

# 一种优化 WLAN 上下行公平性的 MAC 机制

聂明星, 蒋新华, 邹复民, 王桐森

(福建工程学院 计算机与信息科学系, 福建 福州 350014)

**摘 要:** IEEE 802.11 DCF 主要基于载波检测/碰撞退避多址接入协议和时隙制退避算法。因此, 往往在基础架构模式中, AP 与用户站在随机竞争信道过程中并无优势, 并且 DCF 应用于多速率 WLAN, 各站点之间的竞争并不均匀(时间不均), 存在吞吐量异常和严重不公平性问题。通过建立三维 Markov 链模型, 对非饱和状态下 802.11 MAC 协议上下行带宽公平性进行了分析, 由此提出基于下行链路优先的 DPMAC 协议, 其核心思想是: AP 享有优先访问信道的权利, 并且可以根据下行链路状态动态调整占有信道的时间, 各用户站竞争信道仍然采用原有的 DCF 访问方式。通过仿真证实 DPMAC 协议能很好地实现上下行链路公平性, 达到满意的效果。

**关键词:** IEEE 802.11; DCF; 三维 Markov 链; DPMAC

**中图分类号:** TP311.5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-629X(2008)08-0054-04

## A MAC Scheme for Optimizing Fairness on Uplink and Downlink in WLAN

NIE Ming-xing, JIANG Xin-hua, ZOU Fu-min, WANG Tong-sen

(Department of Computer and Information Science, Fujian University of Technology, Fuzhou 350014, China)

**Abstract:** The medium access control mechanism of IEEE 802.11 DCF is based on carrier sense multiple access with collision avoidance and binary slotted exponential backoff. It shows that the AP has no advantage when accessing the shared channel in infrastructure mode using DCF. A tri-dimensional Markov chain is presented in this paper to analyze the fairness of uplink and downlink in WLAN. Then, a MAC scheme is proposed based on downlink priority, named DPMAC. Simulation indicates that this scheme can improve the channel throughput with downlink/uplink bandwidth controlled.

**Key words:** IEEE 802.11; DCF; tri-dimensional Markov chain; DPMAC

## 0 引言

IEEE 802.11 MAC 层协议提供了两种信道访问机制:一种是分布式协调功能 DCF(Distributed Coordination Function), 支持 IBSS 和 BSS 两种类型的无线局域网, 它采用基于冲突避免的载波侦听多重访问(CS-MA/CA)机制, 对碰撞包的重传采用二进制指数回退策略。另外一种只支持 BSS 的点协调功能 PCF(Point Coordination Function), 它建立在 DCF 基础上, 由 BSS 内的中心控制器——点协调器 PC(Point Coordinator, 一般是接入点 AP)来决定当前哪一个站有权发送数据, 但是 PCF 是一种可选模式, 大多数的无线网络产

品不支持 PCF。

最初 DCF 是针对单一速率设计并采用静态接入参数, 没有考虑信道负载及多种速率共存等特点, 因此存在公平性等问题。DCF 公平性缺乏体现在两个方面:一是 DCF 应用于多速率 WLAN, 各站点之间的竞争并不均匀(时间不均), 存在吞吐量异常和严重不公平性问题<sup>[1]</sup>, 国内外研究者针对这个问题从 DCF 退避机制提出了许多相应的改进算法<sup>[2-4]</sup>;二是在基础架构的模式中, AP 和 STA 竞争信道时并无优势, 并且 AP 可能同时向多个 STA 下传数据, 而向 AP 上传数据的 STA 却很少(即接收数据的 STA 多, 发送数据的 STA 少), 即使只有一个 STA 上传数据, 它也要占用一半的带宽资源, 这将导致上下行带宽严重不对称, 并且随着竞争站点数增加, 信道利用率也随之下降。对于上下行带宽不对称问题, 文献[5]根据数学模型得到竞争站点数与 AP/STA 最优化初始竞争窗口值的关系, 在此基础上通过分别设置 AP/STA 的初始竞争窗口对

收稿日期:2007-11-15

基金项目:福建省重大产业技术开发专项(闽发改投资 2005531 号);福建工程学院校科研发展基金立项项目(GY-Z0765)

作者简介:聂明星(1982-), 男, 湖南衡阳人, 硕士, 助教, 研究方向为无线局域网;蒋新华, 教授, 博士生导师, 研究方向为基于无线宽带网与下一代互联网的移动 IP 技术应用开发。

