

## 摘要

目前, 无线传感器网络 (Wireless Sensor Networks 简称 WSN) 的研究主要集中于网络协议、能量有效、定位、可靠性、网络架构以及数据处理等问题, 网络协议的研究是其中的热点之一。而作为 WSN 网络协议栈重要基础架构的介质访问控制协议 (Medium Access Control, 简称 MAC), 决定着无线信道的使用方式, 负责为节点分配无线通信资源。因此 MAC 协议直接影响着网络的整体性能, 成为 WSN 网络协议研究的重中之重。

无线传感器网络面向任务, 网络中节点的资源相当有限, 尤其是能量资源, 节能效率成为 WSN 首要的性能指标。

本文研究跨层设计的 MAC 协议, 主要工作有:

(1) 分析了经典的竞争型和 TDMA 型 MAC 协议, 同时分析了典型的跨层设计 MAC 协议;

(2) 在深入研究各种 MAC 协议的基础上, 针对中高速型无线传感器网络应用, 通过跨层融合 MAC 和路由功能, 提出一种基于轻量地址跨层融合 MAC 和路由的协议 E-AIMRP (Enhanced Address-Light Integrated MAC and Routing Protocol)。该协议重新跨层融合设计传统的 RTS (Request\_To\_Send) 数据帧, 解决了由于多节点检测和报告而造成的能量浪费问题, 同时扩展了单节点检测类型应用的拓扑模型。实验结果表明: 该协议有效地延长了网络的生命。

(3) 为了解决固定的竞争接入方式和同时强制唤醒机制问题, 本文为 E-AIMRP 协议设计了一种高效的能量节省模型, 使其在事件增加或节点增加的情况下, 能量消耗维持在一个常数。仿真结果表明该模型能够取得良好的节能效率。

本文详细地设计了 E-AIMRP 协议, 并阐述了该协议的运行机制, 最后通过仿真实验分析该协议的各个性能指标。研究所取得的成果为无线传感器网络的中高速应用提供了参考, 具有一定的工程应用价值。

**关键词:** 无线传感器网络; MAC 协议; 跨层设计; E-AIMRP

---

---

## ABSTRACT

Currently, WSN's research has focused on network protocols, energy, location, reliability, network infrastructure and data processing issues. Network protocol research is one of the hot spot. As an important foundation for WSN network protocol stack architecture. MAC (Medium Access Control, referred to as MAC) protocol determines how to use of wireless channel, and responsible allocate wireless communication resources for nodes. so it direct impact on the overall performance of the network, become the top priority of WSN Network Protocols

WSN is task-oriented, The nodes can refer to quite limited resources, especially energy resource, so energy efficiency turns out to be the most important criteria of the communication protocols.

This paper concentrates on the Cross Layer Designing WSN MAC protocols, the main responsibilities are:

(1) the classic contention-based and TDMA-based WSN MAC protocols are introduced, and analyzes the typical cross-layer MAC protocols

(2) after deep research on variety of MAC protocols, through the cross-layer integration of MAC and routing, propose an E-AIMRP (Enhanced Address-Light integrated MAC and Routing Protocol) protocol for high speed wireless sensor network applications. The protocol Solve the energy waste issue due to the multi-node testing and reporting and expands single-node test topology model by re-design the traditional RTS (Request\_to\_Send) data frame. simulation results show that E-AIRMP Effectively prolong the life of the network

(3) MAC protocols in general has many limitations in the energy model, the energy efficiency in the applications that require high performance is not very good, this is because the use of fixed competition access mode and the same forced wake-up mechanism. In order to solve this problem, we designed a highly efficient energy saving model for E-AIMRP making it consume a constant energy as the increasing of nodes and invents. simulation results show that this model can achieve

good energy efficiency.

**Keywords:** Wireless Sensor Networks; MAC protocol; Cross-Layer Design; E-AIMRP

---

---

# 目录

摘要 .....	I
ABSTRACT.....	II
目录.....	IV
CONTENTS.....	VII
第一章 绪论 .....	1
1.1 课题的研究背景及意义 .....	1
1.1.1 研究背景 .....	1
1.1.2 研究意义 .....	2
1.2 国内外研究现状.....	3
1.3 课题来源及本文主要研究内容与结构 .....	6
1.3.1 课题来源 .....	6
1.3.2 本文研究内容及创新点 .....	6
1.3.3 论文结构 .....	7
第二章 传统分层 MAC 协议的分析及跨层 MAC 的提出 .....	9
2.1 无线传感器网络的通信协议栈 .....	9
2.2 无线传感器网络 MAC 层关键问题 .....	10
2.2.1 无线传感器网络 MAC 层能耗分析.....	10
2.2.2 无线传感器网络 MAC 协议的设计原则与设计目标.....	11
2.3 基于竞争的无线传感器网络 MAC 协议.....	13
2.4 基于 TDMA 的无线传感器网络 MAC 协议.....	15
2.5 混合型的无线传感器网络 MAC 协议分析 .....	16
2.6 跨层设计思想 MAC 的提出 .....	17
2.6.1 无线传感器网络对跨层的需求.....	18
2.6.2 跨层设计原理 .....	19
2.7 本章小结 .....	20
第三章 参考路由信息跨层设计 MAC 协议 .....	21
3.1 AIMRP 的应用模型及网络结构 .....	21

3.1.1 AIMRP 的前提假设和设计特点 .....	21
3.1.2 事件检测与快速报告型应用 .....	22
3.1.3 AIMRP 的拓扑结构 .....	22
3.2 AIRMP 的帧格式和主要运行机制 .....	23
3.2.1 AIMRP 的帧格式 .....	23
3.2.2 AIMRP 的只要运行机制 .....	24
3.3 AIMRP 的性能评价 .....	25
3.4 E-AIMRP 的提出 .....	25
3.5 E-AIMRP 协议的设计及主要运行机制 .....	26
3.5.1 帧格式的设计和拓扑适应性的设计 .....	26
3.5.2 设计随机空闲侦听和协议死锁避免策略 .....	27
3.5.3 E-AIMRP 的主要运行机制 .....	28
3.6 E-AIMRP 性能定性分析 .....	30
3.7 本章小结 .....	31
<b>第四章 E-AIMRP 的节能模型设计 .....</b>	<b>32</b>
4.1 E-AIMRP 的节能模型 .....	32
4.2 设置 E-AIMRP 的退让时间和各个 TimeOut 时间 .....	35
4.3 E-AIMRP 的网络参数 .....	36
4.3.1 E-AIMRP 的连接参数 $\alpha$ .....	36
4.3.2 E-AIMRP 的睡眠参数 $\sigma$ .....	37
4.4 E-AIMRP 的平均能量消耗估算 .....	39
4.5 本章小结 .....	41
<b>第五章 仿真与实验研究 .....</b>	<b>42</b>
5.1 MAC 层的数据收发 .....	42
5.2 性能评价指标及分析方法 .....	43
5.3 E-AIMRP 的仿真实验分析 .....	44
5.3.1 仿真参数设定及节能效率数值分析 .....	44
5.3.2 节能效率实验分析及延迟性能实验分析 .....	45
5.4 本章小结 .....	49
<b>结语与展望 .....</b>	<b>51</b>

---

---

参考文献.....	52
攻读学位期间发表的学术论文.....	57
攻读学位期间参加的科研项目.....	58
独创性声明.....	59
致 谢.....	60

# CONTENTS

<b>ABSTRACT (CHINESE)</b> .....	I
<b>ABSTRACT (ENGLISH)</b> .....	II
<b>CONTENTS (CHINESE)</b> .....	IV
<b>CONTENTS (ENGLISH)</b> .....	VII
<b>Chapter 1. Introduction</b> .....	1
1.1 Research Background and Purpose .....	1
1.1.1 Background .....	1
1.1.2 Purpose.....	2
1.2 Related Works .....	3
1.3 Subject Source and Main Tasks of this Paper.....	6
1.3.1 Subject Srouce .....	6
1.3.2 Main Tasks of this Paper.....	6
1.3.3 Structure of this Paper.....	7
<b>Chapter 2. MAC protocol analysis and Propose Cross-Layer MAC</b> .....	9
2.1 Wireless sensor network communication protocol stack.....	9
2.2 The Key Problems in MAC Layer of WSN .....	10
2.2.1 Analyze on Energy Consuming in WSN's MAC Layer .....	10
2.2.2 The Design Crateria of WSN MAC Protocols .....	11
2.3 Contention-based WSN MAC Protocols.....	13
2.4 TDMA-based WSN MAC Protocls .....	15
2.5 Contention-based and TDMA-based Hybrid WSN MAC Protocols .....	16
2.6 Propose Cross-Layer Design .....	17
2.6.1 The Demand of Cross-layer.....	18
2.6.2 The principle of Cross-layer design.....	19
2.7 Summary .....	20
<b>Chapter 3.Cross-layer design of MAC protocol</b> .....	21
3.1 Application model and Network Structure of AIMRP.....	21

