

学校编码: 10384

分类号 _____ 密级 _____

学 号: 23320081153301

UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

水声传感器网络能效型 MAC 协议
仿真研究和实现

Simulation Research and Implementation of Energy-efficient
MAC Protocol for Underwater Acoustic Sensor Networks

王琦

指导教师姓名: 胡 晓 毅 教授

王德清助理教授

专 业 名 称: 通信与信息系统

论文提交日期: 2011 年 5 月

论文答辩时间: 2011 年 月

学位授予日期: 2011 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2011 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

水声传感器网络 (Underwater Acoustic Sensor Networks, UASN) 是近年来发展迅速、研究相当活跃的通信网络技术领域之一, 它是一种由大量集成了传感、数据收集、处理和通信能力的传感器节点构成的水声自组织网络, 在水声传感器网络在海洋资源勘探和开发、海洋环境立体监测、地震海啸等灾难预警、援助导航以及战略监测等方面有着广泛的应用。

由于水声环境的特殊性, 能量受限问题在水声传感器网络中显得尤为突出, 其中媒体接入控制 (Media Access Control, MAC) 是传感器节点能量消耗的重要原因。因此, 本文以降低能耗为目的, 提出一种新能效型 MAC 协议——EE-MAC (Energy-efficient MAC), 并对协议分别进行了网络仿真实验和水池实验。实验结果表明: 在仿真环境中, EE-MAC 协议与 MACA (Multiple Access with Collision Avoidance) 协议及 R-MAC (Reservation-based MAC) 协议相比降低了网络的平均能量损耗, 达到了能效性的目标, 同时在节点密度和业务量较大时能取得良好的丢包率、吞吐量及平均时延性能; 而在水池环境中, 较 MACA 协议相比, 当业务量分布较密时, EE-MAC 协议的平均能耗稍有偏大, 吞吐量较低, 但平均能耗及吞吐量性能均优于 R-MAC 协议; 而当业务量分布较稀疏时, EE-MAC 协议的平均能耗相对较低, 且与 MACA 协议保持相同的吞吐量。

论文主要工作如下:

1. 结合对基于冲突避免、侦听/睡眠及功率控制机制的几种典型 MAC 协议的节能性分析, 本文综合考虑到它们的优缺点, 从无碰撞的同步过程实现、发送接收时间选择、功率控制使用及冲突避免四个能耗优化策略出发, 设计出一种新的水声传感器网络能效型 MAC (EE-MAC) 协议。

2. 基于 OPNET 网络仿真平台, 分别从进程模型、节点模型及网络模型对 EE-MAC 协议进行建模, 完成了协议的仿真实验。

3. 基于实验室研制的双处理器样机平台, 从人机交互界面设计、SPI (Serial Peripheral Interface) 协议机制、CRC (Cyclic Redundancy Check) 校验机制及事件驱动机制四个方面对 EE-MAC 协议进行软件实现, 完成了协议的水池实验。

关键词: 水声传感器网络; MAC 协议; 能量有效性

Abstract

Recently, Underwater Acoustic Sensor Networks (UASN) is rapidly developed and is one of the active fields researched in communication network technology. It is a self-organizing network comprised of a number of sensor nodes with the capability of sensing, data collection and processing, and also communication. At present, it is already widely used in such applications as exploration and development of marine resources, three-dimensional monitoring of marine environment, disaster warning systems of seismic tsunami, aid navigation and strategic surveillance.

