

分类号 TN915 密级

## 重庆邮电大学硕士学位论文

论文题目 传感器网络提供 QoS 保证的 MAC 协议研究

英文题目 Research on MAC Protocol with QoS in Wireless  
Sensor Networks

硕士研究生 罗莹

指导教师 陈前斌 教授

学科专业 通信与信息系统

论文提交日期 2007. 5. 15 论文答辩日期 2007. 6. 3

论文评阅人 李云 教授 重庆邮电大学

金纯 教授 重庆金瓯科技公司

答辩委员会主席 隆克平 教授 重庆邮电大学

2007 年 6 月 2 日

## 摘 要

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)是由具有计算、存储和无线通信能力的小型智能设备组成的分布式感知网络,其在军事、民用和工业生产等领域具有广阔的应用前景,被称为未来十大技术之一。目前,传统无线网络的协议理论不适合于无线传感器网络,针对无线传感器网络应用模型、协议及算法的研究成为当今研究的热点问题。

本文主要是对无线传感器网络的MAC协议进行研究。当前大多数MAC协议都是围绕减小能量消耗来设计的。随着研究的深入和业务的不断发展,不同应用对无线传感器网络服务质量(Quality of Service, QoS)提出了不同要求,因此,在无线传感器网络中提供有保证的差别服务,同时能在全网范围内实现资源充分有效地利用,成为学术界研究的新的热点问题。

本文首先介绍了国际上讨论众多的一种 Sensor-MAC(S-MAC), S-MAC 协议从三个方面进行了节能改进:周期性侦听和休眠、冲突和串音避免、消息传递。但是, S-MAC 没有为网络提供 QoS 保证。针对这个问题,本文提出了两种具有业务区分功能的 S-MAC 协议:利用竞争窗口进行业务区分的 S-MAC 协议和利用 DIFS 进行业务区分的 S-MAC 协议。其中,利用竞争窗口进行业务区分的 S-MAC 协议通过给不同优先级的节点分配不同大小的竞争窗口来引进业务区分;利用 DIFS 进行业务区分的 S-MAC 协议通过给不同优先级的节点分配不同大小的 DIFS 来引进业务区分。这两种协议提高了网络的 QoS 性能,不同优先级的节点可以得到不同的网络服务质量。

本文通过 NS 仿真对协议性能进行了分析,验证了利用竞争窗口进行业务区分的 S-MAC 协议和利用 DIFS 进行业务区分的 S-MAC 协议在吞吐量和延迟性能上都得到了较为明显的区分效果。

**关键词:** 无线传感器网络, MAC, 服务质量保证

## Abstract

Wireless Sensor Networks(WSNs) is a distributed sensing network which is composed of minitype intelligent devices with computation, storage and wireless communication capabilities. WSN has wide applications in military, civil and industry, named as one of the ten greatest technology future. At present, the protocols for the traditional wireless network are not fit for WSN. Application model, protocols and arithmetic for WSN become hotspot now.

We mainly do research in the MAC protocol of Wireless Sensor Networks. Most of MAC protocol focus on energy efficiency. With the develop of research and operation, different application need different QoS( Quality of Service),so it become the new hotspot to provide the guaranteed differentiation service, and fully and efficiently make use of resource throughout entire network.

In the dissertation we firstly study the S-MAC that has received broad discussion. S-MAC reduces energy consumption by three novel techniques: listen and sleep periodically, avoid collision and overhearing, message passing. Whereas, S-MAC don't support QoS for network. As for the problem, two enhancing S-MAC protocol combining with service differentiation was proposed: a S-MAC protocol with service differentiation using contend window(CW) and a S-MAC protocol with service differentiation using DIFS. The S-MAC protocol with service differentiation using contend window, provides service differentiation by distributing different size CW to nodes according to priority of nodes. The S-MAC protocol with service differentiation using DIFS, provides service differentiation by distributing different size DIFS to nodes according to priority of nodes. These two protocol enhance QoS performance of network. The nodes with different priority get different QoS.

In the dissertation, we analyze the deploy parameters by computer simulation tool NS, the result of simulation proved that, this two enhancing S-MAC protocol indeed get obvious differentiation effect in throughput and delay.

**Key words:** Wireless Sensor Networks, MAC, QoS

## 独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得重庆邮电大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名：罗董

签字日期：2007年6月2日

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解重庆邮电大学有关保留、使用学位论文的规定，有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权重庆邮电大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

（保密的学位论文在解密后适用本授权书）

学位论文作者签名：罗董

导师签名：罗成斌

签字日期：2007年6月2日

签字日期：2007年6月2日

## 第一章 绪论

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSNs)<sup>[1-4]</sup>是一种特殊的Ad Hoc网络,可应用于布线和电源供给困难的区域、人员不能到达的区域(如受到污染、环境不能被破坏或敌对区域)和一些临时场合(如发生自然灾害时,固定通信网络被破坏)等。它不需要固定网络支持,具有快速展开,抗毁性强等特点,可广泛应用于军事、工业、交通、环保等领域,引起了人们的广泛关注。

近年来,多媒体应用有着爆炸性的增长。人们希望在传感器网络中传送语音、视频这种实时性业务时,能够得到较好的服务品质(Quality of Service, QoS)保证。近年来,国外已有一些研究涉及到这一课题,主要从QoS体系结构、QoS路由、QoS信令以及支持业务区分和资源预留的MAC协议四方面展开研究,并取得了一定的进展<sup>[5]</sup>。

由上述可知,如何在传感器网络上提供QoS支持,是目前重要的研究方向之一,无论对于无线传感器网络的理论研究还是实际应用都具有重要意义。

### 1.1 无线传感器网络的发展历程

早在上世纪70年代,就出现了将传统传感器采用点对点传输、连接传感控制器而构成传感器网络雏形,我们把它归之为第一代传感器网络。随着相关学科的不断发展和进步,传感器网络同时还具有了获取多种信息信号的综合处理能力,并通过与传感控制器的相联,组成了有信息综合和处理能力的传感器网络,这是第二代传感器网络。而从上世纪末开始,现场总线技术开始应用于传感器网络,人们用其组建智能化传感器网络,大量多功能传感器被运用,并使用无线技术连接,无线传感器网络逐渐形成。

无线传感器网络是新一代的传感器网络,具有非常广泛的应用前景,其发展和应用,将会给人类的生活和生产的各个领域带来深远影响。发达国家如美国,非常重视无线传感器网络的发展,IEEE正在努力推进无线传感器网络的应用和发展,波士顿大学(Boston University)还于最近创办了传感器网络协会(Sensor Network Consortium),期望能促进传感器联网技术开发。除了波士顿大学,该协会还包括BP、霍尼韦尔(Honeywell)、Inetco Systems、Invensys、L-3 Communications、Millennial Net、Radianse、Sensicast Systems及Textron Systems。美国的《技术评论》杂志在论述未来新兴十大技术时,更是将无线传感器网络列为第一项未来新兴技术,《商业周刊》预测的未来四大新技术中,无

线传感器网络也列入其中。可以预计,无线传感器网络的广泛是一种必然趋势,它的出现将会给人类社会带来极大的变革。

无线传感器网络综合了传感器技术、嵌入式计算技术、现代网络及无线通信技术、分布式信息处理技术等,无线传感器网络应用前景广阔,在军事国防、工业、农业、城市管理、生物医疗、环境监测、抢险救灾、危险区域远程控制等许多重要的领域都有很大的实用价值,已经受到国际上越来越多的关注,被认为是21世纪具有巨大影响力的技术之一。

## 1.2 无线传感器网络的特点

目前常见的无线网络包括移动通信网、无线局域网、蓝牙网络、Ad hoc网络等,与这些网络相比,无线传感器网络具有以下特点:

(1)硬件资源有限。节点由于受价格、体积和功耗的限制,其计算能力、程序空间和内存空间比普通的计算机功能要弱<sup>[6][7]</sup>很多。这一点决定了在节点操作系统设计中,协议层次不能太复杂。

(2)电源容量有限。网络节点由电池供电,电池的容量一般不是很大。其特殊的应用领域决定了在使用过程中,不能给电池充电或更换电池,一旦电池能量用完,这个节点也就失去了作用(死亡)。因此在传感器网络设计过程中,任何技术和协议的使用都要以节能为前提,牺牲其它参数性能以达到最大化网络生存时间<sup>[8]</sup>。

(3)无中心。无线传感器网络中没有严格的控制中心<sup>[9]</sup>,所有结点地位平等,是一个对等式网络。结点可以随时加入或离开网络,任何结点的故障不会影响整个网络的运行,具有很强的抗毁性。

(4)自组织<sup>[10]</sup>。网络的布设和展开无需依赖于任何预设的网络设施,节点通过分层协议和分布式算法协调各自的行为,节点开机后就可以快速、自动地组成一个独立的网络。

(5)多跳路由<sup>[11][13]</sup>。网络中节点通信距离有限,一般在几百米范围内,节点只能与它的邻居直接通信。如果希望与其射频覆盖范围之外的节点进行通信,则需要通过中间节点进行路由。固定网络的多跳路由使用网关和路由器来实现,而无线传感器网络中的多跳路由是由普通网络节点完成的,没有专门的路由设备。这样每个节点既可以是信息的发起者,也是信息的转发者。

(6)动态拓扑。无线传感器网络是一个动态的网络,节点可以随处移动;一个节点可能会因为电池能量耗尽或其他故障,退出网络运行;一个节点也可能由于工作的需要而被添加到网络中。这些都会使网络的拓扑结构随时发生变化,因此网络应该具有动态拓扑组织功能<sup>[14][15]</sup>。

(7)节点数量众多,分布密集。为了对一个区域执行监测任务,往往有成千上万传感器节点空投到该区域。传感器节点分布非常密集,利用节点之间高度连接性来保证系统的容错性和抗毁性<sup>[16][17]</sup>。

### 1.3 无线传感器网络的关键技术

无线传感器网络作为当今信息领域新的研究热点,涉及多学科交叉的研究领域,有非常多的关键技术有待发现和研究,下面仅列出部分关键技术。

#### (1) MAC协议

传感器网络的MAC协议首先要考虑节省能源和可扩展性,其次才考虑公平性、利用率和实时性等。在MAC层的能量浪费主要表现在空闲侦听、接收不必要数据和碰撞重传等。为了减少能量的消耗,MAC协议通常采用“侦听/睡眠”交替的无线信道侦听机制,传感器节点在需要收发数据时才侦听无线信道,没有数据需要收发时就尽量进入睡眠状态。近期提出了S-MAC、T-MAC和B-MAC等MAC协议。但是随着多媒体应用的快速发展,人们对网络的QoS提出了更高的要求。

#### (2) 路由协议

从拓扑结构的角度,无线传感器网络中的路由协议可分为平面和层次两类。两类协议都采用多跳形式在源节点和汇聚点(sink)节点之间建立连接。Ad Hoc网络中已有的多跳路由协议,如AODV (Ad-hoc demand distance vector)<sup>[18]</sup>和TORA(temporally ordered routing algorithm)<sup>[19]</sup>等,一般都不适合传感器网络的特点和要求。传感器中的大部分节点不像Ad Hoc网络中的节点一样快速移动,因此没有必要花费很大的代价频繁地更新路由表信息。平面路由协议主要有: Flooding<sup>[20]</sup>, SPIN (sensor protocol for information via negotiation)<sup>[21]</sup>, SAR (sequential assignment routing)<sup>[22]</sup>, DD(directed diffusion)<sup>[23,24]</sup>。层次路由协议主要: LEACH (low energy adaptive clustering hierarchy)<sup>[25]</sup>, TEEN (threshold sensitive energy efficient sensor network protocol)<sup>[26]</sup>, PEGAGIS (power-efficient gathering in sensor information system)<sup>[27]</sup>, 多层聚类算法<sup>[28]</sup>等。

#### (3) 网络安全

为了保证任务的机密布置和任务执行结果的安全传递和融合,无线传感器网络需要实现一些最基本的安全机制: 机密性、点到点的消息认证、完整性鉴别、新鲜性、认证广播和安全管理。除此之外,为了确保数据融合后数据源信息的保留,水印技术也成为无线传感器网络安全的研究内容。

#### (4) 网络拓扑控制<sup>[29,30]</sup>

对于无线的自组织的传感器网络而言,网络拓扑控制具有特别重要的意义。

通过拓扑控制自动生成的良好的网络拓扑结构,能够提高路由协议和MAC协议的效率,可为数据融合、时间同步和目标定位等很多方面奠定基础,有利于节省节点的能量来延长网络的生存期。所以,拓扑控制是无线传感器网络研究的核心技术之一。

传感器网络拓扑控制目前主要的研究问题是在满足网络覆盖度和连通度的前提下,通过功率控制和骨干网节点选择,剔除节点之间不必要的无线连通链路,生成一个高效的数据转发的网络拓扑结构。

#### (5) 定位机制与算法

定位是大多数应用,特别是军事应用的基础。传感器网络中的定位机制与算法包括两部分:节点自身定位和外部目标定位,前者是后者的基础。在节点自身定位方面,DARPA支持一些有军事应用背景的项目,如DSN(dynamic sensor network)和SCADDS(scalable coordination architecture for deeply distributed and dynamic system)等,大多采用GPS(global positioning system)技术。对于一些定位精度要求不高的项目,则应用了LPS(local positioning system)。

#### (6) 其他

操作系统技术<sup>[31]</sup>是无线传感器网络的支撑技术之一,它必须充分考虑无线传感器系统的独特性,高效地组织和管理硬件资源,为应用软件提供服务,满足不同传感器网络应用在功能和性能方面的特殊需求。

覆盖问题是无线传感器网络的一个基本问题,它描述了网络对物理世界的感知状况,反映了网络所能提供的“感知质量”。

时间同步是需要协同工作的传感器网络的一个关键机制。RBS、TINY/MINI-SYNC和TPSN被认为是三个基本的同步机制。

## 1.4 无线传感器网络的应用

### 1) 军事应用

传感器网络具有可快速部署、可自组织、隐蔽性强和高容错性的特点,因此非常适合在军事上应用。利用传感器网络能够实现对敌军兵力和装备的监控、战场的实时监视、目标的定位、战场评估、核攻击和生物化学攻击的监测和搜索功能<sup>[32]</sup>。

通过飞机或炮弹直接将传感器节点播撒到敌方阵地内部,或者在公共隔离带部署传感器网络,就能够非常隐蔽而且近距离准确地收集战场信息,迅速获取有利于作战的信息。传感器网络是由大量的随机分布的节点组成的,即使一部分传感器节点被敌方破坏,剩下的节点依然能够自组织地形成网络。传感器网络可以通过分析采集到的数据,得到十分准确的目标定位,从而为火控和制导系统提供



