

6LoWPAN 网络能耗性能建模分析

孙 霞¹, 梁 伟¹, 程宏斌¹, 王海军²

(1 常熟理工学院 计算机科学与工程学院, 江苏 常熟 215500; 2 湖北第二师范学院 计算机学院, 湖北 武汉 430205)

摘 要: 为了改进 6LoWPAN 网络能耗性能, 提出了一种基于超帧睡眠期的信道竞争机制, 并对其进行 Markov 建模. 基于本模型, 对发送状态概率、信道检测冲突概率等网络参数和节点平均能耗进行了数学分析, 并研究了参数 λ 、minBE 和 NB 对能耗等网络性能的影响. 理论分析表明, 该模型能够较好的描述和评价 6LoWPAN 网络 MAC 协议, 新机制降低了网络能耗, 也改善了协议的性能.

关键词: 建模; 6LoWPAN; 睡眠期; 节点能耗

中图分类号: TP393.03

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2012)11-0078-04

Performance Modeling Analysis of Energy Consumption for 6LoWPAN

SUN Xia¹, LIANG Wei¹, CHENG Hong-bin¹, WANG Hai-jun²

(1 School of Computer Science and Engineering, Changshu Institute of Technology, Changshu 215500, China;

2 School of Computer, Hubei University of Education, Wuhan 430205, China)

Abstract: In order to improve the performance of energy consumption for 6LoWPAN network, a channel contention mechanism based on superframe sleep period was proposed. Then a Markov chain model was established for the mechanism. Based on this model, the mathematical analysis on the steady-state probability of sending state, channel conflict probability and node average energy consumption was performed, and moreover the influence of the protocol parameters λ , minBE and NB on the network performance such as energy consumption was also analyzed. Finally, it is showed by the theoretical analysis that our model describes the MAC protocol of 6LoWPAN very well. The new mechanism reduces the network energy consumption, and the performance of protocol is improved.

Key words: model; 6LoWPAN; sleep period; node energy consumption

1 引言

近年来 IEEE802.15.4 标准成为无线传感器网络领域的一个非常重要的通信协议, 而作为 6LoWPAN 网络链路层协议, 其 MAC 层性能研究受到广泛关注. 当前, 基于数学模型的 6LoWPAN 网络 MAC 层性能优化成为一个研究热点. 文献[1]中对饱和情况下的时隙 CSMA/CA 算法进行了建模. 文献[2]中对非饱和情况下的上行及下行链路做了研究. 文献[3]改善了模型的准确性, 分析了网络相关性能参数, 并通过在传输数据前设定一定时间

的延时来模拟非饱和态网络, 但与实际网络工作状态不符. 文献[4]中提出了一个简单高效的模型, 对使用退避的 non-persistent CSMA 进行了建模分析和研究. 文献[5]没有考虑超帧的休眠期, 且对数据包服务时间和吞吐量的数值分析很繁琐. 现有的研究成果对 6LoWPAN 网络的 MAC 子层的性能优化和具体应用都有重要的意义, 但模型及其分析还需要进一步的改进. 节点平均能耗问题是 6LoWPAN 网络 MAC 协议设计的关键问题之一, 本文在分析其 MAC 层协议的基础上, 运用 Markov 链对激活超帧睡眠期的 6LoWPAN 网络信道接入过程进行

收稿日期: 2012-05-08; 修回日期: 2012-06-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61003237); 湖北省教育厅科学技术研究项目(B20123104); 常熟理工学院青年教师基金项目(CST-201209)

建模,并基于该模型对节点相关协议参数和能耗性能进行研究和评价。

2 6LoWPAN 网络 MAC 建模

2.1 信道竞争过程建模

低能耗是 6LoWPAN 最主要的设计目标之一,考虑 N 个节点组成的星形拓扑网络,本文研究 MAC 层支持信标使能模式的 6LoWPAN 网络,节点工作时使用超帧进行定时。

为了降低节点的平均能耗,在节点工作的超帧周期中激活睡眠期,这样节点通信时间划分为活跃期 AP 与睡眠期 IP,而 AP 又被划分为信标帧时间、信道竞争期(CAP),节点在信道冲突严重时进入睡眠期以便节省能量。为了进一步降低节点的能耗,基于超帧结构划分,允许节点根据工作状态于信道竞争期内适时随机进入睡眠期。比如:CAP 内节点若传送一次数据包后没有发送任务就适时进行睡眠,以免节点在 CAP 内空闲侦听。另外若节点在 CAP 内已经退避的轮数达到极限后还是未成功接入,则马上进入睡眠期。通过这些措施,让节点尽可能的在信道竞争中避免能量浪费,改善 6LoWPAN 网络总能耗和延长生存周期。