原有 MAC 机制进行优化,实现上下行带宽控制。文献[6]也是通过分别调整 AP 与 STA 初始竞争窗口大小进行上下行带宽控制。通过竞争窗口的调节来缓解上下行链路不公平性有其局限性,当用户站点数目增加时,还是会存在上下行链路带宽不公平性问题。文献[7]提出一种双向 DCF(Bidirectional DCF)机制,其思想是在基本访问模式中,AP 可以在用户站发送数据后等待一个 SIFS 间隔发送数据,在 RTS/CTS 模式中,AP 可以在 RTS/CTS 期间内与拥有信道的用户站竞争信道,BDCF 提高了 AP 访问信道时的优先级,但是引入了二次竞争信道问题,破坏了原有 DCF 完整性,同时也没能解决多速率 WLAN 存在的不公平性问题。文献[8]把上下行作为不同优先级流处理,利用 QoS 手段调整上下行流的优先级,通过反馈来控制上下行带宽。文献[9]根据信道使用率与上下行公平性原则提出一种基于优先级的公平 MAC 协议 PMAC(priority-based fair medium access control)。文献[10]提出一种 JUDS(a joint uplink/downlink opportunistic scheduling for WLANs)方法,通过协调整合上行和下行调度,实现上下行链路公平性。文中建立了三维 markov 链,对非饱和状态下的 802.11MAC 协议上下行链路公平性进行了分析,并且提出一种基于下行链路优先的信道访问机制 DPMAC(downlink priority-based medium access control),其中心思想是:在访问信道时,AP 与 STA 看作两类群体,AP 不参与用户站之间的信道竞争,因此不是 1 个 AP 与  $n$  个用户站之间的信道竞争,而是上下行两个之间的分配问题。实质上,AP 享有优先访问信道的权利,并且可以根据下行链路状态动态调整占有信道的时间,各用户站竞争信道仍然采用原有的 DCF 访问方式,并且可以采用文献[2~4]等提出的方法,来适应多速率 WLAN。

## 1 DCF 信道资源分配不公平性分析

出于效率的考虑,DCF 将传输之后空闲的 DIFS 划分为多个时隙,时隙的大小设为  $\tau$ 。每个移动设备仅仅被允许在每个时隙开始时传输。同时,DCF 采用一种指数级后退机制,每个分组传输时需要后退的时隙数目从区间  $(0, W_j - 1)$  中均匀选取,其中  $W_j$  称为冲突窗口,  $W_j = 2^j CW_{\min}$ ,  $j \in (0, m)$ ,  $j$  为退避级数,  $m$  代表退避算法可以退避的最大退避级数,  $CW_{\max} = 2^m CW_{\min}$ 。每次开始传输一个新的分组时,冲突窗口被设置为最小冲突窗口,记为  $CW_{\min}$ ,此后每次传输失败,冲突窗口加倍,直到达到一个最大值。只要信道空闲,后退计时器就递减;当检测到信道上有传输时,计

数器停滞;当信道再次空闲超过一个 DIFS 时,计数器被再次激活,当后退计时器达到 0 时移动设备开始传输分组。

假设某个 WLAN 包含  $n$  个用户站点;各站点在成功发送数据后,随机产生新的数据分组,新分组的到达服从 Poisson 分布,平均分组到达率为  $\mu$ 。首先,分析某个站点竞争信道的过程。令  $r(t)$  表示:在时刻  $t$  该站点发送缓冲区中是否包含数据。如果没有数据,则  $r(t) = 0$ ,该站点空闲;如果包含数据,则  $r(t) = 1$ ,该站点竞争信道。令  $s(t)$  表示: $r(t) = 1$  时,该站点在时刻  $t$  的退避级数,取值范围为  $[0, m]$ ;  $b(t)$  表示: $r(t) = 1$  时,该站点的退避时隙计数器在时刻  $t$  的取值,取值范围为  $[0, W_j - 1]$ ,  $W_j = 2^j CW_{\min}$ ,  $j \in (0, m)$ 。显然,  $r(t)$ 、 $s(t)$  和  $b(t)$  分别描述三个随机过程都不是 Markov 过程。因此,文中将这三个随机过程作为一个整体,即采用三维随机过程  $\{r(t), s(t), b(t)\}$  来描述该站点竞争信道的过程,如图 1 所示。假设各站点每次发送数据帧时,数据帧的碰撞概率与过去的碰撞次数无关,即碰撞概率  $p$  恒定且相互独立。这个三维随机过程在时刻  $t+1$  的状态  $\{r(t+1), s(t+1), b(t+1)\}$  只与前一个时刻  $t$  的状态  $\{r(t), s(t), b(t)\}$  有关,与时刻  $t$  以前的状态,如  $\{r(t-1), s(t-1), b(t-1)\}$  等无关,且状态和时间都是离散的。所以,随机过程  $\{r(t), s(t), b(t)\}$  是三维 Markov 链  $(3M)^{[11]}$ 。

