

AIFS 区分的 IEEE 802.11e EDCA 吞吐率分析模型与自适应 MAC 算法*

白翔¹⁺, 毛玉明¹, 冷甦鹏¹, 毛建兵¹, 谢军²

¹(电子科技大学 通信与信息工程学院, 四川 成都 610054)

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

Throughput Analytical Model and Adaptive MAC Scheme for IEEE 802.11e EDCA Based on AIFS Differentiation

BAI Xiang¹⁺, MAO Yu-Ming¹, LENG Su-Peng¹, MAO Jian-Bing¹, XIE Jun²

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

²(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, http://www.uestc.edu.cn

Bai X, Mao YM, Leng SP, Mao JB, Xie J. Throughput analytical model and adaptive MAC scheme for IEEE 802.11e EDCA based on AIFS differentiation. *Journal of Software*, 2009,20(4):779-794. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3269.htm>

Abstract: This paper proposes an AIFS-based multi-class model to study the saturation channel throughput on the basis of the operation mechanism of IEEE 802.11e EDCA (enhanced distributed channel access) supporting service differentiation. The proposed model is calculated numerically and validated against simulation results, a good match between the analytical model and simulation is observed. In particular, this paper compares the proposed model with Xiao's Markov chain model under the same configures. Based on the proposed model, this paper researches the quasi-optimal condition to avoid the computational complexity but still maintain the channel throughput close to its optimal value. Finally, the paper proposes an adaptive p -persistent MAC scheme, named DPS (dynamic parameter-tuning scheme), to assign appropriate different transmission probabilities (or contention window size) of different classes. Through DPS, it is feasible to provide service differentiation and achieve targeted throughput ratio among different classes, at the same time to maximize the total channel throughput. Simulation and numerical results show that DPS can effectively achieve the performance goal under a variety of network conditions, and achieve higher channel throughput than standard IEEE 802.11e EDCA in all different environments.

Key words: channel throughput; analytical model; adaptive scheme; transmission attempt; EDCA (enhanced distributed channel access)

摘要: 针对 IEEE 802.11e EDCA (enhanced distributed channel access) 支持业务区分服务的特点, 提出了一个基于

* 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 2007-11-15; Accepted 2008-01-29

AIFS(arbitration inter-frame space)区分的信道吞吐率分析模型,该模型将不同接入等级的业务统一到一个信道模型中进行分析.通过数值计算结果与仿真实验结果的对比,验证了该模型的准确性,尤其是在分析信道吞吐率方面更优于 Xiao 的 Markov 链模型.根据提出的分析模型,研究了近似优化条件,使得各类优先级业务的发送概率平衡虚拟发送时间段中空闲时间与冲突持续时间对系统性能的影响,实现靠近最优的信道吞吐率,从而使计算复杂度大为减小.利用数值分析的方法验证了近似优化条件实现靠近最优信道吞吐率的可行性.最后,提出的 DPS(dynamic parameter-tuning scheme)算法根据负载情况自适应地调整不同级别业务的相应参数,使得系统时时满足优化条件,在各种场景下都能实现最大信道吞吐率,同时又满足 EDCA 支持 QoS 区分的要求.仿真结果验证了 DPS 算法不仅能够根据竞争节点的数目变化对信道吞吐率进行优化,而且其性能也明显优于标准的 IEEE 802.11e EDCA 机制.

关键词: 信道吞吐率;分析模型;自适应算法;发送尝试;EDCA(enhanced distributed channel access)

中图法分类号: TP301 **文献标识码:** A

IEEE 802.11 协议^[1]描述了用于无线局域网(WLAN)的物理层和 MAC 层协议,它提供的基于 CSMA/CA(carrier sense multiple access with collision avoidance)的 DCF(distributed coordination function)机制,由于其分布式的特点而得到设备制造厂商的广泛支持.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 EDCA(enhanced distributed channel access)^[2]机制为 DCF 提供了 QoS 增强,但 EDCA 的协议参数不能随负载情况自适应地调整,使得系统性能无法实现最优.在现有的 IEEE 802.11e EDCA 机制的基础上提出实现最优信道吞吐率的自适应 MAC 算法是本文研究的主要目标.目前,许多学者利用数学建模的方法分析与优化 IEEE 802.11e EDCA 机制的相关性能,主要包括以下两个方面:1) 对 EDCA 性能的研究^[3-9];2) 改进后退算法和自适应调整协议参数来提高 EDCA 的性能^[10-16].

对 EDCA 性能的研究以 Xiao 和 Ge 的工作最为突出.Xiao 在文献[4],Ge 在文献[6]中分别对基于业务区分的 CSMA/CA 的二进制指数后退机制和 p -persistent 机制进行了建模分析.Xiao 将 Bianchi 的 Markov 链模型^[17]扩展到多优先级情况,定量研究 EDCA 机制支持 QoS 区分的性能.而 Ge 则是在 Cali 的模型^[18,19]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与饱和条件下的协议性能.其后,大部分对 EDCA 的性能研究都基于对 Bianchi 的 Markov 链模型进行修改,如文献[7]的模型中引入了 AIFS(arbitration inter-frame space)区分、文献[8,9]的模型中引入了空闲状态和排队模型.

上述的研究发现,协议的相关参数(CW_{\min} (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,理想的自适应 MAC 算法不仅需要采用简单、高效的机制,而且能够依据网络负载情况(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 EDCA 系统的性能是当前研究的热点.为了保证 EDCA 系统的 QoS 区分,同时提高信道利用率,竞争窗动态调整算法^[10-12]、区分最大包长算法^[13]和可变帧间隔(IFS)算法^[12,13]都被设计用于协议参数的自适应调整.这些自适应算法将测量与动态参数调整结合起来,有效地改善了二进制指数后退机制的性能,通过减少冲突来提高信道利用率.但协议的性能无法实现整体最优,尤其是在网络拥塞时,这些算法很难保证高级别业务的 QoS.

实现系统性能整体优化的自适应 MAC 算法应该能够适应复杂多变的无线网络,防止负载的变化影响系统性能的降级,保证高优先级业务流获得带宽的稳定性.文献[15,19-23]都针对不同的后退机制提出了对系统性能进行整体优化的自适应 MAC 算法,其中,只有文献[15]采用了 EDCA 的 QoS 区分机制.文献[15]基于 Cali 的 p -persistent 模型研究了自适应 MAC 算法.尽管它是一种新颖的支持业务区分的自适应方法,然而该算法基于 Cali 的统一参数信道模型,并不能用于支持多优先级业务(不同接入参数)的 EDCA 系统.同时,相对于实际的无线网络环境,这一算法使用相关的信息量过大,计算过于复杂,因而很难被直接采用.

综上,尽管将测量与动态参数调整结合起来可以有效地提高 EDCA 机制的相关性能,但以往的此类自适应 MAC 算法存在如无法保证公平性、业务流带宽和时延的稳定性等问题.这方面的主要解决方案是采用实现系统性能整体优化的自适应 MAC 算法.然而,目前此类算法都基于多优先级扩展的模型(对以往支持单级别业务

的模型进行多优先级扩展).由于受分析模型的制约,这类算法得出的数值计算结果不能如实反映 EDCA 接入方式的特点.同时,过于复杂的计算也使得算法往往不能适应复杂多变的无线网络.

我们在研究中注意到,虽然 IEEE 802.11e EDCA 中基于业务区分的可调参数——仲裁帧间隔(AIFS)对应的各类优先级业务不同,但从 i 类业务的 AIFS(i)表达式($AIFS(i)=SIFSTime+SlotTime\times AIFSN(i)$)可以看出,业务的 QoS 区分来源于不同的 AIFSN 与最小后退竞争窗(CW_{min}),而 SIFSTime 和 SlotTime 是每类业务相同的接入参数.利用 EDCA 这个特点,同时结合 Cali 的信道模型,我们建立了一个新的基于 AIFS 区分的信道吞吐率分析模型,该模型解决了不同接入参数的不同级别业务统一到一个信道模型中进行分析的问题.同时,我们在研究理论模型时发现,近似优化条件不仅仅适用于支持单级别业务的 p -persistent CSMA/CA 协议^[24],同样也适用于分析 EDCA 机制.只需在虚拟发送时间段中平衡平均的空闲时间和冲突持续时间来满足近似优化条件,系统性能也接近最优.利用近似优化条件可以有效地降低相关算法对系统参数精确计算的依赖,减小计算复杂度.通过对优化条件的研究,我们给出了一个适用于 EDCA 的自适应 MAC 算法——DPS(dynamic parameter-tuning scheme),该算法在每个虚拟发送时间段结束后,依据优化条件更新不同优先级业务的发送概率,实现靠近最优的信道吞吐率.DPS 算法克服了以往相关算法^[10-13]存在的问题,不仅能够实现 QoS 区分,而且能够对系统性能进行整体优化,保证信道接入的公平性和每类业务流带宽的稳定性,减小负载变化对系统性能的影响.

