

## QoS 区分的自适应 p-Persistent MAC 算法对信道利用率的动态优化\*

白翔<sup>1+</sup>, 毛玉明<sup>1</sup>, 冷甦鹏<sup>1</sup>, 毛建兵<sup>1</sup>, 谢军<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(电子科技大学 通信与信息工程学院, 四川 成都 610054)

<sup>2</sup>(电子科技大学 宽带光纤传输与通信网技术教育部重点实验室, 四川 成都 610054)

### QoS Differentiation Based Adaptive p-Persistent MAC Scheme for Dynamic Optimization of the Channel Utilization

BAI Xiang<sup>1+</sup>, MAO Yu-Ming<sup>1</sup>, LENG Su-Peng<sup>1</sup>, MAO Jian-Bing<sup>1</sup>, XIE Jun<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(School of Communication and Information Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

<sup>2</sup>(Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission & Communication Networks, Ministry of Education, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

+ Corresponding author: E-mail: bbxx1977@163.com

**Bai X, Mao YM, Leng SP, Mao JB, Xie J. QoS differentiation based adaptive p-persistent MAC scheme for dynamic optimization of the channel utilization. *Journal of Software*, 2009,20(3):608–619. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3239.htm>**

**Abstract:** This paper proposes an adaptive p-persistent MAC scheme, named QDA-MAC (QoS differentiation based adaptive MAC scheme), for WLAN to maximize the channel utilization and provide the service differentiation among different traffic stations. Specifically, different from the previous work, the proposed scheme does not need to estimate the number of active stations for each priority class but still achieves the channel utilization close to its optimal value by exploiting a new parameter, persistent factor, whose optimal value can dynamically follow the change of the load based on a simple estimation of the network status. At the same time, the transmission probability of each priority class can be updated by the optimal persistent factor. Simulation and numerical results show that QDA-MAC can achieve much higher channel utilization and have shorter delay than standard IEEE 802.11 DCF and IEEE 802.11e EDCA in all different WLAN environments.

**Key words:** QoS differentiation; p-persistent; persistent factor; adaptive scheme; transmission attempt

**摘要:** 在无线局域网中提供服务质量(QoS)保证的 MAC 算法应该满足业务区分服务的要求和系统性能的整体最优。以往的此类自适应 MAC 算法依赖于对不同级别的竞争业务数目进行估计,计算过于复杂。提出一种基于 QoS 区分的自适应 p-persistent MAC 算法, QDA-MAC(QoS differentiation based adaptive MAC scheme)。该算法引入了新的参数-坚持因子(persistent factor),其优化值能够实时反映网络负载的变化情况,结合近似优化的自适应方法,每次发送尝试后,该算法不需要估计每类竞争业务的数目,利用坚持因子的优化值实时更新各类优先级业务的发送概率,

\* Supported by the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant Nos.2005AA123820, 2005AA121122 (国家高技术研究发展计划(863))

Received 2007-08-25; Accepted 2007-12-20

调整相应的协议参数,系统的性能也能接近最优.仿真结果验证了该算法不仅能够根据竞争业务数目的变化对系统的性能进行整体优化,而且能够提供业务区分服务,在 QoS 区分的基础上可以为实时业务提供严格的 QoS 保证,尤其在信道利用率和时延等方面明显优于标准的 IEEE 802.11 DCF 和 IEEE 802.11e EDCA 机制.

关键词: QoS 区分;p 坚持;坚持因子;自适应算法;发送尝试

中图分类号: TP393 文献标识码: A

IEEE 802.11 协议<sup>[1]</sup>描述了用于无线局域网(WLAN)的物理层和 MAC 层协议,并得到设备制造厂商的广泛支持.IEEE 802.11 的 MAC 层协议采用基于 CSMA/CA(carrier sense multiple access with collision avoidance)的 DCF(distributed coordination function)机制,其核心思想是:当发现信道上存在冲突时,站点采用二进制指数后退(BEB)方式避免再次冲突.但 DCF 不能提供 QoS 区分,不能满足人们对实时业务的要求.虽然 IEEE 802.11e 的增强分布式控制接入(EDCA)机制<sup>[2]</sup>为 DCF 提供了 QoS 增强,但 EDCA 的协议参数不能随负载情况自适应调整,使得系统性能无法实现最优.在现有的 IEEE 802.11 MAC 机制的基础上提供业务区分服务,同时满足系统性能的整体最优是研究提供服务质量保证的 MAC 算法的主要目标之一.

许多学者利用数学建模的方法分析与优化 IEEE 802.11 协议的相关性能,其中以 Cali 和 Bianchi 的工作最为突出.Cali 在文献[3,4],Bianchi 在文献[5]中,分别对基于 CSMA/CA 的 p-persistent 机制和二进制指数后退机制进行了建模分析.在 Bianchi 的模型基础上,Ziowa<sup>[6]</sup>,Xiao<sup>[7]</sup>等人对相关模型作了进一步的完善工作.尤其是 Xiao 等人扩展了 Bianchi 的模型到多优先级情况,定量研究 IEEE 802.11e EDCA 机制支持 QoS 区分的性能.而 Ge<sup>[7]</sup>则是在 Cali 模型的基础上引入 QoS 区分机制,为不同优先级业务选择不同的发送概率,进一步分析了各类优先级业务流处于非饱和及饱和条件下的协议性能.上述的研究发现,IEEE 802.11 的 MAC 层协议的性能在多级别业务的情况下,随各类业务数目的增加而迅速恶化,协议的相关参数(如 CWmin(minimum contention windows))对协议的性能有着重要影响,固定参数难以保证不同网络负载情况下的协议性能,因此,理想的 CSMA/CA 协议不仅需要采用简单、高效的机制,而且能够依据网络负载情况(例如竞争业务的数目)动态调整不同服务等级业务的协议参数.

对协议参数的自适应调整以提高系统的性能是当前研究<sup>[4,9-12,14]</sup>的热点.然而,自适应调节要判断网络的负载情况,首先需要对系统中竞争业务的数目进行实时测量和估计.尽管理论上将测量估计方法与动态参数调整结合起来可以有效地改善 IEEE 802.11 二进制后退机制的性能.但是,当网络中考虑 QoS 区分、业务级别比较多时,基于对不同级别竞争业务数目进行估计的方法使用相关的信息量大,计算过于复杂,往往并不能适应实际复杂多变的无线网络.

我们在研究中发现,在多级别业务的 WLAN 中,坚持因子(persistent factor)的优化值能够实时反映竞争业务数目的变化情况,在采用近似优化的自适应方法时,可以不需要估计网络中每类优先级业务的数目,利用坚持因子的实时变化对业务的发送概率作实时调整,优化相应的协议参数,系统的性能也能接近最优.这一发现有效地降低了相关算法对系统参数测量与估计的依赖,减少了算法的复杂度.

本文提出了一种基于 QoS 区分的自适应 p-persistent MAC 算法,QDA-MAC(QoS differentiation based adaptive MAC scheme).QDA-MAC 算法与以往此类自适应算法<sup>[4,9,10]</sup>的不同在于,不用估计网络中各级别业务的数目,简化了自适应方法.该算法在每次发送尝试结束后,依据优化条件更新系统的坚持因子,坚持因子的最优值能够实现信道利用率的最优.随后,利用坚持因子求得不同优先级业务发送概率的最优值,实现 QoS 区分.另一方面,QDA-MAC 将具有 QoS 区分的 p-persistent 模型<sup>[8]</sup>与 Markov 模型<sup>[7]</sup>相结合,利用各类优先级业务发送概率的动态变化来达到实时调整各类业务最小后退竞争窗的目的.

