

无线传感器网络 MAC 协议实时性研究

李洪峻, 李 迅, 马宏绪

(国防科技大学机电工程与自动化学院, 长沙 410073)

摘要: MAC 协议决定着无线信道的使用方式, 是保证网络高效通信的关键协议。通过分析无线传感器网络的特点, 针对应用需求, 讨论影响 MAC 协议设计的有关问题, 研究和比较了当前典型的无线传感器网络 MAC 协议的主要机制及实时性, 展望了无线传感器网络实时 MAC 协议的进一步研究策略和发展趋势。

关键词: 无线传感器网络; MAC 协议; 实时; 能量有效

Research on Real-time of MAC Protocol in Wireless Sensor Networks

LI Hong-jun, LI Xun, MA Hong-xu

(School of Mechatronics and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

【Abstract】 MAC protocol is at the core of effective communication in wireless sensor network because it decides the usage of wireless channel. After introducing the characteristics of wireless sensor networks, this paper describes the sensor network properties that are crucial for the design of MAC protocol. The key mechanism and real-time of the existing representative MAC protocol are analyzed, and their performances are compared. The future research strategies and trends of real-time MAC protocols are summarized.

【Key words】 Wireless Sensor Networks(WSN); MAC protocol; real-time; energy-efficiency

1 概述

MAC 协议的主要功能是解决多个节点共享单个信道的问题, 并决定节点何时占用无线信道进行数据传输。基于 WSN 能量有限的特点, MAC 协议的设计也必须遵循节能理念。目前, WSN 的 MAC 协议以减少能耗、最大化网络生存时间为首要设计目标。同时, 网络通信的实时性、吞吐量及带宽利用率等性能指标针对具体的应用对象而考虑; 其次, 为了适应网络拓扑变化, MAC 协议需要良好的可扩展性。

WSN 中的能量消耗主要包括通信能耗、数据采集能耗和计算能耗。其中, 通信能耗所占比重最大。大量研究表明, 通信过程中主要能量浪费有: 冲突, 非目的节点接收并处理数据形成的串音, 发送/接收不同步导致数据分组空传。

MAC 协议中主要的通信延时存在以下几个方面: 冲突导致数据包的重传, 延迟了数据发送时间; 睡眠机制造成了通信时延; 复杂的 MAC 协议计算也造成了一定的通信时延。

2 无线传感器网络 MAC 协议分类

WSN 的特点之一就是应用相关性, 目前所提出的 MAC 协议还没有一个统一的分类标准。通常, 根据信道访问机制的不同可分为基于竞争的协议、基于调度的协议以及混合 MAC 协议; 根据 MAC 协议在网络 QoS 性能各指标方面的表现, 可分为实时 MAC 协议、能量高效 MAC 协议、安全 MAC 协议、可扩展性 MAC 协议等。根据控制方式可以分为分布式 MAC 协议和集中式 MAC 协议。根据传输的发起者可分为接收者发起和发送者发起的 MAC 协议。

3 无线传感器网络 MAC 协议实时性分析

目前, 学者提出了很多无线传感器网络 MAC 协议, 本文分系列对其机制和实时性进行分析。

3.1 S-MAC 协议及其改进协议

S-MAC 协议^[1]及其改进协议主要包括 S-MAC, T-MAC

及 D-MAC 协议。为了节省能耗, 减少空闲侦听时间, 均采用节点周期睡眠调度机制。S-MAC 的主题思想是: 传感节点采用周期睡眠/唤醒机制以减少空闲侦听, 唤醒后侦听信道, 根据信息判断是否需要发送或接收数据。节点保存接收的邻居节点的调度信息, 选择收到的第一个为自己的调度周期, 如果在侦听时间内没有收到邻居节点的调度信息, 广播自己的调度信息, 形成具有相同调度周期的节点虚簇, 保证了相邻节点调度周期同步。S-MAC 的周期调度机制明显减少了空闲侦听, 较好地实现了 WSN 的能量有效性。但该协议帧长度和占空比固定, 节点固定的缓存大小和一定的延迟要求与协议的周期产生冲突, 唤醒时间主要依赖于消息速率。周期睡眠造成通信延迟累加。由此可以看出, S-MAC 协议的实时性较差, 具有较大的传输延时。

针对 S-MAC 协议固定的睡眠/唤醒占空比引起的缺陷, T-MAC 协议根据通信流量动态调整唤醒时间, 减少空闲侦听时间。T-MAC 协议定义了 4 类激活事件, 如果在唤醒时间内没有发生任一件激活事件, 则节点认为信道空闲, 节点进入睡眠状态, 该方法调整了睡眠时间, 但随机睡眠引起了早醒问题。

