

一种基于预测式公平队列调度算法的 802.11e MAC 层机制

周晓波 卢汉成 李津生 洪佩琳

(中国科学技术大学电子工程与信息科学系 合肥 230027)

摘要: 在共享媒体的通信系统中, 队列调度的公平性是很重要的。该文在研究了 IEEE WLAN 已有的各种队列调度算法的基础上, 提出了一种预测式公平队列调度算法 (Predict Fair Queuing, PFQ), 并结合 IEEE 802.11e 的 EDCF(Enhanced Distributed Coordination Function) 机制提出一种基于 PFQ 的新的 MAC 层协议——P-EDCF(PFQ-based EDCF)。该协议通过引进 PFQ 算法来修改 EDCF 的优先级控制方式, 提供一种公平、高效的接入机制。仿真结果表明, 该机制很好地改善了 EDCF 的性能, 为各种类型业务提供了公平的服务。

关键词: IEEE 802.11e; WLAN; MAC; 队列调度算法; 公平性

中图分类号: TN915.07

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)03-0681-04

A Predict Fair Queuing Based IEEE 802.11e MAC Layer Protocol

Zhou Xiao-bo Lu Han-cheng Li Jin-sheng Hong Pei-lin

(Dept. EEIS., University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: Fairness is an important issue when accessing a shared wireless channel. This paper presents a new fair queuing method—PFQ, after studied some fairness solutions presented recently to IEEE WLAN. And then presents a new IEEE 802.11e MAC layer protocol—P-EDCF by introducing PFQ into EDCF(Enhanced Distributed Coordination Function). This new protocol is fairer and more efficient in channel accessing by modifying the priority control method of EDCF. The results of simulations proves that P-EDCF performs much fairer than EDCF without reducing the efficiency of the system.

Key words: IEEE 802.11e; WLAN; MAC; Queuing; Fairness

1 引言

无线网络技术在这几年发展迅速, IEEE 802.11 标准^[1]的提出, 使 IEEE WLAN 成为无线网络领域的事实标准。为了实现实时业务, 如语音, 视频等的支持, IEEE 802.11e 中引入了 QoS 控制, 其基本思路是把不同类型的业务映射到不同的队列中, 通过对队列调度算法的控制来实现 QoS 的控制^[2]。这样, 如何保证队列调度的公平性, 如何使系统性能满足给定的 QoS 参数成为需要研究的问题。

对 IEEE 802.11e 的公平性研究可以借鉴现有的对 IEEE 802.11 中 DCF(Distributed Coordination Function)机制下的队列调度算法的研究, 如文献[3]中提出的 DFS, 文献[4]提出的 DWRR 等。但是值得注意的是, 这些研究的目的是为了达到 STA 之间的公平性, 本文所讨论的 IEEE 802.11e EDCF 下的队列调度是为了达到 STA 内部各种业务之间的公平性。EDCF 中, 改变 CWmin(竞争窗口初始值)、竞争窗口(CW)的选择算法和帧间间隔(InterFrame Space, IFS)这几个参数可以控制协议的性能。本文所提出的 P-EDCF 机制就是通过预测算法实时调整各个队列所使用的 CWmin, 来控制各队列间的资源分配。以下的篇幅将详细介绍 P-EDCF

协议: 第 2 节介绍相关工作及基础知识, 第 3 节详细阐述 PFQ 算法的理论模型及实验验证并介绍 P-EDCF, 第 4 节介绍仿真设置及结果, 最后在第 5 节总结。

