

# TA-MAC: 一种流量感知的低能耗传感器网络 MAC 协议

舒俊浩<sup>1</sup>, 白光伟<sup>1</sup>, 沈 航<sup>2</sup>

(1 南京工业大学 计算机科学与技术系, 江苏 南京 210009; 2 南京理工大学 计算机科学与技术学院, 江苏 南京 210094)

**摘 要:** 提出一种流量感知的信道访问控制协议 TA-MAC. 其核心思想是通过引入自适应机制来适应流量变化, 根据负载的大小动态调整侦听期的实际长度, 有效减小了空闲侦听. 仿真结果表明, TA-MAC 在满足保持丢包率为零, 只轻微增加时延的情况下, 显著降低了能耗.

**关键词:** 无线传感器网络; MAC; 流量感知; 按需苏醒; 多跳发送

**中图分类号:** TP391.9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-7180(2011)12-0030-04

## TA-MAC: A Traffic-Aware Energy-Efficient MAC Protocol for WSNs

SHU Jun-hao<sup>1</sup>, BAI Guang-wei<sup>1</sup>, SHEN Hang<sup>2</sup>

(1 Department of Computer Science and Technology, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China;

2 College of Computer Sci. and Tech., Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** This paper proposes a novel traffic-aware MAC mechanism, i. e. TA-MAC. The purpose is to be aware of flow changes and to limit the period of idle listening. Our simulation results show that TA-MAC reduces energy consumption significantly, compared to DW-MAC while keeping packet loss ratio to be zero and only increasing delivery latency slightly.

**Key words:** WSNs; MAC; traffic aware; demand wakeup; multi-hop forwarding

### 1 引言

无线传感器网络部署环境复杂, 节点能量有限. 如何高效利用能量以最大化网络寿命, 一直是传感器网络设计中关注的核心问题之一<sup>[1]</sup>. MAC 协议通过协调节点接入信道的方式与时机, 保证信道资源高效有序的利用, 由于直接控制着节点数据包的收发工作, MAC 协议在传感器网络节省能耗的工作中起着至关重要的作用<sup>[2-3]</sup>.

在产生能耗的众多因素中, 空闲侦听是造成无线传感器网络能量浪费的主要原因<sup>[4]</sup>. 提出的 S-MAC 协议为此引入了周期性休眠机制<sup>[5]</sup>. RMAC<sup>[6]</sup>在 S-MAC 周期性休眠机制的基础上改进了发送时序, 允许数据包在单周期内通过尽可能多的跳数. 显著减小数据传输时延.

DW-MAC<sup>[7]</sup>在 RMAC 的发送时序的基础上又进一步引入了映射函数, 改善了网络在较高负载下的通信性能. DW-MAC 的不足之处是存在较大的空闲侦听的机会, 针对这一问题, 本文提出的 TA-MAC (Traffic Aware MAC) 协议.

### 2 流量感知的 MAC 协议 (TA-MAC)

#### 2.1 多跳预约发送机制

不同于 S-MAC 只在 DATA 阶段发送数据包 (如图 1 所示), TA-MAC 的多跳预约发送机制允许在 DATA 和 SLEEP 阶段都发包, 即在 DATA 阶段先发送预约控制包 RF (Reserve Frame), 节点根据 RF 预约的时间在随后的 SLEEP 阶段苏醒过来发送实际数据包. 由于 RF 长度较短且格式特殊, 可以在 DATA 阶段内进行多跳传输, 对应着实际数据包

收稿日期: 2011-03-14; 修回日期: 2011-05-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(61073197); 江苏省自然科学基金项目(BK2010548)

能在一周期内通过多跳距离.如图2所示,节点S要向节点C发送数据,它在DATA阶段开始时采用CSMA/CA竞争方式向外发出RF包. RF除了含有RTS/CTS包中具有如当前地址、下一跳/上一跳地址等所有字段外,还包含了一项特殊字段:最终目的地址. 利用最终目的地址,收到RF的节点可以通过查询路由表来确定自己是否需要转发RF. 图中A节点正好处于S到C的传输路径上,因此决定转发. 它将自己的下一跳B写入RF的下一跳地址字段后将该新的RF向外发送. B收到该RF包后重复同样的操作,很快RF包就到达了最终目的节点C. 在随后的SLEEP阶段节点S、A、B和C根据RF预约的时间准时苏醒过来采用DATA-ACK时序发送实际数据包. 本例中数据包在一周期内传递了4跳距离,这相比与传统发送时序极大地减小了时延.

