

基于节点剩余能量及流量自适应的混合 MAC 协议

穆一夫¹, 刘瑞祥², 王潜平³, 王良英⁴

(1 中国矿业大学(北京) 机电与信息工程学院, 北京 10083; 2 北京联合大学 信息学院, 北京 100101;
3 中国矿业大学 计算机科学与技术学院, 江苏 徐州 221116; 4 南京富士通南大软件技术有限公司, 江苏 南京 210012)

摘 要: 基于节点剩余能量和网络流量变化, 文中提出了 RA-ZMAC 协议, 在 Z-MAC 协议中加入了能量控制和流量自适应机制. 当网络流量低时, 时隙的一部分时间中节点将进入睡眠状态以节省能耗, 随着流量增大, 睡眠时间减少. 当网络流量继续增大, 节点工作到 TDMA 方式, 实现了基于竞争到基于调度的信道接入的平滑转换. RA-ZMAC 协议根据节点剩余能量和流量情况改变竞争窗口和退避时间, 当节点流量大时增大竞争窗口; 节点剩余能量越多, 退避时间越短.

关键词: 混合 MAC 协议; 剩余能量; 流量控制; ZMAC 协议

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2012)11-0123-03

An Hybrid MAC Protocol Based on Residual Energy and Network Traffic

MU Yi-fu¹, LIU Rui-xiang², WANG Qian-ping³, WANG Liang-ying⁴

(1 School of Mechanical and Information, China University of Mining and Technology, Beijing 10083, China;

2 College of Information, Beijing Union University, Beijing 10010, China;

3 School of Computer, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

4 Nanjing Fujitsu Nanda Software Technology Co. Ltd., Nanjing 210012, China)

Abstract: Based on the node's residual energy and network traffic, a RA-ZMAC protocol is proposed. RA-ZMAC protocol employs energy control and traffic adaptive mechanism. When network traffic is low, Owner nodes sleep in a part time of their slot, saving energy. The sleep time is reduced as the network traffic increases. The node runs in HCL mode when the network traffic increases to an upper value. This traffic adaptive mechanism brings smooth transition of the data transmission mode and reduces idle listening. Besides, RA-ZMAC protocol adjusts the contention window size and backoff time according to the node's residual energy and traffic. The results show that RA-ZMAC protocol have better performance than Z-MAC protocol in prolonging network lifetime, network throughput and energy saving.

Key words: hybrid MAC protocol; residual energy; traffic control; ZMAC protocol

1 引言

Z-MAC 协议已经在 TinyOS 中实现. 它在中、高流量下能够提供更高的吞吐量, 能量消耗也更小; 在低流量情况下, 性能比 B-MAC 稍差, Z-MAC 具有比传统 TDMA 协议更好的可靠性和容错能力, 在最坏情况下, 协议性能接近基于竞争的 MAC

协议.

Z-MAC 协议提出了本地时间帧(Local Time Frame)的概念, 只保证两跳邻居内节点的时间帧相同. 两跳邻居的规模决定帧长, 避免了两跳邻居规模小的节点采用较长的帧长, 提高了信道利用率. 假设节点 i 的时隙为 S_i , i 的两跳邻居规模为 F , 则将 i 的时间帧设为 2^α , 其中 α 满足 $2^{\alpha-1} \leq F \leq 2^\alpha - 1$. 节点

i 的时隙为 $l \cdot 2^\circ + s_i (l=1, 2, 3 \dots)$.

本文在深入分析、比较几种现有的网络流量评估方法基础上, 提出 RA-ZMAC 协议, 在 RA-ZMAC 协议中, 网络流量大时, 节点的退避时间较长, 避免网络拥塞, 且剩余能量多的节点的退避时间较长, 承担更多转发任务. 对 RA-ZMAC 协议进行仿真, 结果表明 RA-ZMAC 协议表现出比 Z-MAC 协议更好的网络性能.

2 网络流量评估方法

Z-MAC 协议和其他基于流量自适应的 MAC 协议都需要知道网络的流量情况, 根据网络流量调整一些参数和算法. 如何有效的评估网络流量是值得讨论的问题, 目前存在以下几种流量评估方法.

2.1 信道噪声水平

Z-MAC 协议中用信道噪声水平定性地评估网络流量大小. 信道噪声水平可以通过节点发送数据前的平均噪声退避时间表示^[1]. 通过对实际节点组成的两跳场景进行多次试验, 得出信道噪声水平和两跳邻居范围内竞争程度的相关性.

