

学校编码: 10384  
学号: 22320131151445

密级\_\_\_\_\_

廈門大學

硕士学位论文

基于能量高效的水下无线传感器网络 MAC  
协议优化

MAC Protocol Optimization of Underwater Wireless Sensor  
Network Based on Energy Efficient

夏旖璇

指导教师姓名: 陶毅 助理教授

专业名称: 海洋物理

论文提交日期: 2016年5月

论文答辩时间: 2016年5月

2016年5月

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下，独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果，均在文中以适当方式明确标明，并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范（试行）》。

另外，该学位论文为（ ）课题（组）的研究成果，获得（ ）课题（组）经费或实验室的资助，在（ ）实验室完成。（请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称，未有此项声明内容的，可以不作特别声明。）

声明人（签名）：

年 月 日

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，  
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。
2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

## 摘要

不同于依靠单个传感器的水下信息获取方式,网络化的水下传感器系统具有机动灵活、成本低廉、效费比高等优点,成为了世界各国对水下信息获取的研究热点。水下传感器网络 MAC 协议的作用是控制节点接入水声信道,是数据在信道上发送和接收的直接控制者,为网络层等提供了快速、可靠的数据收发支持。因此,MAC 协议感知并适应水声信道情况,对水下无线传感器网络的性能起着决定性的作用。而水下复杂的信道环境,如高噪声、窄带宽、强多途和长时延等,使得在水声信道中许多常用的 MAC 协议不能得到应用。所以,水下无线传感器网络 MAC 协议,除了考虑常规的无线传感器网络的信道特征以外,还要根据水下环境的特点而设计。水声传感器节点部署在海底使用电池供电来工作,所以不能使用太阳能充电而且更换困难,因此在保证通信所需要的速率与误码率的前提下尽可能的对能量消耗进行优化是传感器网络考虑的重要因素。

围绕这个主题,本文通过对现有水下传感器 MAC 协议性能进行研究,针对 MAC 层存在的能量浪费现象,以及水声网络中由于长且变的传播时延而难以同步的问题,提出了随机唤醒的异步睡眠机制和独立节点功率控制的方法,来进行能耗优化。论文主要包括以下几个方面的工作:

1. 阐述无线传感器网络以及 MAC 层协议节能方案的国内外各高校或组织的最新研究进展。
2. 建立了水下传感器网络通信能耗模型,为 MAC 层协议性能分析提供条件。介绍了水声信道的特点,设定了水声信道传输模型;分析了水下传感器网络的网络拓扑结构和协议分层;对传感器节点的通信耗能建模,为本文的重点——MAC 层的能耗研究提供基础。
3. 对水下无线传感器 MAC 协议的设计目标及问题进行了介绍,指出了 MAC 层能量消耗的原因。对现有的水下 MAC 层协议进行了详细的研究,分析了不同类型的 MAC 协议的优缺点。
4. 使用 Matlab 软件对常用的 MAC 协议网络性能和能量消耗进行仿真分析。

5. 根据 MAC 协议在水下传感器网络中的性能，基于 MACA 协议提出了一种基于睡眠机制和功率控制的能量优化方案。

本文的创新之处在于将异步随机唤醒的睡眠机制与功率控制结合起来对 MAC 层进行能量的优化。仿真结果表明，能量优化后的 MAC 协议在各种网络参数下，如数据包长度变化和 network 业务量变化，都没有使网络通信性能，即吞吐量和时延性能下降，同时，大大的节省了传感器节点的能量。

**关键词：**水下传感器网络；MAC 协议；睡眠机制；功率控制；能量优化

## Abstract

Unlike using a single underwater sensor to obtain information, the network of underwater sensor system with flexible, low-cost, cost-effective advantages, has been becoming the research focus all over the world in underwater information detection field. The multiple access protocol (MAC) in the underwater acoustic sensor network is used to control sensor nodes to access in the underwater acoustic channels. It is the direct controller in the channel to send and receive data, and providing fast and reliable data deliveries for the upper layer protocols. Therefore, MAC protocol perceives and adapts to the underwater acoustic channel, which plays a decisive role in the performance of underwater wireless sensor network. Because of the harsh environments, such as high noise, narrow bandwidth, strong multipath, long delay and other features, a lot of common wireless network protocols are no longer applicable in the underwater acoustic channel. In addition to considering the general requirements of terrestrial wireless communication network, the design of MAC protocol in the underwater sensor network should take into account the characteristics of the underwater environment. Besides, underwater acoustic sensor nodes are deployed in the bottom of the sea and powered by batteries, which makes it impossible to use solar charging or be replaced. So it is imperative to reduce energy consumption as much as possible on the premise of ensuring the network communication qualities.

