

应用于中等负载无线传感器网络的节能型 MAC 协议

任秀丽, 杜吉丽, 尹凤杰, 薛建生

(辽宁大学 信息学院, 沈阳 110036)

摘要: 基于网络负载的大小, 提出了适用于中等负载的无线传感器网络的节能 MAC 协议——EC-MAC 协议。该协议引入概率 p , 采用 TDMA 方式和减少节点的空闲侦听时间来节能, 提高了信道的利用率, 延长了网络的生命周期。仿真结果表明, 该协议在节省能量方面要优于传统 TDMA 和 BMA 协议。

关键词: 无线传感器网络; MAC 协议; 节能

中图分类号: TP393

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2010)04-1410-02

doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2010.04.056

Energy-efficient MAC protocol for medium load in wireless sensor networks

REN Xiu-li, DU Ji-li, YIN Feng-jie, XUE Jian-sheng

(College of Information, Liaoning University, Shenyang 110036, China)

Abstract: Based on the size of networks load, this paper proposed an energy-efficient MAC protocol (EC-MAC) for medium-load in wireless sensor networks. The EC-MAC adopted probability (p), TDMA and reducing the idle period for energy-saving. The simulation results show that the EC-MAC performs better than the conventional TDMA protocol and bit-map-assisted (BMA) protocol in channel utilization and prolongs the lifetime of the networks.

Key words: wireless sensor networks (WSN); MAC protocols; energy-efficiency

无线传感器网络 (WSN) 是由分布在给定局部区域内足够的传感器节点通过无线通信方式形成的一个多跳的自组织 (Ad hoc) 的网络系统。在军事、环境监测和工业控制等方面有广阔的应用前景, 被称为未来十大技术之一^[1]。然而在多数应用中, 传感器节点的能量无法得到补充 (如被部署在环境比较恶劣的地区), 这使得如何有效利用能源, 延长网络的工作寿命成为无线传感器网中一个非常重要的问题。

在传感器节点中, 无线通信模块被认为是传感器节点中能量消耗的主要所在, 而 MAC 协议直接控制着无线通信模块的活动, 因此 MAC 协议节能效率的好坏将严重影响网络的生命周期。要想设计一个能量有效的 MAC 协议, 必须分析是哪些因素导致了能量损耗。经过大量实验和理论分析得出如下几个方面: 空闲侦听、冲突重传、窃听、控制消息开销。其中空闲侦听是能量浪费的主要因素。一个好的 MAC 协议应该具有节省能量消耗、延长网络生命和可扩展性等特点, 因此传统的 MAC 协议不适合无线传感器网络的应用。基于无线传感器网络的应用需求, 结合分簇策略, 提出了节能的 EC-MAC 协议, 一种面向传感器网络应用的 MAC 协议, 节点在自己的时隙内醒来, 如果有数据需要传送给簇头, 就打开射频模块, 否则, 就关闭射频模块, 从而节省了能量。

1 无线传感器网络 MAC 层协议分析

目前, 研究人员设计了很多服务于 WSN 的 MAC 协议, 可以根据协议的特点分为如下两类:

a) 基于竞争的 MAC 协议。SMAC 协议既是最早被提出应

用于无线传感器网络的 MAC 协议之一, 也是典型的基于竞争的随机接入协议。它采用下面介绍的多种机制来减少节点能量的消耗: (a) 固定周期性的侦听和睡眠; (b) 消息传递技术; (c) 流量自适应侦听机制。TMAC 协议^[2]是在 SMAC 协议的基础上提出的。在空闲侦听、碰撞、协议开销和串音等浪费能量的因素中, 空闲侦听占绝对大的比例, 特别是在消息传输频率较低的情况下。TMAC 协议将时间分为时隙, 时隙长度固定, 它根据网络当前的通信流量动态调整节点活动时间, 用突发方式发送消息, 减少空闲侦听时间, 增加了睡眠时间, 降低了能量的消耗。

b) 基于调度的 MAC 协议。TDMA 是实现信道分配的简单成熟的机制, 就是为每个节点分配独立的用于数据发送或接收的时隙。其中基于 TDMA 的 MAC 协议调度节点在不同时隙内收发数据, 避免了与邻居节点发生碰撞。TDMA 协议具有内在的节能特性, 适合于无线传感器网络负载较高的情况下。但是缓冲区空的节点在它们分配的时隙内仍要打开射频模块, 从而消耗了能量。

