

IEEE 802.11 的 DCF 机制媒介接入延时分析与仿真*

李本亮, 王厚军, 师奕兵, 李力, 闫斌

(电子科技大学自动化学院, 成都 610054)

摘要: 在改进的马尔可夫模型的基础上引入 Z 变换, 分析了 802.11 的 DCF 机制 MAC 延时性能, 研究了从非饱和到饱和和信道状态的延时性能。通过 MATLAB 数值分析和 OPNET 10.0 网络仿真, 基于马尔可夫模型的 MAC 延时分析能够与网络仿真的 MAC 延时很好地吻合, 验证了分析模型在预测媒介接入延时方面的有效性, 为无线分布式系统的进一步设计提供理论依据和数据参考。

关键词: 分布式协调功能; 马尔可夫模型; 媒介访问控制; 延时

中图分类号: TP393.17 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2009)06-2202-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2009.06.061

MAC delay analysis and simulation of IEEE 802.11 DCF

LI Ben-liang, WANG Hou-jun, SHI Yi-bing, LI Li, YAN Bin

(School of Automation Engineering, University of Electronics Science & Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: This paper provided an improved Markov model and used Z transform to analyze and compute the MAC delay of 802.11 DCF, which included the non-saturation and saturation delay performance of transmission channel. The numerical analysis of MAC delay in MATLAB matched the network simulation of MAC delay in OPNET 10.0 well, which proved the accuracy of the analysis model in MAC delay predication. The results are beneficial to further designing in theory arguments and data reference.

Key words: DCF(distributed coordination function); Markov model; MAC(media access control); delay

近年来,无线局域网通信的研究受到了广泛的关注,IEEE 802.11 协议提供了 WLAN 的物理层(PHY)和媒介接入控制层(MAC)的具体规范^[1]。IEEE 802.11 无线局域网提供两种 MAC 层访问机制:分布式协调功能(DCF)和点协调功能(point coordination function, PCF)。DCF 机制中采用 CSMA/CA(carrier sense multiple access with collision avoidance)实现信道接入,是 802.11 协议的最基本接入方式;PCF 机制是一种中心控制的 MAC 协议,用于支持非冲突的接入服务。本文主要研究 DCF 机制下的 MAC 延时问题。

IEEE 802.11 标准提出以来,很多文献对 DCF 的性能进行了研究^[2,3],但研究的重点主要是吞吐量和饱和吞吐量的分析与评估。本文着重分析了 IEEE 802.11 的延时问题,文献[4]研究了回退窗口大小对 DCF 的 MAC 延时性能的影响,而对影响延时的其他因素没有进行研究;文献[5,6]也有相关的性能评估,但是没有从理论的角度进行分析;文献[7]有 MAC 延时的性能分析,但是没有从网络的角度进行验证,而且直接分析 MAC 延时与网络数据流量的关系,没有考虑数据产生的随机性。本文使用在文献[2]提出的马尔可夫模型基础上改进的模型^[3]作为分析的出发点,引入了 Z 变换,详细分析了影响 DCF 延时的因素,并对分析进行了 MATLAB 数值仿真和 OPNET 10.0 网络仿真的验证。

1 Markov 分析模型

IEEE 802.11DCF^[2]的行为可以考虑为一个二维的马尔可夫链 (S_i, B_m) ,如图 1 所示。其中 S_i 是一个统计量代表回退阶数; B_m 是回退计数器。为了模型化 DCF 回退机制,马尔可夫链 (S_i, B_m) 的状态空间表示成 (i, k) 。其中: $i=0,1,\dots,m;k=0,1,\dots,W_i$ 。每个数据包发生碰撞的概率为独立的常数 p , p 也将作为条件碰撞概率,表示正在回退过程中的数据包察觉到碰撞的概率,即数据包“冻结”的概率。

对每次回退过程, W_i 代表在 $i-1$ 次不成功的传输之后在第 i 次回退阶段竞争窗口大小,最小的竞争窗口为 W_0 。另外 $i=m$ 代表 m 次回退阶段,此时竞争窗口达到最大竞争窗口 W_m ,给定 $W_m=2^m W_0$ 。

