

基于效用最大化的 IEEE 802.11 DCF 性能分析及改进

张国鹏 邹向毅 赵力强 张海林

(西安电子科技大学综合业务网理论与关键技术国家重点实验室 西安 710071)

摘要: 针对 802.11 DCF 在系统负载较大时不能有效利用带宽资源的缺点, 该文提出一种基于效用函数的 DCF 优化机制(U-DCF)。通过设置站点吞吐量的对数效用函数, 将带宽资源的有效利用问题建模为系统效用最大化问题; 应用最优化理论将此系统问题等效为可分布式求解的用户问题, 即各站点只须独立选择最大化其净效用的竞争参数 (CW_{\min}), 则系统整体效用也获得最大化。仿真结果表明: 与标准 DCF 相比, U-DCF 通过预估系统的当前平均分组长度和竞争站点数来调整竞争参数 CW_{\min} , 能够显著提高系统的饱和吞吐量, 减小分组发送时延和丢帧率。

关键词: 无线局域网; 媒体访问控制; IEEE 802.11 DCF; 效用函数

中图分类号: TP393.17

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)12-3027-04

Maximum Utility Based Performance Analysis and Improvement of the IEEE 802.11 DCF

Zhang Guo-peng Zou Xiang-yi Zhao Li-qiang Zhang Hai-lin

(State Key Laboratory of Integrated Services Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: An enhanced DCF scheme, called U-DCF, based on logarithm utility function is proposed in this paper, since bandwidth resource can not be utilized efficiently in the chosen backoff parameters of 802.11 DCF. The user's utility is a function of his data throughput, thus the bandwidth resource utilization problem is modeled as a utility based constrained maximization problem, called a system problem. A user problem formulation of the system problem is derived by using Lagrange relaxation and duality theory, thus the competing stations only need to choose their optimal channel access strategies (CW_{\min}) independently to maximize their net utility. Then the maximum aggregate utilities can be achieved in a distributed way. Simulation results show that, by adjusting the backoff parameter CW_{\min} to the average frame-length and the number of the competing stations on the channel, U-DCF outperforms the original DCF in terms of system throughputs, delay bound and frame-loss-rate.

Key words: Wireless LANs; MAC; IEEE 802.11 DCF; Utility function

1 引言

无线局域网(WLAN)标准IEEE 802.11采用基于载波监听多路访问、碰撞避免(CSMA/CA)的DCF(Distributed Coordination Function)作为其基本的媒体访问控制(MAC)协议。文献[1]指出DCF竞争参数(如随机退避窗口CW)的设置不能有效利用信道带宽, 即在网络负载较大时会引起站点间数据帧碰撞的加剧, 造成系统吞吐量、时延、丢帧率等性能指标的急剧下降。

文献[2]提出将网络带宽的有效利用和公平分配问题纳入统一的对数效用函数模型, 在每个用户都期望最大化其效用函数时, 上述问题可转化为非线性规划(NP)求解。效用函数 $f(r)$ 被定义为用户带宽(r)的单调递增凸函数, 即 $\partial f(r)/\partial r > 0$, $\partial^2 f(r)/\partial r < 0$ 。文献[2]给出了对数效用函数:

$$f(r) = \begin{cases} \log r, & \alpha = 1 \\ (1 - \alpha)^{-1} r^{1-\alpha}, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

参数 α 确定了系统的公平性准则: 当 $\alpha \rightarrow 1$ 时, 系统满足比例公平性; 当 $\alpha \rightarrow \infty$ 时, 系统满足最大化最小(max-min)公平性。文献[3]利用此对数效用函数模型实现了对 DS-CDMA 系统无线带宽资源的高效利用; 文献[4]利用此模型实现了 IEEE 802.16 网络中的比例公平性带宽分配。

针对 802.11 DCF 不能有效利用带宽资源的问题, 本文通过建立基于用户吞吐量的效用函数模型, 给出了一种 DCF 的优化机制, 提供了有效利用和公平分配 WLAN 带宽资源的新思路。

2 用户吞吐量模型

在使用 802.11 DCF 的 WLAN 中, 用户站点的吞吐量 r 由各站点在给定时间隙的分组发送概率 τ 所决定。根据文献[1], 可进一步给出网络处于饱和状态下(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

发送概率 τ_i 之间的关系式:

$$r_i = \frac{P_i^s L_i}{P^s T^s + P^c T^c + P^i T^i} \quad (2)$$

其中 $P_i^s = \tau_i \prod_{j \neq i} (1 - \tau_j)$ 为站点 i 的分组被成功发送的概率, $P^s = \sum_k P_k^s$; L_i 是站点 i 的平均分组长度; T^s 是由于成功发送平均长度为 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。