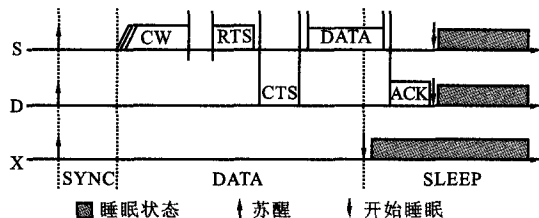


图1 S-MAC发送时序

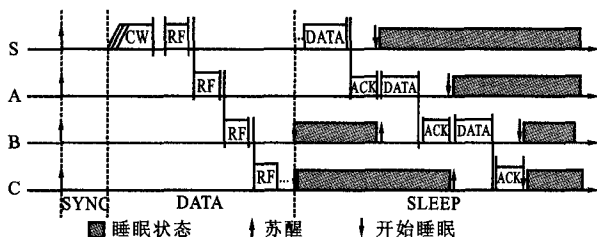


图2 TA-MAC发送时序

除了执行预约功能外,RF包兼有RTS和CTS的部分功能.具体地说(如图3所示),当源节点S发送RF包时,由于只是发起传输请求,它只起着RTS包的作用(A调用handleRTS()函数来处理).当A发送RF包时,它同时履行对上游节点S的确认(发送CTS)和向下游节点发起请求(发送RTS)的两项功能.相较于传统发送时序中一个数据包至少花费RTS/CTS两个控制包,RF的这种一包两用的特点不仅减小了控制开销还降低了碰撞的概率,帮助降低能耗和时延.

## 2.2 映射函数

TA-MAC通过映射函数来决定在SLEEP阶段的苏醒时间.映射函数将DATA阶段和SLEEP阶段的时间成比例映射,如图4所示,整个 $T_{DATA}$ 长度映射整个 $T_{SLEEP}$ 的长度,在DATA阶段的 $T$ 单位的

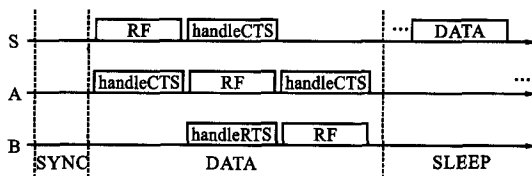


图3 RF包的双重作用

时间就对应SLEEP阶段中 $T \times T_{SLEEP} / T_{DATA}$ 单位的时间.因此,如果节点在距DATA阶段开始 $T_1$ 处成功发送或接收RF,就自动决定在距SLEEP阶段开始时间 $T_2 = T_1 \times T_{SLEEP} / T_{DATA}$ 处苏醒过来收发实际数据.

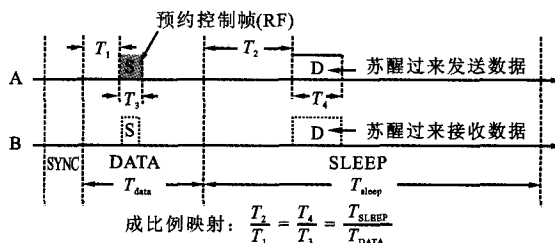


图4 映射函数

这种预约方式主要有两大优点:(1)节点能根据RF的收发时间自动决定收发实际数据包的时刻,不需要花费任何额外的控制开销.(2)它能完全避免实际数据包之间的碰撞.因为如果在发送数据包时碰撞就意味着在发送RF时就发生了碰撞,而根据规定这是不可能预约成功的.即Mapping Function能将数据碰撞的可能性完全排除在SLEEP阶段外,只让帧长度更小的RF包承担碰撞的风险,损失更小.

## 2.3 流量感知机制

DW-MAC为了实现单周期多跳传输,必须要有足够长的 $T_{DATA}$ 以保证预约包RF能传递尽量多的跳数.然而较长的 $T_{DATA}$ 也增加了节点空闲侦听的机会,造成能量浪费.如何既减少不必要的空闲侦听又保证传输跳数是一个设计难题.本文通过引入定时器来适应流量和限制空闲侦听时间来解决这个问题.

TA-MAC规定节点一进入DATA阶段即启动定时器,用来记录空闲侦听的时间.如果在连续的 $T$ 时间内节点及其邻节点都没有数据需要收发则认为近期内信道将一直空闲,节点因此在定时器超时(连续计时达 $T$ )时刻就进入休眠状态,从而避免了更多的空闲侦听.另一方面,定时器在超时前一旦发现节点或其邻节点开始收发数据就会立刻取消计数以防止影响RF包的正常收发,保证通信流畅.

