

基于 M/G/1/K 排队模型的 IEEE802.11e EDCA 性能研究

白翔 毛玉明

(电子科技大学通信与信息工程学院 成都 610054)

摘要: 该文利用二维 Markov 链分析方法, 提出了一种新的 IEEE802.11e EDCA 网络分析模型, 该模型引入了空闲状态和不同接入等级的仲裁帧间隔(AIFS)的使用; 利用 Markov 链状态转移图的 Z 域信号传递函数推导了 MAC 层平均服务时间的概率分布; 结合 M/G/1/K 排队模型分析了增强分布式信道接入(EDCA)在非饱和和饱和负载下的性能。经过访真实验结果与数值分析结果的对比, 验证了分析模型的准确性。分析结果表明: EDCA 接入机制只为不同优先级业务提供 QoS 区分; 不同优先级业务信道接入的不公平性是 EDCA 接入机制的特点。

关键词: Markov 链模型; M/G/1/K 排队模型; 非饱和状态; 饱和状态

中图分类号: TN915.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)07-1610-05

Performance Investigation of IEEE 802.11e EDCA Based on the M/G/1/K Queue Model

Bai Xiang Mao Yu-ming

(School of Communication and Information Engineering, UESTC, Chengdu 610054, China)

Abstract: A new Markov chain model for the IEEE 802.11e EDCA is presented. The model takes into account both the idle state and differentiation based on different AIFS-value for different traffic. The signal transfer function of the generalized state transition diagram can be used to derive a probability distribution of the MAC layer service time and the performance of EDCA from a non-saturated channel to a saturated medium by using presented M/G/1/K queuing model is analyzed. A good match between the analytical model and simulation which conforms the veracity of proposed model is observed. Simulation shows that despite providing prioritized QoS, the EDCA still can not support strict QoS for real-time application. It is inevitable that there is unfairness of channel access to prioritized traffic due to EDCA.

Key words: Markov chain model; M/G/1/K queuing model; Non-saturation condition; Saturation condition

1 引言

IEEE802.11 协议^[1]描述了用于无线局域网的物理层和 MAC 层协议, 它提供的 DCF 机制由于其分布式特点而广泛应用于 Ad hoc 网络, 但是 DCF 不能提供 QoS 区分, 不能满足人们对实时业务的要求。IEEE802.11e^[2]在 802.11 的基础上加入了 QoS 的相关内容, 它引入了 EDCA, 该机制结合帧间隔(IFS)和后退算法来提供业务区分服务, 它建立了一种依据传输业务种类分配带宽的概率优先机制, 高优先级业务能获得更高的吞吐量和更低的接入时延。

为了研究 IEEE 802.11 网络的性能, Bianchi 首先提出了一种 802.11 DCF 接入方式的网络分析模型^[3], 用二维 Markov 链来分析网络行为, 很好地描述了 DCF 的网络性能。但 Bianchi 的模型存在缺陷: 设定业务后退计数器递减的概率为 1, 意味着业务后退过程中不管检测到信道忙还是空闲后退计数器都将递减 1, 这与 802.11 协议不相符。Xiao 等人在文献[4,5]中改进了 Bianchi 的 Markov 链模型, 分析了 802.11e EDCA 系统的饱和吞吐量、饱和时延。设置业务在

后退过程中检测信道忙的概率等于发送数据在信道上发生冲突的概率, 并且依据 802.11e 协议设置了数据帧重传限制, 推导了帧丢失率。但是 Xiao 的模型只是简单地将 Bianchi 的模型进行多优先级扩展, 没有考虑各个优先级业务的 AIFS 区分。Bianchi 和 Xiao 提出的网络分析模型都假定网络处于饱和, 即发送队列时时处于满状态。然而, 由于业务突发性的特点, 不能保证信道时时处于饱和, 所以有必要提出一种覆盖非饱和和饱和状态的模型来分析 EDCA 性能表现的内在原因。