精确的制导。利用生物和化学传感器,可以准确地探测到生化武器的成分,及时提供情报信息,有利于正确防范和实施有效的反击。

## 2) 环境观测和预报系统

随着人们对于环境的日益关注,环境科学所涉及的范围越来越广泛。传感器网络在环境研究方面可用于监视农作物灌溉情况、土壤空气情况、牲畜和家禽的环境状况和大面积的地表监测等,可用于行星监测、气象和地理研究、洪水监测<sup>[33]</sup>等,还可以通过跟踪鸟类、小型动物和昆虫进行种群复杂度的研究等。

传感器网络还有一个重要应用就是生态多样性的描述,能够进行动物栖息地生态监测。美国加州大学伯克利分校 Intel 实验室和大西洋学院联合在大鸭岛上部署了一个多层次的传感器网络系统,用来监测岛上海燕的生活习性。

## 3) 建设及城市管理

各种无线传感器可以灵活方便地布置于建筑物内,获取室内环境参数,从而为居室环境控制和危险报警提供依据。

智能家居:通过布置于房间内的温度、湿度、光照、空气成分等无线传感器,感知居室不同部分的微观情况,从而对空调、门窗以及其它家电进行自动控制,提供给人们智能、舒适的居住环境。

建筑安全:通过布置于建筑物内的图像、声音、气体检测、温度、压力、辐射等传感器,发现异常事件及时报警,自动启动应急措施。

智能交通:通过布置于道路上的速度、识别传感器,监测交通流量等信息,为出行者提供信息服务,发现违章交通车辆时能及时报警和记录。

## 4) 医疗护理

无线传感器网络在医疗系统和健康护理方面的应用<sup>[34]</sup>包括监测人体的各种生理数据,跟踪和监控医院内医生和患者的行动,医院的药物管理等。如果在住院病人身上安装特殊用途的传感器节点,如心率和血压监测设备,医生利用传感器网络就可以随时了解被监护病人的病情,发现异常能够迅速抢救。将传感器节点按药品种类分别放置,计算机系统即可帮助辨认所开的药品,从而减少病人用错药的可能性。还可以利用传感器网络长时间地收集人体的生理数据,这些数据对了解人体活动机理和研制新药品都是非常有用的。

## 5) 其他方面的应用

无线传感器网络还被应用于其他一些领域<sup>[35]</sup>。比如一些危险的工业环境如矿井、核电厂等,工作人员可以通过它来实施安全监测。也可以用在交通领域作为车辆监控的有力工具。此外和还可以在工业自动化生产线等诸多领域,英特尔正在对工厂中的一个无线网络进行测试,该网络由40台机器上的210个传感器组成,这样组成的监控系统将可以大大改善工厂的运作条件。它可以大幅降低检查设备

的成本,同时由于可以提前发现问题,因此将能够缩短停机时间,提高效率,并延长设备的使用时间。其他方面,例如:

路桥结构的自动检测和监测:无损伤自动检测和监测,路桥负载监测,路桥微量移动的监控,路桥质量随时间的变化及地震对路桥结构影响的自动监测。

环境空气质量和食品质量监测:对环境空气进行局域测量,分析,为城市规划提供分析数据。

建筑物和居家智能化:供热,通风,空调,室内空气质量的控制,照明和智能能源管理系统,。

工业自动化和过程控制生产过程的传感器网络监控系统。

复杂环境下的无线传感报警系统交通管理。各种商业化用途:物流管理,自动读表网络系统,车辆停泊场自动管理等。

## 1.5 论文结构

本文共分六章,各章的内容安排如下:

第一章介绍了无线传感器网络的发展和研究现状,分析了无线传感器网络的所面临的问题。

第二章介绍了无线传感器网络的各种 MAC 协议,并着重介绍了 S-MAC 协议。

第三章介绍了无线传感器网络现有的 QoS 机制。

第四章提出了一种利用竞争窗口引进业务区分的 S-MAC 协议,并用 NS 仿真软件对其性能进行了验证。

第五章提出了一种利用帧间间隔 DIFS 引进业务区分的 S-MAC 协议,并用 NS 仿真软件对其性能进行了验证。

第六章总结了本文所做工作,并探讨了进一步的研究方向。

## 第二章 无线传感器网络中的 MAC 协议

在无线传感器网络中, 介质访问控制 (medium access control, MAC) [36-40] 协议决定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机构。MAC 协议处于传感器网络协议的底层部分, 对传感器网络的性能有较大影响, 是保证无线传感器网络高效通信的关键网络协议之一。

### 2.1 无线传感器网络 MAC 层设计的问题与挑战

传统的 MAC 层协议的设计目标是最大化吞吐量、最小化时延并且提供公平性。而为 WSNs 设计的 MAC 层协议关注的是最小化能耗, 这就决定了它要适度地减小吞吐量和增加时延。由于 WSNs 的节点总是协作完成某应用任务, 所以公平性通常不是主要问题。另外, WSNs 的一些典型应用 (如战场目标跟踪) 也对其 MAC 层协议的设计提出了不同于传统无线网络的要求。

无线传感器网络 MAC 层设计面临的一些主要问题归纳如下:

#### ► 能量受限

WSNs 的基本特征就是能量受限。MAC 层协议要尽可能地节约能源, 如减少冲突和串音、降低占空比和尽量避免长距离通信。协议中还应包括折衷机制, 使用户可以在节能和提高吞吐量、降低延迟之间做出选择<sup>[41]</sup>。另外, 协议设计者应该注意能量不是随时可用的。因为节点可能处于休眠状态或者由于不可知的原因死亡。

#### ► 实时性

WSNs 经常被应用于军事、医疗等对实时性要求很高的领域, 及时地检测、处理和传递信息是其不可缺少的要求。MAC 层应和其它层合作提供实时保证。

#### ► 分布式算法

由于 WSNs 的节点计算能力和存储能力受限, 需要众多节点协同完成某应用任务, 所以 MAC 层协议应该运行分布式的算法。这也是有效避免某些节点的死亡造成网络瘫痪的需要。

#### ► 灵活性

WSNs 针对不同的应用显示出了不同的网络特性, MAC 层协议应该能适应不同应用的各种流量模式。

#### ► 各性能间的平衡

MAC 层协议的设计需要在各种性能间取得平衡。各性能间的平衡往往比单

个性能的表现更重要。因为一个不平衡的协议即使在实验室表现好，也可能在实际环境中表现很差。比如，一个协议如果太频繁地关闭无线收发装置来节能，不仅使实时性和可靠性受到影响，包丢失引起的重传也会反过来影响节能的效果。

## 2.2 无线传感器网络 MAC 协议分类

目前，无线传感器网络的MAC协议大致分为三类：基于竞争的MAC协议、非竞争的MAC协议和基于跨层设计的MAC协议。

### 2.2.1 基于竞争的 MAC 协议

基于竞争 MAC 协议是网络基础结构和接入点并没有很好定义的分布式传感器结构的主要选择。大多数基于竞争协议遵循 CSMA 操作模式，结合握手信号和退避机制来减少冲突可能性。然而，能量保存技术不同。一些集中在因为冲突造成的能量浪费，建议智能功率控制来减少干扰的水平，不同数据和控制流信道的使用等等。其他工作通过减少无线电电路花费在空闲模式的时间来开发能力节省。这里讨论这些机制最基本的思想。

PAMAS: Power Aware Medium Access protocol and Signaling ( PAMAS )<sup>[42]</sup> 是一个基于 CSMA 协议，不传输或不接收的节点应该自己关闭。这个方法需要节点为控制和数据使用两个不同信道。使用控制信道为握手过程，使用数据信道为正常的传输。使用两种信道最小化冲突的潜在可能性。只有当节点的邻居并不接收或发送时，节点才侦听数据信道并回复连接请求。没能建立一个到连接的发送者进入睡眠模式并稍后重试。节点在睡眠模式的持续时间基于在邻近的节点间控制信道上特殊探测信息的交换。把没能参加通信的节点进入睡眠模式，这种方式能够节省 70% 的能量。然而协议需要节点为传输侦听信道和并不完全消除冲突。另外，协议要求节点有两个分离的信道(控制和数据)，要求每个节点有两个无线电增加了传感器设计的成本，大小和复杂度。

DPSM: 由 Jung 和 Vaidya 建议的 Dynamic Power Saving Mechanism<sup>[43]</sup> 提高了 IEEE 802.11 MAC 协议的能量消耗。IEEE 802.11 标准的一个媒体仲裁模式是分布式协作功能，节点竞争建立连接。时间被分为信标间隔；每个以固定的时间窗口开始，其中节点宣称任何等待传输到节点的分组。没有传输或发送的节点可以进入一个低功耗休眠模式。DPSM 方法进一步增加节点花费在休眠状态的时间，通过根据节点储备动态决定窗口大小和在以前的间隔中接收活动。假定同步时钟，节点交换它们活动窗口的大小这样发送者就不会不可预知的等待

一个休眠的接收者。另外, DPSM 方法进一步的限定转换到睡眠模式的有效性, 通过保证在休眠和活跃状态之间的转换并不准备消耗比在睡眠模式下得到的节省能量更多的能量。DPSM 的主要思想是在稠密布置的大型网络中它的可升级性。另外, 所有节点时钟同步并不适合 CSMA 协议的本质。

**S-MAC协议:** S-MAC<sup>[44]</sup>(sensor MAC)协议是在IEEE 802.11MAC协议基础上提出的, 它将时间分帧, 帧长度由应用程序确定。帧内分为工作阶段和休眠阶段, 在2002年版本中, 工作阶段持续时间是固定的, 2004年版本为了更好地支持数据突发, 协议将工作阶段改为长度可调。在休眠阶段, 节点关闭射频模块, 缓存这期间采集到的数据, 在工作阶段集中发送。在工作阶段的开始, 节点发送同步消息, 之后通过RTS / CTS / DATA / ACK机制发送数据, 避免冲突造成的能量浪费(通过同步消息, 相邻节点可以采用相同的工作 / 休眠策略, 新节点也可以加入进来, 这种机制在协议中称为虚拟簇。S-MAC协议采用消息传递(message passing)技术, 很好地支持长消息发送(对于无线信道, 传输差错与包长度成正比, 短包成功传输的概率要大于长包)消息传递技术根据这一原理, 将长消息分为若干短包, 采用一次RTS / CTS握手, 集中连续发送全部短包, 既可以提高发送成功率, 又有效地减少了控制开销。该协议的扩展性较好, 可以适应网络拓扑结构的变化; 缺点是协议实现非常复杂, 需要占用大量的存储空间, 这在资源受限的传感器节点中显得尤为突出。

**T-MAC<sup>[45]</sup>协议:** T-MAC是在S-MAC协议基础上提出了一个自适应工作循环周期。T-MAC协议与S-MAC的区别是: S-MAC协议中节点活动与睡眠的时间是固定的, 而T-MAC协议中节点睡眠与活动时间是随通信流量动态变化的。T-MAC协议中定义了5种事件和一个记时器TA(time active), 据此决定工作阶段的结束时间。T-MAC协议根据通信流量采用动态变化的占空比, 它比S-MAC协议更节省了节点的能量, 更加延长了网络的寿命, 但由于它积极的进入睡眠状态, 使它经常过早的进入睡眠状态, 从而相比S-MAC协议更加降低了网络吞吐量, 增加了网络的延时。

总之, 基于竞争的 MAC 协议具有良好的扩展性, 节点发送数据时竞争使用信道, 并通知接收节点及时处于接收状态。节点处于睡眠状态可能造成通信的暂时中断, 增大消息延时, 所以在节省节点能量和增大消息延时之间需要权衡。

## 2.2.2 固定分配类 MAC 层协议

原有的固定分配类 MAC 层协议主要有频分多址接入(FDMA)、时分多址(TDMA)、码分多址(CDMA)三种。

FDMA 是将频带分成多个信道,不同节点可以同时使用不同的信道。TDMA 是将一个时间段内的整个频带分给一个节点使用。相对于 FDMA, TDMA 通信时间较短,但网络时间同步的开销增加。CDMA 是固定分配方式和随机分配方式的结合,具有零信道接入时延、带宽利用率高合统计复用型号的特定,并能降低隐藏终端问题的影响,它具有基于竞争的协议所没有的无冲突或者控制分组开销的特点,但是没有基于竞争协议那样的可扩展性。其完全集中式的信道分配和基站的高复杂性,使其不适用于全分布的 WSNs 中。针对 WSNs 特点,本部分将介绍以下几种基于固定分配类的 MAC 方案。

SMACS (Self-Organizing Medium Access Control for Sensor Networks)协议<sup>[46]</sup>是分布式协议,无需任何全局或者局部主节点,就能发现邻节点并建立传输/接收调度表。链路又随机选择的时隙和固定的频率组成。虽然各子网内邻节点通信需要时间同步,但全网并不需要同步。在链接阶段使用一个随机唤醒机制,在空闲时关掉无线收发装置,来达到节能的目的。EAR(Eavesdrop-And-Register)算法<sup>[53]</sup>用来为静止和移动的节点提供不间断的服务。SMACS 的缺点是从属于不同子网的节点可能永远得不到通信的机会。EAR 算法作为 SMACS 的补充,但 EAR 算法只适合于那些整体上保持静止,且个别移动节点周围有多个静止节点的网络。

TDM-FDM 协议是一个时分复用 TDMA 和频分复用 FDMA 的混合方案<sup>[47]</sup>。在节点上维护着一个特殊的结构帧,类似于 TDMA 中的时隙分配表,节点据此调度它与相邻节点间的通信。FDMA 技术提供的多信道,使多个节点之间可以同时通信,有效的避免了冲突。由于预先定义的信道和时隙分配方案限制了对空闲时隙的有效利用,使得在业务量较小时信道利用率较低。

DE-MAC (Distributed Energy-aware MAC)<sup>[48]</sup>的中心内容是让节点交换能级信息。它执行一个本地选举程序来选择能量最低的节点为“winner”,使得这个“winner”比其邻居节点具有更多的睡眠时间,以此在节点间的平衡能量,延长网络的生命周期。且这个选举程序与 TDMA 时隙分配集成到一起,从而不影响系统的吞吐量。DE-MAC 用选举包和无线收发装置的能量状态包来交换能量信息,节点由能量信息来决定占有传输时隙的数量。各节点为每个邻节点维持一个表明其无线收发装置能量状态的变量,此信息用来设定其接收器接收邻居的包。当一节点比原来的“winner”能量值较低时,它进入选举阶段。处于选举阶段的节点向所有临节点发送它的当前能量值,并收集它们的投票。如果邻节点的能值都彼此节点高,它将收到的所有邻节点的正选票。此节点占有当前时隙,或者发送数据,或者进入睡眠。协议的缺点是传感器节点只在自己占有时隙且无传输时才能进入睡眠。而在其邻节点占有的时隙里,就算没有数据传