由于 S-MAC 和 T-MAC 协议中存在睡眠延时问题, 节点必须等到唤醒时间才能发送数据, 这样, 节点的睡眠延时会随着传输跳数而累加。D-MAC 协议提出了一种针对该问题的改进措施。根据节点转发数据形成的数据采集树, D-MAC 协议采用交错调度机制, 将唤醒/睡眠周期细分为接收时间、发送时间和睡眠时间, 接收时间和发送时间相等, 均为发送一

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60475035)

作者简介: 李洪峻(1979-), 男, 博士研究生, 主研方向: 无线传感器网络; 李 迅, 副教授; 马宏绪, 教授

收稿日期: 2009-04-14 **E-mail:** rm9200@nudt.edu.cn

个数据分组的时间。每个节点的调度具有不同的偏移，下层节点的发送时间对应于上层节点的接收时间。在理想情况下，数据能够连续地从数据源节点传送到目的节点，消除了睡眠延时。D-MAC 协议具有很好的实时性。

基于上述分析可知，S-MAC, T-MAC 的不同点是调度周期中节点唤醒时间所占的比例不同；S-MAC, T-MAC 采用基于竞争的信道访问机制，而 D-MAC 采用基于调度的信道访问机制；T-MAC 协议是 S-MAC 协议的补充，而 D-MAC 协议是对前 2 种协议的改进。

3.2 B-MAC 协议及其改进协议

B-MAC 协议^[2]系列更多地利用了竞争协议对无线信道的“抢占”原则，睡眠调度更具主动性，同时减少对时钟同步精度的要求。B-MAC 及其相关协议主要包括 B-MAC 协议、WiseMAC 协议和 X-MAC 协议。

B-MAC 协议使用扩展前导和低功率侦听(LPL)技术实现低功耗通信，采用空闲信道评估技术进行信道裁决。节点在发送数据分组之前先发送一段长度固定的前导序列，通过先序采样技术达到减少节点空闲侦听时间的目的。为避免分组空传，前导序列长度要大于接收方睡眠时间。若节点唤醒后侦听到前导序列，则保持活跃状态，直到接收到数据分组或信道变得再次空闲为止。B-MAC 协议较长的固定前导序列造成发送方和接收方能耗增加和发送方邻居节点串音。节点在前导序列结束后才能接收到有效数据，因此，前导序列造成了传输延时，平均接收延时为前导长度的一半。B-MAC 协议实时性不高。

考虑到 B-MAC 较长的固定前导序列，WiseMAC 动态调整前导长度，当节点要传送数据至其邻居时，先检查该邻居的采样调度，并在该邻居采样之前发送一个较短的前导序列，等邻居活动后将检测到此前导先序并很快进入接收数据状态。因此，适中长度的前导先序不仅节约了发送方的能量，也缩短了接收方等待接收数据的时间。为了减少固定前导冲突概率，采用随机唤醒前导。

X-MAC 协议在上述协议的基础上再次缩短前导序列的长度。前导序列被分成很多份较小的频闪前导，其中包含目标节点地址，传输过程中中间节点发现自己是非接收节点时，尽早丢弃分组并进入睡眠。接收节点利用频闪前导之间的时间间隔，向发送源节点发送早期确认。发送节点收到早期确认后立刻发送数据分组，这样可以避免发送过多的前导信息，节省能量消耗，同时也减少了接收节点侦听时间。X-MAC 协议同时采用了一种自适应算法，以减少单跳延时。X-MAC 在能量效率、吞吐量和延时等性能上优于 B-MAC 和 WiseMAC。

3.3 基于流量自适应技术的 MAC 协议

由于节点空闲侦听的能耗很大，且网络负载越小，空闲侦听比例越大，因此，采用流量自适应技术，动态调整占空比，是提高能效的较好方法。P-MAC 协议^[3]、TRAMA^[4]是根据网络流量调节占空比方法的典型代表。

P-MAC 协议的帧分为模式循环时间帧和模式交换时间帧。模式循环时间帧由多个数据时隙和一个特殊时隙组成。在数据时隙内节点可以传输数据，在特殊时隙内，所有节点都被唤醒，用来广播信息。最后，P-MAC 协议保留若干时隙用来进行模式交换。节点根据模式决定在每个时隙睡眠或唤醒。节点以模式 1 开始每一个帧时间，在每个模式位为 1 的时隙内，节点检查是否有数据需要发送。如果没有，则模式变化借鉴网络 TCP 窗口慢启动算法的方法，逐步增加模式中

0 位的数量。不论节点任何时候有数据需要发送，模式可以立即增加 1。在模式交换时间帧中，节点广播自己的模式，同时根据接收到的邻居节点模式，计算自己的下一个模式循环时间帧中的睡眠调度。