利用数值计算和 NS-2^[25]仿真,本文对新的信道吞吐率分析模型在各种场景下进行了大量的验证和仿真实验.相关的实验结果验证了新的分析模型更匹配仿真结果,而且在分析信道吞吐率方面明显优于 Xiao 的 Markov 链模型^[4].另一方面,利用 NS-2 对 DPS 算法在不同场景下的仿真结果也验证了 DPS 能够优化信道吞吐率,同时可以保证业务区分服务,适用于复杂多变的无线网络.尤其是对信道吞吐率的分析,明显优于标准的 IEEE 802.11e EDCA 机制.

1 基于 AIFS 区分的信道吞吐率分析模型

Cali 在文献[18]中将基于 CSMA/CA 的 p -persistent 机制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.Ge 在文献[15]中将 802.11 协议的 p -persistent 版本扩展到了 802.11e EDCA,本文虽未采用 Ge 的模型分析方法,但仍然结合 p -persistent 机制,便于分析实现最大信道吞吐率条件下每类业务最优的发送概率.

基于 AIFS 区分的信道吞吐率分析模型采用如下假定:

- 1) 各类业务流的发送速率相同,优先级别不同;
- 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;
- 7) 各类业务采用相同的数据帧长 l .

依据 EDCA 机制,信道忙状态结束后, i 类业务的等待接入时间由 DIFS 变为了 AIFS(i).设每个连续的空闲时隙中 i 类业务的发送概率为 p_i ($0 \leq i \leq M-1$, M 为业务级别数目,且 i 类业务优先级大于 $(i+1)$ 类业务,有 $p_i > p_{i+1}$).使用 A_i 标识 AIFSN(i).由于每类业务的发送过程相互独立,且每次成功发送结束为下一次发送的起点.文献[2]定义了虚拟发送时间段为两次连续的成功发送之间的时间间隔.如图 1 所示,每段虚拟发送时间都要经历空闲时间、发生冲突的持续时间和发送成功的时间.图 1 中,Idle 表示随机的接入时延,它包括每类业务的 SlotTime \times AIFSN,以及后退竞争窗持续时间.两次发送尝试之间的冲突持续时间为 T_{pc} ,成功发送时间为 T_{ps} .

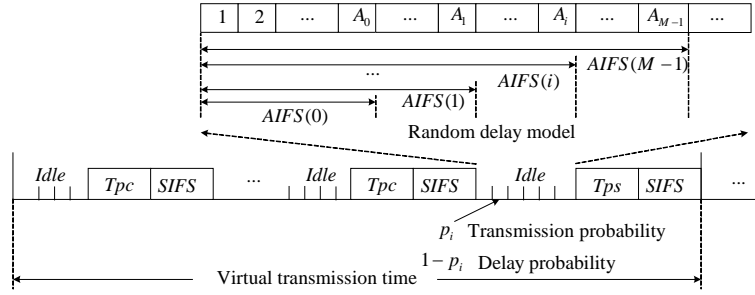


Fig.1 Channel state model and random delay model

图 1 信道状态模型与随机时延模型

根据图 1 中的信道状态模型,定义归一化信道吞吐率为发送每个数据帧的平均持续时间与平均虚拟发送时间之比,令 S 为信道吞吐率,则有

$$S = \frac{E[l]}{E[Idle] + E[Tpc] + E[Tps]} \tag{1}$$

其中, $E[l]$ 为发送一个数据帧的平均持续时间, $E[Idle]$, $E[Tpc]$ 和 $E[Tps]$ 分别表示虚拟发送时间段中的平均空闲时间、平均的冲突持续时间与平均的成功发送时间。

以下引理给出了公式(1)中各个子项的推导方法。

引理 1. 在虚拟发送时间段中,空闲时间的平均值可以表示为

$$E[Idle] = \left(A_0 + \sum_{i=0}^{M-1} D_i \times P_{Ai} \right) t_{slot} \tag{2}$$

式中: A_0 为第 0 类业务的 AIFSN(0);

D_i 表示一次发送尝试在 A_i 到 A_{i+1} 之间发生时而经历的平均时间延迟,有

$$D_i = \frac{\prod_{k=0}^i (1-p_k)^{N_k}}{1 - \prod_{k=0}^i (1-p_k)^{N_k}} \quad (0 \leq i \leq M-1);$$

$$P_{Ai} = \begin{cases} \left\{ 1 - \left[\prod_{k=0}^i (1-p_k)^{N_k} \right]^{A_{i+1}-A_i} \right\} \prod_{k=0}^{i-1} (1-p_k)^{N_k (A_i-A_{i-1})}, & 0 \leq i < M-1 \\ \prod_{k=0}^{M-2} (1-p_k)^{N_k (A_{M-1}-A_{M-2})}, & i = M-1 \end{cases};$$

t_{slot} 为空闲的时隙时间。

证明:图 1 中的时延模型描述了两次信道忙状态之间的空闲时间,将 SIFS 的持续时间结束后到业务成功接入信道之间的空闲时隙数目用 I 表示,则 I 的概率分布函数可以表示为

$$p[I = j] = \begin{cases} 0, & 0 \leq j < A_0 \\ (1-p_0)^{N_0(j-A_0)} [1 - (1-p_0)^{N_0}], & A_0 \leq j < A_1 \\ \dots \\ \prod_{k=0}^i (1-p_k)^{N_k(j-A_k)} \left[1 - \prod_{k=0}^i (1-p_k)^{N_k} \right], & A_i \leq j < A_{i+1} \\ \dots \\ \prod_{k=0}^{M-1} (1-p_k)^{N_k(j-A_k)} \left[1 - \prod_{k=0}^{M-1} (1-p_k)^{N_k} \right], & A_{M-1} \leq j < \infty \end{cases} \tag{3}$$

则 I 的数学期望,即业务的平均接入时延为

$$E[Idle] = \sum_{j=0}^{\infty} j \times p[I = j] \tag{4}$$

将公式(3)代入公式(4),有

$$E[Idle] = A_0 + \frac{(1-p_0)^{N_0}}{1-(1-p_0)^{N_0}} [1 - (1-p_0)^{N_0(A_1-A_0)}] +$$

$$\frac{\prod_{k=0}^1 (1-p_k)^{N_k}}{1 - \prod_{k=0}^1 (1-p_k)^{N_k}} \left\{ 1 - \left[\prod_{k=0}^1 (1-p_k)^{N_k} \right]^{(A_2-A_1)} \right\} (1-p_0)^{N_0(A_1-A_0)} + \dots +$$

$$\frac{\prod_{k=0}^{M-1} (1-p_k)^{N_k}}{1 - \prod_{k=0}^{M-1} (1-p_k)^{N_k}} \prod_{k=0}^{M-2} (1-p_k)^{N_k(A_{k+1}-A_k)},$$

令

$$D_i = \frac{\prod_{k=0}^i (1-p_k)^{N_k}}{1 - \prod_{k=0}^i (1-p_k)^{N_k}}, P_{Ai} = \left\{ 1 - \left[\prod_{k=0}^i (1-p_i)^{N_i} \right]^{A_{i+1}-A_i} \right\} \prod_{k=0}^{i-1} (1-p_k)^{N_k(A_i-A_{i-1})}, 0 \leq i < M-1;$$

$$P_{Ai} = \prod_{k=0}^{M-2} (1-p_k)^{N_k(A_{M-1}-A_{M-2})}, i=M-1,$$

则有 $E[Idle] = \left(A_0 + \sum_{i=0}^{M-1} D_i \times P_{Ai} \right) t_{slot}$. 证毕. □

引理 2. 第 i 类业务成功发送的概率 p_{s_i} 可以如下表示:

$$p_{s_i} = \sum_{t=i}^{M-1} p_t^* \times A_t,$$

式中, $p_i^* = N_i p_i (1-p_i)^{N_i-1} \prod_{k=0, k \neq i}^t (1-p_k)^{N_k}$, $A_t = \sum_{j=A_i}^t \prod_{k=0}^t (1-p_k)^{N_k(j-A_k)}$.