---

3.1.1 Assumptions and design features of AIMRP .....	21
3.1.2 Event detection and rapid reporting applications.....	22
3.1.3 Topology of AIMRP .....	22
3.2 Frame format and key operational mechanism of AIRMP.....	23
3.2.1 Frame format ofAIMRP .....	23
3.2.2 Key operational mechanism ofAIMRP.....	24
3.3 Performance Evaluation of AIMRP.....	25
3.4 Proposal of E-AIMRP .....	25
3.5 Design and Main Mechanisms of E-AIMRP .....	26
3.5.1 the design of frame format and topology adaptation.....	26
3.5.2 Design random idle listening and deadlock avoidance strategy.....	27
3.5.3 Main operating mechanism of E-AIMRP .....	28
3.6 Qualitative Analysis on Performance of E-AIMRP.....	30
3.7 Summary .....	31
<b>Chapter 4. Design of energy-saving model for E-AIMRP.....</b>	<b>32</b>
4.1 Power-saving model of E-AIMRP.....	32
4.2 Setting the Backoff time and TimeOuts of E-AIMRP .....	35
4.3 Network parameters of E-AIMRP .....	36
4.3.1 Connection parameters of E-AIMRP $\alpha$ .....	36
4.3.2 Sleep parameters of E-AIMRP $\sigma$ .....	37
4.4 Estimation of average energy consumption of E-AIMRP.....	39
4.5 Summary .....	41
<b>Chapter 5. Research on Simulations and Experiments.....</b>	<b>42</b>
5.1 Data transceiver of MAC layer.....	42
5.2 Evaluation Crateria and Analyze Method.....	43
5.3 Analyze on Simulation Results of E-AIMRP.....	44
5.3.1 Simulation parameter settings and numerical analysis .....	44
5.3.2 Analysis of energy efficiency and delay performance.....	45
5.4 Summary .....	49
<b>Conclustions and Prospect .....</b>	<b>51</b>



CONTENTS

---

<b>Reference</b> .....	52
<b>Publications</b> .....	57
<b>Research Activities</b> .....	58
<b>Original Creative Statement</b> .....	59
<b>Acknowledgement</b> .....	60



# 第一章 绪论

## 1.1 课题的研究背景及意义

### 1.1.1 研究背景

当前,信息技术可以实现信息的海量存储、高速传输和快速处理,但信息获取却仍未达到自动化水平。微传感器技术、微电子技术、无线通信技术以及计算技术的进步,极大地推动了集信息采集、处理、无线传输等功能于一体的无线传感器网络(Wireless Sensor Network,简称 WSN)的发展。WSN 正在给人类生活和生产的各个领域带来深远影响。在国防军事、医疗卫生、环境监测、城市交通以及空间探索等领域具有广阔的应用前景<sup>[1,2]</sup>。

目前,WSN 的研究主要集中于网络协议、能量、定位、可靠性、网络架构以及数据处理等问题,网络协议的研究是其中的热点之一。而作为 WSN 网络协议栈重要基础架构的介质访问控制(Medium Access Control,简称 MAC)协议,决定着无线信道的使用方式,负责为节点分配无线通信资源,直接影响网络整体性能,成为 WSN 网络协议研究的重中之重。目前,已有大量针对 WSN 不同特点和具体应用的 MAC 协议相继提出。

无线传感器网络中单个节点的功能比较弱,其强大功能是由众多节点互相协作实现的。相对于传统的无线通信网络,它有明显的特殊性<sup>[1,2]</sup>:(1)电源能量有限;(2)通信能力有限;(3)计算能力和存储能力有限;(4)传感器数量大、分布范围广;(5)网络拓扑动态性强;(6)大规模分布式触发。

传统无线网络的首要设计目标是提供高服务质量和高效的带宽利用率,其次才考虑节约能源,而无线传感器网络相对于一般的无线网络系统,节点数目更为庞大(上千甚至上万个),节点分布更为密集,并且由于复杂环境的影响和资源的限制,节点故障率极高,网络拓扑结构极易变化,因此能源的高效使用成为无线传感器网络的首要设计目标。

现有协议在能量有效方面取得了很好的效果,但随着无线传感器网络应用要求的提高,如何在有限资源的动态条件下高质量地完成目标信息的感知、处理和

传输，是面临的重大挑战。无线传感器网络的这些特殊性对其通信协议提出了特别的要求，同时无线传感器网络中通信协议的采用也通常密切依赖于上层应用，因此，针对具体的应用对象，研究更适用于无线传感器网络的跨层通信协议，是非常具有挑战性和实际意义的。

### 1.1.2 研究意义

无线传感器网络是新兴的特殊的计算机网络，是基于应用的特殊的大规模分布式无线网络，被认为 21 世纪最有影响力的、改变世界的 10 大技术之一，有着十分广泛的应用前景，它在工业、农业、军事、环境、医疗等领域有具有巨大的应用价值<sup>[2]</sup>

多点通信网络局部范围内需要介质访问控制（Medium Access Control，MAC）协议分配共享的无线信道，分解发送冲突，MAC 协议决定网络中无线信道的使用方式，在节点之间分配有限的无线通信资源，用来构建无线传感器网络系统的底层基础结构。MAC 协议处于无线传感器网络通信协议底层的数据链路层部分，它直接控制着网络节点中的通信模块，而节点的通信模块又是最大的耗能部件，因此 MAC 协议对传感器网络的能量性能有着非常大的影响，是保证网络高效通信的关键网络协议之一。

无线传感器网络对其 MAC 协议提出了特殊的需求，着重考虑以下几方面<sup>[2]</sup>：（1）节能效率；（2）可扩展性；（3）网络效率。上述三个方面中，重要性依次递减。节能成为传感器网络 MAC 协议设计首要考虑的因素，与传统网络的 MAC 协议所注重的因素正好反序，传统无线网络的 MAC 协议不适用于无线传感器网络，需要研究和设计适用于无线传感器网络的 MAC 协议。关于可扩展性，由于传感器网络的节点数目、节点分布密度等在网络生存过程中不断变化，节点位置也可能移动，还有新节点加入网络的问题，所以无线传感器网络的拓扑结构具有明显的动态性，要求其 MAC 协议具有很强的可扩展性以适应这种动态变化。关于网络效率，包括网络的公平性、实时性、安全性、网络吞吐率以及带宽利用率等，一般其优先级不高，这在无线传感器网络中需要根据实际应用来取决和平衡。

以上表明，随着无线传感器网络服务要求的日益提高，为满足网络的节能和扩展需求。因此对低能耗和可扩展的高效率 MAC

协议的研究是无线传感器网络研究中的一个重要课题，意义深远。

现有的大部分 WSN MAC 协议普遍采用单纯的基于竞争接入方式或基于 TDMA 调度接入方式，且使用传统的分层设计办法，虽然这些协议在能量有效方面取得了很好的效果，但很少针对应用的具体特性来设计协议，所以很难在各个性能指标中取得较好平衡，且容易导致网络性能恶化。跨层设计机制是实现高效 WSN MAC 的一种可行解决方案，同时也是一种全局优化的方案。因此能量高效的无线传感器网络跨层 MAC 协议优化研究尤其具有实际意义和应用价值。

## 1.2 国内外研究现状

本文的研究对象为无线传感器网络协议栈中的 MAC 协议，下面阐述一下当前国内外对 MAC 研究的现状，并给出目前的跨层 MAC 设计方案。

目前针对不同的无线传感器网络应用，研究人员从不同方面提出了多种 MAC 协议，根据采用随机访问信道方式还是固定分配信道方式，根据文献[3]，可将 WSN 的 MAC 协议分为以下几类：

(1) 基于竞争的随机访问方式，主要基于 CSMA/CA 机制。节点在需要发送数据时竞争使用无线信道，如果发生了发送碰撞，就按某种策略重发，直到数据发送成功或放弃发送。这类协议重点考虑尽量减少节点间的干扰，分解冲突。经典的竞争型 WSN MAC 协议有 S-MAC<sup>[4]</sup>、T-MAC<sup>[5]</sup>、Sift MAC<sup>[6]</sup>、B-MAC<sup>[7]</sup>、WiseMAC<sup>[8]</sup>等。

(2) 基于预约或调度的 MAC 协议，普遍采用 TDMA，即基于时分复用的时间调度策略，给每个传感器节点分配固定的无线信道使用时段或时隙，从而避免节点之间的相互干扰。典型的 TDMA 调度型 WSN MAC 协议包括基于分簇网络的 TDMA 调度型 MAC 协议<sup>[9]</sup>、EA-MAC<sup>[10]</sup>、D-MAC<sup>[11]</sup>、DEANA<sup>[12]</sup>等。

