

# WLAN 中基于协作博弈的比例公平性带宽分配机制

张国鹏, 张海林, 赵力强

(西安电子科技大学 综合业务网理论及关键技术国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

**摘要:** 在 IEEE 802.11 无线局域网(WLAN)中,从协作博弈论的角度提出一种按用户流权重成比例(比例公平性)的带宽分配方案.通过建立用户流基于吞吐量的效用函数,将比例公平性的带宽分配过程建模为以整体效用最大化为前提,以个体效用最大化为目的的用户流之间的协作博弈.依据此博弈的纳什议价解(即用户流获取比例公平性带宽份额的最优信道竞争参数  $CW_{min}$ ),提出了带宽分配方案 PF-DCF.仿真结果表明,与 802.11e EDCA 相比,PF-DCF 不仅有效的解决了低权重用户流无法获取系统带宽的问题,而且将 WLAN 在饱和状态下的吞吐量提高 15%.

**关键词:** 无线局域网;比例公平性;IEEE 802.11;协作博弈;纳什议价解

**中图分类号:** TN915.04      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-2400(2009)01-0087-07

## Cooperative game theoretic bandwidth sharing scheme for proportional fairness in WLAN

ZHANG Guo-peng, ZHANG Hai-lin, ZHAO Li-qiang

(State Key Lab. of Integrated Service Networks, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

**Abstract:** To ensure proportional fairness (i. e., the system bandwidth is shared among the user flows according to their weights) in the IEEE 802.11 wireless LANs, a cooperative game theoretic bandwidth sharing scheme, called PF-DCF, is proposed. By setting the throughput based utility function, the bandwidth sharing procedure is modeled as a cooperative game. In the game, the user flows intend to maximize their utilities under the premise that the system utility is maximized. According to the Nash bargaining solution(NBS) of the game, i. e., the user stations' optimal packet transmission probabilities to acquire proportional fairness, a bandwidth sharing scheme (PF-DCF) is developed. Simulation results indicate that when using PF-DCF in the ad hoc mode, the user flows can fairly share the system bandwidth by broadcasting their weights information and adjust the backoff parameter ( $CW_{min}$ ) to the NBS. In addition, by comparison with 802.11e EDCA, PF-DCF can effectively utilize the channel resource.

**Key Words:** wireless LAN; proportional fairness; IEEE 802.11; cooperative game; Nash bargaining solution

IEEE 802.11 协议是无线局域网(WLAN)的实施标准,DCF 是其基本的媒体接入控制(MAC)机制. DCF 对不同类型的数据业务提供一致的尽力而为(best effort)服务,最新的 IEEE 802.11e EDCA(enhanced DCF access)则能对不同类型的业务流进行按优先级的 QoS(Quality of Service)区分.文献[1]的研究表明:当系统负载较大时,EDCA 会使低优先级数据流出现“饥饿”现象(吞吐量长时间为 0),也称为公平性问题.因此,在 WLAN 中实现另一种 QoS 机制:按数据流权重成比例(比例公平性)的带宽分配就能有效的解决上述公平性问题.已提出的比例公平性解决方案过度依赖于集中式计算或过多的站点间信息交换,因此很难在实际的分布式 WLAN 系统中实现.如文献[2]提出的 DS-RWBO(Service Differentiated RWBO)算法要求集中计算并统一分配各竞争站点的最佳最小竞争窗口( $CW_{min}$ );文献[3]提出的 DFS(Distributed Fair

收稿日期:2007-12-01

基金项目:国家自然科学基金资助(60772317);陕西省自然科学基金基础研究计划资助(2006F30)

作者简介:张国鹏(1978-),男,西安电子科技大学博士研究生,E-mail:brahms\_zgp@163.com.

Queuing)算法则需要站点间进行准确的虚拟时钟同步;文献[4]提出的 P-MAC (Priority-based fair MAC)算法要求站点间交换竞争站点数和平均分组长度等信息.针对已有算法所存在的不足,笔者通过建立基于用户流吞吐量的效用函数,从协作博弈的角度出发,提出一种比例公平性带宽分配方案.此方案不仅具有较强的分布式特性,即只需在站点间进行简单的权重信息交换即可获取系统带宽的公平分配,而且可以有效地提高无线信道资源的利用率.

