

无线传感器 SMAC 协议竞争退避机制分析及优化^①

蒋文贤, 李 跃

(华侨大学 计算机科学与技术学院, 厦门 361021)

摘 要: 针对无线传感器网络能量受限和退避时采用固定竞争窗口的特点, 提出了一种基于节点剩余能量和信道冲突次数的 MAC 协议(EC-SMAC). 该协议改进了 SMAC 的竞争退避机制, 根据节点剩余能量和信道冲突次数来动态的调整竞争窗口, 减少传输节点之间的冲突, 从而使全网负载均衡, 同时延长网络生命周期. 仿真实验表明: 在保证网络吞吐量和时延稳定的前提下, 平均延长了 7% 的网络生命周期.

关键词: 无线传感器网络; SMAC; 竞争机制; 剩余能量; 生命周期

Analysis and Optimization of Competition Backoff Mechanism of SMAC Protocol for WSN

JIANG Wen-Xian, LI Yue

(College of Computer Science and Technology, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: We propose a MAC protocol based on node residual energy and the number of channel conflict(EC-SMAC) according to WSN's characteristic that energy is constrained and competition window is fixed when backoff. The proposed protocol improves competition backoff mechanism of SMAC, it dynamically adjusts competition window according to node residual energy and the number of channel conflict, thus reducing conflict between transmission nodes and balancing network load and extending lifetime of network. Simulation results show that our proposed protocol extends 7% lifetime of network under the premise of ensuring network throughput and stable delay.

Key words: wireless sensor networks(WSN); sensor medium access control (SMAC); competition mechanism; residual energy; lifetime

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)是由大量廉价传感器节点组成的, 以获取某一监测区域数据变化, 并通过简单的数据融合和多跳方式, 将节点所采集的信息回传给远程控制端的自组织网络^[1]. 无线传感器网络 MAC 层在避免节点间的冲突、分配信道、能量消耗以及其它资源上担负重要角色, 因此设计一种高效的 MAC 层协议非常重要, 尤其是在能量节省、节点延迟和吞吐量增加等方面都能满足实际应用的 MAC 协议^[2].

目前无线传感器 MAC 层的协议中, 应用最广泛地是 Wei Ye 设计的 Sensor MAC(SMAC)协议^[3], 节点采取周期性的睡眠和监听机制以避免无谓的能量消耗, 其主要贡献在于四个方面: 减少冲突、串音、控制包开销和空闲监听. SMAC 比传统的 IEEE802.11DCF 协

议节省了很多能量, 但采用固定的竞争窗口, 不能够适应网络流量的变化, 传输节点之间容易产生冲突, 网络整体性能较低.

TMAC^[4]是基于 SMAC 提出的低流量的 MAC 协议, 它设置一个门限值 TA, 当超过门限值 TA 的时间内没有激活时间发生, 节点自动计数其侦听状态, 这种方法在某种程度上解决了 SMAC 的早睡问题. DSMAC^[5]增加了动态占空比到达从而减少延迟和能耗. 文献^[6,7]提出了一种基于网络流量自适应的竞争机制的 MAC 协议, 具有更好的网络生存能力.

以上几种协议都是采用固定的竞争窗口(CW)来竞争信道的使用. 但当网络流量增加时, 较小的 CW 会引起节点间更多的冲突, 这将导致丢包率和能耗的增加; 当网络流量减少时, 较大的 CW 会降低信道使

^① 基金项目:福建省自然科学基金(2013J01240)

收稿时间:2013-04-20;收到修改稿时间:2013-05-29

用率,并相应的增加时延.

本文提出了 EC-SMAC 协议是根据节点剩余能量和竞争信道的冲突次数,分阶段的调整竞争窗口,对 SMAC 协议进行改进.综合兼顾能耗和网络负载情况,从而在保证网络吞吐量和数据时延的情况下,最大限度的减少节点能量,优化网络性能.

1 竞争退避机制分析

在 IEEE802.11DCF 中,任何一个节点在发送数据之前,都要首先保证信道处于空闲状态.此外,都必须等待一个信道持续空闲 DIFS 间隔,然后进入竞争窗口(执行退避算法),计算随机退避时间(Backoff Time),以便竞争接入到信道.随机退避时间的计算方法如下:

$$Backofftime = Random() * aSlotTime$$

其中, Random()是一个平均分布在[0,CW]之间的随机数,CW 是介于 CWMIN 和 CWMAX 之间的整数,aSlotTime 是由物理层定义的一个时槽长度.CW 的初始值等于 CWMIN.