(3) 其他 MAC 协议，如通过采用 CDMA 码分多址、FDMA 频分多址技术等，但往往实现过于复杂且硬件成本相对较高，因此没有受到研究者的很大关注。

(4) 各种机制的混合型方案，如 TDMA/FDMA 混合设计，CSMA/TDMA 混合机制。

基于 TDMA 的 MAC 协议往往在协议启动过程中引入随机访问期（竞争访问期）来建立网络拓扑、分配时隙/时槽等。而根据目前的 TDMA 型 MAC 研究进展，已经有不少 TDMA 调度型的 MAC 协议实质上在整个协议运行期间引入了交替的竞争访问期来动态调整时隙分配、拓扑数据表等，已经具备混合型 MAC 协议的特性。典型的混合型 WSN MAC 协议有 Z-MAC<sup>[13]</sup>、TRAMA<sup>[14]</sup>、A<sup>2</sup>-MAC<sup>[15]</sup>、CRMAL<sup>[16]</sup>。

#### （5）各种跨层设计方案

A. 基于能效管理的跨层设计技术：基于能效的无线传感器网络的协议栈设计是结合对节能、容错性、抗干扰性等关键指标的具体要求，借鉴现代网络及无线通信、信息处理等领域的先进技术和研究方法，达到符合网络应用特点这一必要条件。当前已经有了一些基于能效的无线传感器网络优化设计研究的阶段性研究成果<sup>[17-18]</sup>。特别在文献<sup>[19]</sup>中提出了一种基于能效管理的无线传感器跨层优化设计，其核心思想是利用了 MAC 层与网络层之间跨层信息的交互从而实现整体网络系统的性能改善。文献<sup>[19]</sup>同时给出了采用跨层设计技术改进前后基于传统 DSR 路由和 S-MAC 协议的网络寿命的比较。可知协议通过跨层设计后网络系统寿命明显得到了延长和提高。本文所研究的内容属于此类型的跨层设计方案。

B. 基于最优代理的跨层设计技术：利用最优代理提供不同协议层之间信息的交换与控制，进而达到改善无线传感器网络的性能的目的是基于最优代理的跨层优化设计技术的核心思想。在参考文献<sup>[20]</sup>中给出了一种基于跨层设计和优化的协议体系架构，并通过最优代理显著改善了网络系统的性能。通过自上而下的应用需求，最优代理反馈信息给底层网络。充分利用了最优代理可以与网络的各个协议层进行信息的共享和交换的优势。同时大量实验与性能测试也显示传输范围与无线射频干扰均对网络的性能有比较大的影响。文献<sup>[20]</sup>中还给出了一些针对小规模无线传感器网络的跨层设计和优化的策略。

C. 基于 QoS 保障的跨层设计技术：在中高速多媒体无线传感器网络中，为了满足多媒体业务传输延迟需求，出现了动态自适应代理跨层设计技术。无线传感器节点是通过汇聚节点或基站实时的将采集的诸如声音、视频等信息传送到远程的用户处，或是把远程的多媒体信息发送给在现场的控制传感器。须保证在传输多媒体信息过程中满足用户的诸如带宽、延迟及抖动等 QoS 需求。也可以将视频、话音等具体应用信息通过应用层反馈给 MAC 层，接下来 MAC 层就可以根

据这些信息来区分服务，保证了服务质量，正如 IEEE802.11e 的 MAC 协议就是这样一种跨层设计的策略。

(6) 当前跨层设计技术面临的挑战





由于跨层设计是一项崭新的无线网络设计技术，特别是具有诸多限制和与应用高度相关的无线传感器网络，对于什么情况下采用跨层设计技术以及如何实现跨层设计都面临着很大的技术挑战，主要体现在以下几个方面：

A. 针对全网络的设计和优化极其复杂，特别是试图实时动态优化时。在这样的环境中，一种高效的层间信息调度机制对于层间优化的设计就相当重要。

B. 优化时使用的衡量的标准是另一个没有办法回避的核心问题。在业务多元化、需求多元化的情况下，定义有效的衡量指标意义重大。

C. 动态网络优化的最后一个关键问题是由谁来控制跨层功能这个过程。

随着无线传感器网络应用的进一步普及，以及对无线传感器网络的应用特点的研究深入，跨层设计技术还会融合其他领域的新技术出现更加复杂和多样的特点。

目前的研究主要集中在竞争的和 TDMA 时间调度方式的 WSN MAC 协议，这也是 WSN 中实用、可行的 MAC 方案，而基于码分复用等特殊方式的 MAC 协议过于复杂，且性能改善不够理想。基于竞争和调度的机制各自侧重考虑和解决的问题不同，有不同的优势和缺陷，每一种 WSN MAC 协议都有其适用环境等限制，单纯一种机制的 MAC 协议很难在各个性能指标（主要有能耗效率、扩展性及网络效率如时延、传递率/可靠性等）中获得较好的平衡。竞争型的 MAC 协议扩展性好，但延时大；调度型的 MAC 协议开销小，实时性比较好，但扩展性差，时间同步要求严格。虽然研究者针对竞争型的和调度型的 MAC 协议都提出了不少改进措施，但其效果有限、限制条件严格，也难以很好适应实际的 WSN 应用。竞争性 MAC 机制与 TDMA 时间调度机制的有机结合可以平衡两者的优势和不足，取得较好的性能，但混合型 MAC 协议普遍算法过于复杂，在实际应用仍需要进一步的讨论。

目前为止还没有关于无线传感器网络的标准协议栈，每种 WSN 协议或多或少参考了 OSI 网络分层体系。跨层设计是通过层与层之间的信息交换来满足全局性的需要，是一个全局优化的问题。事实上单一性能参数的改善并不一定能带来系统全局效率的提高，比如，物理层链路质量好的节点可能剩余能量较小，缓冲区待发送分组队列较长，因此，MAC 协议不应该将该节点选作下一跳转发节点。为进一步提高 MAC 协议效率，实现协议轻量化，减少开销。基于跨层设计的网络体系可以成为 WSN 的一种新选择。

作为 WSN 底层通信的支撑协议，MAC 协议对 WSN 的性能有很大影响，是保证 WSN 高效通信的关键网络协议之一。针对具体的应用模型研究高效的 MAC 协议意义深远。本课题专注于能量高效的无线传感器网络跨层 MAC 协议优化的研究，主要研究的问题是通过利用路由层的路由表信息，改变传统 MAC 协议的控制帧格式，基于典型的跨层 MAC 协议 AIMRP<sup>[21]</sup>，设计更高效的 WSN MAC 协议，达到低能耗、可扩展/自适应特点的同时提供尽可能低的通信延时。

## 1.3 课题来源及本文主要研究内容与结构

### 1.3.1 课题来源

本论文课题主要来源于：

(1) RFID 传感器网络关键问题研究（国家自然科学基金资助项目,编号：60673132）

(2) 中高速传感器网络关键技术（广东省重大科技专项,编号：2009A080207008）

(3) 信息服务的 RFID 理论与技术研究（国家基金广东省联合基金重点项目,编号：8351009001000002）

本人在这些课题项目中参与的工作主要涉及其中的 MAC 协议的研究与设计，本论文的论述都是在这些研究工作基础上进行的。

### 1.3.2 本文研究内容及创新点

#### 1) 本文研究的主要内容

本文主要研究能量高效的无线传感器网络跨层 MAC 协议，论文涉及工作如下：

(1) 综合分析了经典的竞争型的和 TDMA 型 MAC 协议，并分析了典型的跨层 MAC 协议；

(2) 针对中高速型无线传感器网络应用提出一种跨层的 MAC 协议

(E-AIMRP);

(3) 为 E-AIMRP 协议设计了一种高效的能量节省模型, 使该协议在事件增加或节点增加的情况下, 能量消耗维持在一个常数;

(4) 最后在 NS-2 平台下辅以 Matlab 对 E-AIMRP 协议进行仿真实验, 并分析评价其性能。

## 2) 本文研究的创新表现

本文主要有以下两点创新表现:

(1) 在深入研究分层 MAC 协议的基础上, 从协议的可扩展性能与节能性能两方面进行了研究, 最后提出 E-AIMRP 协议。该协议针对中高速型应用, 通过重新设计 RTR (Request\_to\_Relay) 数据帧, 跨层融合 MAC 和路由功能, 解决了传统协议中由于多节点检测和报告而造成的能量浪费问题, 同时扩展了单节点检测拓扑模型。实验结果表明: 该协议有效地抑制了节点能量过早耗完而使网络生命提早结束问题。

对应于公开发表的学术论文“一种融合 MAC 和路由的无线传感器网络跨层设计节能协议”(《计算机工程》, 已录用, Apr. 2009: 9~1)。

(2) 深入分析传一般 MAC 协议的能量模型后, 发现其能量模型有很大的局限性, 主要表现在使用固定的竞争接入方式和同时强制唤醒上。针对该问题, 本文为 E-AIMRP 参考链路层的信息设计了一种高效的能量节省模型, 使其在事件增加或节点增加的情况下, 能量消耗维持在一个常数。第五章的仿真结果表明该模型能够以稍微降低数据传输的时延性能, 取得良好的节能效率。

