

基于节点流量的低能耗 无线传感器网络 MAC 协议

廖先林, 耿 娜, 赵林亮, 王光兴
(东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004)

摘 要: 根据传感器节点的生存时间取决于节点能量消耗的特点, 设计了节能的 MAC 协议。提出了一种基于节点流量的低能耗无线传感器网络 MAC 协议——TBEE-MAC(traffic-based energy efficient MAC)。在 TBEE-MAC 中, 节点采用周期性休眠机制来节省能量, 提出了活动时间结构和基于节点流量的同步调度方式, 在时间误差允许的范围内, 调整了同步调度周期, 减少了能量消耗。仿真显示, TBEE-MAC 在提供低延时性能的基础上, 能量有效性相对于 S-MAC 协议有很大提高。

关 键 词: 无线传感器网络; MAC 协议; S-MAC 协议; 低能耗; TBEE-MAC 协议
中图分类号: TP 393.01 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-3026(2007)10-1458-04

An Energy-Efficient MAC Protocol Based on Traffic of Nodes for Wireless Sensor Networks

LIAO Xian-lin, GENG Na, ZHAO Lin-liang, WANG Guang-xing
(School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China.
Correspondent: GENG Na, E-mail: ggna17@163.com)

Abstract: According to that the lifetime of sensor nodes depends on their energy consumption, an energy-efficient MAC (medium access control) protocol was designed to prepare the TBEE-MAC, i.e., the traffic based energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks, where the traffic refers to the nodes in network. In the TBEE-MAC protocol the sensor nodes sleep periodically to save energy, and a listening time framework with relevant synchronous scheduling based on traffic of nodes are suggested, which can readjust the periods of the synchronous scheduling within the range the time error is permitted to reduce energy consumption. Simulation results showed that TBEE-MAC obviously outperforms S-MAC in energy efficiency with shorter time-delay available.

Key words: wireless sensor network; MAC protocol; S-MAC protocol; energy-efficient; TBEE-MAC protocol

无线传感器网络(wireless sensor network)^[1]具有无中心节点、容易部署、可远程监控等众多优点,在军事、环境监测、工业控制、医疗和民用领域都有着广泛的应用前景^[2]。

无线传感器网络中的节点靠电池供电,节点的电池能量有限,节点数量大,放置环境复杂,使得节点更换电池困难。传感器节点的能量限制是整个传感器网络设计最关键的约束之一。在无线传感器网络的 MAC 协议中,节点的无效能耗主

要有以下几个方面:^①空闲侦听:节点不知道邻居节点何时向自己发送数据,射频模块必须一直处于接收状态,因此消耗大量的能源;^②冲突:多个节点同时向同一个节点发送数据,造成信号间相互干扰,使得接收方无法准确接收,这就需要重传发送的数据,造成能量浪费;^③串音:由于共用无线信道,节点可能接收和处理发往其他节点的数据,造成能量浪费;^④协议开销:MAC 协议的报头、控制包(如 RTS/CTS/ACK)和同步包不传

收稿日期: 2006-10-17

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(2003AA712032)。

作者简介: 廖先林(1963-),男,辽宁沈阳人,东北大学博士研究生; 赵林亮(1956-),男,辽宁沈阳人,东北大学教授; 王光兴(1937-),男,辽宁沈阳人,东北大学教授,博士生导师。

有效数据,消耗的能量对用户来说是无效的。

目前,MAC 协议在降低能耗方面已经提出了一些解决方案^[3-7]。本文在 S-MAC 协议的基础上提出了一种基于节点流量的低能耗无线传感器网络 MAC 协议——TBEE-MAC。经过理论分析和仿真显示,TBEE-MAC 在提供了低延时性能的基础上,能量有效性明显超过了 S-MAC。

1 S-MAC 协议

1.1 协议描述

S-MAC 是一种为无线传感器网络设计的分布式 MAC 协议,无须任何局部或全局主节点的调度便能让传感器节点发现相邻节点,并安排合理信道占用时间。它是一种基于竞争^[4]的控制协议,但加入了同步的功能。协议主要采用以下机制。

周期性工作/休眠机制: S-MAC 将时间划分为多个帧,每个帧由两部分构成:活动时间(Listen)和休眠时间(Sleep),如图 1 所示。活动时间又分为同步时间和数据时间两部分,其中同步时间通过发 SYNC 包来保持同步调度,数据时间用来与相邻节点进行通信并且发送在休眠期间的消息队列。