利用 NS-2<sup>[16]</sup>,本文对这一新的自适应 MAC 算法在各种场景下进行了大量的仿真实验,相关的实验结果验证了新的算法不仅简单,适用于复杂多变的无线网络,而且能够最优化信道利用率,提供业务区分服务.尤其在信道利用率、时延以及帧丢失率等方面明显优于标准的 IEEE 802.11 DCF 和 IEEE 802.11e EDCA 机制.同时,我们在仿真实验中还发现,QDA-MAC 算法在 QoS 区分的基础上可以为高级别业务(实时业务)提供严格的 QoS

保证,其性能明显优于 IEEE 802.11e EDCA 机制。

## 1 相关的 p-persistent 模型与自适应 p-persistent MAC 算法

现有的相关研究都指出,对 IEEE 802.11 的二进制指数后退机制动态调整能够提高信道利用率.特别是将基于 CSMA/CA 的 p-persistent 机制<sup>[3,4]</sup>引入对协议的性能优化,使得信道利用率达到最优.基于 p-persistent 机制的 IEEE 802.11 协议,不同于标准的 802.11 协议在于后退间隔的选取.标准的 802.11 协议采用二进制指数后退算法,而 p-persistent 802.11 协议的后退间隔以参数为  $p$  的几何分布采样,即站点在一个确定的后退间隔时隙内以概率  $p$  发送数据,否则以  $(1-p)$  的概率延迟.文献[3]的研究指出,只要使用相同的平均后退窗,基于 p-persistent 机制的 IEEE 802.11 协议与标准的 802.11 协议在信道利用率方面具有相同的性能.换句话说,达到最优信道利用率的最优化  $p$  值对应于标准 802.11 协议中的最优化初始后退窗值。

基于 QoS 区分的基本 p-persistent 模型<sup>[8,9]</sup>采用如下假定:1) 各类业务流的发送速率相同,优先级不同;2) 采用饱和流;3) 理想信道;4) 仅针对 DCF 的基本数据发送模式,其方法同样适用于 RTS/CTS 模式;5) 无隐藏终端;6) 每类业务的发送过程相互独立,且所有同级别业务的发送概率相同。

文献[2]定义了 WLAN 的信道利用率  $\rho_u$ ,文献[7]对文献[2]的定义进行了多优先级扩展,如式(1)所示:

$$\rho_u = \frac{E[L]}{E[T_v]} = \sum_{i=0}^{M-1} \rho_i = \sum_{i=0}^{M-1} \frac{E[L_i]P_{pkt}(i)}{E[T_v]} \quad (1)$$

式(1)中,  $E[T_v]$  表示平均虚拟发送时间,即两次连续的成功传输之间的平均时间间隔.  $E[L_i]$  表示第  $i$  类业务平均的数据帧长度;  $P_{pkt}(i)$  表示第  $i$  类业务在虚拟发送时间段内成功发送的概率;  $M$  为业务级别数目;  $\rho_i$  为第  $i$  类业务信道利用率的累计和.如图 1 所示,1 次虚拟发送时间段都要经历空闲时间、发送成功的时间和发生冲突的持续时间.设两次连续发送尝试之间的空闲时间间隔为  $I_i$ ,冲突持续时间为  $coll_i$ ,由文献[3]可知,  $E[T_v]$  可以表示为

$$E[T_v] = E\left[\sum_{i=1}^{N_c} I_i + coll_i\right] + E[Idle] + E[s] = E[N_c]E[T_c]_{collision} + (E[N_c] + 1)E[Idle] + E[s] \quad (2)$$

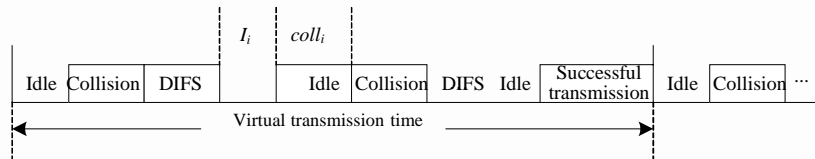


Fig.1 Virtual transmission time

图 1 虚拟发送时间段

式(2)中,  $E[s]$  表示 1 次成功传输的持续时间,有:  $E[s] = E[L] + SIFS + ACK + DIFS$ .  $E[N_c]$  表示在 1 次虚拟发送时间段内的平均冲突次数;  $E[T_c]_{collision}$  表示 1 次冲突的平均持续时间,由发生冲突的数据帧最大帧长决定,则  $E[T_c]$  为在虚拟发送时间段内平均冲突持续时间,有:  $E[T_c] = E[T_c]_{collision} \left[ \frac{E[N_c]}{E[N_c] + 1} \right]$ ,  $E[Idle]$  为平均的空闲持续时间.在平均数据帧长已知的情况下,平均虚拟发送时间的最小值  $\min(E[T_v])$  能够决定最大信道利用率  $\max(\rho_u)$ ,而  $E[T_v]$  是竞争业务发送概率的函数,因此,各类业务的发送概率适当取值可以优化信道利用率.设每个优先级业务的个数为  $N_i (i=0, 1, \dots, M-1, M$  为级别数目),第  $i$  类业务的发送概率为  $p_i$ ,文献[8]推导了  $E[N_c]$  与  $E[Idle]$  的表达式:

$$E[N_c] = \frac{1 - \prod_{i=0}^{M-1} (1 - p_i)^{N_i}}{\sum_{i=0}^{M-1} N_i p_i (1 - p_i)^{N_i - 1} \prod_{j=0, j \neq i}^{M-1} (1 - p_j)^{N_j}} \quad (3)$$

$$E[Idle] = \frac{\prod_{i=0}^{M-1} (1 - p_i)^{N_i}}{1 - \prod_{i=0}^{M-1} (1 - p_i)^{N_i}} \cdot m \quad (4)$$

式(4)中,  $m$  为空闲的时隙时间.为了实现不同优先级业务的 QoS 区分,文献[8]中定义了单个  $i$  类业务与  $j$  类

业务信道利用率的比值  $\overline{r_{i,j}}$  :

$$\overline{r_{i,j}} = \frac{\rho_i/N_i}{\rho_j/N_j} = \frac{E[L_i]}{E[L_j]} \cdot \frac{p_i(1-p_j)}{p_j(1-p_i)} \quad (5)$$

文献[8]对式(2)中的各个子项的数学表达式都作了推导,且提出的模型使得每个优先级业务发送概率的最优值不仅满足式(5),而且能够使得  $E[T_c]$  最小,保证了最大的信道利用率.但文献[7]的算法不具有自适应功能.另一方面,文献[3,4,12]研究的算法通过对网络的实时测量与自适应调节相结合,动态调整站点的发送概率,从而提供最大的信道利用率.但这些自适应算法没有提供 QoS 区分,网络中所有站点的发送概率相同.文献[4,9,10]中的自适应算法都需要实时估计变化的业务数目,带来计算过于复杂等问题.本文提出的自适应 p-persistent MAC 算法,不仅能够优化信道利用率,提供不同级别业务的 QoS 区分,而且由于不用估计网络中各优先级业务的数目,使得该算法与文献[9,10]的自适应算法相比更加简单,更易于在实际中被直接采用.

