

## 分簇无线传感器网络的双时槽混合 MAC 协议<sup>①</sup>

钱德沛<sup>②</sup> 李世晗 刘 轶 杜治高

(北京航空航天大学中德联合软件研究所 北京 100083)

**摘 要** 基于事件驱动的无线传感器网络应用,提出了一个基于分簇优化的低时延混合 MAC 协议——CHMAC。CHMAC 采用双时槽传输调度和载波检测多路接入/时分多址接入(CSMA/TDMA)混合模式,采用适合分簇网络的时槽分配,优先保证紧急事件的最小延迟发送,并充分利用分簇网络的数据流特点,精细控制节点的侦听、睡眠以及传输功率,以提高能量有效性和网络吞吐量。理论分析和模拟试验表明,该协议能够以良好的适应性和健壮性在各种流量条件下均表现良好的性能。

**关键词** 无线传感器网络,媒体接入控制(MAC),载波检测多路接入(CSMA),分时多址接入(TDMA)

### 0 引 言

计算和存储量有限的并主要由以电池供电的传感器节点通过无线通信构成的传感器网络在军事、工业、医疗、环境监测、抢险救灾等诸多领域都有很好的应用前景。与传统的无线网络不同,无线传感器网络中的节点带宽、计算存储等资源匮乏,尤其是其有限的能量会直接影响网络的生命期,所以节点上运行的媒体接入控制(MAC)协议应该能够充分利用不同应用的特点有效地利用节点的能量。对此,研究人员进行了大量的研究,提出了多种适合不同无线传感器网络应用的 MAC 协议。本文在分析研究这些协议的基础上,提出了一种基于分簇优化的低时延混合 MAC 协议——CHMAC(Cluster oriented Hybrid MAC),其目的是使其适用于事件驱动的分簇无线传感器网络,能够在各种流量条件下表现良好的时延性、能量有效性和较高的网络吞吐量。基本设想是设计具有重叠双时槽调度的混合 MAC 协议,使其既能支持紧急事件的 CSMA 方式传输,又能以 TDMA 方式传输周期性数据。如何协同时隙 CSMA 和 TDMA 按照优先级访问,在保持能源有效性的和较高的网络吞吐量同时,优先保证紧急事件的时延性能是本文研究的主要内容。

### 1 相关研究分析

研究者以降低能耗为目标,已经提出了很多适

合不同传感器网络应用的 MAC 协议。MAC 协议的研究包括基于竞争的 MAC 协议和基于调度的 MAC 协议两类。基于竞争随机访问的 MAC 协议采用按需使用信道的方式,基本思想是当节点需要发送数据时,通过竞争方式使用无线信道,如果发送的数据产生了碰撞,就按照某种退避策略重发数据,直到数据发送成功或放弃发送。这种方法不需要严格的节点时钟同步,当网络中的数据流量较小时,能够提高无线信道的利用率,但当网络中需要发送的节点数目较多且网络中的数据流量较大时,由于多个节点频繁地竞争信道资源,容易造成节点间的冲突和能量的消耗<sup>[1]</sup>。无线传感器网络中,经典的基于竞争的 MAC 协议有 S-MAC<sup>[2]</sup>、T-MAC<sup>[3]</sup>、B-MAC<sup>[4]</sup>等。S-MAC 将时帧分为活动和睡眠两个部分,节点在睡眠部分关闭通信模块以降低能量消耗。S-MAC 采用了虚拟簇的概念,同一个簇内的节点保持相同的时间调度。T-MAC 是 S-MAC 的改进方案,采用自适应的工作-休眠模式,使每个周期内节点活跃的时间跟随流量需求相变化。T-MAC 节省能量的策略使节点能够更早地进入休眠状态,但也带来了高延迟和低吞吐量的缺点。B-MAC 协议中运用可调的前导码采样、低功率侦听、空闲信道评估等技术获得了高的吞吐量和较高的能量有效性,并且提供了良好的接口允许应用定义自己的 MAC。

基于调度的 MAC 协议,主要是采用时分多址接

<sup>①</sup> 国家自然科学基金(60673180)和德国教研部资助 eeWSN(MCI)项目资助。

<sup>②</sup> 男,1952 年生,教授,博士生导师;研究方向:计算机体系结构,计算机网络;联系人,E-mail:Depei.Qian@jst.buaa.edu.cn  
(收稿日期:2008-04-22)