证明: 当第 i 类业务接入信道前的空闲时隙数目 $I=j$ 时, 第 i 类业务成功发送的条件概率 $p[class-i|I=j]$ 可以表示为

$$p[class-i|I=j] = \begin{cases} 0, & 0 \leq j < A_0 \\ 0, & A_0 \leq j < A_1 \\ \dots \\ \frac{N_i p_i (1-p_i)^{N_i-1} \prod_{k=0}^{i-1} (1-p_k)^{N_k}}{1 - \prod_{k=0}^i (1-p_k)^{N_k}}, & A_i \leq j < A_{i+1} \\ \dots \\ \frac{N_i p_i (1-p_i)^{N_i-1} \prod_{k=0, k \neq i}^{M-1} (1-p_k)^{N_k}}{1 - \prod_{k=0}^{M-1} (1-p_k)^{N_k}}, & A_{M-1} \leq j < \infty \end{cases} \quad (5)$$

则第 i 类业务成功发送的概率为

$$p_{s_i} = \sum_{j=0}^{\infty} p(I=j) p[class-i|I=j] = \sum_{j=A_i}^{A_{i+1}} N_i p_i (1-p_i)^{N_i-1} \prod_{k=0}^{i-1} (1-p_k)^{N_k} \prod_{k=0}^i (1-p_k)^{N_k(j-A_k)} +$$

$$\sum_{j=A_{i+1}}^{A_{i+2}} N_i p_i (1-p_i)^{N_i-1} \prod_{k=0, k \neq i}^{i+1} (1-p_k)^{N_k} \prod_{k=0}^{i+1} (1-p_k)^{N_k(j-A_k)} + \dots$$

令 $p_i^* = N_i p_i (1-p_i)^{N_i-1} \prod_{k=0, k \neq i}^t (1-p_k)^{N_k}$, $A_t = \sum_{j=A_i}^t \prod_{k=0}^t (1-p_k)^{N_k(j-A_k)}$, 可以得出 $p_{s_i} = \sum_{t=i}^{M-1} p_t^* \times A_t$. 证毕. □

令 p_s 表示信道上完成一次成功发送的概率, 它是各类业务成功发送概率之和, 即

$$p_s = \sum_{i=0}^{M-1} p_{s_i} = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{t=i}^{M-1} p_t^* \times A_t.$$

设 $E[l_i]$ 为第 i 类业务发送数据帧的平均持续时间, 它是数据帧的传输时间 T_i 与第 i 类业务成功发送概率之积, 即 $E[l_i] = p_{s_i} T_i$. 公式(1)中的 $E[Tpc]$ 和 $E[Tps]$ 可以分别表示为

$$E[Tpc] = (1-p_s) T_c,$$

$$E[Tps] = p_s T_s.$$

式中, T_s 为第 i 类业务成功发送数据帧所需的时间, T_c 为第 i 类业务发送数据帧发生冲突的持续时间. 有

$$T_s = T_f + SIFS + ACK + SIFS,$$

$$T_c = T_f + EIFS = T_f + SIFS + ACK + SIFS.$$

从上面两式中可以看出, T_s 和 T_c 与文献[4,8,9]中的表达方式不同, 即将 $AIFS[i]$ 替换为 $SIFS$. 这是因为本文的信道状态模型将 $AIFS[i]$ 分割为 $SIFS$ 与 $t_{slot} \times A_i$. 在接入时延的分析中包含了 $t_{slot} \times A_i$, 这样, 每类业务发送尝试之前的延迟时间都为 $SIFS$. 如图 1 所示, 即在相同帧长情况下, 不同接入等级的业务成功发送和发生冲突的持续时间都相同. 至此, 将解出的 $E[Idle]$, $E[Tpc]$ 和 $E[Tps]$ 代入公式(1)中, 可得:

$$S = \frac{\sum_{i=0}^{M-1} p_{s_i} T_i}{E[Idle] + p_s T_s + (1-p_s) T_c} = \frac{T_i \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{t=i}^{M-1} p_i^* \times \Delta}{\left(A_0 + \sum_{i=0}^{M-1} D_i \times P_{Ai} \right) t_{slot} + T_s \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{t=i}^{M-1} p_i^* \times \Delta + \left(1 - \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{t=i}^{M-1} p_i^* \times \Delta \right) T_c} \quad (6)$$

令 $E[v] = (E[Idle]/p_s) + T_s + (1-p_s)T_c/p_s$, 在平均数据帧长已知的情况下, 最小值 $\min(E[v])$ 能够决定最大信道吞吐量 $\max(S)$. 从引理 1 和引理 2 可以看出, $E[v]$ 是各级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吞吐量. 为了保证 QoS 区分, 定义单个 i 类业务与 j 类业务信道吞吐量比值为 $r_{i,j}$, 有

$$r_{i,j} = \frac{S_i / N_i}{S_j / N_j} = \frac{p_{s_i} N_j}{p_{s_j} N_i} \quad (7)$$

以上基于 AIFS 区分的信道吞吐量分析模型可以称为 P 坚持模型 (P -model), 因为每类业务都使用了典型的 p -persistent CSMA/CA 后退机制. 文献[6,15]已经证实, 只要相应业务使用相同的平均后退窗值, 基于 p -persistent 机制的 IEEE 802.11e EDCA 与标准的 IEEE 802.11e EDCA 在信道吞吐量方面就具有相同的性能. 换句话说, 每类业务的发送概率 p 值对应于标准 EDCA 中相应业务的后退竞争窗值.

为了验证基于 AIFS 区分的 P -model 的有效性, 利用仿真实验与数值计算, 我们将 P -model 与 Xiao 的 Markov 链模型^[6] 在分析信道吞吐量方面作了比较. Xiao 的 Markov 链模型是在 Bianchi 模型的基础上进行了多优先级扩展, 接入等级参数仅使用最小后退竞争窗, 而没有考虑 AIFS 区分带来的影响. 为了在相同场景下比较两类模型的信道吞吐量, 我们在网络配置中考虑 2 个优先级业务: 高优先级业务的发送概率为 p_0 , 低优先级业务的发送概率为 p_1 , 有 $p_0 > p_1$. 分别设置 $N_0=10, N_1=25, A_0=2, A_1=7$ 以及单个 0 类业务与 1 类业务的信道吞吐量比值为 4.0. 在 Xiao 的 Markov 链模型中, 设置 $CW_{\min}(0)=16, CW_{\min}(1)=64$.

图 2(a)和图 2(b)给出了利用 P -model 分析的总信道吞吐量、每类业务的吞吐量以及单个 0 类业务流与 1 类业务流吞吐量比值. 需要指出: 吞吐量曲线都是各个相同类业务流吞吐量的累计之和. 从图中可以观察到:

- 1) 发送概率增加, 信道吞吐量逐步减小, 但两类业务流的吞吐量比值仍然接近准确值 4.0, 满足了 QoS 区分的要求;
- 2) 信道吞吐率先增后减, 吞吐率的最大值对应于一个最优的发送概率.

图 2(c)和图 2(d)给出了配置不同节点数目和不同帧长情况下, 利用 P -model 与 Markov 链模型分析信道吞吐量得出的曲线对比图. 由于我们在 P -model 中考虑了 AIFS 区分, 这样, P -model 的数值计算结果更接近于仿真结果, 而且分析的信道吞吐量明显要优于 Xiao 的 Markov 链模型.

从以上数值结果的分析容易看出, $\max(s)$ 由 $\min(E[v])$ 决定. 而 $E[v]$ 是 N_i, p_i 和 A_i 的函数, 如果 N_i 和 A_i 已知, 则有 $E[v] = f(p_0, p_1, \dots, p_{M-1})$. 利用公式(7)可以把 p_1, p_2, \dots, p_{M-1} 作为 p_0 的函数, 有 $p_1 = r_1(p_0), p_2 = r_2(p_0), \dots, p_{M-1} = r_{M-1}(p_0)$, 将此式代入 $E[v]$, 有

$$E[v] = f(p_0, r_1(p_0), \dots, r_{M-1}(p_0)) = E_v(p_0) \quad (8)$$

这样, $E[v]$ 仅作为 p_0 的函数. 图 3 给出了存在两个优先级业务的场景下, 选择不同的 $N_i (i=0,1)$ 值得出 $E_v(p_0)$ 的曲线图. 从图 3 中可以观察到, p_0 值越小, 得到的 $E[v]$ 越大, 这是因为较小的 p_0 值带来了较大的信道空闲时间. 另一方面, p_0 值越大, 得到的 $E[v]$ 仍然越大, 这是因为信道上冲突次数的增加来源于业务较大的发送概率. 因此, $\min(E[v])$ 对应的 p_0 值能够满足最大的信道吞吐量, 也平衡了信道空闲与信道冲突的影响. 表 1 给出了在不同网

络配置下最大的信道吞吐率以及对应的两类业务最优的发送概率,同时将分析的最大信道吞吐率与标准的 IEEE 802.11e EDCA 在相同配置下作了比较.

