

基于分组到达率的 802.11 DCF 性能分析*

杨卫东⁺, 马建峰, 李亚辉

(西安电子科技大学 计算机网络与信息安全教育部重点实验室, 陕西 西安 710071)

Performance Analysis Based on Packet Arrival Rate for the IEEE 802.11 DCF

YANG Wei-Dong⁺, MA Jian-Feng, LI Ya-Hui

(Key Laboratory of Computer Network and Information Security for the Ministry of Education, Xidian University 710071, China)

+ Corresponding author: E-mail: mengguyang@163.com

Yang WD, Ma JF, Li YH. Performance analysis based on packet arrival rate for the IEEE 802.11 DCF. Journal of Software, 2008,19(10):2762-2769. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/2762.htm>

Abstract: A performance analytic model based on packet arrival rate is proposed for IEEE 802.11 DCF (distributed coordination function) in infrastructure-based WLAN (wireless local area network). The model does not only take into account the factors of number of terminals, traffic loads, the binary exponential back-off mechanism, but also analyzes the impact of the finite queue system at the MAC (medium access control) layer. Each terminal is modeled as an $M/M/1/K$ queue, and the virtual time slot is introduced to discretize the state of the queue system. Based on this, a three dimensional discrete time Markov chain is used to model the system. By using the model, normalized throughput, packet delay and packet losing ratio are obtained. Simulation results show that the proposed model can validly predict the performance of the DCF under various packet arrival rates.

Key words: packet arrival rate; distributed coordination function; performance analysis

摘要: 针对 WLAN(wireless local area network)基础结构模式中的 IEEE 802.11 DCF(distributed coordination function)机制,提出了一种基于分组到达率的性能分析模型.模型不仅考虑了终端数量、传输负载、二进制指数回退机制等因素,而且分析了 MAC(media access control)层有限队列对系统性能的影响.在每个终端被模型化为 $M/M/1/K$ 队列的基础上,进一步利用虚拟时隙在时间上离散化终端 MAC 层队列状态,并采用离散时间的三维马尔可夫链对系统性能建模.基于该模型得到了归一化吞吐量、分组时延和丢包率.仿真分析结果表明,该模型能够有效地预测变化的分组到达率情形下 DCF 机制的性能.

关键词: 分组到达率;分布式协调功能;性能分析

中图法分类号: TP393 **文献标识码:** A

IEEE 802.11 标准中的介质访问控制(media access control,简称 MAC)子层提供了基于具有冲突检测的载波侦听多路存取(carrier sense multiple access with collision avoidance,简称 CSMA/CA)方法的点协调功能(point coordination function,简称 PCF)和分布式协调功能(distributed coordination function,简称 DCF)两种机制^[1].通过

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60633020, 60503012, 60573036 (国家自然科学基金)

Received 2007-07-30; Accepted 2008-02-25

数学建模对广泛应用的 DCF 机制的性能进行分析成为当前的一个研究热点^[2-11].

在饱和状态条件下,Bianchi 提出了基于随机过程理论的数学模型^[2,3].在文献[2]的基础上,文献[4,5]分别增加了最大重传次数的限制和信道干扰的因素.考虑到实际网络中语音业务或数据业务常常导致终端 MAC 层队列为空,即网络处于非饱和状态.文献[6-8]对 Bianchi 模型的状态空间进行扩展,增加一个或多个空闲状态表示终端的非饱和状态,通过求解二维马尔可夫模型实现对 DCF 的性能分析.这些模型均假设队列为 0 而忽略了 MAC 层队列对分组时延的影响.文献[9,10]分别采用 $M/M/1$ 和 $G/G/1$ 队列建模分析 DCF 机制的性能,但因假设队列为无穷大而不能有效预测传输负载较高时的性能.文献[11]采用 $M/G/1/K$ 队列表示终端 MAC 层有限队列的行为状态,与系统实际情况更为接近.然而,基于排队理论的分析模型^[9-11]由于简化了二进制指数回退机制而不能精确分析 DCF 机制的性能.另外,所有模型均没有考虑队列长度对丢包率的影响.