2 相关工作

IEEE 802.11e 的核心是 EDCF^[2]; 而 EDCF 以 DCF 为基础, DCF 中当一个 STA 有数据包要发送时, 则启动退避(Backoff)算法: 在 $[0, CW]$ 区间上随机选取一个值来初始化退避定时器, 其中 CW 称为“竞争窗口(Contention Window)”, 退避定时器只在信道连续空闲 DIFS(DCF InterFrame Space)后才开始启动, 每当空闲时间达到一个 Slot(Slot 是由物理层给出的一个参数)时, 其值减 1, 信道忙则定时器冻结; 当退避定时器减到 0, STA 就发送数据包, 若在一定时间内没有收到 ACK 帧则表明该数据包传输失败, 即认为有碰撞发生了。得知有碰撞发生, STA 就把 CW 加倍, 然后重复上述过程, 直到重传次数达到给定的某个阈值时, 宣告一次发送的失败。DCF 中定义了最小竞争窗口 CWmin(一般是 31)和最大竞争窗口 CWmax(一般是 1023), CW 的初始值取 CWmin, 重传一次就加倍, 到 $CW=CWmax$ 时就不再增加。

EDCF 在每个 STA 中, 定义了 8 个队列, 记为 AC_0-AC_7 ,

优先级从 AC_0 到 AC_7 依次降低。每个队列像 STA 一样参与信道竞争,不同的是,同一个 STA 内部的队列之间产生的碰撞不会造成资源的浪费,因为不必等到发出数据包就可以知道是否会碰撞。这种碰撞被称为虚拟碰撞(virtual collision)。为了提供优先级控制 EDCF: (1)把 DIFS 多样化成仲裁 IFS(Arbitrary IFS AIFS),对每个队列分配不同的 AIFS,优先级越高分配的 AIFS 越小。(2)为每个队列使用不同的 CWmin,优先级越高 CWmin 越小。

本文采用文献[3]中定义的公平性因子(fairness index)来衡量公平性:

$$\sigma = \frac{(\sum_i T_i / \omega_i)^2}{N \sum_i (T_i / \omega_i)^2} \quad (1)$$

其中 T_i 是队列 i 得到的带宽, ω_i 是分配给队列 i 的带宽权重。 σ 越接近 1 公平性越好。

关于 DCF 机制下各个 STA 之间的公平性研究已经很成熟了,例如文献[3-6]。结合无线网络环境,把现有的经典队列调度算法^[7]进行改造和简化,得到很多公平性的解决方案,如文献[3]提出的分布式公平调度协议(Distributed Fair Scheduling, DFS),就是通过引入 Wf2q^[8]和 SCFQ^[9],利用 SCFQ 算法动态修改 CW 达到公平调度的。这些研究对 EDCF 机制下 STA 内的队列调度公平性研究很有借鉴意义。

3 PFQ 和 P-EDCF

3.1 EDCF 的带宽分析模型

EDCF 下从总体看,信道被分割为一些交替的时间片:“空闲”和“忙碌”。由于是共享信道,每个队列所面对的时间片序列是一样的,如图 1。queue1 和 queue2 的退避过程: (1)退避开始后,在每一个“空闲”时间片内每个队列的退避定时器在等待了 AIFS 后开始递减(各队列 AIFS 不同); (2)一旦退避定时器触发,数据包就发送出去,发送出去的数据包可能成功发送或发生碰撞而损坏。需要注意的是碰撞分两种情形:一是与其他 STA 发出的数据包碰撞,这时信道状态被置为“忙碌”;另一种情形是虚拟碰撞,这种情况下两个队列立即开始新的退避过程,数据包不发送到信道上,如图 1 中箭头所示。

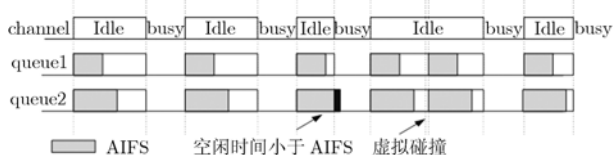


图 1 EDCF 下队列的数据包发送过程

在这里需要假设(假设 1)每个队列一直不空,也就是说一个数据包发送完成后会有下一个数据包立即进入竞争过

程。这种假设在业务繁忙且业务种类较多时是成立的。如何在业务较轻,尤其是业务种类很少时也能使该模型成立,将在 3.3 节叙述。

在该模型的基础上,可以得到在时间 T 内任一队列得到的带宽:

$$bw_0 = BW \times \frac{\bar{m}}{T} \times \left\{ \left[\sum_k (\text{idle}k) - \text{AIFS} - \text{vcolcnt} \times \text{AIFS} \right] / \bar{c}w - \text{colcnt} - \text{vcolcnt} \right\} \quad (2)$$