输, 它也必须醒着。

TRAMA (Traffic-Adaptive Medium Access)<sup>[49]</sup>用两种技术来节能: 一种是用基于流量的传输调度表来避免可能在接受者发生的数据包冲突; 另一种是节点在无接收要求时进入低能耗模式。TRAMA 将时间分成时隙传输, 以此来达到一定的吞吐量和公平性。仿真显示, 由于节点可以最多睡眠 87%, 所以 TRAMA 节能效果明显。在与基于竞争类的协议比较时, TRAMA 也达到了更高的吞吐量(比 S-MAC 和 CSMA 高 40%左右, 比 802.11 高 20%左右), 因为它有效的避免了隐藏终端引起的竞争, 但 TRAMA 的延迟较长, 更适用于对延迟要求不高的应用。

### 2.2.3 基于跨层设计的 MAC 协议

跨层设计通过层与层之间的信息交换来满足全局需要。跨层设计的目标是使网络一方面足够灵活, 以支持多种应用; 同时又能够随时进行自适应调节, 来满足特定应用的要求。跨层设计的优点是: 基于层与层之间的信息共享提高了各层的适应性, 使整个网络的性能得到了提高。在满足能量受限情况下, 满足应用的高吞吐量、低延时等要求。

信道自适应能量管理协议CAME<sup>[50]</sup>(Channel adaptive energy management)是一种结合物理层和MAC层设计的跨层协议。在该协议中, 每个节点具有信令信道和数据信道, 簇头通过信令信道发送周期脉冲, 簇头节点根据收到的脉冲判断当前信道质量以及数据信道是否空闲, 簇中节点分为监测信道、休眠传输以及回避状态, 由于休眠状态节点耗能很少, 而节点处于监测状态是仅工作于能耗较少的信令信道, 从而可以节约大量能量。节点有数据需要发送时, 首先根据信令信道监测无线链路的信道质量, 当信道空闲且信道质量优于门限时, 节点发送数据并且节点可以根据信道的质量不同, 在物理层采用不同的调制方式, 以提高信道的利用率。节点发送完数据后, 进入休眠状态, 直至有数据需要发送时才进入监测信道状态, 准备发送数据。在CAME协议中, 数据只在链路质量好的时候发送, 故其可以减少数据传送和接收的时间, 从而节省了能量, 数据在链路质量不好的时候, 会把数据保存在数据缓存中, 这样会增加数据包的延时和数据包溢出丢失。此协议最大的缺点就是, 有些节点如果一直处于链路质量不好的状态, 它将一直没有工作机会, 导致节点利用率的极度不公平。

CUMPE(cluster management and power efficient protocol)<sup>[51]</sup>是一种结合MAC层和路由层的协议。在路由层该协议用选择性防洪算法传播消息, 并用贪婪算法选择到簇头消耗能量最小的路径。在MAC层该协议采用TDMA机制找出路由树中最重要的路径并且在不增加路径的条件下, 调度节点发送消息。CI 协议主要

由四个阶段完成:

- (1) 选择上游能量消耗最少的节点作为簇头;
- (2) 选择单跳路径传输数据代替远程传输;
- (3) 找出簇树结构中的关键路径, 即是簇树结构中最长的路径;
- (4) 按照TDMA机制, 每个节点向上流邻居节点发送数据。

CUMPE协议可以有效的节省能量, 并且网络延时性能较好, 但信道利用率不高。

## 2.2.4 总结

无线传感器网络是一种应用极为广泛的新兴网络。本章针对几种典型的MAC协议进行了分析、比较, 可以看到目前MAC协议的研究还不完善, 主要存在的问题是: 网络动态特性对信道策略的不良影响以及在一定程度上节省了能量的同时, 降低了带宽利用率和增加了通信时延。如果单独的考虑MAC层来设计的话, 以上问题的解决不是很理想, 我们如果将其它层的设计渗透到MAC层中, 采用跨层设计, 就可以最大限度的利用无线网络的资源。

## 2.3 S-MAC

本节介绍 Sensor-MAC(S-MAC), 为无线传感器网络设计的新的 MAC 协议。此 MAC 协议的主要目标就是减少能量消耗, 同时支持好的可扩展性的冲突避免。S-MAC 试着从以前确认的造成能量浪费的原因, 例如, 空闲侦听, 冲突, 串音和控制开销等方面来减少能量消耗。为了获得设计目标, 本文建议了 S-MAC 协议, 包含三个主要部分: 周期性侦听和休眠, 冲突和串音避免, message passing。在讨论它们以前本文首先讨论对无线传感器网络及其应用的假设。

### 2.3.1 周期性侦听和休眠

在许多传感器网络应用中, 如果没有感应事件发生, 节点很长时间都是处于空闲状态。协议通过让节点进入周期性休眠模式来减少侦听时间。例如, 如果在每秒钟节点休眠半秒, 在另半秒监测, 它的占空因数 (duty cycle) 会减少到 50%。所以协议可以节省很多的能量。

#### A. 基本机制



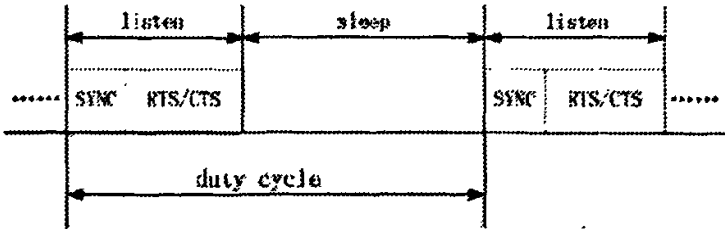


图 2.1 周期性休眠和侦听

S-MAC 协议的基本机制如图 2.1 所示。每个节点在一些时间内休眠，如果其他节点想要和它通信然后他会醒过来并侦听。在休眠中，节点关闭它的无线电，并设置一个定时器以便自我唤醒。

侦听和休眠的持续时间可以根据不同应用场景来选择。为了简单对所有节点这些值可以相同。

S-MAC 机制要求在邻居节点间周期性同步来修复它们的时钟漂移。使用了两种方法来使它对同步错误健壮。首先，所有交换的时间标记都是相对的，不是绝对的。第二，侦听周期要比时钟错误或漂移长很多。例如，0.5 秒的侦听持续时间要比典型的时钟漂移比率大 10 的 5 次方倍。相对于非常短的时隙的 TDMA 机制来说，S-MAC 机制在邻居节点间要求非常宽松的同步。

所有的节点自由的选择它们自己的侦听/休眠调度。然而，为了减少控制花费，本文选择让邻居节点一起同步。这就是说，它们同时侦听同时休眠。应该注意，在一个多跳网络中并不是所有的邻居节点都可以一起同步。图 2.2 中，两个邻居节点 A 和 B 也许有不同的调度，它们每个轮流和不同相对应的节点，C 和 D，同步。



图 2.2 邻居节点 A 和 B 有不同的调度，它们分别和节点 C 和 D 同步

节点是通过广播调度到它的紧靠邻居节点来交换它们的调度。这就保证所有邻居节点可以相互通信，即使它们有不同的调度。例如，在图 2.2 中，如果节点 A 想要和 B 通话，它会等待一直到 B 侦听。如果多个邻居节点想要和一个节点通话，他们就需要竞争媒介。竞争机制和 IEEE802.11 中一样，也就是，使用 RTS (Request To Send) 和 CTS (Clear To Send) 包。首先发出 RTS 包的节点赢得媒介，接收者会回复一个 CTS 分组。在它们开始数据传输后，它们就不会进入周期性休眠，一直到完成传输。

**B. 选择和维持调度**

在每个节点开始周期性侦听和休眠以前，它需要选择一个调度并和它的邻居节点交换。每个节点维持一个调度表，储存它所有邻居节点的调度信息。

第一种情况就是，在网络启动阶段，所有的节点并没有调度。它们按照下面的步骤来选择自己的调度并建立它们的调度表：

1. 节点首先侦听一段时间。如果它并没有听到从其它节点来的调度，它随机的选择一个时间休眠并立即广播它的调度信息：我要在  $t$  秒钟后休眠。称这样的节点为同步节点 (synchronizer)。
2. 如果一个节点在它选择自己的调度以前，收到了来自一个邻居节点的调度信息，它就遵循这个邻居节点的调度，也就是，把它自己的调度设置为相同的。称这样的节点为追随者 (follower)。它然后等待一个随机的延迟（为冲突避免）并广播它的调度。
3. 如果一个节点在它选择自己的调度后受到邻居节点的调度，它就采用这两种调度（也就是说，在它自己和邻居节点的工作时期都将唤醒自己）。它在休眠以前广播它自己的调度。

由于某些节点之间可能会发生广播冲突，因此可能有一些邻居节点并没有相互发现。它们也许会在随后的周期性侦听中相互发现。

现在来讨论一个新的节点如何加入现有的邻居。首先，新节点也许会需要侦听相对长的时间，一直到发现一个活跃的节点。然后新节点发送一个 INTRO 分组到这个发现的邻居节点，来表明它的存在。在收到 INTRO 分组后，邻居会给新节点通过转发它的调度表来回复。新节点会把表上所有节点看作潜在邻居，并会在后面尝试着和这些节点联系。如果新节点可以发现一个同步节点，它会试着跟随这个同步节点。否则它需要自己选择一个侦听调度并随后更新它的邻居节点。

另一方面，当一个发送者和接收者完成传输，它们不会立即进入休眠。而是继续侦听直到下个休眠时间到来。这样就给新节点一个机会来介绍自己。

### C. 维持同步

侦听/休眠机制要求邻居节点间同步。尽管长的侦听时间可以容许相当长的时钟漂移，邻居节点仍然需要周期性的相互更新它们的调度来预防长时间时钟漂移。更新周期可以相当长。对实验平台节点的测量值表明可以是好几十秒。

更新调度通过发送 SYNC 分组完成。SYNC 分组非常短，包含发送者的节点 ID 和它下个休眠的时间。下个休眠时间和发送者完成传输 SYNC 分组时刻有关（大约当接收者收到分组时）。接收者在收到 SYNC 分组后将迅速调整计时器的计数。

每个同步节点需要周期性发送 SYNC 分组到它的追随节点。如果追随节点有邻居节点含有不同的调度，它也需要更新这个邻居节点。追随节点不需要去更新任何含有和它相同调度的邻居节点。

为了让节点收到 SYNC 分组和数据分组，本文把侦听间隔分为两部分，第一部分是为接收 SYNC 分组，第二部分是为接收 RTS 分组，如图 2.3 所示。

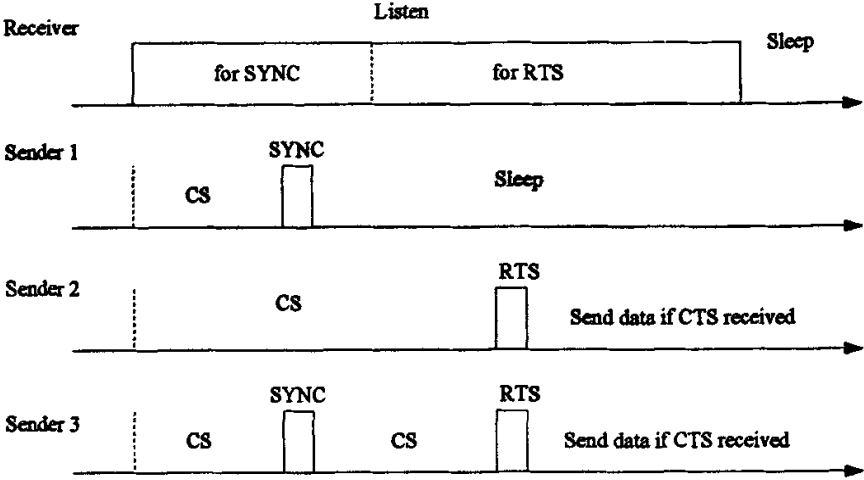


图 2.3 接收者和不同发送者的时间关系

图 2.3 也表明了一个发送者到一个接收者的三个可能情况的定时选择。CS 代表载波侦听。在图中，发送者 1 只发送一个 SYNC 分组，发送者 2 只想发送数据。发送者 3 发送一个 SYNC 分组和一个 RTS 分组。

2.3.2 冲突和串音避免

A. 冲突避免

因为多发送者可能想同时发送到一个接收者，它们就需要竞争媒介。在基于竞争协议中，IEEE 802.11 对冲突避免做了很好的工作。本协议遵循相同的步骤，包括物理和虚拟载波侦听(carrier sense)和 RTS/CTS 交换。本文采用 RTS/CTS 机制来解决隐藏终端问题。

所有发送者在初始化传输以前执行载波侦听。如果一个节点没有得到媒介，它会进入休眠，当接收者空闲并重新开始侦听时醒过来。发送广播分组并不需要使用 RTS/CTS。单播分组跟随发送者和接收者之间的 RTS/CTS/DATA/ACK 分组序列。

在每个传输分组有一个持续时间域，指出剩余传输会有多长时间。所以如果一个节点接收到一个去往其他节点的分组，它会知道自己还需要保持多长时间的沉默。节点在一个称为网络分配矢量(NAV)的变量中报告这个值并给它设置一个定时器。每次当 NAV 定时器计时，节点减少 NAV 值直至 0。当节点有数据要传输，它会首先看一个 NAV 的值。如果它的值不是 0，节点测定媒介是

忙的。这称为虚拟载波传输。如果虚拟和物理载波侦听都指出媒介是空闲的，媒介被认定为空闲。

### B. 串音避免

在 IEEE 802.11 中每个节点保持对从邻居节点来的传输的监听。作为结果，每个节点偷听到许多本不是发送给它自己的分组。这就造成能量很大的浪费，尤其当节点密度很大并且传输负载很重时。

本协议试着通过让干扰节点收到 RTS/CTS 分组以后进入睡眠来避免串音。现在来看当有一个活动的传输要进行时哪个节点应该进入睡眠。如图 2.4 所示的节点 A, B, C, D, E, F 形成一个每个节点只能听到传自与它直接相连的邻居节点的传输的多跳网络。假设节点 A 现在正传输一个数据包到节点 B。我们知道，冲突是发生在接收端的。节点 D 应该进入睡眠，因为它的传输干扰了 B 的接收。很容易就知道节点 E 和 F 并不产生干扰，因此它们不需要进入睡眠。而节点 C 距离 B 有两跳远，它的传输并不干扰 B 的接收，所以它可以自由的传输到它其他的邻居节点 E。然而，C 不能够得到 E 的回复，例如，CTS 或数据，因为 E 的传输和 A 的传输在节点 C 处产生冲突。所以 C 的传输仅仅是能量的浪费。因此，所有发送者和接收者的直接邻居节点在它们听到 RTS 或 CTS 分组之后都应该进入睡眠，一直到现有的传输结束。

