

◎ 博士论坛 ◎

低延迟的能量有效无线传感器网络 MAC 机制

李巧勤, 曾家智

LI Qiao-qin, ZENG Jia-zhi

电子科技大学 计算机科学与工程学院, 成都 611731

School of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China

E-mail: helenli803@uestc.edu.cn

LI Qiao-qin, ZENG Jia-zhi. Low-latency and energy-efficiency MAC scheme in wireless sensor networks. *Computer Engineering and Applications*, 2010, 46(3): 1-3.

Abstract: This paper proposes a MAC scheme to schedule node according to its location on the routing path. The scheme aims to reduce energy consumed on idle listening and reduce latency caused by sleep. Simulation results conform that the scheme is energy efficiency and helpful for reducing latency.

Key words: wireless sensor network; node scheduling; Media Access Control (MAC); idle listening; energy efficiency

摘要: 提出一种 MAC 机制, 根据节点在路由路径上的位置调度节点, 目的在于减少节点空闲侦听的能量消耗, 同时减少因休眠引起的延迟。仿真结果表明该机制在保证能量有效的同时, 也有助于减少延迟。

关键词: 无线传感器网络; 节点调度; 介质访问控制; 空闲侦听; 能量有效

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2010.03.001 **文章编号:** 1002-8331(2010)03-0001-03 **文献标识码:** A **中图分类号:** TP393

1 引言

无线传感器网络通常由一定数量的传感器节点和一个或多个 sink 节点组成。传感器节点负责感应数据, sink 节点负责收集和處理数据。由于传感器节点的能量非常有限, 并且通常难以补充, 因此需要通过有效的能量利用来延长传感器网络的寿命。文献[1]指出在很多传感器网络应用中, 节点空闲侦听消耗的能量在总能量消耗中占较大比例, 这部分能量消耗不可忽略。文献[2]提出让空闲节点处于省电模式, 当通信事件发生时, 再将节点切换到活动(active)状态, 即节点交替处于活动和休眠(sleep)状态, 这种设计技术称为 duty cycle。采用低 duty cycle 可以有效减少空闲侦听(idle listening)的能量消耗, 但是在基于多跳(multi-hop)路由的传感器网络中, 会引起较大的传输延迟。

针对多跳路由的传感器网络, 提出一种 E-MAC 机制, 既保证能量的有效利用, 同时又可减少节点因休眠引起的延迟, 在延长网络寿命的同时, 也使服务质量(QoS)得到保证。

2 相关工作

为了减少节点休眠引起的延迟, 一些文献提出根据负载调整 duty cycle。文献[1]提出自适应监听策略 SMAC, 若节点在休眠状态监听到邻居节点的传输, 则在邻居节点传输结束时唤醒

自己一小段时间, 如果自己正好是其邻居节点的下一跳, 则可以立即接收数据而不必等到下一次调度。文献[3]提出 T-MAC, 可以动态调整节点处于活动状态的时间。只要有激活事件发生, 则节点保持监听, 直到在指定时间间隔内没有发生激活事件。这里的激活事件包括接收任何类型的数据或无线接收器感应到信号。当节点到 sink 的路径需要经过多跳时, 前面提到的策略不能很好地解决延迟问题。

在文献[4]提出并实现 Z-MAC 协议, 这是一个混合协议, 利用 TDMA 和 CSMA 各自的优点, 并避开各自的缺点。在低信道竞争环境下, Z-MAC 可以提高信道利用率, 减少延迟; 在高信道竞争环境下, Z-MAC 可以达到较高的信道利用率, 并在两跳范围内的邻居节点减少冲突。最坏情况下, Z-MAC 的性能与 CSMA 相同。在某些特定应用场合, Z-MAC 对提高能量利用率有效, 但这种根据负载进行调节的机制实现复杂, 需要付出额外的代价。

Johnwan K. 等人采用异步 sleep-wake 调度方法, 每个节点的 sleep-wake 调度与其他节点无关^[5]。为了减少延迟, 提出任播(anycast)技术, 即每个发送节点从候选节点集唤醒一组邻居节点, 然后发送节点从中选择第一个唤醒的节点转发分组。作者对异步 sleep-wake 调度控制的优化、候选邻居节点的选择、邻居节点的任播优先级等问题进行了研究。