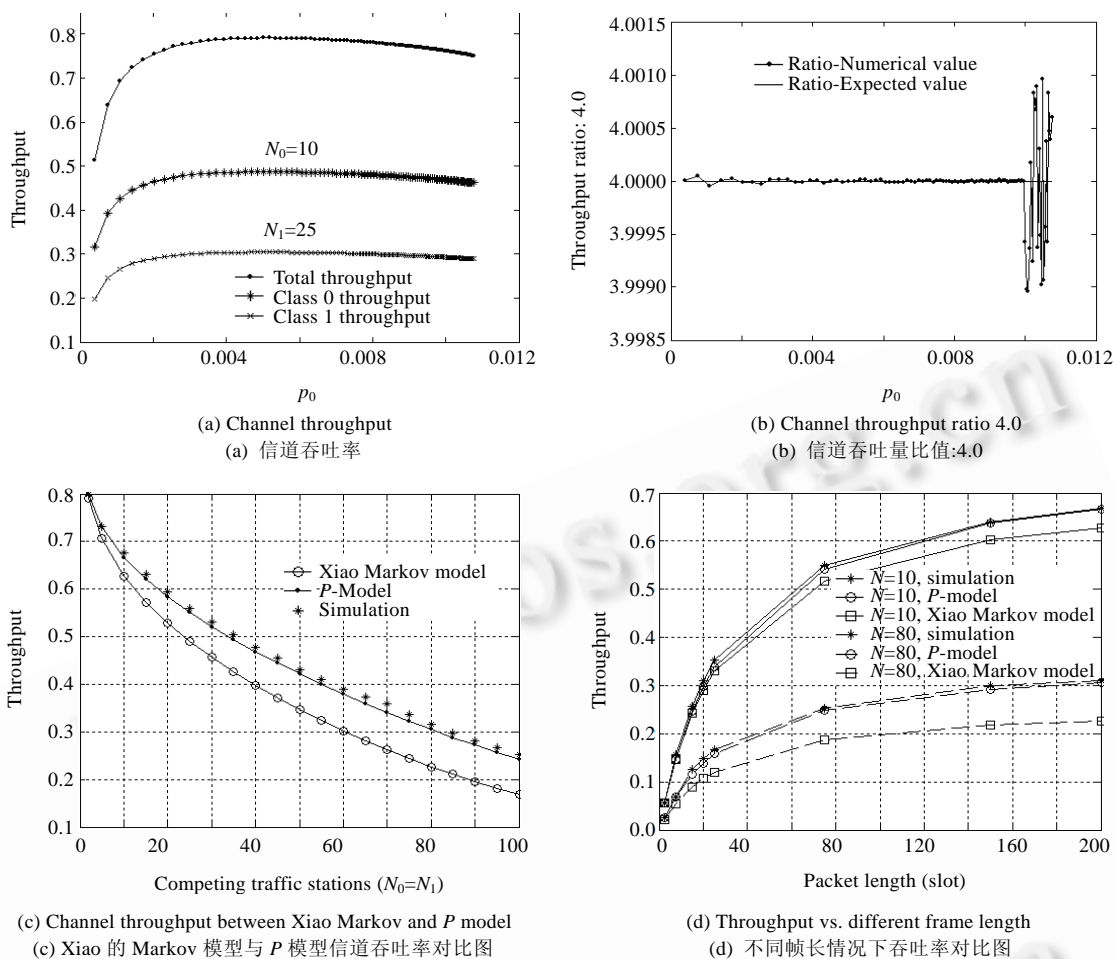


Fig.2 P-model based on the AIFS differentiation

图 2 基于 AIFS 区分的 P-model 验证

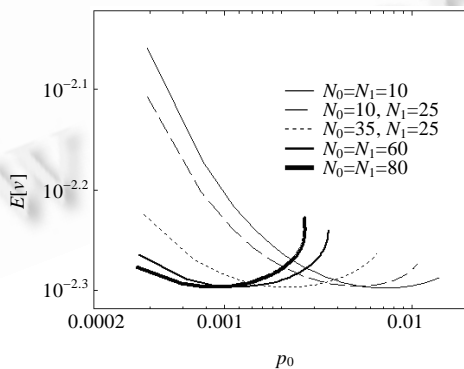


Fig.3 $E[v]$ and p_0 ($A_0=2, A_1=7, ratio=4$)

图 3 $E[v]$ 与 p_0 ($A_0=2, A_1=7, ratio=4$)

Table 1 Optimal throughput and transmission probability of P -model**表 1** P -model 的最优吞吐率与每个业务的发送概率

		Optimal values				Standard EDCA
N_0	N_1	Packet length (slot)	Optimal throughput	p_0	p_1	Throughput
10	25	20	0.321 99	0.008 778 5	0.005 6	0.274 72
		25	0.370 07	0.008 573 2	0.005 3	0.311 86
		75	0.618 47	0.006 902 2	0.003 4	0.487 83
		200	0.790 79	0.005 190 2	0.002 1	0.592 21
35	25	20	0.327 37	0.004 331 2	0.003 0	0.206 44
		25	0.375 57	0.004 126 9	0.002 7	0.232 18
		75	0.622 55	0.003 153 8	0.001 6	0.361 59
		200	0.792 65	0.002 219 4	0.000 9	0.437 73
80	80	20	0.326 03	0.001 728 3	0.001 2	0.106 54
		25	0.374 18	0.001 663 0	0.001 1	0.120 77
		75	0.621 27	0.001 221 6	0.000 6	0.187 65
		200	0.791 57	9.5636e-4	0.000 4	0.226 82

2 近似优化条件

Cali 在文献[18,19]中的研究指出,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,且 Cali 首先给出了单级别业务情况下的近似优化公式.随后,Bruno 在文献[24]中对 Cali 的近似优化公式进行了严格的数学证明.然而,Cali 的优化公式只适合支持单级别业务的 p -persistent CSMA/CA 协议.在业务区分服务的情况下,我们对 P -model 的研究发现,考虑不同等级业务的接入参数(如 $CW_{min,AIFS}$)时,近似优化条件仍然成立,而且极大地减小了求得最大信道吞吐率的计算复杂度.引理 3 给出了 P -model 中近似优化条件的描述.

引理 3. 满足 $\min(E[v])$ 的 p_i 值可以通过求解如下公式来近似:

$$E[Idle] = (1-p_s)T_c \quad (9)$$

上式为在 P -model 基础上得出的能够实现最大信道吞吐率的近似优化条件.

证明:略(由于篇幅所限,本文未给出严格的数学证明,单级别业务情况下优化公式证明可参见 Bruno 的文献 [20]). \square

本文只采用数值计算的方法进行定量的验证.同样考虑网络中有两类优先级业务,每类业务的数目为 N_i ($i=0,1$),有 $p_0 > p_1$. 设置 $A_0=2, A_1=7, r_{0,1}=4.0$. 根据第 1 节的引理有

$$\begin{cases} E[Idle] = \left\{ 2 + \frac{(1-p_0)^{N_0} [1 - (1-p_0)^{(A_1-A_0)N_0}]}{1 - (1-p_0)^{N_0}} + \frac{(1-p_0)^{(A_1-A_0+1)N_0} (1-p_1)^{N_1}}{1 - (1-p_0)^{N_0} (1-p_1)^{N_1}} \right\} t_{slot} \\ p_{s_0} = N_0 (1-p_0)^{N_0-1} \left[\frac{1 - (1-p_0)^{(A_1-A_0)N_0}}{(1-p_0)^{N_0}} + \frac{(1-p_0)^{(A_1-A_0)N_0} (1-p_1)^{N_1}}{1 - (1-p_0)^{N_0} (1-p_1)^{N_1}} \right] \\ p_{s_1} = N_1 (1-p_1)^{N_1-1} (1-p_0)^{N_0} \frac{(1-p_0)^{(A_1-A_0)N_0}}{1 - (1-p_0)^{N_0} (1-p_1)^{N_1}} \\ p_s = p_{s_0} + p_{s_1} \end{cases} \quad (10)$$

公式(10)中, t_{slot} 为空闲的时隙时间.将公式(10)代入 $E[v]$, 可以得到 $E[v]$, $E[Idle]$ 与 $(1-p_s)T_c$ 的函数曲线图,如图 4 所示.从图 4(a)中可以观察到, $E[Idle]$ 是 p_0 的递减函数,而 $(1-p_s)T_c$ 是 p_0 递增函数.当 $p_0=2.4573e-3$ 时,有 $E[Idle] = (1-p_s)T_c$. 当 $p_0=2.2194e-3$ 时,有最小值 $\min(E[v])$. 这时两个 p_0 值的绝对误差仅为 2×10^{-5} , 而 $\min(E[v])$ 与 $quasi-\min(E[v])$ 的绝对误差远远小于 1%. 同理,图 4(b)为 $E[v]$, $E[Idle]$ 与 $(1-p_s)T_c$ 作为 p_1 的函数的曲线图.相同的现象也可以从图 4(b)中观察到.结合图 4, 利用数值方法不难得出:当 $E[Idle] = (1-p_s)T_c$ 时,可求得两类业务的发送概率最优值以及靠近最优的信道吞吐率.