Around this problem, this paper studied the performance of existing underwater sensor MAC protocols. Aiming at the existing energy waste phenomena of MAC layer, and the difficulties of synchronization, due to the long and variable propagation delay in the underwater acoustic channel, this paper used asynchronous sleeping with random wake-up mechanism and independent power control method for energy optimization. This paper did the following works:

1. Elaborated the research significance of underwater acoustic wireless sensor

network and energy saving technology on MAC layer, and the latest research progresses both at home and abroad.

2. Established communication energy consumption model of underwater sensor network nodes for MAC layer performance analysis. Introduced the characteristics of the underwater acoustic channel, and set the transmission model of channel. Analyzed the topology and network stack of underwater sensor network. Set communication energy consumption model of sensor nodes for energy consumption on MAC layer.
3. Introduced the design goals and problems of the MAC protocol in the underwater wireless sensor network. And pointed out the reasons of energy consumption of MAC layer.
4. Used Matlab software for performance and energy consumption simulation analysis of common MAC protocols.
5. According to the performance of MAC protocols in the underwater sensor network, proposed a new MACA protocol based on asynchronous sleeping with random waking mechanism and independent power control method.

The innovation of this article is combining asynchronous sleeping with random waking mechanism and independent power control method in MAC layer for energy optimization. The simulation results show that the energy optimized MAC protocol ensures the communication performance, such as time delay and throughput, as well as reduces the energy consumption under the various network parameters like packet length or network traffic.

**Keyword:** Underwater acoustic sensor network, MAC protocol, Sleeping mechanism, Power control, Energy optimization

摘 要.....	I
ABSTARCT .....	III
目 录.....	V
CATALOG .....	VIII
第一章 绪 论.....	1
1.1 研究背景和意义 .....	1
1.2 研究的国内外进展 .....	2
1.2.1 水下无线传感器网络国内外研究进展.....	2
1.2.2 水下无线传感器网络 MAC 层协议能量优化技术研究进展 .....	4
第二章 水下传感器网络通信能耗模型 .....	8
2.1 水声信道主要特征 .....	8
2.1.1 传播损失.....	8
2.1.2 传播时延.....	9
2.1.3 环境噪声.....	9
2.1.4 多途效应和多普勒效应.....	10
2.2 水声信道传输模型 .....	10
2.3 水下无线传感器网络拓扑与协议栈 .....	11
2.3.1 网络拓扑结构.....	11
2.3.2 水下无线传感器协议栈.....	12
2.4 通信能耗模型 .....	14
2.5 本章小结 .....	15
第三章 水下无线传感器网络 MAC 协议仿真研究 .....	17
3.1 水下无线传感器网络 MAC 协议的设计目标 .....	17



3.1.1 MAC 协议性能指标 .....	17
3.1.2 MAC 协议设计要求 .....	19
<b>3.2 水下无线传感器网络 MAC 协议设计中面临的主要问题 .....</b>	<b>20</b>
3.2.1 隐藏终端和暴露终端问题.....	20
3.2.2 能耗限制.....	23
3.2.3 时间同步困难.....	24
<b>3.3 水下无线传感器网络 MAC 协议分类 .....</b>	<b>25</b>
3.3.1 基于固定分配的 MAC 协议 .....	26
3.3.2 基于随机竞争的 MAC 协议 .....	28
<b>3.4 常用水下无线传感器网络 MAC 协议 .....</b>	<b>29</b>
3.4.1 纯 ALOHA 协议和时隙 ALOHA 协议.....	29
3.4.2 CSMA 协议 .....	30
3.4.3 MACA 协议.....	31
3.4.4 Slotted FAMA 协议.....	32
<b>3.5 常用水下无线传感器网络 MAC 协议性能仿真分析 .....</b>	<b>32</b>
3.5.1 吞吐量.....	35
3.5.2 平均端对端时延.....	37
3.5.3 平均能量消耗.....	38
3.5.4 性能比较总结.....	41
<b>3.6 本章小结 .....</b>	<b>42</b>
<b>第四章 基于能量高效的水下无线传感器网络 MAC 协议优化.....</b>	<b>43</b>
<b>4.1 能量有效性设计的方向 .....</b>	<b>43</b>
4.1.1 减少数据冲突.....	43
4.1.2 采用睡眠机制.....	44
4.1.3 采用功率控制机制.....	44
<b>4.2 水下无线传感器网络 MAC 协议能量优化方案 .....</b>	<b>45</b>
4.2.1 随机唤醒的睡眠机制.....	45

