

一种自适应侦听的异步无线传感器网络 MAC 协议

陈德富* 陶正苏 朱建平

(上海交通大学仪器系 上海 200240)

摘要: 为了提升异步无线传感器网络 MAC 协议在动态网络负载下的性能, 论文提出了一种流量自适应的异步协议 AA-MAC。该协议基于短前导序列采样技术, 当节点收到数据后并不理解转入睡眠而自适应增加若干个最短侦听时间用以接收发送节点的可能其他数据, 使得收发双方在网络负载较重时能实现一次配对对多次收发数据。分析并对比了 AA-MAC 和 X-MAC 的能耗和延时模型。在一个 9 跳线形拓扑网络上的仿真结果表明: AA-MAC 在各种负载下性能均优于 S-MAC; 当网络负载很轻时, AA-MAC 表现和 X-MAC 相当; 随着网络负载加重, AA-MAC 和 X-MAC 能耗相当但延时减少了 56% 以上。

关键词: 无线传感网络; 前导序列; 自适应; 媒体接入控制(MAC)

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)06-1290-04

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.01106

An Adaptive Polling Periods MAC Protocol for Wireless Sensor Networks

Chen De-fu Tao Zheng-su Zhu Jian-ping

(Department of Instrument Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: To improve network performance in dynamic traffic load conditions, an adaptive polling periods MAC protocol called AA-MAC is proposed. Based on short preamble sampling technology, after receiving messages rather nodes in AA-MAC perform some additional polling periods than switch off radios immediately. It allows several transmissions upon one rendezvous between the sender and its destination especially when network traffic is high. To give insight into protocol, energy consumption and network latency are both modeled. Simulations on a 9 hop linear topology illustrate that AA-MAC is superior to S-MAC in any traffic conditions and it performs equally to X-MAC in light traffic conditions and performs better than X-MAC in high traffic conditions. When traffic load is high, AA-MAC decrease network latency by 56% compared to X-MAC.

Key words: Wireless sensor networks; Preamble; Adaptive; Media Access Control (MAC)

1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)由分布在一定区域的大量电池供电的节点(传感器)组成, 并通过无线通讯方式形成一个多跳的自组织网络系统^[1]。由于其监控区域广, 无需人为控制等优点, 无线传感器网络目前被广泛应用到农业种植、智能建筑物、医疗监控、智能交通等生活的各个领域, 尤其是一些灾后重建、突发事件监控等安防领域^[2]。媒体接入控制(Media Access Control, MAC)协议直接操作无线模块, 负责在传感器节点之间分配无线信道、建立并维持无线连接, 是影响网络性能的重要因素, 也是 WSN 的关键协议之一。

2 无线传感器网络异步 MAC 协议

为了节约能量, MAC 协议尽可能地使得节点保持睡眠。节点的工作/睡眠周期影响着网络性能: 节点休眠时间长可以节约能量, 但是包括延时和吞吐量在内的其他网络性能将会变差。MAC 协议的核心就是要根据不同的准则来优化能耗和其他网络性能的平衡。现有的 WSN MAC 协议从无线信道获取的策略方面来讲, 可以分为调度接入型、同步竞争接入型和异步竞争接入型^[3]。前两种协议都要求节点维持时间同步, 其最显著的优点是节点同时醒来, 数据可以立即传送因而数据传递效率极高, 但是维持同步会给网络带来较大的空闲侦听能耗并且使得拓扑自适应性比较差^[4,5]。

异步 MAC 协议不需要节点保持同步, 每个节点维持自己独立的工作周期, 其通过前导侦听来同步收发双方^[6]。相比于前两种协议, 异步 MAC 协议不仅避免了由于时间同步而消耗的能量, 而且实现