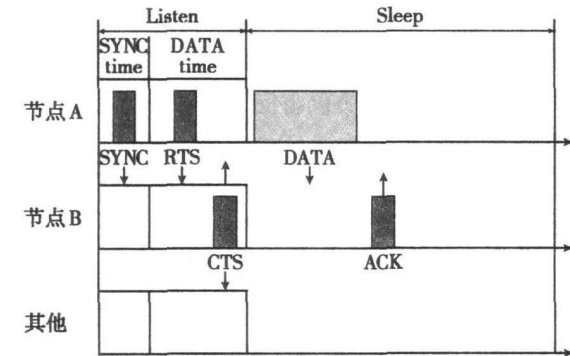


图 1 S-MAC 协议的基本机制
Fig. 1 Basic mechanism of S-MAC

虚拟簇同步机制: 每个节点独立地调度它的工作状态,周期性地进入休眠。为了便于相互通信,相邻节点之间应该尽量维持工作/休眠调度周期的同步。

自适应侦听机制: 为了减少由于节点周期性休眠导致通信延迟的累加效应,通信节点的邻居节点在通信结束后不立即进入休眠状态,而是保持侦听一段时间。如果节点在这段时间内收到 RTS 包,则可以立刻接收数据,无须等到下一次调度侦听周期,如果在这段时间内没有收到 RTS 包,则转入休眠状态直到下一次调度侦听周期。

S-MAC 协议为了减少碰撞和避免串音,还采

用了与 802.11MAC 协议类似的虚拟和物理载波侦听机制以及 RTS/CTS 的通告机制。同时又采用了消息传递技术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,既提高了发送成功率,又有效地减少了控制开销。

1.2 协议基本机制

S-MAC 协议是为了节省能量的需求而提出的,存在着不足之处: ① 协议中采用了周期性休眠机制来节省能量,但为了相邻节点通信,必须加入同步功能,因此在每个时间帧开始时都有一段同步时间,如图 1 所示,用来定期发送 SYNC 包使节点同步休眠,但这个同步周期通常至少是 10 倍时间帧长度,这就导致在很多同步时间,节点不用收发 SYNC 包,而只是处于空闲侦听状态,浪费了能量。④ 协议为了实现同步功能,解决传感器节点长期时钟漂移引起的时间误差问题,引入的 SYNC 包也增加了控制开销。

本文针对以上问题提出了一种新的低能耗无线传感器网络 MAC 协议 TBEE-MAC (traffic-based energy efficient MAC),将同步时间和数据时间结合在一起,用不同的同步包,实现了基于节点流量的同步调度功能,并且在时间误差允许的范围内,调整了同步调度周期。

2 TBEE-MAC 协议设计

2.1 时间帧结构

S-MAC 协议将时间分为很多帧,每帧由活动时间和休眠时间组成,活动时间又分为同步时间和数据时间两部分: 同步时间用来发送 SYNC 包,数据时间用来发送 RTS 和 CTS 包。TBEE-MAC 协议与 S-MAC 一样,也将时间分为很多帧,每帧由活动时间和休眠时间组成,但提出了不同的活动时间结构。分为两种情况: 一种情况是节点存在流量时的活动时间,如图 2a 所示,RTS 和 CTS 在需要同步时会携带同步信息;另一种情况是节点没有流量时的活动时间,如图 2b 所示,需要同步时用来发送 SYNC 包。使改进的 TBEE-MAC 活动时间比自适应侦听 S-MAC 减少了 22 ms,这样没有数据传输的节点会在活动时间结束后提早进入休眠状态,减少了空闲侦听时间,节省了能量。

2.2 基于节点流量的同步调度

在 TBEE-MAC 协议中,节点随着是否有数据传输而采用了不同的同步方式。当一个节点有数据要传输时,要先判断是否需要同步,如果需要同步,节点就会发送 RTS 包携带同步信息,

否则, 发送 RTS 包不携带同步信息. 而接收到 RTS 包的节点, 也先判断自己是否需要进行同步, 如果需要同步, 节点就回复 CTS 包携带同步信息, 否则, 回复 CTS 包不携带同步信息. 当一个节点没有数据要传输时, 如果节点不需要同步, 当侦听到自己是接收节点时则参与通信, 否则侦听直到休眠时间进行休眠; 如果节点需要广播同步消息时, 节点将推迟一段时间, 当侦听到信道一直空闲没有 RTS/CTS 交换时, 再发送自己的 SYNC 包进行同步, 否则将在下一个时间帧重新同步. 这样, 所有的节点都能够及时更新自己的时

钟漂移, 正确进入休眠时间, 并与邻居节点保持同步.

与 S-MAC 相比, TBEE-MAC 协议不仅减少了没有参与数据传输节点的空闲侦听时间, 而且也增加了参与数据通信节点的休眠时间. 携带同步信息的 RTS 和 CTS 控制包 (RTSSYNC 和 CTSSYNC) 在原来 RTS/CTS 的基础上, 添加了关于同步信息的 3 个域, 分别是状态 State, 同步节点号 SyncNode 和休眠时间 Sleep Time. 在仿真中, 比 RTS/CTS 仅增加了 4 个字节.

