of Ad Hoc network's mac protocols. Computer Knowledge and Technology, 2008, 3(21): 415-417
- Liu HF, Chen GW, Jin SY. Topology generation algorithm in 3D underwater surveillance sensor network. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(2): 163-171.
- Hong L, Hong F, Yang BZ, et al. ROSS: Receiver oriented sleep scheduling for underwater acoustic networks. Proc. of the Eighth ACM International Conference on Underwater Networks and Systems. IEEE. November 2013. 11-13.
- Hsu CC, Lai KF, Chou CF, et al. ST-MAC: Spatial-temporal MAC scheduling for underwater sensor networks. Proc. of IEEE InfoCom2009. Rio de Janeiro, Brazil. April 2009. 1827-1835.