

无线传感器网络 MAC 协议的研究与分析

丁睿, 南建国

(空军工程大学工程学院, 西安 710038)

摘要: 针对不同的传感器网络应用, 研究人员从不同方面提出多个无线传感器网络介质访问控制(MAC)协议, 其中包括 S-MAC, PMAC, DEANA, EMACs, Z-MAC 以及 AIMRP 等协议。通过分析各类 MAC 典型协议特点, 归纳其设计原则和分类方法, 比较各协议间的性能差异, 结果证明无线传感器网络 MAC 协议呈现多样性的特点, 设计 MAC 协议需要兼顾能量效能和网络性能 2 个方面。给出 MAC 协议的设计策略。

关键词: 无线传感器网络; 介质访问控制协议; 设计策略

Study and Analysis of MAC Protocols in Wireless Sensor Networks

DING Rui, NAN Jian-guo

(Institute of Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038)

【Abstract】 Many new Medium Access Control(MAC) protocols have been designed according to different applications, including the S-MAC, PMAC, DEANA, EMACs, Z-MAC and AIMRP protocols. This paper analyzes characteristics and performance of various typical MAC protocols. Design principles and classification methods for MAC protocols are summarized and compared in detail. Results show that a good MAC protocol is that it has the ability to make tradeoffs between energy-efficiency and other performances of WSNs in term of application conditions. According to the same principles, the future devisable tactics of MAC protocols in WSNs are pointed out.

【Key words】 Wireless Sensor Networks(WSNs); Medium Access Control(MAC) protocols; design tactics

1 概述

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSNs)是一种无中心节点的全分布系统。该系统由部署在监测区域内众多集感知、数据处理和无线通信等模块于一体的微型传感器节点组成, 并以自组织的协作方式获知监测信息。在无线传感器网络中, 介质访问控制(Medium Access Control, MAC)协议决定无线信道的使用方式, 负责分配传感器节点间有限的通信资源, 对传感器网络的性能影响较大, 是保证无线传感器网络高效通信的关键协议。WSNs 虽与无线自组网络在分布式、拓扑变化以及自组织性等方面有许多相似之处, 但同时也存在着不少差异, 使得针对传统无线网络研究的通信协议不能有效地直接应用于 WSNs, 这对无线传感器网络中的 MAC 协议设计带来了挑战。

2 WSNs MAC 协议设计存在的问题

对于电源能量、通信能力和节点计算能力有限的 WSNs 而言, 要靠众多节点协作来实现某种特定的应用目标, 作为一种能量受限的自组织网络, 对 WSNs 的 MAC 协议设计需要重点考虑以下 4 方面的问题:

(1) 能耗问题。在 WSNs 中, 其节点体积微小, 通常靠能量有限的电池供电, 由于部署环境的复杂, 造成电池能量难以补充和更换, 因此高效使用能量来最大化网络生命周期成为设计 WSNs 的重要理念。而在传感器节点中又以无线通信耗能最大, 其主要因素有: 发送节点和接收节点不同步造成空传; 节点不知自己何时接收数据, 对信道空闲侦听; 节点接收并处理非该节点信息产生串音; 不同节点在同一信道传输数据发生碰撞, 导致数据重传; 发送与接收状态的频繁转换; 发送、接收和侦听控制分组的使用等。基于上述原因,

直接控制节点的无线通信模块, 负责在节点间分配无线信道资源并决定无线通信使用方式的 MAC 协议成为设计中的重点。

(2) 信道使用问题。WSNs 中节点间的通信方式采用多跳共享信道使用方式, 即在网络中多个节点在同一时间利用同一信道传递数据。这就造成报文冲突, 它与节点所处地理位置相关就会带来隐蔽终端、暴露终端问题的发生。隐蔽终端和暴露终端致使信道利用率降低、节点能量损耗。因此, WSNs 的 MAC 协议设计需要协调节点的收发, 降低这些问题的发生概率, 避免它们发生的可能性。

(3) 扩展性问题。WSNs 节点数量众多, 规模庞大, 由于节点的加入、退出、死亡, 造成节点数目、位置的不断变化, 因此 WSNs 的拓扑结构具有动态性。MAC 协议设计要能够灵活适应这种拓扑结构的性质。

(4) 公平性问题。在传统网络中, 每一位用户都希望拥有平等收发数据的能力, 但在 WSNs 中, 所有节点都是协作工作, 这对网络的公平性要求不高。之所以还要实现网络的公平性, 是因为赋予每个节点相同的信道访问机会, 均衡节点的能量消耗。

在上述的 4 个方面中, WSNs 的功耗性能和可扩展性是其中最主要的性能指标。除这几个方面的问题外, 实时性、吞吐量以及延迟问题也是 MAC 协议设计中需要注意的问题, 不过对它们往往可以作出一些折中处理。