该研究成果已在核心期刊《计算机工程与应用》投稿论文一篇“一种高效的无线传感器网络跨层设计 MAC 协议”。

### 1.3.3 论文结构

本论文各章的联系与全文的结构如下:

第一章, 绪论

主要介绍该课题的研究背景和研究目的、意义, 以及课题来源、

国内外研究现状、发展趋势。

第二章，传统分层 MAC 协议分析及跨层 MAC 的提出

主要介绍和分析经典的传统分层 MAC，最后提出分层思想的适用性。

第三章，参考路由信息跨层设计 MAC 协议

为解决由于多节点检测和报告而造成的能量浪费问题和单节点检测型应用的拓扑自适应问题，通过重新设计 RTR 数据帧，跨层融合 MAC 和路由功能，设计了 E-AIMRP 协议。

第四章，基于链路层的能量计算模型分析

针对固定的竞争接入方式和同时强制唤醒问题，为 E-AIMRP 参考链路层的信息设计了一种高效的能量节省模型，并分析了其能量效率性能。

第五章，仿真与实验分析

针对第三、四章的研究进行仿真实验，并着重对实验结果分析比较，并评价 E-AIMRP 协议的各种性能。

最后，结语和展望

对本文工作总结，讨论有待进一步解决的问题，展望无线传感器网络 MAC 协议的研究方向和趋势。

## 第二章 传统分层 MAC 协议的分析及跨层 MAC 的提出

### 2.1 无线传感器网络的通信协议栈

与互联网协议框架类似，无线传感器网络的通信协议栈可分为五层<sup>[22]</sup>，如图 2-1 所示。

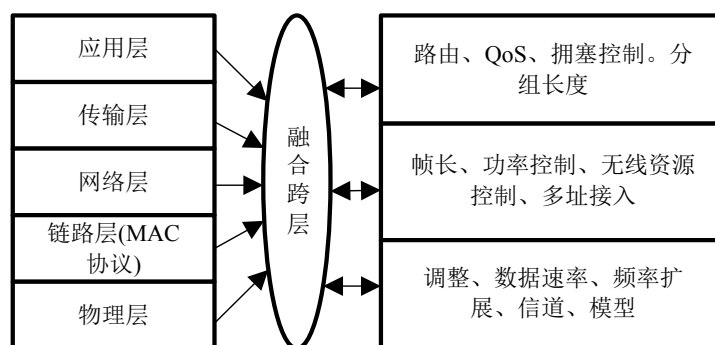


图 2-1 无线传感器网络的通信协议框架

Fig. 2-1 Communication Protocols of Wireless Sensor Networks

**物理层协议：**物理层负责信号的调制、发送与接收。该层的设计将直接影响到电路的复杂度和能耗。物理层的研究目标是设计低成本、低功耗、小体积的传感器节点。

**数据链路层协议：**数据链路层负责数据成帧、帧检测、差错控制以及无线信道的使用控制，减少邻居节点发送引起的冲突。主要的部分是介质访问控制 MAC 协议，它决定无线传感器网络无线信道的使用方式，在传感器节点之间分配有限的无线通信资源，用来构建传感器网络系统的底层基础结构，对网络的性能有非常大的影响，是保证无线传感器网络高效通信的关键网络协议。

**路由层协议：**路由层负责路由生成和路由选择，并可实现数据融合。

**传输层协议：**传输控制层负责数据流的传输控制，协作维护数据流，是保障通信质量的重要部分。TCP 协议是 Internet 上通用的传输层协议，但无线传感器网络的资源受限、错误率高、拓扑结构动态变化，这将严重影响 TCP 协议的性能。

故 TCP 协议也不能直接应用在无线传感器网络中。

应用层协议：基于检测任务，可在应用层上开发和使用不同的应用层软件。无线传感器网络的应用层支持服务包括：时间同步和节点定位。其中，时间同步服务为协同工作的节点同步本地时钟，节点定位服务依靠有限的位置已知节点（信标）确定其他节点的位置，在系统中建立起一定的空间关系。

图 2-1 中右侧部分不是独立的模块，他们的功能渗透到各层中，如能量、安全、移动，在各层设计实现中都要考虑；而拓扑管理主要是为了建立邻居数据表，管理拓扑关系；网络管理主要是实现在传感器网络环境下，对各种资源的管理，为上层应用服务的执行提供一个集成的网络环境；QoS 支持是指为用户提供高质量的服务，通信协议中的各层都需要提供 QoS 支持。

本文研究 WSN 的 MAC 协议，它决定有限的无线共享信道的访问方式，分解发送冲突，对 WSN 的网络质量有非常重要的影响。

## 2.2 无线传感器网络 MAC 层关键问题

### 2.2.1 无线传感器网络 MAC 层能耗分析

无线传感器网络研究的核心问题之一是功耗管理。这就决定了无线传感器网络协议栈各层的设计，都必须以能源有效性（节能效率）作为首要的考虑。通过对现有系统的分析可知，射频模块是传感器网络节点中最大的耗能部件，也是优化的主要目标<sup>[23]</sup>。

由于媒体访问控制 MAC 层协议直接控制网络中节点的无线收发装置（即射频模块），因此，MAC 协议的设计对节点的能耗有非常大影响，直接关系到节点的生存时间。

参考文献[23]，传感器节点无效功耗主要有以下 5 个来源：

(1) 空闲侦听 (Idle hearing)：节点不知道邻居节点何时会向自己发送数据，因此，射频模块一直处于接收状态，消耗大量的能源。这是无效功耗的最主要来源；

(2) 冲突 (Collision)，碰撞重传：数个节点可能同时向同一节点发送多个数据帧，信号相互干扰，接收方无法准确接收，重发造成能量浪费；

(3) 串扰/串音 (Over-hearing): 接收和处理发往其它节点的数据都属于无效功耗;

(4) 控制开销 (Control overhead): 控制报文不传送有效数据, 消耗的能量对用户来说是无效的;

(5) 过度发送 (Over-transmitting): 发出数据帧, 接收节点未准备好接收, 再次发送造成能量浪费。

以上 5 个因素中, 空闲侦听消耗的能量占比重最大, 其次是冲突或过度发送带来的重发, 再次是串扰和控制开销。在 MAC 协议设计中, 也应该首要尽量减少空闲侦听比例, 提高节点的节能效率。

### 2.2.2 无线传感器网络 MAC 协议的设计原则与设计目标

在 WSN 中, 节点能量有限且难以补充。为保证 WSN 长期有效工作, MAC 协议以减少能耗、最大化网络生存时间为首要设计目标; 其次, 为了适应节点分布和拓扑变化, MAC 协议需要具备良好的可扩展性; 传统无线网络关注的实时性、吞吐量及带宽利用率等性能指标成为次要目标; 此外, WSN 节点一般属于同一利益实体, 可为系统优化作出一定的牺牲, 因此, 能量效率以外的公平性一般不作为设计目标, 除非多用途 WSN 重叠部署。

WSN 中的能量消耗主要包括通信能耗、感知能耗和计算能耗。其中, 通信能耗所占比重最大。因此, 减少通信能耗是延长网络生存时间的有效手段。大量研究表明, 通信过程中主要能量浪费存在于: 冲突导致重传和等待重传; 非目的节点接收并处理数据形成串音; 发射/接收不同步导致分组空传(Overemitting); 控制分组本身开销; 无通信任务节点对信道的空闲侦听等。此外, 无线发射装置频繁发送/接收状态切换也会造成能量迅速消耗。

基于上述原因, WSN MAC 协议通常采用“侦听/休眠”交替的信道访问策略, 节点无通信任务则进入低功耗睡眠状态, 以减少冲突、串音和空闲侦听; 通过协调节点间的侦听/休眠周期以及节点发送/接收数据的时机, 避免分组空传和减少过度侦听; 通过限制控制分组长度和数量减少控制开销; 尽量延长节点休眠时间, 减少状态切换次数。同时, 为了避免 MAC 协议本身开销过大, 消耗过多的能量, MAC 协议尽量做到简单、高效。

当然，影响传统无线网络 MAC 协议设计的一些基本问题，如隐藏终端和暴露终端问题、无线信道衰减和无规律冲突(Interference and Irregularity)问题等，在 WSN MAC 协议中依然存在，需要解决。

WSN MAC 的特殊需求表现在：（1）节能效率；（2）可扩展性；（3）网络效率。具体而言，针对无线传感器网络的特殊性，设计 MAC 协议，需要和考虑以下因素：

#### （1）能源有效性（节能效率）

节能效率是无线传感器网络 MAC 协议性能指标中最重要的一项指标，正如前文所述，网络中节点的能量非常有限，而且在实际设计一些无线传感器网络时，也会考虑减少节点的成本，以节点的一次性使用作为设计目标。另外，无线传感器网络可能工作比较偏远，甚至危险的环境中，通常很难给传感器节点更换电池或充电。因此，尽量延长网络节点的生存时间是设计无线传感器网络时需要考虑到的一个重要问题。