BMA 协议是一种基于比特位图帮助的内部分簇通信的适合大规模 WSN 的 MAC 协议。它改进了传统的 TDMA 协议, 即在每帧开始时有一个竞争阶段, 当传感器节点有需要传输数据的, 节点向簇头发送 1 bit 的控制消息预订时隙, 这样簇头节点知道在当前帧内有哪些节点需要传送数据, 并给这些节点分配时隙。在这些节点传送完数据后, 簇头节点可以进入睡眠, 并在下一帧开始时苏醒。由于簇头节点无须在整个帧上保持激活, 极大地节约了簇头节点的能量。与传统的 TDMA 协议相比, BMA 减少了空闲侦听的时间, 从而降低了能量的消耗。与

收稿日期: 2009-08-19; 修回日期: 2009-09-24

作者简介: 任秀丽 (1965-), 女, 吉林四平人, 教授, 博士后, 主要研究方向为无线网络与通信; 杜吉丽 (1984-), 女, 山东临沂人, 硕士研究生, 主要研究方向为无线传感器网络 (djlj103@163.com); 尹凤杰 (1965-), 女, 辽宁沈阳人, 教授, 博士, 主要研究方向为控制理论; 薛建生 (1954-), 女, 北京人, 教授, 博士, 主要研究方向为计算机网络。

TDMA 相比, BMA 更适用于节点少的网络, 在负载小时节能效果明显, 此时时延小。

2 EC-MAC 协议描述

由以上分析知道, 传统的 TDMA 协议适合于负载大的网络, 而 BMA 协议适合于负载小的网络。根据无线传感器网络的应用需求, 提出适合工作于中等规模的无线传感器网络的节能 MAC 协议——EC-MAC 协议。在此协议中, 每个节点在分配给它的时隙内 (时隙的长度为 T_{data}) 内醒来, 如果它没有数据要发送给簇头, 就立即关闭射频模块。假定射频模块在 T_e 后关闭, 而不是在整个时隙内都保持打开状态。实现本协议需要具备的假设条件有: a) 节点在整个网络中保持静止状态; b) 单跳网络环境。与 HEED、BMA 协议相同, EC-MAC 协议 (EC-MAC 协议的帧结构如图 1 所示) 按轮进行, 每轮包括两个阶段:

a) 设置阶段 (setup phase)。它主要完成时钟同步和成簇的工作。在簇形成阶段, 传感器节点根据自己的剩余能量高低来决定是否当上簇头。簇头负责为簇内所有传感器节点分配时隙, 收集和簇内传感器节点发过来的信息。如果出现意想不到的状况导致簇头节点失效了, 那么在广播消息中能量处于第二位的节点会接管失效簇头的位置。

b) 稳定阶段。它包括以下四个阶段:

(a) T_e 。在 T_e 阶段节点打开射频模块, 查看缓冲区是否有数据需要发送, 如果没有数据需要发送, 马上关闭射频模块, 进入睡眠状态^[2]。

(b) RSV。预约阶段由 N 个 mini slot 组成, N 为簇内成员的数目, 成员节点根据其 ID 大小而顺序占用此 N 个 mini slot (在设置阶段成员节点可以知道本簇其他成员节点的 ID 大小), 若节点检测到某事件发生 (即有数据需要传送时), 将在其 mini slot 内向簇头发送 RSV 消息预定时隙, 如同 BMA 协议, RSV 消息可以仅为 1 位。由于各成员在不同的 mini slot 内向簇头节点发送 RSV 消息, 不存在碰撞的现象^[3]。

(c) Schedule。在调度阶段, 簇头节点广播一次 TDMA 调度信息, 该消息包含簇成员节点的 ID 和分配给那些有数据要发送给簇头的节点的时隙号。

(d) Data transmission。数据传输阶段包含 m 帧, 每个帧的大小和时间是确定的, 每帧对应一次簇内的数据收集。假设一个簇内有一个簇头节点和 N 个非簇头节点。在数据传输阶段每个节点在分配给它的时隙内打开射频模块, 把数据传送给簇头。如果一个节点在它打开射频模块后发现缓冲区是空的, 也就是说该节点没有数据要发送, 那它就马上关闭射频模块, 以节省能量。没有数据要发送的节点就会进入睡眠状态。