文献[6-9]都提出了非饱和状态下的 Markov 链模型, 分析了 802.11 DCF 的性能, 这些模型沿用了 Bianchi 的模型, 因而存在相同的缺陷。Chen 和 Engelstad 分别在文献[10,11]中对 802.11e EDCA 在非饱和和负载下的性能做了研究, 但是他们提出的 Markov 链模型没有考虑空闲状态产生的影响。虽然 Chen 的模型分析结合了 MAC 层的排队系统, 但假定排队队长为无穷大, 这样不能得到准确的时延分析结果, 不能如实反映系统的性能。本文提出的网络分析模型区别于其他文中的模型主要体现在以下几个方面: (1)本文提出的模型分析了 802.11e EDCA 的性能不仅包括饱和情况, 而且还包

括非饱和情况。(2)依据 802.11e 协议,分析模型在非饱和状态下引入了空闲状态,此时队列为空,等待数据包到达。(3)结合 M/G/1/K 排队模型分析了在 EDCA 接入方式下不同接入等级业务的吞吐量、MAC 时延和帧丢失率等性能。(4)模型引入了不同接入等级的 AIFS 的使用,分析了低优先级业务被“饿死”的原因,同时考虑了信道忙率的影响。

2 IEEE 802.11e EDCA 网络分析模型

本文的模型分析主要分为 3 个部分,首先通过分析一个优先级业务的二进制指数退避过程来获得在某个时隙内不同优先级的业务发送数据的概率,发生冲突的概率以及信道处于忙状态的概率等。然后根据第一步的结果,结合后退过程的 Z 域传递函数推导 MAC 层服务时间的概率分布,计算 MAC 层平均服务时间。最后利用前两步分析结果结合 M/G/1/K 排队模型计算吞吐量、时延和帧丢失率。

2.1 Markov 链模型

首先设每个优先级业务的个数为 $n_i (i = 0, 1, 2, 3)$ 。用 $b(i, t)$ 代表第 i 类业务后退时间计数器, $s(i, t)$ 代表第 i 类业务后退级数,则由文献[5] $\{b(i, t), s(i, t)\}$ 可以看作是一个第 i 类业务的二维离散 Markov 链。图 1 是该 Markov 链的状态转移图。图中 idle 状态表示第 i 类业务的缓存队列为空,等待数据包到达。用 $W_{i,j}$ 表示第 i 类业务处在第 j 个后退级数时的竞争窗口。则 $W_{i,0} = CW_{\min}[i]$, m 为最大重传次数, m' 为最大后退级数, $CW_{\max}[i] = 2^{m'} CW_{\min}[i]$ 。则

$$W_{i,j} = \begin{cases} 2^j W_{i,0}, & j \leq m' \\ 2^{m'} W_{i,0}, & m' < j \leq m \end{cases} \quad (1)$$

令 τ_i 为第 i 类业务在给定时刻发送数据帧的概率(此时队列有数据准备发送); p_a 为包到达缓存队列的概率; pI_i 为第 i 类业务的缓存队列为空的概率; p_i^* 为第 i 类业务在进行

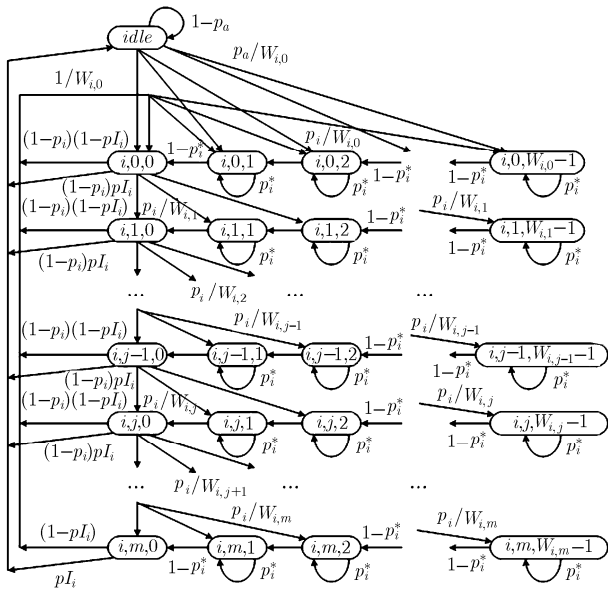


图 1 优先级 i 的 Markov 链状态转移图

后退过程中检测到信道忙的概率。

$b(i, j, k) = \lim_{t \rightarrow \infty} p\{s(i, t) = j, b(i, t) = k\}$ 为 Markov 链的平稳分布,则 $b_{i,0,0}$ 如式(2)所示:

$$\frac{1}{b_{i,0,0}} = \begin{cases} \frac{2(1-p_i^{m+1})(1-2p_i)(1-p_i^*)}{2(1-2p_i)(1-p_i)(1-p_i^*)} \\ + \frac{W_{i,0}(1-(2p_i)^{m+1})(1-p_i) - (1-p_i^{m+1})(1-p_i)}{2(1-2p_i)(1-p_i)(1-p_i^*)} \\ + \frac{pI_i}{p_a}, m > m' \\ \frac{2(1-p_i^{m+1})(1-2p_i)(1-p_i^*)}{2(1-2p_i)(1-p_i)(1-p_i^*)} \\ + \frac{W_{i,0}(1-(2p_i)^{m+1})(1-p_i) - (1-p_i^{m+1})(1-p_i)}{2(1-2p_i)(1-p_i)(1-p_i^*)} \\ + \frac{(1-2p_i)(2^{m'}W_{i,0} - 1)(p_i^{m'+1} - p_i^{m+1})}{2(1-2p_i)(1-p_i)(1-p_i^*)} + \frac{pI_i}{p_a}, m \leq m' \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可以看到,如果 $pI_i = 0$, $p_a = 1$, $p_i^* = p_i$, 得出的式(2)与文献[5]的分析结果相同,这时 Markov 链模型退化为文献[5]中的模型,此时为饱和状态。如果 $pI_i \neq 0$, $p_a = 1$, $p_i^* = 0$, 式(2)的结果与文献[12]的分析结果相同,此时 Markov 链模型退化为非饱和状态模型。第 i 类业务在给定时刻内发送数据的概率为(队列为非空): $\tau_i = \sum_{j=0}^m b_{i,j,0} = (1-p_i^{m+1}/1-p_i)b_{i,0,0}$ 。 p_i 为第 i 类业务在后退计数器变为 0 时发送数据发生冲突的概率,有

$$p_i = 1 - \prod_{l=0}^{i-1} [1 - (1-pI_l)\tau_l]^{p_i} \times [1 - (1-pI_i)\tau_i]^{p_i-1} \cdot \prod_{l=i+1}^m [1 - (1-pI_l)\tau_l]^{p_i} \quad (3)$$

式(3)中 $(1-pI_i)\tau_i$ 为第 i 类业务在给定时刻内发送的概率,如果 $pI_i = 0$, 即饱和状态,式(3)与文献[6]中的分析结果相同。令 p_b 为信道被占用的概率,即所有业务至少有一个占用信道发送数据,则 $p_b = 1 - \prod_{l=0}^3 [1 - (1-pI_l)\tau_l]^{p_l}$ 。如果不考虑各类优先级业务的 AIFS 区分,则 $p_i^* = p_i$, Xiao 提出的饱和状态下的网络分析模型[5]就使用了此分析结果,为了更接近于 802.11e 协议的描述,考虑接入等级的 AIFS 区分,需要重新计算 p_i^* 。设定在一个给定的时隙中,信道被占用的概率为 p_b , 空闲的概率为 $1-p_b$ 。在空闲时隙中,由于后退过程 AIFS 引起的时隙空闲的概率为 $A_i p_b$, 则信道完全空闲的概率为 $1 - (A_i + 1)p_b$, 那么在给定时刻中其他业务都不传输的概率可以表示为 $p_e = [1 - (A_i + 1)p_b]/[1 - (1-pI_i)\tau_i]$, 其中 $A_i = \text{AIFSN}(i) - \text{AIFSN}(3)$, 则有 $p_i^* = 1 - p_e = 1 - [1 - (A_i + 1)p_b]/[1 - (1-pI_i)\tau_i]$, 为了保证 $p_i^* \in [0, 1]$, 有 $p_i^* = \min\{1, p_b + A_i p_b/[1 - (1-pI_i)\tau_i]\}$ 。如果 $p_i^* = 1$, 此时 $\tau_i \rightarrow 0$, 此业务被“饿死”。