## 2 基于 QoS 区分的自适应 p-persistent MAC 算法——QDA-MAC

### 2.1 近似优化条件

无线局域网中,各类优先级业务的数目可能实时动态变化,为了达到最大信道利用率和提供 QoS 区分,每类业务的发送概率应该随着网络状态的变化作自适应调整.式(2)中,  $E[T_c]$  的最小值对应于最大的信道利用率,利用式(2)和式(5),可同时求解各类优先级业务最优的发送概率,然而,求解最优概率的数学表达式异常复杂.文献[4]的研究指出,当虚拟发送时间段内的平均空闲时间等于平均冲突持续时间时,信道利用率仍然接近最优,文献[4]给出了近似优化公式:

$$E[T_c]_{collision} \cdot E[N_c] = (E[N_c] + 1) \cdot E[Idle] \Rightarrow E[T_c] = E[Idle] \quad (6)$$

式(6)提供了一个为达到最大信道利用率而系统必须时时满足的条件.  $E[T_c]$  和  $E[Idle]$  是各类业务发送概率的函数,因此满足式(6)即存在各类业务发送概率的最优值.

### 2.2 坚持因子

**定义 1.** 坚持因子  $p^*$ : 在单级别业务的 WLAN 中,每个业务的发送概率相同且都等于坚持因子;而在具有多级别业务的网络中,坚持因子是各类业务发送概率的函数,即:

$$p^* = P(p_0, p_1, \dots, p_{M-1}) = \sum_{i=0}^{M-1} p_i - \sum_{i,j=0, j>i}^{M-1} p_i p_j + \sum_{i,j,k=0, k>j>i}^{M-1} p_i p_j p_k - \dots \quad (7)$$

式中  $p_i (0 \leq i \leq M-1)$  为第  $i$  类业务的发送概率.

令  $f$  表示在 1 个确定时隙内信道空闲的概率,有:

$$f(p_0, p_1, \dots, p_{M-1}) = \prod_{i=0}^{M-1} (1 - p_i)^{N_i} \quad (8)$$

利用麦克劳林公式(Maclaurin formula)  $f$  的近似表达式为

$$f(p_0, p_1, \dots, p_{M-1}) \approx 1 - \frac{\sum_{i=0}^{M-1} N_i}{M} \left( \sum_{i=0}^{M-1} p_i - \sum_{i,j=0, j>i}^{M-1} p_i p_j + \sum_{i,j,k=0, k>j>i}^{M-1} p_i p_j p_k - \dots \right) \quad (9)$$

将式(9)代入式(4)中,  $E[Idle]$  的近似表达式可以表示为

$$E[Idle] \approx \frac{1 - \frac{1}{M} \left( \sum_{i=0}^{M-1} N_i \right) \cdot p^*}{\frac{1}{M} \left( \sum_{i=0}^{M-1} N_i \right) \cdot p^*} \cdot m \quad (10)$$

式(10)中,  $p^*$  为坚持因子.采用与文献[13]中相同的假定,当网络的信道利用率接近最优时,冲突只可能在两个竞争业务之间发生,有  $E[T_c]_{collision} = \max\{L_1, L_2\} = l$ , 式中  $L_i$  为第  $i$  类业务的帧长,则  $E[T_c]$  可以表示为

$$E[T_c] = l \cdot \frac{E[N_c]}{E[N_c] + 1} \approx l \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{M} \left( \sum_{i=0}^{M-1} N_i \right) \cdot p^* \quad (11)$$

为了满足优化条件  $E[T_c]=E[Idle]$ ,式(10)和式(11)可以给出坚持因子的优化值,利用优化的坚持因子可以推导每类优先级业务发送概率的优化值.为了验证式(9)近似方法的误差,我们考虑 2 个优先级业务,得到:

$$f(p_0, p_1) = (1 - p_0)^{N_0} (1 - p_1)^{N_1} \approx 1 - \frac{N_0 + N_1}{2} (p_0 + p_1 - p_0 p_1), p_0 > p_1.$$

通过选择不同的  $N_0$  和  $N_1$ ,分别计算利用近似方法得出的  $f\{p_0, p_1\}$  和  $E[T_c]$ (数值计算式(10)和式(11))与准确值(数值计算式(3)和式(4))之间的相对误差.当选择优先级业务数目较少时,如  $N_0=N_1=5$ ,图 2 显示出  $f\{p_0, p_1\}$  和  $E[T_c]$  与准确值之间的相对误差远远小于 1%.当业务数目较大时,利用优化公式(6)可以得出  $p_0$  接近 0.001,我们在图 3 中选择  $N_0=15, N_1=35, f\{p_0, p_1\}$  和  $E[T_c]$  与准确值之间的相对误差仍然小于 1%.在级别数大于 2 的情况下,同样方法可以验证式(9)近似方法的有效性.

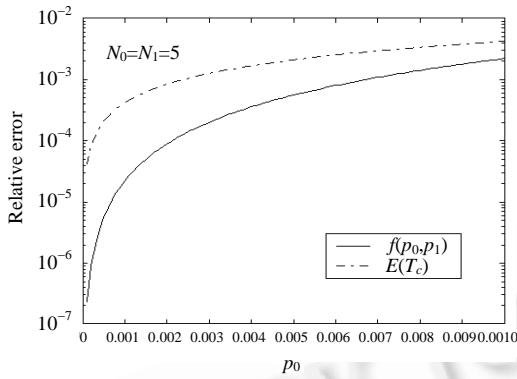


Fig.2 Relative error between  $f\{p_0, p_1\}$  and  $E[T_c]$  ( $N_0=N_1=5$ )

图 2  $f\{p_0, p_1\}, E[T_c]$  的相对误差( $N_0=N_1=5$ )

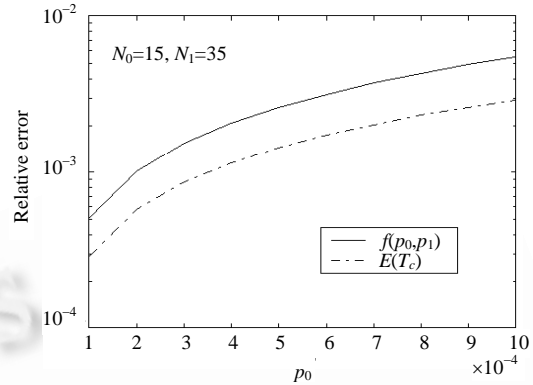


Fig.3 Relative error between  $f\{p_0, p_1\}$  and  $E[T_c]$  ( $N_0=15, N_1=35$ )

图 3  $f\{p_0, p_1\}, E[T_c]$  的相对误差( $N_0=15, N_1=35$ )

### 2.3 自适应方法

为使系统能够实时满足优化条件(6),需要在每个发送尝试结束后依据网络负载情况更新  $E[Idle]$  和  $E[T_c]$  的值.如图 4 所示,1 次发送尝试(导致 1 次成功发送或者 1 次冲突)紧跟着 1 段空闲时间,每次发送尝试结束后,可以实时测量冲突持续时间  $T_c$  和空闲时间  $Idle$ .如果发送成功,则  $T_c=0$ .