每个节点维持 NAV，来指出它邻居节点的活动。当一个节点接收到指向其他节点的包，它通过分组中的持续时间域来更新它的 NAV 值。非零的 NAV 值表明在它的邻居节点里有一个活跃的传输。当 NAV 定时器计时，NAV 值每次都会减少。这样如果一个节点的 NAV 值不为 0 它就应该进入睡眠来避免串音。当它的 NAV 值变为 0 时它就可以醒来。

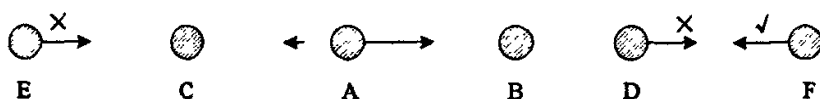


图 2.4 当节点 A 向 B 传输时各节点间的关系

### 2.3.3 Message Passing

这个子章节说明如何在能量和反应时间方面高效传输一个长信息。信息是有意义的，相关的数据单元。它可以是长系列的分组或短分组，通常接收者需要在实现网内数据处理或融合前获得全部的数据单元。

把一个长信息作为一个短信息来传输的缺点是如果在第一次传输时只是几个字节损坏的话再重传的高成本。然而，如果把长信息分成许多独立的小分组，

就不得不付出大的控制花费和更长的延迟。这也是因为每个独立的包在竞争中都要使用 RTS 和 CTS 分组。

S-MAC 的方法是把长信息分割为许多小的片断,然后传输它们。只使用一个 RTS 分组和一个 CTS 分组。它们预约媒介,为传输所有的片断。每次传输一个数据片断,发送者等待接收者送来的 ACK。如果没有能够接收到 ACK,它将会为更多的分组扩展保留的传输时间,并迅速重传现有的片断。

如前,所有的包都有持续时间域,现在是传输所有剩余数据片断和 ACK 分组所需的时间。如果临近节点听到一个 RTS 或 CTS 分组,它将会睡眠传输所有分组片段所需要的时间。

在每个数据片断后使用 ACK 的目的是预防隐藏终端问题。在传输过程中间一个邻居节点醒来或新节点加入都是可能的。如果节点只是接收者的邻居而不是发送者的,它就不会听到发送者正传输的数据片断。如果接收者并没有频繁的发送 ACK,新节点也许会错误的从它的载波侦听中推断媒介是空闲的。如果它开始传输,现有传输将会在接收者处被损坏。

每个数据片断和 ACK 分组都有持续时间域。这样,如果中间有节点醒来或者新节点加入,它可以适当的进入睡眠,不管它自己是不是发送者或接收者的邻居。

值得说明一下 IEEE 802.11 也有片断支持(fragmentation support)。本文应该指出这个机制和本文中的 message passing 的区别。

在 IEEE 802.11 中,RTS 和 CTS 只为第一个数据片断预约媒介。第一个片断和 ACK 然后为第二个片断和 ACK 预约媒介,等等。所以对每个临近节点,在它接收一个片断或 ACK 后,它知道会有更多片断要发送。所以它只能保持监听直到所有的片断被发送。再次,对能量受限节点,所有邻居的串音浪费大量能量。

IEEE 802.11 这样做的原因是提升公平性。如果发送者对任何片断没能够得到 ACK,它就必须放弃传输并重新竞争媒介。所以其他节点就有机会传输。如果接收者真的需要整个信息来开始处理的话这就造成延迟。对比来说, message passing 竞争传输时间并重新传输现有片断。这样它就有较少的竞争和一个小的反应时间。在传输过程中接收者失效或断开连接的情况下,对每个信息可以造成多少竞争应该有一个限制。然而,对传感器网络,应用层公平性是目标,相对立的时节点的公平性。

以上对 S-MAC 协议的细节作了详细的介绍和说明。可以看出, S-MAC 是一种良好的节能的无线传感器网络 MAC 协议。从三个方面节省了能量,提高了网络生存周期。

但是, 我们需要看到的是, 对于周期性的侦听和休眠, S-MAC 的帧结构是固定的, 这样一来, 当网络的业务量发生变化时, 协议的自适应能力就不好, 尤其对于某些实时性要求较高的场合, 协议不能满足应用的要求。而在现实生活和实际应用中, 业务量通常是不停的改变的, 突发性很强。针对这个特点, 研究无线传感器网络协议的自适应性, 成为了另一个重点。

## 2.4 小结

本章介绍了多种无线传感器网络 MAC 协议, 并着重介绍了 S-MAC 协议的实现细节。

S-MAC 协议以减少能耗为主要目标, 牺牲了节点间的公平性和延迟。同时也有很好的可扩展性和冲突避免能力。S-MAC 使用三个新的技术来减少能量消耗和支持自组织。为减少监听空闲信道的能量消耗, 节点周期性的睡眠。邻居节点形成虚拟簇在睡眠调度上自同步。受 PAMAS 的启发, S-MAC 在其他节点传输过程中设置无线电装置为睡眠, 不过 S-MAC 只使用带内信号。最后, S-MAC 对在数据移动过程中需要储存和转送处理的传感器网络应用, 使用 `message passing` 来减少竞争反应时间。协议本质上是用使用的能量来换取吞吐量和反应时间。吞吐量减少是因为只有帧的活跃部分用于通信。反应时间增加是因为物理事件也许会在睡眠时间内发生。那样的话, 消息会排队一直到下个活跃时间的到来。

S-MAC 协议在节省能耗方面效果显著, 但是它没有提供 QoS 支持, 当网络提出更高的 QoS 要求时, S-MAC 就不再适用, 这显然需要提出解决的办法。

## 第三章 无线传感器网络的 QoS 机制

现有无线传感器网络研究大都假定基于单一的“尽力而为”(best effort)数据传输服务模型。该模型下,各类业务平等竞争网络资源,网络拥塞时,业务被不加区分地丢弃,因而不利于服务质量要求高的业务传输。随着研究和应用的深入,不同业务对QoS提出了不同的要求,包括有保证的强QoS服务(guaranteed hard QoS)和有差别的软QoS服务(differentiated soft QoS)等。例如,在军用监控传感器网络中,对空气放射物质浓度的周期性测量,检测结果要求传输可靠,分组丢失率尽可能低;而在事件驱动的敌方目标识别和跟踪中,实时数据(语音或视频)的传输则对延迟非常敏感。因此,可提供不同业务服务质量并有效利用全网资源的无线传感器网络QoS机制正显示出广阔应用前景,受到越来越多的关注,与传统数据通信网络相比,无线传感器网络在网络自身和应用需求上有明显特点,其QoS研究也面临许多新的挑战。国内外对该领域的研究才刚刚起步,有价值成果相对较少。本章首先通过介绍无线传感器网络及其应用的特点,分析网络QoS的需求,并与传统数据通信网络的QoS研究进行比较。然后,分析无线传感器网络实施QoS面临的挑战。接着,总结该领域的现有工作进展。最后,讨论可能的一些研究方向。

### 3.1 QoS 需求分析

QoS定义系统的非功能化特征,代表用户和服务间有关信息传递质量的约定,是网络业务性能的总体效果。服务是网络提供给用户的业务。服务质量有两层含义:从用户来看,它是用户对网络提供服务的满意程度;从服务来看,它是网络向用户所提供业务的参数指标。无线传感器网络具有面向应用、以数据为中心的特点。因此,对其QoS的需求分析可从用户对应的应用层面和服务对应的网络层面来考虑。

#### 3.1.1 应用需求

无线传感器网络由大量随机部署在监控区域的传感节点组成,节点通过对目标热、红外、声纳、雷达或地震波等信号的感知来获取诸如温度、体积、位置或速度等目标属性,网络核心目标是协作地感知、采集和处理网络覆盖区域内目标对象的信息或事件,并返回给相应的查询用户。它可广泛用于工业生产制造、环

境监测、安全反恐和国防军事等领域。尽管无线传感器网络在不同应用环境下的具体功能要求不同,但仍可抽取并定义其基础功能,包括:1)给定区域中目标对象的属性值测定;2)感兴趣事件的检测和相关参数估计;3)对目标对象的分类和识别;4)对目标对象的定位和跟踪。因此,可定义网络感知覆盖率(sensing coverage)、事件检测成功率、目标分类识别成功率和目标定位误差等指标作为应用层QoS的度量。

### 3.1.2 网络需求

在网络层面,可从数据分发模式来分析。无线传感器网络主要有查询驱动、事件驱动和连续传递<sup>[52]</sup>3种模式。查询驱动模式也可称为拉(pull)模式,由观测节点发起,匹配该查询的传感节点将感知数据发往观测节点,属于一对多通信。该模式常用于交互式场景,对数据传输强调及时性和可靠性。事件驱动模式也称为推(push)模式,由传感节点发起,发现感兴趣事件后立即向观测节点报告,属于多对一通信。该模式常用于事件检测场景,对数据传输同样强调及时性和可靠性,数据流量具有突发性,易拥塞,且节点数据存在高度冗余。连续传递模式也称周期传输模式,由双方约定,传感节点周期性向观测节点报告 sensed 数据,属于多对多通信。该模式常用于预定义速率的数据报告场景,若传输数据是实时数据,如语音、图像或视频等,则关注传输延迟和带宽,若是非实时数据,如温度、湿度或气压等,则关注可靠性。可靠性和实时性仍然是传感器网络的主要性能评价指标。但从3种数据分发模式来看,节点间基于非端到端(none end. to. end)数据传输,数据大量冗余,在传输过程中往往需采用聚合(aggregation)或融合的方法。因此,统计QoS(probability QoS)度量更能反映网络数据传输特点,如可定义一定融合率下分组丢包率、延迟或传输带宽的随机分布等。在某些特例下,也会存在端到端的数据传输,比如监控摄像头的实时图像信息传输。因此,传统QoS度量的延迟、丢包率、带宽和数据吞吐量也可作为补充。

### 3.1.3 与传统网络 QoS 研究的比较

传统网络QoS研究主要面向日益增长的多媒体业务对端到端数据传输的质量需求,常用度量为时延、时延抖动、丢包率和带宽等。在Internet上, IETF提出了以集成服务(IntServ)和区分服务(DifServ)为核心的端到端IP QoS框架<sup>[53,54]</sup>。前者基于资源预留协议RSVP,可为实时业务提供端到端的绝对服务质量保证,但可扩展性较差,实现复杂。后者将数据流分类,根据不同服务级别协定SLA对其实施调度和管理。有基础设施支持的移动网络通过基站或中心节点进行集中



QoS控制和管理,如蜂窝移动通信网。移动无线自组网(Mobile Ad hoc Network, MANET)拓扑经常变化,带宽较窄,能量和内存非常受限,其QoS目标也是提供有质量保证的多媒体业务,但需要解决的问题和复杂度大大增加,目前已经在支持QoS的信道接入协议、网络路由以及节点拥塞控制和管理等方面取得较多成果<sup>[5]</sup>。无线传感器网络与MANET最为接近,都是节点可移动且资源受限的多跳无线传输网,但两者在QoS需求上仍有明显区别:前者在应用上主要面向事件监控和属I生测量等业务,在网络上主要为非端到端数据流,多媒体流量较少。因此,传统QoS需求及其度量对无线传感器网络并不充分,相关保障机制也不能被直接移植。

### 3.2 面临的问题

无线传感器网络QoS机制的设计和实施不仅需解决传统网络QoS已经面临的问题,如度量选择NPC问题的求解、多业务并存节点状态信息存储与实时更新等,还须考虑网络特有的节点部署、资源限制和数据分发模式等问题,可归纳如下:

1)资源严重受限。传感器网络节点数量众多,受成本和体积限制,其节点资源受到严重限制,包括能量、带宽、内存和处理器性能等。其中,节点能量是影响网络节点失效和生存期的主要因素。因此,降低QoS机制能耗是首要问题之一。另外,资源受限也决定了算法须简单有效。

2)以数据为中心、非端到端的通信模式。传感器网络面向事件监控和属性测量,观测节点不关心数据来源的节点地址标识,往往是基于查询属性匹配的节点集一起进行数据传输。因此,传统端到端的QoS度量和保障机制难以直接应用,需要加以扩展或设计新的QoS体系。

3)数据高度冗余,流量非均匀分布。传感器网络中感知数据高度冗余,虽然提高了网络的可靠性,但会占用更多的网络资源,能耗也相当严重。数据融合是常用手段,但会引入传输延迟,使QoS度量选择更加复杂,增加了算法设计和实现的难度。另外,流量非均匀分布会造成网络能耗不平衡,严重制约网络生存期的提高,因此QoS机制还应该考虑支持能耗均衡。

4)节点密集分布的无线多跳传输。无线多跳传输存在大量背景噪音和干扰,信道质量不稳定,使得QoS分析、保障和管理更加复杂。

5)多用户、多任务的并发操作,多类别数据流量。网络可能存在多个观测节点,可并发进行多个查询任务。网络节点的配备可能不同,导致数据流量类别不一致。

6)可扩展性。传感器网络节点数量众多,规模不等,QoS机制应该具有自适应能力。

### 3.3 研究现状

QoS研究从内容上看,包括度量选择、保障机制和综合集成技术等方面。从实施层面看,网络协议栈各层都有相应解决方案,包括QoS模型、QoS MAC协议、QoS路由、信令机制和动态自适应机制等方面<sup>[56]</sup>。传感器网络QoS相关研究才刚刚起步,各方面都不充分,已有研究主要集中在网络层QoS路由和数据传输可靠性保证等方面。

#### 3.3.1 网络路由

有序分配路由(sequential assignment routing, SAR)<sup>[57]</sup>是第一个面向传感器网络提供QoS保证的网络层协议。SAR基于树结构形成多条从源节点到达观测节点的路径,由源节点根据路径评价和数据分组包优先级确定传输路径。它的优点是结合路径能耗和数据分组包优先级来评估QoS度量,但它要求保存到达观测节点的路径信息,对节点要求较高。