由于终端 MAC 层上发送的分组取决于上层业务的分组数据流量,本文的思路是利用由回退等级、回退计数器和队列长度构成的三维离散马尔可夫链直接建立基于分组到达率的 DCF 性能分析模型.模型不仅考虑了二进制指数回退机制和 MAC 层有限队列系统对吞吐量、分组时延和丢包率的影响,而且全面实现了非饱和状态和饱和状态条件下的性能预测.

1 802.11 DCF

802.11 DCF 采用具有冲突检测的载波侦听多路访问(CSMA/CA)方法,提供基本模式和 RTS/CTS 模式两种信道访问方式,利用竞争窗口的二进制指数回退机制协调多个终端对共享链路的访问,避免出现因争抢信道而无法通信的情况.

在终端发送数据分组时,首先检测信道的忙闲状态,如果信道空闲且持续一个 DIFS(DCF inter-frame space)时间,则在基本模式下立即发送 MAC 数据帧(在 RTS/CTS 模式下,发送 RTS 帧),并同时检测有没有发生分组碰撞.如果发生碰撞,则终端随机地在 $[0, W_i]$ 之间均匀地选取一个延迟时间赋值给回退计数器(W_i 被称作竞争窗口,其大小依赖于数据分组重新传输次数).随后,当终端探测到信道空闲时间等于一个时隙 δ 时,计数器减 1;而当检测到信道忙时,计数器值保持不变,并在信道空闲时间等于 DIFS 时,重新激活延时计数器且终端继续监测信道,直到计数器值减到 0 时终端才发送 MAC 帧.另外,为了避免某终端长时间占用信道,终端在两次连续的数据分组发送之间也必须进行随机延迟.

2 分析模型

为了讨论和分析方便,不失一般性,我们假设:1) 无线局域网系统由相互独立且共享同一无线信道的 n 个终端组成;2) 终端 MAC 层上的分组数据按照泊松过程到达且速率一致;3) 分组数据的服务时间遵循指数分布^[9];4) 所有终端 MAC 层发送队列的容量均为 K ;5) 不考虑隐藏终端及衰落信道问题.

2.1 数学模型

系统中每个终端 MAC 层的行为可模型化为 $M/M/1/K$ 队列,其中 K 表示终端发送队列的大小.令 $X(t)$ 表示终端 MAC 层队列在时刻 t 所处的状态,那么其状态空间定义为

$$S = \{I_0, B_1, B_2, \dots, B_K\} \quad (1)$$

这里, I_0 表示终端没有分组数据发送, $B_k (1 \leq k \leq K)$ 表示终端正在发送分组数据并且队列中有 k 个分组.设 λ 为 MAC 层上的分组数据平均到达速率, μ 为一个分组的平均服务率,队列利用率 $\rho = \lambda / \mu$. $M/M/1/K$ 系统中队列长度 $k \in [0, K]$ 的稳态概率 $\pi_k^{(K)}$ 为

$$\pi_k^{(K)} = \begin{cases} (1-\rho)\rho^k / (1-\rho^{K+1}), & \rho \neq 1 \\ 1 / (K+1), & \rho = 1 \end{cases} \quad (2)$$

利用“虚拟时隙”(时隙长度可能为空闲时隙 δ 、分组成功发送的时间周期 T_s 或分组产生碰撞的时间周期 T_c)将状态 $B_k (1 \leq k \leq K)$ 在时间上离散化^[2].那么, B_k 进一步可用三维随机过程 $\{s(t), b(t), q(t)\}$ 表示,其中,随机变量

$s(t) \in [0, m]$ 表示终端时刻 t 所处的回退等级, $b(t) \in [0, 2^i W_{\min} - 1]$ 表示时刻 t 回退计数器的值 ($i \in [0, m]$), $q(t) \in [1, K]$ 表示时刻 t MAC 层队列中的分组数量. 为分析方便, 用空回退时隙 δ 离散化 I_0 并用状态 $\{s(t) = 0, b(t) = \infty, q(t) = 0\}$ 表示它. 当终端进入 $(0, \infty, 0)$ 后, 在一个空回退时隙 δ 内, 如果有分组到达, 那么在该时隙结束后, 后退计数器立即启动并进入指数回退过程; 如果没有分组到达, 则终端继续待在状态 $(0, \infty, 0)$ 并等待下一个时隙. 在各终端的每一次发送尝试中, 在各分组发生碰撞的概率 p 恒定且相互独立的条件下, 得到 802.11 DCF 的性能分析模型为三维离散时间的马尔可夫链 $\{s(t), b(t), q(t)\}$.

