

文章编号:1001-893X(2012)08-1349-05

无线传感器网络能量高效混合 MAC 算法*

卢艳宏¹, 掌 明², 冯 源²

(1. 连云港职业技术学院 电气学院, 江苏 连云港 222005; 2. 淮海工学院 电子工程学院, 江苏 连云港 222005)

摘 要:针对无线传感器网络 MAC 协议中存在的能耗问题,提出了能量高效的无线传感器网络混合 MAC(EEH-MAC)算法,采用基于 TDMA 机制的时槽系数动态调整簇内节点的时槽大小来降低数据的传输时延;同时,对部分不需要数据传输的节点不分配时槽来减少能耗;按簇内节点剩余能量系数形成时槽分配顺序来减少状态转换的能耗;在簇头之间采用 CSMA/CA 机制的随机分配策略进行通信。仿真结果表明,EEH-MAC 协议能有效减少能耗并延长网络生命周期。

关键词:无线传感器网络;介质访问控制;动态时隙分配;节能

中图分类号:TP393 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1001-893x.2012.08.026

An Energy-efficient Hybrid MAC Algorithm in Wireless Sensor Networks

LU Yan-hong¹, ZHANG Ming², FENG Yuan²

(1. Electrical Institute, Lianyungang Technical College, Lianyungang 222005, China;

2. School of Electronic Engineering, Huaihai Institute of Technology, Lianyungang 222005, China)

Abstract: Aiming at energy consumption for MAC protocol in wireless sensor networks(WSNs), an energy-efficient hybrid MAC algorithm for WSNs called EEH-MAC is proposed. It adopts time-slot factor based on TDMA to adjust slot size to reduce data transmission delay and allows a longer sleep time for the part of nodes which have no data transmission to save energy. At the same time, a slot order is formed by the residual energy coefficient to reduce the state conversion energy consumption. It uses CSMA/CA mechanism to communicate with cluster heads. Simulation results show that EEH-MAC can reduce energy consumption and prolong network lifetime.

Key words: wireless sensor network(WSN); medium access control(MAC); dynamic slot allocation; energy saving

1 引 言

由大量传感器节点构成的无线传感器网络主要用于数据的采集和传输,在军事监控、环境监测、工业控制、智能家居等方面有着广泛的应用前景。由于传感器网络节点部署密度大、环境复杂、节点体积小、电

池容量有限且节点更换和能量补充较难实现,因此,节能是无线传感器网络面临的一个严峻挑战。

无线传感器网络的介质访问控制(Medium Access Control, MAC)协议决定了节点之间无线通信资源的分配和无线信道的使用方式。如何在无线通信过程中减少因为数据碰撞、重传和控制开销等引起额外的开销已引起很多学者的广泛注意,并提出了

* 收稿日期:2011-11-01;修回日期:2012-04-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61174013);江苏省高校自然科学基金资助项目(BK20110398,08KJD520003)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No. 61174013); The Natural Science Foundation of Jiangsu Province Universities(BK20110398,08KJD520003)