---

4.2.2 独立节点的功率控制.....	47
4.2.3 协议描述.....	48
4.3 能量优化机制对网络通信性能的影响 .....	49
4.3.1 随机唤醒睡眠机制的影响.....	49
4.3.2 功率控制机制的影响.....	50
4.4 仿真结果及分析 .....	50
4.4.1 不同网络业务量下优化前后协议的网络通信性能对比.....	50
4.4.2 不同数据包长度下优化前后协议的网络通信性能对比.....	52
4.4.3 优化前后协议的能量消耗对比.....	53
4.5 本章小结 .....	57
第五章 总结与展望 .....	58
5.1 本文研究工作总结 .....	58
5.2 研究展望 .....	58
参考文献.....	60
攻读硕士学位期间发表的论文 .....	65
致 谢.....	66

## Catalog

<b>Abstract</b> .....	I
<b>ABSTARCT</b> .....	III
<b>Catalog</b> .....	V
<b>CATALOG</b> .....	VIII
<b>Chapter 1 Introduction</b> .....	1
<b>1.1 Background and Motivation</b> .....	1
<b>1.2 Research Status at Home and Abroad</b> .....	2
1.2.1 Research Status of Underwater Wireless Sensor Network at Home and Abroad .....	2
1.2.2 Research Status of Energy Optimization on MAC Layer at Home and Abroad .....	4
<b>Chapter 2 Communication Energy Consumption Model of Underwater Sensor Network</b> .....	8
<b>2.1 The Characteristics of Underwater Acoustic Channel</b> .....	8
2.1.1 Propagation Loss.....	8
2.1.2 Propagation Delay.....	9
2.1.3 Ambient Noise .....	9
2.1.4 Multipath and Doppler Effect .....	10
<b>2.2 Underwater Acoustic Channel Transmission Model</b> .....	10
<b>2.3 Underwater Wireless Sensor Network Topology and Protocol Stack</b> .....	11
2.3.1 Network Topology .....	11
2.3.2 Protocol Stack .....	12
<b>2.4 Communication Energy Consumption Model</b> .....	14
<b>2.5 Chapter Summary</b> .....	15
<b>Chapter 3 Underwater Wireless Sensor Network MAC Protocol</b>	

<b>Simulation Research</b> .....	17
<b>3.1 Underwater Wireless Sensor Network MAC Protocol Design Goals</b> .....	17
3.1.1 MAC Protocol Performance Metrics .....	17
3.1.2 MAC Protocol Design Requirements .....	19
<b>3.2 Major Problems in Underwater Wireless Sensor Network MAC Protocol Design</b> .....	20
3.2.1 Hidden Terminal and Exposed Terminal.....	20
3.2.2 Energy Consumption Limits .....	23
3.2.3 Time Synchronization Difficulty .....	24
<b>3.3 Classification of Underwater Wireless Sensor Network MAC Protocols</b> .....	25
3.3.1 Fixed allocation MAC Protocol.....	26
3.3.2 Random Competition MAC Protocol .....	28
<b>3.4 Common Underwater Wireless Sensor Network MAC Protocols</b> .....	29
3.4.1 Pure ALOHA Protocol and Slotted ALOHA Protocol.....	29
3.4.2 CSMA Protocol.....	30
3.4.3 MACA Protocol .....	31
3.4.4 Slotted FAMA Protocol .....	32
<b>3.5 Common Underwater Wireless Sensor Network MAC Protocol Simulation</b> .....	32
3.5.1 Throughput.....	35
3.5.2 End-to-end Delay .....	37
3.5.3 Energy Consumption.....	38
3.5.4 Performance Summary.....	41
<b>3.6 Chapter Summary</b> .....	42
<b>Chapter 4 Energy Efficient MAC Protocol Optimization</b> .....	43
<b>4.1 Directions of Energy Efficiency Design</b> .....	43
4.1.1 Data Conflict Reduce .....	43