## 1 博弈模型

IEEE 802.11 DCF 主要基于载波监测/碰撞避免(CSMA/CA)多址接入协议和二进制时隙退避策略.使用 DCF 协议,WLAN 中的用户站点通过对共享信道资源的分布式竞争来获取系统带宽,在负载较大时可能造成网络中分组碰撞的加剧,从而导致信道资源得不到有效利用.因此,合理的带宽分配方案应以最大化信道资源利用率为前提.协作博弈论(cooperative game theory)<sup>[5-8]</sup>正是在分布式决策环境下,探讨博弈者之间如何通过相互协商达到公平有效地利用系统资源问题的.协作博弈的分析结果称为纳什议价解(Nash bargaining solution),它具有比例公平性,或称为帕累托最优性(Pareto optimum)<sup>[5,8]</sup>.

### 1.1 协作博弈建模

博弈建模的首要工作是选取能够反映博弈者资源需求特性的效用函数.根据文献[7],设网络的当前站点数为  $N$ ,假设任意站点  $i$  ( $1 \leq i \leq N$ ) 在任意时刻仅产生一个数据流,定义站点  $i$  的效用是它可获取的系统带宽  $r_i$ .为了避免出现用户流的饥饿现象,假设每个用户流的最低带宽需求为  $r_i^{\min}$ .根据文献[5]中的定理 2.1,可定义 WLAN 中用户流竞争系统带宽资源的协作博弈问题为

$$\begin{aligned} S: \quad & Y_1 = \max_r \prod_{1 \leq i \leq N} (r_i - r_i^{\min}) \quad , \\ \text{subject to:} \quad & \sum_i r_i \leq B, \quad r_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, N \quad , \end{aligned} \quad (1)$$

其中  $\mathbf{r} = (r_1, \dots, r_N)$  为全部用户流对系统当前可用带宽  $B$  的任意分配方案.对最优化问题(1)中的目标函数取对数,则优化问题(1)可以等效为

$$\begin{aligned} S: \quad & Y_2 = \max_r \sum_{i=1}^N \ln(r_i - r_i^{\min}) \quad , \\ \text{subject to:} \quad & \sum_i r_i \leq B, \quad r_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, N \quad , \end{aligned} \quad (2)$$

令任意用户  $i$  的最小带宽需求为  $r_i^{\min} = 0$ ,权重参数为  $w_i$  ( $w_i > 0$ ).根据文献[5]中的定义 2.2,权重参数  $w_i$  反映了站点  $i$  带宽需求为  $(w_i / \sum_{i=1}^N w_i)B$  的比例公平性.最终,由文献[5]中的式(1)和文献[7]中的式(4),WLAN 中用户流比例公平性的带宽资源竞争博弈可建模为

$$\begin{aligned} S: \quad & Y_3 = \max_r \sum_{i=1}^N w_i \ln(r_i) \quad , \\ \text{subject to:} \quad & \sum_i r_i \leq B, \quad r_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, N \quad , \end{aligned} \quad (3)$$

在协作博弈(3)中,任意用户  $i$  比例公平性的效用函数  $w_i \ln(r_i)$  满足经济学边际效用递减的规律<sup>[9]</sup>,用户  $i$  流获取的带宽  $r_i$  越高,则其效用值  $w_i \ln(r_i)$  就越高,但每增加一单位带宽所带来的效用值较之上一个单位则单调递减,即效用函数  $w_i \ln(r_i)$  满足如下数学性质:  $\partial(w_i \ln(r_i)) / \partial r_i > 0, \partial^2(w_i \ln(r_i)) / \partial r_i^2 < 0$ .由于最优化问题  $S$  的约束条件为线性不等式组,且  $r_i$  为非负,并有上下边界 ( $0 \leq r_i \leq B$ ),因此  $S$  的可行解集  $\{\mathbf{r}\}$  为非空凸集<sup>[10]</sup>.又因为  $w_i \ln(r_i)$  为单调递增的凸函数,故  $S$  存在惟一的可行解  $\mathbf{r}^* = (r_1^*, \dots, r_N^*)$ <sup>[10]</sup>.