模型状态转移图如图 1 所示, 图中 P_0 表示终端在成功发送或丢弃当前分组后队列中没有分组的概率, P_I 表示终端在状态 I_0 的一个空回退时隙 σ 内没有新分组到达的概率. 该模型的单步非零转移概率表示如下:

$$\begin{cases}
 P(0, \infty, 0 | 0, \infty, 0) = P_I \\
 P(0, w, k | 0, \infty, 0) = (1 - P_I) / W_0, & 0 \leq w \leq W_0 - 1, 1 \leq k \leq K \\
 P(0, \infty, 0 | i, 0, k) = P_0(1 - p), & 0 \leq i \leq m, 1 \leq k \leq K \\
 P(i, w, k | i - 1, 0, k) = p / W_i, & 0 \leq i \leq m, 0 \leq w \leq W_i - 1, 1 \leq k \leq K \\
 P(0, w, k | i, 0, k) = (1 - P_0)(1 - p) / W_0, & 0 \leq i \leq m, 0 \leq w \leq W_0 - 1, 1 \leq k \leq K \\
 P\{i, w, k | i, w + 1, k\} = 1, & 0 \leq i \leq m, 0 \leq w \leq W_i - 1, 1 \leq k \leq K \\
 P(m, w, k | i, w, 0) = p / W_m, & m \leq i \leq m', 0 \leq w \leq W_m - 1, 1 \leq k \leq K
 \end{cases} \quad (3)$$

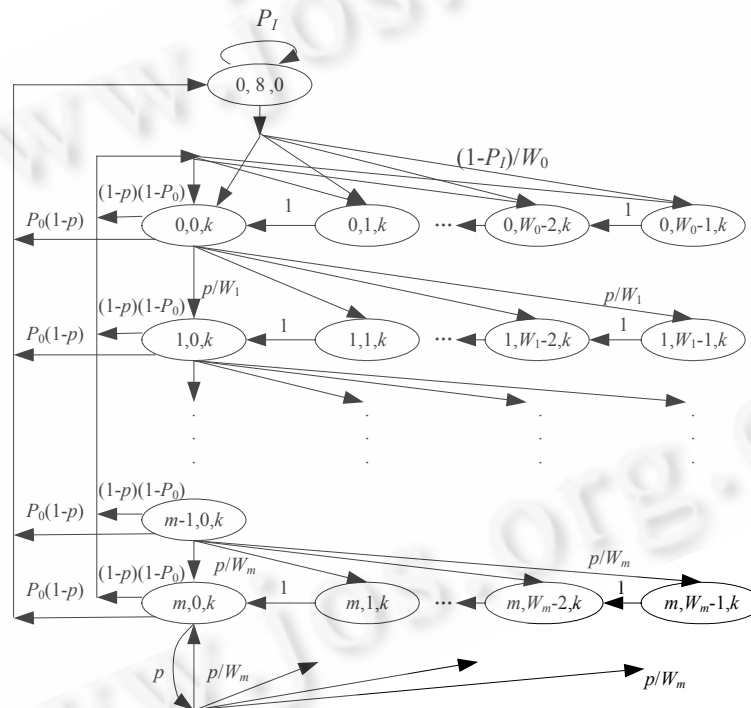


Fig.1 Markov chain model
图 1 马尔可夫链模型

2.2 模型的求解

假设在当前分组发送期间, 新到达的分组暂不进入发送队列, 直到当前分组被成功发送或丢弃后终端才去检测是否有新分组到达, 即终端队列长度在当前分组发送过程中保持不变. 令 Q_k 表示终端发送或丢弃第 k 个分组后队列中的分组数量, V 表示发送第 $k+1$ 个分组期间新分组到达的数量. 那么, Q_{k+1} 满足如下方程:

$$Q_{k+1} = \begin{cases} Q_k - 1 + V, & Q_k \geq 1 \\ V, & Q_k = 0 \end{cases} \quad (4)$$