基金项目: 国家留学基金委高水平大学研究生资助项目。

作者简介: 李巧勤(1972-), 女, 博士生, 讲师, 主要研究领域为无线传感器网络, 新型网络体系结构; 曾家智(1939-), 男, 教授, 博导, 主要研究领域为新型网络体系结构。

收稿日期: 2009-09-28 修回日期: 2009-11-20

3 系统模型

3.1 基本假设和网络模型

假设网络中所有传感器节点都静止, sink 节点位于网络区域中心位置。根据传感器节点到 sink 的距离(跳数, hop), 将节点分为不同的层(layer), 具有相同跳数的节点属于同一层。每一层又可分为若干簇(cluster), 每个簇由位于同一层的节点和一个位于相邻内层(靠近 sink)的簇头(cluster head)组成。每个节点将感应的数据发送到其簇头, 簇头负责将来自本簇成员节点和外层簇头的数据转发到其内层簇头, 直到数据到达 sink 节点。这种基于层的分簇结构被称为 PMRC(Progressive Multi-hop Rotational Cluster)结构^[6]。图 1 显示了一个基于 PMRC 结构的网络, 包含 3 层, 其中阴影部分是位于第 2 层的一个簇, 包含节点 6、7、8、9 和 10, 其簇头是位于第 1 层的节点 1。

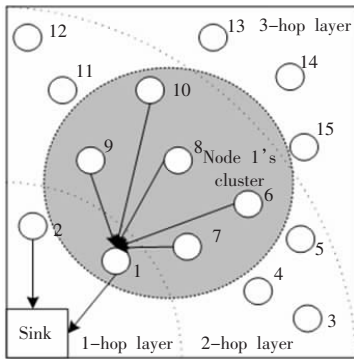


图 1 基于 PMRC 结构的网络

3.2 能量模型

假设每个传感器节点具有相同的初始能量, 而 sink 节点不受能量限制, 每个节点都可能被选做簇头。传感器节点的能量消耗主要包含四部分: (1) E_t , 发送本簇节点产生的数据以及转发来自外层的数据所消耗能量; (2) E_r , 接收来自外层的数据所消耗的能量; (3) E_s , 节点空闲侦听消耗的能量; (4) E_c , 网络构建过程中接收和发送控制分组所消耗能量。由于 E_c 远小于 E_t , 因此这里忽略 E_c 。

考虑自由空间(free space)信道模型^[7], 则在距离为 r 的范围传送 l 位(bit)数据所消耗能量为:

$$l(E_{elec} + \epsilon r^2) \quad (1)$$

其中, E_{elec} 和 ϵ 为系统参数。相应地接收 l 位数据所消耗能量为 lE_{elec} 。单位时间内节点空闲侦听消耗的能量用 e_{idle} 表示。各系统参数的取值分别为 $E_{elec}=50$ nJ/bit, $\epsilon=10$ pJ/bit/m², $e_{idle}=0.88$ mJ/s。

4 E-MAC 设计

4.1 E-MAC 调度机制

E-MAC 采用 duty cycle 技术, 节点交替处于活动和休眠状态。处于活动状态时节点的接收器打开, 可以接收和发送数据。处于休眠状态的节点关闭接收器, 以减少空闲侦听的能量消耗。在基于 PMRC 结构的网络中, 从各个节点到 sink 的数据传输路径构成一个树形结构, 称为数据聚集树 DGT(Data Gathering Tree), 如图 2 所示。DGT 以 sink 为根, 中间节点为簇头, 叶子节点为簇内的成员。E-MAC 利用 DGT 中不同层次的节点之间的关系, 将各层节点处于活动状态的时间错开, 使节点产生的数据尽量连续地传送到 sink, 以减少因节点休眠引起的传输延迟。

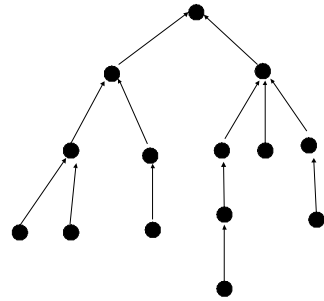


图 2 数据聚集树 DGT

图 3 显示了各层节点的调度顺序。根据节点在 DGT 中所处的层次进行节点调度, 第 $i+1$ 层节点的活动调度时间 a_{i+1} 与第 i 层节点的活动调度时间 a_i 之间的关系如下:

$$a_i = a_{i+1} + T_s \quad (2)$$

其中, T_s 为分组从发送方到接收方(簇头)的传输时间。采用这样的顺序调度, 第 $i+1$ 层节点到达第 i 层时, 第 i 层节点也正好处于活动状态, 可以接收并转发数据, 减少因休眠引起的延迟。

