

无线传感网中一种基于多信道节能机制

徐曦^{1,2,3}, 谢晓尧³, 徐洪峰⁴

(1. 贵州大学 计算机科学与信息学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 湖南科技大学 信息与电气工程学院, 湖南 湘潭 411201;
3. 贵州师范大学 信息与计算科学重点实验室, 贵州 贵阳 550002; 4. 贵州师范大学 经济与管理学院, 贵州 贵阳 550002)

摘要:无线传感网是当前物联网技术研究的热点,无线传感网中如何对能耗进行控制以延长网络的生存时间又成为其中最受关注的问题. 为了实现能耗的有效控制,通过对能耗模型的研究和建立,研究提出了一种基于多信道无线传感网的节能机制. 它基于非坚持 CSMA 协议,是通过对非坚持 CSMA 协议中退避过程的控制和对物理层调制阶数的控制来达到控制能耗目的. 同时结合多信道无线传感网中可使用多个信道的特点,建立的节能机制加入可用信道数量来共同分析和处理. 最后仿真试验验证了文中提出的机制具有提升能耗效率的效果.

关键词:多信道;无线传感网;CSMA 协议;节能

中图分类号: TN711.1

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2014)04-0084-05

An energy - saving mechanism based on multi channel wireless sensor network

XU Xi^{1,2,3}, XIE Xiaoyao³, XU Hongfeng⁴

(1. Institute of Computer Science and Information, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. School of Information and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

3. Key Laboratory of Information and Computing Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550002, China;

4. School of Economics and Management, Guizhou Normal University, Guiyang 550002, China)

Abstract: Currently wireless sensor network is one of the most hot research in Network of Things. How to control energy consumption to prolong the network survival time in wireless sensor network becomes one of the most concerned problems. In order to achieve effective control of energy consumption, an energy saving mechanism was established based on multi channel wireless sensor network by building energy consumption model. It based on CSMA protocol, and in order to control energy consumption it controls back - off process in non - persistent CSMA protocol and physical layer modulation. And combined with the characteristics of multi channel wireless sensor network, it used multiple channels, so the energy saving mechanism added the available channel number. At last the simulation result proved that it could improve energy efficiency.

Key words: multi channel; wireless sensor network; CSMA protocol; energy saving

目前无线传感器网络(WSN)中处理器和传感器模块的功耗已经变得较低,而 WSN 研究的核心问题也就是降低能耗,就落在了如何降低通信模块的能耗上了,因为传感器节点的绝大部分能耗都在通信模块上产生. 如何在介质访问控制(medium

access control,简称 MAC)层对能耗进行控制是无线传感器网络设计的核心问题之一. 无线传感器网络有着与传统的无线网络明显不同的性能特点和技术要求,传统无线网络 MAC 层技术无法应用于传感器网络,各种针对特定传感器网络特点的节能

机制相继提出^[1-2].

当前多信道无线传感器网络以其自身独特的优点,在传感器发展领域内拥有广阔的研究空间.由于其特殊的网络结构使其上各层网络通信协议发生了本质的变化,尤其是对介质访问层的影响尤为巨大.本文在研究分析多信道无线传感网的基础上提出了一种新的节能机制,其结合 MAC 层与物理层的控制,达到减少能耗的目的^[3-4].

1 模型分析

定义整个无线传感网路中拥有 C 个互不相交的信道,其中 1 个信道用于传输控制信息,另外 $C-1$ 个信道用于传输数据信息.网络中节点的功能主要包括以下 3 个部分:1)网络层;2)MAC 层;3)物理层.在无线传感网络中网关节点周期性地采样在不同的信道的通信负荷,并以此来确定一个适当的调制阶数 M ,它将用于所有节点当前通信负载下的物理层调制设定^[5-7].

本文所设计机制是基于多信道无线传感网络且在 MAC 层采用非坚持 CSMA 协议.节点在进行数据发送之前首先需要不断的监听信道,在发现信道处于空闲状态时,就立即将数据从该信道上发送出去.整个发送过程中将会出现下列 4 种情形:

- 1)信道处于忙状态,此时节点执行退避过程,即等待一随机长时间后继续发送;
- 2)信道处于空闲状态,节点将数据包在该信道上进行发送,但在传输过程中发生冲突,则节点执行退避过程;
- 3)信道处于空闲状态,节点将数据包在该信道上进行发送,但在传输过程中由于噪声干扰而使数据包发生损坏,则节点执行退避过程;
- 4)信道处于空闲状态,节点将数据包在该信道上进行发送,传输成功.