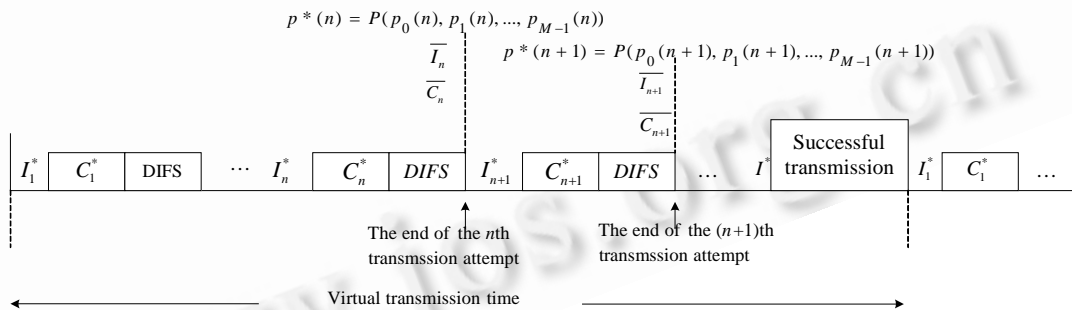


Fig.4 Adaptive method during transmission attempt

图 4 发送尝试中的自适应方法

图 4 显示了 1 个虚拟发送时间段,其中第  $(n+1)$  次发送尝试的时间段内的相关标识如下定义:

$I_{n+1}^*$ :空闲持续时间;  $C_{n+1}^*$ :冲突持续时间;  $p_i(n+1)$ :第  $i$  类业务发送概率的优化值,  $0 \leq i \leq M-1$ ;  $p^*(n+1)$ :第  $(n+1)$  次发送尝试结束后坚持因子优化值,  $p^*(n+1) = P(p_0(n+1), p_1(n+1), \dots, p_{M-1}(n+1))$ ;  $\bar{I}_{n+1}$ :虚拟发送时间段内的平均空闲时间;  $\bar{C}_{n+1}$ :虚拟发送时间段内的平均冲突持续时间.

在每次发送尝试结束后,平均空闲时间和平均冲突持续时间的更新可以表示为

$$\overline{I_{n+1}} = \alpha \overline{I_n} + (1-\alpha) I_{n+1}^* \quad (12)$$

$$\overline{C_{n+1}} = \alpha \overline{C_n} + (1-\alpha) C_{n+1}^* \quad (13)$$

式(12)中,  $\alpha$ 为平滑因子,  $\alpha$ 的取值直接影响算法的自适应性能.

假定在第  $n$  次发送尝试的时间段内, 负载变化, 系统不满足式(6)的优化条件, 即  $\overline{I_n} \neq \overline{C_n}$ . 自适应算法的目的则是依据网络负载的变化情况重新计算坚持因子的优化值, 使得在第  $(n+1)$ 次发送尝试的时间段内系统性能重新达到最优. 显然, 由式(10)和式(11)可以看出,  $E[Idle]$ 是  $p^*$ 的递减函数,  $E[T_c]$ 是  $p^*$ 的递增函数. 如果  $\overline{I_n} > \overline{C_n}$ , 则需要增加  $p^*$ 的值, 否则减少  $p^*$ 的值. 令每次发送尝试结束后更新的坚持因子为  $p_{temp}^*$ , 引理 1 给出了  $p_{temp}^*$ 的计算方法.

**引理 1.** 在第  $(n+1)$ 次发送尝试结束后, 坚持因子  $p_{temp}^*$  的更新值可以表示为

$$p_{temp}^* = \frac{\sqrt{4\overline{C_{n+1}}(\overline{I_{n+1}} + m) + m^2} - m}{2\overline{C_{n+1}}} \cdot p^*(n) \quad (14)$$

式中  $m$  为空闲的时隙时间,  $p^*(n)$  为第  $n$  次发送尝试时间段内满足优化条件的坚持因子.

证明: 令  $\frac{1}{M} \left( \sum_{i=0}^{M-1} N_i \right) \cdot p_{temp}^* = x$ , 其中  $\frac{1}{M} \left( \sum_{i=0}^{M-1} N_i \right) = A$ .

设第  $(n+1)$ 次发送尝试的时间段内,  $\overline{I_{n+1}} \neq \overline{C_{n+1}}$ , 利用优化公式可得:

$$\frac{l}{2m} x^2 + x - 1 = 0.$$

解一元二次方程, 有:

$$x = \frac{-1 + \sqrt{1 + \frac{2l}{m}}}{l/m} \Rightarrow p_{temp}^* = \frac{-1 + \sqrt{1 + \frac{2l}{m}}}{Al/m} \quad (15)$$

由式(11)可以推导出:

$$\overline{C_n} = l \cdot \frac{Ap_n^*}{2} \Rightarrow l = \frac{2\overline{C_n}}{Ap_n^*} \quad (16)$$

由式(10)可以推导出:

$$\overline{I_n} = \frac{1 - Ap_n^*}{Ap_n^*} \Rightarrow Ap_n^* = \frac{m}{\overline{I_n} + m} \quad (17)$$

将式(16)和式(17)代入式(15), 可得:  $p_{temp}^* = \frac{\sqrt{4\overline{C_{n+1}}(\overline{I_{n+1}} + m) + m^2} - m}{2\overline{C_{n+1}}} \cdot p^*(n)$ .  $\square$

从引理 1 可以看出, 在第  $(n+1)$ 次发送尝试的时间段内, 如果网络负载没有发生变化, 即  $\overline{I_{n+1}} = \overline{C_{n+1}}$ , 则  $p_{temp}^* = p^*(n)$ . 如果网络负载的变化导致  $\overline{I_{n+1}} \neq \overline{C_{n+1}}$ , 则  $p_{temp}^*$  可以根据  $p^*(n)$  作自适应调整. 由于实时变化的  $\overline{I_{n+1}}$  和  $\overline{C_{n+1}}$  能对坚持因子  $p_{temp}^*$  的优化值更新, 因此  $p_{temp}^*$  能够反映出网络负载的变化情况, 无须估计各类优先级业务的数目, 简化了自适应算法. 同理, 利用平滑因子, 第  $(n+1)$ 次发送尝试时间段内的坚持因子优化值为

$$p^*(n+1) = \alpha p^*(n) + (1-\alpha) p_{temp}^* \quad (18)$$

为了验证多级业务系统中利用坚持因子而实现的 QDA-MAC 自适应方法, 我们考虑两个优先级业务, 高优先级业务的发送概率为  $p_0$ , 低级别业务的发送概率为  $p_1$ , 有  $p_0 > p_1$ . 初始状态设置  $N_0 = N_1 = 10$ , 逐步增加  $N_0$  的值到 90, 比较 QDA-MAC 的信道利用率  $\rho_u^*$  与准确值  $\rho_{num}$  (可通过数值计算式(1)得出) 之间的相对误差, 以及比较由自适应方法得出的  $p_{temp}^*$  与利用数值计算得出的准确值  $p_{num}^*$  之间的误差. QDA-MAC 自适应方法的验证过程如下: 初始状态为  $N_0 = N_1 = 10$ , 此时的坚持因子为  $p_0^*$ . 增加  $N_0$  到 20, 由引理 1, 以初态的坚持因子  $p_0^*$  计算此时的  $p_{temp}^*$ , 再分别计算此时的  $p_0$  和  $p_1$ , 求得信道利用率为  $\rho_u^*$ . 而准确值  $\rho_{num}$  的计算方法为直接将  $N_0 = 20, N_1 = 10$  代入式(1)

求得.从表1可以看出,  $p_{temp}^*$  和  $p_{num}^*$  的误差平均在 0.0004 左右,而对应的信道利用率的相对误差则远远小于 1%.因此,QDA-MAC 算法将引入的坚持因子与近似优化的自适应方法相结合,仍然能够使系统的性能接近最优,而且避免了对每类优先级业务数目的测量与估计.

