6LoWPAN 网络节点信道接入延时性能研究*

程宏斌，王晓喃，孙 霞，聂盼红
（常熟理工学院 计算机科学与工程学院，江苏 常熟 215500）

摘 要：为了优化6LoWPAN 网络 MAC 协议性能，提出了一种基于饱和负载的时隙 CSMA/CA 机制的 Markov 链模型，并对协议主要网络参数进行了数学推导。基于该模型对节点平均接入延时及网络的信道接入概率等参数进行数值计算，重点分析了协议参数对网络延时性能的影响。数学分析表明，该模型较好地描述了基于饱和负载的 IEEE 802.15.4 MAC 协议的信道竞争接入机制，而合理的协议参数设置能够有效地改善网络节点平均信道接入延时性能。

关键词：6LoWPAN；时隙 CSMA/CA；接入延时；参数
中图分类号：TP393.03 **文献标志码**：A **文章编号**：1001-3695(2013)01-0246-03
doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.01.063

Channel access delay analysis of node for 6LoWPAN

CHENG Hong-bin, WANG Xiao-nan, SUN Xia, NIE Pan-hong
(*School of Computer Science & Engineering*, *Changshu Institute of Technology*, *Changshu Jiangsu* 215500, *China*)

Abstract: To optimize the performance of MAC in 6LoWPAN, this paper proposed a mechanism based on saturated traffic for slotted CSMA/CA algorithm, and it established a Markov chain model for it. Then, this paper gave ont an expression using the new model for calculating the main parameters. Furthermore, it carried out the numerical analysis based on the model of the node access delay and channel access probability, and analyzed the impact of protocol parameters to the node average access delays. Finally, by the theoretical analysis showes that the model describes the slotted CSMA/CA mechanism well, and reasonable settings for CSMA/CA parameters can improve the performance of node average access delay.
Key words: 6LoWPAN; slotted CSMA/CA; access delay; parameter

6LoWPAN 网络是当前的一个热门研究领域。IETF 的 6LoWPAN 工作组仅提出了适配层技术草案，其他技术还在探讨中，其中 6LoWPAN 网络数据链路层协议 IEEE 802.15.4 的研究受到广泛关注，而基于数学模型的协议性能优化研究是一个热点。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作了研究。文献[1~3]中的条件假设不能很精确地描述协议特性。文献[4,5]对上述模型进行了改进，改善了模型的准确性，其中文献[4]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，这与实际网络工作状态不相符。文献[6]中在四个假设下对使用退避的 non-persistent CSMA 作出模型分析，提出了一种简明有效的模型。这些学者在使用数学建模方法对 IEEE 802.15.4 MAC 协议的研究中都做出了许多有意义的工作，但模型及其分析还需要进一步的改进和完善。

6LoWPAN 网络的传输时延和功率消耗是相互矛盾的一对性能指标，如何能够达到良好的平衡是 6LoWPAN 网络协议设计的重要问题。本文在分析时隙 CSMA/CA 机制的 IEEE 802.15.4 协议的基础上，对基于饱和负载的时隙 CSMA/CA 算法进行 Markov 建模，并基于该模型对网络节点平均接入延时时间和相关的概率参数进行数学分析。

1 时隙 CSMA/CA 机制

IEEE 802.15.4 MAC 支持信标使能和无信标使能两种工作模式，本文只分析信标使能模式，即各节点通过接收协调器周期性广播的信标帧与协调器保持同步，协议使用超帧进行定时。超帧将整个通信时间周期划分为活跃期(AP)与非活跃期(CFP)两个部分。AP 又被划分为信标帧时期、竞争接入时期(CAP)和非竞争接入期。本文只研究采用时隙 CSMA/CA 的 CAP，即在 CAP 传输数据帧和 MAC 帧之前所采用的竞争接入机制，而在传输信标帧、确认帧和 CFP 的过程中不起作用。算法描述如图 1 所示。

2 IEEE 802.15.4 MAC 建模

在星型拓扑网络下，网络中除协调节点外共有 N 个设备，节点竞争访问信道采用的时隙 CSMA/CA 算法是一个离散的随机过程，这正好符合 Markov 链中对象是离散状态空间的特点。故使用 Markov 链对网络中节点竞争接入信道的状态转换进行建模，通过该模型对节点的状态进行研究。使用 Markov 理论对时隙 CSMA/CA 算法建立的模型如图 2 所示。