入(TDMA)的方法周期性地给每个节点分配用于数据发送或接收的时槽,而节点在其他空闲时槽内转入睡眠状态以节省能量。TDMA 机制没有竞争机制的碰撞重传问题,数据传输时不需要过多的控制信息。当网络中数据流量较大,资源竞争较为激烈的情况下,TDMA 机制是一种较好的节能机制。但当网络中的数据流量较小时,按分配的时槽访问信道会造成信道资源的浪费。同时,TDMA 机制需要节点之间的严格同步,网络扩展也比较困难<sup>[2]</sup>。

受随机 TDMA(PTDMA)<sup>[5]</sup>的影响,Z-MAC<sup>[6]</sup>协议是一种以结合 TDMA 和载波检测多路接入(carrier sense multiple access,CSMA)思想的混合型协议,但它不是基于概率调整属主和非属主访问时槽的概率,而是按照优先级访问时槽。它给两跳邻居内的每个节点预先分配一个不同的时槽,并根据不同争用条件按不同的传输控制策略控制节点对时槽的访问。Z-MAC 协议结合了 CSMA 和 TDMA 的优点,在不同的流量和信道争用情况下均具有较好的性能。但 Z-MAC 协议比较适合静态的传感器网络,不能区分骨干节点与普通节点的流量需求。另外,Z-MAC 在网络初始化阶段给每个节点分配时槽,协议的开销很大,当网络中节点大部分进入睡眠状态时,分配给它们的时槽不能得到最有效的利用。本文提出的面向分簇无线传感器网络优化的混合 MAC 协议——CHMAC 协议,同样采用了 CSMA/TDMA 混合访问模式,并改进了时隙分配和共享机制,采用双时槽调度和功率控制,使其能够能量有效地为不同优先级的数据提供 QoS 保证,优先保证紧急数据的最小延迟发送,同时更为健壮灵活,能够以很小的开销适应网络重组、节点加入死亡以及睡眠等带来网络拓扑的变化。

## 2 CHMAC 协议描述

### 2.1 网络模型

网络由可以控制发送功率的大量节点构成,这些节点按照分簇算法构成若干个分簇。节点具有若干个功率水平,如 Mica Motes2 节点的收发器具有 22 个功率水平。在网络初始化阶段,每个节点都确定一个最低发送功率,以保证网络的连通和覆盖。在分簇形成后,成员节点确定到簇头节点的传输功率。相邻簇头之间可以直接通信,或者通过一个协同节点相连接。协同节点是同时可以连接两个簇头的中间节点。簇头节点和协同节点统称为骨干节点,由

它们构成到汇集(SINK)节点的骨干路径。邻居节点之间通过交换信息以协同检测特定事件的发生。为了保证最高的时效性,紧急事件需要及时直接发送或者由簇头节点转发到汇集节点。

### 2.2 帧结构和时槽划分

CHMAC 定义了相重叠的两类时槽:A 时槽和 B 时槽。A 时槽具有较高的优先级,用于长距离的信息发送。节点在监测到紧急数据发生时,采用 A 时槽将数据直接发送到簇头节点或者汇集节点。A 时槽由簇头节点负责分配,采用固定长度的时间帧,如图 1 所示,并将其分为两个部分:专用时间段和共享时间段。专用时间段的各个时槽分配给骨干节点,共享段内一个子段分配给一个簇为簇内成员共享。每个簇的分段的第一个时槽固定作为簇头节点发送时间同步和广播数据专用。B 时槽用于节点的最小功率传输,用于邻居间信息交换和协同。B 时槽与 A 时槽相重叠,但每个节点可以在时间帧内分配多个时槽。这是因为当以最小功率传输时,其两跳邻居节点的数目远远小于一个时间帧的总时槽数目。

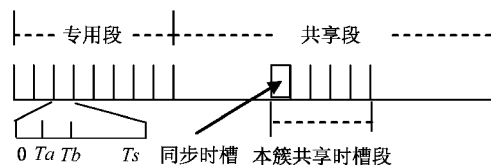


图 1 CHMAC 帧结构

### 2.3 时槽访问策略

首先介绍 A 时槽的访问策略。为了保证 A 时槽的优先使用,将 $[0, T_a]$ 作为 A 时槽的争用窗口。通过监听该窗口的通信,节点确定是否可以使用 B 时槽发送数据。有两种模式访问 A 时槽,即低流量访问模式和高流量访问模式。在低流量访问模式下,节点访问时槽不受时槽分配的约束。节点在争用窗口内按请求发送/清除发送(RTS/CTS)模式协商对时槽的占用。A 时槽一般用于紧急数据的发送。在低流量模式下,节点可以使用任意空闲时槽发送数据。在高流量模式下,按常规方式访问时槽,但仍然需要发送 RTS/CTS 握手信号协同控制节点对 B 时槽的访问。低流量模式下,A 时槽信道的访问过程如算法 1 所示。