**Table 1**  $p_{temp}^*$ ,  $p_{num}^*$  by using QDA-MAC adaptive method and numerically exact value  $p_{num}^*$ ,  $\rho_{num}$

**表 1** QDA-MAC 自适应方法的  $p_{temp}^*$ ,  $\rho_u^*$  与数值计算准确值  $p_{num}^*$ ,  $\rho_{num}$  的比较

$N_0=10$	$N_1=10$	QDA-MAC				Numerically exact values				Relative error ( $\rho_{num} - \rho_u^*$ )/ $\rho_{num}$
		$p_{temp}^*$	$p_0$	$p_1$	$\rho_u^*$	$p_{num}^*$	$\rho_{num}$	$p_{num-1}$	$\rho_{num}$	
20	10	0.0059	0.0039	0.0020	0.8002	0.0056	0.0037	0.0019	0.8003	1.2495e-4
30	10	0.0045	0.0030	0.0015	0.7993	0.0040	0.0027	0.0013	0.8000	8.7500e-4
40	10	0.0036	0.0024	0.0012	0.7988	0.0031	0.0021	0.0010	0.7997	1.1254e-3
50	10	0.0030	0.0020	0.0010	0.7984	0.0025	0.0017	8.50e-4	0.7996	1.5008e-3
60	10	0.0025	0.0017	8.34e-4	0.7982	0.0021	0.0014	7.13e-4	0.7995	1.6260e-3
70	10	0.0022	0.0015	7.34e-4	0.7979	0.0019	0.0012	6.16e-4	0.7995	2.0012e-3
80	10	0.0020	0.0013	6.67e-4	0.7981	0.0016	0.0011	5.37e-4	0.7994	1.6262e-3
90	10	0.0018	0.0012	6.00e-4	0.7975	0.0014	9.67e-4	4.79e-4	0.7994	2.3768e-3

#### 2.4 第*i*类业务发送概率 $p_i(n+1)$ 的数值求解与最小后退竞争窗 $CW \min(i)(n+1)$ 方法

本文借鉴文献[9]中的数值计算方法来求解  $p_i(n+1)$ .然而,我们对其中一些参数的理解和使用与文献[9]不同,以下重新给出解释和经过验证的数值求解方法.在第 $(n+1)$ 次发送尝试的时间段内坚持因子与各类优先级业务的发送概率之间的关系可以表示为

$$\left( \sum_{i=0}^{M-1} p_i(n+1) - \sum_{\substack{i,j=0 \\ j>i}}^{M-1} p_i(n+1)p_j(n+1) + \sum_{\substack{i,j,k=0 \\ k>j>i}}^{M-1} p_i(n+1)p_j(n+1)p_k(n+1) - \dots \right) = p \times (n+1) \quad (19)$$

由于 QDA-MAC 算法不用估计各类业务的数目,因此利用式(5)可以得到:

$$r_{i,j} = \frac{\rho_i/N_i}{\rho_j/N_j} = \frac{E[L_i]}{E[L_j]} \cdot \frac{p_i(n+1)(1-p_j(n+1))}{p_j(1-p_i(n+1))} \quad (20)$$

式(20)给出了单个  $i$  类业务与  $j$  类业务信道利用率的比值.式(19)和式(20)同时满足就能够达到信道利用率的最优化和业务区分服务的要求.因此, $p_i(n+1)$ 的数值求解方法如下( $M=2$ ,其方法同样适用于  $M>2$  的情况),在第 $(t+1)$ 次迭代时:

- 1)  $p_0(t+1) = p_0(t)$ ,  $p_{\min}=0$  且  $p_{\max}=1$ ;
- 2) 利用式(20)计算  $p_1(t+1)$ ;
- 3) 比较式(19)的左边  $L$  和右边  $R$  的值,如果 $(L-R)$ 的绝对值小于 0.001,则停止迭代,否则:

IF( $L>R$ )

$$\{ p'_{\min} = p_0(t+1); p_0(t+1) = \frac{1}{2}[p_0(t+1) + p_{\max}]; p_{\min} = \max(p'_{\min}, p_{\min}) \}$$

ELSE

$$\{ p'_{\max} = p_0(t+1); p_0(t+1) = \frac{1}{2}[p_0(t+1) + p_{\min}]; p_{\max} = \max(p'_{\max}, p_{\max}) \}$$

END IF. Go to 2).

文献[15]分析了基于 IEEE 802.11 DCF 的  $p$ -persistent 模型与 Markov 模型之间的关系.虽然未考虑业务区分,但基于文献[15]的分析不难证明,在多级业务情况下,Ge 的  $p$ -persistent 模型<sup>[8]</sup>与 Xiao 的 Markov 模型<sup>[7]</sup>之间的对应关系仍然成立.受篇幅所限,本文未给出由  $p_i(n+1)$ 到  $CW \min(i)(n+1)$ 的详细推导过程,只定性地指出它们之间存在对应关系:  $p_i(n+1) \rightarrow CW \min(i)(n+1)$ .

#### 2.5 QDA-MAC算法的工作流程

综上,QDA-MAC 算法的具体工作过程如下:

$p^*(n)$ :第  $n$  次发送尝试时间段内坚持因子的最优值,  $p \times(n) = P(p_0(n), p_1(n), \dots, p_{M-1}(n))$ ;

开始:

- 1)  $I_{n+1}^*$ :虚拟发送时间段中第 $(n+1)$ 次发送尝试内的空闲时间;
- 2)  $C_{n+1}^*$ :虚拟发送时间段中第 $(n+1)$ 次发送尝试内的冲突持续时间;
- 3)  $\overline{I_{n+1}} = \alpha \overline{I_n} + (1-\alpha)I_{n+1}^*$ ;
- 4)  $\overline{C_{n+1}} = \alpha \overline{C_n} + (1-\alpha)C_{n+1}^*$ ;
- 5)  $p_{temp}^* = \frac{\sqrt{4\overline{C_{n+1}}(\overline{I_{n+1}} + m) + m^2} - m}{2\overline{C_{n+1}}} \cdot p \times(n)$ ;
- 6)  $p \times(n+1) = \alpha p \times(n) + (1-\alpha)p_{temp}^*$ ;
- 7) 利用  $M$  个方程和数值迭代的方法求解  $p_i(n+1)$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=0}^{M-1} p_i(n+1) - \sum_{\substack{i,j=0 \\ j>i}}^{M-1} p_i(n+1)p_j(n+1) + \sum_{\substack{i,j,k=0 \\ k>j>i}}^{M-1} p_i(n+1)p_j(n+1)p_k(n+1) - \dots = p \times(n+1) \\ r_{i,j} = \frac{\rho_i/N_i}{\rho_j/N_j} = \frac{E[m_i]}{E[m_j]} \cdot \frac{p_i(n+1)(1-p_j(n+1))}{p_j(n+1)(1-p_i(n+1))} \end{array} \right. ;$$

- 8) 利用 p-persistent 模型与 Markov 模型的对应关系求解每次发送尝试后第  $i$  类业务的最小后退竞争窗  $CW \min(i): p_i(n+1) \rightarrow CW \min(i)(n+1)$ .