2.2 丢包率

衡量网络性能时有个重要指标, 丢包率(packet loss rate). 节点的丢包率是指节点没有成功发送到目的节点的数据包占所发送的总的数据包的比例.

$$\text{丢包率} = \frac{\text{丢弃的数据包}}{\text{接受的数据包} + \text{丢弃的数据包}} \times 100\% \quad (1)$$

丢包率与数据包发送频率以及数据包大小有关. 数据发送频率越高, 数据包越大, 则可能产生的丢包率越大.

有两种可以反映两跳邻居竞争程度的方法, 一是计算节点 Sender 的丢包率; 二是计算节点 Sink 的丢包率. 第一种方法比较复杂, 计算丢包率时需要 Sink 节点反馈包投递信息. 当丢包率达到规定门限值后, 也必须通过同样的过程发送 ECN 标示来通知 Sink 节点的两跳邻居节点. 第二种方法相比之下简单得多, 只需要计算节点的丢包率, 此时计算丢包率不用公式(1)来表示, 因为不知道发往 Sink 节点的总的数据包数量, 而是用每秒钟内, 接收节点离开空闲状态到接收状态但没有接收到数据的次数表示. Sink 节点直接向其所有一跳邻居节点发送 ECN 标示, 避免了过多 ECN 消息的传递.

2.3 时隙利用率

基于时隙分配的混合 MAC 协议中, 时隙利用

率^[3]可以反映网络流量的变化. 时隙利用率高, 证明网络流量越高; 反之, 则网络流量低. 时隙 i 的利用率可用如下公式计算:

$$U_i(M) = \frac{\text{被占用周期}}{\text{单个时隙内周期数}} \times 100\% \quad (2)$$

式中, 被占用周期是指非时隙所有节点所占用的时间, 不包括时隙所有节点对信道的使用时间. 在数据传输发生碰撞的情况下, 节点则认为该段时间被其他的节点占用. 第 i 个时隙的时隙使用率 $S_i(M+1)$ 可通过下面表达式获得:

$$S_i(M+1) = \alpha U_i(M) + (1-\alpha) S_i(M) \quad (3)$$

其中, α 为指数平滑常数, 取值大于 0, 小于 1. 当网络流量变化平稳时, 可取相对较大的 α ; 当网络流量变化较大时, 则应取较小的 α . 时隙利用率衡量网络流向在基于竞争的 MAC 协议中无法使用.

2.4 节点流量预测的 ARMA 模型

传感器网络的流量模式具有不均衡性和应用相关性的特点, 流量的不均衡性表现在越是靠近基站的节点, 流量负担越重. 应用相关性是指在事件驱动的应用中, 数据流以随机突发为主, 而在周期性数据采集应用中, 网络流量相对平稳, 具有规律性. 可见, 确定传感器网络的流量模型必须与其应用场景相结合. 应用于周期性数据采集应用的节点流量预测的 ARMA^[2-3] 模型如下:

$$\hat{X}_t(1) = \sum_{j=1}^m I_j X_{t-j} \quad (4)$$

其中, m 为 X_t 之前的 m 次观测值, 可根据预测精度的要求取值, 通过实验证明 ARMA 模型是对未来流量的预测结果与实际吻合度高.

3 RA-ZMAC 协议设计

本节提出 RA-ZMAC 协议, 从流量自适应和退避时间两方面对 Z-MAC 协议进行改进. RA-ZMAC 协议根据节点的流量值调整睡眠时间, 根据节点的剩余能量和预测流量值调整竞争窗口的大小以及退避时间的长短.

3.1 流量自适应机制

混合 MAC 协议使用竞争状态标志来实现协议的切换, 即单纯地从 CSMA 方式切换到 TDMA 方式, 是突变式的转换, 连续性和平滑性不理想. 在转换过程中采取流量自适应的动态占空比^[4], 当流量增大时, 根据节点缓冲队列长度, 减小占空比, 直至一个周期长度等于时隙长度时, 就完全转换成了 TDMA 机制.

Z-MAC 协议中即是采用的发送竞争状态标志 ECN 的方式,收到 ECN 消息后,节点将传输模式改为 HCL 后进行一次接入信道,然后又变为 LCL 模式.这与网络实际流量情况不符,实际应用中,网络流量大会持续一段时间,而不是瞬时的.这就造成在那一段时间不断发送 ECN 消息,严重影响了网络性能. LCL 模式和 HCL 模式主要是针对发送节点的优化,流量自适应更多的优化了节点在接收模式下的能耗.