令 $B_{i,k}$ 表示节点处于第 i 次退避期第 k 个时隙退避状态 ($i \in [0, \max NB]$, $k \in [0, w_i - 1]$)；$C_{i,1}$ 和 $C_{i,2}$ 分别表示节点第

收稿日期：2012-03-31；**修回日期**：2012-05-03 **基金项目**：江苏省自然科学基金资助项目(BK2009133)

作者简介：程宏斌(1975-)，男，湖北黄冈人，副教授，硕士，主要研究方向为无线传感网络协议性能分析与优化(chb361@163.com)；王晓喃(1973-)，女，辽宁沈阳人，副教授，博士(后)，主要研究方向为下一代网络体系结构与协议；孙霞(1978-)，女，河南周口人，讲师，硕士，主要研究方向为算法分析与设计、计算机网络协议.

一次和第二次信道评估(CCA)状态;T_i 表示节点处于数据帧发送状态($i\in[1,L]$);α、β 分别为节点第 1、2 次信道检测结果为忙的概率。

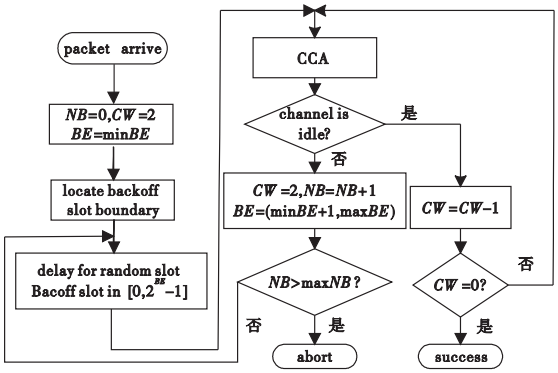

图1　时隙CSMA/CA退避机制

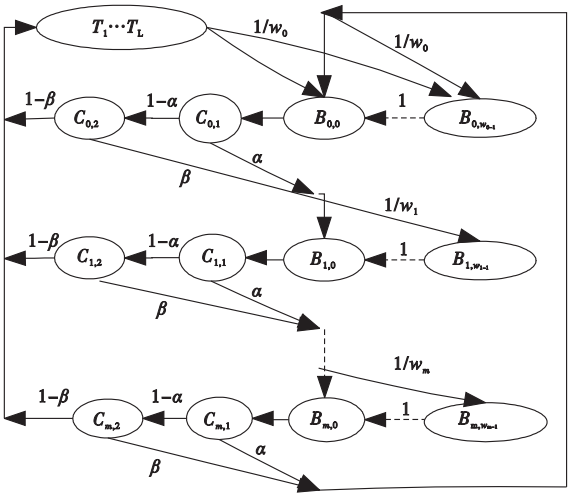

图2　时隙CSMA/CA算法Markov模型

对于图 2 所示的分析模型存在平稳分布,主要状态间的单步转移概率如下:

$$\begin{gathered}P\{B_{0,k}\mid T\}=1/w_0,k\in(0,w_0-1)\\P\{B_{0,k}\mid C_{m,1}\}=\alpha/w_0,k\in(0,w_0-1)\\P\{B_{i+1,k}\mid C_{i,1}\}=\alpha/w_i,i\in(0,m),k\in(0,w_i-1)\\P\{C_{i,2}\mid B_{i,0}\}=1-\alpha,i\in(0,m)\\P\{T_1\mid B_{i,0}\}=(1-\alpha)(1-\beta),i\in(0,m)\\P\{B_{i,k}\mid B_{i-1,0}\}=[\alpha+(1-\alpha)\beta]/w_i,i\in(1,m),k\in(0,w_i-1)\\P\{B_{0,k}\mid B_{i,0}\}=(1-\alpha)(1-\beta)/w_0,i\in(0,m-1),k\in(0,w_0-1)\end{gathered}\tag{1}$$

依据上述结果,由马尔可夫链的相关性质可以得到分析模型的各个状态的稳态概率[7]:

$$\begin{gathered}\pi_{C_{i,2}}=(1-\alpha)\pi_{C_{i,1}},\pi_{T_i}=(1-\beta)\sum_{i=0}^{m}\pi_{C_{i,2}},\pi_{B_{0,0}}=\alpha\pi_{C_{m,1}}+\beta\pi_{C_{m,2}}+\pi_{T_i}\\\pi_{B_{i,0}}=\pi_{B_{i-1,0}}(\alpha+(1-\alpha)\beta)=\pi_{B_{0,0}}S^i,S=\alpha+\beta-\alpha\beta\\\pi_{B_{i,k}}=\frac{(w_i-k)}{w_i}\pi_{B_{i,0}},i\in(0,m),k\in(0,w_i-1)\end{gathered}\tag{2}$$