Due to the particularity of underwater acoustic environment, the problem of energy limitation is highlighted in UASN while MAC (Media Access Control) is the important reason of the energy consumption of sensor nodes. Therefore, the paper chooses reducing energy as our principal goal and then proposes a new energy efficient MAC protocol (EE-MAC). Besides we carry out the network simulation experiment and pool experiment. Experiment results show that in the simulation scenario when compared to MACA (Multiple Access with Collision Avoidance) and R-MAC (Reservation-based MAC), EE-MAC decreases the energy consumption and achieves the goal of energy efficiency. Also it obtains such favorable performance of packet loss rate, throughput and average access delay. While in the pool scenario, as the traffic is dense and energy consumption caused by collision is not be taken into consideration, thus the average energy consumption of EE-MAC is relatively higher and throughput of EE-MAC is smaller when compared to MACA but the performance of average energy consumption and throughput of EE-MAC is better than R-MAC. Besides, when the traffic is sparse, the average energy consumption of EE-MAC is lower and throughput of EE-MAC is the same with MACA.

Main works of the paper is as follows:

1. Combining with the analysis of energy efficiency of several typical MAC protocol based on the mechanism of collision avoidance, listen and sleep, and power control, the paper comprehensively consider the relative merits of them and then designs a new energy efficient MAC (EE-MAC) protocol from four energy optimized

strategies such as realization of synchronous process without collision, timing selection of sending and receiving, using of power control and collision avoidance.

2. Based on the network simulation tools, OPNET, the paper builds the simulation model of EE-MAC separately from the process model, node model and network model. Then the paper completes the simulation experiment.

3. Based on the prototype platform developed by our laboratory, the paper accomplishes the software implementation of EE-MAC respectively from four aspects such as the design of human-machine interactive surface, mechanism of SPI (Serial Peripheral Interface), CRC (Cyclic Redundancy Check) and event driven. Besides the paper realizes the pool experiment.

Key Words: Underwater Acoustic Sensor Networks; MAC Protocol; Energy Efficiency

目 录

第一章 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 国内外研究进展和现状	2
1.3 本论文研究内容	5
第二章 水声传感器网络体系结构	7
2.1 水声传感器网络拓扑结构	7
2.2 水声传感器网络协议体系结构	9
2.3 水声传感器网络节点结构	11
2.4 本论文研究的网络结构	12
2.5 本章小结	13
第三章 水声传感器网络 MAC 协议节能分析	14
3.1 MAC 协议能量消耗成因分析	14
3.2 MAC 协议节能策略	15
3.3 几种典型 MAC 协议节能性分析	17
3.3.1 基于冲突避免机制的 MACA 协议	17
3.3.2 基于侦听/睡眠机制的 R-MAC 协议	19
3.3.3 基于功率控制机制的 PARO 协议	24
3.4 本章小结	26
第四章 能耗优化的 MAC 协议设计	27
4.1 协议设计方案	27
4.2 能耗优化策略	28
4.2.1 无碰撞的同步过程实现	29
4.2.2 发送接收时机选择	30
4.2.3 功率控制使用	34
4.2.4 数据冲突及串音避免	35
4.3 本章小结	38
第五章 网络仿真和水池实验	39
5.1 协议建模	39
5.1.1 进程模型	39
5.1.2 节点模型	42
5.1.3 网络模型	43
5.2 仿真实验	44
5.2.1 仿真环境及参数设置	45
5.2.2 仿真结果及讨论	45
5.3 软件实现	49
5.3.1 人机交互界面设计	49
5.3.2 SPI 协议机制	50

5.3.3 CRC 校验机制	51
5.3.4 事件驱动机制.....	52
5.4 水池实验	53
5.4.1 实验场景.....	53
5.4.2 实验结果及讨论.....	55
5.5 本章小结	59
第六章 总结与展望	60
参考文献.....	62
致谢.....	66