算法 1: 低流量模式下 A 时槽访问算法

- (1) 节点有紧急数据,准备访问信道。
- (2) 属主节点直接发送 RTS 信号,非属主节点在 $[m, T_a - m]$ 内随机选择时刻  $t$ ,开始监听数据, $m$

为发送 CTS 信号或者 RTS 信号占用时间。

(3) 在时刻  $t$  内收到 RTS 或 CTS,取消当前时槽的访问。

(4) 没有收到 RTS 或 CTS,在时刻  $t$  发送 RTS。

(5) 收到 CTS,准备发送数据。

(6) 没有收到 CTS,判断监听窗口剩余时间,如果大于  $2m$ ,选择再次发送 RTS 的时刻  $t$ ,转到(3)。

(7) 访问失败,转到(2)访问下一时槽。

高流量模式下,节点要等到所属 A 时槽才访问信道。为了有效地控制隐藏站点问题,发送方和接收方在发送握手信号和数据分别采用不同的功率水平。发送方以高于数据发送功率一个功率水平发送 RTS 信号,该信号覆盖的节点就会取消对当前时槽的访问。簇头节点发送 CTS 信号的功率要可以到达所有成员节点,告知它们取消对当前时槽的访问。

B 时槽的访问受 A 时槽访问的制约。只有在监听到 A 时槽空闲,或者能够确定可以和 A 时槽同时使用,节点才可使用所属 B 时槽以最小功率发送数据到邻居节点。除了考虑自己的发送不被干扰外,同时 B 时槽发送也不能干扰正在进行的 A 时槽的数据接收。同常规 TDMA 相同,节点只在所分配的 B 时槽发送数据,所以普通成员节点可以根据邻居节点的 B 时槽分配调度自己的侦听和睡眠。普通成员节点只在邻居节点分配的时槽进行接收监听,其监听窗口为  $[Ta, Tb]$ ,期间没有监听到数据到来,则关闭对信道的侦听。

## 2.4 时槽分配

CHMAC 时槽分配包括 A 时槽和 B 时槽的分配。B 时槽的分配取决于节点以最小功率发送数据的网络拓扑,时槽的分配可以采用 Z-MAC 中的分布式算法 DRAND<sup>[7]</sup>,获得分配权限的节点,选择一个没有被其两跳邻居使用的最小时槽,并发送时槽分配通知到两跳邻居。最后,根据其两跳范围邻居数进行定帧,获得局部帧长  $F$ ,以  $F$  为周期,节点自动确定在整个时间帧  $Fg$  的其它时槽,如节点获得的时槽为  $k$ ,则节点的时槽集合为:

$$\{s_b \mid s_b = F * i + k, s < Fg, i = 0, 1, \dots\}$$

A 时槽的分配考虑了分簇网络的流量特性以及重新分簇会引起网络拓扑的变化。CHMAC 为骨干节点在专用段分配时槽,其时槽再分配只会影响到少量数目的节点。专用段时槽数目取决于骨干节点的密度和数据量的大小。由于参与时槽再分配的节点少,所以能够快速完成,开销相对也会小。新的分簇在共享段中选取一段时槽为簇成员节点共有,并

由簇头节点负责分配。

因为在低流量模式下,不需要为成员节点分配 A 时槽。在高流量访问模式下,由簇头节点给簇内的每一个活动节点分配一个 A 时槽。簇内时槽的分配所需总数取决于本簇活动节点的数目,而不是成员节点的数目,长期睡眠的节点的存在不会影响时槽的分配和使用效率。两种模式的转换也由簇头节点负责。这种在簇头管理下的按照分段进行时槽的分配和管理使其能够以较小协议开销适应网络重组、功率控制、睡眠调度引起的拓扑变化<sup>[8]</sup>。

## 3 协议分析和仿真试验

### 3.1 协议分析

性质 1:在帧内所有 A 时槽都被占用时,节点仍然可以利用 B 时槽进行通信。

可以用图 2 予以简单说明,节点 a 准备利用 A 时槽发送数据,图中虚线大圆为节点 a 的 RTS 信号的覆盖区域,虚线小圆为节点 a 数据发送信号覆盖区域,大圆以外区域为区域 I,其中的节点可以利用时槽 B 进行相互通信。