得到 P_0 和 P_I 的计算公式为

$$\begin{cases} P_0 = P\{Q_{k+1} = 0\} = P\{Q_k = 1, V = 0\} = \pi_1^{(K)} \cdot e^{-\lambda T_p} \\ P_I = P\{V_\delta = 0 | Q_k = 0\} = e^{-\lambda} \end{cases} \quad (5)$$

上式中, V_δ 表示一个空回退时隙内分组到达的数量, T_p 表示队列中一个分组的平均服务时间^[9], 且

$$T_p = \frac{1}{\mu} = \rho(n-1) \cdot \left[T_s + T_c \cdot \frac{p}{1-p} \right] + T_s + T_c \cdot \frac{p}{1-p} + \frac{(1-p-p(2p)^m) \cdot W}{2(1-2p)} \quad (6)$$

简记 $P_{i,w,k} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{s(t) = i, b(t) = w, q(t) = k, 0 \leq i \leq m, 0 \leq w \leq W_i - 1, 1 \leq k \leq K\}$ 为马尔可夫链的稳态概率, $P_{0,\infty,0}$ 表示状态 $(0, \infty, 0)$ 的稳态概率. 由单步转移概率式(3)推导出关系式(7)和式(8):

$$P_{i,w,k} = \begin{cases} \frac{1-P_I}{P_0} P_{0,\infty,0} \\ p^i P_{0,0,k}, & 0 \leq i \leq m-1, 1 \leq k \leq K \\ \frac{p^m}{(1-p)} P_{0,0,k}, & i = m, 1 \leq k \leq K \\ \frac{W_i - w}{W_i} P_{i,0,k}, & 0 \leq i \leq m, 1 \leq w \leq W_i - 1, 1 \leq k \leq K \end{cases} \quad (7)$$

$$\sum_{i=0}^m \sum_{k=1}^K P_{i,0,k} = P_{0,0,k} / (1-p) \quad (8)$$

利用归一性条件可得:

$$\begin{aligned} 1 &= P_{0,\infty,0} + \sum_{i=0}^m \sum_{w=0}^{W_i-1} \sum_{k=1}^K P_{i,w,k} = \frac{P_0}{1-P_I} P_{0,0,k} + \sum_{i=0}^m \sum_{k=1}^K P_{i,0,k} \frac{W_i+1}{2} \\ &= \frac{P_{0,0,k}}{2} \left[\frac{P_0}{1-P_I} + \frac{1}{(1-p)} + W \left(\sum_{i=0}^{m-1} (2p)^i + \frac{(2p)^m}{1-p} \right) \right] \end{aligned} \quad (9)$$

进一步由式(10)推导可得:

$$P_{0,0,k} = \frac{2(1-P_I)(1-p)(1-2p)}{2P_0(1-p)(1-2p) + (1-P_I)\{(1-2p) + W[1-p-p(2p)^m]\}} \quad (10)$$

由于模型中其他状态概率均可用 $P_{0,0,k}$ 表示, 所以整个模型便可以求解出来.

3 性能分析

3.1 归一化吞吐量

定义 τ 为终端任意选择一个时隙发送分组的概率, 分组碰撞概率 p 为系统中至少有两个终端在同一时隙内发送了数据分组的概率. 由式(8)和式(10)可得:

$$\tau = \sum_{i=0}^m \sum_{k=1}^K P_{i,0,k} = \frac{2(1-P_I)(1-2p)}{2P_0(1-p)(1-2p) + (1-P_I)\{(1-2p) + W[1-p-p(2p)^m]\}} \quad (11)$$