图5展示了流量感知机制工作的三种典型案

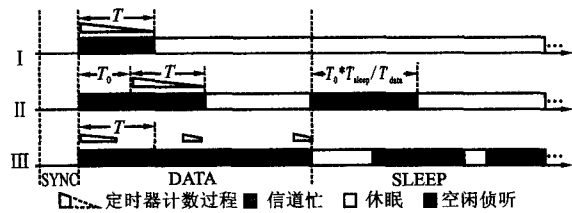


图 5 流量感知机制

例. 案例 I 属于低负载情况, 节点从 DATA 阶段开始就一直没有数据, 当空闲侦听达  $T$  后, 节点即刻进入休眠状态. 在这种情况下节点在整个周期中只侦听了  $T$  时间, 极大地节省了能耗. 案例 II 节点在 DATA 开始阶段参与了通信, 但在  $T_0$  后便开始空闲侦听, 当连续空闲侦听时间累计到  $T$  时, 节点开始休眠. 根据预约, 节点在随后的 SLEEP 阶段开始苏醒过来通信  $T_0 \times T_{SLEEP}/T_{DATA}$  长度的时间, 然后重新回归休眠状态. 案例 III 是流量感知机制在负载较大情况下的表现: 刚开始节点处于空闲侦听状态, 定时器开启, 但很快网络中有了流量, 节点可以马上取消定时器(未超时)参与到通信中去. 整个周期中定时器多次启动但节点都未因此进入休眠状态, 它说明了感知机制对高负载情况也有很好的适应性, 不会为了一味地节省能耗而导致过早休眠. 总体来说 TA-MAC 有很好的流量感知能力和适应能力, 流量小时倾向休眠, 流量大时倾向通信, 节能和时延两方面的性能都能得到保障.

合理地选择连续空闲侦听的上限时间  $T$  对协议性能有重要影响. 过小的  $T$  会导致节点过早休眠, 导致时延增加; 过大的  $T$  会加大空闲侦听时间, 不利于节能. 因此在设置时应视网络具体情况而定, 选取适当的  $T$  值以使感知机制获得最佳表现.

3 TA-MAC 协议性能分析与评价

本文在 NS-2.29 仿真平台上验证协议, 将它与 DW-MAC 在时延、能耗和投递率三个方面进行比较.

3.1 实验设置

实验采用全向天线、free space 和 two-ray ground reflection 混合广播模型, 主要网络参数见表 1, 周期参数如表 2 所示. 实验场景采用了和 DW-MAC 文中相同的  $7 \times 7$  的矩形网络拓扑, 49 个节点均匀分布在矩形区域内, 邻节点之间相距 200 m, 节点通信半径为 250 m. Sink 节点被设置在矩形区域正中间, 区域内感知到事件的节点向 sink 节点发送数据包. 综合考虑实验场景最大传输跳数为 6 和减小小时延的需要, 仿真将  $T$  设置为 55 ms, 它大约是

RF 连续传递 5 跳距离需要的时间.

表 1 网络参数

|         |           |                  |       |
|---------|-----------|------------------|-------|
| 带宽      | 20 kb/s   | 信道编码率            | 2     |
| 发送功率    | 31.2 mW   | 传输范围             | 250 m |
| 接收功率    | 22.2 mW   | 载波侦听范围           | 550 m |
| 空闲功率    | 22.2 mW   | 竞争窗口             | 64    |
| 休眠功率    | 3 $\mu$ W | DATA 包大小         | 100 B |
| SIFS 长度 | 5 ms      | RTS/CTS/ACK 包的大小 | 10 B  |
| DIFS 长度 | 10 ms     | RF 的大小           | 14 B  |
| 重传限制    | 5         | $T$              | 55 ms |

表 2 周期参数

|        |               |               |                |                |
|--------|---------------|---------------|----------------|----------------|
|        | $T_{SYNC}/ms$ | $T_{DATA}/ms$ | $T_{SLEEP}/ms$ | $T_{CYCLE}/ms$ |
| DW-MAC | 55.2          | 168.0         | 4 241.8        | 4 465.0        |
| TA-MAC | 55.2          | 168.0         | 4 241.8        | 4 465.0        |

为了模拟无线传感器网络的流量的突发性和相关性特点, 实验使用“随机相关事件”(RCE)流量模型<sup>[8]</sup>来产生数据. RCE 随机选择网络分布区域内的一个点  $(x, y)$  作为事件源, 如果节点的事件感知半径为  $R$ , 那么以  $(x, y)$  为圆心, 以  $R$  为半径的圆形区域内的节点都将产生数据的报告事件.

3.2 实验结果及分析

实验以时延、能耗、投递率作为指标考察协议的性能. 图 6 所示为 DW-MAC 和 TA-MAC 随流量改变的时延变化. 横坐标是节点的感知半径, 代表网络流量的大小变化. 纵坐标为每次实验中所有数据包从源节点到达目的节点所需要的平均时间. 从图中看出随着感知半径的增加(即网络负载增加)DW-MAC 和 TA-MAC 的时延都明显增大, 这主要是因为网络负载增加导致数据包碰撞概率加大, 数据包重传导致了更大的时延. 与 DW-MAC 相比 TA-MAC 的时延稍有增加, 这是因为 TA-MAC 在当连续的空闲侦听达  $T$  之后就进入休眠状态以减少能耗, 这有可能会少量潜在数据包只能等到下一周期才能继续发送. 但这种时延增加的幅度并不大, 这主要归功于 TA-MAC 的流量感知机制良好的适应性, 能在发现网络中开始有数据时立即取消计时器.