现使用 $P_{\text{busy}}, P_{\text{col}}, P_{\text{cor}}$ 和 P_{suc} 分别表示上述 4 种状态的概率.这里设定在各个信道上的退避过程中的等待随机时间构成了一个独立同分布的随机变量序列,且它们都服从概率为 p 的随机分布^[8-9].另外由于退避过程对于能耗的影响并不大,因为本文中考虑的能耗优化主要是在物理层进行优化.

物理层采用的是 M 进制正交幅度调制方式 (MQAM),可以得到它的误码率为

$$P_{\text{ber}} = \frac{1}{5} e^{-\frac{1.5\gamma}{M-1}}. \quad (1)$$

式中, γ 定义理想奈奎斯特脉冲条件下的信噪比^[10],它的值为 $\frac{E_s}{N_0}$.

1.1 单信道非坚持 CSMA 分析

定义 H 为完成一个数据包传输所需要的时间,首先分析其在单信道条件下的非坚持 CSMA 协议中的情况.假定在节点在 t_0 时刻需要进行数据发送并在下一个时隙进行向信道上发送数据.现用 N 表示在成功完成数据传输之前向信道上进行数据发送的次数,用 W_i 表示第 i 次数据发送所消耗的时间,定义 τ 为时间单位时隙的时长.那么 H 的值可通过下式得出^[11-12]:

$$H = \sum_{i=0}^N W_i. \quad (2)$$

对于无高斯白噪声的非坚持 CSMA 协议,数据包成功传输的概率可得出为^[13]

$$P_{\text{suc}} = \frac{ae^{-aG}}{(1 - e^{-aG}) + a}. \quad (3)$$

式中, $a = \frac{\tau}{T_i}$, G 表示负载供应,它表示在传输时间 H 内成功传输的新数据包以及重新发送的数据包的平均数量^[14-15].在加入高斯白噪声的影响后的非坚持 CSMA 协议中,对于数据包成功传输的概率 P_{suc} 和数据包由于噪声损坏的概率 P_{cor} 有:

$$P_{\text{suc}} = \frac{ae^{-aG}(1 - P_{\text{beN}})}{1 + a - e^{-aG}}; \quad (4)$$

$$P_{\text{cor}} = \frac{ae^{-aG}P_{\text{beN}}}{1 + a - e^{-aG}}. \quad (5)$$

上 2 个式子中 P_{beN} 为加入高斯白噪声后信道上的误码率,它的值为

$$P_{\text{beN}} = 1 - (1 - P_{\text{ber}})^L. \quad (6)$$

式中, L 为数据包长度.

同时对于数据包传输过程中监测到信道忙的概率 P_{busy} 以及传输中发生冲突的概率 P_{col} 有:

$$P_{\text{busy}} = \frac{1 - e^{-aG}}{1 + a - e^{-aG}}; \quad (7)$$

$$P_{\text{col}} = \frac{a(1 - e^{-aG})}{1 + a - e^{-aG}}. \quad (8)$$

根据传输数据时的情况,第 i 次传输所消耗的时间(时隙数量)为

$$W_i = \begin{cases} B_i, & 1 \leq i \leq N-1 \text{ 且信道为忙;} \\ B_i + \frac{T}{\tau}, & 1 \leq i \leq N-1, \text{ 且传输时} \\ & \text{发生冲突或数据损坏;} \\ \frac{T}{\tau}, & i = N, \text{ 且传输成功时.} \end{cases} \quad (9)$$

式中, B_i 表示在第 i 次传输时进行退避过程的时隙数量.

将式(9)代入式(2)中, 忽略 W_0 可得:

$$H = \sum_{i=1}^{N-1} B_i + N_{\text{ccs}} \frac{T}{\tau} \leq \sum_{i=1}^N B_i + N_{\text{ccs}} \frac{T}{\tau}. \quad (10)$$

式中, N_{ccs} 为一随机变量, 它表示数据发送时发生冲突、数据损坏或是传输成功的数据发送次数. 由于在无线传感网中节点休眠所消耗的能量通常比节点唤醒所消耗的能量要大得多, 因此可以近似认为 H 的值为 $\sum_{i=1}^N B_i$. 这样对于 H 的特征函数有:

$$\varphi(s) = \sum_{i=1}^{\infty} P\{H = i\} S^i = \frac{P_{\text{suc}} p S}{1 - (1 - P_{\text{suc}} p) S}. \quad (11)$$