2010-10-15 收到, 2010-12-27 改回

国家科技支撑计划(2006BAK03A17)资助课题

*通信作者: 陈德富 defuchen@sjtu.edu.cn

起来也比较简单。B-MAC^[7]是一种典型的异步协议，其用发送一个长度不小于睡眠周期长度的前导序列来确保能唤醒接收节点。但是这个长的前导序列不仅增加了数据转发的能耗和延时，而且由于占用大量带宽而使得包括吞吐量在内的网络性能进一步下降。X-MAC^[8]通过在发送短前导帧后侦听接收节点的应答，有效减少了 B-MAC 中需要发送的前导序列的长度。SCP-MAC^[9]在节点保持同步后通过一个短前导序列来通知接收节点，进一步缩短前导序列到仅仅为保证时钟漂移的最短长度。Boost-MAC^[10]通过前一周期节点的数据量来动态调节节点侦听间隔，使得网络更好地适应突发性数据的应用。Lee 等人^[11]改进了 Boost-MAC 的自适应策略，其根据可配置的前若干个周期的数据量来调节节点侦听间隔。

3 AA-MAC 协议设计

异步 MAC 协议的一个最大的优点就是解除了节点的同步关系，节约了用于节点同步的能耗，并且使得协议更容易实现。但其带来的缺点也很明显：每次通信都需要通过发送前导帧来唤醒接收节点。这个唤醒过程不仅增加了节点能耗、加大了网络延时，而且由于长时间占用信道而降低了网络吞吐量。因而有必要设计一种策略，使得节点通信充分地利用每次唤醒过程。应用这种策略，当网络负载较轻时，节点每次配对唤醒进行一次数据传输；当网络负载较高时，节点在每次配对唤醒中都尽可能多地进行数据收发。根据这个原则，设计如下的优化策略使得网络自适应不同负载流量：节点维护一个先进先出的缓冲队列。当节点有新数据包需要传输时，则向队列中添加该包；当某个包传送成功后，在队列中删除该包并且查找并立即发送队列中其他数据包。接收节点在接受完一个数据包后继续侦听一段时间，如果在后续侦听时间里没有收到数据则转入睡眠，否则继续增加下一段侦听时间直到接收完所有数据。在 AA-MAC 中使用如下的策略自适应增加侦听时间：如果节点在当前侦听时间里接收到数据，则表示网络有数据转发，因而需要增加一个侦听时间来探测网络是否流量过大；节点连续侦听到的数据越多，说明网络流量越大，节点越需要增加更多的侦听时间。这个自适应策略可以表示为 $T_{\text{add}} = nT_{\text{min}}$ ，其中 n 表示连续接收到数据的次数； T_{min} 表示能听到一个完整前导序列的最小时间。接收节点可能在发送节点发送前导序列和侦听确认包的任何时刻醒来，因而确保可以听到一个完整前导序列的最小侦听时间可以表示为 $T_{\text{min}} = 2T_{\text{pre}} + T_{\text{ack}}$ ，其中 T_{pre} 和 T_{ack} 分别表示前导序列和确

认包的长度。

一个节点增加侦听时间的机制如图 1 所示。接收节点在接收完数据后增加一个侦听时间，此时发送节点没有数据继续发送，因而接收节点在这个侦听时间后立即转入睡眠；接收节点在接受完第 2 个数据包后，在其增加的侦听时间内侦听并接收了第 3 个数据包，因而其增加两个最小侦听时间。

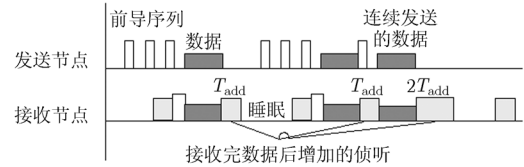


图 1 AA-MAC 节点自适应机制

4 延时和能耗分析

在 X-MAC 中延时主要由收发双方的配对产生。发送节点需要平均花费 $1/2$ 个侦听间隔来唤醒接收节点。接收节点然后侦听完整前导序列，发回 ACK 包并开始接受数据。因而单跳的传输延时为

$$L_{\text{X-MAC}} = T_{\text{cw}} / 2 + T_{\text{pre}} + T_{\text{ack}} + T_{\text{msg}}$$

其中 T_{cw} 为节点侦听间隔， T_{msg} 分别表示数据包的长度。

在 AA-MAC 中，连发的数据包共享一次配对过程。假设有 n 个数据包得以连发，则平均每个数据包的延时可以减小为

$$L_{\text{AA-MAC}} = T_{\text{cw}} / (2n) + T_{\text{pre}} + T_{\text{ack}} + T_{\text{msg}}$$