下面是对式(2)的一些简化处理。由文献[1], 使用DCF的任意站点 i 的发送概率 $\tau_i = 1$, 故有

$$\prod_k (1 - \tau_k) \approx 1 - \sum_k \tau_k \quad (3)$$

由于 T^i 被定义为单位时隙长度^[1], 故可将 T^s 和 T^c 对 T^i 归一化处理; 结合式(3), 将式(2)简化为

$$\left. \begin{aligned} r_i &= \frac{\tau_i (1 - A_{-i}) L_i}{E[T]} \\ E[T] &= \sum_k \tau_k (1 - A_{-k}) T^s + \sum_k \tau_k A_{-k} T^c + 1 - A \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中 $A = \sum_k \tau_k$ 为系统中 N 个站点的发送概率之和, $A_{-k} = \sum_{j \neq k} \tau_j$; T^s 和 T^c 为归一化处理后的结果。在系统中竞争站点数较多、负载较大时, $\tau_i \ll A$, 继而 $A_{-k} = \sum_{j \neq k} \tau_j \approx \sum_j \tau_j = A$ 。因此式(4)可进一步简化为

$$\left. \begin{aligned} r_i &= \frac{\tau_i (1 - A) L_i}{E[T]} \\ E[T] &= A(1 - A) T^s + A^2 T^c + 1 - A \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式(5)即为本文所采用的用户站点 i 的吞吐量 r_i 和其发送概率 τ_i 的关系式。

3 带宽分配的效用函数模型

DCF协议应满足比例公平性, 因此令式(1)中 $\alpha=1$, 基于用户 i 吞吐量的对数效用函数即为 $f(r_i) = \log(r_i)$, 带宽资源的最优利用问题可建模为系统整体效用的最大化问题 S :

$$\left. \begin{aligned} S: \max_{r_i} \sum_i f(r_i) \\ \sum_i r_i \leq C, r_i \geq 0, i = 1, \dots, N \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

其中 C 是信道容量, $\mathbf{r} = (r_1, \dots, r_N)$ 是各用户吞吐量的列向量。线性规划问题 S 的约束条件为线性不等式组, 且 r_i 非负并存在上下边界 ($0 \leq r_i \leq C$), 因此 S 的可行解集为非空凸集 $\{\mathbf{r}\}$ 。又 $f(r_i)$ 为单调递增凸函数, 故 S 存在唯一的可行解^[5]。

然而WLAN是典型的分布式系统, 其性能由各站点的分组发送概率 τ 所决定, 因此系统问题 S 必须能由各站点分布式解决。由线性规划对偶理论及文献[6], 定义 S 的对偶问题 S' 为

$$\left. \begin{aligned} S': \min_{\theta \geq 0} \sum_i \max(f(r_i) - \theta r_i) \\ \sum_i r_i \leq C, r_i \geq 0, i = 1, \dots, N \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

其中 θ 为Lagrangian乘子。在给定 θ 的条件下, 问题 S' 可进一步等效为用户效用最大化问题 U :

$$\left. \begin{aligned} U: \max_{r_i} u(r_i), u(r_i) = f(r_i) - \theta r_i \\ \sum_i r_i \leq C, r_i \geq 0, i = 1, \dots, N \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

其中 θ 的取值表示了网络当前的拥塞状况, 文献[2]将其定义为网络当前单位带宽的价格。

至此, 系统问题 S 已等效为可分布式解决的用户问题 U : 给定网络当前拥塞价格 θ , 各用户只需分布式的选择其吞吐量 r 的取值, 最大化其净效用 $u(r) = f(r) - \theta r$, 则根据线性规划问题的对偶理论, 系统整体效用亦得以最大化。

4 最优接入策略选择

使用DCF协议, 用户吞吐量 r 由站点的接入策略 τ 决定。因此重定义式(5)中的系统问题 S 为

$$\left. \begin{aligned} S: \max_{\tau_i} \sum_i f(r_i) \\ \sum_i \tau_i \leq 1, \tau_i \geq 0, i = 1, \dots, N \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

重定义式(6)中的用户问题 U 为

$$\left. \begin{aligned} U: \max_{r_i} u(r_i), u_i(r_i) = f(r_i) - \theta r_i \\ \sum_i \tau_i \leq 1, \tau_i \geq 0, i = 1, \dots, N \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

根据式(9), 系统效用最大化的必要条件为

$$\frac{\partial \left(\sum_i f(r_i) \right)}{\partial \tau_i} = \frac{\partial f(r_i)}{\partial \tau_i} + \sum_{j \neq i} \frac{\partial f(r_j)}{\partial \tau_i} = 0 \quad (11)$$