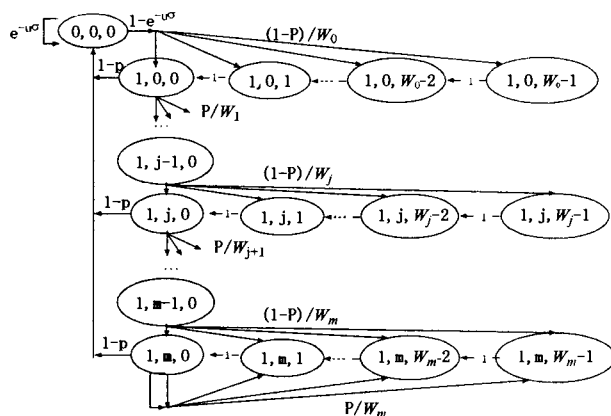


图 1 三维 Markov 链模型

为了简化分析,令:

$$P\{i_1, j_1, k_1 | i_0, j_0, k_0\} = P\{r(t+1) = i_1, s(t+1) = j_1, b(t+1) = k_1 | r(t) = i_0, s(t) = j_0, b(t) = k_0\} \quad (1)$$

由图 1 可得:

$$p\{1, j, k | 1, j, k+1\} = 1 \quad 0 \leq k \leq w_j - 2, 0 \leq j \leq m \quad (2)$$

$$p\{1, j+1, k | 1, j, 0\} = p/w_{j+1} \quad 0 \leq k \leq w_{j+1}$$

$$-1, 0 \leq j \leq m-1 \quad (3)$$

$$p\{1, m, k | 1, m, 0\} = p/w_m \quad 0 \leq k \leq w_m - 1 \quad (4)$$

$$p\{0, 0, 0 | 1, j, 0\} = 1 - p \quad 0 \leq k \leq m \quad (5)$$

$$p\{0, 0, 0 | 0, 0, 0\} = e^{w_0} \quad (6)$$

$$p\{1, 0, k | 0, 0, 0\} = (1 - e^{w_0})/w_0 \quad 0 \leq k \leq w_0 - 1 \quad (7)$$

上面式中(2)表示,在退避过程中,退避计数器在每个时隙的开始时刻减1;(3)表示,当退避级数为 $j$ 时,如果发送失败,退避级数加1,退避计数器的取值等概率地从 $[0, W_{j+1} - 1]$ 选取;(4)表示,当退避级数已经达到最大时,如果发送失败,退避级数不变。(5)表示,站点将发送缓冲区内的分组成功发送出去后,进入空闲状态;(6)表示,如果没有新的分组到达,站点保持空闲;(7)表示,如果新的分组进入发送缓冲区,站点进入退避过程,退避级数为0,退避计数器的取值等概率地从 $[0, W_0 - 1]$ 选取。

假设马尔可夫稳态方程的分布为:

$$b_{i,j,k} = \lim_{t \rightarrow \infty} p\{r(t) = i, s(t) = j, b(t) = k\}, i = \{0, 1\}, 0 \leq j \leq m, 0 \leq k \leq w_j - 1 \quad (8)$$

不论退避级数是多少,只要退避计时器为零,站点就开始发送数据。因此,站点在任一时隙的发送概率为:

$$\tau = \frac{\sum_{j=0}^m b_{1,j,0}}{2(1-2p)(1-p) + (1-e^{w_0})(1-2p)(w_0+1) + pw_0(1-(2p)^m)} \quad (9)$$