选择不同的 N_i 值,表 2 列出了通过近似优化条件得出的信道吞吐率与最优吞吐率,以及两类业务的发送概率.图 5 给出了不同 N_i 取值情况下的吞吐率相对误差(相对误差=近似优化值-优化值/优化值).从图 5 中可以清楚地看到,两类业务在近似优化条件下的发送概率与准确值之间的相对误差大约在 0.1 左右,而对应的信道吞

吞吐率的相对误差则小于 0.1%.通过近似优化条件来求解每类业务发送概率的最优值,可以大大减小计算的复杂度,而且获得靠近最优的信道吞吐率.采用相同的方法可以验证 $M>2$ 时优化条件仍然成立.以下的 DPS 自适应方法依靠时时满足优化条件来实现靠近最优的信道吞吐率.

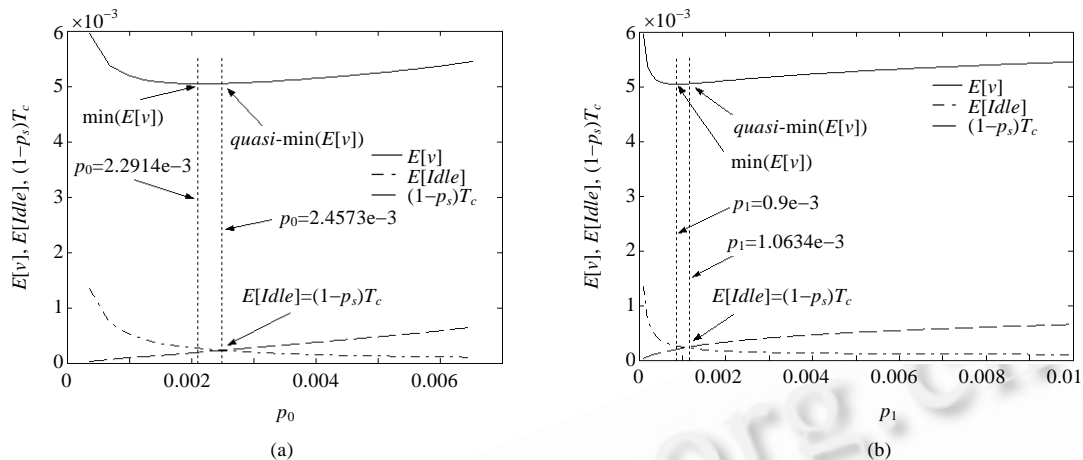


Fig.4 Quasi-Optimal condition ($N_0=35, N_1=25$)

图 4 近似优化条件($N_0=35, N_1=25$)

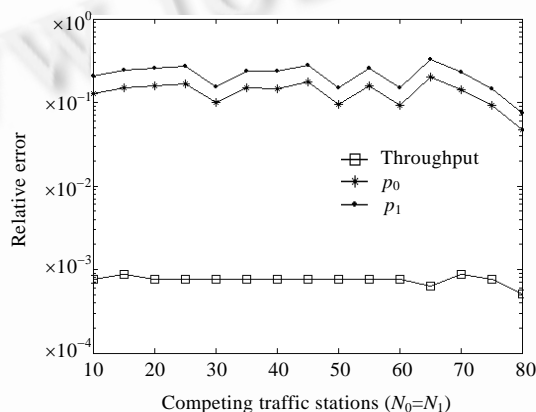


Fig.5 Relative error

图 5 相对误差

Table 2 Error between quasi-optimal values and optimal values

表 2 近似优化值与优化值的误差

N_0	N_1	Quasi-Optimal values			Optimal values		
		Throughput	p_0	p_1	Throughput	p_0	p_1
10	10	0.793 4	0.008 232 0	0.003 618 10	0.794 0	0.007 310 8	0.003 0
10	25	0.789 7	0.005 980 4	0.002 640 60	0.790 8	0.005 190 2	0.002 1
20	20	0.792 1	0.004 049 5	0.001 755 50	0.792 7	0.003 500 8	0.001 4
35	25	0.792 1	0.002 457 3	0.001 053 40	0.792 6	0.002 219 4	0.000 9
30	30	0.791 7	0.002 685 5	0.001 159 10	0.792 3	0.002 443 9	0.001 0
40	40	0.791 5	0.002 009 0	0.000 865 23	0.792 1	0.001 752 2	0.000 7
45	50	0.791 2	0.001 739 6	0.000 750 00	0.791 9	0.001 506 7	0.000 6
50	50	0.791 4	0.001 605 0	0.000 690 43	0.792 0	0.001 467 2	0.000 6
60	60	0.791 3	0.001 336 0	0.000 574 22	0.791 9	0.001 222 8	0.000 5
70	70	0.791 2	0.001 144 2	0.000 491 46	0.791 9	0.001 001 7	0.000 4
80	80	0.791 2	0.001 000 8	0.000 429 69	0.791 6	0.000 956 4	0.000 4

3 动态参数调整算法(DPS)

基于业务区分的 EDCA 机制可调参数包括最小后退竞争窗(CW_{\min})、仲裁帧间隔(AIFS)和发送机会(TXOP).TXOP 是成功接入信道的业务占用信道的最大持续时间.EDCA 中引入 TXOP 可以减少信道预约的开销,有效地提高信道利用率.怎样在 P-model 中引入 TXOP 是我们后续研究的内容.这里,DPS 算法主要针对在 AIFS 区分的情况下依据网络负载的变化自适应地调整每类业务的 CW_{\min} (等同于调整每类业务的发送概率).

在支持 IEEE 802.11e EDCA 的无线局域网中,各类优先级业务的数目可能实时动态变化.为了达到最大信道吞吐率并满足 QoS 区分的要求,每类业务的发送概率应随网络状态的变化作自适应的调整.引理 3 提供了一个为达到最大信道吞吐率而系统必须时时满足的条件.因此,需要业务在每个成功发送结束后依据网络负载情况更新 $E[Idle]$ 与 $(1-p_s)T_c$ 的值,然后估算出下一个虚拟发送时间段内最优的发送概率.令 $(1-p_s)T_c=E[T_c]$,即为虚拟发送时间段中平均的冲突持续时间.

3.1 自适应方法

图 6 显示了连续两次成功发送的时间段,其中,第 $(n+1)$ 次虚拟发送时间段内的相关标识如下定义:

- $Idle(n+1)$:发送尝试中的空闲持续时间;
- $coll(n+1)$:发送尝试中的冲突持续时间;
- $p_i(n+1)(0 \leq i \leq M-1)$:虚拟发送时间段内第 i 类业务发送概率的优化值;
- $E[Idle](n+1)$:虚拟发送时间段内的平均空闲时间;
- $E[T_c](n+1)$:虚拟发送时间段内的平均冲突持续时间;
- $E[N_c](n+1)$:虚拟发送时间段内的平均冲突次数.

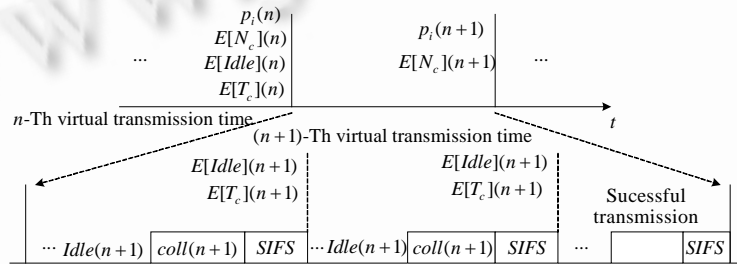


Fig.6 Virtual transmission time

图 6 虚拟发送时间段

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

$$E[Idle](n+1) = \alpha E[Idle](n) + (1-\alpha) Idle(n+1) \quad (11)$$

$$E[T_c](n+1) = \alpha E[T_c](n) + (1-\alpha) coll(n+1) \quad (12)$$

在公式(11)和公式(12)中, α 为平滑因子, α 的取值影响算法的自适应性能.定义在第 $(n+1)$ 次虚拟发送时间段结束后,统计该时间段中的冲突次数为 $N_c(n+1)$.同样,利用平滑因子,虚拟发送时间段内的平均冲突次数为

$$E[N_c](n+1) = \alpha E[N_c](n) + (1-\alpha) N_c(n+1) \quad (13)$$

令 $N_i(n+1)$ 为第 $(n+1)$ 次虚拟发送时间段内第 i 类业务的数目,有

$$E[Idle](n+1) = f_1[p_i(n), N_i(n+1)] \quad (14)$$

$$E[N_c](n+1) = f_2[p_i(n), N_i(n+1)] \quad (15)$$

在公式(14)和公式(15)中, f_1 表示 $E[Idle](n+1)$ 为 $p_i(n), N_i(n+1)$ 的函数,具体表达式可参见引理 1.同理, f_2 表示 $E[N_c](n+1)$ 也为 $p_i(n), N_i(n+1)$ 的函数.利用上式的 M 个方程,可解得第 i 类业务数目的估计值 $N_i(n+1)$.例如,对 $M=2$,通过使用如下公式来求解 $N_0(n+1)$ 和 $N_1(n+1)$.其中,已知 A_0, A_1 以及 $r_{0,1}$.