1.2 多信道非坚持 CSMA 分析

在多信道情况下任意数据包的传输时间 H 可以表示为

$$H = \min\{H^1, H^2, \dots, H^i, \dots, H^C\}. \quad (12)$$

式中, H^i 表示信道 i 上的数据包传输所需要的时间. 上式表明数据包在各条信道上传输时间的最小值就是 H 值. 根据 H 的特征函数可以使用 $P_{\text{suc}} p$ 来表示 H^i , 其累积分布函数可表示如下:

$$F_{H^i}(k) = 1 - (1 - P_{\text{suc}} p)^k. \quad (13)$$

此时 H 的累积分布函数为

$$F_H(k) = 1 - \prod_{i=1}^{C-1} [1 - F_{H^i}(k)] = 1 - (1 - P_{\text{suc}} p)^{k(C-1)}. \quad (14)$$

2 能耗优化

2.1 能耗模型

定义 $K = \left\lfloor \frac{T_{\text{limit}}}{\tau} \right\rfloor$ 表示规范化的传输时间边界^[9]. 在成功传输数据包之前而产生的丢包率定义为 P_{loss} , 表示为

$$P_{\text{loss}} = P\{H > K\} = (1 - P_{\text{suc}} p)^{KC}. \quad (15)$$

定义丢包率的上限为 δ , 则根据上式可得数据包成功传输概率需满足条件:

$$P_{\text{suc}} \geq \frac{1 - \delta^{\frac{1}{KC}}}{p}. \quad (16)$$

现可用泰勒公式近似 e^{-aG} 的值为 $1 - aG$, 可以得到最大误码率需要满足下式:

$$P_{\text{ber}} \leq 1 - \left(\frac{(1 + G)(1 - \delta^{\frac{1}{KC(C-1)}})}{p(1 - aG)} \right)^{\frac{1}{C}}. \quad (17)$$

将式(17)代入式(1)中可得:

$$\frac{E_b}{N_0} = -\frac{2(M-1)}{3 \log_2 M} \ln \left[5 \left(1 - \left(\frac{(1 + G)(1 - \delta^{\frac{1}{KC(C-1)}})}{p(1 - aG)} \right)^{\frac{1}{C}} \right) \right]. \quad (18)$$

在网络中节点在某个信道上进行通信时在某个时刻它只能发送数据或者是接收数据, 不能同时进行接收和发送, 即工作在半双工模式下. 在网络中各个信道被占用的概率是相同的, 因此在多信道情况下的通信成功概率 P_{suc}^M 与任意一个信道上的通信成功概率 P_{suc} 是相等的. 对于任意一个数据包, 定义 N 为它在传输成功后在所有信道上进行发送的总次数 (包括传输成功的那次), 其实际传输的平均数可表示为

$$E\{N_{\text{ccs}} | N\} = N\{P_{\text{suc}} + P_{\text{col}} + P_{\text{cor}}\} = N\{1 - P_{\text{busy}}\}. \quad (19)$$

式中, N_{ccs} 表示数据包从新发送的次数, 其均值为

$$\overline{N_{\text{ccs}}} = \frac{p(1 - aG)}{(1 + G)(1 - \delta^{\frac{1}{C(C-1)}})}. \quad (20)$$

2.2 能耗优化

定义能耗效率 η 来考虑能耗优化的问题, 它表示成功传输一个比特数据包的平均能耗, 定义式如下:

$$\eta = E_b \overline{N_{\text{ccs}}} = -\frac{2N_0(M-1)}{3 \log_2 M} \ln 5 (1 - z^{\frac{1}{C}}). \quad (21)$$

式中,

$$z = \frac{(1 + G)(1 - \delta^{\frac{1}{C(C-1)}})}{p(1 - aG)}. \quad (22)$$

所以能耗优化问题可以归纳为

$$\min_{(M, i, p)} \eta. \quad (23)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} 0 \leq p \leq 1; \\ M \in \{2^i | i = 1, 2, \dots\}; \\ 0 \leq P_{\text{ber}} \leq 1 - \left(\frac{(1 + G)(1 - \delta^{\frac{1}{C(C-1)}})}{p(1 - aG)} \right)^{\frac{1}{C}}. \end{cases} \quad (24)$$

固定 M 值可以从上述问题的求解中得到最优化的 p 值. 同样对于不同的 M 值都可以求出与它对应的最优化 p 值.