当某个需要发送数据的节点使用退避算法选择了竞争窗口 CW 中的某个随机值后,就根据该值设置一个退避计时器(Backoff Timer).对于该时间段内的每个时隙,如果信道保持空闲,则 Timer 减 1;若信道忙,则放弃退避,节点继续侦听信道,直到信道持续空闲事件大于 DIFS 间隔,然后继续进行退避.如果该时间段内的每个时隙信道都是空闲的,那么 Timer 则会逐渐递减,直到为 0 时,通过过程开始.如果本次传输不成功,即发生了冲突,重传次数加 1,当重传次数增加到规定的最大值时,便丢弃所要发送的数据.成功传输完成之后,重传次数重置为 0.退避机制的作用原理如图 1 所示.

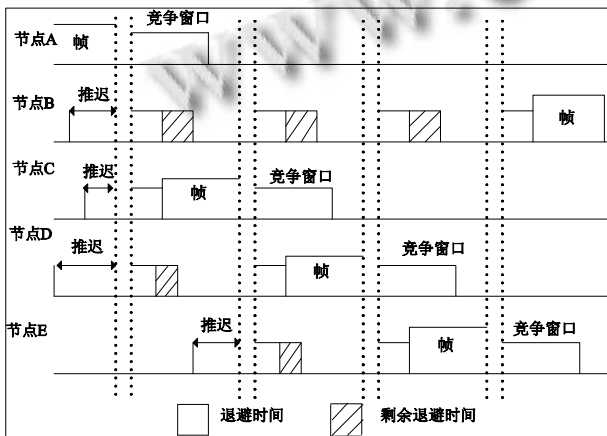


图 1 退避机制流程图

2 EC-SMAC协议设计

2.1 竞争窗口调整机制

由于 SMAC 协议中竞争窗口是固定不变的,不能够根据网络负载情况和节点剩余能量动态调整.随着无线传感器网络监测时间的增加和节点间监测任务的变化,会导致网络性能的降低和某些节点的提前死亡.

SMAC 中具有相同睡眠调度机制的节点组成簇,节点同时睡眠和侦听.在 IEEE802.11DCF 中,如果信道空闲,节点在等待一个帧间隔 DIFS 时间后仍然空闲,就立刻发送数据.在 SMAC 中,因为同一个簇中的节点会同时醒来,所以就不能采用类似的方法,否则多个节点等待 DIFS(DCF IFS)时间后都立刻发送数据,会造成很大的冲突.在等待 DIFS 时间结束之后,信道仍然空闲的,节点进入退避状态.随机选择一个退避时间 BT,随机退避时间结束后信道仍空闲则发送数据.若在退避时间结束之前侦听到信道忙的,节点取消计时器.随机退避时间 BT 表示为:

$$BT = rand(0, CW - 1)SlotTime \quad (1)$$

其中, CW 是竞争窗口大小, rand(0,CW-1)是在[0, CW-1]内均匀分布的伪随机整数, SlotTime 是一个时隙的时间长度.

2.2 SMAC 性能分析

2.2.1 SMAC 时延和竞争窗口分析

由文献[3]可知在未采用自适应侦听 SMAC 协议中,如图 2 所示的场景中, N 跳的平均时延为:

$$\begin{aligned} E[D(N)] &= E[t_{s,1} + (N - 1)T_f + t_{cs,N} + t_{tx}] \\ &= T_f / 2 + (N - 1)T_f + t_{cs} + t_{tx} \\ &= NT_f - T_f / 2 + t_{cs} + t_{tx} \end{aligned} \quad (2)$$

而节点的侦听时间可表示为:

$$t_{cs} = DIFS + rand(0, CW - 1)SlotTime \quad (3)$$

所以 n 跳网络的平均时延为:

$$\begin{aligned} E[D(N)] &= E[t_{s,1} + (N - 1)T_f + t_{cs,N} + t_{tx}] \\ &= T_f / 2 + (N - 1)T_f + t_{cs} + t_{tx} \\ &= NT_f - T_f / 2 + t_{cs} + t_{tx} \\ &= NT_f - T_f / 2 + t_{tx} + DIFS \\ &\quad + rand(0, CW - 1)SlotTime \end{aligned} \quad (4)$$

由(4)式可知,节点的平均时延会随着竞争窗口的值变化,为降低数据的平均时延,应减少 CW 值.