马尔可夫链的非零阶状态转换概率分布为

$$P\{i, k|i, k+1\} = 1-p; k \in \{0, W_i-2\}, i \in (0, m) \quad (1)$$

$$P\{i, k|i, k\} = p; k \in \{0, W_i-2\}, i \in (0, m) \quad (2)$$

$$P\{0, k|i, 0\} = (1-p)/W_0; k \in \{0, W_i-1\}, i \in (0, m) \quad (3)$$

$$P\{i, k|i-1, 0\} = p/W_i; k \in \{0, W_i-1\}, i \in (1, m) \quad (4)$$

$$P\{0, k|m, 0\} = 1/W_0; k \in \{0, W_i-1\} \quad (5)$$

令 $b_{i,k}$ 代表马尔可夫链的稳态分布,则在任何一个状态 $(i, 0)$ 下状态转换表达式为

收稿日期: 2008-09-17; 修回日期: 2008-12-27 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60673011); 国家教育部博士点基金资助项目(20070614018)

作者简介: 李本亮(1977-), 男, 山东烟台人, 博士研究生, 主要研究方向为无线分布式测试系统同步与触发(chnlbliang@163.com); 王厚军(1961-), 男, 教授, 博导, 博士, 主要研究方向为电子测量、仪器、测试信号处理、分布式测试; 师奕兵(1964-), 男, 教授, 博导, 博士, 主要研究方向为计算机辅助测试、VLSI 和电子系统、电子测量仪器理论与设计; 李力(1974-), 男, 讲师, 硕士, 主要研究方向为无线分布式测试系统相关技术; 闫斌(1974-), 男, 博士, 主要研究方向为无线传感器网络鲁棒性、路由及定位。

$$b_{i,0} = b_{i-1,0} \times p; i = 0, 1, \dots, m \quad (6)$$

通过递推得到

$$b_{i,0} = b_{0,0} \times p^i; 0 \leq i \leq m \quad (7)$$

$$b_{i,k} = (W_i - k) / [W_i(1-p)] \begin{cases} (1-p) \sum_{j=0}^{m-1} b_{j,0} + b_{m,0} & i=0 \\ pb_{i-1,0} & 0 < i \leq m \end{cases} \quad (8)$$

$$1 = \sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^{W_i-1} b_{i,k} = \sum_{i=0}^m b_{i,0} \sum_{k=0}^{W_i-1} (W_i - k) / [W_i(1-p)] = 1 / (1-p) \times \sum_{i=0}^m b_{i,0} (W_i + 1) / 2 \quad (9)$$

则一个基站在任何一个时隙中传输数据包的概率为

$$\tau = \sum_{i=0}^m b_{i,0} = (1 - p^{m+1}) / (1-p) \times b_{0,0} \quad (10)$$

信道忙的概率 p_b 和信道成功发送数据的概率 p_s 分别为

$$p_b = 1 - (1 - \tau)^n \quad (11)$$

$$p_s = n\tau(1 - \tau)^{n-1} / [1 - (1 - \tau)^n] \quad (12)$$

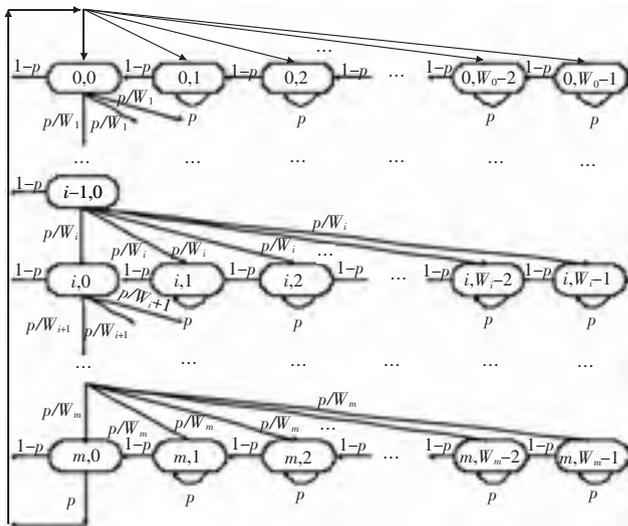


图 1 802.11 DCF 的二维的马尔可夫链

2 MAC 延时分析

2.1 递减延时的 Z 变换

由于 DCF 回退时隙操作的离散性,引入了 Z 变换描述延时。 T_e 为基本时隙, T_s 是发送持续时间, T_c 是冲突持续时间,合理选取时隙长度 T_e ,使 T_s 和 T_c 等于基本时隙的整数倍。在 DCF 递减计数期间遇到阻塞的加权平均延时可以写成: $T_e P_s / P_b + T_c (1 - P_s / P_b)$, 相应的 Z 变换为 $Z^{T_s} P_s / P_b + Z^{T_c} (1 - P_s / P_b)$ 。当 DCF 递减时,遇到一个空的时隙的概率是 $1 - p$,而遇到阻塞的概率则为 p 。当不阻塞时,DCF 将维持一个空时隙 T_e ,然后转移到下一个计数器状态。因此与一个计数器状态相关的总体延时的表达式为