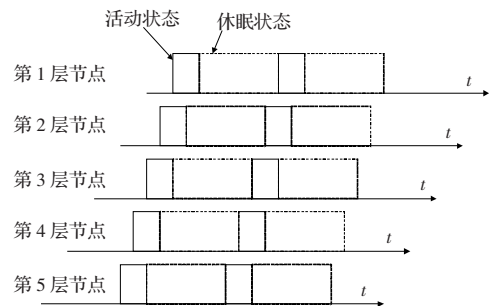


图 3 EMAC 调度方式

4.2 E-MAC 的信道访问控制

传感器节点传输数据时要与其传输范围内所有节点竞争信道, E-MAC 实现了基于 CSMA 的信道访问机制减少冲突。这里没有采用 RTS/CTS, 因为在大多数传感器网络应用中, 分组长度比较小, RTS/CTS 会增加额外的能量消耗。传感器节点发送数据之前需要侦听信道直到信道空闲, 然后产生一个随机回退(random backoff)间隔作为发送之前额外的延迟时间。只要信道空闲, 回退计数器以时槽(slot)为单位递减, 一旦检测到信道上传输则终止回退过程, 并重复上面的过程直到回退计数器为 0, 则节点发送数据。用 CW 表示竞争窗口, 则产生的回退间隔为介于 0 到 $CW-1$ 之间的一个随机数。

实现 E-MAC 需要在节点之间进行时间同步, 因为节点需要知道其簇头节点的调度时间。现有技术如 RBS^[8]即使在多跳的网络环境, 也可以实现时间同步, 其精度可以达到 10 μ s 以内。基于 PMRC 结构的网络, 一旦网络构建过程完成, 则各节点知道自己的簇头节点, 其同步实现相对容易。后面的描述假设时间同步是可行的。

5 仿真实验

为了验证提出的 E-MAC 机制的性能, 利用仿真工具 OPNET 进行了仿真实验, 并与另外两种 MAC 进行比较: (1) 节点完全处于活动状态的 CSMA-CA (在仿真结果图中用 F-MAC 表示); (2) SMAC 的简单版本(仿真结果中用 SMAC 表示)。

5.1 仿真环境

所有的仿真实验, 传感器网络覆盖区域为 250 m \times 250 m 的

矩形区域, sink 节点位于网络区域的中心位置。传感器节点随机均匀分布在网络区域(由 Matlab 产生各节点的位置), 随机选择 100 个节点作为源节点, 产生并发送数据。E-MAC 和 SMAC 的 duty cycle 都设置为 10%, 即在节点的一个完整周期中, 处于活动状态和休眠状态的时间分别为 100 ms 和 900 ms。

表 1 实验参数

参数	取值
ϵ	10 $\mu\text{J}/\text{bit}/\text{m}^2$
Energy model	E_{elec} 50 nJ/bit
	e_{sdr} 0.88 mJ/s
Number of nodes	400
Radio transmission range	40 m
Packet length	100 Byte
Duty cycle	10%

5.2 仿真结果

以下显示的结果为对 20 组源节点进行仿真的结果平均值。

图 4 显示各层节点单位时间内的节点平均能量消耗(average energy per node)。从内层(靠近 sink)到外层, 节点的平均能量消耗先呈下降趋势, 随后呈轻微增加趋势。一方面, 在基于 PMRC 的网络中, 内层节点因要转发来自其他外层的所有数据, 负载最重; 另一方面, PMRC 的网络拓扑构建方式决定了外层节点在网络构建时因空闲侦听消耗的能量更多。对同一层的节点, E-MAC 和 SMAC 消耗的能量接近, 都小于 F-MAC 消耗的能量, 因为 E-MAC 和 SMAC 的节点交替处于活动和休眠状态, 减少了节点因空闲侦听消耗的能量。