厦门大学博硕士论文摘要库

CHAPTER 1 Introduction	1
1.1 RESEARCH BACKGROUND AND MEANINGS.....	1
1.2 RESEARCH DEVELOPMENT AND STATUS AT HOME AND ABOARD	2
1.3 RESEARCH CONTENTS OF THIS PAPER	5
CHAPTER 2 ARCHITECTURE OF UASN.....	7
2.1 NETWORK TOPOLOGY OF UASN	7
2.2 PROTOCOL ARCHITECTURE OF UASN	9
2.3 NODE STRUCTURE OF UASN	11
2.4 RESEARCHED NETWORK STRUCTURE OF PAPER.....	12
2.5 SUMMARY	13
CHAPTER 3 ANALYSIS OF ENERGY SAVING OF MAC PROTOCOL OF UASN.....	14
3.1 ANALYSIS OF THE REASON OF ENERGY CONSUMPTION OF MAC PROTOCOL	14
3.2 ENERGY SAVING STRATEGY OF MAC PROTOCOL	15
3.3 ANALYSIS OF ENERGY EFFICIENCY OF SEVERAL TYPIC MAC PROTOCOL.....	17
3.3.1 MACA BASED ON COLLISION AVOIDANCE.....	17
3.3.2 R-MAC BASED ON LISTEN AND SLEEP.....	19
3.3.3 PARO BASED ON POWER CONTROL	24
3.4 SUMMARY	26
CHAPTER 4 DESIGN OF ENERGY OPTIMIZED MAC PROTOCOL.....	27
4.1 DESIGN SCHEME OF PROTOCOL.....	27
4.2 STRATEGY OF ENERGY OPTIMIZATION	28
4.2.1 REALIZATION OF SYNCHRONOUS PROCESS WITHOUT COLLISION	29
4.2.2 SELECTION OF TIME FOR SENDING AND RECEIVING.....	30
4.2.3 USING OF POWER CONTROL	34
4.2.4 AVOIDANCE OF DATA COLLISION AND CROSSTALK.....	35
4.3 SUMMARY	38
CHAPTER 5 NETWORK SIMULATION AND POOL EXPERIMENT	39

5.1 MODELING OF PROTOCOL	39
5.1.1 PROCESS MODEL	39
5.1.2 NODE MODEL	42
5.1.3 NETWORK MODEL	43
5.2 SIMULATION EXPERIMENT	44
5.2.1 SIMULATION ENVIROMENT AND PARAMETERS SETTING.....	45
5.2.2 SIMULATION RESULTS AND DISCUSSIONS	45
5.3 SOFTWARE IMPLEMENTATION	49
5.3.1 DESIGN OF HUMAN-MACHINE INTERACTION	49
5.3.2 MECHANISM OF SPI PROTOCOL	50
5.3.3 MECHANISM OF CRC CHECKING	51
5.3.4 MECHANISM OF EVENT DRIVEN	52
5.4 POOL EXPERIMENT	53
5.4.1 SCENARIO OF EXPERIMENT	53
5.4.2 EXPERIMENT RESULTS AND DISCUSSIONS	55
5.5 SUMMARY	59
CHAPTER 6 SUMMARY AND PROSPECT	60
REFERENCE	62
ACKNOWLEDGEMENTS	66

第一章 绪论

1.1 研究背景和意义

近年来,随着世界各国海洋开发步伐的加快,对水下传感器网络、水下监视系统、水声预警网络的需求愈来愈迫切,水声通信网络技术成为了世界范围内的研究热点,而水声传感器网络(Underwater Acoustic Sensor Networks, UASN)是水声通信技术与传感器网络结合所产生的一个新的研究领域^[1]。水声传感器网络从原来仅有的军事领域逐渐扩展到商业领域,现在它已经广泛的应用于海洋数据采集、污染检测、海上探测、灾难预警、援助导航和战略监测等方面^[2]。

水声传感器网络是无线传感器网络的一个重要领域,尽管以往对陆地无线网络的研究有很多,但是由于水声信道环境的特殊性,使得水声传感器网络与无线传感器网络有很大的不同,具体表现如下^[3-6]:

1) 花费高:水声传感器节点通常需要配备水下收发器以及特殊的硬件保护设备,这些硬件较为昂贵。

2) 分布稀疏。无线传感器网络节点分布较为密集,由于水下设备一般比较昂贵,因而在水声传感器网络中节点分布相对比较稀疏。

3) 能量受限。传感器网络节点采用电池供电,电池能量十分有限,而且与无线传感器网络相比,水声环境较为恶劣,在实际工作环境中更换电池是很难实现的,更换周期普遍较长,使得节点易受到能量耗尽等原因的影响而无法保证网络的正常工作。