$$D_{state}(z) = z^{T_e} (1-p) / \{1 - p [z^{T_s} P_s / P_b + z^{T_c} (1 - P_s / P_b)]\} \quad (13)$$

则计数器递减一个计数器单位的延时表达为

$$D_{state} = T_e + [(P_s / P_b) T_s + (1 - P_s / P_b) T_c] p / (1-p) \quad (14)$$

2.2 MAC 延时的 Z 变换

回退阶段的总延时是与每一个递减计数状态的延时相关的概率几何求和:

$$D_{state}(z) = 1 / W_i \times [1 - D_{state}(z)]^{W_i} / [1 - D_{state}(z)] \quad (15)$$

其中系数 $1/W_i$ 表示在每一个回退阶段计数器初始值的选取服从均匀分布。

为了简化引入 $D_{j,s}(z)$ 代表 j 次回退的总延时:

$$D_{j,s}(z) = \prod_{l=s}^j D_{state}(z) \quad (16)$$

此时在每个数据包发送之前, s 被设置成 0,以便在回退计数进行中存储延时。这种类型的延时被称为饱和延时 $D_{sat}(z)$ 。在饱和状态下必须总是考虑回退延时,该延时表达式为

$$D_{sat}(z) = (1-p) \sum_{j=0}^m p^j z^{T_s + jT_c} D_{j,0}(z) + p^{m+1} z^{(m+1)T_c} D_{m,0}(z) \quad (17)$$

在非饱和状态下,与此相反,计数器回退延时总是在新数据包到达传输队列之前结束。因此在这种情况下,回退延时将不再加入传输延时,这一点与饱和状态不同,此时 s 设置成 1。非饱和状态下的延时表达式为

$$D_{non-sat}(z) = (1-p) \sum_{j=0}^m p^j z^{T_s + jT_c} D_{j,1}(z) + p^{m+1} z^{(m+1)T_c} D_{m,1} \quad (18)$$

则饱和延时和非饱和延时的关系为

$$D_{sat} = D_{stage}(z) D_{non-sat}(z) \quad (19)$$

2.3 平均媒介接入延时

当考虑计数器回退延时的平均 MAC 延时 $\overline{D^{sat}}$,可以直接通过式(19)的 Z 逆变换的微分得到

$$\overline{D^{sat}} = (1 - p^{m+1}) (T_s + T_c p / (1-p)) + (\overline{D^{state}} / 2) \sum_{i=1}^m p^i (W_i - 1) \quad (20)$$

其中 $\overline{D^{state}}$ 在式(14)中有定义。

3 仿真实验

3.1 仿真设置

本文通过 MATLAB 7^[8] 进行 MAC 延时的数值仿真分析。仿真参数设置如下:

$$T_e = 20 \mu s, T_{MSDU} = T_{1024} = 8.192 \text{ ms}$$

$$T_c = (T_{PHY} + T_{MAC} + T_{1024}) + EIFS = 9.462 \text{ ms}$$

$$T_s = (T_{PHY} + T_{RTS}) + (T_{PHY} + T_{CTS}) + (T_{PHY} + T_{MAC} + T_{1024}) + (T_{PHY} + T_{ACK}) + 3SIFS + T_{DIFS} = 9.462 \text{ ms}$$

3.2 MAC 延时的 MATLAB 数值仿真分析

从式(21)的展开式可以看出,当参数 T_e, T_{MSDU}, T_s, T_c 确定以后,MAC 延时 $D(z)$ 只与回退窗口和冲突概率 p 相关。计算过程参见文献[2]。 p 与发送成功的概率 τ 关系如图 2 所示。