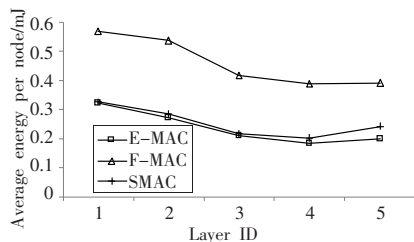


图 4 各层节点平均能量消耗

图 5 显示各层节点的平均传输延迟(average packet latency)。从内层到外层, 三种 MAC 的节点平均传输延迟逐层增加。对同一层的节点, F-MAC 的传输延迟最小, 这是因为 F-MAC 的节点一直处于活动状态, 发送方不会因为接收方的休眠而等待。E-MAC 的传输延迟小于 SMAC, 因为 E-MAC 根据数据聚集树上各层节点的传输路径进行节点调度, 外层节点发送数据时, 内层的接收方处于活动状态的可能性比 SMAC 更大, 减少了因节点休眠引起的等待时间。

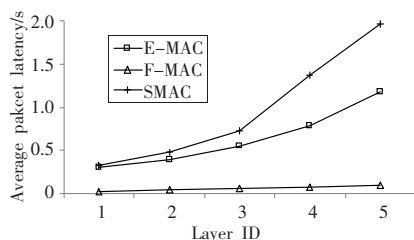


图 5 各层节点的平均延迟

图 6 显示网络负载对传输延迟的影响。改变分组产生率, 可以改变负载。随着负载的增大, 各种 MAC 的传输延迟增加, SMAC 的延迟增加速度最快。尤其是当负载增加到某个门限值

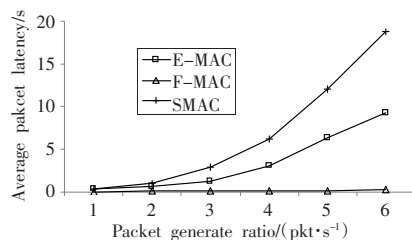


图 6 网络负载对传输延迟的影响

之后, 传输延迟急剧增加, 这是因为竞争信道更加激烈。在相同的网络负载下, F-MAC 的延迟最小, E-MAC 的延迟小于 SMAC。

与图 5 相比, 随着网络负载的增加, 平均分组传输延迟显著增加。这是因为在负载增加时, 节点竞争信道成功的概率下降, 导致节点等待更长时间。

图 7 显示了网络负载对分组递交率(delivery ratio)的影响。分组递交率是指到达 sink 的分组与网络实际产生的分组总数的比率。随着负载的增加, 各种 MAC 的分组递交率都有所下降, 其中 SMAC 的下降速度最快。在相同负载下, F-MAC 具有最高的分组递交率。与 SMAC 相比, E-MAC 对负载的承受能力较好, 这说明 E-MAC 在负载较轻的场合优势更明显。

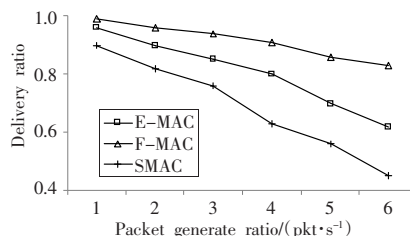


图 7 网络负载对分组递交率的影响

6 结束语

为了延长无线传感器网络的寿命, 可以让节点交替处于活动和休眠状态, 以节省能量, 但这会引起传输延迟的增加。该文的主要工作在于如何根据节点之间的层次关系对节点进行调度, 在有效利用能量的同时, 尽量减少传输延迟。

尽管提出的 MAC 机制是在基于 PMRC 结构的网络中实现的, 但该调度机制可以适用于其他基于多跳路由且具有单个 sink 的静态传感器网络环境。今后的工作将进一步研究如何对节点进行按需调度, 在能量利用和延迟之间达到更好的平衡。

参考文献:

- [1] Wei Y, John H, Deborah E. Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks[J]. IEEE/ACM Trans Networks, 2004, 12(3): 493-506.
- [2] Rong Zh, Robin K. On-demand power management for ad hoc networks[J]. Ad Hoc Networks, 2005, 3(1): 51-68.
- [3] Tijs V D, Koen L. An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks[C]//Proceeding of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, Los Angeles, 2003: 171-180.
- [4] Injong R, Ajit W, Mahesh A, et al. Z-MAC: A hybrid mac for wireless sensor networks[J]. IEEE/ACM Trans Networks, 2008, 16(3): 511-524.