在 P-MAC 协议中，当网络流量较小时节点睡眠时间更长，能量浪费更少。但有些节点可能因为没有收到调度更新，造成邻居节点之间不同的调度从而产生冲突，增加传输延时；邻居节点间协商产生睡眠-唤醒调度，收敛时间长；传输延时较大。

TRAMA 协议是基于调度机制设计的，同时加入流量自适应技术，动态调整占空比。TRAMA 协议将时间划分为连续时隙，根据局部两跳内的邻居节点信息，采用分布式选举机制计算节点无冲突发送的每一个时隙。同时根据实际流量，避免把时隙分给无数据流量的节点，没有数据收发的节点转入睡眠状态，减少空闲侦听能耗。

TRAMA 协议时间同步存在一定的通信开销；协议对节点存储空间和计算能力要求很高，实现难度大；同时，为了适应由于节点变化带来的网络动态拓扑结构的变化，引入了交替的随机访问和调度访问周期，同时该交替机制增加了端到端延时。

3.4 基于 TDMA 机制的 MAC 协议

时分复用(TDMA)机制就是为每个 WSN 节点分配独立的用于数据收发的时隙，而节点在无收发空闲时隙内转入睡眠状态。相比随机竞争接入机制，TDMA 方式本身就更能节省能量。基于 TDMA 机制的 MAC 协议典型的代表是 EMACs 协议^[5]、LMAC 协议、AI-LMAC 协议。

Van Hoesel 等人结合物理层与网络层的特点，提出 3 个 TDMA 协议。EMACs 协议的基本原理是：采用分布式算法选举主动节点，构成连通的骨干通信网络，在拥有的每一个时隙内主动节点协商产生调度。被动节点没有时隙所有权，只能通过向主动节点申请后才能发送信息，其他大多数情况下保持睡眠。EMACs 协议帧格式主要由 3 个部分组成：通信请求，通信控制及数据，如图 1 所示。

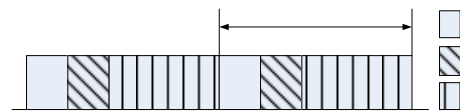


图 1 EMACs 帧格式

而 LMAC 协议让所有节点都拥有自己的时隙，所有节点都在主动状态下工作。LMAC 协议帧在时间上把信道分成许多时隙，形成一个固定长度的帧结构。一个时隙包含一个业务控制时段和固定长度的数据时段。帧结构的管理机制非常简单，每个节点控制一个时隙。当一个节点需要发送数据包时，它会一直等待，直到属于自己的时隙到来。在每个时隙的控制时段内，节点首先广播消息头，然后马上发送数据；监听到消息头的节点，如果发现自己不是此消息的接收者，它会将自己的无线装置关闭。与其他的 MAC 协议相比，接收端正确接收一个消息后，LMAC 协议不需要向发送端回送确认消息。LMAC 协议将可靠性问题留给高层协议来处理，帧格式如图 2 所示。

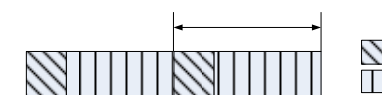


图 2 LMAC 帧格式

EMACs 和 LMAC 协议在每一个发送时隙都会产生一个用来时隙维护的较大开销,且节点不能根据更改时隙的所有权去适应网络流量的变化。为此又提出了 AI-LMAC 协议。在该协议中每一个节点拥有一个统计数据流量的 DDT,网络节点被分成父子 2 种类型。父节点根据 DDT 建议子节点增加或减少时隙,同时来自父节点的建议保证子节点间的公平性。为了节省能量,节点只在帧开始时自己拥有的第 1 个时隙内发送控制信息,控制信息包含节点拥有的时隙信息和当前帧所要传输的数据信息。协议帧格式与 LMAC 协议相同。AI-LMAC 协议也提供了 LMAC 协议中不曾有的数据传输应答。

AI-LMAC 协议在 EMACs 和 LMAC 协议的基础上增加了流量自适应特性,减少了时隙维护开销,但是,上述 3 个协议在大规模网络初始配置时产生相当长的延时,时隙碰撞问题在好几个帧内才能解决。

4 典型 MAC 协议实时性比较

由于 WSN 具有面向应用的特点,因此,WSN 的 MAC 协议各具特色,没有统一的标准,不同的协议所表现出的性能优缺点也不一样。按照 MAC 协议的顺序,对 MAC 协议的能量有效性、实时性以及应用范围进行比较,如表 1 所示。总体上看,目前所提出的 MAC 协议,实时性比较差,或者很少考虑实时性问题。