能量感知QoS路由EQR(energy-aware QoS routing, EQR)<sup>[58]</sup>通过评估链路代价,扩展Dijkstra算法,为节点找到符合QoS需求的最小代价路径。链路代价模型定义为:

$$\text{cost}_y = c_0 \cdot (D_y)^i + c_1 \cdot f(\text{energy}) + c_2 \cdot f(e_y) \quad (1)$$

其中,第一项为通信代价,如传输能量消耗,与距离的指数成比例;第二项为接收节点可用能量;第三项是链路误码率,反映链路质量状态。为同时支持“尽力而为”和实时业务,EQR引入分类排队模型,节点配有两个分类队列和一个调度器,如图1所示。节点首先检查到达数据分组包的类型并将其放到相应队列中,观测节点计算所有可选路径的延迟,根据QoS需求确定带宽比例 $r$ 取值,调度器则根据带宽比例参数 $r$ 决定等待分组的传输次序。EQR可为实时业务提供一定QoS保证,也可避免因实时业务流量剧增而严重影响非实时通信的吞吐量。

SAR和EQR都采用了集中式路由策略,源节点或观测节点需要保留全网状态信息,包括网络拓扑和路径代价等等,虽然简化了中继节点的算法实现,但在大规模网络部署环境下,协议开销和性能都会迅速恶化。

SPEED<sup>[59]</sup>协议基于无状态非确定地理转发(stateless non-deterministic geographic forwarding, SNGF)机制提供软实时(soft real-time)的端到端路由能力,它采用周期性触发和门限触发两种机制,通过邻居节点间信息交换获得邻居节点地理信息和负载状况,优先选择负载较轻且性能较好的邻居节点作为下一

跳。

SPEED采用分布式路由策略,由多个节点协同完成路径建立过程,每个节点仅需确认下一跳,具有较好的可扩展性。

文[60,61]面向“尽力而为”和“实时”两类基本业务,基于定向扩散协议提出了一种组合利用路径节点最小能量和最小跳数信息的分布式QoS路由算法。该算法利用节点最小能量和到观测节点跳数建立两类梯度,采用优先级调度法作为多约束路由策略,可实现能量均衡使用,大大提高网络生存期。基于网络分层模型,Robert等研究了在传感节点与观测节点间多种数据传输模式下满足QoS的路径选择问题<sup>[62]</sup>。

### 3.4 其它

传感器网络是以数据为中心的,不少研究结合能量有效利用策略,把保证传输可靠性作为首要度量,主要思想是按数据敏感程度(criticality of data)建立优先级,对各类别数据流量分配不同的网络资源和实施调度策略,缺陷是都基于端到端数据传输模式。文[63]基于非端到端传输模式,利用拥塞控制来协调可靠性和能耗,提出了一种可靠传输策略ESRT。以上方法大都仅考虑可靠性度量,从QoS研究来看还不够。Felemban等则综合考虑不同流量的实时性和可靠性两方面需求,提出一种多径多速路由算法MMSPEED,它采用分布式路由策略,可较好地实现服务区分,并提供统计QoS保证。Lu等提出支持实时数据传输的传感器网络通信体系RAP,包括:应用层基于地理位置属性和定时器来实现事件的登记和查询,传输层的位置标识协议LAP,网络层的地理位置路由协议,以及速度单调调度策略VMS和支持优先级的MAC协议。Bhatnagar等则试图通过扩展DiffServ模型在传感器网络中对不同流量类别进行优先级调度。另外,文[64]把空间分辨率(spatial resolution)作为QoS度量,结合节能策略,在网络参数选择、QoS策略以及静态和动态QoS性能比较等方面进行了研究。

### 3.5 总结与研究展望

无线传感器网络在网络自身和应用需求上有明显特点,其QoS研究也面临许多新的挑战。实时性、可靠性和资源利用有效性是其QoS机制研究的3个基本设计目标。同时,还需满足算法实现简单有效和可扩展的要求。QoS度量定义、非端到端数据传输模式和节点资源限制则是无线传感器网络QoS研究的主要难点。通过对目前已有QoS方法的分析,主要存在以下几个问题:

1) 基于端到端数据传输的QoS研究不符合传感器网络特点。传统网络主要采用以节点为中心的通信模式,而传感器网络主要以数据为中心,主要是非端到端流量。在QoS度量上,传统的延迟、抖动和吞吐量等指标也无法体现传感器网络的应用特点。因此,基于端到端的QoS技术对于传感器网络来说应该是不充分的。

2) 仅考察个别评价指标,不能全面反映传感器网络的QoS需求。SAR和EQR仅考虑端到端的延迟以及能耗,忽略了数据传输的可靠性;另外一些研究则主要考虑端到端传输的可靠性,没考虑其他QoS参数,这些显然都不够。

3) 缺乏合理QoS框架。现有研究大都在网络路由或数据传输层面来考虑QoS,缺乏整体框架思路,虽然也提出了一些适合传感器网络的MAC层协议,但主要考虑能耗情况,如SMAC。随着传感器网络研究和应用的快速发展,QoS正日益受到人们的关注。以上问题的解决对建立适应网络特点的QoS框架,满足业务对服务质量的不同要求和提高网络资源利用率至关重要。因此,传感器网络QoS机制可在以下几个方面进一步深入研究:

1) 建立QoS度量和 service 类型体系。以数据为中心、面向应用的传感器网络以非端到端数据传输为主,需体现一对多、多对一或多对多的通信模式。因此,结合网络特点和应用需求建立QoS度量和 service 类型体系是建立和实施QoS框架的基础工作。

2) 实时性、可靠性和资源利用率间的自适应平衡机制。传感器网络高度冗余的数据可提高数据传输的可靠性,但会消耗过多的资源,如能量或存储空间。数据融合可有效减少数据冗余并节省能量,但又会增加传输延迟。通过理论分析或者仿真实验寻找一种最优的自适应平衡机制非常重要。

3) 交叉层(cross-layer)优化技术。无线链路在衰落、干扰和噪声等因素作用下信道质量的波动,能量控制策略下节点工作状态的转变,节点增减或移动带来的网络拓扑变化,都需要把物理层的信号质量及时通知MAC层,MAC层也需要及时和网络层、传输层以及应用层进行信息交互。传统分层体系体现了“开放”和“互联”,但在面向应用且资源受限的传感器网络中并不是最佳的。考虑网络各层间的相关性实施基于交叉层优化的QoS机制,最大限度利用有限资源,并在效率、开销、可靠性和可扩展方面求得平衡非常有意义。

4) QoS机制应与节点活动性调度结合。节点活动性调度是节约网络能耗,延长网络生存期的有效办法。已有研究大都以数据传输可靠性为QoS度量。因此,选择综合QoS度量并结合节点调度和路由机制为应用提供QoS保证值得深入研究。

5) 基于中间件的主动QoS机制。主动QoS机制建立在应用和网络协商的基础上,可对应用和网络,如应用质量、网络结构或路由等,进行主动调节与干预。中间件能实现应用与网络间的翻译和控制,支持两者协商新的服务质量。传感器

网络的中间件技术已有相关研究，但更多集中在中间件问题本身，未上升到QoS支持层面。因此，研究如何基于中间件实施主动QoS机制值得关注。

## 第四章 利用竞争窗口进行业务区分的 S-MAC 协议

### 4.1 原理介绍

由于 S-MAC 协议采用固定竞争窗口大小的机制，发送不同类型数据的节点只能获得相同的信道接入概率，从而无法保证网络 QoS 性能的问题，下面我们就介绍一种具有业务区分功能的 S-MAC 协议，提高网络的 QoS 性能。

在这种具有业务区分功能的 S-MAC 协议中，沿用了 S-MAC 协议中的周期性侦听和休眠机制，冲突和串音避免机制以及消息传递机制，并对 S-MAC 协议引进了业务区分功能，对固定大小竞争窗口机制进行了改进。

在具有业务区分功能的 S-MAC 协议中，我们对网络中所有的业务类型分为三类，对不同的业务类型赋予不同的优先级。节点接收到数据分组之后，首先对分组进行处理，从中取出表示优先级的数据变量，把这个数据变量赋值给变量  $p$ 。比如业务类型为视频，给节点分配优先级 1，用  $p=1$  来表示；如果业务类型为语音，给节点分配优先级 2，用  $p=2$  来表示；如果业务类型为数据，给节点分配优先级 3，用  $p=3$  来表示。各节点得到自己的优先级之后，根据  $p$  的数值设置竞争窗口大小，当  $p=1$  时，节点的竞争窗口设为  $w_1$ ；当  $p=2$  时，节点的竞争窗口设为  $w_2$ ，当  $p=3$  时，节点的竞争窗口设为  $w_3$ ，这样不同 QoS 要求的业务就得到了不同大小的竞争窗口。具体的算法实现如下：

```
If  $p=1$ 
{
     $W=w_1$ ;
}
Else if  $p=2$ 
{
     $W=w_2$ ;
}
Else if  $p=3$ 
{
     $W=w_3$ ;
}
```

由算法可知，节点的优先级不同得到的竞争窗口大小不同。由图 2 所示，节点 1 的优先级高于节点 2 的优先级，所以节点 1 的竞争窗口  $w_1$  小于节点 2 的

竞争窗口  $w_2$ 。两个节点都在时刻 0 进入竞争窗口竞争信道，节点 1 在  $[0, w_1-1]$  的范围内任意选择一个时隙，节点 2 在  $[0, w_2-1]$  的范围内任意选择一个时隙，节点根据各自所选时隙的位置设置一个退避计时器，退避计时器的值就是所选时隙的序号。由于时隙是均匀分布的，节点 1 选择某一时隙的概率为  $1/w_1$ ，节点 2 选择某一时隙的概率为  $1/w_2$ ，而  $w_1 < w_2$ ，所以节点 1 所选时隙落在  $[0, w_1-1]$  范围内的概率要大于节点 2 所选时隙落在  $[0, w_1-1]$  范围内的概率，也就是说，节点 1 获得序号较小时隙的概率要大于节点 2。假定节点 1 选中时隙序号小于节点 2，则节点 1 退避计时器的值也小于节点 2，然后节点一边侦听信道，一边对退避计时器倒计时，显然节点 1 的退避计时器最先减小到零，它检测到信道是空闲的，则节点 1 竞争到信道，开始发送数据，此时节点 2 检测到信道处于忙态，就停止倒计时，等待下一个周期。

这样高优先级的节点得到位置靠前时隙的几率增大，所以相同时间内高优先级节点访问信道的机会较大，业务得到的带宽就比较大，从而保证高优先级的业务吞吐量。

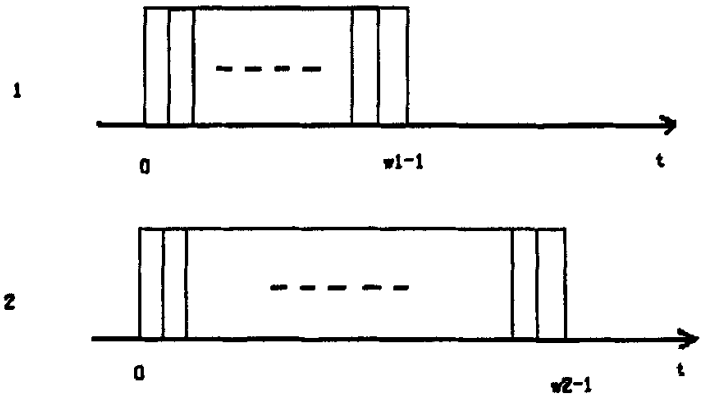


图 4.1 退避机制图

## 4.2 性能分析

### 4.2.1 仿真平台说明

本文采用 NS2 仿真工具对给出的 MAC 机制进行仿真分析。NS2 是一个面向对象的、由离散事件驱动的网络仿真工具，主要用于局域网和广域网的仿真。

针对网络仿真，NS2 已经预先做了大量的模型化工作，NS2 对网络系统中

一些通用的实体已经进行了建模,例如链路、队列、分组、节点等,并用对象来实现了这些实体的特性和功能,这些被称为 NS2 的构件库。相对于一般的离散事件仿真工具来说,NS2 的优势就在于它有非常丰富的构件库,而且这些对象易于组合,易于扩展。用户可以充分利用这些已有的对象,进行少量的扩展,组合出所要研究的网络系统的模型,然后进行仿真。这样就大大减轻了进行网络模拟研究的工作量,提高了效率。NS2 的构件库所支持的网络类型包括广域网、局域网、移动通信网、卫星通信网等,所支持的路由方式包括层次路由、动态路由、多播路由等。NS2 还提供了跟踪和检测的对象,可以把网络系统中的状态和事件记录下来以便分析。另外,NS2 的构件库中还提供了大量的数学方面的支持,包括随机数产生、随机变量、积分等等。

NS2 的构件库是使用两种面向对象的语言: C++和 OTcl (Tcl script language with Object-oriented extensions) 编写的。OTcl 是 Tcl 的面向对象的扩展。Tcl 的全称是 Toolkit command language,它是一种灵活的、交互式的脚本语言,OTcl 则是在 Tcl 中加入了类、实例、继承等面向对象的概念。NS2 中的构件通常都作为一个 C++类来实现,同时有一个 OTcl 类与之对应。用户通过编写 OTcl 脚本来对这些对象进行配置、组合,描述仿真过程,最后调用 NS 完成仿真。事实上,NS2 对外的表现就是一个 OTcl 编译器(interpreter)。和一般编译器的不同在于,NS2 中预先定义了一些命令和面向网络模拟的类。

NS2 中的构件一般都是由相互关联的两个类来实现的,一个在 C++中,一个在 OTcl 中。这种方式被称为分裂对象模型。构件的主要功能通常在 C++中实现,OTcl 中的类则主要提供 C++对象面向用户的接口,用户可以通过 OTcl 来访问对应的 C++对象的成员变量和函数。

NS2 使用这种分裂对象模型,是处于兼顾模拟性能和灵活性两方面的考虑。一方面,C++是高效的编译执行语言,使用 C++实现功能的模拟,可使模拟过程的执行获得较好的性能。另一方面,OTcl 是编译执行的,用 OTcl 进行模拟配置,可以在不必要重新编译的情况下随意修改仿真过程和仿真参数,提高了仿真的效率。同时这种分裂对象模型增强了构件库的可扩展性和可组合性,用户通常只需要编写 OTcl 脚本就可以把一些构件组合起来,成为一个宏对象。这种分类对象模型也起到了抽象化的作用,它对用户屏蔽了功能实现的细节。使用和通过 OTcl 进行模拟配置,很多情况下只需要了解构件的使用和配制接口就可以了,而不需要了解这些构件的功能是如何实现的。