大量的 MAC 协议。其中 S-MAC 协议主要采用周期性侦听和休眠机制来延长节点的休眠时间和降低能耗,节点间通过形成虚拟簇来缩短空闲侦听时间,结合使用物理载波和虚拟侦听机制来解决信息碰撞和串音问题。其优点是可扩展性较好,能适应网络拓扑结构的变化;缺点是协议实现非常复杂,需要占用大量存储空间,这对于资源受限的传感器节点显得尤为突出。T-MAC 协议根据通信流量动态调整活动时间,用突发方式发送消息。通过采用自适应调度方法,协议能较好地适应网络流量的变化。优点是有较好的能量效率性能,缺点是引入了早睡问题,在延迟和带宽利用率方面性能不好。文献[1]提出了基于 TDMA 机制的 MAC 协议。网络中的所有节点被分成多个簇,每个簇的簇头负责为成员节点分配时槽、收集和处理数据、使用多跳通信机制把数据发送给汇聚节点,其簇头要有较强的处理和通信能力,其能耗也较大。文献[2]提出了流量自适应混合 MAC 协议,通过预测机制跟踪网络负载和冲突情况实现 CSMA 和 TDMA 的自适应混合,在降低冲突的同时尽量保持较高的信道利用率。文献[3]利用现有的 MAC 协议构造转发能量消耗公式,提出了一个新的非线性的数学公式来最小化数据传输中的总能量消耗。基于时隙分片原理的 MAC 协议通过规定节点参与时隙竞争的顺序来避免时隙冲突。多信道 CSMA 协议^[4]使用基于预留的多信道机制实现信道分配,有效减少冲突,但传输时延会增大。文献[5]提出了基于时间槽结构的能量有效的无碰撞的 MAC 协议,该协议可以实现高速传递和可忍受的时延,但如果网络中节点密度太大,将会导致由于碰撞而引起的不完整的邻居信息或更多的能量消耗。文献[6]提出了一个基于 TDMA 的 MAC 协议,采用基于簇的集中时间槽分配策略等。

本文在综合分析基于竞争和基于 TDMA 协议的优缺点的基础上,从减少能耗和提高信道利用率方面出发,提出了一种无线传感器网络能量高效混合 MAC(Energy-efficient Hybrid MAC Protocol for Wireless Sensor Networks, EEH-MAC)算法,在簇内采用基于 TDMA 机制的动态时槽系数调整簇内节点的时槽大小,从而降低数据的传输时延;对不需要传输数据的节点不分配时槽来节约能量;按簇内节点剩余能量系数大小形成时槽分配顺序来减少状态转换的能耗。簇间采用基于 CSMA/CA 机制的随机分配策略进行通信。

2 系统模型

2.1 网络模型

文中假定 N 个传感器节点随机均匀分布在 $M \times M$ 的正方形区域内,周期性地采集周围的环境信息,并且具有如下性质^[7]:

- (1)无线传感器网络是静态的、高密度分布的,即所有节点部署完毕后不再移动;
- (2)汇聚节点(Sink)是唯一的,且位于区域 A 以外的一个固定位置;
- (3)每个节点依靠 GPS 或相关技术获得其具体的物理位置 (x_i, y_i) ,并且具有唯一的标识符 ID;
- (4)任意两个节点 i, j 的欧氏距离为

$$d(i, j) = \sqrt{(x(i) - x(j))^2 + (y(i) - y(j))^2};$$

- (5)所有节点是同构的,且具有相同的初始能量和相似的处理能力(处理/通信),并且地位平等;
- (6)采用一定的策略把整个网络划分成若干个簇,簇内成员与簇头采用单跳通信,簇内成员不转发其他簇内节点的数据;簇头对数据进行融合以后采用多跳方式把数据传送给汇聚节点。

2.2 能量模型

本文采用文献[8]所述能量模型,考虑发射电路的发射能量、功率放大器消耗的能量以及接收电路消耗的接收能量,且能量损耗与距离有关。即为了发送 k 比特的信息包给距离为 d_{ij} 的节点,发送功耗为

$$E_{Tx}(k, d) = E_{elec} \times k + \epsilon_{amp} \times k \times d \times d \quad (1)$$

节点 i 和 j 之间的距离 $d_{i,j}$ 为

$$|d_{i,j}| = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (2)$$

接收节点的能耗为

$$E_{Rx}(k) = E_{elec} \times k \quad (3)$$

其中, E_{elec} 表示无线收发电路所消耗的能量(单位为 J/bit),取值为 50 nJ/bit; ϵ_{amp} 表示放大器消耗的能量(单位为 J/bit/m²),取值为 100 pJ/(bit·m⁻²)。

一般节点的剩余能量为

$$E_r(i) = E_r(i) - \sum_{n=1}^{n1} E_{Tx}(k_n, d_n) - \sum_{l=1}^{n2} E_{Rx}(k_l), \quad n1, n2 \in N \quad (4)$$