3 节能机制设计

本节中对在多信道非坚持的 CSMA 协议条件下进行了节能机制的设计. 整个机制遵循基本的 MAC 协议通信过程, 即 RTS/CTS/DATA/ACK 流程. 在进行设计之前做如下假设:

1) 控制信道的带宽为 WC , 该信道时是固定的且用于传输控制信息的. 另有 $C - 1$ 个互不相交的信道可用于数据传输;

2) $C - 1$ 个数据信道都具有相同的概率分布的回退过程, 通信流量负载在这些信道上均匀分布;

3) 控制信道与数据信道之间不会产生干扰,

节点收发控制信息与其发送接收数据信息不发生冲突;

4)所有节点都监听控制信道上的控制信息,控制信息通常以最大功率进行传输.网关节点可以通过控制信道来为整个网络提供即时的通信负载信息;

5)各个数据包都包含一个计数字段,各个节点在发送数据包之前都在这个字段加1的值.这样各个数据包的这个字段在到达网关节点时就可以被网关节点了解该数据包经过了多少次传输.通过对各个数据包传输次数的统计就能估计出通信负载的情况.

整个设计的节能机制流程如下:

1)当节点需要发送一个数据包时,它首先要依次监测各个数据信道,从信道1开始直到有空闲信道被监测到.

2)如果所有的信道都监测完后仍然没有空闲信道,则节点对所有信道执行概率为 p 的退避过程,即它在各个信道上执行一个概率为 p 的随机重发延时.当第一个重发延时到期时,节点监测相应的信道,如果此时该信道为忙状态,则节点对该信道重新执行退避过程.否则转入第4步骤.

3)如果监测到有空闲信道 j ,则对所有前面所监测到的忙信道 $i(i = 1, 2, \dots, j - 1)$,节点对它们都执行概率为 p 的退避过程.

4)节点监测到空闲信道后,首先通过控制信道发送 RTS 给需要进行数据传输的目的节点,通告目的节点可以该空闲数据信道上接收数据.目的节点收到 RTS 确认该空闲数据信道后将向源节点通过控制信道发送 CTS,源节点收到该帧后双方就开始在这个空闲的数据信道上进行数据传输了.

5)如果在数据传输过程中有冲突或者数据损坏的情况,则节点在该信道上执行退避过程.此时节点一方面继续等待看是否有重发延时到期,到期则监测信道状态.另一方面则继续监测哪些还未监测过的信道,直到出现空闲数据信道就转入步骤4.

6)如果数据包成功传输完成,目的节点通过该数据信道返回给源节点一个 ACK 帧,源节点收到该 ACK 帧后将结束信道上的所有退避过程.

4 仿真与分析

本部分仿真工具使用的是 MATLAB 软件.在

仿真过程中本节做出如下设定:数据包长度 L 为 1 000b its, R 的值为 250 kbps, T_{limit} 的值为 500 ms, δ 的值为 0.01,网络中的最大距离为 300 m,时隙时长 τ 为 1 μ s,可用信道数量为 5,控制信道的带宽是总带宽 R 的 10%.

仿真结果如下图所示.

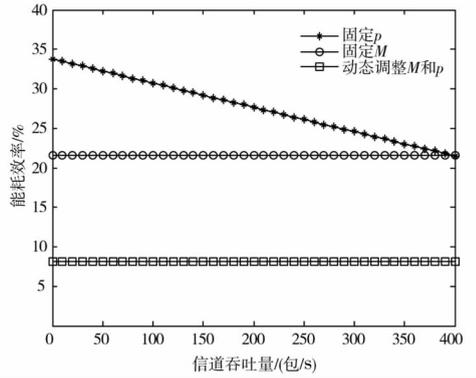


图1 不同 p 值和 M 值下的信道吞吐量与能耗

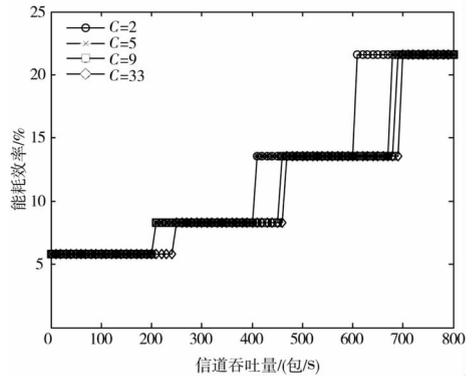


图2 不同信道数量下的能耗效率

在图1中带星号的线表示将 p 值固定为 2×10^{-5} 时的信道吞吐量和能耗效率的情形,而带圆圈的线表示将 M 值固定为 4 时的信道吞吐量和能耗效率的情形,带方框的线则表示动态调整 M 和 p 值的情形.从图上可以看出动态调整 M 和 p 值可以使得能耗效率 η 值最小,这时能耗取得最佳优化.另外从图上可以看出退避过程中的概率 p 对于能耗效率 η 值的影响比较大.在 M 值固定的条件下, p 值可以根据信道吞吐量来进行调整而使得能耗效率值不发生变化.当概率 p 值固定时,可以发现能量消耗要高出许多.因此当节点采用 M 值的调制模式进行数据发送时,可以通过调整概率 p 值来减少能量消耗.从图2中可以看出当信道数量增加时各阶调制的容量区域明显增大了,如从 0 到 200 的信道吞吐量区域内调制阶数 M 为 2(后调制