因为节点接入信道使用的时隙 CSMA/CA 算法是一个离散的随机过程,该过程符合 Markov 链对象是离散状态空间的特点,因此使用 Markov 理论对 6LoWPAN 网络节点接入信道过程进行建模,其模型如图 1 所示。

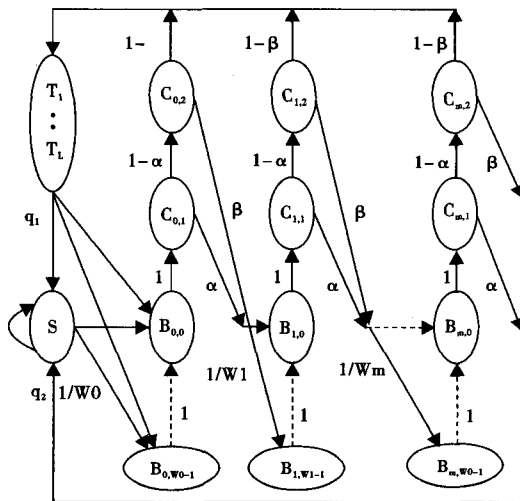


图 1 信道竞争模型

通过建立的模型可以对节点主要状态转换过程和性能指标进行深入的数学分析,模型图中状态 S 为睡眠态, $C_{i,1}$ 和 $C_{i,2}$ 分别是节点的两次信道争

估状态; T_i 为节点发送数据包状态, $B_{i,k}$ 表示节点第 i 次退避时第 k 个时隙退避状态($i \in [0, \max NB], k \in [0, W_{i-1}]$). W_i 为退避指数为 i 时的退避时隙数选择窗口大小,其值为 $W_0 2^i$. W_0 为初始退避窗口时隙数(值为 $2^{\min BE}$). q_1 表示一次数据传输成功后无发送任务的概率, q_2 表示节点持续了一个超帧睡眠期 IP 后还没有数据发送的概率. 由图 1 可求得节点各个状态间的转移概率,且对于图 1 所示的状态切换模型,显然存在平稳分布,因此由马尔科夫链的相关性质可得到分析模型的主要状态的稳态概率如下^[6]:

$$\left. \begin{aligned} \pi_{C_{m,2}} &= \pi_{B_{0,0}} (1-\alpha) \delta^m, \quad \delta = \alpha + \beta - \alpha\beta \\ \pi_{T_i} &= \pi_{B_{0,0}} (1-\delta^{m+1}) \\ \sum_{i=0}^m \pi_{C_{i,1}} &= \sum_{i=0}^m \pi_{B_{i,0}} = (1-\delta^{m+1}) \pi_{B_{0,0}} / (1-\delta) = \chi \\ \sum_{i=0}^m \pi_{C_{i,2}} &= (1-\delta^{m+1}) (1-\alpha) \pi_{B_{0,0}} / (1-\delta) \\ \sum_{i=0}^m \sum_{k=1}^{W_{i-1}} \pi_{B_{i,k}} &= \frac{1}{2} \left[W_0 2^{\max BE - \min BE} \frac{S^{\max BE - \min BE + 1} - \delta^{NB}}{1-\delta} + \right. \\ &\quad \left. W_0 \frac{1 - (2\delta)^{\max BE - \min BE + 1}}{1-2\delta} - \frac{1 - \delta^{NB+1}}{1-\delta} \right] \times \pi_{B_{0,0}} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

另外, α 表示首次检测信道为冲突的概率,可以表示为:

$$\alpha = L(1-\alpha)(1-\beta)(1-[1-\chi]^{n-1}) \quad (2)$$

β 表示首次检测信道不冲突的情况下第二次信道检测为冲突的概率,可表示为:

$$\beta = (1-[1-\chi]^{n-1}) / (2-[1-\chi]^{n-1}) \quad (3)$$

鉴于 6LoWPAN 网络一般处于非饱和负载工作状态,参照文献[5]的分析方法,节点完成一次数据发送后无数据传送的概率 q_1 表示为: $1 - \lambda/v$, 其中 v 为数据包平均服务率,表示为 $1/T_{\text{service}}$, 而 T_{service} 为数据包平均服务时间. 为了简化计算,由泰勒级数展开式可得 $q_1 = \exp(-\lambda * T_{\text{service}})$. T_{service} 可由图 1 模型进行详细的数值分析计算求得. q_2 表示节点保持一个超帧睡眠期后还没有传输任务的概率,可表示为: $q_2 = \exp(-\lambda * W_0)$.