在节点的硬件结构中，无线收发装置消耗的能源占节点消耗能源的绝大部分，MAC 协议直接控制无线收发装置的行为，可直接控制其消耗的能源大小，因此 MAC 层的能源有效性直接影响网络节点的生存时间。

#### （2）可扩展性

可扩展性是指一个 MAC 协议应该适应网络大小、网络拓扑结构、网络节点密度的变化。无线传感器网络是一个动态的网络，节点可以移动；一个节点可能因为电池能源耗尽或其它原因退出网络运行；一个节点也可能由于需要而加入到网络中。诸多的因素影响，改变着网络的规模、结构等。因此，一个好的 MAC 协议应该使网络能快速高效地自适应这些变化。

#### （3）网络效率

无线传感器网络 MAC 设计中，网络效率指标应根据实际应用来取舍和平衡。常关注的方面包括：

##### a) 通信延迟

延迟是指发送端向接收端发送一个数据包，到接收端成功接收这一数据包之间的这一时间间隔。在无线传感器网络中，延迟的重要性主要取决于网络的应用。

##### b) 信道利用率

信道利用率反映了网络通信中信道带宽如何被使用。



在蜂窝移动通信系统和无线局域网中信道利用率是一项非常重要的性能指标，因为在这一个系统中，带宽是非常重要的资源，系统需要尽可能地容纳更多的用户通信。相比之下，无线传感器网络中处于通信中的节点数量是由一定的应用任务所决定的，信道利用率性能指标在无线传感器网络中是处于第二位的。

#### c) 吞吐量

吞吐量代表在一个给定的时间内，发送端成功发送给接收端的数据量。许多因素影响网络的吞吐量，例如，冲突避免机制的有效性、信道利用率、延迟、控制开销等。和延迟一样，吞吐量的重要性也取决于具体的网络应用，无线传感器网络的许多应用为了获得更长的节点生存时间，可以适当牺牲延迟和吞吐量性能指标。

#### d) 其它

因此，设计一个无线传感器网络的 MAC 协议，主要应该考虑到，一是能源有效性，另一个是可扩展性，而其它的一些网络效率方面的性能指标，包括信道访问的公平性、延迟、吞吐量、带宽利用率等传统 MAC 协议中首要考虑到性能指标，在无线传感器网络中，和这两个性能指标相比，其重要性就可以放在比较次要的地位了。

上文提到的无线传感器网络 MAC 协议的设计目标中，无论怎样的应用环境，基本始终以资源的有限性作为第一考虑因素，以网络良好的节能效率作为重要的设计指标，其次是可扩展性，以适应网络动态的变化，然后才对关键的网络效率进行合理的取舍和权衡。

目前的 WSN MAC 协议可分四类，主要有：（1）基于竞争，节点在需要发送数据时随机竞争使用无线信道，重点考虑尽量减少节点间的干扰；（2）基于采用时分复用（TDMA）方式，给每个传感器节点分配固定的无线信道使用时段，从而避免节点之间的相互干扰；（3）基于竞争和基于 TDMA 调度的混合型的 MAC 协议；（4）跨层设计的 MAC 协议。

下面按照上述传感器网络 MAC 协议分类，简要介绍几种经典的无线传感器网络 MAC 协议。

## 2.3 基于竞争的无线传感器网络 MAC 协议

基于竞争的 MAC 协议的基本思想是当节点需要发送数据时，通过竞争方式使用无线信道，如果发送的数据产生了碰撞，就按照某种策略重发数据，直到数据发送成功或放弃发送。

IEEE 802.11 作为典型的竞争型介质访问控制协议，广泛应用在无线网络环境以作为无线节点的 MAC 协议。由于无线网络使用的传输媒介属于开放式共享资源，移动节点要传输时必须完全占用传输媒介才能运作，因此，802.11 采用了载波侦听多路访问/冲突检测（CSMA/CA）的方式来争夺传输媒介，只有获得信道的节点才能进行数据传输。

但是 CSMA/CA 的运作方式需要节点长期侦听信道，显然，对于传感器节点来说会消耗相当多的能源，另外 CSMA/CA 倾向支持独立的点到点通信业务，容易导致临近网关的节点获得更多的通信机会，而抑制多跳业务流量，因此，802.11 协议不能直接应用于无线传感器网络领域。在各种类型的 WSN MAC 协议中，对基于 802.11 竞争型协议的研究和改进居多，各学者也不断提出新的改进思路。

基于竞争的 MAC 协议具有良好的扩展性，且不要求严格的时钟同步，但它们对接收节点的考虑相对较少。在节省节点能量和增大消息延迟之间需要权衡。基于竞争的 MAC 协议在保证一定的节能性的前提下，在各种性能指标之间进行折中。竞争型的 WSN MAC 协议很多，研究人员从不同的应用环境从不同的性能需求角度提出了许多竞争型 MAC 协议，除了前文国内外研究现状所提及的经典的 S-MAC、T-MAC、WiseMAC 外，较受关注竞争型 WSN MAC 协议还有 AC-MAC/DPM<sup>[24]</sup>、CB-MAC<sup>[25]</sup>、QS-Sift<sup>[26]</sup>、PMAC<sup>[27]</sup>（Pattern MAC）、PCS-MAC<sup>[28]</sup>、TEEM<sup>[29]</sup>（Traffic aware, Energy Efficient MAC）、PAMAS<sup>[30]</sup>（power aware multiple access protocol with signaling）等，本节仅介绍最经典的 S-MAC 协议。

S-MAC（Sensor MAC）协议是由 Wei Ye 和 Heidemann 于 2003 年在 IEEE 802.11 MAC 协议基础上，采纳了其 DCF 节能模式的设计思想，针对传感器网络的节省能量需求而提出的传感器网络 MAC 协议。S-MAC 以多跳网络环境为应用平台，节点周期性地在监听状态和休眠状态之间转换。

S-MAC 协议的主要设计目标是提供良好的扩展性，减少能量的消耗。

S-MAC 协议的工作原理见图 2-2，图中 Normal 标识一般情况（802.11 MAC 协议下）的数据交换，S-MAC 标识 S-MAC 的数据间歇交换过程。

对碰撞重传、串音、空闲侦听和控制消息等可能造成传感器网络的消耗更多能量的主要因素，S-MAC 协议采用以下机制：周期性侦听/睡眠的低占空比工作方式，控制节点尽可能处于睡眠状态来降低节点能量的消耗；邻居节点通过协商一致性睡眠调度机制形成虚拟簇，减少节点的空闲侦听时间；通过流量自适应的侦听机制，减少消息在网络中的传输延迟；采用带内信令来减少重传和避免监听不必要的数据；通过消息分割和突发传递机制来减少控制消息的开销和消息的传递延迟。

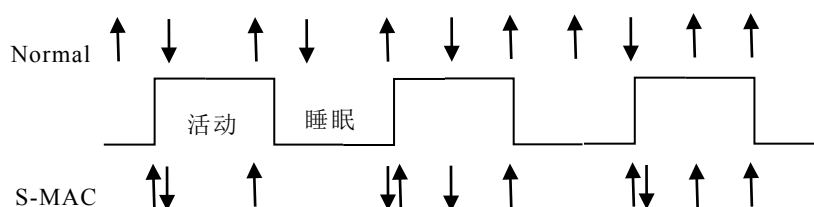


图 2-2 S-MAC 的基本机制

Fig. 2-2 Basic Mechanisms of S-MAC

S-MAC 协议的优点是形成了一个使相邻节点都能彼此自由通信的平面拓扑结构，同步节点形成了一个簇内无冲突的虚拟簇，很容易适应拓扑结构的改变。但节点周期性休眠增加了通信时延，而且时延会在每跳中积累；各节点的休眠时长固定，不能动态改变，在传感/转发事件的发生间隔较长时，会导致不必要的能量消耗。

## 2.4 基于 TDMA 的无线传感器网络 MAC 协议

本文所涉及的调度型 MAC 协议主要指 TDMA 时间调度型的协议。与基于竞争协议相比，基于 TDMA 的协议在节能效率上有天然的优势，这是因为没有竞争所带来的控制开销，也不会产生冲突。但是，使用单纯的基于 TDMA 的协议并不能动态改变帧的长度和时隙/频率的分配，可扩展性就远远不如基于竞争的协议，很难灵活适应无线传感器网络不断变化的拓扑结构。