NS2 中所体现的这些先进的设计思想使得 NS2 成为了一种广泛使用的网络仿真工具。同时 NS2 是免费使用的,源代码是开放的。这使得利用 NS2 进行网络仿真的研究人员可以很方便的扩展 NS2 的功能,也可以很方便的共享和交



流彼此的研究成果。NS2 吸纳了这些 NS2 开发者贡献的各方面的模块，从而使它的构件库不断的丰富，这正是一个好的网络仿真器的生命力之所在。

进行仿真前首先要分析仿真涉及哪个层次，NS2 仿真分两个层次：一个是基于 OTcl 编程的层次，即利用 NS2 已有的网络元素实现仿真，无需对 NS2 本身进行任何修改，只要编写 OTcl 脚本；另一个层次是基于 C++ 和 OTcl 编程的层次，如果 NS2 中没有所需的网络元素，就需要首先对 NS2 扩展，添加你所需要的网络元素。这就需要利用前面多提到的分裂对象模型，添加新的 C++ 类和 OTcl 类，然后在编写 OTcl 脚本。本文即采用了第二种形式，即通过对 NS2 进行扩展对提出的新机制进行仿真分析。

## 4.2.2 网络配置

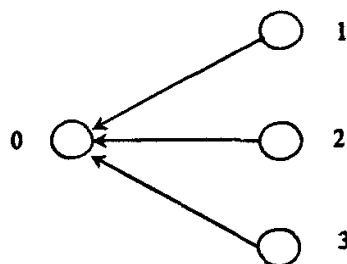


图 4.2: 4 个节点的拓扑结构

图 4.2 所示为一个无线传感器网络的拓扑图，由于传感器网络是不需要移动的网络，因此这是一个静态拓扑。其中节点 0 为 sink 节点，节点 1、2、3 为传感器节点。节点 1、2、3 同时有数据向节点 0 发送，三个节点发出的数据类型是不同的，节点 1 发出的是视频类型，节点 2 发出的是语音类型，节点 3 发出的是数据类型，根据结合业务区分的 S-MAC 协议，节点 1 的优先级最高，节点 3 的优先级最低。

我们在 NS-2 仿真软件下进行模拟，模拟的基本参数为：模拟时间 1000s，cbr 流的每次发送间隔 0.5s，每个 cbr 包为 512 字节，采用 DSR 路由协议，信道类型为无线信道，天线为单向天线。

## 4.2.3 仿真结果及分析

### ► 吞吐量仿真分析

表 1 是两种协议在整个模拟时间内的平均吞吐量的一个对比：

表 1：两种协议的平均吞吐量对比表

	1	2	3
S-MAC 的吞吐量（字节/秒）	118.750000	102.840909	105.954545
具有业务区分的 S-MAC 的吞吐量（字节/秒）	176.136364	89.204545	57.954545

从表1可以看出，在S-MAC协议下，节点1、2、3没有优先级差别的情况下，3个节点的吞吐量差别不大，从而证明了S-MAC协议固定竞争窗口大小的机制不能保证网络的QoS要求。而在具有业务区分功能的S-MAC下，区分效果很明显，高优先级的吞吐量就高，低优先级的吞吐量就低，而且可以看出，高优先级节点吞吐量的提高是以牺牲低优先级节点为代价的，然而，低优先级的是数据业务，降低吞吐量只是造成发送接收时间变长，对QoS没有影响，但是对于高优先级的节点却可以获得更好的QoS性能，从而保证了业务的实时性。

图 4.3 和图 4.4 是两种协议的平均吞吐量模拟图，仿真以 40 秒为一个步长，画出随时间变化每一个步长内的平均吞吐量曲线图：

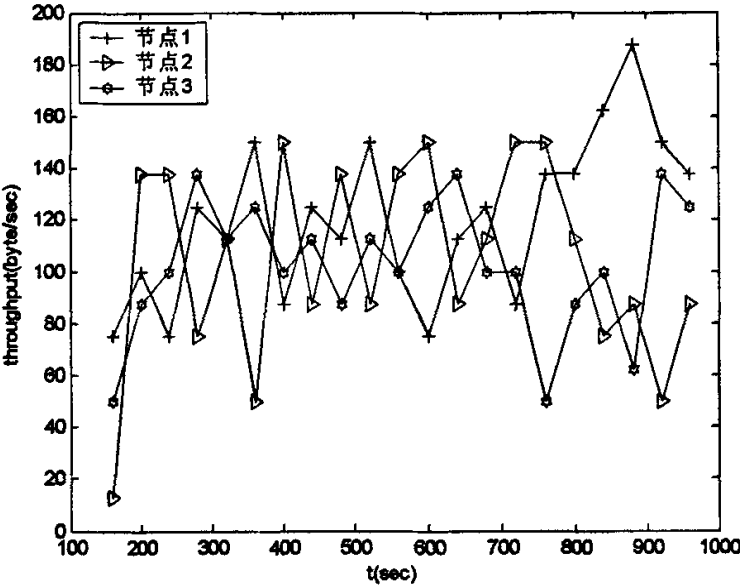


图 4.3：S-MAC 的平均吞吐量

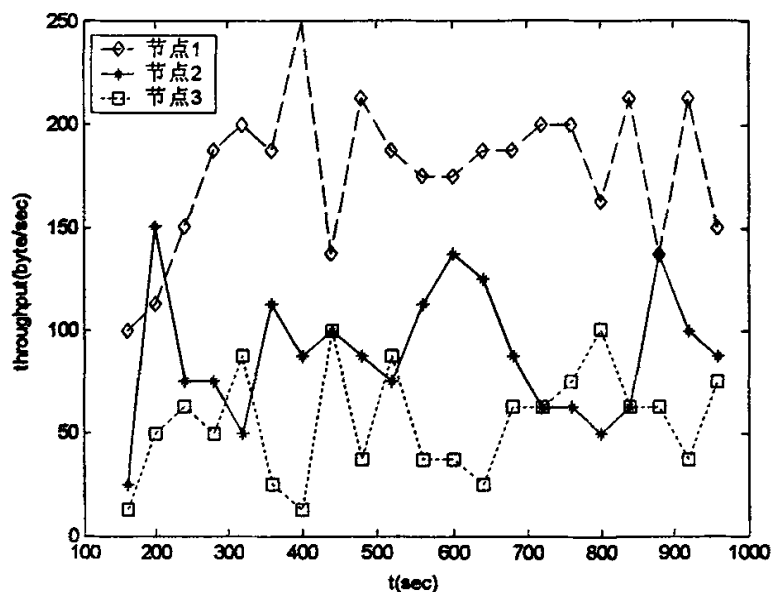


图 4.4: 利用竞争窗口进行业务区分的 S-MAC 协议的平均吞吐量

图4.3是S-MAC协议下的平均吞吐量模拟图，图中清晰的显示，3个节点的平均吞吐量相差不大，波动范围大致相同。图4.4是具有业务区分功能的S-MAC协议的平均吞吐量模拟图，从图中可以看出，3个节点的平均吞吐量已经根据其优先级大大拉开了距离，优先级最高的节点1的平均吞吐量远远大于优先级最低的节点3，区分效果明显，从而验证了我们所提出的结论。

#### ➤ 延迟仿真分析

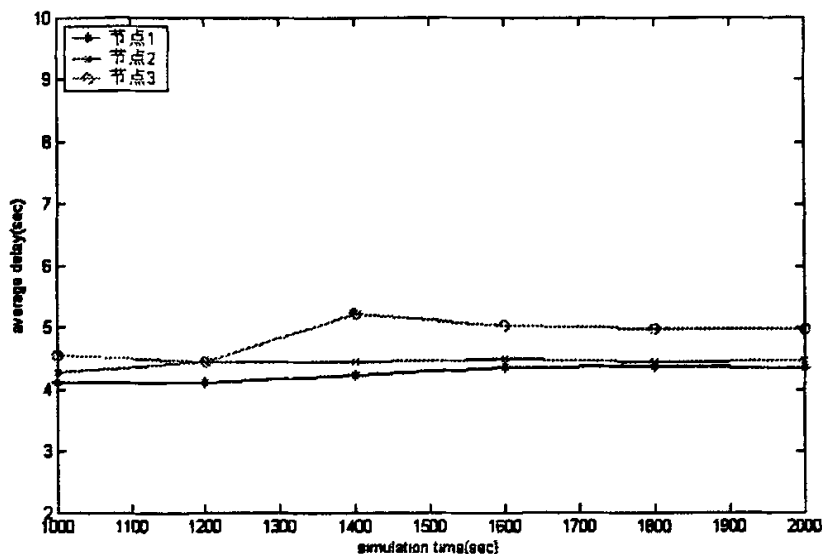


图4.5 S-MAC协议的平均竞争延迟

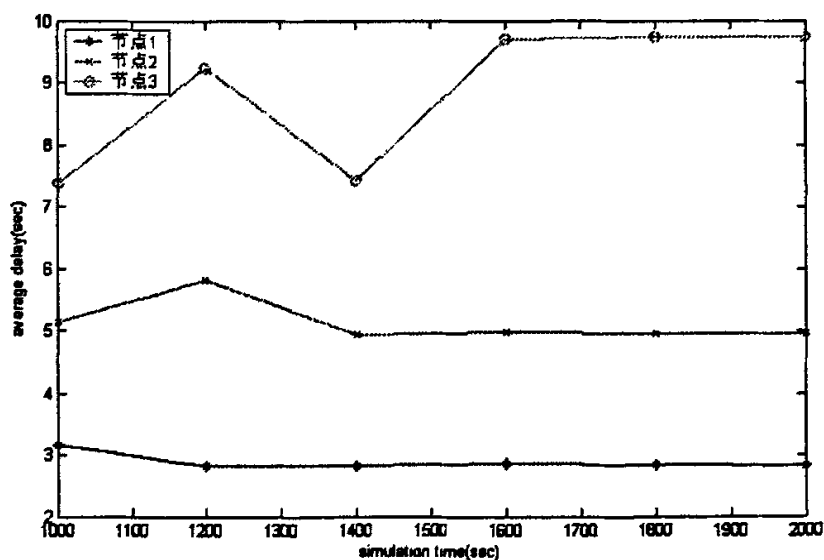


图4.6 利用竞争窗口进行业务区分的S-MAC协议的平均竞争延迟

在MAC协议中,节点的MAC层接收到上层交下来的数据后,都要先进入竞争窗口竞争信道,获得信道的节点才能发送数据。所以,节点的MAC层从接收数据到获得信道将数据发送出去,产生一段延迟,我们这里称为竞争延迟。

图4.5和图4.6是两种协议的平均延迟模拟图,横坐标是仿真时间,以200s为步长,纵坐标是节点的平均竞争延迟。

图4.5是S-MAC协议下的平均竞争延迟,图中显示,3个节点的平均竞争延迟相差不大。这是因为,在S-MAC协议中,每个节点的竞争窗口都是一样大小,且固定不变的,因而每个节点获得信道的概率是差不多的,所以它们的竞争延迟也就差别不大。图4.6是具有业务区分功能的S-MAC协议,从图中可以看出,3个节点的平均竞争延迟根据其优先级大大拉开了距离,优先级最高的节点1的平均竞争延迟远远小于优先级最低的节点3,区分效果明显,充分验证了我们的结论。

### 4.3 小结

S-MAC协议很好的解决了降低网络能耗的问题,但是它没有考虑网络的QoS性能,已不能适应快速发展的多媒体应用的需求,针对这个问题,我们提出了一种利用竞争窗口进行业务区分的S-MAC协议。

首先,节点侦听业务,根据业务类型分析出该节点的优先级,业务类型为视频的,分配给它最高的优先级,业务类型为数据的,分配给它最低的优先级,并根据优先级计算出竞争窗口的大小,优先级越高,竞争窗口越小,而优先级越低,竞争窗口越大。这样的话,节点在竞争窗口中竞争信道的时候,优先级高的节点由于竞争窗口较小,获得更多的访问信道的机会,从而提高了高优先级节点的吞吐量,保证了QoS性能,NS仿真结果证明了引进区分机制能够对S-MAC协议的QoS性能有所提高。

## 第五章 利用帧间间隔 DIFS 进行业务区分的 S-MAC 协议

### 5.1 原理介绍

S-MAC 协议在竞争窗口之前有一段固定大小的帧间间隔 DIFS，长度为 10 个时隙，DIFS 之后的竞争窗口也是固定大小（63 个时隙）的，这样造成发送不同类型数据的节点在同一时间进入竞争窗口，获得相同的信道接入概率，无法保证网络的 QoS 性能。在第四章中，给优先级不同的节点分配不同的竞争窗口大小，从而引进业务区分机制。这一章我们介绍另一种利用 DIFS 帧间间隔进行业务区分的 S-MAC 协议，提高网络的 QoS 性能。

在这种利用 DIFS 帧间进行业务区分的 S-MAC 协议中，同样沿用了 S-MAC 协议中的周期性侦听和休眠机制，冲突和串音避免机制以及消息传递机制，并对 S-MAC 协议引进了业务区分功能，对固定大小帧间间隔机制进行了改进。

在具有业务区分功能的 S-MAC 协议中，我们对网络中所有的业务类型分为三类，对不同的业务类型赋予不同的优先级。节点接收到数据分组之后，首先对分组进行处理，从中取出表示优先级的数据变量，把这个数据变量赋值给变量  $p$ 。比如业务类型为视频，给节点分配优先级 1，用  $p=1$  来表示；如果业务类型为语音，给节点分配优先级 2，用  $p=2$  来表示；如果业务类型为数据，给节点分配优先级 3，用  $p=3$  来表示。各节点得到自己的优先级之后，根据  $p$  的数值设置 DIFS 大小。当  $p=1$  时，节点的 DIFS 设为  $d1$ ；当  $p=2$  时，节点的 DIFS 设为  $d2$ ，当  $p=3$  时，节点的 DIFS 设为  $d3$ ，这样不同 QoS 要求的业务就得到了不同大小的 DIFS。具体的算法实现如下：

```
If  $p=1$ 
{
     $D=d1$ ;
}
Else if  $p=2$ 
{
     $D= d2$ ;
}
Else if  $p=3$ 
{
     $D= d3$ ;
}
```