$$\begin{cases} E[Idle](n+1) = \left\{ 2 + \frac{(1-p_0(n))^{N_0(n+1)}[1-(1-p_0(n))^{(A_1-A_0)N_0(n+1)}]}{1-(1-p_0(n))^{N_0(n+1)}} + \frac{(1-p_0(n))^{(A_1-A_0)N_0(n+1)}(1-p_1(n))^{N_1(n+1)}}{1-(1-p_0(n))^{N_0(n+1)}(1-p_1(n))^{N_1(n+1)}} \right\} t_{slot} \\ E[N_c](n+1) = \frac{1-p_{s_0}(n+1)-p_{s_1}(n+1)}{p_{s_0}(n+1)+p_{s_1}(n+1)} \\ p_1(n) = r_1(p_0(n)) \end{cases} \quad (16)$$

式中

$$p_{s_0}(n+1) = N_0(n+1)(1-p_0(n))^{N_0(n+1)-1} \left[\frac{1-(1-p_0(n))^{(A_1-A_0)N_0(n+1)}}{(1-p_0(n))^{N_0(n+1)}} + \frac{(1-p_0(n))^{(A_1-A_0)N_0(n+1)}(1-p_1(n))^{N_1(n+1)}}{1-(1-p_0(n))^{N_0(n+1)}(1-p_1(n))^{N_1(n+1)}} \right],$$

$$p_{s_1}(n+1) = N_1(n+1)(1-p_1(n))^{N_1(n+1)-1} (1-p_0(n))^{N_0(n+1)} \frac{(1-p_0(n))^{(A_1-A_0)N_0(n+1)}}{1-(1-p_0(n))^{N_0(n+1)}(1-p_1(n))^{N_1(n+1)}}.$$

通过解公式(16),可求得在第 $(n+1)$ 次虚拟发送时间段中的估计值 $N_0(n+1)$ 和 $N_1(n+1)$.可以看出,在第 $(n+1)$ 次虚拟发送时间段内,如果网络负载没有发生变化,则有 $E[Idle](n)=E[Idle](n+1)$, $E[N_c](n)=E[N_c](n+1)$,那么这时有 $N_i(n)=N_i(n+1)$.如果网络负载发生变化,导致系统不满足优化条件,即 $E[Idle](n+1) \neq E[T_c](n+1)$,DPS 算法的目的则是依据负载的变化情况重新为各级业务分配发送概率,使得在第 $(n+2)$ 次虚拟发送时间段内信道吞吐率达到最优,满足 $E[Idle]=E[T_c]$.因此,有

$$\begin{cases} \left\{ 2 + \frac{(1-p_0(n+1))^{N_0(n+1)}[1-(1-p_0(n+1))^{(A_1-A_0)N_0(n+1)}]}{1-(1-p_0(n+1))^{N_0(n+1)}} + \frac{(1-p_0(n+1))^{(A_1-A_0)N_0(n+1)}(1-p_1(n+1))^{N_1(n+1)}}{1-(1-p_0(n+1))^{N_0(n+1)}(1-p_1(n+1))^{N_1(n+1)}} \right\} t_{slot} = \\ E[T_c](n+1) \\ p_1(n+1) = r_1(p_0(n+1)) \end{cases} \quad (17)$$

公式(17)中有两个方程和两个未知数,在实际的数值计算过程中总可求得 $p_0(n+1)$ 和 $p_1(n+1)$ 的收敛解.

3.2 DPS算法的工作流程

综上,DPS 算法的具体工作过程如下:

$p_i(n)(0 \leq i \leq M-1)$:第 n 次虚拟发送时间段内 i 类业务发送概率的最优值;

开始:

- 1) $Idle(n+1)$:第 $(n+1)$ 次虚拟发送时间段中发送尝试内的空闲持续时间;
- 2) $coll(n+1)$:第 $(n+1)$ 次虚拟发送时间段中发送尝试内的冲突持续时间;
- 3) $N_c(n+1)$:在第 $(n+1)$ 次成功发送结束后,虚拟发送时间段中的冲突次数;
- 4) $E[Idle](n+1) = \alpha E[Idle](n) + (1-\alpha)Idle(n+1)$;
- 5) $E[T_c](n+1) = \alpha E[T_c](n) + (1-\alpha)coll(n+1)$;
- 6) $E[N_c](n+1) = \alpha E[N_c](n) + (1-\alpha)N_c(n+1)$;
- 7) 通过解 M 个方程,估算第 $(n+1)$ 次成功发送结束后各类业务的数目 $N_i(n+1)$;

$$\begin{cases} E[Idle](n+1) = f_1[p_i(n), N_i(n+1)] \\ E[N_c](n+1) = f_2[p_i(n), N_i(n+1)] \end{cases}$$

- 8) 在得到 $N_i(n+1)$ 估计值的条件下,利用数值计算方法求解 i 类业务最优的发送概率 $p_i(n+1)$:

$$\begin{cases} f_i[p_i(n+1), N_i(n+1)] = E[T_c](n+1) \\ r_{i,j} = r[p_i(n+1), p_j(n+1)] \end{cases}$$

结束.

3.3 DPS算法的数值验证

为了验证支持 EDCA 的 DPS 算法,考虑 2 个优先级业务,初始状态设置 $N_0=N_1=10$, $p_0 > p_1$.随后,改变 N_0 和 N_1

的值来分别配置两个场景,将 DPS 算法实现的信道吞吐率估计值与理想值进行比较.见表 3 和表 4.此外,还分析了平滑因子 α 对系统稳态的影响.

Table 3 Numerically estimated values 1 of DPS scheme 1 ($N_0=10, N_1=25$)

表 3 DPS 算法的数值验证 1($N_0=10, N_1=25$)

		Packet length: 200 slots					Packet length: 20 slots			
N_0	N_1	α	N_0	N_1	Throughput	Transient delay	N_0	N_1	Throughput	Transient delay
10	25	0.8	9.95	24.701 5	0.789 72	7.889 8 ms	9.9	23.475 7	0.314 06	2.714 8 ms
		0.9	9.94	24.656 6	0.789 72	16.764 ms	9.9	23.425 4	0.314 10	6.029 2 ms
		0.99	9.94	24.841 8	0.789 70	174.483 ms	9.9	23.611 4	0.313 22	64.717 2 ms
Ideal values			10	25	0.789 67		10	25	0.313 22	

Table 4 Numerically estimated values 2 of DPS scheme 2 ($N_0=30, N_1=30$)

表 4 DPS 算法的数值验证 2($N_0=30, N_1=30$)

		Packet length: 200 slots					Packet length: 20 slots			
N_0	N_1	α	N_0	N_1	Throughput	Transient delay	N_0	N_1	Throughput	Transient delay
30	30	0.8	29.25	33.782 1	0.791 40	10.125 4 ms	29.02	36.349 4	0.320 74	4.676 7 ms
		0.9	29.2	33.926 1	0.791 42	21.700 4 ms	29.02	35.580 5	0.321 00	10.148 4 ms
		0.99	29.16	32.295 6	0.791 59	229.130 5 ms	28.9	34.330 3	0.329 75	108.523 2 ms
Ideal values			30	30	0.791 72		30	30	0.322 53	

从表 3 和表 4 的结果可以看出, DPS 算法在各种网络配置下能够有效地实现靠近最优信道吞吐率的估计值.此外,随着 α 的增加,空闲时间和冲突持续时间的估计值接近稳态值,这样估计的信道吞吐率也就越接近理想值.然而,当 $\alpha=0.99$ 时,系统的暂态时延大为增加,并不利于 DPS 的自适应性能.所以,选择 $\alpha=0.9$ 时,仍然实现靠近最优值的信道吞吐率,同时获得较短的暂态时延.