回退窗口对 MAC 延时的影响在文献[7]中已经进行了研究,本文着重研究了冲突概率 p 对 MAC 延时的影响。MAC 延时的数值仿真如图 3 所示。从图 3 的仿真结果可以看出,MAC 延时对冲突概率 p 的影响很大,当 p 达到最大值 0.83 时^[2],1 M 传输率情况下的 MAC 延时达到 12.6 s,5.5 M 传输率的 MAC 延时为 2.8 s,11 M 传输率情况下 MAC 延时达到 1.7 s。从仿真曲线中可以清楚地看出 MAC 延时与冲突概率 p 的关系。但是由于网络数据产生的随机性,数值仿真无法体现出具体网络负荷对 MAC 延时的影响,而网络仿真可以很好地弥补这一点。

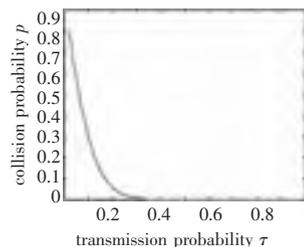


图 2 冲突概率 p 与成功发送概率 τ 关系

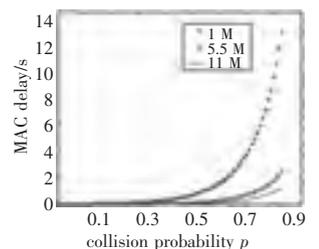


图 3 MAC 延时的数值仿真

3.3 MAC 延时的网络仿真实验

仿真场景面积为 $600 \text{ m} \times 600 \text{ m}$, 中央有一个 main station,

四周有 20 个基站都向主站发送数据,如图 4 所示。仿真中每个基站每秒钟产生 20×1024 Byte 的数据,数据包的 PHY 帧头为 24 Byte,MAC 帧头为 28 Byte,系统每秒钟产生的总数据量为 20×1076 Byte。

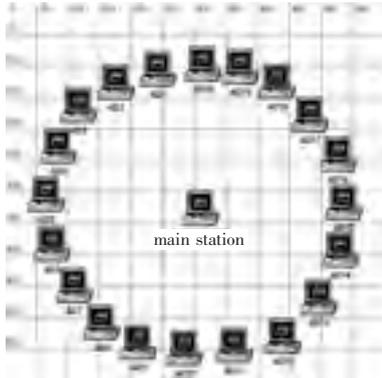


图 4 MAC 延时的网络仿真场景

OPNET 仿真中使用 802.11 默认参数作为网络仿真参数,如 CWmin 和 CWmax 使用了 802.11 协议的默认值,设置 CWmin 为 31,CWmax 为 1023。仿真中使用 DCF 的 RTS/CTS 机制发送和接收数据。具体的仿真参数设置如表 1 所示。

表 1 OPNET 网络仿真的参数设置

数据包大小/ Byte	信道容量/ Mbps	传播延时/ μ s	时隙/ μ s	SIFS/ μ s	DIFS/ μ s
1024	1	1	20	10	50

仿真过程 a):所有基站的数据从 0 时刻开始产生,使信道迅速进入饱和状态,仿真时间 300 s。

从图 5 饱和情况下 MAC 延时的网络仿真可以看出,饱和情况下 MAC 的延时仍然有较大的波动,但是 MAC 延时的最大值能够与数值仿真的极值很好地匹配,1 M 为 12.2 s,5.5 M 为 2.6 s,11 M 为 1.8 s。

仿真过程 b):基站 1 从 0 时刻开始产生数据,每过 120 s 一个新的基站加入到数据的产生和传输,使数据的产生和传输呈递增趋势,信道由非饱和进入饱和状态,仿真时间 1200 s。

从图 6 从非饱和到饱和 DCF 下 MAC 延时的网络仿真可以看出,在数据流量递增的情况下,MAC 延时的网络仿真的趋势与数值仿真一致,但是 5.5 M 的 MAC 延时的突增转折点与数值仿真有差异,具体原因还有待进一步研究。由于数据产生的随机性的影响,网络仿真的曲线平滑性不如数值仿真,但是更加贴近实际的场景。

(上接第 2186 页)

[4] De DOUGLAS S J, DANIEL A, BICKET D, *et al.* High throughput path metric for multi-hop wireless routing[J]. *Wireless Network*, 2003, 11(4): 134-146.