作者简介: 丁睿(1980 -), 男, 硕士研究生, 主研方向: 无线传感器网络; 南建国, 副教授、博士研究生

收稿日期: 2009-05-20 **E-mail:** canon2300@sohu.com

3 WSNs MAC 协议的分类与分析

WSNs 广泛的应用领域使其面临多样和特殊的应用需求和业务特性,从而促成了各种不同的 MAC 协议设计。这些设计从多层面、多角度出发,具有不同的特点,同时又存在相互交叉的共同点,很难对其进行统一的分类。综合对目前现有 MAC 协议的研究,WSNs 的 MAC 协议可以按照下列条件进行分类:

- (1)单信道还是多信道。
- (2)集中控制还是分布式控制。
- (3)接收节点处于侦听、唤醒和调度中的哪种状态。
- (4)信道访问方式是固定的还是随机的。

本文选取了部分较为重要的和近期提出的 MAC 协议,并采用第(4)种分类方法对其核心机制、特点和优缺点等进行分析。

3.1 基于竞争的 MAC 协议

(1)S-MAC(Sensor-MAC)与 T-MAC(Timeout-MAC) 协议。S-MAC 协议扩展性好、能耗少。该协议采用周期性侦听和睡眠机制来降低节点的能耗。节点间通过协商形成虚拟簇,既保证相邻节点调度周期同步又有良好的扩展性。利用物理和虚拟载波侦听机制以及带内信令避免消息碰撞和串音问题。通过消息分割和突发传递机制提高长消息传输效率。不足之处在于节点活动时间不能随负载动态变化,而且节点休眠会引起数据延迟。T-MAC 协议针对 S-MAC 的缺陷进行了改进,定义了 5 种激活事件和 1 个计时器 TA (每个周期最小空闲侦听时间),据此确定工作阶段的结束时间。在 TA 内,射频模块没有侦听到这 5 种事件中的任一种,则节点认为信道空闲,节点转入睡眠阶段。每一帧根据通信流量动态调整其活动时间,以此减少空闲侦听时间,但会带来早睡问题,解决办法有 2 种:一种为未来请求发送(FRTS),该方法可提高吞吐率,但 DS 分组和 FRTS 分组会带来额外的通信开销;另一种为缓冲区优先(FBP),该方法减少了早睡的发生,具有一定流量控制作用,但增大了冲突的概率。由图 1 可见,T-MAC 协议增加了休眠时间。

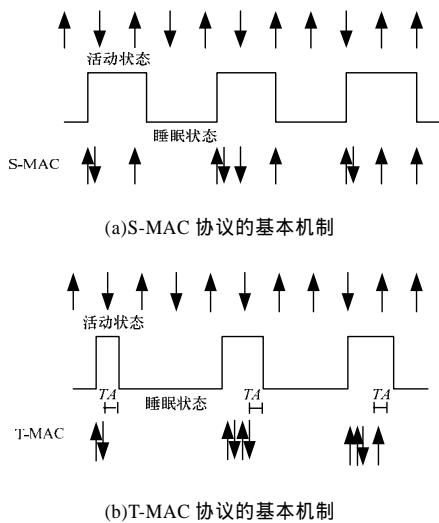


图 1 S-MAC 和 T-MAC 协议的基本机制

(2)PMAC(pattern-MAC)^[1]协议。PMAC 协议是对 S-MAC 和 T-MAC 协议的改进,目的在于进一步减少空闲侦听产生的能耗。该协议根据网络负载和流量模式自适应调整休眠调度。时间被分割成许多连续的超时间帧(STF),每个 STF 由模

式循环时间帧(PRTF)和模式交换时间帧(PETF)2 个子帧构成,PRTF 包含 N 个时隙和 1 个附加时隙,节点根据用 0^m1 表示的模式信息(pattern information)决定在每个时隙休眠或唤醒,0 代表休眠,1 代表唤醒, m 大表示负载轻, m 小表示负载重,节点通过判断每个时隙内有无数据收发来调整模式中 0 或 1 的数量。PETF 也被分为多个时隙,用于与相邻节点进行模式交换,并通过相邻节点的模式计算下一个 PETF 中的休眠调度。研究表明,PMAC 协议具有良好的能量有效性和扩展性,但执行复杂,控制开销大。