如果除了当前站点外,剩余 $n-1$ 个站点中至少有一个站点也发送数据,那么就会发生碰撞。系统稳定后,各站点的发送概率都为 $\tau$ ,因此碰撞概率为:

$$p = 1 - (1 - \tau)^{n-1} \quad (10)$$

式(9)和(10)构成含两个未知数 $\tau$ 和 $P$ 的非线性方程组,可以通过计算机数值解法求得近似解。

## 2 基于下行链路优先的 MAC 机制

802.11 标准的 DCF 基于 CSMA/CA,在 BSS 网络中,所有的上下行数据都必须经过 AP,根据上面面对 DCF 公平性分析,可知 AP 在随机竞争信道过程中并无优势<sup>[12]</sup>。在包含 $n$ 个上行链路的 BSS 中,AP 的上下行带宽约为 $1:n$ ,上下行带宽比例严重不对称。在实际网络接入中,下行数据量一般都要高于上行数据量,如 ADSL 业务一般提供 2Mbps 的下行带宽和 512kbps 的上行带宽。文中提出一种基于下行链路优先的接入方式:DPMAC(downlink priority based medium

access control)。其中心思想是:在访问信道时,AP 与 STA 看作两类群体,AP 不参与用户站之间的信道竞争,因此不是 1 个 AP 与 $n$ 个用户站之间的信道竞争,而是上下行两个之间的分配问题。实质上,AP 享有优先访问信道的权利,并且可以根据下行链路状态动态调整占有信道的时间,各用户站竞争信道仍然采用原有的 DCF 访问方式。

图 2 为 DPMAC 帧结构,DLP(downlink period)与 DCF 共存,逻辑上位于 DCF 之上。AP 占用信道期 APP(access point period)和竞争期 CP(Contention Period)。AP 在 APP 时期内控制 BSS 内下行链路的传输,DCF 在 CP 时期内控制 BSS 内上行链路帧的传输,两者交替控制媒体,从而达到 DLP 与 DCF 共存的目的。

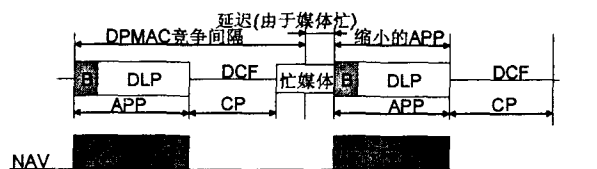


图 2 DPMAC 帧结构

## 3 仿真结果及分析

文中使用的仿真工具是由加州大学洛杉矶分校(UCLA)开发的 Glomosim。因为只分析上下行带宽分配问题,所以只考虑一个 BSS 情况,且各站点处于相互的接收范围之内,不存在隐藏终端和暴露终端问题。仿真中包含 1 个 AP,2N 个用户站点,其中有 N 个站点为发送站点,向 AP 发送数据,形成 N 条上行链路,另 N 个站点为接收站点,接收来自 AP 的数据帧,形成 N 条下行链路。仿真的业务类型为恒定比特率 CBR 业务,传输层采用 UDP 协议,相应的仿真参数如表 1 所示。

图 3 中横坐标值表示上行链路数目(下行链路数目等于上行链路数目),纵坐标表示上下行带宽比值。分组大小为 512 byte,产生的总业务流足以使 WLAN 饱和,仿真时长为 500s。可见在原有 DCF 机制中,上下行链路存在严重不公平性,上下行链路带宽比值约为 $n:1$ (如果考虑到有 $m$ 个下行链路,则平均单条下行链路与上行带宽比值为 $n:1/m$ )。在 DPMAC 机制中,根据 DLP-Duration 和 DCF-Duration 值的设置,可以动态调整上下行链路分配,仿真中设置 DLP-Duration 为 12ms,设置 DCF-Duration 为 8ms,用户站采用 RTS/CTS 的 DCF 机制,如图 3 所示,仿真结果上下行带宽比值不是理论的 1.5:1,而是接近于这个值,这是因为用户站采用了 RTS/CTS4 次握手机制,会出现占用信道的时间超过 DCF-Duration 值。

表 1 仿真参数

参数名	参数值
信道比特速率	1Mbps
时隙 $\delta$ 长度	$20\mu\text{s}$
SIFS	$10\mu\text{s}$
DIFS	$50\mu\text{s}$
PIFS	$30\mu\text{s}$
EIFS	$212\mu\text{s}$
$CW_{min}$	31
$CW_{max}$	1023
PHY 头大小	192b
MAC 头大小	144b
RTS 大小	160b
CTS 大小	112b
ACK 大小	112b
DLP - Duration	12ms
DCF - Duration	8ms