另外,分析模型中 $C_{i,0}$ 状态总稳态概率和 $C_{i,1}$ 状态总稳态概率分别为

$$\begin{gathered}\pi_{C_{i,1}}=\pi_{B_{i,0}}=\pi_{BO_{0,0}}(\alpha+\beta-\alpha\beta)^i=\pi_{B_{0,0}}S^i\\\sum_{i=0}^{m}\pi_{C_{i,1}}=\sum_{i=0}^{m}\pi_{BO_{i,0}}=\pi_{B_{0,0}}\frac{1-S^{m+1}}{1-S}=\varphi\\\sum_{i=0}^{m}\pi_{C_{i,2}}=(1-\alpha)\sum_{i=0}^{m}\pi_{C_{i,1}}=\frac{(1-S^{m+1})(1-\alpha)}{1-S}\pi_{B_{0,0}}\\\pi_{T_i}=(1-\beta)\sum_{i=0}^{m}\pi_{C_{i,2}}=(1-S^{m+1})\pi_{B_{0,0}}\end{gathered}\tag{3}$$

由图 2 中所有状态的稳态概率和为 1 可得到:

$$\sum_{i=0}^{L-1}\pi_{T_i}+\sum_{i=0}^{m}\pi_{C_{i,1}}+\sum_{i=0}^{m}\pi_{C_{i,2}}+\sum_{i=0}^{m}\sum_{k=0}^{w_i-1}\pi_{B_{i,k}}=1\tag{4}$$

由上述式(1)~(3),得到 $B_{0,0}$ 的稳态概率为[8]

$$\begin{gathered}1=\sum_{i=0}^{NB}B_{i,0}\left(1+(1-\alpha)+(1-\alpha)(1-\beta)L+\frac{w_i-1}{2}\right)\\B_{0,0}=2/\left[(1+2(1-\alpha)+2(1-\alpha)(1-\beta)L)\frac{1-S^{NB+1}}{1-S}+w_0\frac{1-(2S)^{NB+1}}{1-2S}\right]\end{gathered}\tag{5}$$

另外分析模型中,转移概率 α 表示第一次 CCA 检测信道为忙的概率,即网络中其余的 $N-1$ 个节点中至少有一个节点信道检测为空闲并已经传输一个数据帧。

$$\alpha=L(1-[1-\varphi]^{n-1})(1-\alpha)(1-\beta)\tag{6}$$

转移概率 β 表示第一次 CCA 检测信道为空闲的情况下第二次 CCA 检测信道为忙的概率,即网络中其余的 $N-1$ 个节点中至少有一个节点信道检测为空闲并开始传输数据帧。β 的值可表示为

$$\beta=(1-[1-\varphi]^{n-1})/(2-[1-\varphi]^{n-1})\tag{7}$$

3　接入延时分析

网络节点接入延时表示从数据包到达时刻起到该数据包被成功接收到所经历的时间。延时的大小反映了通信系统的实时性。

为了分析 IEEE 802.15.4 MAC 的 CSMA/CA 算法机制,本文重点分析节点成功发送一个数据帧过程中的平均信道接入延时时间。为了求解节点接入延时分析的表达式,参考文献[6],通过 Markov 链为信道建模以便描述完整的传输周期,信道的状态转移图如图 3 所示。

图 3 中,success 状态为节点开始传输数据帧,转移到此状态的概率为 $p=n\pi_{T_i}(1-\pi_{T_i})^{n-1}$;failure 状态为多个节点同时开始传输数据时信道的状态;idle 状态为当前信道没有数据传送;(idle,idle)状态表示当两个连续的时隙内没有节点进行数据传送,此状态发生的概率为 $t=(1-\pi_{T_i})^n$,则节点接入延时可以表示为

$$\begin{gathered}D=\frac{\text{数据帧时隙数}}{\text{成功传输一个帧花费的时间占传输总时间的比例}}\\D=\frac{(LP_{\text{success}}+LP_{\text{fail}}+P_{\text{idle}}+P_{\text{idle,idle}})L}{P_{\text{success}}}(\text{slot-time})\end{gathered}\tag{8}$$