[5] LIU J S, LIN R C H. Energy-efficiency clustering protocol in wireless sensor networks[J]. *Ad hoc Networks*, 2005, 3(3): 371-388.

[6] PAUL G, TANIZAWA T, HAVLIN H, *et al.* Optimization of robustness of complex networks[J]. *European Physical Journal B*, 2004, 38(2): 187-191.

[7] TIAN Di, GEORGANAS N D. Energy efficient routing with guaranteed delivery in wireless sensor networks[C]//Proc of Wireless Communication and Networking Conference. New Orleans; IEEE Press, 2003: 1923-1929.

[8] YE Fan, ZHONG G, LU Song-wu, *et al.* Gradient broadcast: a robust data delivery protocol for large scale sensor networks[J]. *Wireless*

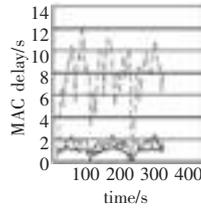


图 5 饱和情况下 DCF 下 MAC 延时的网络仿真

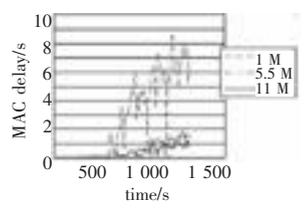


图 6 非饱和到饱和 DCF 下 MAC 延时的网络仿真

4 结束语

本文基于改进的马尔可夫模型,引入了 Z 变换分析了 802.11 DCF 的 MAC 延时,仿真了冲突概率与成功发送概率的关系,给出了基于冲突概率的 MAC 延时的仿真结果。通 OPNET 网络仿真,进一步验证了从非饱和到饱和的信道状态下的 MAC 延时的增长规律,以及饱和状态下的 MAC 延时情况。马尔可夫模型的 MAC 延时预测能够与网络仿真 MAC 延时很好地吻合,验证了分析模型的有效性,为系统的进一步研究提供理论依据和数据参考。

参考文献:

[1] IEEE 802.11 WG. IEEE 802.11a—1999, part 11: wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specification [S]. 1999.

[2] BIANCHI G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2000, 3(18): 535-547.

[3] WU Hai-tao, PENG Yong, LONG Ke-ping, *et al.* Performance of reliable transport protocol over IEEE 802.11 wireless LAN: analysis and enhancement[C]//Proc of the 21st Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies Proceedings. 2002: 599-607.

[4] 阮加勇, 黄本雄, 张帆. IEEE 802.11 DCF 延迟性能分析[J]. *华中科技大学学报:自然科学版*, 2006, 34(4): 27-29.

[5] MANGOLD S, CHOI S, MAY P, *et al.* IEEE 802.11e wireless LAN for quality of service [C]//Proc of IEEE Wireless Communications and Networking Conference. 2003: 1291-1296.

[6] ROBINSON J W, RANDHAWA T S. Saturation throughput analysis of IEEE 802.11e enhanced distributed coordination function [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2004, 6(22): 917-928.

[7] ENGELSTAD P E, OSTERBO O N. Analysis of the total delay of IEEE 802.11e EDCA and 802.11 DCF [J]. *IEEE International Conference on Communications*, 2006, 6(2): 552-559.

[8] 王沫然. MATLAB 与科学计算[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.

[9] 李馨, 叶明. OPNET Modeler 网络建模与仿真[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2006.

[9] 李德毅, 孟海军, 史雪梅. 隶属云和隶属云发生器[J]. *计算机研究与发展*, 1995, 32(6): 15-20.

[10] 柴日发, 曾文华. 定性规则的云表示[J]. *计算机工程*, 2002, 28(7): 161-164.

[11] 杨朝晖, 李德毅. 二维云模型及其在预测中的应用[J]. *计算机学报*, 1998, 21(11): 961-969.

[12] 余建桥. 基于云理论与数据场的空间孤立点挖掘研究[D]. 重庆: 西南农业大学, 2005.

[13] 黄海生, 王汝传. 基于隶属云理论的主观信任评估模型研究[J]. *通信学报*, 2008, 29(4): 13-19.

[14] 孟祥怡, 张光卫, 刘常显, 等. 基于云模型的主观信任管理模型研究[J]. *系统仿真学报*, 2007, 19(14): 3310-3317.

[15] 李众, 高键. 液电伺服变距系统的二维云模型控制研究[J]. *系统仿真学报*, 2004, 16(5): 1150-1156.