---

4.1.2 Sleeping Mechanism.....	44
4.1.3 Power Control .....	44
<b>4.2 Underwater Wireless Sensor Network MAC Protocol Energy Optimization Scheme.....</b>	<b>45</b>
4.2.1 Random Wake-up Sleeping Mechanism .....	45
4.2.2 Independent Node Power Control.....	47
4.2.3 Protocol Description .....	48
<b>4.3 Energy Optimization Influence for Communication Performance .....</b>	<b>49</b>
4.3.1 Sleeping Influence .....	49
4.3.2 Power Control Influence .....	50
<b>4.4 Simulation Results and Analysis .....</b>	<b>50</b>
4.4.1 Communication Performance Comparison before and after Optimization under Different Traffic.....	50
4.4.2 Communication Performance Comparison before and after Optimization under Different Package Lengths.....	52
4.4.3 Energy consumption comparison before and after Optimization .....	53
<b>4.5 Chapter Summary .....</b>	<b>57</b>
<b>Chapter 5 Summary and Prospects .....</b>	<b>58</b>
5.1 Summary .....	58
5.2 Prospects.....	58
<b>References .....</b>	<b>60</b>
<b>Research Publishments in the Master Study .....</b>	<b>65</b>
<b>Acknowledgements .....</b>	<b>66</b>

## 第一章 绪 论

### 1.1 研究背景和意义

近年来世界各国对海洋探索的步伐加速,加入水声通信方向的研究机构也越来越多。迅猛发展的互联网使得获取信息的技术向智能化、网络化方向发展,网络成为信息获取最重要的技术之一,水下无线传感器网络的研究也已经成为新的研究热点。

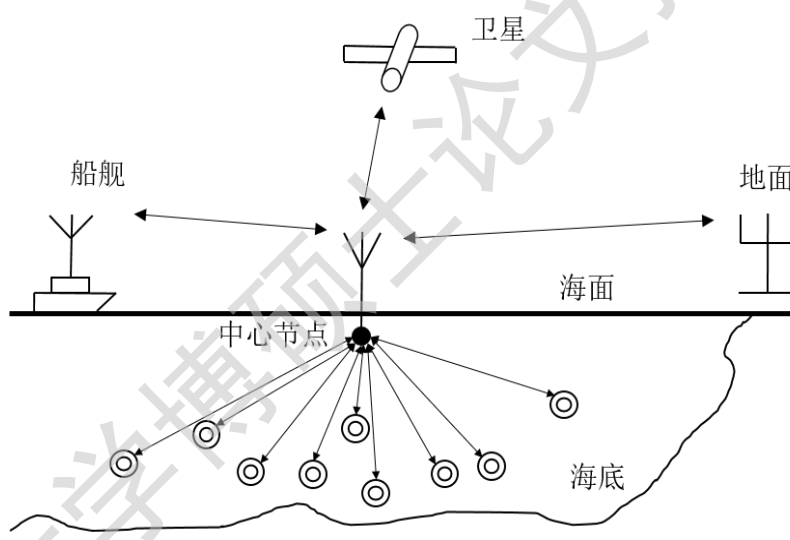


图 1.1 水下传感器网络

Fig. 1.1 Underwater acoustic sensor network

传统的水下环境探测主要是利用单个的水下传感器,这种方式并不能满足大范围、长时间的水下监测的目的且探测效率低下。水下传感器网络在特定的水下范围内,依靠各水下传感器节点获得信息同时利用声信号将水下节点组网,最后通过汇聚节点以各种通讯形式把在覆盖范围内所获取的信息传送到岸上的常规网络的水下无线网络<sup>[1]</sup>。网络化水下传感器体系具备机动灵活、成本低廉、效费比高的优点,分布式的部署扩展了水下的探测规模和持续时间并且增强了系统整体对水下环境的感知能力。可用于收集海洋数据、污染监测、海底勘探、灾害预