由公式(1~3)组成的非线性方程组,参考文献[7-8]的分析方法,可以分别求得节点各个状态的稳态概率值。

2.2 节点能耗

基于建立的 6LoWPAN 网络 MAC 协议信道接入模型,下面分析 6LoWPAN 网络节点在一个超

帧周期内的平均能耗. 由模型可将节点运行时间分为以下三个部分: 用于接收信标帧的时隙数、CAP 和睡眠期 IP. 其中 CAP 包括退避等待期、信道检测期、数据发送期和提前睡眠期四部分. 根据上述分析, 节点在信道检测状态、空闲退避期和传输期间能量消耗分别表示如下:

$$\left. \begin{aligned} Y_{CCA} &= \frac{SD}{BI} \left(\sum_{i=0}^m \pi_{C_{i,1}} + \sum_{i=0}^m \pi_{C_{i,2}} \right) Y_{receive} \\ Y_{IDLE} &= \frac{SD}{BI} \sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^{w_i-1} \pi_{B_{i,k}} Y_{idle} \\ Y_{T_i} &= \frac{SD}{BI} L \pi_{T_i} Y_{trans} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

由上面的分析, 网络节点平均能耗表示为:

$$Y = Y_{IDLE} + Y_{CCA} + Y_{T_i} + \frac{T_{beacon}}{BI} Y_{receive} + \frac{SD}{BI} \pi_S Y_{sleep} + \frac{BI - T_{beacon} - SD - T_{si}}{BI} Y_{sleep} + \frac{T_{si}}{BI} Y_{idle} \quad (5)$$

为方便计算, 节点退避期耗能相当于空闲状态耗能, 信道检测耗能相当于数据接收耗能. 式(5)中, 前三部分分别为节点信道检测能耗、退避能耗和发送能耗, 第四部分为信标帧的接收能耗, 第五部分为 CAP 内提前睡眠的能耗, 第六部分为超帧睡眠期能耗, 第七部分为状态切换能耗.

3 性能分析

为验证本文提出的激活节点睡眠态的 6LoWPAN 网络信道接入过程模型的准确性和有效性, 下面对该模型进行数学分析和评价. 网络中的节点工作于非饱和负载, 在网络层有数据包到来时节点就进行信道竞争以便完成传送数据, 否则节点提前进入或适时进入睡眠期节省能量. 主要协议参数设置如下: 超帧中的信标级数 BO 为 6, 超帧级数 SO 为 4, NB 最大值为 5, CW 为 2, 退避指数最大最小值分别为 5 和 2. 网络层发送的数据报载荷为 100 字节, 数据包到达速率 λ 最大为 100 包/秒. 数据包长为 6 时隙数, 超帧时隙宽度为 20 个符号宽度, 每时隙长可传输 80 比特数据. 节点在空闲侦听、发送数据、接收数据和睡眠期的功率消耗设置分别为: $Y_{idle} = 0.8$ 毫瓦、 $Y_{trans} = 31.3$ 毫瓦、 $Y_{receive} = 35.3$ 毫瓦、 $Y_{sleep} = 144$ 纳瓦^[9]. 下面对 λ 值变化时网络中主要协议参数和性能指标的变化规律进行数学分析和研究.

3.1 协议参数分析

图 2 描述了节点发送状态的稳态概率分析结

果. 从图中看出, 当网络负载较小时, 随着 λ 的增大, 发送概率值呈递增趋势, 且设置较大的退避指数初值时能够获得较高的发送概率. 这是因为网络负载缓慢增大时节点空闲的概率降低, 相应的节点处于发送状态的机会加大, 并且 minBE 值越大时信道冲突降低, 从而发送概率越大. 一旦网络负载饱和之后, 随着 λ 的增加而趋于稳定.

图 3 描述了信道冲突概率的分析结果. 从图中看出, 随着 λ 的增大, 两次信道检测的冲突概率 α 和 β 都逐渐增大, 且首次信道检测为冲突的概率明显比第二次检测结果要大. 另外, 退避指数初值越小时冲突概率越大. 这是因为退避指数初值越小, 节点检测信道之前退避等待的时间越短, 信道竞争也就更加恶化, 从而信道冲突加剧. 另外, 通过第一次信道检测之后网络中只有部分节点检测信道为空闲, 所以第二次进行信道检测时冲突概率自然要降低.