考虑到 $T_{\text{pre}} + T_{\text{ack}} + T_{\text{msg}} \ll T_{\text{cw}}$ ，因而 AX-MAC 的延时缩小为 X-MAC 的 $1/n$ 。

X-MAC 中，节点能量主要消耗在空闲侦听、数据收发和干扰串听中。为了能够侦听到发送节点的前导序列，节点在每次唤醒后必须侦听于一个不短于 ACK 包长度的时间。因而用于空闲侦听的能耗为

$$E_{\text{CS}}^{\text{X-MAC}} = P_{\text{rx}} [(2T_{\text{pre}} + T_{\text{ack}}) / T_{\text{cw}}]$$

其中 P_{rx} 表示节点的接收电流。

X-MAC 在一次配对中，平均前导序列个数为 $n_{\text{ret}} = T_w / [2(T_{\text{pre}} + T_{\text{ack}})]$ ，因而发送和接收的能耗分别为

$$E_{\text{TX}}^{\text{X-MAC}} = P_{\text{tx}} (n_{\text{ret}} T_{\text{pre}} + T_{\text{msg}})$$

$$E_{\text{RX}}^{\text{X-MAC}} = P_{\text{rx}} ((3/2)T_{\text{pre}} + T_{\text{msg}}) + P_{\text{tx}} T_{\text{ack}}$$

节点有一半的概率串听到邻居的通信，因而串听功耗可表示为 $E_{\text{O}}^{\text{X-MAC}} = (1/2)P_{\text{rx}} ((3/2)T_{\text{pre}} + T_{\text{ack}})$ 。

在 AA-MAC 中,若没有数据转发则节点不会增加任何侦听时间,因而空闲侦听和 X-MAC 一样;若有 n 个数据包在 AA-MAC 中得以连发,则节点在接收完最后一个数据包之后必然有一个长为 $n(2T_{\text{pre}} + T_{\text{ack}})$ 的空闲侦听。因而节点空闲侦听可以表示为

$$E_{\text{CS}}^{\text{AA-MAC}} = \frac{n(2T_{\text{pre}} + T_{\text{ack}})}{T_w + n(T_{\text{msg}} + 2T_{\text{pre}} + T_{\text{ack}})}$$

考虑到 $T_{\text{pre}} + T_{\text{ack}} + T_{\text{msg}} \ll T_{\text{cw}}$, 因而有节点转发时 AA-MAC 的空闲侦听是 X-MAC 的 n 倍。

同理,其发送和串听功耗分别为 $E_{\text{TX}}^{\text{AA-MAC}} \approx E_{\text{TX}}^{\text{X-MAC}} / n$, $E_{\text{RX}}^{\text{AA-MAC}} = E_{\text{RX}}^{\text{X-MAC}}$, $E_{\text{O}}^{\text{AA-MAC}} = E_{\text{O}}^{\text{X-MAC}} / n$ 。

5 仿真结果及分析

为了评测协议的性能,在 NS2^[12]中建立了一个如图 2 所示的 9 跳线形拓扑。节点 0 发送间隔可调的 CBR 数据流,节点 9 为数据包的目的节点。为了分析负载对协议性能的影响,仿真中分别设置了 CBR 速率从 1 bit/s 到 700 bit/s。CBR 速率越高,数据包之间的时间间隔越小,网络负载越重。我们设置数据包在各种速率下均发送 1000 个,并以此统计节点能耗和数据包时延。为了更直观的观测该协议性能,在相同的条件下模拟了 S-MAC^[13], X-MAC 并和 AA-MAC 进行比较。