4) 长传播时延。在水声传感器网络中,水声信号的传播速率为 1.5×10^3 m/s,比无线网络中电磁波的传播速率(3×10^8 m/s)低5个数量级,每公里的传播时延大约达到670ms,因而不仅给网络带来长时延,而且也会影响到吞吐量等网络效率。

5) 窄带宽及强噪声。与无线信道相比,水声信道带宽是有限的,取决于距离和频率。在有限的带宽内,水声信号受时变多途的影响,可能会导致严重的码间干扰(ISI)、多普勒频移等问题,降低了通信系统性能,目前,水声通信所使用的频带主要是5kHz~20kHz。此外,水声环境噪声复杂多变,在一定程度上也

影响了通信系统的性能。

6) 传播损失大。水声信号在水下传播时的传播损失较为严重, 主要由扩展、吸收和散射三方面引起的。声波波阵面在传播过程中不断扩展而引起声波的扩散损失, 而水声环境中的吸收和散射效应则造成声波的衰减损失。图 1-1 反映了声信号在水声环境中的传播损失与频率及距离之间的关系。

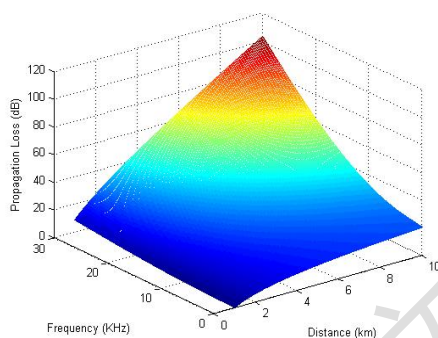


图 1-1 水声信号传播损失与频率及距离的关系

由以上分析可见, 设计一个能耗低而网络效率高的水声传感器网络是一项复杂且极具挑战性的工作, 其中能量受限问题在水声传感器网络中显得尤为突出。因此, 如何提高传感器节点的能量有效性, 使网络在有限的能量条件下尽可能的工作更长时间以延长网络生存时间是水声传感器网络研究中的一个重要课题。

在此背景下, 本文以提高能量有效性为目标, 进行能耗优化的水声传感器网络 MAC 协议研究, 期望设计能量高效的水声传感器网络 MAC 协议。

1.2 国内外研究进展和现状

水声通信网络的研究起步于 20 世纪 90 年代。从 21 世纪开始, 水声通信网络引起了各个国家的极大关注, 美国和欧洲等相继启动了许多关于水下网络的研究计划, 投入了大量的人力、物力进行水声通信网络的技术研究, 如早期的 MAST 计划、ALAN 项目、Seaweb 计划以及其他项目研究组计划等。

在 MAST 计划的支持下, 欧共体发展了一个系列化的水声通信网络研究计划, 主要包括 SWAN Project、LOTUS Project、ACME Project、ROBLINKS Project 等。SWAN 计划的主要研究目标是水声通信网络通信协议算法; LOTUS 计划是针对超浅信道中的长距离通信样机进行设计, 其点对点通信距离可达 10km, 载波频率 8kHz, 通信速率最高 4kbps; ACME 计划则是 SWAN 计划的延续, 研究

的主要目标是开发设计一个适用于浅水通信网络的稳健通信和网络协议的算法，而 ROBLINKS 计划的目标是研究并试验浅水（深度：20m~30m）中长距离（>10km）的稳健通信（>1kbps）^[7]。