根据文献[10],协作博弈(3)属于约束最优化问题,其局部最优解的一阶必要条件满足 KKT (Karush-Kuhn-Tucher)定理.定义问题(3)的 Lagrange 函数为

$$L(\mathbf{r}, \theta) = \sum_{i=1}^N w_i \ln(r_i) - \theta \sum_{i=1}^N r_i = \sum_{i=1}^N (w_i \ln(r_i) - \theta r_i) \quad , \quad (4)$$

其中  $\theta$  为 Lagrange 乘子, 可视作网络当前单位带宽的竞价<sup>[5]</sup>,  $\theta$  反映了网络当前拥塞状况. 结合式(4), 协作博弈(3)可进一步等效为

$$\begin{aligned} U: \quad & \max (\omega_i \ln(r_i) - \theta r_i) \quad , \\ \text{subject to:} \quad & 0 \leq r_i \leq B, \quad i = 1, \dots, N \quad , \end{aligned} \quad (5)$$

至此, 最优化问题(3)和问题(5)完成了对用户流进行比例公平性带宽分配的协作博弈建模. 给定网络的拥塞竞价  $\theta$  和用户流权重  $\omega_i$ , 站点  $i$  只需最大化其效用  $(\omega_i \ln(r_i) - \theta r_i)$ , 即可获取比例公平性的系统带宽份额.

## 1.2 竞争策略选择

在使用 802.11 DCF 的 WLAN 中, 某用户的吞吐量  $r$  由各站点在给定时间隙的分组发送概率  $\tau$  所决定, 因此  $\tau$  可视为用户站点在博弈中的竞争策略. 根据文献[11]中的式(3), 系统处于饱和状态下(各站点始终有数据分组等待发送), 任意用户站点  $i$  ( $1 \leq i \leq N$ ) 的吞吐量  $r_i$  和站点竞争策略  $\tau_i$  之间的关系式为

$$r_i = P_i^s \bar{L}_i / (P^s T^s + P^c T^c + P^i T^i) \quad , \quad (6)$$

其中  $P_i^s = \tau_i \prod_{j \neq i} (1 - \tau_j)$  为站点  $i$  分组被成功发送的概率,  $P^s = \sum_k P_k^s$ ;  $\bar{L}_i$  是站点  $i$  的分组平均长度;  $T^s$  是由于成功发送平均长度为  $\bar{L}_i$  (包括各种帧间隔 IFS 的持续时间)的分组, 信道被检测为忙的时间;  $P^i = \prod_k (1 - \tau_k)$  是信道的空闲概率,  $T^i$  是信道的平均空闲时间;  $P^c = 1 - P^i - \sum_k P_k^s$  为信道中的分组碰撞概率,  $T^c$  是由于发生碰撞所导致的信道被检测为忙的平均时间.

对式(6)进行简化处理. 在 DCF 中任意站点  $i$  的发送概率  $\tau_i \ll 1$ <sup>[12]</sup>, 故有

$$\prod_k (1 - \tau_k) \approx 1 - \sum_k \tau_k \quad , \quad (7)$$

此外, 由于  $T^i$  被定义为单位时间隙的长度<sup>[12]</sup>, 故可进行  $T$  和  $T^c$  对  $T^i$  的归一化处理, 并结合式(7), 将式(6)简化为

$$r_i = \frac{\tau_i (1 - A_{-i}) \bar{L}_i}{E[\bar{T}]} \quad , \quad E[\bar{T}] = \sum_k \tau_k (1 - A_{-k}) \bar{T}^s + \sum_k \tau_k A_{-k} \bar{T}^c + 1 - A \quad , \quad (8)$$