2.2 MAC 层服务时间

MAC 层服务时间是业务的数据帧达到了队列头部开始

争用信道进行发送的时刻到此数据帧被成功接收的确认时刻或到此数据帧发送失败被丢弃的时刻。在 EDCA 接入方式下, 数据帧的发送过程可以看作是一个 Z 域的线性系统, 其服务系统的传递函数系统框图如图 2 所示。

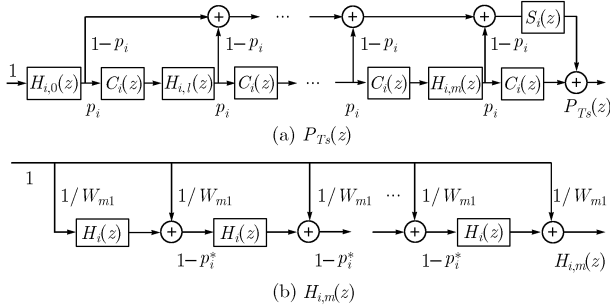


图 2 服务系统的 Z 域传递函数系统框图

图 2 中, $C_i(z)$ 表示第 i 类业务发送数据冲突持续时间的概率母函数(为了方便运算, 只讨论 RTS/CTS 的接入方式), $C_i(z) = z^{T_{\text{coll}}} = z^{\text{RTS+SIFS+ACK+AIFS}(i)}$ 。 $S_i(z)$ 表示第 i 类业务成功传输数据帧所需时间的概率母函数, 则有 $S_i(z) = z^{\text{RTS+CTS+DATA+ACK+3SIFS+AIFS}(i)}$ 。式中 DATA 表示传输有效平均长度的数据帧所需要的时间。

以下推导第 i 类业务后退计数器递减过程所需时间的概率母函数 $H_{i,m}(z)$ 。为了计算 $H_{i,m}(z)$, 首先定义两个概率 q_{ti} 和 q_{si} 。 q_{ti} 表示其他业务中至少有一个占用信道进行传输的概率, 即第 i 类业务在后退过程中检测到信道忙的概率, 则有 $q_{ti} = p_i^*$ 。 q_{si} 表示其他业务中只有一个数据帧占用信道成功传输的概率, 即在后退过程中第 i 类业务检测信道忙, 同时又检测信道无冲突的概率, 有

$$q_{si} = (n_i - 1)(1 - pI_i)\tau_i[1 - (1 - pI_i)\tau_i]^{n_i - 2} \cdot \prod_{l=0, l \neq i}^3 [1 - (1 - pI_l)\tau_l]^{n_l} + [1 - (1 - pI_i)\tau_i]^{n_i - 1} \cdot \sum_{l=0, l \neq i}^3 \left\{ n_l(1 - pI_l)\tau_l[1 - (1 - pI_l)\tau_l]^{n_l - 1} \cdot \prod_{l'=0, l' \neq i, l}^3 [1 - (1 - pI_{l'})\tau_{l'}]^{n_{l'}} \right\} \quad (4)$$

可以推导: $H_i(z) = (1 - q_{ti})z^\sigma/[1 - q_{si}S_i(z) - (q_{ti} - q_{si}) \cdot C_i(z)]$, 式中 σ 表示一个空时隙时间。由上式可以推导 $H_{i,m}(z)$:

$$H_{i,m}(z) = \begin{cases} \frac{1}{W_{i,m}} \sum_{j=0}^{W_{i,m}-1} [H_i(z)]^j, & m \leq m' \\ \frac{1}{W_{i,m'}} \sum_{j=0}^{W_{i,m'}-1} [H_i(z)]^j, & m > m' \end{cases} \quad (5)$$

令 $P_{Ts}(z)$ 为 Z 域线性系统的传递函数, 根据图 2 使用梅森公式(Mason formula)有

$$P_{Ts}(z) = (1 - p_i)S_i(z) \sum_{m_1=0}^m \left\{ [p_i C_i(z)]^{m_1} \prod_{j=0}^{m_1} H_{i,j}(z) \right\} + [p_i C_i(z)]^{m+1} \prod_{j=0}^m H_{i,j}(z) \quad (6)$$