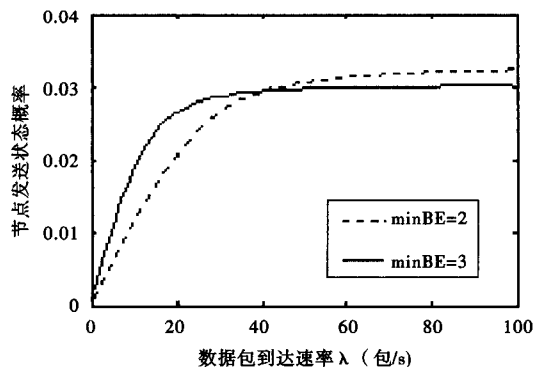


图 2 发送状态稳态概率

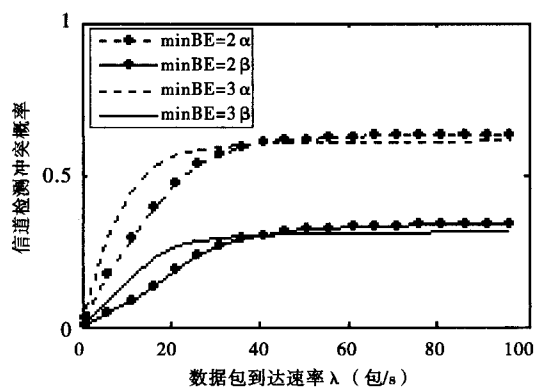


图 3 信道冲突概率

图 4 描述了节点处于退避状态的概率分析结果. 从图看出, 随着 λ 的加大, 退避状态概率逐渐增大, 且退避次数越大, 节点处于退避态的概率越大. 这是因为随着网络负载的逐渐加大, 网络节点竞争信道的冲突逐渐加大. 另外, NB 越小时信道冲突越大, 这样节点只能退避等待更长时间, 以便增加下次

信道检测成功的机会。

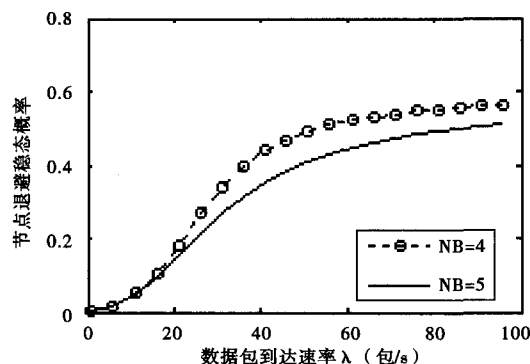


图4 退避态稳态概率

3.2 能耗性能分析

下面分析网络节点的能耗性能。通过图5对节点各个主要状态的能耗对比分析,可以看出,随着网络负载的加大,节点各个状态的能耗均逐渐增大,且传输能耗和信道检测能耗增速较快,而退避期能耗相对小得多。这说明节点主要能耗来自于传输数据和信道检测过程。

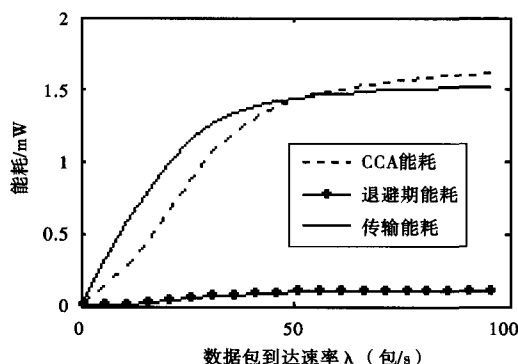


图5 节点主要状态能耗

图6描述了节点平均能耗分析结果。从图6看出,随着λ的递增,节点能耗逐渐增多,且退避次数

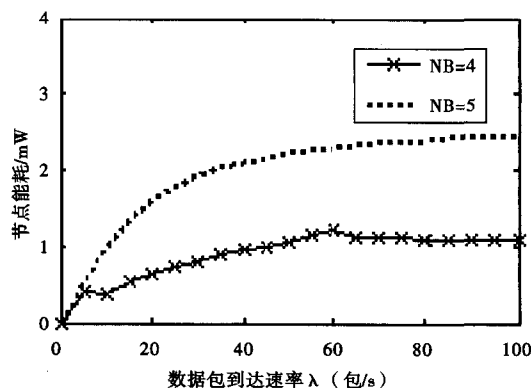


图6 节点平均能耗

越大时节点的平均能耗相对较高。这是因为节点在信道竞争中耗费的时间更长,加上节点状态切换次数更多,也会消耗更多的能量。

4 结束语

本文提出一种激活超帧睡眠期的6LoWPAN网络MAC子层信道竞争机制,通过对该机制数学建模分析,结果表明建立的模型能够很好的反映6LoWPAN网络在启用超帧睡眠期情况下的信道接入方法的特性,而且通过合理设置协议主要的参数NB和minBE的值,可以降低信道冲突概率,提高节点发送态概率,最终降低节点的平均能耗。另外还能够使用提出的模型对6LoWPAN网络MAC子层其它性能指标进行研究和优化。今后需要进一步通过改进6LoWPAN网络信道竞争机制,并建立相应的优化模型来分析评价网络其它性能指标,使其具有更广泛的应用。