将式(5)代入式(11), 可得(过程请参见附录1)

$$\frac{\partial f(r_i)}{\partial \tau_i} = L_i \frac{(1 - A)^2 T^s + A(2 - A) T^c}{E^2[T]} \sum_{j \neq i} \frac{df(r_j)}{dr_j} \tau_j \quad (12)$$

另外, 分别由式(8)和式(10), 得到用户效用最大化的必要条件分别为

$$du(r_j)/dr_j = df(r_j)/dr_j - \theta = 0 \quad (13)$$

$$\partial u(r_i)/\partial \tau_i = \partial f(r_i)/\partial \tau_i - \theta \cdot dr_i/d\tau_i = 0 \quad (14)$$

因为 S 和 U 互为对偶问题, 故可将式(5)代入式(14), 并与式(12)联立, 可得(过程可参考式(12))

$$\theta = \frac{(1 - A)^2 T^s + A(2 - A) T^c}{(1 - A) E[T]} \sum_{j \neq i} \frac{df(r_j)}{dr_j} \tau_j \quad (15)$$

将式(13)代入式(15), S 和 U 的最优化的必要条件为(过程见附录2)

$$\frac{(1 - A)^2 T^s + A(2 - A) T^c}{(1 - A) E[T]} A = 1 \quad (16)$$

其有唯一解(求解过程见附录3)

$$A^* = \sum_i \tau_i^* = \left(1 + \sqrt{T^c} \right)^{-1} \quad (17)$$

式(17)说明, 当网络负载较大、竞争信道的站点较多时, 信

道能被最优利用的必要条件是：所有站点(N)的发送概率之和为一固定值 A^* ，且 A^* 仅与归一化的信道平均碰撞时间 T^c 相关。

5 系统实现

5.1 竞争参数设置

若各站点均采用DCF的DATA/ACK接入模式，则信道平均碰撞检测时间 T^c 可表示为 $T^c = T^{PHY} + (L+34)/R + T^{DIFS} + \sigma$ ，其中 R 为数据速率， σ 为电磁波传播时延， L 为碰撞数据帧中最大帧长的均值(包括34byte的MAC头)， T^{PHY} 是发送物理层协议头的时间开销， T^{DIFS} 为DIFS的持续时间。对 T^c 按单位时隙时间归一化处理并代入式(17)，则系统中任意站点 i 的最优发送策略为

$$\tau_i^* = A^*/N \tag{18}$$

由文献[7]，各用户站点可使用式(19)，根据发送概率 τ_i^* 调整其初始竞争窗口 $CW_{min,i}$ 的大小。

$$\tau_i = 2/(CW_{min,i} + 1) \tag{19}$$

5.2 站点数估计算法

由式(18)–式(19)，站点的最优初始竞争窗口 CW_{min} 和当前竞争信道的站点数 N 有关。现有的站点数估计算法[8]复杂度较高，不易在应用中实现。鉴于无线信道的广播特性和各站点的MAC地址全球唯一性，本文设计了一种根据监测站点MAC地址估计竞争站点数的算法，该算法复杂度较低，便于在工程应用中实现。算法步骤描述如下：

步骤 1 定义变量 n 记录网络中当前竞争站点数，且令 $n < 100$ ；定义数组 $addr[k][j]$ ($0 \leq k \leq 100, 0 \leq j \leq 5$) 用于记录系统中竞争站点的 MAC 地址和与其相关的时间数据。例如， $addr[k][0]$ ($k=0,1,\dots,n$) 记录站点 k 的 MAC 地址， $addr[k][1]$ 记录 k 第 1 个数据帧成功发送的时刻， $addr[k][2] \sim addr[k][4]$ 记录 k 最近 3 次数据帧成功发送的时间间隔， $addr[k][5]$ 记录 k 的生存期信息 $life_time$ 。

步骤 2 当某站点侦听到其他站点一次成功的帧发送后，先对其 MAC 地址进行解析并将其存储于变量 $address$ ；将 $address$ 和已记录 MAC 地址进行比较：若为新地址，则在数组中增加一个新记录，同时 n 增 1；否则，更新数组中相应 $address$ 项的到达时刻或到达时间间隔。

步骤 3 逐个扫描 $addr[k][5]$ ($k=0,1,\dots,n$)，若 $addr[k][5] > life_time$ ，则清除该记录，并且 n 减 1，表示：若某 MAC 地址(站点)在间隔 $life_time$ 内没有成功的帧发送，则判定他已经退出网络。

上述算法中，MAC 地址生存期 $life_time$ 的设置至关重要：若 $life_time$ 太小，可能会出现过早删除相应的地址表项；若 $life_time$ 太大，则不能及时反映站点的退出。通过仿真，得出较准确的 $life_time$ 设置方法： $life_time = r \times \Delta t$ ， Δt 为站点数据帧成功发送的平均时间间隔， r 为 DCF 规定