由算法可知，节点的优先级不同得到的 DIFS 大小不同。由图 5.1 所示，节

点 1 的优先级高于节点 2 的优先级, 所以节点 1 的帧间间隔  $d_1$  小于节点 2 的帧间间隔  $d_2$ , 则节点 1 在时刻  $d_1$  进入竞争窗口, 而节点 2 在时刻  $d_2$  才能进入竞争窗口竞争信道。进入竞争窗口后, 由于竞争窗口大小都为固定值 63, 节点 1 和节点 2 都在  $[0, 62]$  的范围内任意选择一个时隙, 节点根据各自所选时隙的位置设置一个退避计时器, 退避计时器的值就是所选时隙的序号。假设节点 1 和节点 2 选中同一个时隙序号  $n$ , 即节点 1 和节点 2 退避计时器的值都等于  $n$ , 节点 1 的退避计时器从时刻  $d_1$  开始倒计时, 节点 2 的退避计时器从时刻  $d_2$  开始倒计时, 由于  $d_1$  小于  $d_2$ , 则节点 1 的退避计时器比节点 2 的退避计时器提前  $d_2 - d_1$  开始倒计时, 显然节点 1 的退避计时器最先减小到零, 它检测到信道是空闲的, 则节点 1 竞争到信道, 开始发送数据, 此时节点 2 检测到信道处于忙态, 就停止倒计时, 等待下一个周期。

这样高优先级的节点竞争到信道的机率增大, 所以相同时间内高优先级节点访问信道的机会较大, 业务得到的带宽就比较大, 从而保证高优先级的业务吞吐量。

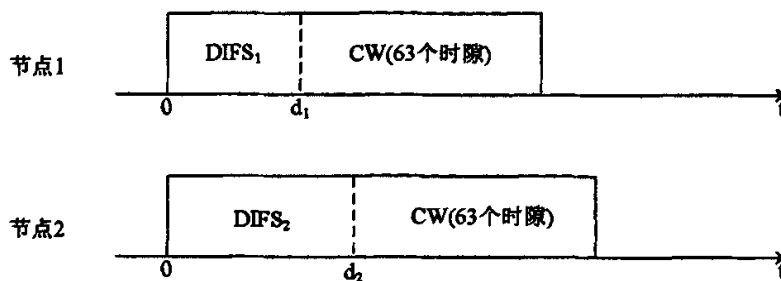


图 5.1 帧间间隔 DIFS

## 5.2 性能分析

### 5.2.1 网络配置

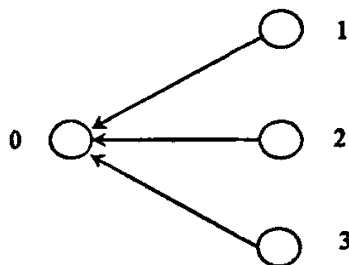


图 5.2: 4 个节点的拓扑结构

图 5.2 所示为一个无线传感器网络的拓扑图，由于传感器网络是不需要移动的网络，因此这是一个静态拓扑。其中节点 0 为 sink 节点，节点 1、2、3 为传感器节点。节点 1、2、3 同时有数据向节点 0 发送，三个节点发出的数据类型是不同的，节点 1 发出的是视频类型，节点 2 发出的是语音类型，节点 3 发出的是数据类型，根据结合业务区分的 S-MAC 协议，节点 1 的优先级最高，节点 3 的优先级最低。

我们在 NS-2 仿真软件下进行模拟，模拟的基本参数为：模拟时间 1000s，cbr 流的每次发送间隔 0.5s，每个 cbr 包为 512 字节，采用 DSR 路由协议，信道类型为无线信道，天线为单向天线。

### 5.2.2 仿真性能分析

#### ► 吞吐量仿真分析

表 1 是两种协议在整个模拟时间内的平均吞吐量的一个对比：

表 1：两种协议的平均吞吐量对比表

	1	2	3
S-MAC 的吞吐量 (字节/秒)	118.750000	102.840909	105.954545
具有业务区分的 S-MAC 的吞吐量 (字节/秒)	136.666667	105.000000	83.333333

从表1可以看出，在S-MAC协议下，节点1、2、3没有优先级差别的情况下，3个节点的吞吐量差别不大，从而证明了S-MAC协议固定帧间间隔DIFS大小的机制不能保证网络的QoS要求。而在具有业务区分功能的S-MAC下，区分效果比较明显，高优先级的吞吐量就高，低优先级的吞吐量就低，而且可以看出，高优先级节点吞吐量的提高是以牺牲低优先级节点为代价的，然而，低优先级的是数据业务，降低吞吐量只是造成发送接收时间变长，对QoS没有影响，但是对于高优先级的节点却可以获得更好的QoS性能，从而保证了业务的实时性。

图5.3和图5.4是两种协议的平均吞吐量模拟图，仿真以60秒为一个步长，画出随时间变化每一个步长内的平均吞吐量曲线图：



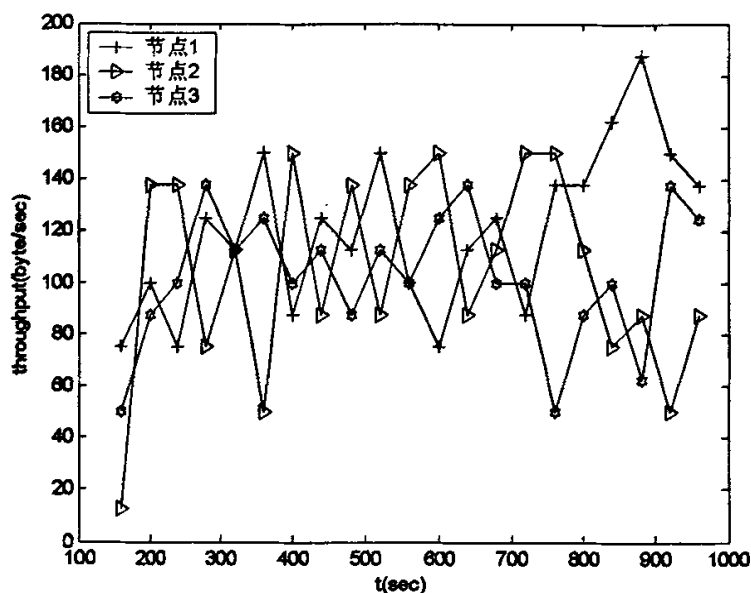


图5.3 S-MAC的平均吞吐量

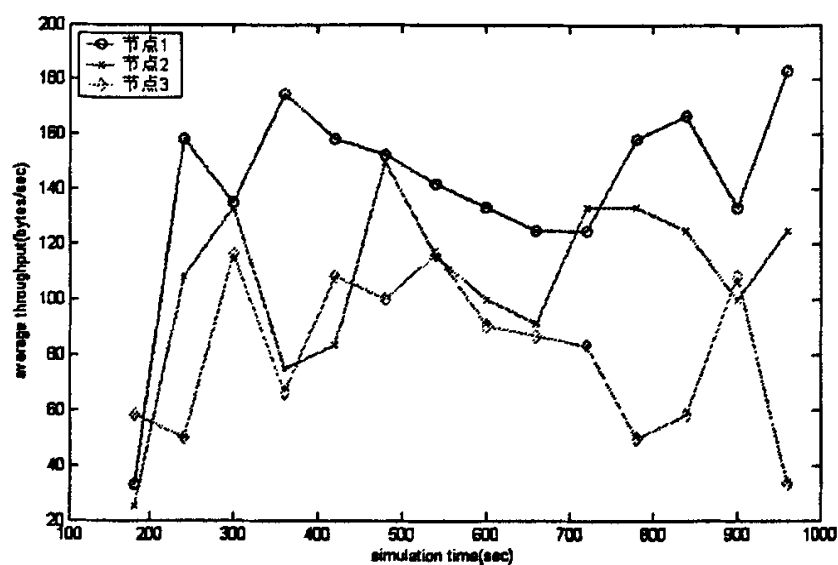


图5.4: 利用DIFS进行业务区分的S-MAC协议的平均吞吐量

图 5.3 是 S-MAC 协议下的平均吞吐量模拟图, 图中清晰的显示, 3 个节点的平均吞吐量相差不大, 波动范围大致相同。图 5.4 是利用 DIFS 进行业务区分的 S-MAC 协议的平均吞吐量模拟图, 从图中可以看出, 在 700 秒之前, 3 个节点的平均吞吐量显示了一定的区分效果, 而在 700 秒之后, 3 个节点的平均吞吐量已经根据其优先级大大拉开了距离, 优先级最高的节点 1 的平均吞吐量远远大于

优先级最低的节点 3，区分效果明显，从而验证了我们所提出的结论。

➤ 延迟仿真分析

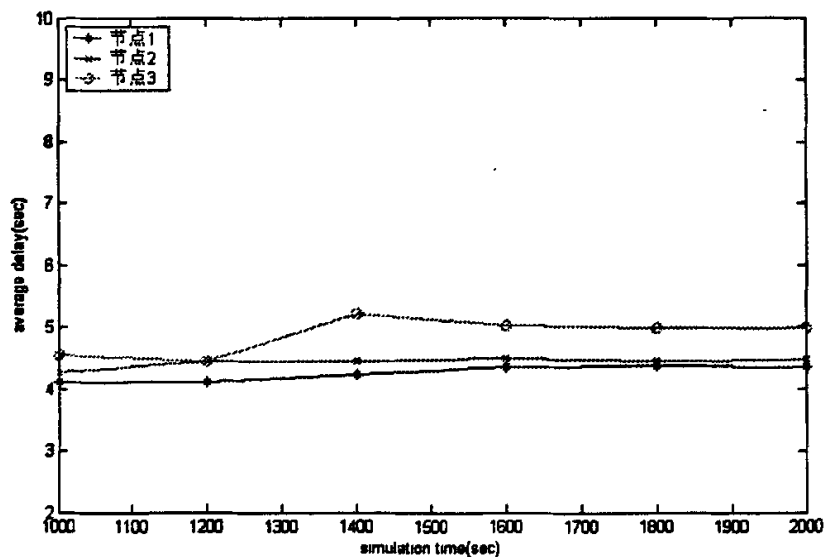


图5.5 S-MAC协议的平均竞争延迟

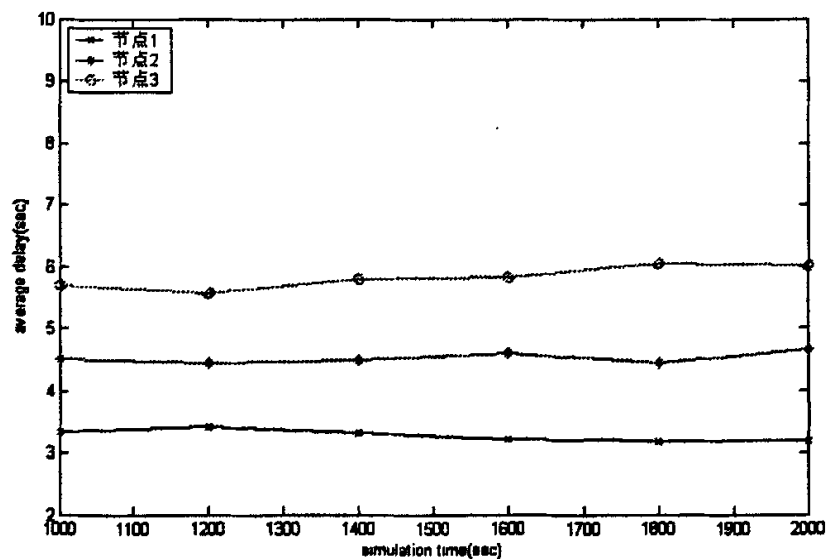


图5.6 利用DIFS进行业务区分的S-MAC协议的平均竞争延迟

在MAC协议中，节点的MAC层接收到上层交下来的数据后，都要先进入竞争窗口竞争信道，获得信道的节点才能发送数据。所以，节点的MAC层从接收数据到获得信道将数据发送出去，产生一段延迟，我们这里称为竞争延迟。

图5.5和图5.6是两种协议的平均延迟模拟图，横坐标是仿真时间，以200s

为步长，纵坐标是节点的平均竞争延迟。

图5.5是S-MAC协议下的平均竞争延迟，图中显示，3个节点的平均竞争延迟相差不大。这是因为，在S-MAC协议中，每个节点的DIFS一样大小，它们在同一时间进入竞争窗口竞争信道，因而每个节点获得信道的概率是差不多的，所以它们的竞争延迟也就差别不大。图5.6是利用DIFS进行业务区分的S-MAC协议，从图中可以看出，3个节点的平均竞争延迟根据其优先级大大拉开了距离，优先级最高的节点1的平均竞争延迟远远小于优先级最低的节点3，区分效果明显，充分验证了我们的结论。

### 5.3 小结

S-MAC协议很好的解决了降低网络能耗的问题，但是它没有考虑网络的QoS性能，已不能适应快速发展的多媒体应用的需求，针对这个问题，我们提出了一种利用帧间间隔DIFS进行业务区分的S-MAC协议。

首先，节点侦听业务，根据业务类型分析出该节点的优先级，业务类型为视频的，分配给它最高的优先级，业务类型为数据的，分配给它最低的优先级，并根据优先级计算出DIFS的大小，优先级越高，DIFS越小，而优先级越低，DIFS越大。这样的话，节点在竞争窗口中竞争信道的时候，优先级高的节点由于DIFS较小，优先进入竞争窗口竞争信道，获得更多的访问信道的机会，从而提高了高优先级节点的吞吐量，保证了QoS性能，NS仿真结果证明了引进区分机制能够对S-MAC协议的QoS性能有所提高。

## 第六章 结论及未来的工作

### 6.1 结论

本文所作的工作是重庆市教委资助的“基于竞争的无线传感器网络MAC机制研究”（编号：KJ050503）项目中的组成部分。本文的研究内容分为四大部分，首先分析了无线传感器网络面临的问题，介绍了无线传感器网络的特点，关键问题和应用领域。接着介绍了无线传感器网络MAC协议设计上所面临的问题，并介绍了多种无线传感器网络MAC协议，重点分析了S-MAC。然后分析了无线传感器网络QoS机制的需求，讨论了实施QoS的难点和可采用的策略，并对现有工作进行了归纳和总结。最后提出了两种具有业务区分功能的S-MAC协议，并用NS仿真工具

提出了两种具有业务区分功能的 MAC 协议——利用竞争窗口进行业务区分的 S-MAC 协议和利用帧间间隔 DIFS 进行业务区分的 S-MAC 协议，这两种协议有效的提高了网络的 QoS 性能。通过数计算机仿真试验，证明了这两种协议明显的区分效果。

### 6.2 未来的工作

由于时间和条件的限制，我们仅仅进行了无线传感器网络 MAC 机制研究的一部分工作，在未来，我们将从以下几个方面展开深入的研究：

- 1) 除了吞吐量和延迟之外，根据传感器网络的应用需求，考虑传输的可靠性、资源利用有效性等其它的 QoS 参数，全面反映传感器网络的 QoS 需求；
- 2) 考虑网络各层间的相关性实施，基于交叉层优化的 QoS 机制，最大限度的利用有限资源；
- 3) 协议实现与应用，对本文提出的机制进行实验网验证。