其中  $A = \sum_k \tau_k$  为系统中  $N$  个站点的发送概率之和,  $A_{-k} = \sum_{j \neq k} \tau_j$ ,  $\bar{T}^s$  和  $\bar{T}^c$  分别为  $T^s$  和  $T^c$  对  $T^i$  进行归一化处理后的结果. 在竞争站点数较多, 系统负载较大的情况下有  $\tau_i \ll A$ , 继而  $A_{-k} = \sum_{j \neq k} \tau_j \approx \sum_j \tau_j = A$ . 因此式(8)可进一步简化为

$$r_i = \frac{\tau_i (1 - A) \bar{L}_i}{E[\bar{T}]} \quad , \quad E[\bar{T}] = A(1 - A) \bar{T}^s + A^2 \bar{T}^c + 1 - A \quad , \quad (9)$$

式(9)即为此文所采用的任意站点  $i$  的吞吐量  $r_i$  和其竞争策略  $\tau_i$  的关系式.

## 1.3 博弈的纳什议价解

协作博弈分析的目的在于求解博弈的纳什议价解, 也就是全部博弈者的比例公平性的竞争策略组合. 在 WLAN 比例公平性带宽分配博弈中, 博弈的纳什议价解应该是与最优带宽分配方案  $\mathbf{r}^* = (r_1^*, \dots, r_N^*)$  相对应的用户竞争策略组合  $\boldsymbol{\tau}^* = (\tau_1^*, \dots, \tau_N^*)$ . 为此, 先要建立站点竞争策略  $\boldsymbol{\tau}$  和最优化问题 S 以及 U 之间的关系式. 结合式(9), 重定义式(3)中的问题 S 为

$$\begin{aligned} S^r: \quad & Y_4 = \max_{\boldsymbol{\tau}} \sum_{i=1}^N \omega_i \ln(r_i) \quad , \\ \text{subject to:} \quad & \sum_{i=1}^N \tau_i \leq 1, \quad \tau_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, N \quad , \end{aligned} \quad (10)$$

重定义式(5)中的用户问题 U 为

$$\begin{aligned} U^r: \quad & \max_{\tau_i} (\omega_i \ln(r_i) - \theta r_i) \quad , \\ \text{subject to:} \quad & \sum_{i=1}^N \tau_i \leq 1, \quad \tau_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, N \quad , \end{aligned} \quad (11)$$

将用户  $i$  的效用函数表示为  $f(r_i) = \omega_i \ln(r_i)$ , 下面求解博弈的纳什议价解. 式(10)中所定义的最优化问题

$S^c$  的一阶必要条件为

$$\frac{\partial(\sum_{i=1}^N f(r_i))}{\partial \tau_i} = \frac{\partial f(r_i)}{\partial \tau_i} + \sum_{j \neq i} \frac{\partial f(r_j)}{\partial \tau_i} = 0, \quad (12)$$

将式(9)代入式(12),可得(求解过程请参见 3.1 节):

$$\frac{\partial f(r_i)}{\partial \tau_i} = \bar{L}_i \frac{(1-A)^2 \bar{T}^s + A(2-A) \bar{T}^c}{E^2[\bar{T}]} \sum_{j \neq i} \frac{df(r_j)}{dr_j} \tau_j, \quad (13)$$

对于式(5)和式(11)所定义的最优化问题  $U$  和  $U^c$ , 其一阶必要条件分别为

$$\frac{du(r_j)}{dr_j} = \frac{df(r_j)}{dr_j} - \theta = 0, \quad (14)$$

$$\frac{\partial u(r_i)}{\partial \tau_i} = \frac{\partial f(r_i)}{\partial \tau_i} - \theta \frac{dr_i}{d\tau_i} = 0, \quad (15)$$

将式(9)代入式(15),再将其结果与式(13)联立(可参考 3.1 对式(13)的求解过程),可得:

$$\theta = \frac{(1-A)^2 \bar{T}^s + A(2-A) \bar{T}^c}{(1-A)E[\bar{T}]} \sum_{j \neq i} \frac{df(r_j)}{dr_j} \tau_j, \quad (16)$$