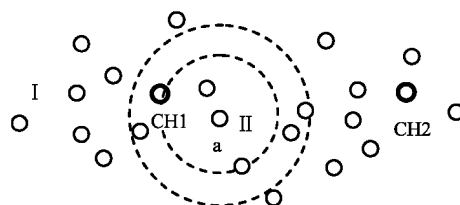


图 2 时槽访问示例

性质 2:紧急数据的时延性能远高于普通 TDMA 方式。

因为普通 TDMA 方式发送数据仅使用所分配时槽,所以其平均时延与帧长相关。CHMAC 引入了 CSMA 机制,节点可以利用其它节点分配的时槽发送紧急数据,在信道争用节点数目小的情况下,数据可以在随后几个时槽即时发送而不依赖于帧长。

性质 3:高流量通信条件下,骨干节点保证了更高的数据吞吐量。

当进入高流量条件下,CHMAC 的节点进入高流量访问模式,不再发生信道争用,具有更高分配时槽数目的骨干节点可以取得正比于其分配时槽数的吞吐量。

### 3.2 实验结果

我们采用 NS-2 网络模拟器<sup>[9]</sup>来评价协议性

能。为了使节点可以将数据单跳发送到簇头节点,在运行 Z-MAC 协议时,每个节点的传输功率都设置为发送到簇头节点所需的功率值。

CHMAC 支持用单跳方式直接传输紧急事件,由图 3 看出,虽然采用时槽方式访问信道,但由于混合模式的使用,使其能够在低争用流量条件下取得接近于 CSMA 的时延性能,而在高争用流量条件下,同 Z-MAC 性能相当,其时延性能要优于 CSMA。

在比较协议的吞吐量时,在模拟试验中按比例定义部分节点为骨干节点,并设定其数据产生速率为普通节点的两倍。CHMAC 和 Z-MAC 在吞吐量在低的数据流量下具有相当的性能,接近 CSMA 的吞吐量,但是在过载的数据流量条件下,如图 4 所示,CHMAC 和 Z-MAC 的吞吐量要远高于 CSMA 的吞吐量。CHMAC 的总的吞吐量要略高于 Z-MAC,而且保证了骨干节点两倍于普通节点的吞吐量。这主要是因为 CHMAC 的时槽分配能够匹配不同节点的流量需求,而 Z-MAC 同等对待所有节点。

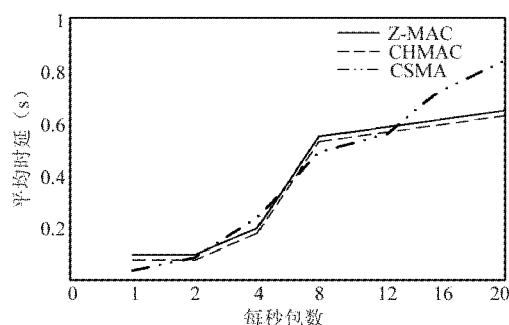


图 3 不同流量下的时延性能

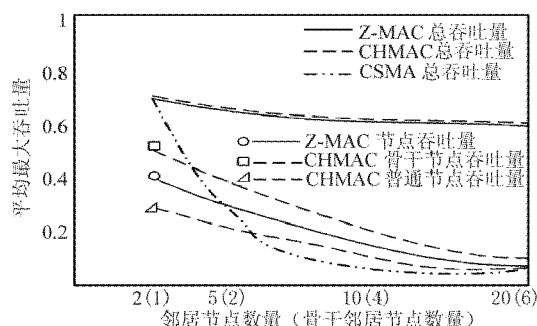


图 4 过载流量下的吞吐量

CHMAC 从几个方面降低无效能耗和提高能量有效性。CHMAC 通过模式转换减少通信碰撞,在高流量模式下只有属主节点可以访问时槽。另外,CHMAC 利用功率控制技术减少了节点的传输能耗。在减少节点的空闲侦听和提高睡眠时间上,CHMAC

能够显著增加普通节点的睡眠时间和降低节点的睡眠、侦听切换次数。对于普通节点,在无数据到达时,其睡眠时间相对于 Z-MAC 提高了 20%,而睡眠、侦听切换次数减少了 50%。此外,CHMAC 协议的开销也很小。我们用单位能量的吞吐量表示能量有效性,如图 5 所示,总体上 CHMAC 具有更高的能量有效性。