其中:1 slot-time = 0.32 ms;L 为数据帧时隙长度;P_{success}、P_{fail}、P_{idle}、$P_{\text{idle,idle}}$分别表示数据帧传输时处在信道中各个状态的稳态概率。由图 3 可得:

$$\begin{gathered}P_{\text{success}}=pP_{\text{idle,idle}},P_{\text{fail}}=(1-t-p)P_{\text{idle,idle}}\\P_{\text{idle}}=1-P_{\text{idle,idle}}-P_{\text{success}}-P_{\text{idle}},P_{\text{idle,idle}}=tP_{\text{idle,idle}}+P_{\text{idle}}\end{gathered}\tag{9}$$

由方程组(9)可解出信道四个状态的稳态概率,从而得到节点接入延时的表达式为

$$D=0.32(1+(1+L)(1-t))/p(\text{ms})\tag{10}$$

4　性能分析与评价

为验证本文提出的 IEEE 802.15.4 协议时隙 CSMA/CA 算法建模的正确性和有效性,下面采用数学分析的方法对该模型进行分析和评价。将网络部署为单跳星型网络,只有一个协调节点,其余 $N-1$ 个 RFD 节点均在通信范围之内。在 IEEE 802.15.4 网络中,假设节点工作于饱和负载的情形,只要上层有数据包到来,节点就进行数据传送。假设上层发送的数据帧

载荷为 100 Byte，MAC 帧头长 13 Byte，PHY 帧头长 6 Byte，信道带宽为 250 kbps，*NB* 最大值为 4，CCA 检测次数 *CW* 为 2，*BE* 最大值为 5，最小值 min*BE* 为 2，*L* 为 6 ~ 14 slot，超帧时隙宽度为 20 个符号宽度，每个符号宽度 0.016 ms。

4.1 参数分析

图 4 为节点首次准备信道监测的概率分析结果。从图 4 中看出，较低的 min*BE* 值能够获得较高的首次信道监测概率，这是因为 min*BE* 值比较小时节点退避期耗时短，即信道接入延时相对较少。而且，信道概率值随着节点数目的增加而趋于稳定的恒值。

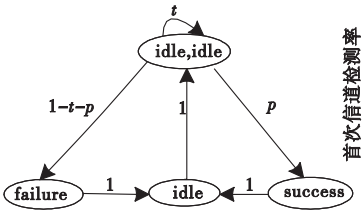

图3 信道Markov模型

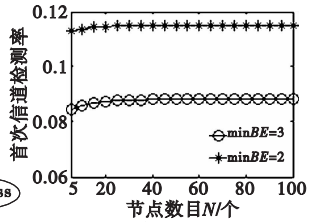

图4 首次信道监测概率

图 5 描述了节点数据发送状态的稳态概率值分析结果。从图 5 中可以看出，发送状态的稳态概率值比较小，而且随着节点数目增多，此概率值呈下降趋势，之后随着节点数目的增加而趋于稳定的恒值。这是因为节点数目增多导致信道空闲的概率减少，相应的节点数据发送状态的稳态概率也降低。研究还发现，较大的 min*BE* 值在节点增多的情况下能够获得较高的节点数据发送概率，这是因为较长的退避期能够减少节点传输数据的冲突，提高网络总体发送数据的概率。

4.2 延时分析

图 6 为提出的 CSMA/CA 算法模型中不同 min*BE* 值的延时结果。从图 6 可以看到，*N* 较小时，随着节点数目的增加，节点成功发送一个数据帧的平均接入延时时间缓慢降低；而且 min*BE* 对延时时间的影响较为明显，当 min*BE* 取值较小时，节点接入延时时间越小。这是因为 *BE* 的取值决定节点初始退避窗口的大小，其值越小，节点的初始退避窗口越小，意味着节点进行 CCA 检测前需要等待的时间越短，导致节点接入延时时间越短；反之节点接入延时越长。另外，此时节点少，从而网络冲突概率也相对比较低。