其中 BW 是系统的总带宽, \bar{m} 是数据包平均长度, $\text{idle}[k]$ 是一个“空闲”时间片的长度, colcnt 是(真实)碰撞的次数, vcolcnt 是虚拟碰撞的次数, $\bar{c}w$ 是窗口平均大小, AIFS 是该队列对应的帧间间隔。这些参数除 BW 外单位都是秒。

式(2)的意义是:全部可用于发送数据的时间 $\sum_k (\text{idle}[k] - \text{AIFS}) - \text{vcolcnt} \times \text{AIFS}$ 与平均窗口大小的比值(即发送的次数),然后去掉碰撞的次数(包括虚拟碰撞),就得到真正成功数据的次数;乘以平均数据包长度就是该队列实际占用的时间(即用于成功传送数据的时间);与总时间的比值也就是占用带宽的比例,乘以总带宽 BW 就得到该队列得到的带宽。需要测量的数据有 $\text{idle}[k]$, colcnt , vcolcnt 及 \bar{m} , 都很容易得到。

式(2)的正确性将在 3.2 节中用仿真数据证明。在式(2)的基础上,我们来对下一时间段内 $\bar{c}w$ 的值进行估计。首先从图 1 中的模型可以看出,测量出来的这些值(\bar{m} , $\text{idle}[k]$, colcnt , vcolcnt 和 $\bar{c}w$)并不是统计独立的,很大程度上取决于 AIFS 和 CWmin 这两个值,从 3.2 节的仿真中将看到, AIFS 的大小是决定性的因素,平均来看 CWmin 的变化对其他测量值的影响较小,这样我们认为(假设 2)仅仅改变 CWmin(正如 P-EDCF 所作的)时,其他测量值的改变是平缓的。有了假设 2,可以认为 \bar{m} , $\text{idle}[k]$, colcnt 和 vcolcnt 下一时段的增量等于这一时段的增量。通过带宽权值计算该队列希望得到的带宽即 bw_0 ;利用式(2)就可以得到下一时间段的 $\bar{c}w$,这样就可以参照 $\bar{c}w$ 来设定该队列下一时段的 CWmin,从而控制其获取的带宽——这就是 PFQ 的基本思想,其具体实施在 3.3 节叙述。

3.2 带宽分析模型的实验验证

这一节首先从基本 EDCF 机制开始,通过 ns2 仿真来研究 AIFS 和 CWmin 这两个参数对系统性能的影响,然后验证 3.1 节中由式(2)得到的带宽的预测值和测量值是否拟合。仿真中采用 infrastructure 模式,共 9 个 STA 和一个接入点(Access Point, AP),每个 STA 上启动 8 条流分别对应 8 个队列。拓扑结构如图 2,结果示于图 3—图 5。