基于 TDMA 的 MAC 协议往往在引入协议启动过程中引入随机访问期（竞争访问期）来建立网络拓扑、分配时隙/时槽等。而根据目前的 TDMA 型 MAC 研究进展，已经有不少 TDMA 调度型的 MAC 协议实质上在整个协议运行期间引入了交替的竞争访问期来动态调整时隙分配、拓扑数据表等，已经具备混合型 MAC 协议的特性。本文把包含交替动态的随机访问期和调度期的 WSN MAC 协议归类为混合型的 MAC 协议，如 TRAMA 协议。

基于 TDMA 的 WSN MAC 除了前文国内外研究现状中提到过的经典的 EA-MAC、D-MAC、DEANA 外，较受关注的 TDMA 调度型 WSN MAC 还有 PACT<sup>[38]</sup> 基于 TDMA 的能量已知的分簇协议（Power Aware Clustered TDMA, PACT）、EDF-MAC<sup>[39]</sup>、DE-MAC<sup>[40]</sup>、CFPMS-MAC<sup>[41]</sup>、GANGS 协议<sup>[42]</sup>、AI-LMAC<sup>[43]</sup>（Adaptive, Information centric and Lightweight MAC）等。本节仅介绍最经典的 TDMA 型 D-MAC 协议。

DMAC（详见文献[11]）是针对数据采集树结构提出的，目标是减少网络的能量消耗和减少数据的传输延迟。它的核心思想是采用交错调度机制，使数据能够连续地从数据源节点传送到汇聚节点，减少在网络中的传输延迟。DMAC 的主要机制包括自适应占空比机制、数据预测机制、MTS 分组机制。

DMAC 协议是针对竞争性 MAC 协议 S-MAC 和 T-MAC 的数据转发停顿问题而提出的。该协议使用采集树描述网络结构，采用不同深度节点间的交错调度机制，从而减少消息在网络中的传输延迟。但该协议需要严格的时间同步，且实现复杂，许多细节需要进一步深入研究。

## 2.5 混合型的无线传感器网络 MAC 协议

采用单纯的竞争型或调度型机制很难在各种指标中获得较平衡的优良性能，它们往往用较大的某些性能损失代价去换取另一种性能的提高，如 S-MAC 用较大的时延代价来获取可接受的节能效率。而竞争性 MAC 机制与 TDMA 调度机制的有机结合可以平衡两者的优势和不足，取得较好的性能。

结合基于竞争和基于 TDMA 调度的混合型方案是高效无线传感器网络 MAC 协议的重要解决思路。目前已有不少学者提出各种实用有效的混合型 MAC 协议。下面分析其中较典型的代表 Z-MAC。

综合 CSMA 和 TDMA 二者各自的优点，由 Rhee 等提出了一种混合机制的 Z-MAC (Zebra MAC) 协议 (详见文献[13])。Z-MAC 将信道使用划为时间帧的同时，使用 CSMA 作为基本机制，时隙的占有者只有数据发送的优先权，其他节点也可以在该时隙发送信息帧，当节点之间产生碰撞之后，时隙占有者的回退时间短，从而真正获得时隙的信道使用权。Z-MAC 使用竞争状态标示来转换 MAC 机制，节点在 ACKs 重复丢失和碰撞回退频繁的情况下，将由低竞争状态转为高竞争状态，由 CSMA 机制转为 TDMA 机制。可以说，Z-MAC 在低网络负载下类似 CSMA，在网络进入高竞争的信道状态之后类似 TDMA。

Z-MAC 并不需要精确的时间同步，有着较好的信道利用率和网络扩展性。协议达到即时的适应网络负载变化的同时，TDMA 和 CSMA 机制的互换会产生大量的能耗，对于网络负载的突发波动会造成网络延迟问题。

总体而言，Z-MAC 在较低竞争情况下性能像 CSMA，在较高竞争情况下性能像 TDMA。优点是比较好结合了 CSMA 和 TDMA 的优点，节点可以在任何时隙都可以发送数据，信道利用率得到了提高。缺点是网络开始的时候，花费大量的开销来初始化网络，造成网络能量大量消耗，且协议实现过于复杂，虽然设计思想非常新颖和有效，但实用性不高。

## 2.6 跨层设计思想 MAC 的提出

目前，大部分 WSN MAC 的研究沿用分层设计思想，不同的信道访问策略具有如下的优缺点。

基于竞争类的 MAC 协议虽然具有良好的可扩展性和能量有效性，在低业务的 WSN 网络应用中具有较好的吞吐量性能，但无法避免碰撞问题，从而带来了延时。

基于调度的 TDMA 类 MAC 协议没有竞争机制的碰撞重传问题，节点在空闲时隙能及时进入睡眠状态，从而节省节点的能量消耗。但 TDMA 类的 MAC 协议需要节点间的时间同步，网络的可扩展性差。

混合类的 MAC 协议通过增加控制开销和节点的结构复杂性，进一步改进了能量有效性和其他性能，但仍然存在能量有效性和其他性能的矛盾性，协议的执行过程也更复杂。

目前为止还没有关于无线传感器网络的标准协议栈。图 2-1



给出了一种协议栈，是 OSI 网络分层体系的具体体现。但由于 WSN 是面向应用的网络，各个节点简单且差异性小，有时几乎完全相同，虽然现有的协议在能量有效方面取得了很好的效果（大部分很少针对应用的具体特性来设计协议），但随着无线传感器网络服务要求的提高，例如中高速多媒体传感器网络应用，如果在这些应用中继续采取传统的协议设计思想可能会造成资源的浪费且导致网络性能恶化。

跨层设计是通过层与层之间的信息交换来满足全局性的需要，是一个全局优化的问题。事实上单一性能参数的改善并不一定能带来系统全局效率的提高，比如，物理层链路质量好的节点可能剩余能量较小，缓冲区待发送分组队列较长，因此，MAC 协议不应该将该节点选作下一跳转发节点。

### 2.6.1 无线传感器网络对跨层的需求

#### 1) 物理层对跨层的需求：

物理层主要向 MAC 层协议、路由协议、传输层协议等提供本层的状态参数，如信噪比(SNR)、误码率(BER)和数据传输速率等,作为其他协议层优化设计的依据。其发射功率及传输速率影响了 MAC 层的接入控制及网络层的路由选择。

#### 2) MAC 层对跨层的需求：

MAC 层主要负责无线信道的划分及分配,它影响了网络层的路由选择。不同应用背景 Qos 保证机制的提出，对于 MAC 层需要区分具体业务的类型，采取具有优先级的调度机制,这种机制必须依据其上协议层的 Qos 需求信息和物理层的信道状态信息。

#### 3) 网络层对跨层的需求

网络层通过选择路由把分组传送到信宿,影响着 MAC 层的 QoS 及物理层的性能参数。现有无线多跳网络路由协议大都采用最短路径准则设计，没有考虑下层物理层信道特性的变化对 MAC 层接入性能的影响等因素，造成所选路径无法适应底层性能的变化。

#### 4) 传输层对跨层的需求

在无线传感器网络中，节点的移动可能导致通信链路的的中断，从而导致数据包丢失。按传统的 TCP 机制,这将判决为因 TCP 拥塞导致的结果,从而频繁触发



TCP 超时重传机制，



导致 TCP 性能下降。这在分层协议设计的原则下是不可避免的,因为 TCP 协议层无法判定数据包丢失的真正原因。

### 5) 应用层对跨层的需求

无线传感器网络是一种应用相关的网络,不同的应用有不同的 QoS 需求,像事件监测与快速报告系统就对监测数据的实时性和可靠性有较高的需求。这种 QoS 保证机制就涉及到所有通信协议层。

本文是针对应用的具体特性参考路由层的信息来设计 MAC 协议,同时参考物理链路层来设计自己的节能模型。

## 2.6.2 跨层设计原理

跨层设计就是使任意两层之间能够互相提供和利用有用信息,实现自适应机制,使网络各层共享与其它层相关的信息,对无线网络进行整体设计。它并不是完全否定了传统无线网络的五层而是用综合的方法来适应网络的动态性,每层应对本层的变化和其他层反馈的信息做出合理反应,将分散在网络各个子层的特性参数协调融合。因此,所有层间可以交互信息,使得协议栈能够以全局的方式适应特定应用所需的 QoS 保证和网络状况的变化,并根据系统的约束条件和网络特征来进行综合优化,实现对网络资源的有效分配,提高网络的综合性能现有跨层模型有数据报报头信息机制、ICMP 报文机制、本地特性信息机制、MobileMan 跨层方案、WCI 服务器机制、CLASS(Cross—LayerSignallingShotrcuts)方案。其优缺点可以通过表 2-1 所示:

表 2-1 跨层模型比较

Table 2-1 Compare of Cross Layer model

模型	数据报报头信息	ICMP 报头	本地特性信息	MobileMan	WCI	CLASS
优点	易于实现; 开销小	易于实现; 开销小	灵活性好; 开销较小	灵活性好; 开销较小	对现有协议栈影响小; 适合作为补充手段	灵活性很好; 传输信息量很小
缺点	数据冗余大; 层层传	单向层层; 传输效率			开销较大; 延时也很大	