为了更好地接近实际情况,考虑簇头节点的处理能耗 E_p 为

$$E_p(k, m) = \sum_{i=1}^m E_{elec} \times k_i \quad (5)$$

式中, k 是每次发送的数据包的长度, m 是发送数据包的次数。则簇头节点的剩余能量为

$$E_r(i) = E_r(i) - \sum_{n=1}^{n1} E_{Tx}(k_n, d_n) - \sum_{l=1}^{n2} E_{Rx}(k_l) - E_p(k, m), n1, n2 \in N \quad (6)$$

式中, $n1$ 、 $n2$ 是簇头分别发送和接收信息包的次数, $E_p(k, m)$ 是簇头处理能耗。

3 EEH-MAC 算法

3.1 时槽大小和分配顺序

当簇生成以后,网络处于稳定的运行阶段。设簇头向簇内成员节点广播 TDMA 通信时槽表,成员节点 j 收到广播以后,只在属于自己的时槽内把监测到的数据以及节点自身的 ID、信息流量比特数的预约信息 l_j 和剩余能量 $E_{\text{residual}}(j)$ 。

对于第 i 簇,节点间的初始信道容量为 C ; 协议假设簇内有 N_i 个节点,分别为 $1, 2, \dots, N_i$, 各个节点的剩余能量分别为 $E_{\text{residual}}(k), k \in [1, N_i]$ 。某轮中分配给各个节点的时槽长度分别为 $t_k, k \in [1, N_i]$, 初始时时槽长度相等,则第 i 簇中用于节点发送数据的总时槽 $T(i)$ 为

$$T(i) = \sum_{p=1}^{n_i} t_p \quad (7)$$

假设在第 r 轮中,第 i 簇内的节点 j 分配到的时槽为 t_j ,那么节点 j 传输数据的最长时间为 $t_j - \sigma$,则节点 j 发送的最大数据量为 $C(t_j - \sigma)$ 。节点 j 的预约信息量为 l_j ,在该轮结束后剩余的数据量为 $l_j - C(t_j - \sigma)$ 。

$$l_{\text{residual}}(j) = l_j - C(t_j - \sigma) \quad (8)$$

在第 r 轮中,第 i 簇内的节点产生的数据总量 $L(i)$ 为

$$L(i) = \sum_{p=1}^{n_i} l_p \quad (9)$$

数据传输时间与信息量成正比,而与信道速率成反比,因此得到该剩余部分的数据在下一轮的传输时间为 $l_{\text{residual}}(j)/C$ 。

引入数据权值的概念,此数据权值为 $k \in (1, \xi)$,其中 ξ 的值根据具体的应用设定,本文中设 $\xi = 2$ 。

根据上面的分析,可以得到节点 n_j 下一轮的期望时槽为 $k \times l_{\text{residual}}(j)/C + \sigma$,即:

$$t_{\text{inest}}(j) = \frac{k(l_j - C(t_j - \sigma))}{C} + \sigma \quad (10)$$

在第 r 轮中,第 i 簇内的节点总数是 N_i ,假设需要发送信息的节点数为 $m (1 \leq m \leq N_i)$,其节点集合为 C_i ,则下一轮中,簇 i 中需要发送信息的节点的

期望总时槽 $T_{\text{inest}}(i)$ 为

$$T_{\text{inest}}(i) = \sum_{j=1}^m t_{\text{inest}}(j) \quad (11)$$

如果 $T_{\text{inest}}(i) < T(i)$,则说明第 i 簇中的总时槽能满足下一轮中需要发送信息的节点的总时槽要求,簇头在下轮广播中,按每个节点的期望时槽值进行分配来保证节点能及时把监测到的数据发送给簇头。