### 3 QDA-MAC 算法的性能评估

为了对 QDA-MAC 算法的实际性能有充分的了解,本文使用 NS-2 对它在各种场景下的系统性能进行了仿真.每个节点采用基本的 IEEE 802.11 DCF 模式.仿真中使用的系统参数完全遵从 IEEE 802.11 标准<sup>[1]</sup>,见表 2.同时假定是理想信道,且不存在隐藏终端,即网络拓扑属于单跳 Ad Hoc 网络.

**Table 2** IEEE 802.11 configuration parameters

**表 2** IEEE 802.11 配置参数

Data rate	PLCP data rate	Slot time	SIFS	DIFS	RTS	CTS,ACK	Phy header	MAC header	Packet size
2Mbps	1Mbps	20 $\mu$ s	10 $\mu$ s	50 $\mu$ s	160bits+ 192bits	112bits+ 192bits	192bits	224bits	8000bits+ 192bits+224bits

为了简单说明问题,仿真场景中只存在 2 种优先级业务,每个节点可以发送实时业务(real-time)或者尽力而为业务(best-effort).实时业务用 AC3(access category)表示,用 AC0 表示尽力而为业务.设置单个 AC3 业务和 AC0 业务信道利用率比值 2.0.各类优先级业务使用相同的发送速率持续发送固定帧长的饱和数据流直至仿真结束.

#### 3.1 仿真场景的说明

仿真场景 1:验证 QDA-MAC 算法的自适应性能.在一个单位区域内,设置 AC3 和 AC0 业务的数目为  $N_3=N_0=10$ .当仿真时间持续到 20s 时,增加 AC3 数目到 20,运行仿真到 40s 结束.然后,统计该场景下信道利用率的变化情况,以及参数设置对该算法自适应性能的影响.

仿真场景 2:验证网络中优先级业务数目变化对 QDA-MAC 算法的影响,以及该算法提供 QoS 区分和严格 QoS 保证的性能.采用固定帧长为 1 000bytes,发送速率为 1Mbps 的背景业务流.单位区域内各级别业务数目从 2( $N_3=N_0=2$ )增加到 50( $N_3=N_0=50$ ),分别统计系统的信道利用率、冲突率、帧丢失率以及平均时延等性能,并与标准的 IEEE 802.11 DCF 机制(设置  $CW \min(AC3)=CW \min(AC0)=32$ ),IEEE 802.11e EDCA 机制(设置  $CW \min(AC3)=16, CW \min(AC0)=64$ )在相同场景下的性能进行分析与比较.

仿真场景 3:验证帧长的变化对 QDA-MAC 算法的影响.在一个单位区域内,分别设置 40( $N_3=N_0=20$ )和 160( $N_3=N_0=80$ )个节点,统计帧长从 2.5(slots)增加到 200(slots)过程中,信道利用率、平均时延的变化情况,同样与



标准的 DCF 和 EDCA 机制(相应的参数设置与场景 2 相同)在相同场景下的性能进行分析与比较.

### 3.2 仿真结果的分析与说明

图 5 是利用仿真场景 1 得到的系统性能随仿真时间变化的曲线图,并将仿真结果与数值计算结果作比较.图 5(a)中的不同级别业务信道利用率曲线是相同类业务流信道利用率的累计和.仿真的前 20 秒, $N_3=N_0=10$ ,两类优先级业务的信道利用率比值接近 2.20 秒后,AC3 的数目增加到 20,低优先级业务 AC0 牺牲了部分占用的带宽,降低了信道利用率,而由于 AC3 数目的增加,其信道利用率的累计和增加,如图 5(a)所示.然而,单个 AC3 和 AC0 业务流信道利用率的比值仍为 2 左右,与理论值相同,如图 5(b)所示. $(N_3p_3+N_0p_0)$ 在优化条件下始终接近 0.094,可以在表 1 中验证.因此,我们利用 $(N_3p_3+N_0p_0)$ 的变化情况来捕捉 QDA-MAC 算法的自适应过程.图 5(c)显示出,当平滑因子 $\alpha=0.9$ 时,算法的自适应时间为 0.9 秒.选择 $\alpha=0.99$ 时,算法的自适应时间接近 3 秒,因此,平滑因子的选取对算法的自适应性能产生了重要影响.实际应用中选择 $\alpha=0.9$ ,能够达到较为理想的效果.

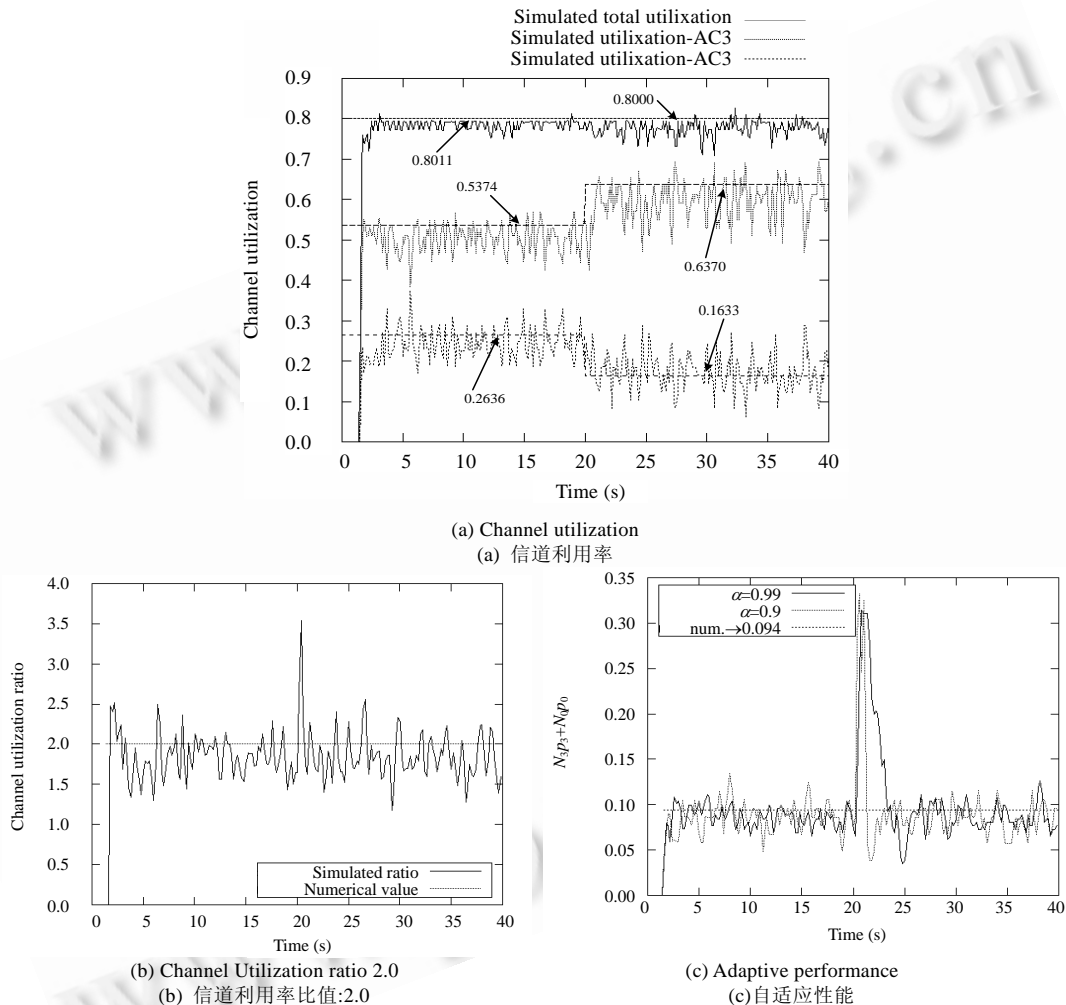


Fig.5 Adaptive performance of QDA-MAC scheme

图 5 QDA-MAC 算法的自适应性能

图 6 是利用场景 2 得到的 QDA-MAC 算法以及标准的 DCF 和 EDCA 机制的信道利用率、冲突率、帧丢失率和平均时延迟.图 6 显示出由于 QDA-MAC 使用了自适应方法,因此,时时满足最优的信道利用率,且不受业务数目的影响,同时,冲突率、帧丢失率和时延等性能都优于基本的 DCF,EDCA 机制.尤其是当实时业务的时延限制为 200ms 时,系统中接入 AC3 业务的数目可以达到 30 个,而且为了保证相同的时延限制,利用 EDCA 和