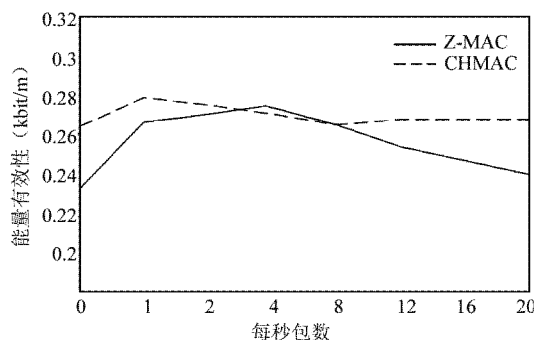


图 5 不同流量下的能源有效性

## 4 结论

本文提出的面向分簇优化的流量适应的混合 MAC 协议——CHMAC,能够在事件驱动的分簇传感器网络中不同的流量条件下表现良好的时延性能、能量有效性,同时具有较高的网络吞吐量。CHMAC 运用双时槽调度以及 CSMA/TDMA 混合模式,保证了紧急事件的优先传输。CHMAC 能够为骨干节点提供高于普通节点的传输量保证,能够以较小协议开销适应网络重组、功率控制、睡眠调度引起的拓扑变化,提高了网络服务质量和适应性。在簇头节点的调度下,节点可以更多地进入睡眠,大大减少了由于空闲侦听等造成的能量浪费,同时运用功率控制技术进一步减少传输能耗,从而提高 MAC 协议的能量有效性。下一步准备在 Mote 节点的实验床上实现并改进该协议,并结合分簇管理算法模拟实际应用进行试验验证,以实现能量有效的具有 QoS 保证的可灵活调整的无线传感器网络的 MAC 协议。

## 参考文献

- [1] Demirkol I, Ersoy C, Alagoz F. MAC protocols for wireless sensor networks: a survey. *Communications Magazine, IEEE*, 2006, 44(4):115-121
- [2] Ye W, Heidemann J, Estrin D. Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks.

- IEEE/ACM Trans Netw*, 2004,12(3):493-506
- [ 3 ] Dam T V, Langendoen K. An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks. In: Proceedings of the 1st ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2003), Los Angeles, CA, USA, 2003.171-180
  - [ 4 ] Polastre J, Hill J, Culler D. Versatile low power media access for wireless sensor networks. In: Proceedings of the 2nd ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2004), Baltimore, MD, USA, 2004.95-107
  - [ 5 ] Ephremides A, Mowafi O A. Analysis of hybrid access schemes for buffered users-probabilistic time division. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 1982,SE-8(1): 52-61
  - [ 6 ] Rhee I, Warrier A, Aia M, et al. Z-mac: a hybrid mac for wireless sensor networks. In: Proceedings of the 3rd ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (Sensys 2005), New York, USA, 2005.90-101
  - [ 7 ] Rhee I, Warrier A, Xu L. Randomized dining philosophers to TDMA scheduling in wireless sensor networks: [technical report]. Raleigh, NC, USA: Computer Science Department, North Carolina State University, 2004
  - [ 8 ] Li S H, Qian D P, Liu Y. Adaptive distributed randomized TDMA scheduling for clustered wireless sensor networks. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing (WICOM 2007), Shanghai, China, 2007.2688-2691
  - [ 9 ] The network simulator. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>

## A cluster oriented hybrid MAC with dual slots for wireless sensor networks

Qian Depei, Li Shihan, Liu Yi, Du Zhigao

(Sino-German Joint Software Institute, Beihang University, Beijing 100083)

### Abstract

The CHMAC, a cluster oriented hybrid media access control (MAC) protocol, constructed using the carrier sense multiple access (CSMA)/ time division multiple access (TDMA) hybrid approach, is presented for event-driven wireless sensor network applications. To improve the performance of throughput and the energy efficiency, especially the delay performance for urgent event, a channel access mechanism of two types of slots is presented. Slot assignment fitting for such kind of networks is adopted. Traffic characteristics are also utilized to control listening and sleeping and transmission power of sensor nodes elaborately. The results of the analysis and simulation show that the proposed CHMAC has good performance and exhibits good adaptability and robustness in different traffic conditions.

**Key words:** wireless sensor networks, media access control (MAC), carrier sense multiple access (CSMA), time division multiple access (TDMA)