3.4 DPS 算法的性能评估

本文使用 NS-2 对 DPS 算法在各种场景下的吞吐率性能进行了仿真.每个节点采用基本的 IEEE 802.11e EDCA 模式,且独立运行 DPS 算法.仿真中使用的物理层参数完全遵从 NS-2 中的 IEEE 802.11e EDCA 模块的设置^[25].其中,信道速率为 2Mbps 并假定是理想信道,且不存在隐藏终端,即网络拓扑属于单跳 Ad Hoc 网络.为了简单说明问题,仿真场景中存在两种级别的业务,每个节点可以发送一个实时业务或一个尽力而为业务,实时业务用 AC_3 表示,用 AC_0 表示尽力而为业务.设置单个 AC_3 业务和 AC_0 业务信道吞吐率比值 $r_{3,0}$ 为 4.0,选择平滑因子 $\alpha=0.9$.各类业务使用相同的发送速率发送固定帧长的饱和数据流直至仿真结束.

3.4.1 仿真场景 1

在一个单位区域内,设置 AC_3 和 AC_0 业务的数目为 $N_3=5, N_0=10$.当仿真时间持续到 20s 时,增加 N_3 到 35, N_0 到 25,仿真到 40s 后,还原 $N_3=5, N_0=10$,最后运行仿真到 60s 结束.统计该场景下信道吞吐率的变化情况以及 DPS 算法对系统中各个参数的估计情况.

图 7 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结果作比较.图 7(a) 中的不同级别业务的信道吞吐率曲线是同类业务流吞吐率的累计之和.仿真的前 20s, $N_3=5, N_0=10$,两类业务单个流的吞吐率比值接近 4.0.20s 后,网络节点数目的增加,导致了信道吞吐率和单个流吞吐率比值经历了一个暂态过程.短暂的调整后,系统重新进入稳定,低级别业务 AC_0 牺牲了部分占用的带宽,降低了吞吐率,而 AC_3 由于节点数目的增加,信道吞吐率的累计和也随之增加,如图 7(a) 所示.然而,单个 AC_3 和 AC_0 业务流的信道吞吐率比值仍为 4.0 左右,如图 7(b) 所示.相同的现象也反映在 40s 以后.图 7(c) 和图 7(d) 描述了 DPS 算法对两类业务数目的估计值以及发送概率的调整值.与数值计算结果相同,节点数目的增加导致了两类业务发送概率的减小,但 AC_3 有较高的优先级别,因而其发送概率仍高于 AC_0 业务.

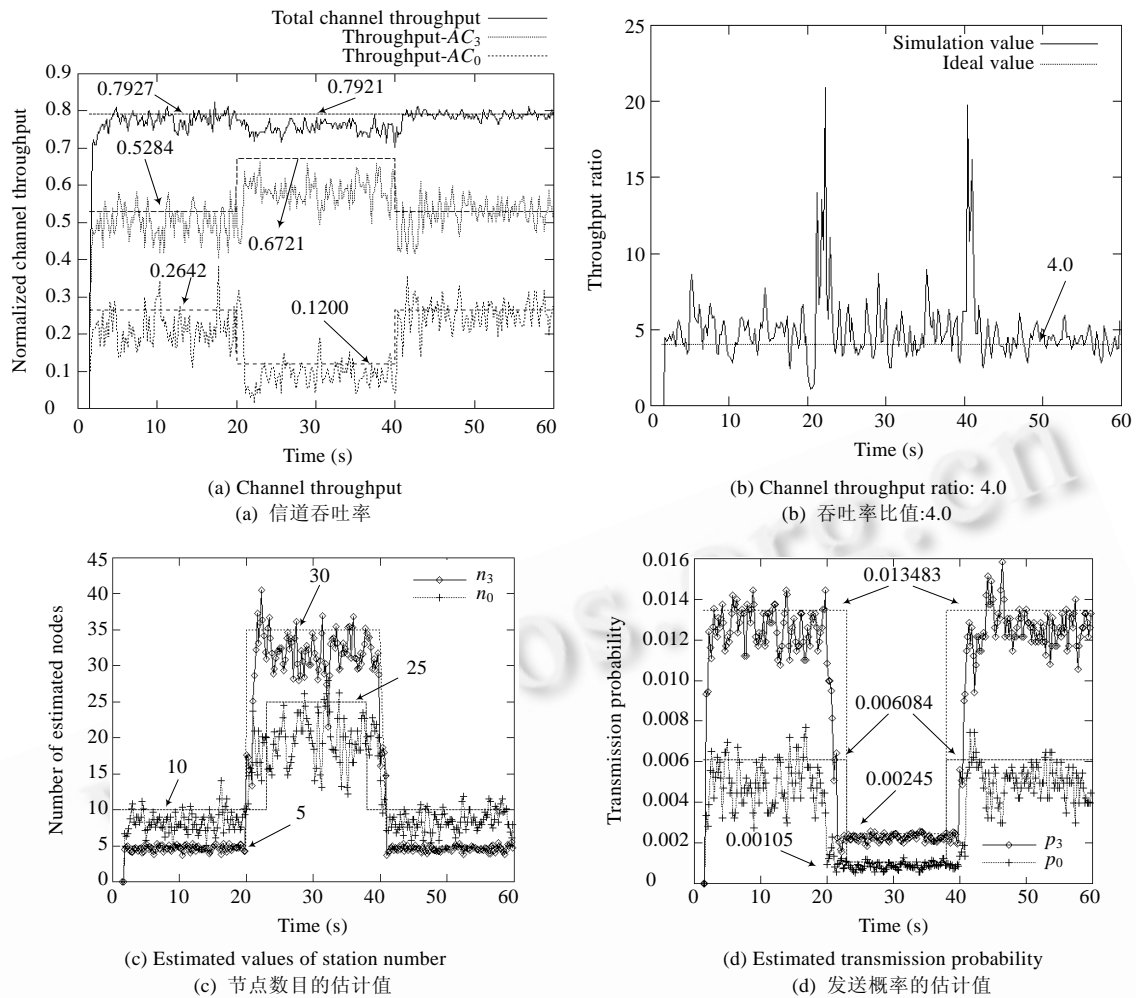


Fig.7 Simulation scenario 1

图 7 仿真场景 1

3.4.2 仿真场景 2

初始状态设置为 $N_3=N_0=10$, 逐步增加 N_3 和 N_0 到 80, 统计系统在稳态下的吞吐率估计值与最优值, 以及与标准的 IEEE 802.11e EDCA (设置 $CW_{min}(AC_3)=16, CW_{min}(AC_0)=64$) 在相同场景下的性能进行分析与比较.

图 8 给出的是通过使用 DPS 和 EDCA 分别统计两类优先级业务流在两种接入方式下获得的吞吐率. 从图中可以观察到, EDCA- AC_3 的吞吐率随竞争节点数目的增加逐步降级, 而 DPS- AC_3 吞吐率的平均值仍然维持在大约 0.62 左右, 受负载的影响小. 同样, DPS- AC_0 和 EDCA- AC_0 也有相同的对比结果. 因此, DPS 在获得最优信道吞吐率的同时, 为高级别业务提供了稳定的带宽, 克服了负载变化带来的影响, 既可以反映 EDCA 支持业务区分的特点, 又能实现系统性能的整体优化. 从图 9 中可以

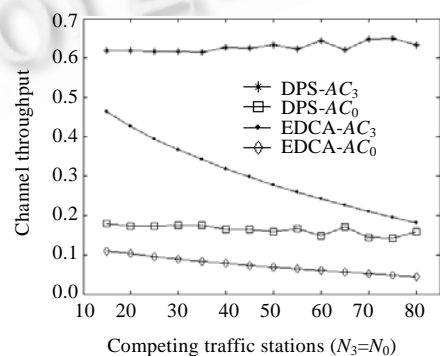


Fig.8 Stability of channel throughput

图 8 信道吞吐率的稳定性

看出,基于 AIFS 区分的 DPS 算法达到的信道吞吐率明显接近最优,受负载变化的影响很小.同时,在相同配置下,标准的 EDCA 机制随节点数目的增加,信道吞吐率明显降级,下降的幅度远远大于 DPS.

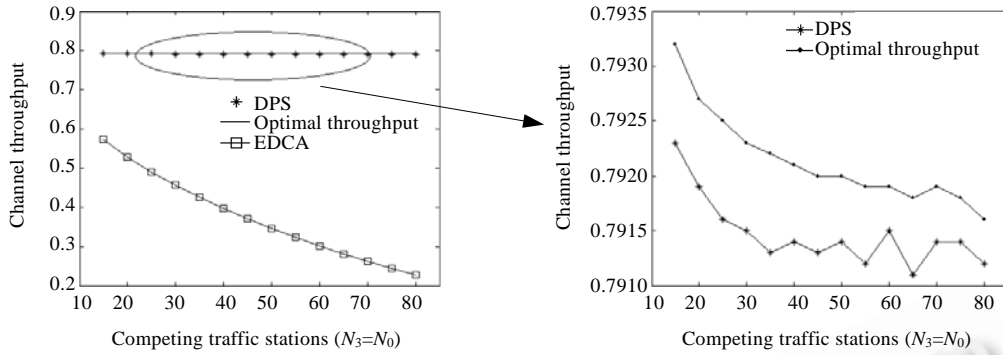


Fig.9 DPS and EDCA ($A_3=2, A_0=7, r_{3,0}=4.0$)

图 9 DPS 与 EDCA($A_3=2, A_0=7$ 以及 $r_{3,0}=4.0$)

3.4.3 仿真场景 3

在一个单位区域内,设置不同的 N_3 和 N_0 ,同时固定 A_3 为 2, A_0 分别取值 2,3,5,7,然后统计帧长为 200slots 和 20slots 情况下 DPS 与 EDCA 的信道吞吐率.