如果 $T_{\text{inest}}(i) > T(i)$,则说明无法满足所有需要发送信息的节点的期望时槽要求,此时我们更倾向于对大数据量的节点享有更多的发送数据的时间。因为在传感器网络的实时监测中,当有突发事件发生的时候,节点监测到的数据量会突然大量增加,说明该部分数据更紧迫,故该节点应该得到较大的时槽。为此,我们引入时槽调整系数 λ , λ 的值为

$$\lambda = \frac{T_{\text{inest}}(i)}{T(i)} \quad (12)$$

此时 $\lambda > 1$,簇头分别计算需要发送信息的节点 (C_i 集合中的节点) 在下一轮中分配的时隙:

$$t_{\text{real}}(j) = \frac{t_{\text{inest}}(j)}{\lambda}, j \in C_i \quad (13)$$

簇头在下轮广播中,按照计算得到的需要发送信息的节点占用的实际时槽大小来给相应的节点分配时槽,这样能保证让需要发送更多信息的节点占用更长的时槽来发送数据,避免大量的实时数据因为传输时延而影响其价值,同时也可以避免节点缓冲区的溢出而导致数据的丢失和减少网络拥塞的概率。

在广播时槽时簇内的所有节点都处于侦听状态,而分配到第一个时槽的节点不需要进行状态转换就可以直接进入自己的时槽来发送数据,为了减少状态转换消耗的能量,簇头从上一轮节点发送的信息的报告帧中获取每个发送信息的节点的剩余能量,簇头按照剩余能量系数大小排序,并以此顺序作为分配时隙的顺序。

3.2 簇间通信

簇头收集到簇内节点发送来的数据后,采用一定的策略进行数据融合并采用多跳方式传输给汇聚节点,簇头 CSMA/CA 机制实现与邻居簇头之间的通信连接,实现无线信道的共享。簇头 i 在发送数据包之前,向其路由上的下一跳邻簇头先发送请求帧 RTS,其邻簇头收到 RTS 后发送清除帧 CTS 进行应答,簇头 i 发送携带自己节点编号 ID、信息流量比特数 1 的数据包 packet。当邻簇头收到数据包 packet 后,向其邻簇头发送广播一个应答帧 (ACK) 确认数据包被正确接收。其他邻簇头侦听到 RTS 或

CTS 后等待,直到本次数据包发送结束以后再竞争信道。

4 EEH – MAC 性能分析

本节利用 MATLAB 仿真工具,从能量消耗、网络生命周期两个方面,通过与 TDMA、S – MAC 和 CSMA/CA 协议的比较来验证 EEH – MAC 算法的性能。

设仿真的 100 个传感器节点随机部署在 200 m × 200 m 的方形区域内,汇聚节点位于角落,其主要参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数表
Table 1 Simulation parameters

仿真参数	值
节点数 N/node	100
感知区域 A/m^2	200×200
Sink 节点数目	1
$E_{\text{elec}}/(\text{nJ}/\text{bit})$	50
$\epsilon_{\text{amp}}/(\text{pJ}/\text{bit} \cdot \text{m}^{-2})$	0.001 3
初始化能量 E/J	20
侦听能耗/ mW	13
空闲能耗/ mW	5
能量阈值/ W	0.2
信道容量/ (kbit/s)	60
数据包大小/ byte	100
广播包大小/ byte	20

4.1 能耗分析

为了体现 EEH – MAC 协议根据簇内节点负载情况动态调整时隙长度的特点,我们在一轮循环中对 EEH – MAC、TDMA – WSN 和 TDMA 的能耗进行了仿真比较,如图 1 所示。在仿真时,簇内的每个成员节点不一定有采集数据发送。