再将式(14)代入式(16),可得(过程请参见 3.2):

$$A((1-A)^2 \bar{T}^s + A(2-A) \bar{T}^c) / ((1-A)E[\bar{T}]) = 1, \quad (17)$$

其有惟一解:

$$A^* = \sum_i \tau_i^* = 1 / ((\bar{T}^c)^{1/2} + 1). \quad (18)$$

将式(18)代入式(9),并按照比例公平性原则,即  $r_i = \frac{\omega_i}{\sum_{i=1}^N \omega_i} B = \frac{\omega_i}{\sum_{i=1}^N \omega_i} \sum_{i=1}^N r_i$  可得:

$$\frac{\tau_i(1-A^*)\bar{L}_i}{E[\bar{T}]} = \frac{\omega_i}{\sum_{i=1}^N \omega_i} \sum_{i=1}^N \frac{\tau_i(1-A^*)\bar{L}_i}{E[\bar{T}]}, \quad (19)$$

$$\tau_i^* = \frac{\omega_i}{\sum_{j=1}^N \omega_j} \sum_{j=1}^N \tau_j = \frac{\omega_i}{\sum_{j=1}^N \omega_j} A^*, \quad i = 1, \dots, N. \quad (20)$$

因此,比例公平性带宽分配博弈的纳什议价解即为所有站点的最优发送策略组合:  $\tau^* = (\tau_1^*, \dots, \tau_N^*)$ .

由式(18)和(20)可见,任意站点  $i$  获取比例公平性系统带宽份额的策略  $\tau_i^*$  仅与信道的平均碰撞检测时间  $T^c$  和各站点的权重信息  $\omega_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ) 相关. 其中,  $T^c$  可通过文献[12]中的式(14)由各站点直接计算得到;对于权重信息,当 WLAN 工作在 Ad Hoc 模式下时,可通过站点间的信息广播进行获取;当 WLAN 工作在 AP(接入点)模式下时,可由 AP 进行统一的分配. 因此,与文献[2-4]中所给出的比例公平性带宽分配方案相比,实现笔者所给出的纳什议价解策略所需获取的外部信息大大减少,满足了 WLAN 分布式体系结构的需要. 另外,实现纳什议价解策略的算法复杂度很低,且与 802.11 DCF 具有较强的兼容性(见仿真部分).

## 2 仿真分析

使用仿真平台 NS-2,笔者在 IEEE 802.11 DCF 的基础上实现了所提出的基于协作博弈的比例公平性带宽分配方案,将其称之为 PF-DCF (Proportional Fairness DCF). 下面对其性能进行仿真实验. 仿真中,物理层参数的设置服从 IEEE 802.11b<sup>[13]</sup> 协议,如表 1 所示. 系统工作在 802.11 的 DATA/ACK 接入模式下,根据文献[12]中的式(14),每个站点可根据式(21)估计信道的平均碰撞检测时间  $T^c$ .

$$T^c = T^{\text{PHY}} + (\bar{L} + 34)/R + T^{\text{DIFS}} + \sigma, \quad (21)$$

其中  $R$  为信道的数据传输速率,  $\sigma$  为电磁波的传播时延,  $\bar{L}$  为发生碰撞的数据帧中最大帧长的平均值(包括

34 bytes 的 MAC 层协议头),  $T^{\text{PHY}}$  是发送物理层协议头的时间开销,  $T^{\text{DIFS}}$  为 DIFS 的持续时间. 由于 PF-DCF 在 802.11 DCF 基础上实现, 故可通过调节站点的初始竞争窗口大小来实现其均衡竞争策略  $\tau_i^*$ . 仿真中, 各站点使用  $\tau_i^* = 2 / (\text{CW}_{\min,i} + 1)$  调整其的初始竞争窗口  $\text{CW}_{\min,i}$  大小.