DCF 机制只能分别接入 16 个和 11 个 AC3 业务,如图 6(d)所示.因此,从仿真结果可以看出,QDA-MAC 算法不仅为不同优先级业务提供了 QoS 区分,而且在提供严格 QoS 保证方面也大大优于 DCF 和 EDCA 机制.

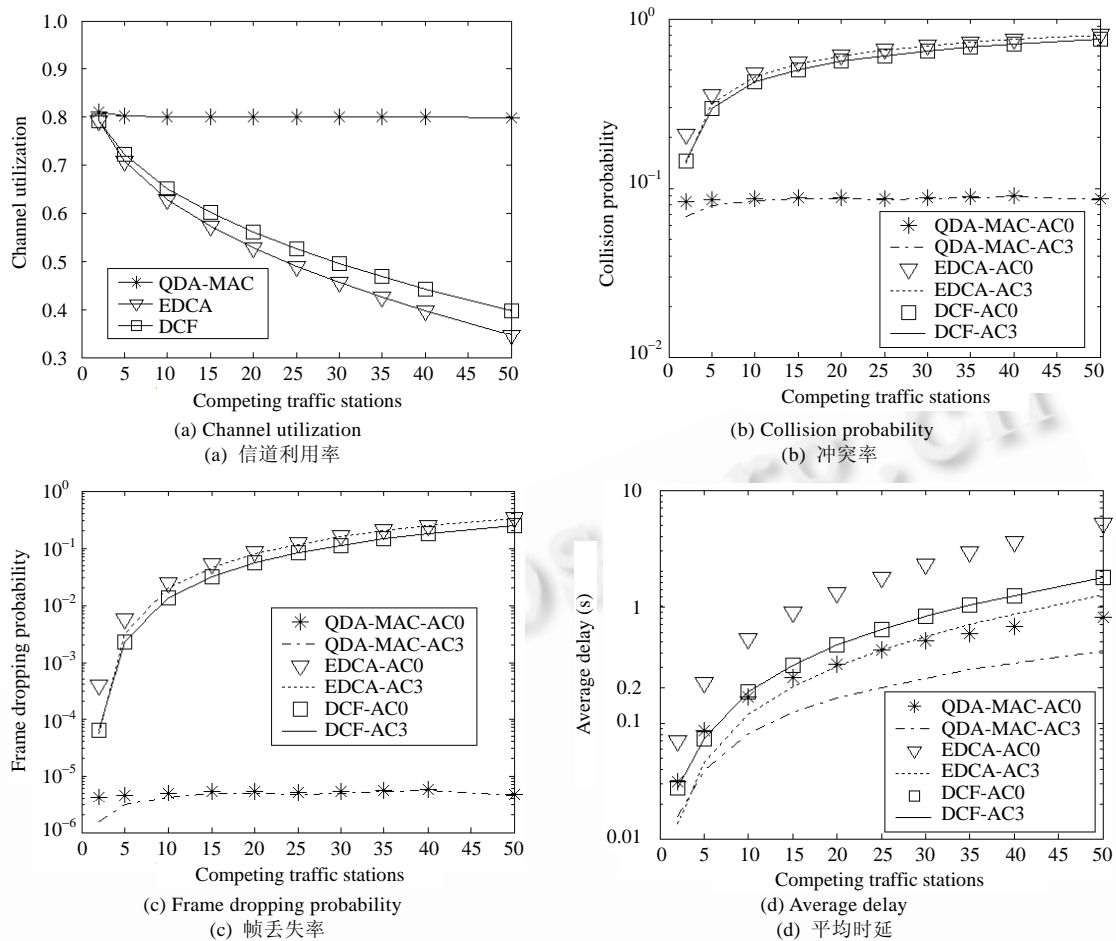


Fig.6 System performance with different number of traffic

图 6 随业务数目变化的系统性能曲线

从图 6 中我们还观察到,QDA-MAC 算法的冲突率和帧丢失率几乎不受业务数目变化的影响,而平均时延则随着负载的增加而增加.这是因为,在网络过载的情况下,QDA-MAC 算法为每类业务选择较小的发送概率才能保证信道利用率的最优,这样,每个帧经历了较长的服务时间,但是仍然能够维持较小的冲突率和帧丢失率.

图 7 是利用场景 3 得到的不同帧长对系统性能的影响.仿真结果不仅验证了 QDA-MAC 算法能够根据帧长的变化对系统性能进行整体优化,在信道利用率和平均时延等方面明显优于标准的 DCF 和 EDCA 机制,而且也证实了 QDA-MAC 算法能够广泛适用于不同帧长的实际系统中.

在  $N_3=N_0=20$  的情况下,表 3 列出了随帧长变化的 AC3 和 AC0 的最小后退竞争窗值.由于 QDA-MAC 算法利用了 p-persistent 模型与 Markov 模型的对应关系<sup>[15]</sup>,这样最优化的  $p_i$  值能够对第  $i$  类业务的初始竞争窗实时更新,因此,QDA-MAC 算法不仅适用于基本的 p-persistent 机制的 IEEE 802.11 协议,同时也适用于基本的二进制后退机制的标准 IEEE 802.11 协议,在实际中能够被直接采用.

#### 4 结论

尽管将测量估计方法与动态参数调整结合起来可以有效地改善 IEEE 802.11 DCF 的性能,然而以往的此类

基于 QoS 区分的自适应算法依赖于对不同级别的竞争业务数目进行估计,当业务级别比较多时,计算过于复杂,自适应算法就难以使用在复杂多变的无线网络中.根据研究发现,本文首次在系统中引入了坚持因子,结合近似优化的自适应方法来避免以往算法中对竞争业务数目的测量与估计,并结合相关的理论模型提出了一个基于 QoS 区分的自适应 p-persistent MAC 算法——QDA-MAC.相关的实验结果验证了新算法不仅简单,适用于复杂多变的无线网络,而且能够优化信道利用率,为不同优先级业务提供 QoS 区分,在信道利用率和时延等方面明显优于标准的 DCF 和 EDCA 机制,同时从实验结果还观察到,在业务流饱和条件下,QDA-MAC 提供严格 QoS 保证的性能明显优于 EDCA 机制.进一步需要研究的是,QDA-MAC 算法在非饱和流、隐藏终端和变速率等条件下的优化方法.