## 致 谢

在硕士学习期间，我一直在光互联网研究中心进行学习和相关科研工作。三年来，我主要从事无线网络方面的研究，涉及无线传感器网络。在进行科研工作的时候，我得到指导最多的就是我的导师陈前斌教授和项目组指导老师李云教授，他们总是耐心的为我讲解每一个细节，让我对整个通信网有了一个更加全面的认识。两位老师为人热心，治学严谨，从他们身上我学到了许多做学问的方法，通过他们的悉心指导，我取得了一定的成果，在此对他们表示由衷的感谢！此外，刘占军老师对我的科研也有不小的帮助，让我尽快地进入角色，少走弯路。

感谢重庆邮电大学光互联网及无线信息网络研究中心给我提供了很好的试验条件和学习环境！感谢研究中心的所有老师！感谢田敏、张怡、王罗、魏征和无线及移动通信研究所的所有同学，他们都给过我无私的帮助！

最后，作者还要感谢在百忙之中抽出宝贵时间来阅读本论文的各位评委！

罗萱

2007.5

## 参考文献

- [1] Mohsen Sharifi, Majid Alkaee Taleghan, Amirhosein Taherkordi. A Middleware Layer Mechanism for QoS Support in Wireless Sensor Networks. Networking, International Conference on Systems and International Conference on Mobile Communications and Learning Technologies, April 2006
- [2] Shangwei Duan, Xiaobu Yuan. Exploring hierarchy architecture for wireless sensor networks management. Wireless and Optical Communications Networks, 2006 IFIP International Conference on 11-13 April 2006..
- [3] Evans, J.J. Wireless sensor networks in electrical manufacturing. Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo. 2005. Proceedings 23-26 Oct. 2005 Page(s):460 - 465.
- [4] Taherkordi, A., Taleghan, M.A., Sharifi, M. Achieving availability and reliability in wireless sensor networks applications. The First International Conference on Availability, Reliability and Security, 20-22 April 2006.
- [5] 李云, 隆克平, 吴诗其, 赵为粮, 无线Ad Hoc网络QoS路由协议研究的进展与展望, 计算机科学, 2004, Vol. 31 No. 3 P. 28-30.
- [6] K. Bult, A. Burstein, D. Chang, M. Dong, M. Fielding, E. Kruglick, J. Ho, F. Lin, T.H. Lin, W.J. Kai, Low Power systems for Wireless Microsensors., ISLPED'96, August 1996.
- [7] J. M. Kahn, R. H. Katz, and K. S. J. Pister., Next Century Challenges: Mobile Networking for "Smart Dust", Mobicom'99, August 1999.
- [8] Qunfeng Dong, Maximizing System Lifetime in Wireless Sensor Networks, Fourth International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN '05), April 2005.
- [9] A. Karnik and A. Kumar, Distributed Optimal Self-Organisation in a Class of Wireless Sensor Networks, INFOCOM'04, March 2004. [10] K. A. Delin, S. P. Jackson. The sensor Web: A new instrument concept. SPIE's (The Int'l Society for Optical Engineering).
- [10] A. Cerpa and D. Estrin, ASCENT: Adaptive Self-Configuring sEnsor Networks Topologies, INFOCOM'02, June 2002.
- [11] S.D. Servetto and G. Barrenechea, Constrained Random Walks on Random Graphs: routing Algorithms for Large Scale Wireless Sensor Networ, WSNA'02,

September 2002.

[12] D.S.J.D. Couto, D. Aguayo, J. Bicket, and R. Morris, A High-Throughput Path Metric for Multi-Hop Wireless Routing, MOBICOM 2003, September 2003.

[13] B. Deb, S. Bhatnagar, and B. Nath, ReInForM: Reliable Information Forwarding Using Multiple Paths in Sensor Networks, LCN 2003, October 2003.

[14] N. Li and J.C. Hou, Topology Control in Heterogeneous Wireless Networks: Problems and Solutions, INFOCOM'04, March 2004.

[15] Mihaela Cardei, Jie Wu, Shuhui Yang, Topology Control in Ad hoc Wireless Networks with Hitch-hiking, October 2004.

[16] F. Ye, G. Zhong, S. Lu, and L. Zhang, PEAS, A robust Energy conserving Protocol for Long-lived Sensor Networks, International Conference on Network Protocols, November 2002.

[17] P. B. Godfrey and D. Ratajczak, Naps: scalable, robust topology management in wireless ad hoc networks, 3rd International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN '04), April 2004.

[18] Charles E. Perkins, Elizabeth M. Royer, Samir R. Das. Ad hoc on-demand distance vector routing. IETF RFC3561, July 2003.

[19] T. Clausen, P. Jacquet. Optimized link state routing protocol (OLSR). IETF RFC3626, October 2003.

[20] Hedemiemi S, Lieberman A. A survey of gossiping and broad-casting in communication networks[J]. Networks, 1998, 18(4): 319—349.

[21] Kulik J, Heinzelman W R, et al. Negotiation-based protocols for disseminating information in wireless sensor networks[J]. Wireless Networks, 2002, 8(8): 169—185.

[22] Sohrabi K, Gao J, Ailawadhi V, Pottie GJ. Protocols for self-organization of a wireless sensor network. IEEE Personal Communications, 2000,7(5):16~27.

[23] Intanagonwiwat C, Govindan R, Estrin D. Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks[C]. Proceedings of the ACM MobiCOM00, Boston, MA, 2000. 56-67.

[24] Deborah Estrin et al. Directed Diffusion for Wireless Sensor Networking[C]. IEEE/ACM TRANSACTIONS ON NETWORKING, February 2003

[25] Heinzelman W, Sinha A, Wang A, et al. Energy-scalable algorithms and protocols for wireless microsensor networks[A]. Proc. International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing [C]. 2000.

[26] Manjeshwar A, Agrawal DP. TEEN: A routing protocol for enhanced efficiency in wireless

- sensor networks[C]. In: Proceedings of the 15th Parallel and Distributed Processing Symposium. San Francisco: IEEE Computer Society, 2001. 2009~2015.
- [27] Lindsey S, Raghavendra CS. PEGASIS: Power-Efficient gathering in sensor information systems. <http://www.cs.wayne.edu/~loren/csc8220-info/menu.html>.
- [28] Sourabi K, Gao J, Ailawadni V, Pottie GJ. Protocols for self-organization of a wireless sensor network[C]. IEEE Personal Communications, 2000, 7(5):16~27.
- [29] Barnhart, C.M.; Ziemer, R.E. Topological analysis of satellite-based distributed sensor networks. Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on Volume 21, Issue 5, Sept.-Oct. 1991 Page(s):1060 – 1070.
- [30] Yeo, B.S.; Tan, S.K.; Wong, K.S.; Ge, Y.; Yao, Q.; Yin, Q.H. An analysis on the topological formation of wireless sensor networks. Vehicular Technology Conference, 2005. VTC-2005-Fall. 2005 IEEE 62nd Volume 3, 25-28 Sept., 2005 Page(s):1804 – 1808.
- [31] Brooks, R.R.; Keiser, T.E. Mobile code daemons for networks of embedded systems. Internet Computing, IEEE Volume 8, Issue 4, July-Aug. 2004 Page(s):72 – 79.
- [32] Sensor Webs. <http://sensorwebs.jpl.nasa.gov/>.
- [33] ALERT. <http://www.altersystem.org>.
- [34] Noury N, Herve T, Rialle V, Virone G, Mercier E. Monitoring behavior in home using a smart fall sensor. In: Proceedings of the IEEE-EMBS Special Topic Conference on Microtechnologies in Medicine and Biology. Lyon: IEEE Computer Society, 2000. 607-610.
- [35] Akyildiz I.F, Su W, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E. Wireless sensor network: A survey. Computer Networks, 2002,38(4): 393~422.
- [36] Woo A, Culler D. A transmission control scheme for media access in sensor networks. In: Proceedings of the ACM MobiCom 2001. Rome: ACM Press, 2001. 221~235.
- [37] Shih E, Cho S, Ickes N, Min R, Sinha A, Wang A, Chandrakasan A. Physical layer driven protocol and algorithm design for energy-efficient wireless sensor networks. In: Proceedings of the ACM MobiCom 2001. Rome: ACM Press, 2001. 272~286.
- [38] Ye W, Heidemann J, Estrin D. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor network. In: Proceedings of the INFOCOM 2002. San Francisco: IEEE Computer Society, 2002.
- [39] Singh S, Raghavendra CS. PAMAS: Power aware multi-access protocol with signaling for Ad hoc networks. ACM Computer Communication Review, 1998,28(3):5~26.
- [40] Sohrabi K, Pottie GJ. Performance of a novel self-organization protocol for wireless Ad hoc sensor networks. In: Proceedings of the IEEE 50th Vehicular Technology Conference. Amsterdam, 1999. 1222~1226.



- [41] 曾鹏, 于海斌, 梁英, 尚志军, 王忠锋, 分布式无线传感器网络体系结构及应用支撑技术研究, 信息与控制, 2004, 33 (3): 307-313.
- [42] S. Singh and C.S. Raghavendra, PAMAS: Power Aware Multi-Access protocol with Signaling for Ad Hoc Networks, ACM Computer Communications Review, 28(3), 5-26 (1998).
- [43] E. Jung and N. Vaidya, "An energy efficient MAC protocol for wireless LANs, in: Proceedings of IEEE INFOCOM'02, New York (June 2002).
- [44] Wei Ye, John Heidemann, Deborah Estrin. Medium Access Control With Coordinated Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks. IEEE/ACM TRANSACTIONS ON NETWORKING, 2004.
- [45] T. van Dam, K. Langendoen. An adaptive energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks. The 1<sup>st</sup> ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems. Los Angeles, California, USA, 2003.
- [46] K. Sohrabi, J. Gao, V. Ailawadhi, G.J. Pottie, "Protocols for self-organization of a wireless Microsensor Network", IEEE Personal Communication, October 2000, pages 16-27.
- [47] SeongHwan Cho, Anantha P. Chandrakasan, "Energy efficient Protocols for low duty cycle wireless sensor networks". IC ASSP 2001, May 2001.
- [48] R. Kalidindi, L. Ray, R. Kannan, S. Iyengar, "Distributed Energy Aware MAC Layer Protocol For Wireless Sensor Networks" in International Conference on Wireless Networks, Las Vegas, Nevada, June 2003.
- [49] V. Rajendran, K. Obraczka, and J.J. Garcia-Luna-Aceves. "Energy Efficient, Collision-Free Medium Access Control for Wireless Sensor Networks". The First ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (Sensys 2003), Los Angeles, CA, USA. November, 2003.
- [50] Xiao-Hui Lin; Yu-Kwo ng Kwok; On channel adaptive energy management in wireless sensor networks Parallel Processing 2005 ICPP Workshops International Conference Workshops on 14-17 June 2005 Page(s): 397-404 Digital Object Identifier 10. 1109/ICPPW. 2005. 61
- [51] S. B. ; Su, X. ; CuMPE: Cluster Management and Power Efficient protocol for wireless sensor networks Information Technology Research and Education 2005 ITRE 2005 3<sup>rd</sup> International Conference on 27-30 June 2005 Page(s): 60-67 Digital Object Identifier 10. 1109/ITRE. 2005. 1503067.
- [52] Tilak S, Abu. Ghazaleh N, Heinzelman W. A taxonomy of wireless microsensor

- network communication models[J] ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2002, 6(2): 28~36.
- [53] Braden R, Clark D, Shenker S. Integrated Services in the Internet Architecture: an Overview [EB/OL]. <http://rfe.arago.net/rfc1633.html>. 1994.
- [54] Shenker S, Partridge C, Guerin K. Specification of Guaranteed Quality of Service[EB/OL]. <http://rfc.arago.net/fie2212.html>. 1997.
- [55] Chakrabarti S, Mishra A. QoS issues in ad hoc wireless net. WOI'ks[J]. IEEE Communications Magazine, 2001, 39(2): 142~ 148.
- [56] Stankovic J A, Abdelzaher T E, Lu C, et al. Real-time communication and coordination in embedded sensor networks[J]. Proceedings of the IEEE. 2003, 91(7): 1002—1022.
- [57] Sohrabi K, Gao J, Ailawadhi V, et al. Protocols for self-organization of a wireless sensor network[J]. IEEE Personal Communications, 2000, 7(5): 16—27.
- [58] Akkaya K, Younis M. An energy-aware QoS routing protocol for wireless sensor networks[A]. Proceedings of the IEEE work-shop on Mobile and Wireless Networks[C]. Piscataway, USA: IEEE. 2003. 710-715.
- [59] Tian H, Stankovic J A, Lu C Y, et al. SPEED: a stateless protocol for realtime communication in sensor networks[A]. Proceedings of the International Cmference on Distributed Computing Systems[c]. Los Alamitos, USA: IEEE Computer Society. 2003. 46~55.
- [60] 杨少军, 史浩山, 陈敏. 无线传感器网络QoS路由的研究与仿真[J]. 传感技术学报, 2005, 18(3): 454—459.
- [61] Chen M, Kwon T, Choi Y. Energy-efficient differentiated directed diffusion(EDDD)for real-time traffic in wireless sensor networks[J] Computer Communications, 2006, 29(2): 231-245.
- [62] Benkoezi B, Hassanein H, Akl S, et al. QoS for data relaying in hierarchical wireless sensor networks[A]. Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Quality of Service & Security in Wireless and Mobile Networks[c]. USA: ACM 2005. 47~54.
- [63] Sankarasubramaniam Y, Akan B, Akyildiz I F. ESRT: event-to-sink reliable transport in wireless sensor networks[A]. Proceedings of the Fourth ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing[c]. New York, USA: Association for Computing Machinery, 2003. 177~188.
- [64] Kay J, Frelik J. Quality of service analysis and control for wireless sensor

networks[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems[C]. NewYork, USA: IEEE Inc. , 2004. 359~368.

## 附 录

### 攻读硕士学位期间从事的科研工作

#### 1. 主要从事的科研工作

- 1) 运维报表辅助生成系统, 重庆联通;
- 2) 基于 AVR 单片机的无线数据报送终端, 四川科宏石油天然气工程有限公司;
- 3) 无线传感器网络中基于竞争的 MAC 机制研究, 重庆市教委科学技术研究项目, 项目编号: KJ050503。

#### 2. 发表及已录用的论文

- 1) 一种结合业务区分的 S-MAC 协议, 重邮学报, 将在 2008 年 3-4 出版的第 3 或第 4 期刊出; (已录用)