3 EC-MAC TDMA 和 BMA 协议的性能分析

采用分簇的网络环境, 有一个簇头节点和 N 个非簇头节点。假设一轮中有 m 帧, 第 i 帧有 n_k 个源节点 (有数据需要发送的节点称为源节点)。在协议中, 使用 Bernoulli Trail 来计算节点有数据要发送的概率 p 。 n_k 是一个 Binomial 随机变量, 一帧中源节点的数量为 $E_{n_k} = Np = n(k=1, 2, 3, \dots, m)$ 。每帧中源节点的数量不相同。传送状态和接收状态的功率消耗分别是 P_t 和 P_r , EC-MAC 协议中节点打开射频模块和检查空缓冲区的功率消耗为 P_e , P_s 为睡眠状态的功率消耗。在本协议中, 源节点打开射频模块传输或接收数据的能量消耗忽略不计^[4]。

传输或接收一个数据包和控制包的时间分别为 T_{data} 和 T_{ct} , 节点打开射频模块, 检查缓冲区, 关闭射频模块的时间为 T_e , P_{ip} 和 E_{ic} 分别为空闲节点的功率消耗和能量消耗, 在 BMA 协议中, 簇头节点传输一个控制包的时间为 T_{cb} 。

采用文献 [5] 提出的能量模型分析 EC-MAC 协议, 然后与传统 TDMA 和 BMA 协议相比较。

1) EC-MAC 协议 在一帧中, 传输数据所消耗的能量为

$$E_{dc} = p_t T_{\text{data}} \quad (1)$$

打开射频模块, 检查缓冲区, 关闭射频模块的能量消耗为

$$E_{ie} = p_e T_e \quad (2)$$

总消耗的能量为 $Np_e T_e$ 。在预约阶段, 有数据需要发送的节点发送控制包消耗的能量为 $np_t T_b$ (T_b 为发送 1 bit 数据的时间), 簇头收到控制包消耗的能量为 $np_r T_b$ 。在调度阶段, 簇头为有数据要发送的节点分配时隙, 能量消耗为

$$E_{cs} = np_t T_{ct} + np_r T_{ct} \quad (3)$$

数据传输阶段, 消耗的能量为

$$E_{dc} = np_t T_{\text{data}} + np_r T_{\text{data}} + 2(N-n)p_s(T_{\text{data}} - T_e) \quad (4)$$

所以在第 i 帧, 整个能量消耗为

$$E_{fc} = Np_e T_e + np_r T_b + np_t T_b + np_t T_{ct} + np_r T_{ct} + np_t T_{\text{data}} + np_r T_{\text{data}} + 2(N-n)p_s(T_{\text{data}} - T_e) \quad (5)$$

假设每轮有 m 帧, 每轮中系统的总能量消耗为

$$E_{\text{EC-MAC}} = m(Np_e T_e + np_r T_b + np_t T_b + np_t T_{ct} + np_r T_{ct} + np_t T_{\text{data}} + np_r T_{\text{data}} + 2(N-n)p_s(T_{\text{data}} - T_e)) \quad (6)$$

2) BMA 协议 在每一个会话开始时有一个竞争阶段。每一个源节点在自己的时隙内传输控制包, 其余 $N-1$ 个时隙空闲, 每个源节点的能量消耗为

$$E_{dc} = p_t T_{ct} + (N-1)p_{ip} T_{ct} + p_t T_{\text{data}} + p_r T_{cb} \quad (7)$$

每个非源节点的能量消耗为

$$E_{ic} = Np_{ip} T_{ct} + p_r T_{cb} \quad (8)$$

在竞争阶段, 簇头节点收到 n 个控制包, 在其他 $N-n$ 个时隙内保持空闲状态。簇头节点的能量消耗为

$$E_{cc} = n(p_r T_{ct} + p_r T_{\text{data}}) + (N-n)p_{ip} T_{ct} + p_t T_{cb} \quad (9)$$

BMA 协议每轮的平均能量消耗为

$$E_{\text{BMA}} = m(n(p_t T_{ct} + (N-1)p_{ip} T_{ct} + p_t T_{\text{data}} + p_r T_{cb}) + (N-n) \times (Np_{ip} T_{ct} + p_r T_{cb}) + n(p_r T_{ct} + p_r T_{\text{data}}) + (N-n)p_{ip} T_{ct} + p_t T_{cb}) \quad (10)$$