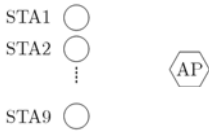


图 2 仿真拓扑图

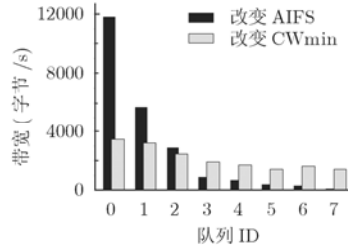


图 3 AIFS 和 CWmin 对带宽分配的影响

图 3 显示的是在设定不同的 AIFS 相同的 CWmin 时任一节点(这里选取 STA2)上 8 个队列获得的带宽, 及设定相同的 AIFS 不同的 CWmin 时 STA2 上 8 个队列获得的带宽。可以看出 CWmin 相同时, 虽然 AIFS 设置为等差 (公差为一个 Slot) 递增, 但队列获得的带宽却是类似指数减少的; 而当 AIFS 相同时, CWmin 等差(公差为 9)递增, 队列带宽的变化平缓。也就是说, AIFS 的变化比 CWmin 的变化对带宽分配的影响更明显, 这也验证了假设 2。因为 P-EDCF 并不改变 AIFS 的取值, 我们把图 3 所示的设定不同 AIFS 相同 CWmin 时带宽分配对应的权重记录为 $w[i](0 \leq i \leq 7)$ 。此后若要通过 CWmin 的改变来控制带宽分配, 都应该以 $w[i]$ 为基准。也就是说通过调整 CWmin 对带宽分配的修正不能过分背离这个基准, 否则会带来较大误差, 这是由 AIFS 对带宽分配的影响大于 CWmin 决定的。仿真中得到的 $w[i](0 \leq i \leq 7)$ 归一化后为 $\{0.44366, 0.288338, 0.147811, 0.045527, 0.034525, 0.019349, 0.016010, 0.00478\}$ 。

为了验证式(2)的正确性, 通过仿真给出在设定相同 CWmin, AIFS 等差递增时的带宽分配的估计值和测量值, 结果示于图 4。可以看出两组值拟合得很好, 式(2)在一定的误差范围内是可用的。事实上估计值与测量值之间相差一个因子 α_T , 在 3.3 节的讨论中将看到, 在实际的使用中我们考虑到了这个因子, 并自适应地调整它。

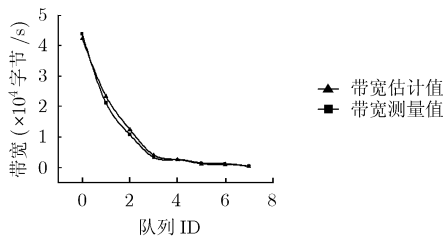


图 4 各队列的带宽测量值与估计值

3.3 P-EDCF 协议

接下来介绍 P-EDCF 协议。在前面的讨论中, 用到了假设 1, 即数据包一个接一个地进入发送程序, 之间不留空隙。因此在把 PFQ 用于 EDCF 时需要修改上层不同业务到 MAC 层优先级队列的映射机制, 使这个假设(假设 1)成立。本文中采用以下映射方式: 一个数据包到来时首先按照原始的映

射规程, 映射到某个队列 i , 然后依次扫描队列 0 到 $i-1$ (队列编号越小优先级越高), 如果 0 到 $j-1$ 都是非空, j 到 $i-1$ 为空, 则把该数据包填到队列 j ; 另外, 如果数据包 k 原始映射到 i , 最终填到 j , 而且紧接着的数据包 $k+1$ 原始映射也是到 i , 那么 $k+1$ 也应该填到 j , 而不是 $j+1$, 即便 j 非空。

3.2 节提到式(2)需要乘以一个因子 α_T , 在 P-EDCF 中, 我们引入带宽的实时测量值:

$$bw1 = BW \times \frac{\sum_i m[i]}{T} \quad (3)$$

其中 $m[i]$ 是 T 时间段内发出的每个数据包的长度, 单位是秒。在一个时间段 T 内利用式(2)计算 $bw0$, 利用式(3)计算 $bw1$, 其比值作为下一个时间段的 α_T 。

通过以上几点, 我们可以给出 \overline{cw} 的估计公式

$$\overline{cw}'[i+1] = \frac{IDLE'[i+1] - N'[i+1] \times AIFS - vcolent'[i+1] \times AIFS}{bw1[i+1] \times T} + colent'[i+1] + vcolent'[i+1] \quad (4)$$