令 $\overline{t_{svci}}$ 为第 i 类业务 MAC 层平均服务时间, 由式(6)和概率母函数的性质, 有 $E[T_s] = \overline{t_{svci}} = [dP_{Ts}(z)/dz]|_{z=1}$ 。

2.3 M/G/1/K 排队模型分析

设定第 i 类业务服从到达率为 λ_i 的泊松过程, 则在 802.11e EDCA 接入方式下, 每类业务的缓存队列可以看作 M/G/1/K 排队模型。令 $\varepsilon(t)$ ($t \geq 0$) 表示在 t 时刻排队系统所处的状态。令 t_n 为第 n 个数据包服务完毕离开排队系统的时刻, 则 $\varepsilon_n = \varepsilon(t_n^-)$, ε_n 表示在 t_n 时刻之前排队系统所处的状态, 可以认为 ε_n 是队长过程的嵌入 Markov 链^[13]。此时嵌入 Markov 链的状态空间为 $S' = \{A_0, A_1, A_2, \dots, A_K\}$, 式中 A_k 表示在信道忙的条件下排队队长为 k 。

令 $p_{i,j}$ 表示状态 A_i 到 A_j 的一步转移概率, 有 $p_{i,j} = \lim_{n \rightarrow \infty} P\{\varepsilon_{n+1} = A_j | \varepsilon_n = A_i\}$, $\forall i, j \in [0, k]$ 。一步转移概率 $p_{i,j}$ 的平稳分布可以表示为 $\pi = \{\pi_n\}$, 有 $\pi P = \pi$ 。基于 M/G/1/K 排队模型, 可以计算队列空的概率 p_0 和队列满的概率 p_K :

$$p_0 = pI_i = \frac{\pi_0}{\pi_0 + \rho} = \frac{\pi_0}{\pi_0 + \lambda_i \overline{t_{svci}}}, \quad p_K = 1 - \frac{1}{\pi_0 + \lambda_i \overline{t_{svci}}} \quad (7)$$

式中 $\rho = \lambda_i \overline{t_{svci}}$ 表示服务强度, 即信道被占用的概率。至此, 可以计算网络模型的吞吐率、MAC 时延和帧丢失率, 令 MAC 时延为 wt_i (平均等待时间, 数据帧进入 MAC 层到最后出 MAC 层的时间), $E[L]$ 表示平均排队队长, 有

$$wt_i = E[L]/[\lambda_i(1 - p_K)] = (1/\lambda_i) \left[\sum_{n=0}^{K-1} n\pi_n + K(\pi_0 + \rho - 1) \right] \quad (8)$$

第 i 类业务的吞吐率 S_i 可以表示为 $S_i = \lambda_i(1 - p_K)(1 - p_i^{m+1})$, 式中 p_i^{m+1} 为第 i 类业务的帧丢失率。

3 实验结果与 802.11e EDCA 的性能分析

为了验证本文提出的网络分析模型的准确性, 需要将数值分析结果与仿真结果作比较。仿真采用的软件是 Berkeley 发布的离散事件仿真器 NS2 的 2.29 版本, 在 Red Hat9.0 平台上仿真。网络拓扑分别设置 N 为 20 ($n_3 = n_1 = 10$), 30 ($n_3 = n_1 = n_0 = 10$), 40 ($n_3 = n_1 = 20$) 和 100 ($n_3 = n_1 = 50$) 个节点随机分布在 100m × 100m 的区域内, 节点传输范围为 250m, 不考虑隐藏终端问题。表 1 是仿真使用的参数, 其他参数按照文献[1]中的 IEEE 802.11 物理层设置。

3.1 802.11e EDCA 支持 QoS 的性能

为了简单说明问题, 场景 1 先考虑网络中只有接入等级为 AC3 和 AC1 的两种业务, 图 3 给出的数值计算和仿真结

表1 仿真参数设置

Priority	AIFS	AIFSN	CW _{min}	CW _{max}	Queue length
AC3	50 μs	2	15	511	50
AC1	50 μs	2	31	1023	50
AC0	150 μs	7	31	1023	50