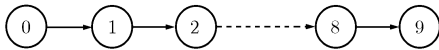


图 2 线形网络拓扑

5.1 能耗

能耗是衡量无线传感器网络协议的一个重要指标,因此设计一种能耗统计的策略是必不可少的。目前节点能耗统计大多是通过测量硬件节点运行一段时间前后能耗差来统计的。这样的硬件统计方法不仅实现困难,而且误差比较大。Dunkels 等人^[14]设计了一种软件统计能耗的策略。但该策略只能统计节点 RF 唤醒和睡眠的时间。然而对于大多数无线收发芯片来说,其在侦听和发送时的功耗是不相同的,因而该策略不能够精确地统计节点空闲侦听和发送数据的功耗。为此,本文设计了一种简单而精确的能耗统计策略。该策略的核心思想是统计无线模块在各个状态(睡眠,侦听和发送)所经历的时间总和。在软件实施中,每次无线模块改变状态时,记下当前的状态和时间,当 RF 模块状态再次改变时,根据当前状态和时间并结合上一状态信息来计算得节点在上一状态经历的时间。定义能耗

为:从开始发送第 1 个数据包到发送完所有数据各个节点消耗的平均能量。采用一款通用无线收发芯片 CC2430 的功耗参数来统计能量,其睡眠电流为 6 μA ,接收电流为 27 mA,发送电流为 25 mA^[15]。据此获得的能耗曲线如图 3 所示。从图 3 可以看出:

(1)随着数据速率的增加,网络转发 1000 个数据包所需要的时间变小,因而每个数据包的平均功耗也逐渐减小。

(2)X-MAC 和 AA-MAC 的功耗要小于 S-MAC。异步协议的最小唤醒时间为能够侦听到一个前导序列并发送应答的最短时间;而 S-MAC 由于需要维护节点同步,因而在其最小唤醒时间里除了需要侦听邻居节点的数据包之外还需要维护节点同步,因而其最小唤醒时间远大于异步 MAC 协议唤醒时间,因而其能耗要明显高于异步协议。当网络流量较小时,节点能耗主要由侦听信道产生,S-MAC 和异步 MAC 协议能耗差距更明显。

(3)当流量较小时,AA-MAC 在每次接收完一个数据包后节点都自适应的增加侦听时间,而由于流量较小,这个自适应的侦听时间内都不会有数据包被转发,因而导致其能耗大于 X-MAC;但是随着数据速率的增大,节点连续收发数据的概率就越大,节点在数据发送和干扰串听中节约的能耗就越多。当 CBR 流速大于 250 bit/s 时,AA-MAC 能耗与 X-MAC 能耗基本相当。

5.2 网络延时

网络延时是评价网络性能的另一关键指标。定义单个数据包的延时为:节点 0 开始发出该包到节点 9 接收到该包的时间间隔。统计各种数据速率下所有数据包的平均延时,如图 4 所示。在仿真中,我们设置各协议合适的唤醒时间,并限定一个工期为 1 s。因而理论上数据经过 9 跳后的平均延时为 4.5 s。从图 4 可以看出:

(1)当数据速率较小时,3 种协议平均延时相当,均为理论平均延时。当数据速率变大时,数据在到达节点后不能被立即发送,因而延时逐渐变大。

(2)S-MAC 延时要明显高于异步 MAC 协议。这一方面由于数据包在需要等到节点睡眠周期结束才能发送;另一方面由于节点需要定期执行同步过程,这也阻碍了数据包传输。

(3)AA-MAC 中由于采用了自适应的数据转发机制,随着数据速率增加,节点连续接收数据的概率越来越大,因而使得数据延时明显小于普通的 X-MAC。当 CBR 速率大于 300 bit/s 时,AA-MAC 比 X-MAC 延时小 56%以上。