表 1 仿真参数设置

参数名	参数值	参数名	参数值
信道速率/(Mb · s <sup>-1</sup> )	2	ACK/ $\mu\text{s}$	112
aSlotTime/ $\mu\text{s}$	20	SIFS/ $\mu\text{s}$	10
最大重传次数	$r = 7$	DIFS/ $\mu\text{s}$	50
MAC Header/ $\mu\text{s}$	144	$\text{CW}_{\min}$ /slots	32
PHY Header/ $\mu\text{s}$	192	$\text{CW}_{\min}$ /slots	1 024

在 250 m × 250 m 的平面上随机放置 10 个移动站点, 分为 5 对, 仿真持续 40 s. 仿真中, 每一对站点中的发送站点始终采用 UDP 协议以速率 1 Mb/s 向接收站点传输分组长度为 512 byte 的 CBR (Constant Bit Rate) 数据流, 且各发送站点数据流的权重设置为 [6 4 2.5 2.5 1]. 系统工作在 Ad Hoc 模式下, 各站点在开始数据传输前在网络中广播自己的权重信息. 仿真结束后, 5 个 CBR 流的吞吐量以及系统整体吞吐量如图 1 所示; 每个 CBR 流实际得到的带宽比率如表 2 所示. 图 1 说明 PF-DCF 可以根据每个数据流的权重进行服务区分, 而且信道速率带宽获得较高的利用率 (76.5%). 表 2 表明 PF-DCF 可以较精确的根据每个数据流的权重比例来分配带宽.

表 2 PF-DCF 按数据流权重的带宽分配的统计结果

数据流	数据流权重	吞吐量/(Mb · s <sup>-1</sup> )	带宽比率
1	6	0.5929	5.9
2	4	0.3918	3.9
3	2.5	0.2469	2.5
4	2.5	0.2413	2.4
5	1	0.0971	0.9

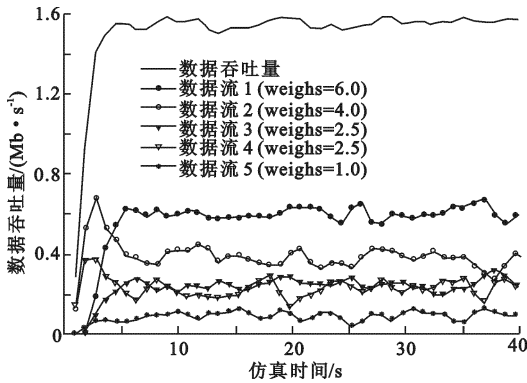


图 1 EDCA<sup>+</sup> 按数据流权重的带宽分配

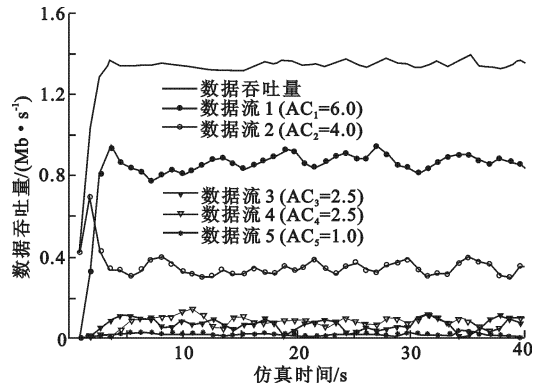


图 2 EDCA 按相对优先级的带宽分配

作为比较, 将上述 PF-DCF 仿真中的 5 个数据流分别对应为 EDCA<sup>[14]</sup> 中的 1 个 AC<sub>3</sub> 业务, 1 个 AC<sub>2</sub> 业务, 2 个 AC<sub>1</sub> 业务和 1 个 AC<sub>0</sub> 业务, 其他仿真环境参数均相同, 则结果如图 2 所示. 可见 EDCA 中低优先级 (AC<sub>0</sub>, AC<sub>1</sub>) 业务的吞吐量趋近于 0, EDCA 系统存在不公平现象; 且系统吞吐量仅为 1.34 Mb/s, 比 PF-DCF 低 200 kb/s.

以上仿真结果说明: PF-DCF 不仅有效地实现了比例公平性的带宽分配, 且与 EDCA 相比, 在有效地保证了系统中业务流最小带宽需求的同时, 更加有效的利用了宝贵的无线信道资源.