果证实了分析模型的准确性。将输入归一化负载的增加过程分为 3 个阶段, 从 0~0.72 为非饱和阶段, 0.72~0.96 为准饱和阶段, 0.96 以上为饱和阶段。在非饱和阶段, 信道有足够的带宽承载各类业务流, 因而网络吞吐量随着负载的增加而线性增加, 如图 3(a)和图 3(b)所示。非饱和状态下, 图 3(c)示出了 AC3 业务的 MAC 时延随着输入负载的增加从 5.5ms 增加到 20ms, 远远小于 150ms 的实时业务时延限制^[6]。同样 AC1 业务的 MAC 时延从 5.7ms 增加到 39.6ms。AC3 业务的帧丢失率小于 0.01, 也符合实时业务帧丢失率限制。因而在非饱和情况, EDCA 支持实时业务严格的 QoS 保证。随着负载的继续增加, 网络进入准饱和, 优先级高的业务虽然仍能维持线性增加的吞吐量, 但是其他 QoS 性能明显降

级。网络进入饱和后, 在固定节点数情况下, QoS 性能都趋于稳定, 随着节点数 N 从 20 增加到 40, 冲突率几乎增加了 10%, 如图 3(f)所示。各类优先级业务的 QoS 性能明显降级, 这时 EDCA 不能维持实时业务的 QoS 要求, 只提供不同业务的 QoS 区分。

3.2 802.11e EDCA 信道接入的不公平性

场景 2 考虑网络中有接入等级为 AC3, AC1 和 AC0 的 3 种业务。图 4 给出了仿真与数值计算结果。当输入归一化负载增加到 0.5 左右, 网络进入准饱和, AC3 和 AC2 占用大量带宽保证线性增加的吞吐量, 而接入等级最低的 AC0 吞吐量明显下降, 同时其时延和帧丢失率成倍增加。当输入负载达到 0.95 时, AC0 的时延已经达到 25s, 而帧丢失率已接近 1, AC0 业务几乎为零吞吐量, 被“饿死”。此时 $p_0^* \rightarrow 1$, $\tau_0 \rightarrow 0$, 有 $p_0^* = 1 - \{[1 - (A_0 + 1)p_b]/[1 -$