受到以上流量自适应 MAC 协议思想的启发,对 Z-MAC 协议进行改进.将一个时隙再细划分为侦听/睡眠周期,根据节点流量情况动态改变占空比,即改变侦听时间在整个周期中所占的比例. Z-MAC 协议是在每个时隙上使用 LPL 技术侦听信道情况,改进后的协议在侦听/睡眠周期的侦听调度上使用 LPL 侦听.如图 1 表示改进协议 RA-ZMAC 的帧结构.

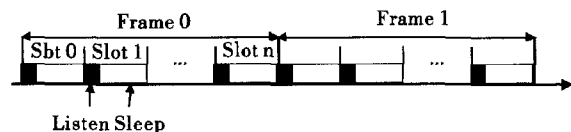


图 1 RA-ZMAC 的帧结构

RA-ZMAC 中的帧同步方法和 Z-MAC 协议中相同,侦听/睡眠周期的同步利用侦听时间的一部分时间来进行.节点发送数据之前,在同步时间内向其一跳邻居节点通知自己的调度周期.

3.2 网络流量评估方法的选取

本文采用接收节点的丢包率来评估网络竞争程度,丢包率能够直接反映两跳邻居的竞争情况,只需发送一跳 ECN.根据数据采集周期及每次数据采集时间设置发送一次 ECN 效果的持续时间,减少数据延后性的影响.采用 ARMA 模型预测节点的流量,调节占空比.如表 1 所示.

表 1 RA-ZMAC 占空比规则

模式	接收率 α	侦听时间
LCL	$\alpha < 20$	$f_{\text{node}} \leq L$ slot/4
		$L < f_{\text{node}} < H$ slot/2
		$f_{\text{node}} \geq H$ 1 slot
HCL	$\alpha \geq 20$	1 slot

3.3 基于节点剩余能量和流量的时隙接入

Z-MAC 中的数据传输,无论是 LCL 模式还是 HCL 模式,Nonowner 节点在接入无线信道时,

由退避时间的长短决定接入信道的优先级,设退避时间为 T_b , T_b 为 $[T_0, T_{n0}]$ 之间的一个随机整数: $T_b = \text{rand}[T_0, T_{n0}]$. 此外无论是 Owner 节点还是 NonOwner 节点,侦听到信道空闲后都要再等待 T_0 时间,以便减少传输冲突.在 Z-MAC 协议中, T_0 的值设为 8 个时隙大小, T_{n0} 的值设为 32 个时隙大小. T_0 和 T_{n0} 的大小固定不变.

网络流量大时,较长的退避时间,可以减少数据传输冲突,网络流量较小时,较短的退避时间,能减少数据传输延迟.从剩余能量方面考虑通过控制退避时间的长短,让剩余能量多的节点优先接入信道,执行更多的数据转发任务,可以均衡节点间的能量消耗,延长网络寿命.因此,根据节点流量和剩余能量情况改变 T_0 , T_{n0} 以及 T_b 的值有利于提高网络性能.

在 T_0 , T_{n0} 的选取中再次用到节点的流量信息.当节点的流量值低于 L 值时,将 T_0 , T_{n0} 的值减半,就减少了等待和退避时间,可以降低延迟;当流量预测值超过 H 值时,将 T_0 , T_{n0} 的值增倍,增加了侦听信道和退避的时间,可以减少碰撞.

节点接入信道的退避时间 T_b 服从正态分布^[10].正态分布的均值与 T_{n0} 以及节点的能量因子 η 有关,正态分布的方差和 T_{n0} 相关,设节点的初始能量值为 E_{max} ,节点的当前剩余能量值为 E_{now} ,则节点的能量因子 $\eta = E_{\text{now}}/E_{\text{max}}$.正态分布的均值和方差如公式(5)和公式(6)所示:

$$E(T_b) = T_{n0}(1 - \eta) \quad (5)$$

$$D(T_b) = T_{n0}/4 \quad (6)$$

其中, T_b 以时隙为最小单位,所以只能选取整个时隙,文中采用向下取整的方式.

通过公式(5)可以看出,当节点的剩余能量值大时,正态分布的均值会比较小,此时退避时间 T_b 选取较小值的概率大,而当节点的剩余能量值较小时,正态分布的均值会比较大, T_b 取得较大值的概率大.通过公式(6)可以看出, $D(X)$ 的选择和 T_{n0} 有关,当流量增大时 T_{n0} 增大, T_{n0} 变大,正态分布的方差将变大,正态分布呈现出较大的不均匀性,这样发送节点选择的退避时间相差就比较大,发生冲突的可能性极小.