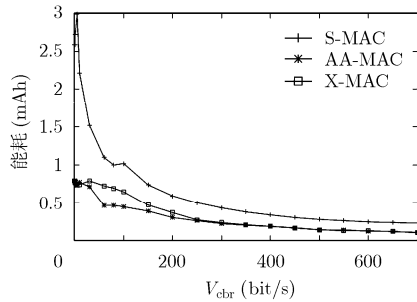


图3 数据包的平均能耗

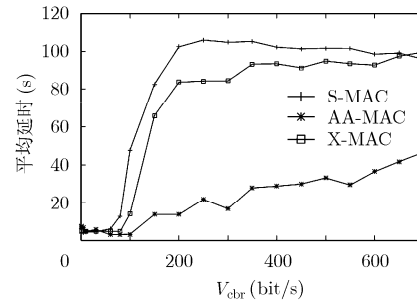


图4 数据包的平均延时

6 结束语

在无线传感器网络中，MAC 协议直接操作 RF 模块，是影响网络性能的关键因素。异步 MAC 协议通过附在数据包之前的前导序列唤醒接收节点，其不需要收发双发保持时间同步，因而减少了用于节点同步的功耗并使得协议更容易实现。本文提出了一种流量自适应的异步协议 AA-MAC，其根据网络流量自适应调节侦听时间，使得网络在重负载下能够一次配对多次通信。仿真结果表明，AA-MAC 能较好地适应不同网络负载。在轻负载时，其性能和 X-MAC 相近；在重负载下，其自适应策略使得网络延时大大小于 X-MAC。下一步要做的工作是进一步分析节点侦听时间随着网络流量改变的转变模型，以期优化侦听时间调节机制并获得最优的能耗-延时平衡。

参考文献

- [1] Akyildiz I F, Su W, and Cayirci E, *et al.* Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks*, 2002, 38(4): 393-422.
- [2] Chen D, Tao Z, and Ma G. Application of wireless sensor networks for monitoring emergency events. Proceedings of the 4th International Conference on Wireless Communication, Networking and Mobile Computing, Dalian, China, 2008: 1-4.
- [3] Bachir A, Dohler M, and Watteyne T, *et al.* MAC essentials for wireless sensor networks. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2010, 12(2): 222-248.
- [4] 邓亚平, 蒋新春, 陈兰兰. 无线传感器网络 TDMA MAC 协议的对比和改进研究. *计算机工程与应用*, 2010, 46(4): 89-92.
Deng Y, Jiang X, and Chen L. Research on comparison between TDMA MAC protocols and improvement for wireless sensor networks. *Compute Engineering and Applications*, 2010, 46(4): 89-92.
- [5] Chaari L and Kamoun L. Wireless sensors networks MAC protocols analysis. *Journal of Telecommunications*, 2010, 2(1): 42-48.
- [6] Ei-Hoiydi A. Aloha with preamble sampling for sporadic traffic in ad hoc wireless sensor networks. Proceedings of IEEE International Conference on communications, NY, USA, 2002: 3418-3423.
- [7] Polastre J, Hill J, and Culler D. Versatile low power media access for wireless sensor networks. Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, NY, USA, 2004: 95-107.
- [8] Buettner M, Yee G, and Anderson E, *et al.* X-MAC: a short preamble MAC protocol for duty-cycled wireless sensor networks. Proc 4th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, NY, USA, 2006: 307-320.
- [9] Ye W, Silva F, and Heidemann J. Ultra-low duty cycle MAC with scheduled channel polling. Proceedings of the 4th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, Colorado, USA, 2006: 321-333.
- [10] Stone K and Colagrosso M. Efficient duty cycling through prediction and sampling in wireless sensor networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2007, 7(9): 1087-1102.
- [11] Lee S, Choi J, and Na J, *et al.* Analysis of dynamic low power listening schemes in wireless sensor networks. *IEEE Communications Letters*, 2009, 13(1): 43-45.
- [12] The Network Simulator-NS2. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/> 1995.
- [13] Ye W, Heidemann J, and Estrin D. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks. Proceedings of IEEE International Conference on Computer Communication, NY, USA, 2002: 1567-1576.
- [14] Dunkels A, Osterlind F, and Tsiftes N, *et al.* Software-based on-line energy estimation for sensor nodes. Proceedings of the 4th Workshop on Embedded Networked Sensors, NY, USA, 2007: 28-32.
- [15] CC2430 Datasheet. <http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/cc2430.html>. 2007.

陈德富：男，1981年生，博士生，研究方向为无线传感器网络 MAC 和路由研究。

陶正苏：男，1961年生，教授，博士生导师，研究方向包括无线传感器网络、在线检测新技术等。

朱建平：女，1978年生，博士生，研究方向为无线传感器网络基础理论。