### 3 算法求解

(3.1) 由式(9)可得

$$\frac{dE[\bar{T}]}{d\tau_i} = \frac{d[A(1-A)\bar{T}^s + A^2\bar{T}^c + 1 - A]}{d\tau_i} = (1-2A)\bar{T}^s + 2A\bar{T}^c - 1 \quad (22)$$

$$\frac{dr_j}{d\tau_i} = \frac{d}{d\tau_i} \left( \frac{\tau_j(1-A)}{E[\bar{T}]} \right) = \bar{L}_i \frac{-\tau_j E[\bar{T}] - \tau_j(1-A) (dE[\bar{T}]/d\tau_i)}{E^2[\bar{T}]} \quad (23)$$

将式(22)代入(23)可得

$$\frac{dr_j}{d\tau_i} = \bar{L}_i \tau_j \frac{(1-A)^2\bar{T}^s + A(2-A)\bar{T}^c}{E^2[\bar{T}]} \quad (24)$$

由式(12)有

$$\frac{\partial f(r_i)}{\partial \tau_i} = - \sum_{j \neq i} \frac{df(r_j)}{d\tau_i} = - \sum_{j \neq i} \frac{df(r_j)}{dr_j} \frac{dr_j}{d\tau_i} \quad (25)$$

将式(24)代入式(25)则有

$$\frac{\partial f(r_i)}{\partial \tau_i} = \bar{L}_i \frac{(1-A)^2\bar{T}^s + A(2-A)\bar{T}^c}{E^2[\bar{T}]} \sum_{j \neq i} \frac{df(r_j)}{dr_j} \tau_j \quad (26)$$

(3.2) 将式(14)即  $(\theta = df(r_j)/dr_j)$  代入式(13)可得

$$\theta = \frac{(1-A)^2\bar{T}^s + A(2-A)\bar{T}^c}{(1-A)E[\bar{T}]} \sum_{j \neq i} \theta \tau_j \quad (26)$$

$$1 = \frac{(1-A)^2\bar{T}^s + A(2-A)\bar{T}^c}{(1-A)E[\bar{T}]} \sum_{j \neq i} \tau_j \quad (27)$$

由假设,在系统负载较大、竞争站点数较多的情况下  $\tau_i \ll A$ , 则有

$$A - \tau_i = \sum_{j \neq i} \tau_j \approx \sum_j \tau_j = A \quad (28)$$

将式(27)和(28)联立则有

$$1 = \frac{(1-A)^2\bar{T}^s + A(2-A)\bar{T}^c}{(1-A)E[\bar{T}]} A$$

## 4 结束语

通过建立基于用户流吞吐量的效用函数,从协作博弈论的角度提出一种带宽分配方案(PF-DCF),在 IEEE 802.11 无线局域网中实现用户流之间的比例公平性资源分配。仿真结果表明,使用 PF-DCF 网络中的用户站点只需通过交换彼此的权重信息和简单的监测信道来调整各自的最小竞争窗口参数  $CW_{\min}$ ,就能在最优利用信道资源的前提下,较精确的实现比例公平性的带宽资源分配。此外,PF-DCF 和 802.11 DCF 具有良好的兼容性,可以方便的在 DCF 协议中实现。

### 参考文献:

- [1] Ni Q, Romdhani L, Turletti T. A Survey of QoS Enhancements for IEEE 802.11 WLAN [J]. Journal of Wireless Communications and Mobile Computing, 2004, 1(4):1-20.
- [2] 李云, 隆克平. IEEE 802.11 无线局域网中一种支持业务区分的回退算法 [J]. 电子学报, 2006, 34(10): 1877-1880.  
Li Yun, Long Keping. A Novel Service Differentiated Backoff Algorithm in IEEE 802.11 WLAN [J]. Chinese Journal of Electronics, 2006, 34(10): 1877-1880.
- [3] Vaidya N, Bahl P, Gupta S. Distributed Fair Scheduling in Wireless LAN [J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2005, 6(4): 616-629.
- [4] Qiao Daji, Shin Kang G. Achieving Efficient Channel Utilization and Weighted Fairness for Data Communications in IEEE 802.11 WLAN under the DCF [C]//Proceedings of IEEE IWQoS'02. Miami Beach: IEEE, 2002: 227-236.
- [5] Haikel Yaiche, Mazumdar R R, Rosenberg C. A Game Theoretic Framework for Bandwidth Allocation and Pricing in Broadband Networks [J]. IEEE/ACM Trans on Networking, 2000, 8(5): 667-678.
- [6] 张惠娟, 周利华, 翟鸿鸣. 一种基于非合作博弈的均衡路由方法 [J]. 西安电子科技大学学报, 2007, 34(3): 398-401.