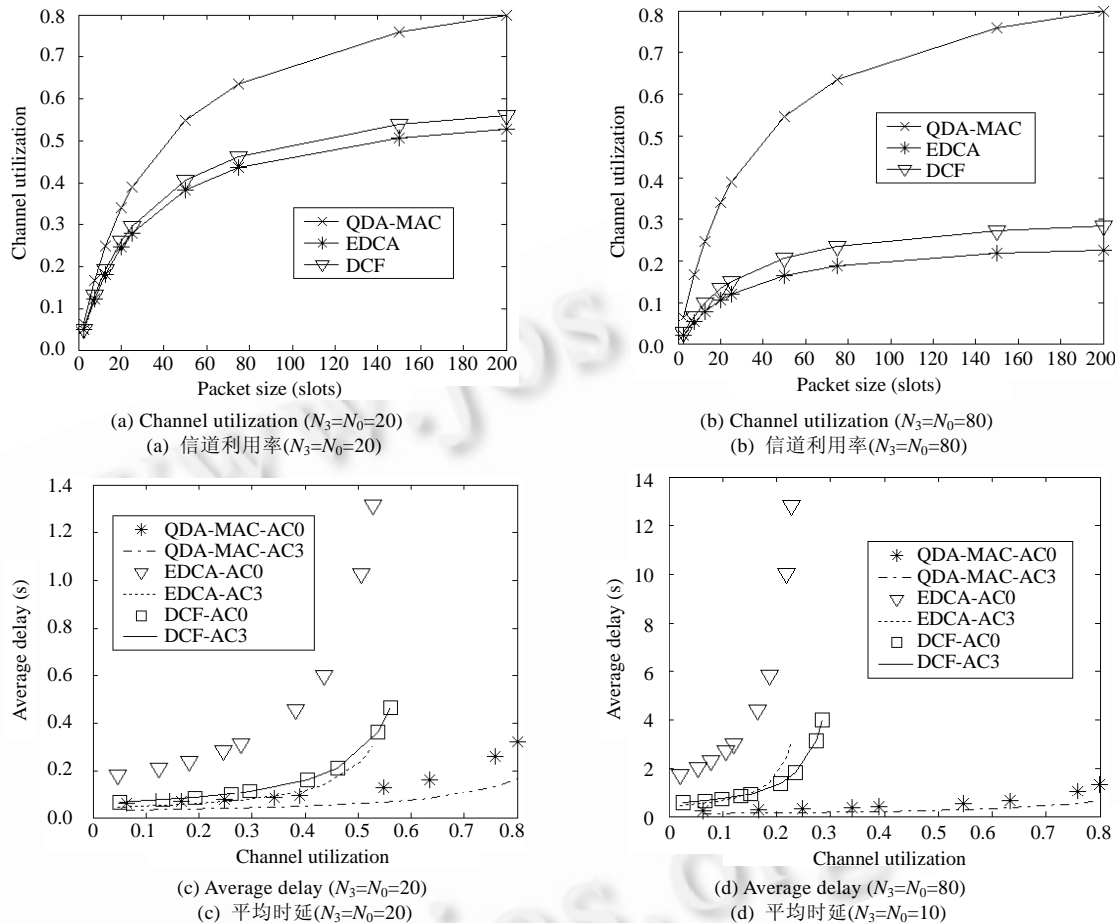


Fig.7 System performance with different packet length

图 7 随帧长变化的系统性能曲线

**Table 3** Initial window size and utilization with different packet size

表 3 两类业务随帧长变化的最优初始竞争窗和信道利用率

Packet size (slots)	12.5	20	25	50	75	150
CW min(3)	213.89	239.33	253.52	321.57	372.10	508.90
CW min(0)	426.32	477.20	497.71	641.73	742.83	988.30
$\rho_u$	0.2482	0.3411	0.3899	0.5478	0.6350	0.7593

**致谢** 在此,我们向对本文工作给予支持和建议的同行,尤其是电子科技大学通信与信息工程学院毛玉明教授、冷甦鹏副教授领导的教研室中的同学和老师表示感谢.

## References:

- [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] IEEE 802.11 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, 2005.
- [3] Cali F, Conti M, Gregori E. IEEE 802.11 protocol: Design and performance evaluation of an adaptive back-off mechanism. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2000,18(9):1774-1786.
- [4] Cali F, Conti M, Gregori E. Dynamic tuning of the IEEE 802.11 protocol to achieve a theoretical throughput limit. IEEE/ACM Trans. On Networking, 2000,8(6):785-799.
- [5] Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2000,18(3):535-547.
- [6] Ziouna E, Antonakopoulos T. CSMA/CA performance under high traffic conditions: Throughput and delay analysis. Computer and Communications, 2002,25:313-321.
- [7] 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.
- [8] Ge Y, Hou J. An analytical model for service differentiation in IEEE 802.11. In: Proc. of the IEEE ICC 2003. Vol 2, 2003. 1157-1162. <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/8564/27114/01204548.pdf>
- [9] Wei Z, Rose Q H, Yi Q, Yu C. An adaptive MAC scheme to achieve high channel throughput and QoS differentiation in a heterogeneous WLAN. In: Proc. of the QShine06. 166-176. <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1185407>
- [10] Rose Q H, Wei Z, Yi Q. An adaptive p-persistent 802.11 MAC scheme to achieve maximum channel utilization and QoS provisioning. In: Proc. of the IEEE WCNC 2006. 1705-1710. <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/11060/34936/01696545.pdf>
- [11] Romdhani L, Qiang N. Adaptive EDCF: Enhanced service differentiation for IEEE 802.11 wireless ad-hoc networks. In: Proc. of the IEEE WCNC'03. 2956-2961. [http://www-sop.inria.fr/planete/qni/52\\_03.PDF](http://www-sop.inria.fr/planete/qni/52_03.PDF)
- [12] Bruno R, Conti M, Gregori E. A simple protocol for the dynamic tuning of the back-off mechanism in IEEE 802.11 networks. The Int'l Journal of Computer and Telecommunications Networking, 2001,37(1):33-44.
- [13] Raffaele B, Marco C, Gregori E. Optimal capacity of p-persistent CSMA protocols. IEEE Communications Letters, 2003,7(3):139-141.
- [14] Li HW, Wu JP, Ma H, Zhang PY, Luo SX. Performance optimization for IEEE 802.11 based on the range of contention station number. Journal of Software, 2004,15(12):1850-1859 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/15/1850.htm>
- [15] Chunyu H, Hwangnam K, Jennifer CH. Short-Term non-uniform access in IEEE 802.11-compliant WLANs: A microscopic view and its impact. In: Proc. of the ACM MSWiM 2006. 2006. 447-456. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1389128607002691>
- [16] <http://140.116.72.80/~smallko/ns2/ns2.htm>

## 附中文参考文献:

- [14] 李贺武,吴建平,马辉,张培云,罗世新.基于竞争终端个数区间的 IEEE 802.11 性能优化.软件学报,2004,15(12):1850-1859. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/15/1850.htm>



白翔(1977-)男,四川眉山人,博士生,主要研究领域为无线局域网,支持 QoS 的接入控制协议与算法.



毛建兵(1980-),男,博士生,主要研究领域为无线局域网,网络系统性能的优化.



毛玉明(1954-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为宽带通信网,网络体系结构与协议分析,网络管理系统与协议.



谢军(1972-),男,博士,副教授,主要研究领域为通信网与宽带通信技术,现代光通信网络技术.



冷颢鹏(1972-),男,博士,副教授,主要研究领域为无线自组织网,传感器网络,无线宽带网络,下一代无线网络.