$$p = 1 - (1-\tau)^{n-1} \quad (12)$$

方程(11)和方程(12)组成了一个非线性方程组. 对于每一确定的分组到达率 λ , 通过数值方法可以求得在区间 $\tau \in [0, 1]$, $p \in [0, 1]$ 上的唯一解. 根据信道的工作状态, 终端的回退计时器减 1 需要等待的时间可能为一个空回退时隙、分组成功发送的时间周期或分组发送发生碰撞的时间周期. 设 p_r 表示空回退时隙的概率, p_s 表示一个终端成功发送数据分组的概率, p_c 表示至少两个终端在同一时隙发送分组时发生碰撞的概率, 可得:

$$\begin{cases} p_i = (1-\tau)^n \\ p_s = n\tau(1-\tau)^{n-1} \\ p_c = 1 - (1-\tau)^n - n\tau(1-\tau)^{n-1} \end{cases} \quad (13)$$

根据文献[2],归一化吞吐量 S 定义为

$$S = \frac{p_s \cdot l}{p_i \cdot \delta + p_s \cdot T_s + p_c \cdot T_c} = \frac{l}{T_s + \frac{p_i \cdot \delta + p_c \cdot T_c}{p_s}} \quad (14)$$

有效载荷 l 由上层协议决定,在基本访问模式和 RTS/CTS 模式下, T_s 和 T_c 有不同的值,但在给定的访问模式下,它们的值通常为常量^[2].计算公式分别为

$$\begin{cases} T_s^{bas} = DIFS + H + l + SIFS + \delta + ACK + \delta \\ T_c^{bas} = DIFS + H + l + \delta \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} T_s^{rts} = RTS + SIFS + \delta + CTS + SIFS + \delta + H + \\ \quad l + SIFS + \delta + ACK + DIFS + \delta \\ T_c^{rts} = RTS + DIFS + \delta \end{cases} \quad (16)$$

由式(14)可知,当 $(p_i \cdot \delta + p_c \cdot T_c) / p_s$ 最小时,网络信道的吞吐量最大.因此,吞吐量最大化的约束条件为

$$\frac{d}{dp} \left(\frac{p_i \cdot \delta + p_c \cdot T_c}{p_s} \right) = 0 \quad (17)$$

由式(17)可得,当终端数量 $n > 5$ 且碰撞概率 $p = 0.0933$ 时,信道吞吐量最大.

3.2 分组时延

根据 $M/M/1/K$ 队列的性质,队列中分组数据的平均数量 L 的计算公式为

$$L = \begin{cases} \frac{\rho[1 - (K+1)\rho^K + K\rho^{K+1}]}{(1-\rho)(1-\rho^{K+1})}, & \rho \neq 1 \\ K/2, & \rho = 1 \end{cases} \quad (18)$$

由分组服务时间和分组排队等待时间组成的分组平均时延 T 为

$$T = \frac{L}{(1 - \pi_K^{(K)}) \cdot \lambda} \quad (19)$$

3.3 丢包率

实际系统在如下两种情形下丢弃分组数据:当发送队列已满,新到达的分组数据直接被丢弃时;当到达最大回退级别且发生碰撞时,发送的分组数据被丢弃.用 PD 表示分组数据被丢弃事件, QF 表示发送队列已满, NQF 表示发送队列缓存未滿,可以得到分组数据被丢弃的概率 P_L 为

$$\begin{aligned} P_L &= P(PD) = P(PD | NQF) \cdot P(NQF) + P(PD | QF)P(QF) \\ &= p^m \cdot (1 - \pi_K^{(K)}) + 1 \cdot \pi_K^{(K)} = p^m + \pi_K^{(K)}(1 - p^m) \end{aligned} \quad (20)$$

4 仿真分析

本文采用 NS-2.26^[12]作为仿真平台,以 802.11b 作为网络中终端和接入点(access points,简称 AP)的无线网络协议,通信覆盖范围为 250m,其他物理层和 MAC 层仿真参数设置见表 1.仿真过程中 n 个终端只与一个 AP 通信且所有终端上的传输负载相同,仿真场景为 $200 \times 200 \text{m}^2$ 的矩形区域,仿真时间为 2 000s.由分析模型得到的数值结果以空回退时隙 δ 为单元时间,图 2,图 3 中 Ana 表示由模型分析得到的结果,Sim 表示由仿真实验得到的结果.