3.2 基于非竞争的 MAC 协议

基于非竞争的 MAC 协议可分为基于频分复用(FDMA)的协议、基于时分复用(TDMA)的协议以及基于码分复用(CDMA)的协议等。基于 FDMA 的协议将总频段划分为多个等长的信道,信道间互不干扰,但通信质量和保密性较差。基于 CDMA 的协议是为节点分配相互正交的地址码,这样就避免了节点在传输数据时的冲突,该类协议扩展性好,控制开销少,但硬件成本高。本节重点分析基于 TDMA 的协议,此类协议通过为节点分配独立的收发数据时槽,避免了碰撞和重传。下面介绍几种基于 TDMA 的协议。

(1)分布式能量感知节点激活(Distributed Energy-Aware Node Activation, DEANA)^[2]协议。该协议将帧分为调度访问部分和随机访问部分。调度访问部分由多个时隙组成,某个时隙分配给特定节点用来发送数据,其他节点则处于休眠状态。为了进一步节能,调度访问部分的每个时隙又细分为控制时段和数据时段,控制阶段发送带接收数据节点 ID 的控制消息,在数据阶段发出数据。真正的接收节点处于接收状态,其他节点进入睡眠。随机访问部分由多个连续的信令交换时隙组成,处理节点的添加、删除及时间同步等。DEANA 协议要求网内所有节点时间同步,扩展性差。

(2)DMAC(Data gathering tree-based MAC)协议。图 2 为 DMAC 协议的交错活动/休眠调度机制。

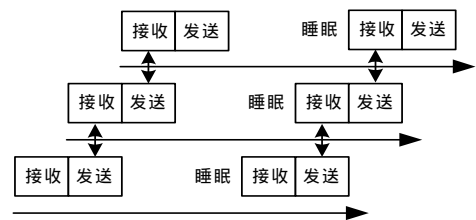


图 2 DMAC 协议的交错活动/休眠调度机制

DMAC 协议的目标是达到较低的等待时间,但同时也具有良好的能量有效性。DMAC 协议是在分析了 S-MAC 和 T-MAC 协议自适应工作/休眠策略基础上,发现了数据转发中断问题。其核心思想是交错活动/休眠调度机制。从感知节点到汇聚节点形成一棵数据汇聚树,树中的数据传输是单向的,由孩子节点到父节点。该协议用汇聚树描述网络结构,摆动唤醒机制负责调整树中节点的工作周期,以减少消息在网络中的传输延迟。但其网络拓扑依赖性大,节点间要求精确的时间同步。

(3)EMACs(EYE's MAC)^[3]协议。EMACs 由若干时隙组成长度固定的帧,每个时隙分为控制时段和数据时段。EMACs 采用分布式时隙分配算法选举主动节点构成连通骨干网络,每个主动节点控制一个时隙。主动节点协商产生调度,时隙只能在 3 跳外重用。接收节点只能接收特定主动节点发送的数据,大多数情况下保持睡眠。根据流量和剩余能量,主动

节点和其他节点可以转换。连通骨干网络有利于网络层建立路由,并减少路由开销。但该协议由于帧中存在空闲时隙,降低了信道利用率。

3.3 混合型 MAC 协议

混合型 MAC 协议结合竞争协议和非竞争协议的特点,在不同的条件下,表现不同协议的性质,尽可能避免某类协议缺陷的发生,有利于网络系统的全局优化。

Z-MAC(Zebra MAC)^[4]协议。该协议是一种结合 CSMA 和 TDMA 优点的混合 MAC 协议。节点根据网络的信道竞争程度,自适应地调整信道接入方式,利用 CSMA 解决低业务下节点间对信道的竞争,可提高信道利用率并降低延时,利用 TDMA 解决高业务下节点间对信道的竞争,可减少碰撞和串音。Z-MAC 中节点有 2 种模式: LCL(Low Contention Level)和 HCL(High Contention Level)。节点收到 ECN(Explicit Contention Notification)就进入 HCL 模式,在 HCL 模式下,只有时隙拥有者和其一跳邻居才可以竞争。而在 ECN 模式下,任何节点都可以竞争任何时隙。当时隙为空或空闲时,其邻居节点以 CSMA 方式竞争信道,获胜者占用该时隙。通过邻居发现,节点收集两跳内邻居信息,然后采用分布着色算法为每个节点分配时隙,减少冲突的概率。其不足在于网络开始时,初始化网络开销大,网络能量大量消耗。

3.4 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。采用综合各层的设计方法,实现 MAC 层控制与业务流的有效结合,减少控制开销,从而取得更好的网络性能。

AIMRP(Address-light Integrated MAC and Routing Protocol)^[5]协议是一种 MAC 层协议与网络层路由机制的结合。该协议根据节点到汇聚节点的跳数,形成一个以汇聚节点为中心的多层环形结构,数据信息从外环逐层向内环传递。节点利用 MAC 协议中的 RTR(Request To Relay)/CTR (Clear To Relay)/DATA/ACK 握手机制实现节点对信道的访问控制,并利用给定参数的分步来实现节点的休眠调度,该参数由端到端延时需求来确定。AIMRP 协议同步精度要求高,但动态适应性差,适用于小范围网络中。