水声局域网（The Acoustic Local Area Network, ALAN）是由美国伍兹霍尔研究院（Wood's Hole Oceanographic Institution, WHOI）提出的一种网络概念。ALAN 网络通过海洋底的节点进行长期的数据采集与海洋监控。2003 年该项目进行了海试，测试的网络由三个不同的水下传感器组成，其中一个用于测深，两个用做实时传送数据的测震仪，网络允许的最大上行传送速率是 4kB/s，每天可上传数据达 1.6MB，比特率为 80kbps~5300kbps，吞吐量为 66.8kbps~440kbps。此外，WHOI 还构建了包含 Racom 浮标在内的水下机器人（Autonomous Underwater Vehicles, AUVs）控制网络系统，该系统于 2004 年 5 月作为联合行动的一部分进行了分布实验，实验显示出控制距离取决于水下信道条件：在水质均匀、硬质海底环境下，控制距离可达 2000m~3000m；如果是在软质海底环境下，表面水温又比较高，控制距离则缩小到大约 1000m。

Seawe 计划^[8,9,10]是美国海军水下无线网络研发中心研究的水下网络。Seaweb 是一种可部署的自主水下网络系统，可用于水下指挥、控制、通信与导航，它是目前比较成功的水声通信网络概念。Seaweb 可以支持 2kB 长度的数据包和 2400bps 的通信速率，但是为了改善网络性能和电池续航能力，采用了 350B 长度的数据包，标称速率为 800bps，点对点的最大通信距离为 10km，部署深度小于 1000m。在数据链路层协议方面，Seaweb 采用了 MACA（Multiple Access with Collision Avoidance）协议中的控制包握手交互机制，如图 1-2 所示；此外，考虑到物理层误码率较高而在纠错无法改善误码性能的情况下，Seaweb 还采取了如图 1-3 所示的选择性自动要求重传（Selective-Automatic Repeat Request, SRQ）机制。

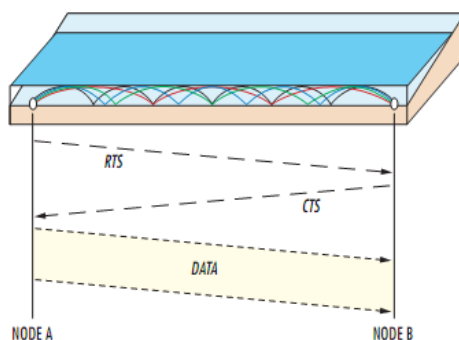


图 1-2 Seaweb 采用的 MACA 协议

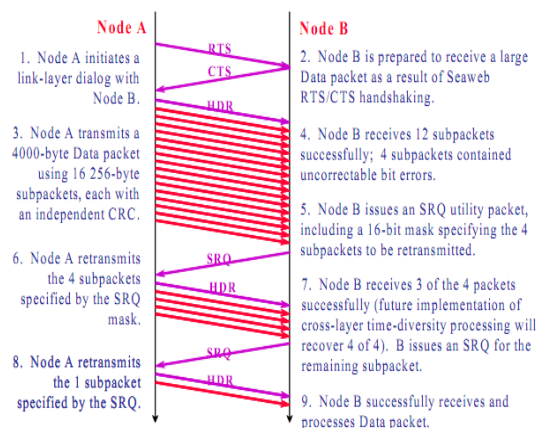


图 1-3 Seaweb 采用的选择性重传机制

美国麻省理工学院构建了一套名为 AquaNodes (如图 1-4) 的水下传感器网络^[11], 并在 2007 年前进行了多达 100 次的湖试和海试实验。该网络采用时分多址接入 (Time Division Multiple Access, TDMA) 协议和自同步技术。当节点使用 30kHz 的 FSK 声学调制、解调模式时, 节点间在海水和淡水中能够以 330bps 的速率进行 400m 或更远距离上的数据传输。



图 1-4 置于防水圆柱形容容器中的 AquaNodes

以上种种项目计划都表明了水声通信网络的研究在世界范围内已经越来越受重视。在水声通信网络的研究中, 各国研究者将能耗问题视为当前水声通信网络研究的重点之一。文献[12]对此作了如下总结:

Ethem M. Sozer, Milica Stojanovic 等指出减少能量的方法就是采用中继方式, 水声通信网络中应该采用仅在相邻的节点之间建立连接的拓扑结构, 并验证了一种多跳拓扑结构在水声网络中的可行性, 成为此后水声通信网络的主流结构。

美国学者 Rofoplu 等提出了一种新的分布式、规模可变的 MAC 协议, 并且对其在水下传感器网络中的应用做了详细的分析。这个协议是一种新的多点接入技术, 它以能量为主要尺度而不是带宽的利用率。通过仿真得出, 当平均 1 跳邻

节点数为 6 时,这种协议最少可以提高 MAC 层能量效率的 95%。当网络变化时,即加入新节点或节点被抛弃时,这种算法仍然是分布式、规模可变和健壮的。

R.Jurdka, C.V.LoPes 在介绍了一个在物理层和 MAC 层之间的交叉设计方法。该方法通过声纳方程来估计水声传感器网络的电池寿命和能源成本。电池寿命的模型取决于四个主要参数,即节点间距离、发射频率、数据更新频率和簇中节点数。由于水声传播损失与频率和距离有关,而且 sink 节点附近的节点需要为较远的节点中继数据,所以通常给这些节点分配较低的频率。这样,就可以均衡能量消耗,延长网络的寿命。

东南大学的张宏滔提出将基于簇的网络自组织方式用于水声通信网络。网络节点以簇的形式组织起来,多址接入协议采用了一种适合于水声环境的 TDMA/CDMA 混合式协议,建立了由簇首与网关组成的用于簇间通信的主干链路。经过 OPNET 仿真证明,基于簇间协商的事件报告策略能有效减少网络中的冗余通信量从而延长网络寿命,为水声通信网络的构成提供了新的选择。

可以看出,能耗问题贯穿于整个水声网络的研究之中。在水声网络中需对节点的各个功能模块进行优化,以减少能量的消耗,从而延长网络的生存时间。

1.3 本论文研究内容

本文以节能为重要目标,从传感器网络节点能量消耗的主要原因出发,对无线或水声传感器网络中已有的节能 MAC 协议进行了深入的研究,并在分簇的网络拓扑结构框架下针对簇首间基于分布式对等的单跳网络拓扑结构进行研究,结合水声传感器网络的特点,设计出一种新的适用于水声传感器网络的能效型 MAC 协议;此外,借助 OPNET 网络仿真工具,本文对新协议进行建模、仿真和性能分析,同时完成了协议在基于 ARM 和 DSP 平台样机上的实现,并进行了水池实验。全文共分为六章,各章节内容如下:

第一章为绪论,对本课题的研究背景和意义以及国内外对水声通信网络研究的现状与进展进行介绍。

第二章,分别从水声传感器网络拓扑结构、协议体系结构及节点模块结构三个方面对水声传感器网络的体系结构进行介绍,并指出本论文所要研究的网络结构。

第三章，首先对水声传感器网络 MAC 协议的能耗原因进行介绍和分析，然后总结了 MAC 协议中采用的节能策略；最后，基于能效性原则将水声传感器网络 MAC 协议划分为三类：碰撞避免类、侦听/睡眠类及功率控制类，并分别从这三个角度对几种典型 MAC 协议的节能性进行分析。

第四章，基于上一章节对几种典型 MAC 协议节能性的分析，在综合它们的优缺点的基础之上设计一种适合于水声传感器网络的新能效型 MAC 协议——EE-MAC 协议，并从协议的设计方案及能耗优化策略对新协议进行阐述。

第五章，基于 OPNET 网络仿真平台，对 EE-MAC 协议进行仿真实现；同时，基于实验室所研制的双处理器（ARM 和 DSP）样机平台，在 Linux 操作系统环境下对 EE-MAC 协议进行软件实现，并在水池进行了协议的实验。

第六章，对本论文的研究工作进行总结，同时对论文中仍有可能深入研究的问题和工作中不尽完善的地方，提出一些建设性的意见，以供今后研究工作参考。

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts 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 for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库