Table 1 Simulator parameter

表 1 仿真参数

| Parameters | Values | Parameters | Values | Parameters | Values |
|------------------|-----------|----------------------|------------|--------------------|-----------|
| Channel bit rate | 11 Mbit/s | Packet payload | 8 184 bits | MAC header | 224 bits |
| $DIFS$ | 50 us | $SIFS$ | 10 us | ACK | 112 bit |
| CW_{min} | 32 | CW_{max} | 1 024 bit | Slot time δ | 20 us |
| PHY header | 192 bit | Retransmission limit | 6 | T_s^{bas} | 8 982 bit |
| T_c^{bas} | 8 713 bit | T_s^{rts} | 9 568 bit | T_c^{rts} | 417 bit |

图 2 和图 3 分别给出了终端数量为 10,30,50 和 70 且终端 MAC 层队列为 10 倍分组大小时,在基本模式和 RTS/CTS 模式下归一化吞吐量随分组到达率 λ 的变化趋势.如图中所示,当分组到达率较小时,两种模式下不同数量终端系统的吞吐量也随分组到达率的增大而增加,这是因为信道空闲,分组数据能够很快发送.当吞吐量达到最大值后,基本模式的吞吐量随分组到达速率的增加而下降,到达一定程度后,系统吞吐量进入饱和状态而趋于平缓;而 RTS/CTS 模式的吞吐量一直保持在最大值不变.仿真结果表明,RTS/CTS 模式几乎不受终端数量影响,且在非饱和条件下比基本模式的性能更优越.

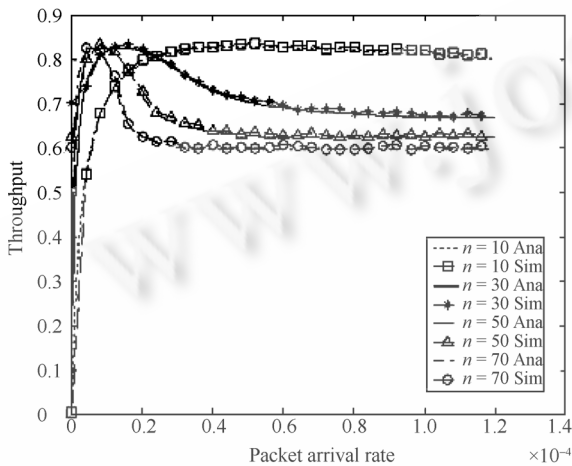


Fig.2 Throughput versus the packet arrival rate for the base access method

图 2 基本访问模式下吞吐量与分组到达率关系图

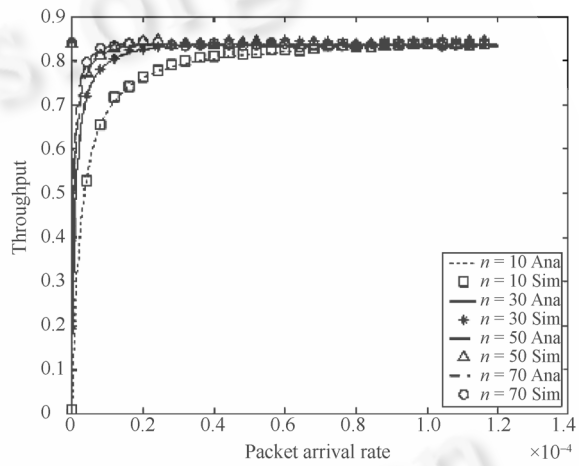


Fig.3 Throughput versus the packet arrival rate for the RTS/CTS mechanism

图 3 RTS/CTS 模式下吞吐量与分组到达率关系图

图 4 和图 5 分别给出了基本模式下终端数量为 30 和 50 的情形下,吞吐量随分组碰撞概率的变化.由仿真结果可知,信道吞吐量的最大值出现在非饱和状态下 $p \approx 0.1$ 时且几乎不受终端数量影响,这与本文第 3.1 节式 (17)分析的结果相一致.