	输：效率低	较低				
--	-------	----	--	--	--	--



			文件读取 处理过程 较长; 延时 较大	实现复杂; 对象有协 议影响很 大		实现复杂; 外部消息 格式需要 标准化
--	--	--	------------------------------	----------------------------	--	------------------------------

图 2-3 给出了一个无线传感器网络的理想跨层设计模型。各个协议层之间相互依赖，彼此合作。可以看出，跨层设计的核心概念就是以自适应的方式从整体的角度对系统进行设计。自适应指的是协议栈对网络条件进行观察并做出反应的机制。自适应既包括协议栈的上层对下层变化的自适应，也包括下层的上层要求的自适应。整体则是指在设计移动通信系统时，必须充分考虑协议栈各层之间的相互影响，避免出现因为单纯追求某一层的最优性能，而导致系统整体性能下降的情况。

为进一步提高 MAC 协议效率，实现协议轻量化，减少开销。基于跨层设计的网络体系可以成为 WSN 的一种新选择。

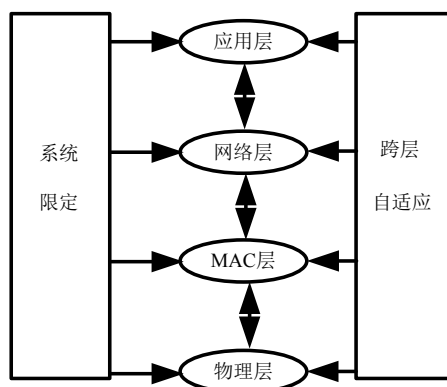


图 2-3 跨层设计机制示意

Fig.2-3 Cross-layer design mechanism

## 2.7 本章小结

本章首先介绍了无线传感器网络的构成及特点，分析了无线传感器网络的 MAC 层关键问题，包括其 MAC 协议的设计目标，和 MAC 层的能耗分析；然后按照竞争型、TDMA 调度型和两种机制混合型的分类分别介绍了典型的 MAC 协议，并作对比分析，最后给出跨层设计的地位、重要性及未来面临的挑战。

## 第三章 参考路由信息跨层设计 MAC 协议

AIMRP<sup>[21]</sup>是跨层设计的无线传感器网络 MAC 协议, 是由 SunilKulkarni, Aravind Iyer, Catherine Rosenberg 等人于 2006 年在 IEEE/ACM Transactions On Networking 中提出的, 它充分结合了 MAC 层和路由层的优势, 实现了在特殊的应用环境中高效的性能, 详见文献[21], 原文研究细节充分, 相对于其他类型无线传感器网络 MAC 协议, 它不仅算法简易可行, 而且性能优越, 在针对事件检测与快速报告型应用中能达到很好的效果。AIMRP 是本文研究的基础, 本章分析其应用模型、运行过程及相关主要机制。最后为了解决多节点检测和报告而造成的能量浪费和拓扑模型自适应问题, 提出一种全新的基于轻量地址, 融合 MAC 和路由功能的协议 E-AIMRP。

### 3.1 AIMRP 的应用模型及网络结构

#### 3.1.1 AIMRP 的前提假设和设计特点

AIMRP 实践了跨层设计的思想, 根据路由层的数据帧, 利用路由的数据帧来提高 MAC 协议的性能, 这是 AIMRP 的新颖之处之一。

AIMRP 设计的目标是高节能效率, 同时提供可接受的时延和可靠性(用数据包传达率衡量), 该协议采用了竞争接入方式, 充分利用了竞争性机制接入控制的灵活性并对竞争接入可能形成的协议死锁提出了相应的解决方案, 是典型的跨层 MAC 协议。

AIMRP 的设计中, 作者作了如下几个前提假设:

(1) 汇集节点不需要与特定的节点通信, 只需要在配置阶段进行一种广播的操作, 即没有点到点的通信功能;

(2) 网络拓扑不能频繁变化, 实际上, 原文对 AIMRP 的动态拓扑适应性考虑甚少, 不能应对节点加入和失效的变化;

(3)

事件能够被兴趣区域内的节点等概率地感知，并且仅仅只有一个节点能够感知和汇报此事件，而多节点感知和报告在 WSN 应用中却非常不可避免。

以上的前提假设主要是 MAC 层功能性的方面，主要为的是简化 AIMRP 的设计，重点关注 AIMRP 的跨层设计对 MAC 层性能的影响。

AIMRP 的设计中，有如下几个特点：

(1)融合 MAC 和路由来最小化协议负载消耗，这是由 AIMRP 特定的网络拓扑决定的寻址机制。

(2)没有每节点全局唯一固定的 MAC 地址和网络地址的机制，AIMRP 使用随机的标识符作为此次发送数据的 MAC 地址，使用网络拓扑的层号作为路由地址。

(3)不用节点之间交换信息的能量节省模型。

### 3.1.2 事件检测与快速报告型应用

AIMRP 的应用模型是事件检测与快速报告型，如环境监测应用、火灾检测应用等。从原文归纳，AIMRP 所针对的事件检测与快速报告型应用特指有如下特点的网络：

- a) 长时间处于不活动状态直到某一兴趣时间被检测到；
- b) 一旦事件被检测到，要求快速汇报给汇集节点；
- c) 事件汇报数据中通常需求有事件发生的位置信息；
- d) 多对单的通信模型。

### 3.1.3 AIMRP 的拓扑结构

AIMRP 的拓扑结构如图 3-1 所示。AIMRP 中假设所有的节点都是以汇集节点为中心来配置的，通过初始配置阶段，整个网络被组织成以汇集节点为中心的分层结构，从最里面层开始，各层分别被编号为 1, 2, 3..., 这样第  $n$  层节点可以通过  $n$  跳把数据转接给汇集节点。配置阶段完成后，整个路由发现也就跟随着完成，基于这样的规则：一个  $n$  层的节点可以转接比它更远层节点的数据，如  $n+1$ ,  $n+2$ , ...。在每一跳中，节点通过比较数据包中的层号码来决定是否需要向底层转接此数据包。以这样的方式，AIMRP 在层寻址的层次上完成路由功能，它



比全局编址的路由寻址法使用更少的能量。



由于无线传感器网络是与应用密切相关的, 对协议设计适应的模型特点把握越清楚, 设计能达到的性能就越理想。AIMRP 正是专门针对这种特殊的事件检测与快速报告型网络应用去跨层设计的。

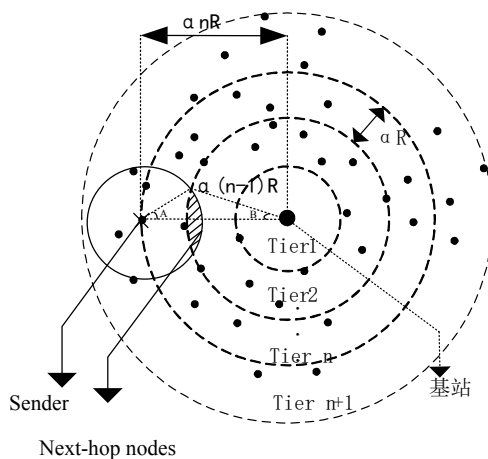


图 3-1 AIMRP 的网络拓扑

Fig. 3-1 Network topology of AIMRP

除了两个重要的不同点外, AIMRP 中的介质访问机制与 IEEE 802.11 中的 DCF 相似。这两点为: (1)AIMRP 不适用预先分配的, 全局唯一的 MAC 地址进行通信, 而是在每次准备通信时, 使用一个全新的短随机标识符作为临时的 MAC 地址。(2)AIMRP 使用 RTR(Reruest\_to\_Relay)与 CTR(Clear\_to\_Relay)来取代 IEEE 802.11 中的 RTS 和 CTS, 这一点是非常重要的, 因为它把一跳一跳的路由功能集成在 MAC 中。

## 3.2 AIRMP 的帧格式和主要运行机制

### 3.2.1 AIMRP 的帧格式

AIMRP 一共有五种类型的帧, 结构如图 3-2 所示。AIMRP 使用其中的 RTR 帧来寻找靠近汇集节点的接收者来转接数据, 接收者使用 CTR 来在网络确定它作为下一节点的地位。TIER 帧是 AIMRP 的特有帧, 它被使用来在网络配置阶段进行路由发现。DATA 帧和 ACK 帧为一般的数据和确认帧。

RTR	Message Type	RSD	STD	NAV	OPI	
CTR	Message Type	RSD	STD	RRD	RTD	NAV
DATA	Message Type	RSD	STD	RRD	RTD	DADA
ACK	Message Type	RSD	STD	RRD	RTD	ACK
TIER	Message Type	TIER ID				