参数依次为 4, 8 和 16), 这时信道数量为 33 时此区域内明显加长了. 可以看到在后面的调制区域这个现象更加明显了.

5 结论

提出了一种新的基于多信道无线传感网的节能机制, 其中结合了物理层调制参数 M 和退避过程中的概率值 p 以及信道的数量 C 来综合考虑, 设计的目的是最小化能量消耗. 通过对不同条件下的 M 值、 p 值和 C 值进行仿真分析对比. 从仿真结果来看在该节能机制下通过合理的设置 M 值和 p 值可以达到较好的节能效率, 而且在不同的信道数目环境下有着不同的物理层调制参数和退避概率的优化配比. 另外根据节能机制的设定, 在固定的调制阶数下调整概率值 p 可以保持能耗不变, 同时信道数目的增加可以使各个信道上可容纳的吞吐量增加. 文中只针对非坚持 CSMA 协议下的物理层和链路层进行了联合优化节能设计, 对 p 坚持 CSMA 协议下的能耗优化以及更多层次间的联合优化将是新的研究方向.

参考文献:

- [1] 于宏毅. 无线自组织网络[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2004.
- [2] Weisheng S, Selvadurai S, Albert Y Z. An overview of channel assignment methods for multi - radio multi - channel wireless mesh networks[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2010(5):505 - 524.
- [3] Cheng Y, Li H K, Wan P J. A theoretical framework for optimal cooperative networking in multi radio multi channel wireless networks[J]. Wireless Communications, 2012(4):66 - 73.
- [4] Tseng Y C, Wu S L, Lin C Y, et al. A multichannel MAC protocol with power control for multi - hop mobile ad hoc networks [J]. Proceedings of 21st International Conference on Distributed Computing Systems Workshops, 2001(4):419 - 424.
- [5] Jain N, Das S R, Nasipuri A. A multichannel CSMA MAC protocol with receiver - based channel selection for multihop wireless networks [J]. Proceedings of the 9th International Conference on Computer Communications and Networks, 2011(10):726 - 733.
- [6] Goldsmith A J, Chua S G. Variable - rate variable - power MQAM for fading channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 45 (10):1218 - 1230.
- [7] Kyasanur P, Vaidya N. Routing and interface assignment in multi - channel multi - interface wireless networks [C]//2005 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC2005). New Orleans, Louisiana:IEEE Press, 2005.
- [8] Kleinrock L, Tobagi F A. Packet switching in radio channel: carrier sense multiple - access modes and their throughput - delay characteristics [J]. IEEE Transactions on Communications, 1975, 23 (12):1400 - 1416.
- [9] David B J, David A M. Dynamic source routing in Ad Hoc wireless networks mobile computing [M]. Netherlands:Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [10] 蒋云霞, 徐建波. WSAWs 中一种基于能耗自适应的多反应节点的选择算法[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2007, 22(4):85 - 88.
- [11] Avallone S. An energy efficient channel assignment and routing algorithm for multi - radio wireless mesh networks [J]. Ad Hoc Networks, 2012 (10): 1043 - 1057.
- [12] 贾杰, 林秋思, 陈剑, 等. 认知无线 Mesh 网络中的联合功率控制与信道分配的拥塞避免[J]. 计算机学报, 2013, 36(5):915 - 925.
- [13] Liu F, Bai Y. An overview of topology control mechanisms in multi - radio multi - channel wireless mesh networks[J]. Journal on Wireless Communications and Networking, 2012(1):324 - 335.
- [14] Li H, Cheng Y, Zhou C, et al. Routing metrics for minimizing end - to - end delay in multi - radio multi - channel wireless networks[J]. IEEE Transactions, 2012 (11):84 - 92.
- [15] Phan K T, Jiang H, Tellambura C. Joint medium access control, routing and energy distribution in multi - hop wireless networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(12):5244 - 5249.