图 6 和图 7 分别给出了终端数量为 30 时,不同分组到达率和不同队列长度情形下平均分组时延和丢包率的变化趋势.由图中可以看出,当分组到达率较小时,队列长度的大小对分组时延和丢包率几乎没有影响;随着分组到达率的增加,队列长度小的丢包率明显增大而分组时延几乎不变;当分组到达率增大到系统饱和后,队列长度大的分组时延大于队列长度小的,而丢包率的变化却恰恰相反.这是因为,在非饱和状态下,分组几乎不需要等待就发送;当到达饱和状态后,队列长度大的终端由于有大量的分组等待发送而使得分组时延增加,而队列长度小的由于将新到达的分组直接丢弃造成丢包率增大.另外,图 7 给出队列长度为无穷大时,丢包率几乎和队列长度为 100 倍分组大小接近.

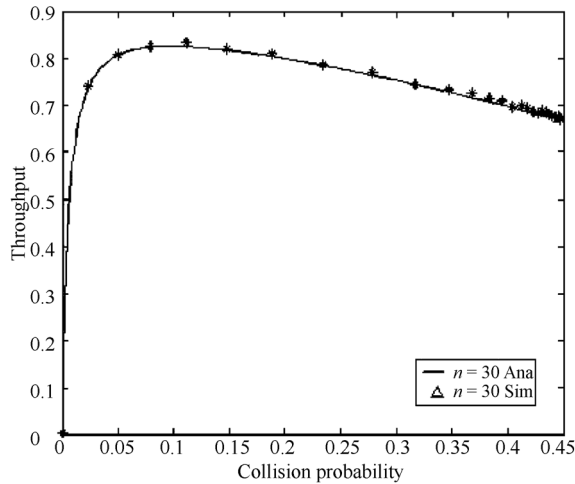


Fig.4 Throughput versus the collision probability ($n=30$)

图4 吞吐量与碰撞概率关系图($n=30$)

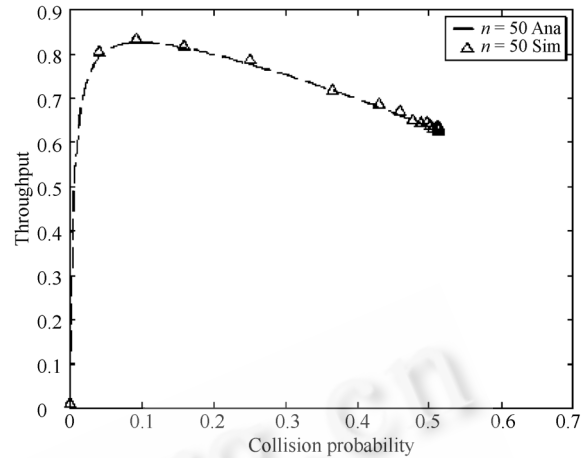


Fig.5 Throughput versus the collision probability ($n=50$)

图5 吞吐量与碰撞概率关系图($n=50$)