防、辅助导航、监督应用与侦察战术、水下油田及其运输管道泄漏监控、地动监测和生态环境监控等，有着广阔的应用前景。

差别与陆地无线传感器网络，水下传感器网络运用于极为复杂多变的水下情况，以海水作为通信媒介，使用声波进行通信。水中环境复杂多变，噪声高、传输损耗大、多普勒效应严重。在水中声音的传播速度大概是 1500 m/s，传播时延大。也是这些原因导致陆地无线传感器网络协议不能够直接在水下应用。而介质访问控制协议 (MAC) 是水下传感器网络实现数据收集、传输等等功能的重要环节。因此，研究适合水下环境的无线传感器网络 MAC 协议具有重要的意义。此外，水下声学传感器网络设备的能量是非常有限的，传感器节点部署在海底，不能使用太阳能充电并更换困难<sup>[2]</sup>。因此，如何在提高网络性能的基础上，节约和平衡节点能量是水声通信网络技术研究的关键。

所以，在保证有效通信的基础上尽可能节省能量，最大限度的提高节点和网络的生存期是当前水下传感器网络 MAC 协议研究的重点。

## 1.2 研究的国内外进展

美国是最早提出“水声通信网”和进行水下网络应用的国家<sup>[3]</sup>。自二十世纪末，水声通信网成为海洋通信技术的研究重点。目前，研究水下传感器网络的机构有很多。也提出了一些在 MAC 层协议上进行能量优化的方案。

### 1.2.1 水下无线传感器网络国内外研究进展

目前，研究水下传感器网络的国内机构有：厦门大学、哈尔滨工程大学、中国海洋大学、浙江大学、中科院声学研究所和华南理工大学等。国内对水下声通信网络的研究侧重在传输编解码、信道的均衡以及高速率通信等物理层方面。在水下传感器网络方面我国的研究刚刚起步，大多数都还在理论仿真上，有一些实验性的结果但是公开发表资料较少，却已经受到了国家的重视。在“十一五”规划中，提出了环境保护和灾害预警信息化的发展战略并在国家自然科学基金中给予大力支持，在其信息学部的水下通信与探测领域重点项目群的支持下，各研究机构进行了以下水下传感器网络方面的探索。

厦门大学利用水下传感器网络对水下环境信息进行采集。采用分簇海网拓扑结构, 对不同网络协议的性能进行了仿真实验。

西北工业大学使用水下传感器网络对移动目标进行协同探测<sup>[4]</sup>。使用 TDMA 和 ALOHA 协议, 提出了基于跨层设计具有长网络生存期的水下声网络广播路由机制, 以及时延差最小的多路径路由协议, 进行了 5 个节点的水池实验。

华南理工大学进行了水下动态多节点自动接入与组网的基础研究<sup>[5]</sup>。与国家海洋局海洋一所无人船研究团队合作, 实现了基于 CSMA 接入的简单 MAC 协议水声网络组网通信实验。搭建了基于无人船的水声移动通信测试平台, 开展了湖试实验。

中国科学院声学研究所的水下传感移动节点的数据获取与可靠传输项目, 于 2015 年 6 月和 2015 年 11 月在千岛湖进行了两次湖上实验。并与中国科学院沈阳自动化研究所和西安光学精密机械所共同研制了水下反恐传感器网络监控系统。中国科学院自动化研究所进行了基于机器鱼的移动传感器网络来实现环境监测的研究<sup>[6]</sup>。

浙江大学的分布式水声网络定位与探测基础研究项目, 进行了基于水声传感网络的海洋参数获取与处理研究。构建了 12 个固定传感节点, 1 个移动节点, 1 个海面节点的分布式海洋环境参数传感系统, 研发了集传感、通信、计算、定位功能于一体的传感器节点, 依托摘箬山岛外海基地开展了海上实验。

哈尔滨工程大学围绕大规模水下传感网络的未来发展需求, 以重点突破高精度网络定位的理论和关键技术为研究目标, 对融合复杂海洋环境、平台运动特性以及网络自身特性为一体的水下网络定位理论模型和信号处理方法理论模型进行了研究<sup>[7]-[8]</sup>。

在国外, 众多高校和研究机构也参与到了该领域的研究中, 比如康涅狄格州立大学的水下传感器网络实验室、乔治亚理工学院的宽带无线网络实验室、南加州大学的自治网络研究小组、加利福尼亚大学洛杉矶分校网络研究实验室等都在该领域进行了一系列的研究和探索。

加拿大 Dalhousie 大学的 MEPS (Marine Environmental Prediction System) 用于浅海 (水下 20 米, 间距 30 米) 海洋监测, 由一个主浮标和一些小型浮标组成。



Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.