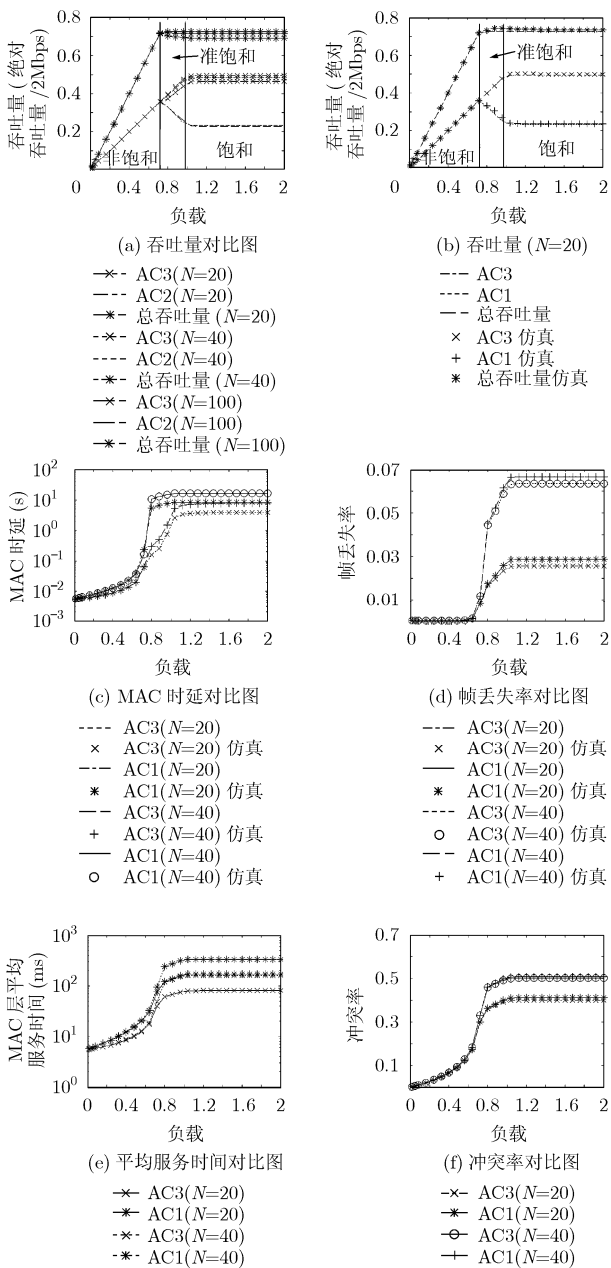


图 3 802.11e EDCA 支持 QoS 的性能

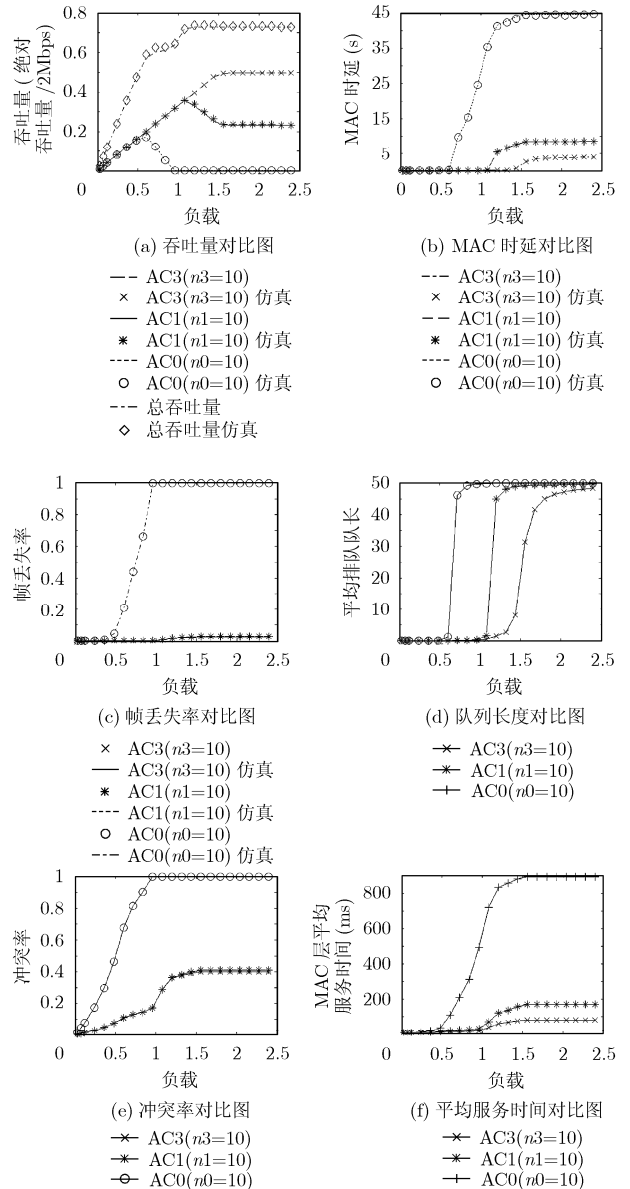


图 4 802.11e EDCA 信道接入的不公平性

$(1 - pI_0)\tau_0\} \leq 1$ 。要使得 AC0 业务不被“饿死”，上式必须成立，有 $p_b \leq \{1/[A_0 + 1]\}_{A_0=5} = 1/6 \approx 0.1667$ 。上式说明将信道忙率控制在 0.1667 以下，AC0 不会被“饿死”。可以看出，随着输入业务负载的增加，低优先级业务被高优先级业务“饿死”是 EDCA 接入机制的特点，因而为了保证信道接入的公平性，应该引入基于 EDCA 的接纳控制机制。