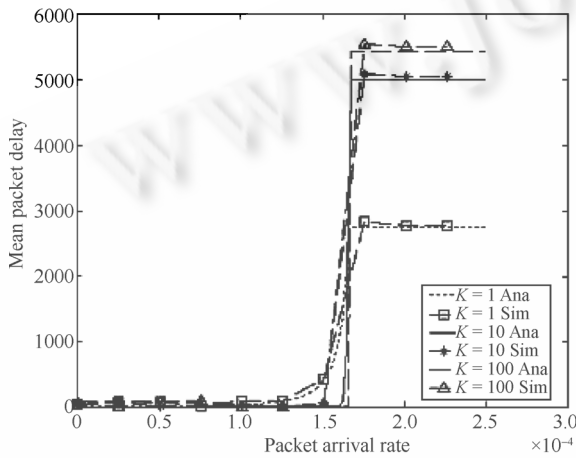


Fig.6 Mean packet delay versus the packet arrival rate

图6 平均分组时延与分组到达率关系图

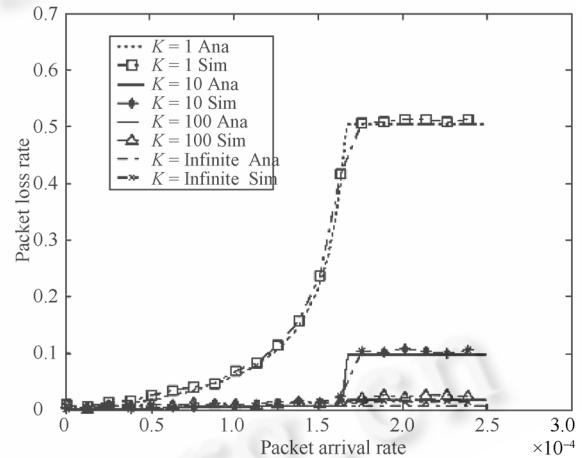


Fig.7 Packet loss rate versus the packet arrival rate

图7 丢包率与分组到达率关系图

仿真和数值分析结果较好地吻合表明在不同分组速率、终端数量和队列长度情形下,给出的模型能够很好地预测 DCF 机制的性能。

5 结论

本文采用离散时间的三维马尔可夫链分析 WLAN 基础结构模式中的 802.11 DCF 机制的吞吐量、分组时延和丢包率。该模型不仅考虑了二进制指数回退机制,而且分析了 MAC 层有限队列系统对系统性能的影响。另外,直接基于变化的分组到达率分析方法使得模型更接近实际系统且具有通用性。仿真和数值分析结果表明,该模型能够有效地预测变化的分组到达率情形下 DCF 机制的性能。

References:

- [1] IEEE Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. IEEE Standard 802.11, 1999.

- [2] Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2000,18(3):535–547.
- [3] Bianchi G, Tinnirello I. Remarks on IEEE 802.11 DCF performance analysis. *IEEE Communications Letters*, 2005,9(8):765–767.
- [4] Chatzimisios P, Boucouvalas AC, Vitsas V. IEEE 802.11 packet delay: A finite retry limit analysis. In: *Proc. of the IEEE Globecom*. 2003. 950–954. http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=1258379&fromcon
- [5] Vishnevsky VM, Lyakhov AI. 802.11 LANs: Saturation throughput in the presence of noise. In: *Proc. of the IFIP Networking*. 2002. 1008–1019. <http://www.springerlink.com/content/rkchd978egg2wye6/>
- [6] Duffy K, Malone D, Leith DJ. Modeling the 802.11 distributed coordination function in non-saturated conditions. *IEEE Communications Letters*, 2005,9(8):715–717.
- [7] Malone D, Duffy K, Leith DJ. Modeling the 802.11 distributed coordination function in non-saturated heterogeneous conditions. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2007,15(1):159–172.
- [8] Latkoski P, Hadzi-Velkov Z, Popovski B. Extended model for performance analysis of non-saturated IEEE 802.11 DCF in erroneous channel. In: *Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS)*. New York: IEEE Press, 2006. 783–788. <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/defdeny.jsp?url=/iel5/4053889/4053890/04053997.pdf&isnumber=4053890&prod=CNF&arnumber=4053997&arSt=783&ared=788&arAuthor=P.+Latkoski%3B+Z.+Hadzi-Velkov%3B+B.+Popovski&code=2>
- [9] Tickoo O, Sikdar B. A queuing model for finite load IEEE 802.11 random access. In: *IEEE Int'l Conf. on Communications*. 2004. 175–179. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1312475
- [10] Winands E, Denteneer T, Resing J, Rietman R. A finite-source feedback queuing network as a model of the IEEE 802.11 distributed coordination function. In: Casals O, *et al.*, eds. *Proc. of the European Wireless 2004 Conf.* John Wiley & Sons, 2004. 551–557. <http://www3.interscience.wiley.com/journal/109876269/abstract?CRETRY=1&SRETRY=0>
- [11] Zheng Y, Lu KJ, Wu DP. Performance analysis of IEEE 802.11DCF in imperfect channels. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2006,55(5):1235–1246.
- [12] NS-2.26 Network simulator. 2005. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>



杨卫东(1977—),男,内蒙古卓资人,博士生,主要研究领域为无线网络协议设计,移动计算.



李亚辉(1976—),男,博士生,讲师,主要研究领域为无线网络协议设计.



马建峰(1963—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为信息安全,无线网络.