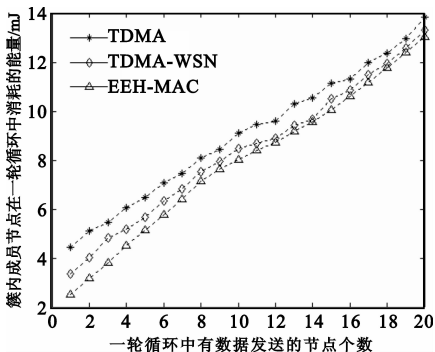


图 1 一轮循环内能量消耗比较

Fig.1 Comparison of energy consumption in one round

从图 1 可以看出:当网络流量较小时,EEH – MAC 算法的能耗比 TDMA 的能耗低,这主要是因为即使簇内节点没有数据传输,TDMA 协议中的簇头也要给节点分配固定时隙来保持侦听状态消耗许多空闲侦听能量;当发送数据的节点较多时,即节点通信负载差别不大时,EEH – MAC 算法消耗的能量也比 TDMA 低,这主要是因为 EEH – MAC 算法能根据簇内节点需要发送数据的实际情况来动态地调整分配给成员节点的时隙,使得某些数据量较大的节点可以占用更多的时隙发送数据来减少状态转换的次数,从而节约能量;对某些没有数据发送的节点则不分配时隙,减少侦听时间和次数来减少能量消耗。而 TDMA – WSN 算法的能耗介于 EEH – MAC 和 TDMA 之间,主要是因为 TDMA – WSN 采用了动态时隙分配算法,能根据节点需要发送数据情况动态竞争使用时隙,对于优先级别低或没有数据发送的节点不分配时隙,其能耗比 TDMA 略低,但因为 TDMA – WSN 在建立、计算冲突集和竞争分配时隙时需要消耗额外的能量,故其能耗比 EEH – MAC 略高。

4.2 生命周期分析

图 2 是当网络负载为 20 packet/s 时整个网络的节点存活情况,对比 4 个协议可以明显看出,CSMA/CA 协议能量消耗最大,其节点在 300 轮左右开始大幅度减少,到 1 200 轮左右时已经没有节点存活;S – MAC 协议要优于 CSMA/CA,而 TDMA – WSN 算法的节点存活情况在 800 轮之前和 EEH – MAC 算法非常接近,在 800 轮之后节点存活数量略微下降得明显,而 EEH – MAC 算法的节点存活情况最好,在 1 600 轮之后还有近 80% 的节点存活。而图 3 说明了当网络负载为 60 packet/s 时网络中节点的存活情况,其中网络负载增大时,CSMA/CA 协议性能下降得非常厉害,S – MAC 协议的性能下降明显,TDMA – WSN 算法在低负载时的存活节点数在 400 轮之后就有所下降,且下降趋势较明显,而我们设计的 EEH – MAC 算法的性能仅有微小的下降,这主要是因为 EEH – MAC 算法根据网络中各节点数据量大小动态地分配时隙,没有数据需要发送的节点会长期处于睡眠状态来节约能量,需要发送大量数据的节点因为占用了较长的时隙,能尽快把数据发送出去而节约能量,所以在同样情况下,EEH – MAC 算法的生命周期明显优于其他两个协议。

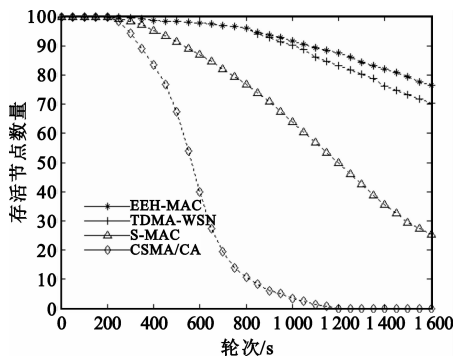


图 2 负载为 20 packet/s 时节点的存活情况
Fig.2 Survival nodes in load of 20 packet/s

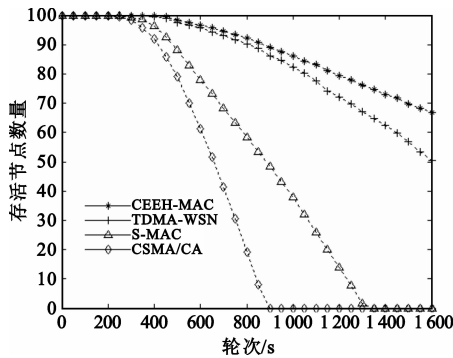


图 3 负载为 60 packet/s 时节点的存活情况
Fig.3 Survival nodes in load of 60 packet/s

5 结 论

基于能量高效的无线传感器网络混合 MAC (EEH-MAC)算法采用基于 TDMA 机制的时槽系数动态调整簇内节点的时槽大小,从而降低数据的传输时延;同时,对部分不需要数据传输的节点不分配时槽,让其拥有较长的睡眠时间来节约能量;在簇头之间采用 CSMA/CA 机制的随机分配策略进行通信。该方法从减少串音和空闲侦听两方面来降低能量消耗,从动态分配时槽大小来提高信道的利用率。仿真结果表明,在网络负载较大的情况下,EEH-MAC 协议节能效果明显,具有更小的平均时延和更长的网络生命周期。