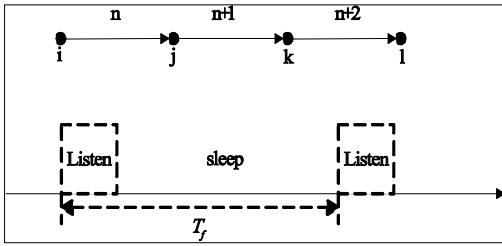


图 2 SMAC 时延分析

2.2.2 SMAC 能耗与吞吐量分析

在 SMAC 协议中, 节点的能耗可分为四种: 传输能耗 E_t 、接收能耗 E_r 、空闲监听能耗 E_i 和睡眠能耗 E_s , 在图 2 所示的场景中, 对第 N 跳节点 i , 当链路上仅有一个数据包传输时, 节点 i 的能耗为:

$$E_{total} = E_r ListenTime + P_{len} / B_{wid} E_r + E_t ListenTime + P_{len} / B_{wid} E_r + (N-3)E_i ListenTime \quad (5)$$

其中 listenTime 为节点侦听时间, P_{len} 为数据包大小, B_{wid} 为链路带宽. 并在此假设 $E_t=E_r=E_i$, 忽略睡眠能耗 E_s , 当链路上的数据包个数为 P_m 时, 节点 i 的能耗为:

$$E_{total} = (N-1)E_i ListenTime + 2P_m E_r P_{len} / B_w \quad (6)$$

综合以上分析, 可见链路上节点的能耗是和数据包个数成正比关系的. 当网络吞吐量较大时, 节点 i, j, k 和 l 需要转发的数据包个数会相应的增加. 并且越是靠近发送节点, 需要转发的数据包个数越多, 能耗也越大. 在分析中, 可设置足够大的缓存队列和分组存活时间, 这样当网络负载较大时, 较大的竞争窗口就可以获得较高的吞吐量, 但相应的能耗也会增加. 由上节分析可知较大的竞争窗口也会导致数据包延迟增加. 于是, 竞争窗口 CW 和吞吐量、时延、能耗就存在一种相互矛盾的关系, 需要不断的调整 CW 来适应不同网络状况下的需求.

2.3 动态竞争窗口调整

如前所述, 由于 SMAC 采用固定竞争窗口机制, 无法自适应具体网络负载变化. 为此, 设计一种动态调整竞争窗口的 MAC 协议——EC-SMAC(Energy and Content Sensor MAC). 该协议在 SMAC 基础之上进行改进, 能根据节点剩余能量和碰撞次数阶段性的调整竞争窗口的大小. 该协议可以有效的增加能耗利用率, 并提升网络吞吐量.

在协议改进初始阶段, 通过设定节点剩余能量阈

值, 剩余能量在阈值之上时, 根据节点竞争信道的碰撞次数衡量网络负载, 并作为调整竞争窗口依据. 反之, 节点在确定竞争窗口大小时, 应考虑到节点具体剩余能量的值, 以网络吞吐量的牺牲换取节点能耗的降低, 延长节点生存时间.

假设节点初始能量为 E_{tot} , 剩余能量为 E_{sur} , 网络初始化之前可设定剩余能量阈值为 $1/2E_{tot}$, 在每次竞争信道之前统计当前节点剩余能量. 竞争窗口的调整分为下面两个阶段:

(1) 当 $E_{sur} > 1/2E_{tot}$ 时, 说明此时节点剩余能量充足, 应充分发挥传感器网络监测数据能力, 最大化网络吞吐量, 此时根据节点竞争信道时的碰撞次数 cancelamount 分别调整竞争窗口 CW 为 15, 31 和 63.

(2) 当 $E_{sur} \leq 1/2E_{tot}$ 时, 此时节点剩余能量处于较低水平, 此时应以节点较长的生存周期为目标, 在改进算法中, 拥有剩余能量多的节点竞争到信道的概率应该大于剩余能量较少的节点, 随着节点能量的逐渐消耗, 竞争窗口 CW 应逐渐变大.