协议在能耗方面的表现如图 7 所示, TA-MAC 在各负载情况下的节能效率都显著高于 DW-MAC.

协议在投递率方面的比较表明, TA-MAC 保持

与 DW-MAC 一致的零丢包率,这是因为 TA-MAC 虽然实际改变了节点的实际侦听时间,但并不改变周期参数  $T_{DATA}$  的值,很好地保留了 DW-MAC 映射函数的功能,从而也保持了协议在投递率方面的优异表现。

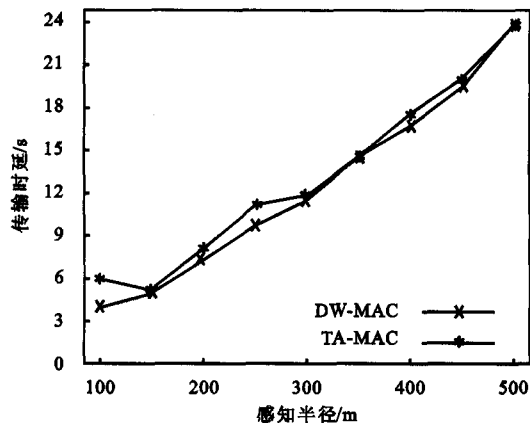


图6 时延

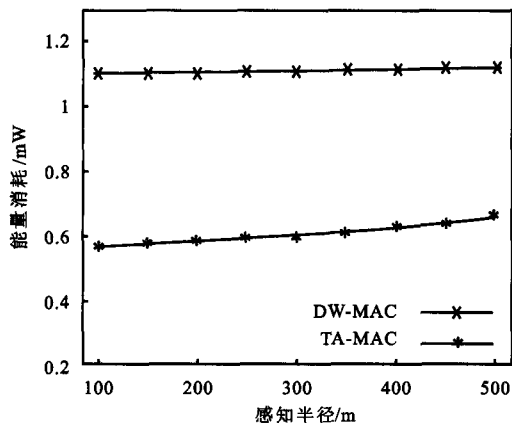


图7 能耗

#### 4 结束语

本文在分析 DW-MAC 特点的基础上,针对其存在较长空闲侦听的问题,提出了利用定时器限制空闲侦听时间,自动适应负载调整  $T_{DATA}$  实际长度的流量感知机制。该机制在保持 DW-MAC 丢包率低时延小的优点的同时,节省了将近一半的能量消耗,有效延长了网络寿命。

下一步将在 TA-MAC 的基础上,深入研究协

议在发包时序上可能存在的重复性问题,精简发包流程,同时考虑功率控制,让协议在时延和能耗方面的表现有进一步的提升。

#### 参考文献:

- [1] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramaniam Y, et al. Wireless sensor networks: a survey[J]. Computer Networks; Elsevier, 2002, 38(4): 393-422.
- [2] 靳江伟,刘勇,黄福睿. 一种高能效无线传感器网络 MAC 协议[J]. 微电子学与计算机, 2010, 27(8): 153-156.
- [3] 靳勇,白光伟. 支持区分服务的自适应链路层 HARQ 控制策略[J]. 微电子学与计算机, 2010, 27(5): 143-147.
- [4] 孙利民,李建中,陈渝,等. 无线传感器网络[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [5] Ye W, Heidemann J, Estrin D. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks[C]// Proc. of INFOCOM. New York, USA, 2002: 1567-1576.
- [6] Shu Du, Amit Kumar Saha, David B Johnson. RMAC: a routing-enhanced duty-cycle MAC protocol for wireless sensor networks[C]// Proc. of INFOCOM. Moscow, Russia, 2007: 1478-1486.
- [7] Sun Y, Du S, Gurewitz O, et al. DW-MAC: a low latency, energy efficient demand wakeup MAC protocol for wireless sensor networks[C]// Proc. of MobiHoc. China, Hong Kong, 2008: 53-62.
- [8] Bret Hull, Kyle Jamieson, Hari Balakrishnan. Mitigating congestion in wireless sensor networks[C]// Proc. of International Conference On Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2004). Baltimore, Maryland, 2004: 134-147.

#### 作者简介:

舒俊浩 男, (1986-), 硕士研究生. 研究方向为无线传感器网络 MAC 协议。

白光伟 男, (1961-), 博士, 教授, 博士生导师. 研究方向为无线传感器网络、无线自组织网络、网络体系结构和协议、网络系统性能分析和评价和多媒体网络服务质量等。

沈航 男, (1984-), 博士研究生. 研究方向为无线传感器网络。