3) TDMA 协议 在第 i 帧, 源节点的能量消耗为

$$E_{dc} = p_t T_{\text{data}} \quad (11)$$

非源节点的能量消耗为

$$E_{ic} = p_{ip} T_{\text{data}} \quad (12)$$

簇头节点的能量消耗为

$$E_{cc} = np_r T_{\text{data}} + (N-n)p_{ip} T_{\text{data}} \quad (13)$$

TDMA 每轮的平均能量消耗为

$$E_{\text{TDMA}} = p_t T_{ct} + Np_r T_{ct} + m(np_t T_{\text{data}} + 2(N-n)p_{ip} T_{\text{data}} + np_r T_{\text{data}}) \quad (14)$$

利用 NS-2 仿真工具, 对 EC-MAC、TDMA 和 BMA 协议进行性能分析, 分析协议的能量消耗时, 使用 Rockwell's WINS 模型^[6]。仿真场景参数设定: 面积 $s = 10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$, $R = 20 \text{ m}$, $\text{transmit} = 462 \text{ mW}$, $\text{receive} = 346 \text{ mW}$, $\text{idle} = 330 \text{ mW}$, $\text{sleep} = 64 \text{ mW}$, $\text{datarate} = 24 \text{ kbps}$, $\text{packet size} = 250 \text{ Byte}$, $\text{control size} = 18 \text{ Byte}$ 。在实验中, 假定 $p_{ip} = p_e$ 。

图 2 中假设 $N = 10$, $m = 3$ 。由图 2 可知, 当 $p < 0.9$ 时, EC-MAC 协议要优于 BMA 和传统的 TDMA 协议; 除了负载比较重时, EC-MAC 比传统的 TDMA 要节能, 负载比较大时, EC-MAC 和 TDMA 比 BMA 协议耗能要少。所以可以推定, EC-MAC 协议适合工作在中小负载的网络中。 (下转第 1429 页)

采用文献[8]介绍的均方根相对误差 (root mean square error, RMSE) 模型对预测结果进行统计:

$$e = \sqrt{\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{d \in [u, v]} (u_{di} - v_{di})^2\right)} \quad (6)$$

其中: N 表示测试样本数目; u_{di} 表示模型的预测值; v_{di} 是时间序列的真实值。

5 PBM 与 SVM 预测方法的比较

实验分别选取某地区通信网络中一周的通信告警数据, 分别根据不同的监测窗、预警窗和预测窗对告警交易取样, 并且用两种预测方法分别建模。

表 1 显示了取样的过程。设滑动窗口为 3S, 预测窗口、预警窗口、预测窗口分别为 3S、0.5S、1.5S, 得到一组样本值。取其中 2/3 样本作为训练集, 1/3 样本作为测试集, 分别针对两种预测方法 SVM 和 PBM 进行预测误差率的测试, 结果如表 2 所示。

表 1 告警取样值

原始告警	1 000	2 000	3 000	4 000	5 000	10 000
交易数目	350	715	1 064	1 372	1 739	3 538
正样本数目	64	86	105	119	138	234
负样本数目	286	629	959	1 253	1 061	3 304

表 2 SVM 和 PBM 的预测误差率比较

样本数	10	20	30	40	50	60
SVM	0.289	0.167	0.059	0.032	0.014	0.010
PBM	0.304	0.237	0.036	0.029	0.009	0.007

从表 2 可以看出, 样本数目较小的时候 SVM 的预测精度略好于 PBM, 当样本数目增加, 则 PBM 的预测误差率明显小于 SVM, 说明 PBM 的适用范围要比 SVM 广泛, 并且可以达到 SVM 的预测效果。

6 结束语

通信网中有些预测重大故障的告警数量并不多, 对这类告

警序列进行预测属于小样本学习过程。本文提出了一种新的基于稀疏贝叶斯的预测方法 PBM, 对通信告警序列进行了建模研究, 并比较了 PBM 和经典预测方面 SVM 的预测误差率。实验结果表明: PBM 方法可以用于时间序列的预测, 并且具有较高的预测精度, 是一种适用于通信网告警的告警预测方法。

参考文献:

- [1] HAN J, PEI J, YIN Y, *et al.* Mining frequent patterns without candidate generation: a frequent-pattern tree approach [J]. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 2004, 1(8):53-87.
- [2] PI De-chang, QIN Xiao-lin, GU Wang-feng, *et al.* STBAR: a more efficient algorithm for association rule mining[C]//Proc of the 4th International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Guangzhou:[s. n.], 2005: 1529-1533.
- [3] VILALTA R, APTE C V, HELLERSTEIN J L, *et al.* Predictive algorithms in the management of computer systems [J]. *IBM Systems Journal*, 2002, 41(3):461-474.
- [4] TAY F E H, CAO L J. A comparative study of saliency analysis and genetic algorithm for feature selection in support vector machines [J]. *Intelligent Data Analysis*, 2001, 5(3):191-209.
- [5] BURGESS C. A tutorial on support vector machines for pattern recognition [J]. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 1998, 2(2): 121-167.
- [6] WEISS G M, HIRSH H. Learning to predict rare events in events sequences[C]//Proc of the 4th International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. [S. l.]: AAAI Press, 1998: 359-363.
- [7] 单莘, 朱永宣, 郭军. 基于支持向量机的网络告警预测知识发现 [J]. *微电子学与计算机*, 2007, 24(6):35-37.
- [8] WILLIAMS O, BLAKE O, CIPOLLA R. Sparse Bayesian learning for efficient visual tracking [J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005, 27(8):1292-1304.

(上接第 1411 页)

图 3 中假设 $m = 10, p = 0.6, N$ 是变化的, 可以看出, 随着网络中节点的增加, EC-MAC 协议比其他两种协议的能耗都要小, 从而 EC-MAC 协议适合于中大规模的网络。图 4 中假设 $N = 10, p = 0.6, m$ 是变化的, 可以看出, 随着 m 的增大, EC-MAC 协议比传统的 TDMA 和 BMA 更节能。

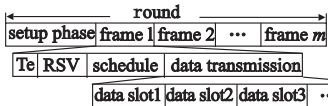


图1 EC-MAC协议的帧结构

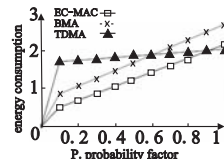


图2 能量消耗和p的关系图

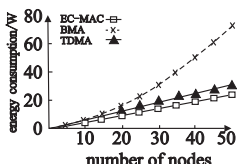


图3 能量消耗和N的关系图

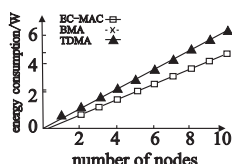


图4 能量消耗和m的关系图

综合图 2~4 结论可以得出, EC-MAC 协议更适合工作在中等规模的无线传感器网络中。

4 结束语

考虑到无线传感器网络的应用环境, 提出了基于簇的节能

MAC 协议, 仿真实验证明, 在中等负载的情况下 EC-MAC 协议比传统的 TDMA 和 BMA 要节能。下一步研究如何将 MAC 层协议与无线传感器网络中其他层结合在一起, 设计基于跨层的数据链路层协议。

参考文献:

- [1] 姜华, 袁晓兵, 王鹏, 等. 无线传感器分簇网络中 MAC 协议的研究 [J]. *计算机应用研究*, 2007, 24(3):265-270.
- [2] BAI Rong-gang, Qu Yu-gui, GUO Yang, *et al.* An energy-efficient TDMA MAC for wireless sensor networks[C]//Proc of the 2nd IEEE Asia-Pacific Services Computing Conference. Washington DC: IEEE Computer Society, 2007:69-74.
- [3] 龚海刚, 刘明, 余昌远, 等. 无线传感器网络环境下基于事件驱动应用的节能 TDMA 协议 [J]. *电子学报*, 2007, 35(10):1843-1848.
- [4] HEINZELMAN W R, CHANDRAKASAN A P, BALAKRISHNAN H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. *IEEE on Wireless Communications*, 2002, 10(4): 660-670.
- [5] LI J, LAZAROU G Y. A bit-map-assisted energy-efficient MAC scheme for wireless sensor networks[C]//Proc of the 3rd International Symposium on Information Processing in Sensor Networks. New York: ACM Press, 2004:55-60.
- [6] RAGHUNATHAN V, SCHURGERS C, PARK S, *et al.* Energy-aware wireless microsensor networks[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2002, 19(2):40-50.