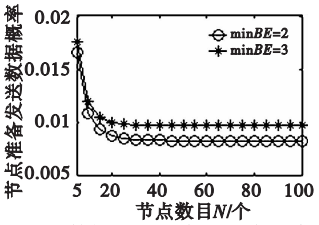

图5 数据发送状态的稳态概率

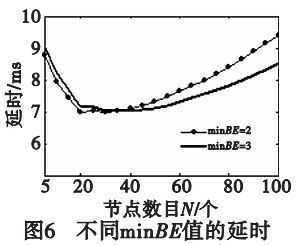

图6 不同min*BE*值的延时

但是一旦节点数目较多时，节点平均接入延时时间将会逐步地增加。而且当 min*BE* 取值较小时，节点接入延时时间越长。这是因为 min*BE* 取值越小，初始退避窗口越小，较多的节点都可能在较小的退避等待周期之后竞争信道，从而导致网络竞争信道的冲突概率明显增加，节点退避之后等待下一个超帧周期进行新一轮的竞争接入访问。最终接入延时时间会明显增大。反之，较大的 min*BE* 取值会增大节点的退避周期，一定程度地缓解各个节点同时竞争信道的概率，从而降低了节点平均接入延时时间。

图 7 为模型中不同退避次数值的延时结果。从图 7 可以看到，较小的 *NB* 值能够获得较小的节点平均接入延时，且当节点数 *N* 较少的阶段，节点接入延时时间呈现下降趋势。而一旦节点数目快速增加之后，*NB* 值较小时的接入延时值趋于稳定的值；*NB* 取值越大时，节点平均接入延时随着节点数目的增加呈较快的增大趋势，这是因为此时信道竞争激烈，冲突概率增大，导致节点平均退避时间延长。图 8 为不同数据帧长（*L*）的情况下节点平均接入延时结果。很明显，网络中的数据帧较短的情况下会得到较短的延时性能。

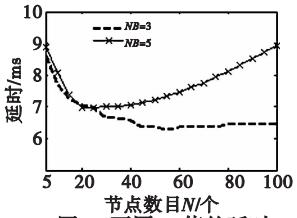

图7 不同*NB*值的延时

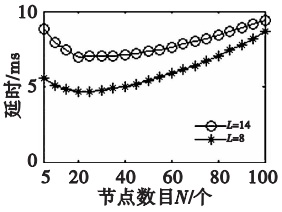

图8 不同数据帧长的延时

综合以上研究结果，*NB* 设置为较小值（如 3），min*BE* 设置为 3，数据帧长 *L* 设置为较小值（如 8 slot），网络节点平均接入延时较为理想，且节点接入信道的相关概率相应地也较高。

5 结束语

本文对 6LoWPAN 网络 MAC 协议 IEEE 802.15.4 MAC 进行分析，对基于饱和负载的时隙 CSMA/CA 算法进行 Markov 建模；然后基于本模型分析了协议的主要网络参数，并对网络节点平均接入延时时间和一些信道概率参数进行了数学分析，并提出相应的数学表达式。实验分析表明，本模型可以有效地分析时隙 CSMA/CA 算法。模型数值结果还可以用来分析协议参数对网络其他重要性能指标的影响。今后需要进一步通过改进模型、优化协议，使得网络的功率消耗和端到端时延这对相互矛盾的性能指标取得更好的平衡，使之具有更广泛的应用。

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 slotted 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 uplink traffic [J]. IEEE Trans on Parallel and Distributed Systems, 2006, 17(4): 361-376.

[3] ZHANG Y, XU P, ZHANG Z, *et al*. Comments on throughput analysis of IEEE 802.15.4 slotted CSMA/ CA considering timeout period [J]. IEEE Electronics Letters, 2006, 42(19): 1127-1128.

[4] POLLIN S, ERGEN M, ERGEN S C, *et al*. Performance analysis of slotted carrier sense IEEE 802.15.4 medium access layer [C]//Proc of IEEE Global Telecommunications Conference. [S. l.]: IEEE, 2006: 126.

[5] HE Jian-hua, TANG Z, CHEN H H, *et al*. An accurate Markov model for slotted CSMA/CA algorithm in IEEE 802.15.4 networks [J]. IEEE Communications Letters, 2008, 12(6): 420-422.

[6] RAMACHANDRAN I, DAS A K, ROY S, Analysis of the contention access period of IEEE 802.15.4 MAC [J]. ACM Trans on Sensor Networks, 2007, 3(1): 70-77.

[7] WEN Hao, LIN Chuang, CHEN Zhi-jia, *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] XIAO Zhuo-ling, HE Chen, JIANG Ling-ge. Slot-based model for IEEE 802.15.4 MAC with sleep mechanism [J]. IEEE Communications Letters, 2010, 14(2): 154-156.