参考文献:

- [1] Park T R, Kim T H, Choi J Y, et al. Throughput and energy consumption analysis of IEEE 802. 15. 4 slot-ted CSMA/CA [J]. IEEE Electronics Letters, 2005, 41(18):1017-1019.
- [2] Misic J, Shafi S, Misc V B. Performance of a beacon enabled IEEE 802. 15. 4 cluster with downlink and up-link traffic[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2006, 17 (4): 361-376.
- [3] Pollin S, Ergen M, Ergen S C, et al. Performance analysis of slotted carrier sense IEEE 802. 15. 4 medium access layer[C]//Kero T, Yea J J, Ding Z, et al. IEEE Global Telecommunications Conference, San Francisco, USA;IEEE, 2006:126.
- [4] Ramachandran I, Das A K, Roy S. Analysis of the contention access period of IEEE 802. 15. 4 MAC[J]. ACM Transactions on Sensor Networks, 2007, 3(1):4.
- [5] 方梅,陆阳.非饱和态 802. 15. 4 网络吞吐量建模分析[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(4):1037-1041.
- [6] Chen Z, Lin C, Wen P H. An analytical model for evaluating IEEE 802. 15. 4 CSMA/CA protocol in low-rate wireless application [C] // Proc of International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops. Niagara Falls, Ont, Canada, 2007:899-904.

参考文献:

- [1] 陈果. 图像阈值分割的 Fisher 准则函数法[J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(6): 564-567.
- [2] 杨金龙, 张光南, 厉树忠, 等. 基于二维直方图的图像分割算法[J]. 激光与红外, 2008, 38(4): 400-403.
- [3] Lu C D, Zhang C M, Zhang T Y, et al. Kernel based symmetrical principal component analysis for face classification[J]. Neurocomputing, 2007, 70(4/6): 904-911.
- [4] Ozdemir D, Akarun L. A fuzzy algorithm for color quantization of images[J]. Pattern Recognition, 2002, 35(8): 1785-1791.
- [5] 杨金龙, 张光南, 厉树忠, 等. 基于二维直方图的图像分割算法研究[J]. 激光与红外, 2008, 38(4): 400-403.
- [6] Bach J. Principles of synthetic intelligence: PSI: an architecture of motivated cognition[D]. Oxford University Press, USA, 2009.
- [7] Bartneck C, Lyons M J, Saerbeck M. The relationship between emotion models and artificial intelligence[C] // in Workshop on The Role of Emotion in Adaptive Behaviour And Cognitive Robotics, at the 10th Inter-

national Conference on Simulation of Adaptive Behavior: From Animals to Animates (SAB 2008). Osaka, 2008.

- [8] 马苗, 郝重阳, 韩培友, 等. 基于灰色关联分析的图像保真度准则[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 16(7): 978-983.

作者简介:



李晓玲 女, (1982—), 讲师, 硕士研究生. 研究方向为计算机网络与数据库.

吴慧丽 女, (1965—), 高级讲师. 研究方向为计算机教学与研究.

鹿艳晶 女, (1983—), 硕士研究生, 助教. 研究方向为图像分割、模式识别.

李凯 男, (1980—), 硕士研究生, 助教. 研究方向为程序设计、网络开发.

(上接第 81 页)

- [7] Wen H, Lin C, Chen Z J, et al. An improved markov model for IEEE 802. 15. 4 slotted CSMA/CA mechanism[J]. Journal of Computer Science and Technology, 2009, 24(3): 495-504.
- [8] 程宏斌, 李克清, 孙霞. 基于减少偷听的 802. 15. 4 网络节点能耗降低方法[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(9): 3477-3480.
- [9] Martalò M, Busanelli S, Ferrari G. Markov chain-based performance analysis of multihop IEEE 802. 15. 4 wireless networks [J]. Performance Evaluation, 2009, 66(12): 722-741.

作者简介:



孙霞 女, (1978—), 硕士, 讲师. 研究方向为算法分析与设计、计算机网络协议.

梁伟 男, (1971—), 博士, 副教授. 研究方向为计算机通信网及 IP 技术.

程宏斌 男, (1975—), 硕士, 讲师. 研究方向为计算机网络协议.

王海军 男, (1977—), 硕士, 讲师. 研究方向为计算机网络应用.