图 3-2 AIMRP 的帧格式

Fig. 3-2 Frame format of AIMRP

### 3.2.2 AIMRP 的主要运行机制

AIMRP 协议节点的运行分两个阶段: 配置和路由发现阶段与活动阶段。另外, AIMRP 包括协议死锁避免机制, 路由修复机制, 能量节省模型。对于配置路由发现、活动阶段, 主要有以下机制:

在网络的初始化阶段, 有两种路由发现机制。(1)汇集节点根据不同通信半径  $n\alpha R$  ( $n=1,2,3\dots$ 其中  $n$  为层 ID) 发送不同功率的 TIER 帧, 其他节点根据接收到的帧的层 ID 而被分进不同的层。(2)汇集节点只发送一个能量等级为  $\alpha R$ 、层号为 1 的 TIER 帧, 接收到此帧的节点被划分为第一层节点, 接着第一层节点发送能量等级也为  $\alpha R$ 、层号为 2 的 TIER 帧, 接收到此帧的节点被划分为第二层, 依此类推完成路由发现的配置。

活动阶段的节点有两种状态: 监听状态和睡眠状态。监听状态和睡眠状态的切换由 AIMRP 的能量节省模型控制。当节点检测到一个事件或是必须从其它的节点转接数据时, 它就进入监听状态, 节点在发送数据之前先等待一个安全时间  $t_g$  来可靠地估计信道的空闲情况, 等待超时或是信道变为空闲后, 节点再等待一个随机监听时间  $t_l$  来确保没有其它的节点在同一时刻发送数据以免造成冲突。这两个等待时间过后, 节点发送一个 RTR 消息, 然后节点转入请求状态。如果这个 RTR 消息成功被低层的节点接收, 那么低层节点在响应源节点发送 CTR 消息之前等待一个随机的避退时间  $t_b$  进行信道监听来避免与其它潜在下一跳节点的冲突。如果源节点处于请求状态超过  $t_w$  时间, 并且没有被其它节点响应, 那么源节点将重发 RTR 消息直到被效应为止。在源节点与下一结点分别成功接收 CTR 与 RTR 消息之后, 一个 DATA 与 ACK 消息立即被交换。AIMRP 分别使用  $t_d$  和  $t_a$

来检测 DATA 消息与 ACK 消息的丢失。AIMRP 以这种方式来完成检测数据的上传，节点的状态转换图如图 3-3 所示。

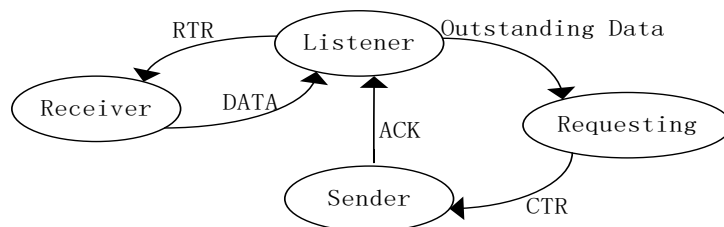


图 3-3 AIMRP 节点状态转换图

Fig. 3-3 Diagram of node state transition of AIMRP

### 3.3 AIMRP 的性能评价

AIMRP 在拓扑建立，特别是路由发现的算法机制上有极大的优势，它采用基于分层的路由算法，该算法易于实现和维护，能耗小。同时 AIMRP 在竞争接入方式可能引起死锁的问题上提出了一种相应的方案，该方案于 802.11 相似。

AIMRP 在信道接入控制、路由和 MAC 地址的配置与处理、数据的传递上是高效的，且算法简易可行。在针对事件检测与快速报告型应用的 WSN 网络应用中能达到很好的性能。但该协议仍有值得进一步完善的方面。

### 3.4 E-AIMRP 的提出

本章前部分分析了本文的研究基础 AIMRP 协议，它充分发挥了跨层设计的高效性，是典型的跨层 MAC 协议，在事件检测与快速报告型应用中能取得很好的性能。但针对中高速无线传感器网络应用的苛刻服务要求，该协议的设计在功能方面不是很适应，在性能方面，路由和 MAC 结合运行方面在效率上还有待进一步提高。本章就这些基本问题进行合理的研究，得到增强型的 AIMRP，即 E-AIMRP (Enhanced AIMRP) 协议。

深入分析 AIMRP 的功能和运行控制方式，发现有以下问题需要解决，以进一步增强或提高协议的功能和性能来适应要求苛刻的中高速型传感器网络应用：

(1) AIMRP 协议中存在多节点检测和报告而造成的能量浪费问题。

AIMRP 没有解决多个节点对同一事件进行多次报告而造成能量浪费的问题, 从而导致汇集节点能量过早耗完而使网络生命结束, 而现代的 WSN 应用中, 多个节点检测到同一事件的情况是经常有的。

(2) AIMRP 缺乏对动态拓扑的适应性。

对于节点的移除或加入, AIMRP 并不提供机制应对, 对于节点移除, 作者只是提出一种局部修复或全局重新配置的选择, 没有提出具体选择的策略。作者也没有进一步说明对于新加入的节点如何入网。

(3) AIMRP 没有给出自适应通信量突然激增的具体解决方案。

以上三点中, (1) 是影响 MAC 协议能量性能的重要因素, (2) 和 (3) 是 MAC 协议功能方面的不足。

针对这些问题, 本节基于 AIMRP 协议改进设计了一种增强型的 AIMRP, 即 E-AIMRP (Enhanced AIMRP)。

### 3.5 E-AIMRP 协议的设计及主要运行机制

E-AIMRP 针对中高速型无线传感器网络应用, 协议的设计与运行采用 MAC 与路由融合策略。能量节省模型采用第四章中设计的控制策略和算法。

#### 3.5.1 帧格式的设计和拓扑适应性的设计

为了解决多节点检测和报告而造成的能量浪费问题, 本节对数据帧格式进行了如下设计:

a) 在 RTR 帧中增加一个  $COUNT_R$  域, 使该帧能够在同路由层中传播一定距离, 避免同路由层的其它节点对同一事件的报告。

b) 在 RTR 帧中加入一个 Thre 域, 同时在每一个节点中增加一个全局的 ThreadValue 变量和一个 EventTime 变量, 只有当节点采集的数据和 ThreadValue 不同, 并且这次检测到事件的时间距上次检测到事件的时间之差比 EventTime 大时才对此事件进行报告, 这样就抑制了同一路由层相同事件的报告, 具体的协议运行见 3.5.3 节。设计的 RTR 帧如图 3-4 所示。

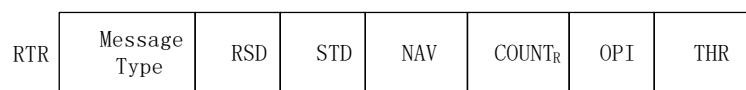


图 3-4 改进的 RTR 消息

Fig. 3-4 Improved RTR message of E-AIMRP

为了解决动态拓扑的适应性问题，对协议的改进如下：

增加对新加入节点的处理，对于新加入节点，让它等到下一个检测事件发生并汇报时才加入网络。对于节点的移除，采用局部修复办法，这些办法与 AODV<sup>[44]</sup>, DSDV<sup>[45]</sup>中的路由修复策略相似。

对于 E-AIMRP 的应用模型，拓扑改变不是经常的，不需要周期运行路由发现协议来修复路由；另外，兴趣区域的事件发生很频繁时，可以通过 *TheadValue* 变量和 *EventTime* 变量来控制信息量的大小，防止汇集节点过早死亡，但同时可以自适应地调整 *EventTime* 的值从而达到不减弱不同事件报告的及时性。因此，协议的设计是合理的。

### 3.5.2 设计随机空闲侦听和协议死锁避免策略

在提高节能效率方面，E-AIMRP 还作了进一步的增强改进，引入了 *Time Out* 机制，进一步限制了竞争期的空闲侦听时间和避免协议的死锁。

E-AIMRP 是基于随机接入机制，如果没有提供有效的措施的话，那协议就有死锁潜在危险。这里参考 802.11 的一些死锁避免机制来设计死锁避免机制，同时降低空闲侦听的时间，从而减少节点的能耗。

本文中，E-AIMRP 使用保护时间  $t_g$  和随机监听时间  $t_l$ ，使用方式于 820.11 相同。这里还引入 *TimeOut* 机制，分别使用  $t_w$ ， $t_d$  和  $t_a$  来决定 RTR，DATA 和 ACK 消息包的发送失败。最后基于虚拟载波监听策略使用 NAV 来预留数据通信的持续时间。与 802.11 相比，在 E-AIMRP 中的数据接收节点是没有预先确定的。因此，为了避免潜在的接收节点与自己的 CTR 消息冲突，需要一个随机的退让时间  $t_b$ 。同样，由于是使用随机标识 ID 作为 MAC 的地址（这些 ID 在每一次 CTR 和 RTR 的发送中都刷新），所以这个机制降低了最后转接节点选取

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。  
如要下载或阅读全文，请访问：

<https://d.book118.com/157031063036006060>