具体调整过程如图 3 所示:

```

Step1 recv
{
    if (state_ == CR_SENSE) {
        mhCS_checkToCancel();
        cancelamount++;
    }
}

Step2 handleCounterTimer
{
    if (E_sur > 1/2 E_tot)
    {
        if (cancelamount < 20)
            {newDataCW = 63;}
        if (cancelamount >= 20 && cancelamount < 40)
            {newDataCW = 31;}
        else
            {newDataCW = 15;}
    }
    else
    {
        if (E_sur > 20 && E_sur <= 30)
            {newDataCW = 15;}
    }
}

```

```

if(  $E_{sur} > 10$  &&  $E_{sur} \leq 20$  )
    {newDataCW = 31;}
else
    {newDataCW = 63;}
}
    
```

图 3 竞争窗口调整过程

3 仿真实验和结果分析

本文采用 UC Berkeley 开发的网络仿真器 NS2 对无线传感器网络进行仿真. 在 NS2 仿真环境中构建 20 个节点随机分布在 500m*500m 的范围内, 节点的初始能量都是 60J, 发射范围是 120m. 为了验证竞争窗口的变化对网络整体性能的影响, 在设置的场景中, 应尽可能制造一些碰撞情况, 在同一个簇内设置较密集的节点. 同时在实际环境中也可以避免由于节点竞争信道失败所导致的某一区域信息丢失. 具体仿真参数设置如表 1.

表 1 仿真参数表

参数	数值
占空比	40%
场景大小	500*500
节点通信距离	120(m)
数据包长度	50bytes
初始能量	60J
发送功率	15mW
接收功率	12mW
空闲功率	6mW
睡眠功率	5.0e-5mW
节点个数	20
竞争窗口	15
运行时间	700s

在相同的网络拓扑中分别对比 SMAC 和 EC-SMAC 整体性能, 这里的性能主要指吞吐量, 平均收发数据包的延迟时间以及能耗.

3.1 网络能耗分析

如图 4 所示, 改进后的 EC-SMAC 协议降低了约 4%左右的能耗, 主要原因是在竞争窗口调整的第二个阶段, 考虑了节点剩余能量的数值, 权衡并设置了相应的竞争窗口大小, 使得节点在剩余能量不多时, 减少节点接入信道的概率, 增加节点生存时间.

图 5 为不同数据包发送间隔的网络生存时间, 此处网络生存时间定义为第一个节点死亡的时间. 实验

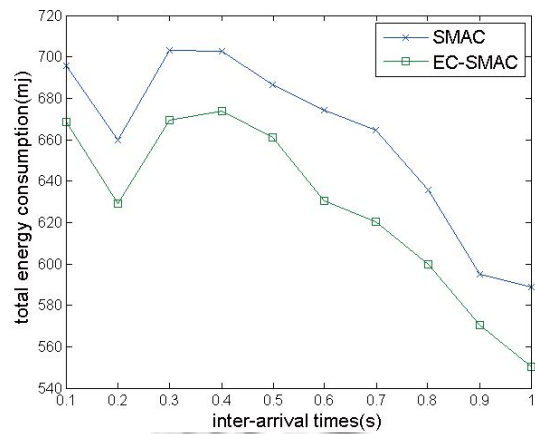


图 4 网络总能耗

结果表明, 在网络负载较大即发包间隔为 0.1 时, 网络生存时间可以有效的提升 12.5%左右. 当网络负载较轻时生存时间提升约 5.1%, 实验结果表明, 改进后的协议在网络负载较大时可以显著提升网络生存时间.

最后对比的为发包间隔从 0.1-1.0 之间统计得到网络生存时间的平均值, 生存时间提升约 7.3%.

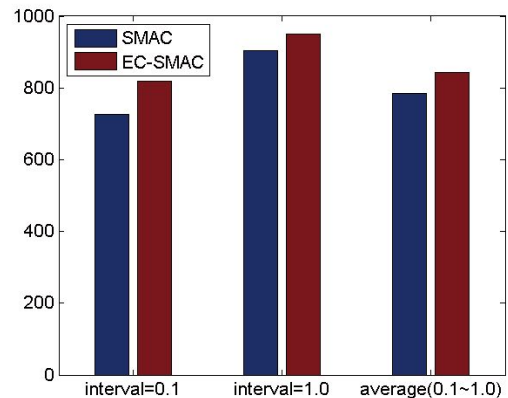


图 5 网络生命周期

3.2 网络吞吐量和时延分析

由于 CW 的频繁变化, 导致网络整体吞吐量和原 SMAC 协议基本持平, 主要是因为 CW 的分阶段调整机制, 使得 CW 的调整不总是有利于网络吞吐量的增加, 在节点能耗较低时, 需要较少节点接入信道的概率, 相应的会增加数据包延迟的增加和网络吞吐量的下降. 但是综合考虑前期调整 CW 阶段, 最终实验结果显示网络吞吐量和时延基本保持不变. 如图 6、7 所示.