表 1 MAC 协议性能比较

协议名称	接入机制	能量有效性	实时性	应用环境
S-MAC	基于竞争机制	较好	很差	小规模应用
T-MAC	基于竞争机制	较好	较差	大规模应用
D-MAC	基于调度机制	好	很好	数据采集树结构,小规模
B-MAC	基于竞争机制	较好	一般	大规模应用
WiseMAC	基于竞争机制	较好	一般	大规模应用
X-MAC	基于竞争机制	一般	较好	中等规模应用
P-MAC	基于调度机制	一般	一般	大规模应用
TRAMA	基于调度机制	好	较差	小规模应用
EMACs	基于调度机制	较好	较好	小负载结构化网络
L-MAC	基于调度机制	较好	较好	小负载结构化网络
AI-LMAC	基于调度机制	好	较好	小负载结构化网络

5 结束语

经过分析总结 WSN 现有的 MAC 协议,其实时性与应用需求相比还有较大的差距,进一步研究的方向主要有以下几

(上接第 77 页)

然后通过非常便利的路径到拥有资源的节点下载。可以说,它为因特网的信息搜索提供了全新的解决之道。

4 结束语

本文提出一种基于节点兴趣的非结构化 P2P 搜索机制,通过在含有相似兴趣的节点之间添加连接,将其组织在一起构成兴趣覆盖网络。在信息搜索时,只查询路由到相关的节点上,从而改善搜索效率。模拟实验结果表明,基于节点兴趣的非结构化 P2P 搜索机制可以减少信息搜索时的平均搜索路径长度,大幅度提高了搜索的成功率。

参考文献

[1] 杨天路,刘宇宏,张文. P2P 网络技术原理与系统开发案例[M]. 北京:人民邮电出版社,2007:59-63.
 [2] Hildrum K, Kubiatowicz J, Rao S. Distributed Object Location in a Dynamic Network[C]//Proceedings of the 14th ACM Symp. on Parallel Algorithms and Architectures. Winnipeg, USA: ACM Press, 2002:41-52.

个方面:

(1)对于 MAC 协议,由于实时性应用需求增加(如监控系统等),必须提高 MAC 协议的实时性。

(2)现有的 MAC 协议大多适用于静态节点,较少考虑节点移动的情况,节点的移动使得网络的拓扑变化、节点相互之间的睡眠调度将被打乱。面对实际应用,有必要设计能适应网络节点移动、具有较强扩展性的实时 MAC 协议。

(3)WSN 应用的特点是面向特定应用,因此,网络流量类型具有特殊性,设计实时 MAC 协议时,应该认真分析应用需求,充分考虑流量类型的特点,实现高效的、具有针对性的 MAC 协议。

(4)由于 WSN 节点计算能力有限,因此期望实时 MAC 协议的算法实现简单,复杂度低,尽量提高效率、减少计算能耗及时间。

参考文献

[1] Ye Wei, Heidemann J, Estrin D. An Energy-efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Network[C]//Proc. of the 21st Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. San Francisco, USA: IEEE Computer Society, 2002.
 [2] Polastre J, Hill J, Culler D. Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks[C]//Proc. of the 2nd ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems. Baltimore, USA: [s. n.], 2004:95-107.
 [3] Zheng Tao, Radhakrishnan S, Sarangan V. P-MAC: An Adaptive Energy-efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks[C]//Proc. of the Parallel and Distributed Processing Symposium. Piscataway, USA: IEEE Computer Society, 2005:237-247.
 [4] Kwon Y. Energy-efficient, Traffic-adaptive, Fast Collision Resolution MAC for WSNs[C]//Proc. of the 3rd International Conference on Ubiquitous Intelligence and Computing. Wuhan, China: [s. n.], 2006:586-594.
 [5] Van Hoesel L F W, Havinga P J M. A TDMA-based MAC Protocol for WSNs[C]//Proc. of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. Baltimore, MD, USA: [s. n.], 2004.

编辑 顾逸斐

[3] 吕建明,刘悦. P2P 与信息检索[J]. 信息技术快报, 2005, 3(2):112-114.
 [4] 朱晓姝,周娅,黄桂敏. 基于小世界层次分布式路由模型研究[J]. 计算机工程, 2006, 32(15):120-122.
 [5] Sripanidkulchai K, Maggs B, Zhang Hui. Efficient Content Location Using Interest-based Locality in Peer to Peer Systems[C]//Proc. of the 22nd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. San Francisco, USA: IEEE Press, 2003:2166-2176.
 [6] Reynolds P, Vahdat A. Efficient Peer to Peer Keyword Searching[M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2003.
 [7] 罗杰文. Peer to Peer(P2P)综述[EB/OL]. (2005-05-05). <http://www.intsci.ac.cn/users/luojw/paper/p2p.htm>.
 [8] 青桂仙,苏筱蔚,陈淑艳. 中文文本挖掘的无词典分词的算法及其应用[J]. 吉林工学院学报, 2002, 23(1):16-18.

编辑 张正兴