4 WSNs MAC 协议比较

为了对所述协议有一个直观地认识,文中以列表的形式对各协议的性能进行比较,如表 1 所示。

表 1 MAC 协议的性能比较

协议	接入方式	能量有效性	可扩展性	信道利用率	同步要求	延迟	适应性	吞吐量
S-MAC		较好	好	较好	不需要	一般	较好	较好
T-MAC	基于竞争	较好	好	较好	不需要	一般	较好	好
PMAC		好	好	较好	不需要	一般	好	好
DEANA		较好	差	较好	较高	一般	差	一般
DMAC	基于非竞争	好	一般	较好	高	好	差	一般
EMACs		较好	差	差	不需要	差	差	一般
Z-MAC	混合接入	较好	较好	较好	低	一般	较好	好
AIMRP	跨层设计	好	一般	好	高	一般	差	好

基于竞争的 MAC 协议易发生消息碰撞,从而带来延迟问题,但该类协议具有良好的能量有效性和可扩展性,并在低流量的 WSNs 中有很好的网络吞吐量。基于非竞争的 MAC 协议避免了消息碰撞问题的发生,但节点间要求严格的时间同步,并且在低流量条件下,网络吞吐量降低,在网络能耗、扩展性以及适应性方面也不能适当地作出折衷。而混合型的

MAC 协议对于上述 2 类协议存在的问题进行了改进,但该类协议增加了执行过程的复杂性。通过对一些典型 MAC 协议的分析发现,并没有某一种 MAC 协议在各方面都表现出色,每种协议都有其优缺点,很难判定哪个最优。

5 WSNs MAC 协议设计策略

文中通过对 WSNs MAC 协议系统的分析和比较,发现现有 MAC 协议在扩展性、适应性和延迟等方面还存在诸多问题,为了促进 MAC 协议研究的全面性,其未来的设计策略如下:

(1)由于不同场合对网络的要求不同,MAC 协议的设计面临着各种各样与应用相关的业务特性和需求,因此并不存在一种通用的 MAC 协议。但随着 WSNs 研究的逐渐深入,不可能针对各种具体应用进行不同的分析和设计,这就需要根据 WSNs 特殊的应用特点进行透彻的研究和总结,提取共同点。

(2)能量高效仍是 MAC 协议设计的关键因素,但不是唯一目标。在未来的应用中,WSNs 的应用需求还可能存在着对某个或某些指标有特别的要求,这就要求在 MAC 协议的设计上进行一定的折衷。

(3)由于最初 WSNs 被假定为是由静态节点组成的,因此在研究时会忽略 MAC 协议的移动性,但随着应用需求要求节点需要自主移动性,对 MAC 协议移动性设计也提出了更高的要求。

(4)现有 WSNs MAC 协议的安全性十分脆弱,窃听、传感器数据伪造、拒绝服务攻击^[6]和传感器节点物理妥协等各种网络攻击层出不穷,这使得安全问题和其他 WSNs 性能问题同样重要,MAC 协议的设计应考虑到网络安全的因素,引入一定的安全机制,对现有安全协议进行优化,这些是对未来 MAC 协议安全性设计的要求。

参考文献

- [1] Zheng T, Radhakrishnan S, Sarangan V. P-MAC: An Energy-efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks[C]//Proc. of the Parallel and Distributed Processing Symp.. New York, USA: IEEE Press, 2005: 66-72.
- [2] Rajendran V, Garcia-Luna-Aceves J J, Obraczka K. Energy-efficient Channel Access Scheduling for Power-constrained Networks[C]//Proc. of WPMC'02. New York, USA: [s. n.], 2002: 27-30.
- [3] Wan C Y, Eisenman S E, Campbell A T, et al. Siphon: Overload Traffic Management Using Multi-radio Virtual Sinks[C]//Proc. of the 3rd ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems. San Diego, USA: ACM Press, 2005: 116-129.
- [4] Rhee N, Warrier A, Aia M, et al. ZMAC: A Hybrid MAC for Wireless Sensor Networks[C]//Proc. of the 3rd ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems. San Diego, USA: ACM Press, 2005: 90-101.
- [5] Kulkarni S S, Iyer A, Rosenberg C. An Address-light, Integrated MAC and Routing Protocol for Wireless Sensor Networks[J]. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2006, 14(4): 790-810.
- [6] 朱云歌, 施建俊. 无线 Ad Hoc 网络组密钥协商和管理方案[J]. 计算机工程, 2006, 32(4): 166-167.

编辑 索书志