其中 $IDLE'[i+1]$, $N'[i+1]$, $vcolent'[i+1]$, $\alpha_T'[i+1]$ 和 $\overline{m}[i+1]$ 是估计值。得到的 $\overline{cw}[i+1]$ 是下一时间段的 CW 的平均值。我们在 $\overline{cw}[i+1]$ 的邻域上的随机选取一个数作为 CWmin。随后, 退避过程中 CW 的选取同于 EDCF; P-EDCF 只用于 CWmin 的选取过程。

4 仿真及结果

在图 2 的拓扑上对以下 5 种情况分别仿真: (1)EDCF 下所有队列的 CWmin 相同但 AIFS 等差递增的情形(EDCF_cv); (2) EDCF 下所有队列的 CWmin 等差递增但 AIFS 相同的情形(EDCF_vc); (3) EDCF 下所有队列的 CWmin 和 AIFS 都等差递增的情形(EDCF_vv); (4)P-EDCF 的 CW 指数退避的情形(P-EDCF); (5)P-EDCF 下 CW 线性退避的情形(P-EDCF_ex)。5 种情况的环境相同; 归一化带宽分配权值均由公式(5)决定:

$$w[i] = \frac{1}{2.858 \times (5 - 0.5 \times i)}, \quad 0 \leq i \leq 7 \quad (5)$$

结果示于图 5, 图 6 和表 1。图 5 证明 P-EDCF 的带宽分配的可控性及公平性, 图 6 从另一个角度证明 P-EDCF 的公平性, 表 1 显示 P-EDCF 对系统整体性能的改善。

图 5 显示的是每个队列对 9 个 STA 取平均后的带宽与事先分配给它们的权重的比值, 比值越恒定表明各队列得到的带宽越符合事先分配的权值。从中可以看出 EDCF 比 P-EDCF 公平性明显要差, 这在 3.2 节已经论述过, 是因为 EDCF 的带宽分配实际上是不可控制的: 首先是 AIFS 的取值决定了带宽分配的基调是如同图 3 所示的指数递减型; 其次, 对 CWmin 的设置是非实时的, 没有考虑具体的信道使用情况, 只是事先写入到芯片中的。而与此相反, P-EDCF 机制下, 带宽是由 STA 根据分配给各个队列的带宽权重值,

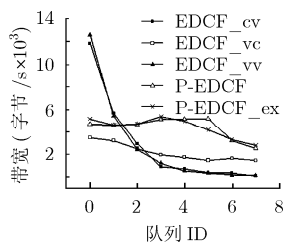


图5 系统各队列的带宽均值与权重的比值

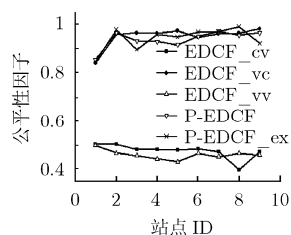


图6 各STA的公平性因子

表1 EDCF与P-EDCF系统总体性能比较

	吞吐量 (kBps)	平均延时 (ms)	延时抖动 (ms)	碰撞次数
EDCF_cv	105.85	596.84	347.30	3793
EDCF_vc	99.508	3951.53	1744.48	5262
EDCF_vv	107.116	6359.04	3764.69	3468
P-EDCF	115.64	376.88	163.94	1481
P-EDCF_ex	115.29	376.05	165.41	1304

结合信道使用情况实时调整的,这种调整是通过每次发送数据包前设定各个队列的 CW_{min} 来实现的。当然即便在 P-EDCF 下带宽的分配也不可能完全背离图 3 所示的趋势,这是由 AIFS 决定的, P-EDCF 没有改变 AIFS 的取值,因此会继承这种趋势。

图 6 是系统中各 STA 的公平性因子(fairness index),从图中可以看出, P-EDCF 的公平性因子维持在 0.95 以上,而 EDCF 则较小,只是在 0.4 附近,这进一步说明了 P-EDCF 的公平性要好于 EDCF。从图中不能很好地比较 P-EDCF 下线性退避和指数退避的差别。原因有两个:一是使用 P-EDCF 后,初始窗口 CW_{min} 的变化较大,在业务量大时是大于标准 CW_{min} 的,这造成了无论线性还是指数退避,经历很少次数的退避就达到了 CW_{Max} ,其差异体现不出来;另一个, P-EDCF 下碰撞次数大为减少,数据包只需很少次数的退避就成功发送了,而指数退避的特点(由慢到快退避)就来不及体现。