3.3 网络有效能耗

如果考虑网络有效能耗, 即成功传输单个数据包所消耗的能量时, EC-SMAC 协议的有效能耗仍是小于

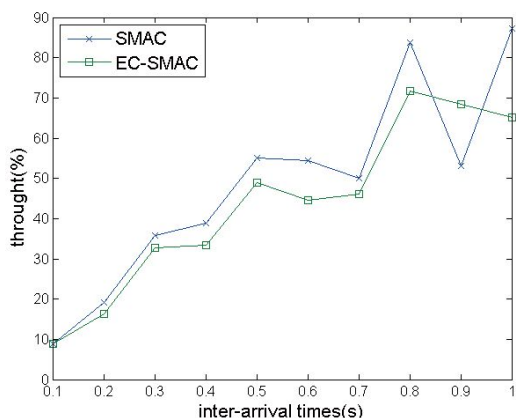


图 6 网络吞吐量

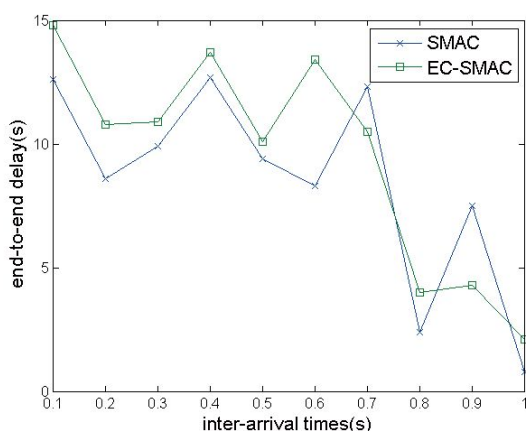


图 7 网络时延

SMAC 协议, 表示改进后协议将已消耗的能量进行了有效的利用. 在能量消耗或传输数据包数量相同时, EC-SMAC 可以更多的传输数据包和更少的消耗能量. 如图 8 所示.

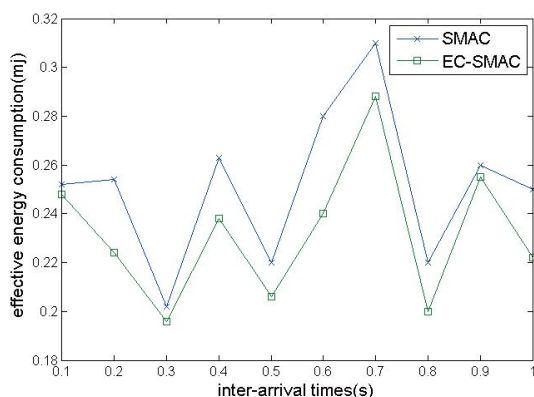


图 8 网络有效能耗

4 结束语

本文提出了一种适用于无线传感器网络的 EC-SMAC 协议, 它改进了 SMAC 的竞争退避机制, 动态的调整竞争窗口的大小, 设定阈值, 大于阈值时根据网络冲突状况调整 CW, 减少冲突发生, 提高网络性能; 小于阈值时, 根据节点剩余能量大小适时调整 CW, 减少节点接入信道的概率, 降低节点能耗, 延长网络生存周期, 实验结果表明, 在保证网络吞吐量和时延稳定的前提下, 平均延长了 7% 的网络生命周期.

参考文献

- 1 孙利民, 李建中, 陈渝. 无线传感器网络. 北京: 清华大学. 2005.5.
- 2 蹇强, 龚正虎, 朱培栋. 无线传感器网络 MAC 协议研究进展. 软件学报, 2008, 19(2): 389-403.
- 3 Ye W, Heinemann J, Estrin D. Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks. IEEE. Acll Trans. on Networking. June 2004, 12(3): 493-506.
- 4 Dam TV, Langendoen K. An adaptive energy efficient MAC protocol for wireless sensor networks. First ACM Sensys, 2003.
- 5 Lin P, Qiao C, Wang X. Medium access control with a dynamic duty cycle for sensor networks. IEEE Wireless Communications and Networking Conference 3. 2004. 1534-1539.
- 6 Saxena N, Roy A, Shin J. Dynamic duty cycle and adaptive contention window based QoS- MAC protocol for wireless multimedia sensor networks. Computer Networks, 2008, 2(13): 2532-2542.
- 7 古连华, 程良轮, Zhu QM. Au-MAC: 一种自适应的无线传感器网络 MAC 协议. 自动化学报, 2010, 36(1): 54-59.