从图 10 中可以清楚地看到:相同帧长情况下, N_i 值增加,DPS 仍能实现最大信道吞吐率,而且几乎不受 (A_3, A_0) 的影响;而标准的 EDCA 没有采用自适应方案,随着 N_i 的增加,信道吞吐率明显降级.另一方面,较小的帧长对应较小的信道吞吐率,但在不同 (A_3, A_0) 取值的情况下,DPS 仍然维持了最大的信道吞吐率.

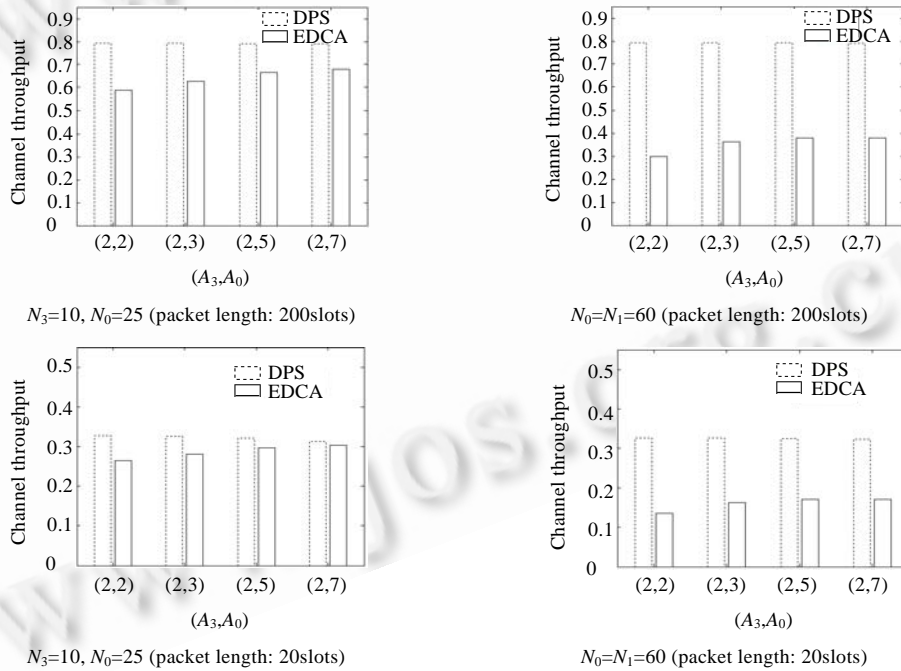


Fig.10 Impact of A_i value on DPS

图 10 A_i 值对 DPS 算法性能的影响

4 结束语

尽管实现系统性能整体优化的自适应 MAC 算法能够保证信道接入的公平性和高级别业务流获得带宽的稳定性,然而,以往此类算法都基于支持单级别业务的理论模型,并不适用于 EDCA 机制.同时,复杂的计算也使得算法并不适合实际的网络环境.首先,提出的模型不同于 Xiao 的 Markov 链模型,也不同于 Ge 的 p -persistent 模型.利用 EDCA 支持 QoS 区分的特点,该模型解决了将不同接入参数的不同级别业务统一到一个信道模型中进行分析的问题.经过仿真实验结果与数值分析结果的对比,验证了该模型的准确性,尤其是在分析信道吞吐率方面明显优于 Xiao 的 Markov 链模型.为了减小获得最大信道吞吐率的计算复杂度,我们研究了近似优化条件.根据研究发现,模型中考虑不同接入等级参数时,近似优化条件仍然成立.最后,我们提出了适用于提高 EDCA 系统性能的 DPS 自适应 MAC 算法,该算法要求系统时时满足优化条件,保证系统性能的整体优化.相关的数值计算与仿真实验结果验证了 DPS 算法适用于复杂多变的无线网络,同时也满足最大的信道吞吐率,保证不同优先级业务之间的 QoS 区分,在信道吞吐率方面明显优于标准的 IEEE 802.11e EDCA 机制.进一步的工作是,还需要研究 DPS 算法在隐藏终端和非饱和条件下的优化方法.

致谢 在此,我们向对本文的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] Ziouna E, Antonakopoulous T. CSMA/CA performance under high traffic conditions: Throughput and delay analysis. *Computer and Communications*, 2002,25:313–321.
- [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] Hui J, Devetsikiotis M. Performance analysis of IEEE 802.11e EDCA by a unified model. In: *Proc. of the Globecom*. 2004. 754–757. <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/9481/30078/01378061.pdf>
- [6] Ge Y, Hou JC, Chio S. An analytical model for service differentiation in IEEE 802.11. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC 2003)*. 2003. 1157–1162. <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/8564/27114/01204548.pdf>
- [7] Engelstad PE, Osterbo ON. The delay distribution of IEEE 802.11e EDCA and 802.11 DCF. In: *Proc. of the 5th Int'l IEEE Workshop on Wireless Local Networks (WLN 2005)*. Sydney, 2005. 87–96. <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/10845/34183/01629394.pdf>
- [8] Bai X, Mao YM, Xie J. Performance investigation of IEEE 802.11e EDCA under non-saturation condition based on the M/G/1/K model. In: *Proc. of the 2nd IEEE Conf. on Industrial Electronic and Applications (ICIEA 2007)*. 2007. 298–304. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4318419
- [9] Chen X, Zhai H, Fang Y. Enhancing the IEEE 802.11e in QoS support: Analysis and mechanism. In: *Proc. of the 2nd Int'l Conf. on Quality of Service in Heterogeneous Wired/Wireless Networks (Qshine 2005)*. 2005. 122–134. <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/10400/33050/01551083.pdf>
- [10] Romdhani L, Qiang N. Adaptive EDCF: Enhanced service differentiation for IEEE 802.11 wireless ad-hoc networks. In: *Proc. of the IEEE WCNC 2003*. 2003. 2956–2961. http://www-sop.inria.fr/planete/qni/52_03.PDF
- [11] Aad I, Castelluccia C. Differentiation mechanism for IEEE 802.11. In: *Proc. of the IEEE Infocom*. 2001. 209–218. <http://ieeexplore.ieee.org/ielx5/7321/19793/00916703.pdf?arnumber=916703>
- [12] Yan S, Zhuo Y, Wu S, Guo W. Priority backoff algorithm for IEEE 802.11 DCF. In: *Proc. of the Int'l Conf. on Communications, Circuit and Systems (ICCCAS 2004)*. 2004. 423–427. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1346126

- [13] Choi S, Del Prado J, Mangold S, Shankar S. IEEE 802.11e contention-based channel access (EDCF) performance evaluation. In: Proc. of the IEEE ICC. 2003. 1151–1156. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1204546
- [14] Cheng RG, Chang JC, Shih CY, Chen YS. A new scheme to achieve weighted fairness for WLAN supporting multimedia services. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2006,5(5):1095–1102.
- [15] Ge Y, Hou JC, Choi S. An analytic study of tuning systems parameters in IEEE 802.11e enhanced distributed channel access. Computer networks, 2007,51(8):1955–1980.
- [16] Juliana F, Nelson LS. Tuning of 802.11e network parameters. IEEE Communication Letters, 2006,10(8):611–613.
- [17] Bianchi G. Performance analysis of the IEEE802.11 distributed coordination function. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2000,18(3):535–547.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Wei Z, Rose QH, Yi Q, Yu C. An adaptive MAC scheme to achieve high channel throughput and QoS differentiation in a heterogeneous WLAN. In: Proc. of the Qshine 2006. Waterloo, 2006. 166–176. <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1185407>
- [22] Li H, Wu J, Ma H, Zhang PY. 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>
- [23] Rose QH, 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/ielx5/11060/34936/01696545.pdf>
- [24] Raffaele B, Marco C, Gregori E. Optimal capacity of p -persistent CSMA/CA protocols. IEEE Communication Letters, 2003,7(3): 139–141.
- [25] <http://140.116.72.80/~smallko/ns2/ns2.htm>

附中文参考文献:

- [22] 李贺武, 吴建平, 马辉, 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,网络系统性能优化.



毛玉明(1954—),男,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.



冷甦鹏(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.