4 结束语

本文介绍了 Z-MAC 协议,分析了 Z-MAC 协

参考文献:

- [1] 郭敏,任娜,高卫平. 第二代 curvelet 变换与区域能量的多聚焦图像融合方法[J]. 西北大学学报, 2009, 39(05), 750-754.
- [2] Yan Sun, Chunhui Zhao, Ling Jiang. A new image fusion algorithm based on wavelet transform and the second generation curvelet transform [C]// Proceeding of 2010 International Conference on Image Analysis and Signal Processing (IASP 2011). Wuhan, China: IEEE, 2010, 438 - 441.
- [3] Qin Xue, Zhuangzhi Yan, Shengqian Wang. Mammographic feature enhancement based on second generation curvelet transform [C]// Proceeding of 2010 3rd International Conference on Biomedical Engineering and Informatics (BMEI 2010). Yantai, Shan dong, China; IEEE, 2010; 349 - 353.
- [4] 闫敬文,屈小波. 超小波分析及应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2008.
- [5] 李逵,狄红卫. 一种基于二代 Curvelet 变换的图像融合新算法[J]. 暨南大学学报, 2008, 29(01): 11-15.
- [6] Jiang Tao, Chen Chao. An ameliorative remote sensing image fusion method based on the second-generation curvelet transform[C]// Proceeding of 2009 Urban Remote Sensing Joint event. Qingdao, China: IEEE, 2009; 1-6.
- [7] Youzhi Zhen, Xiaodong Hou, Tiantian Bian, et al. Effective image fusion rules of multi-scale image decomposition[C]// Proceedings of the 5th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis. Istanbul, Turkey; IEEE, 2007, 362-366.
- [8] Yuancheng Li, Qiu Yang, Runhai Jiao. A novel image compression algorithm using the second generation of curvelet transform and SVM[C]// Proceeding of 2009 WRI Global Congress on Intelligent Systems. Xiamen, China; IEEE, 2009; 117-121.
- [9] 何贵青,郝重阳. 一种基于特征量积的遥感图像融合方法[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(3): 71-73.
- [10] 赵鲁燕,尹君. 图像融合效果评价方法研究[J]. 遥感信息, 2005 (4): 16-18.

作者简介:

胡学龙 男, (1960—), 硕士, 教授. 研究方向为图像处理与多媒体技术.

(上接第 125 页)

议的运行过程、传输规则和成帧规则. 针对 Z-MAC 协议中流量评估方法和 ECN 机制的不足, 文中深入分析并比较了几种现有的网络流量评估方法: 丢包率、时隙利用率以及节点流量预测的 ARMA 模型.

RA-ZMAC 协议采用接收节点的丢包率来评估网络竞争程度, 通知发送节点改变数据传输模式; 采用 ARMA 模型预测节点的流量, 调节每个时隙中侦听时间所占的比例. 此外, RA-ZMAC 协议中节点根据自身剩余能量和流量情况改变竞争窗口 T_0 和 T_{n0} 的大小, 并按照正态分布规律决定退避时间. 在 RA-ZMAC 协议中, 网络流量大时, 节点的退避时间较长, 避免网络拥塞, 且剩余能量多的节点的退避时间较长, 承担更多转发任务. 对 RA-ZMAC 协议和 RA-ZMAC 协议进行仿真, 仿真结果表明 RA-ZMAC 协议表现出比 Z-MAC 协议更好的网络性能.

参考文献:

- [1] Polastre J, Hill J, Culler D. Versatile low power media access for wireless sensor networks[C]// Proc of the 2nd ACM Conf on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys). Baltimore; ACM, 2004; 95-107.
- [2] 李捷, 刘先省, 韩志杰. 基于 ARMA 的无线传感器网络流量预测模型的研究[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(5): 1224-1227.
- [3] 曹晓梅, 韩志杰, 陈贵海. 基于流量预测的传感器网络拒绝服务攻击检测方案[J]. 计算机学报, 2007, 30(10): 1798-1805.
- [4] 廖照亮, 张烈平, 严华. 基于动态占空比的流量自适应 MAC 协议[J]. 计算机工程, 2011, 37(6): 85-87.
- [5] 陈国铭, 蒋铃鸽, 何晨, 等. 基于节点剩余能量的无线传感器网络 MAC 协议[J]. 上海交通大学学报, 2007, 41(11): 1788-1791.

作者简介:

穆一夫 男, (1966—), 博士, 工程师. 研究方向为数据挖掘和无线网络.