图 5,图 6 中 EDCF_vc 是一个例外,它的公平性可以达到 P-EDCF 相当的水平,这是因为 EDCF_vc 是各队列 AIFS 相同,那么很显然,通过改变 CW_{min} 来控制优先级和公平性就会很有效。但这也是有代价的,从表 1 中可以看到, EDCF_vc 下的系统性能受很大影响,因为有了不同大小的 AIFS 来区分选取了相同退避窗口的队列,碰撞(真实碰撞和虚拟碰撞)的概率将大大增加。如表 1 所示, P-EDCF 在改善了系统公平性的同时,并没有影响到系统的其他性能,反而有所提高,如系统吞吐量、延时和延时抖动等。P-EDCF 极大地减少了碰撞次数,这也是其吞吐量、平均延等等性能提高的原因。

5 结束语

本文首先提出了一种基于预测的公平队列调度算法 PFQ,并从仿真的角度验证其性能;随后提出 P-EDCF 协议,从仿真结果中可以看出,它在不影响系统其他性能的基础上,明显地改善了系统的公平性。该协议简单且易于在硬件实现,另外它不需要任何的先验参数,是一种自适应的调度机制。

但是 P-EDCF 还有进一步改进的可能,本文只是简单地用线性预测算法对 cw 的下一个取值进行预测,事实上可以在式(2)的基础上运用自适应滤波器的相关知识作一个更精确的预测模型,这可以成为下一步研究的切入点。

参考文献

- [1] IEEE. IEEE standard 802.11-wireless LAN Medium Access Control (MAC) and PHYsical layer (PHY) specification[S]. 1999: 72-85.
- [2] Grilo A and Nunes M. Performance Evaluation of IEEE 802.11e. Proc. of Personal, Indoor and Mobile Radio Communications(PIMRC), Lisbon, Portugal, Sept. 2002: 511-517.
- [3] Vaidya N H, Bahl P, and Gupa S. Distributed fair scheduling in a wireless LAN. Proc. of the Sixth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, Boston, USA, August 2000: 167-178.
- [4] 王辉,李津生,洪佩琳,802.11 WLAN中一种基于循环队列的分布式公平队列调度算法. 电子与信息学报,2004,26(10): 1540-1547.
- [5] Nandagopal T, Kim T-E, Gao X, and Vaduvur B. Achieving MAC layer fairness in wireless packet networks. Proc. Mobile Computing and Networking(MobiCom), Boston, MA, Aug. 2000: 87-98.
- [6] Banchs A. Distributed weighted fair queuing in 802.11 wireless LAN. Proc. of IEEE International Conference on Communications (ICC 2002), New York: NY, 2002, (5): 3121-3127.
- [7] 王重钢,隆克平,龚向阳,程时端. 分组交换网络中队列调度算法的研究及其展望. 电子学报,2001,29(4): 553-559.
- [8] Bennett J C R and Zhang H. WF2Q: Worst-case fair weighted fair queuing. Proc. of IEEE INFOCOM'96, 1996: 120-128.
- [9] Golestani, S J and Morrystown N J. A self-clocked fair queuing scheme for broadband application, INFOCOM '94. Networking for Global Communications. 13th Proceedings IEEE, Toronto, Ont., Canada, 1994, (2): 636-646.

周晓波: 男,1981年生,博士,研究方向为宽带无线网络技术和 DTN.

卢汉成: 男,1977年生,博士,讲师,研究方向为下一代互联网技术和无线网络技术.

李津生: 男,1937年生,教授,研究方向为信息通信网技术.

洪佩琳: 女,1960年生,教授,研究方向为信息通信网技术.