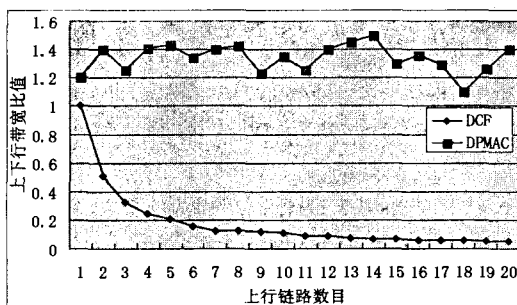


图 3 DCF 和 DPMAC 仿真结果

#### 4 结束语

建立了三维 Markov 链模型,对非饱和状态下 802.11 MAC 协议造成的上下行带宽公平性进行了研究,由此提出基于下行链路优先的 DPMAC 协议,通过仿真证实 DPMAC 协议能很好地实现上下行链路公平性,达到满意的效果。

#### 参考文献:

- [1] Heusse M, Rousseau F. Performance Anomaly of 802.11b [C]// Proceedings of IEEE INFOCOM'03. San Francisco, California: [s. n.], 2003: 231 - 238.
- [2] Pang Q X, Liew S C, Lee Y B. A TCP-like Adaptive Con-

tention Window Scheme for WLAN[C]//Proc. of IEEE International Conference on Communications. Paris, France: [s. n.], 2004.

- [3] Deng J, Varshney P K, Haas Z J. A New Backoff Algorithm for the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function[C]//Proc. of Communication Networks and Distributed Systems Modeling and Simulation. San Diego, CA, USA: [s. n.], 2004.
- [4] Cali F, Conti M, Gregori E. IEEE 802.11 Protocol: Design and Performance Evaluation of an Adaptive Backoff Mechanism[J]. IEEE JSAC, 2000, 18(9): 1774 - 1786.
- [5] 冯辉,王挺,胡波.一种 WLAN 中优化上下行公平性的 MAC 机制[J].复旦学报:自然科学版,2006, 45(1): 67 - 71.
- [6] Bottigliengo M, Casetti C, Chiasserini C F, et al. Smart traffic scheduling in 802.11 WLANs with access point[C]//CERCOM - Dipartimento di Elettronica Politecnico di Torino. Torino, Italy: [s. n.], 2003.
- [7] Nandiraju N S P, Gossain H, Cavalcanti D, et al. Achieving Fairness in Wireless LANs by Enhanced IEEE 802.11 DCF [C]//Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications, 2006 (WiMob'2006). IEEE International Conference. [s. l.]: [s. n.], 2006: 132 - 139.
- [8] Kim Sung Won, Kim Byung-Seo, Fang Yuguang. Downlink and uplink resource allocation in IEEE 802.11 wireless LANs [J]. IEEE Transaction and Vehicular Technology, 2005, 54(1): 320 - 327.
- [9] Qiao Daji, Shin K G. Achieving efficient channel utilization and weighted fairness for data communications in IEEE 802.11 WLAN under the DCF[C]//The 10th IEEE International Workshop on Quality of Service. USA: IEEE, 2002.
- [10] Yoo Joon, Luo Haiyun, Kim Chong-kwon. Opportunistic Joint Uplink/Downlink Scheduling in WLANs[R]. US: University of Illinois at Urbana-Champaign, Korea: Seoul National University, 2006.
- [11] 李波,李建东,方勇.非饱和状态下 IEEE 802.11 DCF 的性能分析[J].西安电子科技大学学报,2007, 34(1): 76 - 81.
- [12] 刘乃安.无线局域网(WLAN)——原理、技术与应用[M].西安:西安电子科技大学出版社,2004: 306 - 307.

(上接第 53 页)

#### 参考文献:

- [1] Pawlak Z, Grzymala-Busse J, Slowinski R, et al. Rough sets[J]. Communications of the ACM, 1995, 38(11): 88 - 95.
- [2] Pawlak Z. Rough Sets: Theoretical Aspects of Reasoning About Data[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1991.

- [3] Düntsch I, Gediga G. Uncertainty measures of rough set prediction[J]. Artificial Intelligence, 1998, 106: 109 - 137.
- [4] Ziarko W. Variable precision rough set model[J]. Journal of Computer and System Sciences, 1993, 46: 39 - 59.
- [5] 胡寿松,何亚群.粗糙决策理论与应用[M].北京:北京航空航天大学出版社,2005.
- [6] 陶志.基于粗糙集理论的数据挖掘方法及其在电力营销决策支持系统中的应用[D].沈阳:东北大学,2004.