参考文献:

[1] Arisha K A, Youssef M A. Energy-aware TDMA based MAC for sensor networks[C]//Proceedings of 2002 IEEE Workshop on Integrated Management of Power Aware Communication, Computing and Networking. New York, NY: IEEE, 2002.

[2] 郭彬, 李喆, 夏鹏. 无线传感器网络流量自适应混合 MAC 协议[J]. 计算机工程, 2008, 34(17): 31-33.

GUO Bin, LI Zhe, XIA Peng. Traffic-adaptive Hybrid MAC Protocol for Wireless Sensor Network[J]. Computer Engineering, 2008, 34(17): 31-33. (in Chinese)

[3] Frank Yeong-Sung Lin, Yen Hong-Hsu, Lin Shu-Ping. A novel energy-efficient MAC aware data aggregation routing in wireless sensor networks[J]. Sensors, 2009(9): 1518-1533.

[4] 陈宗明, 许力, 郑宝玉. Ad Hoc 网络中 MAC 协议的研究和展望[J]. 电讯技术, 2003, 43(6): 7-12.

CHEN Zong-ming, XU Li, ZHENG Bao-yu. MAC Protocols in Wireless Ad Hoc Networks: Study and Prospect[J]. Telecommunication Engineering, 2003, 43(6): 7-12. (in Chinese)

[5] Obraczka R K, Aceves G L. Energy-efficient, collision-free medium access control for wireless sensor networks[C]//Proceedings of the ACM SenSys 2003. Los Angeles, CA: ACM, 2003: 181-192.

[6] Arisha A, Youssef M A, Younis M Y. Energy-aware management in cluster-based sensor networks[J]. Computer Networks, 2003, 43(5): 649-668.

[7] 齐迎迎, 禹继国, 王楠楠. 无线传感器网络的节能分布式分簇算法[J]. 计算机工程, 2011, 37(3): 83-86.

QI Ying-ying, YU Ji-guo, WANG Nan-nan. Energy-efficient Distributed Clustering Algorithm for Wireless Sensor Network[J]. Computer Engineering, 2011, 37(3): 83-86. (in Chinese)

[8] Tabassum N, Ahsanul Haque A. GSEN: an efficient energy consumption routing scheme for wireless sensor network[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Systems and International Conference on Mobile Communications and Learning Technologies. Hong Kong, China: IEEE, 2006: 117.

作者简介:

卢艳宏 (1979—), 女, 江苏连云港人, 2010 年获硕士学位, 现为讲师, 主要研究方向为计算机技术、传感器技术;

LU Yan-hong was born in Lianyungang, Jiangsu Province, in 1979. She received the M.S. degree from East China Normal University in 2010. She is now a lecturer. Her research interests include computer technology and wireless sensor networks.

Email: lyh_lyg@mail.lygtc.net.cn

掌明 (1970—), 男, 江苏连云港人, 2011 年获博士学位, 现为副教授, 主要研究方向为无线传感器网络、信息网络及其安全;

ZHANG Ming was born in Lianyungang, Jiangsu Province, in 1970. He received the Ph.D. degree from Nanjing University of Posts and Telecommunications in 2011. He is now an associate professor. His research interests include wireless sensor networks, network and information security.

冯源 (1978—), 男, 江苏连云港人, 高级工程师, 主要研究方向为计算机网络和软件工程。

FENG Yuan was born in Lianyungang, Jiangsu Province, in 1978. He is now a senior engineer. His research interests include computer network and information security.