- Zhang Huijuan, Zhou Lihua, Zhai Hongming. Balanced Route Arithmetic Based Noncooperative Game Theory [J]. Journal Of Xidian University, 2007, 34(3): 398-401.
- [7] Fang Zuyuan, Bensaou B. Fair Bandwidth Sharing Algorithms Based on Game Theory Frameworks for Wireless Ad-hoc Networks [C]//Proceedings of IEEE INFOCOM'04. Miami: IEEE, 2004(2): 1284-1295.
- [8] Zhu Han, Zhu Ji, Liu K J R. Fair Multiuser Channel Allocation for OFDMA Networks Using Nash Bargaining Solutions and Coalitions [J]. IEEE Trans on Communications, 2005, 53(8): 1366-1376.
- [9] 牛志升, 王兰, 段翔. 多媒体 DS-CDMA 系统中基于效用函数的无线资源优化策略[J]. 电子学报, 2004, 32(10): 1594-1599.
- Niu Zhisheng, Wang Lan, Duan Xiang. Utility-based Radio Resource Optimization for Multimedia DS-CDMA Systems [J]. Chinese Journal of Electronics, 2004, 32(10): 1594-1599.
- [10] 薛毅. 最优化理论与方法 [M]. 北京:北京工业大学出版社, 2001.
- [11] NCCR-MICS. On Cheating in CSMA/CA Ad Hoc Networks [R]. Swiss: Mario Cagalj, Saurabh Ganeriwal, and Jean-Pierre Hubaux. 2004.
- [12] Bianchi G. Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function [J]. IEEE Journal of Selected Areas in Telecommunications, Wireless Series, 2000, 18(3): 535-547.
- [13] IEEE Std. 802.11 b. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications [S]. USA: IEEE, 1999.
- [14] Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Medium Access Control (MAC) Enhancements for Quality of Service (QoS), IEEE Standard 802.11e/D4.1 [S]. USA: IEEE, 2003.

(编辑: 高西全)

(上接第 73 页)

- [3] Kwakernaak H. Fuzzy Random Variables, I [J]. Information Scienc, 1978(15): 1-29.
- [4] Kwakernaak H. Fuzzy Random Variables, II [J]. Information Scienc, 1978(17): 253-278.
- [5] Miyakoshi M, Shimbo M. A Strong Law of Large Numbers for Fuzzy Random Variables[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1984, 12(2):133-142.
- [6] 吕恩琳. 模糊随机有限元平衡方程的摄动解法[J]. 应用数学和力学, 1997, 14(7): 631-638.
- Lü E L. Perturbational Solution for Fuzzy-stochastic Finite Element Equilibrium Equations[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 1997, 18(7): 631-638.
- [7] Lee B W, Lim O K. Application of Stochastic Finite Element Method to Optimal Design of Structures[J]. Computer & Structures, 1998, 68(1): 491-497.
- [8] 马洪波, 陈建军. 随机参数桁架结构的有限元与可靠性分析[J]. 西安电子科技大学学报, 2003, 30(1): 102-107.
- Ma Hongbo, Chen Jianjun. Analysis of Finite Element and Reliability for Stochastic Truss Structures[J]. Journal of Xidian University, 2003, 30(1): 102-107.
- [9] Youn B D, Choi K K, Park Y H. Hybrid Analysis Method for Reliability-based Design Optimization[J]. Journal of Mechanical Design, 2003, 125(2): 221-232.
- [10] Ma Juan, Chen Jianjun, Gao Wei. Dynamic Response Analysis of Fuzzy Stochastic Truss Structures Under Fuzzy Stochastic Excitation[J]. Computational Mechanics, 2006, 38(3): 283-292.
- [11] Alefeld G, Claudio D. The Basic Properties of Interval Arithmetic, Its Software Realizations and Some Applications[J]. Computers & Structures, 1998, 67(1): 3-8.

(编辑: 齐淑娟)