2.3 同步周期调整

在 S-MAC 协议中, 同步周期为 10 个时间帧, 即大约每 16 s 发送一次 SYNC 包来修正时间误差, 但根据 S-MAC 论文中对传感器节点时钟漂移进行测量, 得到定时器每秒最大偏移误差为 0.2 ms, 所以这个同步周期是可以适当延长的.

在 TBEE-MAC 中, 活动时间为 139 ms, 考虑到上述时间偏移值, 即经过将近 700 s 之后, 时间误差最大才达到 139 ms, 影响节点正常通信, 因此在保证网络正常工作的前提下, 改进协议中将同步周期延长到 30 个时间帧. 但由于改进协议中有可能出现延迟发送 SYNC 包的现象, 本文协议中为 25~30 个时间帧. 当节点传输数据之前, 先判断距离上次同步时间是否超过了 25 个时间帧, 如果超过了, 就会用控制包携带同步信息提前进行同步, 这样, 改进协议将同步周期设定为一个范围, 既避免了延迟发送 SYNC 包, 又可以使同步信息尽可能地由控制包携带发送, 减少了能量消耗.

2.4 协议流程

基于以上描述, 运行 TBEE-MAC 协议的基本流程如图 3 所示.

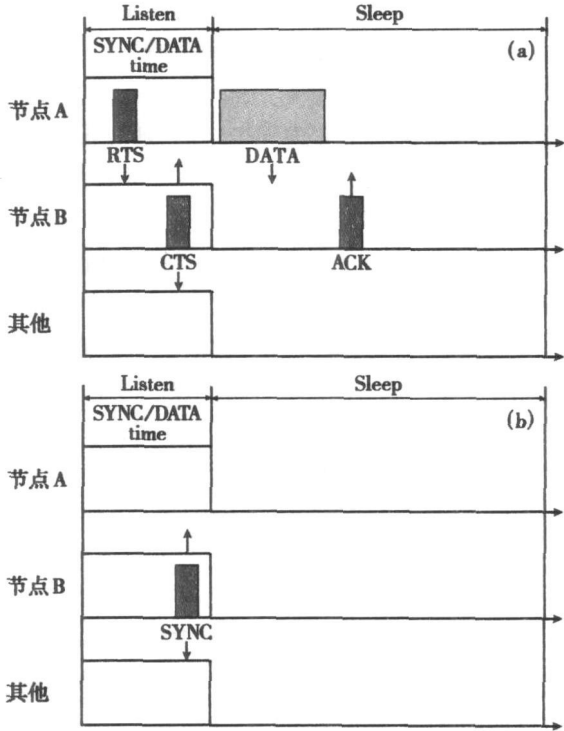


图 2 TBEE-MAC 协议的基本机制

Fig. 2 Basic mechanism of TBEE-MAC

- (a) 一节点有数据传输时;
- (b) 一节点没有数据传输时.

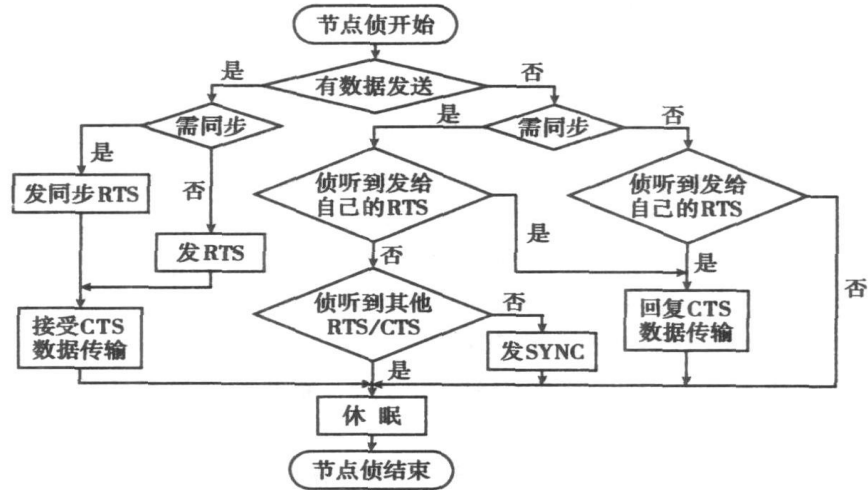


图 3 TBEE-MAC 协议基本流程

Fig. 3 Basic flow of TBEE-MAC

3 仿真结果

使用 NS-2^[7] 网络仿真进行性能评估。在仿真环境中布置了 10 个节点, 网络模型采用从源节点到目的节点为 9 跳的线性网络, 且节点被配置成只能与相邻的节点通信。网络中 CBR 数据包大小为 50B, 共发送了 50 个数据包。本文比较了普通 S-MAC(没有自适应侦听)、S-MAC 采用自适应侦听与 TBEE-MAC 采用自适应侦听这三种协议在 10% duty cycle 情况下的能耗和延时性能。