4 结束语

本文利用二维 Markov 链分析方法，提出了一种新的 IEEE 802.11e EDCA 的网络分析模型，该模型引入了空闲状态和 AIFS 区分，并结合 M/G/1/K 排队模型分析了 EDCA 在非饱和和饱和负载下的性能，经过仿真实验结果与理论分析结果的对比表明：新的模型很好地描述了现有的 EDCA 接入方式，特别是引入空闲状态和不同接入等级 AIFS 的使用的影响，如实反映了 EDCA 接入方式的功能。依据模型分析与仿真实验的结果，得出如下结论：(1)EDCA 接入方式在 DCF 的基础上提供业务区分服务，在饱和情况，EDCA 接入方式达不到实时业务严格的 QoS 要求，只为不同接入等级提供 QoS 区分。(2)EDCA 在非饱和状态为实时业务提供严格的 QoS 保证，这是研究 EDCA 接纳控制机制的主要依据。(3)在非饱和情况，各优先级业务的 QoS 性能与网络节点数无关。(4)低优先级业务被高优先级业务“饿死”造成信道接入的不公平性是 EDCA 接入机制的特点。

以上的结论表明：为了保证实时业务的服务质量和信道接入的公平性，有必要提出基于 EDCA 的接纳控制方案，这是后续研究的主要内容。

参考文献

- [1] Wireless LAN Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications, ANSI/IEEE Std.802.11, 1999, ISO/IEC 8802-11: 1999(E).
- [2] IEEE802.11 WG. Draft Supplement to Part II: Wireless Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications: Medium Access Control(MAC) Enhancements for Quality of Service (QoS). IEEE 802.11E/D 13.0, Jan, 2005.
- [3] Bianchi G. Performance analysis of the IEEE802.11 distributed coordination function. *IEEE J. Select. Areas Commun.*, 2000, 18(3): 535-547.
- [4] Xiao Y. Performance analysis of priority schemes for IEEE802.11 and IEEE802.11e wireless LANs. *IEEE Trans. on Wireless Communication*, 2005, 4(4): 1506-1515.
- [5] Xiao Y and Pan Y. Differentiation, QoS guarantee, and optimization for real-time traffic over one-hop Ad hoc networks. *IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems*, 2005, 16(6): 538-549.
- [6] Zhai H, Kwon Y, and Fang Y. Performance analysis of IEEE802.11 MAC protocols in wirelessLans. *Journal of Wireless Communications and Mobile Computing*, 2004, 4: 917-931.
- [7] Duffy K, Malone D, and Leith D J. Modeling the 802.11 distributed coordination function in non-saturated conditions. *IEEE Communications Letters*, 2005, 18(9): 715-717.
- [8] Zheng Y, Lu K, and Fang Y. Performance analysis of IEEE802.11 DCF in binary symmetricchannels. *IEEE GLOBECOM 2005, St Louis, Missouri*, 2005: 112-129.
- [9] Lee W, Wang C, and Sohrby K. On use of traditional M/G/1 model for IEEE 802.11 DCF in unsaturated traffic conditions. *IEEE WCNC2006, Las Vegas, Nevada*, 2006: 1933-1937.
- [10] Choi S, Prado J, Mangold S, and Shanker S. IEEE802.11e contention-based channel access (EDCF) performance evaluation. in *IEEE ICC'03*, 2003, 2: 1151-1156.
- [11] Engelstad P E and Osterbo O N. The delay distribution of IEEE802.11e EDCA and 802.11 DCF. *Proceedings of the Fifth International IEEE Workshop on Wireless Local Networks (WLN'05)*, Sydney, Australia, 2005: 87-96.
- [12] Chen X, Zhai H, and Fang Y. Enhancing the IEEE802.11e in QoS support: analysis and mechanism. *Proc. of the Second International Conference on Quality of Service in Heterogeneous Wired/Wireless Networks(QShine'05)*, Orlando Florida, 2005: 122-134.
- [13] He D and Shen C Q. Simulation study of IEEE802.11e EDCF. *IEEE INFOCOM2003, San Francisco*, 2003: 685-689.

白翔：男，1977年生，博士生，研究方向为无线局域网、无线接入控制。

毛玉明：男，1956年生，教授，博士生导师，主要研究方向为宽带通信网、网络体系结构与协议分析、路由协议与技术、网络管理系统与协议等。