仿真过程主要用到的参数有网络带宽、发送功能消耗、接收功耗和空闲侦听功耗。本实验仿真参数设置为: 网络带宽 20 kb/s, 发送功耗 36 mW, 接收功耗 14.4 mW, 空闲侦听功耗 14.4 mW。

3.1 网络总的能量消耗

图 4 比较了节点总数为 10 的线性网络在不同的负载情况下运行三种 MAC 协议时网络总的能量消耗。由图 4 看出, 采用自适应侦听算法的协议能耗显著小于普通 S-MAC, 而且 TBEE-MAC 协议消耗最少的能量。当网络负载轻时, TBEE-MAC 比普通 S-MAC 和自适应侦听 S-MAC 分别节省了约 50% 和 30% 的能量。

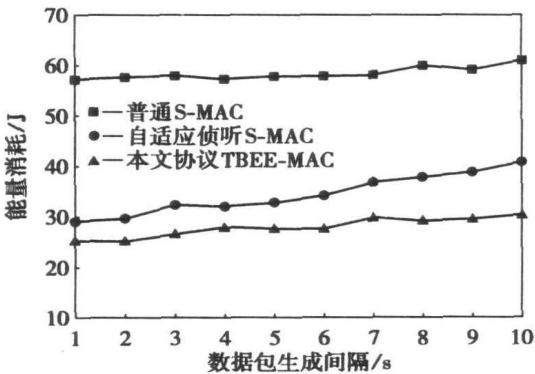


图 4 不同负载下的能耗比较

Fig. 4 Total energy consumption under different traffic loads

3.2 平均端到端延时

图 5 比较了节点总数为 10 的线性网络在不同的负载情况下运行三种 MAC 协议时平均的端到端延时。三种协议的平均端到端延时都随着数据包生成间隔的增大逐渐趋于平稳。TBEE-MAC 协议平均延时不足普通 S-MAC 的一半。

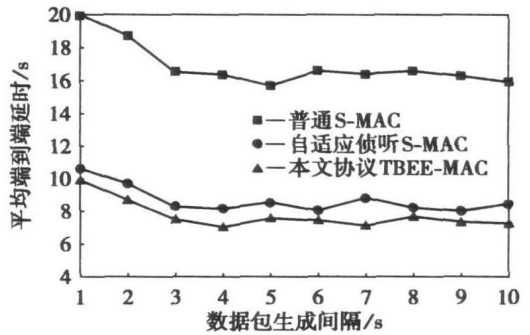


图 5 不同负载下的平均端到端延时比较

Fig. 5 Average latency under different traffic loads

4 结 论

本文针对 S-MAC 协议中同步时间空闲侦听和同步包发送的能量消耗问题, 提出了一种基于节点流量的低能耗无线传感器网络 MAC 协议——TBEE-MAC 协议。在 TBEE-MAC 中, 节点采用周期性工作/休眠机制, 提出了同步/数据共用时间, 采用了基于节点流量的同步调度方式, 并在时间误差允许的范围内, 调整了同步调度周期, 既减少了空闲侦听时间使节点提前进入休眠状态, 又避免了不必要的协议开销, 大大减少了能量消耗。经理论分析和仿真显示, TBEE-MAC 在提供低延时性能的基础上, 能量有效性明显超过了 S-MAC。

参考文献:

[1] Estrin D, Govindan R, Heidemann J. Next century challenges: scalable coordination in sensor networks[C] // Proceedings of the 5th Annual International Conference. NY: IEEE, 1999: 263-270.

[2] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramaniam Y, et al. Wireless sensor networks: a survey[J]. Elsevier Computer Networks, 2002, 38(4): 393-422.

[3] Ye W, Heidemann J, Estrin D. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks[C] // INFOCOM. NY: IEEE, 2002: 1567-1576.

[4] Dam T V, Langendoen K. An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks[C] // The First ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems. NY: IEEE, 2003: 145-151.

[5] Sohrab I K, Gao J, Lawadhiv A. Protocols for self organization of a wireless sensor network [J]. IEEE Personal Communications, 2000, 7(5): 16-27.

[6] Wei Y, Heidemann J, Estrin D. Medium access control with coordinated, adaptive sleeping for wireless sensor networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2004, 12(3): 493-506.

[7] Fall K, Varahan K. The ns manual (formally ns notes and documentation) [M/OL]. [2006-10-17]. <http://www.netyi.net/training/acaf8c9d16f948fe98dd1c1e9181b75e>.