的最大重传次数， Δt 可计算为 $\Delta t = \frac{1}{3} \sum_{j=2}^4 \text{addr}[k][j]$ ， $k=0,1,\dots,n$ 。

5.3 仿真分析与验证

在OPNET 10.5中集成了所提出的DCF优化机制和竞争站点数的统计算法，称之为U-DCF。仿真中未考虑信道误码与传播时延的影响，参数设置服从IEEE 802.11b协议，如表1所示。

表 1 仿真参数设置

信道速率	11Mb/s	ACK	112 μs
时隙长度	20 μs	SIFS	10 μs
最大重传次数	$r = 7$	DIFS	50 μs
MAC Header	144 μs	CW_{min}	32slots
PHY Header	192 μs	CW_{max}	1024slots

各站点始终有数据帧待发(使系统处于饱和状态)，每个站点发送的帧大小均为 512 byte，发送速率为 2Mb/s。仿真开始时网络中有 5 个站点，此后每 30s 增加 5 个，直至第 120s(此时系统中共有 25 个站点)；从 150s 开始，系统中每 30s 减少 5 个站点，直至 270s 时仿真结束。

图 1 表明 5.2 节所给出的算法能够较准确地估计当前竞争站点数目。图 2 和图 3 分别对 U-DCF 和标准 DCF 的系统饱和吞吐量与数据帧发送时延进行了比较。可见随着网络中竞争站点数的增加、系统负载增大，DCF 的饱和吞吐量不断降低，而 U-DCF 则基本上保持不变(均值为 5.1932Mb/s)；且 U-DCF 的数据帧发送时延远低于 DCF。这说明使用 U-DCF，站点可以根据当前网络拥塞状态(T^c, N)的变化调整自己的最优竞争参数 CW_{min} ，而保持系统饱和吞吐量几乎不变；而使用 DCF，站点竞争窗口参数(CW)的设置是由协议(二进制指数退避策略[9])所指派的固定值，这导致站点只有在经过连续、多次碰撞后才能获得理想的 CW 取值，并因此造成信道中碰撞加剧、系统吞吐量下降、重传次数增多和数据帧的发送时延增大。

最后，图 4 比较了 U-DCF 和 DCF 中由于数据帧的重传次数超过协议所规定的最大重发次数($r=7$)所造成的丢帧率。可见，U-DCF 的丢帧率始终为 0，说明其竞争参数设置能提高数据帧的成功发送概率，系统中的碰撞减少，无线信

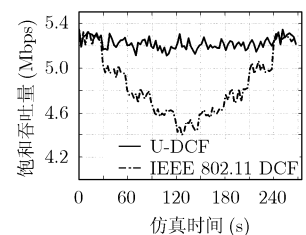
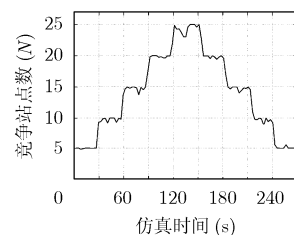


图 1 信道中竞争站点数的估计 图 2 系统饱和状态下的吞吐量

道资源得以更有效的利用。

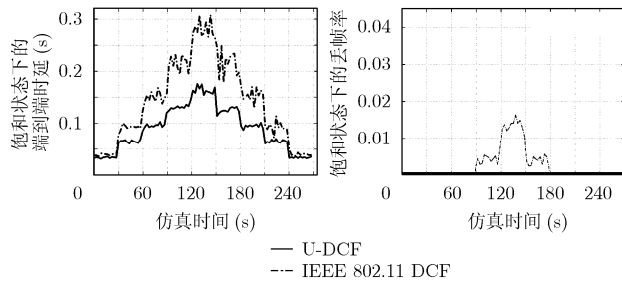


图3 系统饱和状态下的数据帧发送时延

图4 系统饱和状态下的丢帧率

6 结束语

本文在综合考虑效用函数模型和WLAN系统的特点后,提出了基于效用函数最大化的DCF优化机制U-DCF。使用U-DCF,各用户通过监测信道、获取系统负载的变化,并据此调整其最优的信道竞争策略。相比于标准DCF,U-DCF可以获得更高的无线带宽资源利用率。

附录1 式(12)式的证明 由式(5)可得

$$\begin{aligned} dE[T]/d\tau_i &= d[A(1-A)T^s + A^2T^c + 1 - A]/d\tau_i \\ &= (1-2A)T^s + 2AT^c - 1 \end{aligned} \quad (A1)$$

$$\begin{aligned} \frac{dr_j}{d\tau_i} &= \frac{d}{d\tau_i} \left(\frac{\tau_j(1-A)}{E[T]} \right) \\ &= L_i \frac{-\tau_j E[T] - \tau_j(1-A)dE[T]/d\tau_i}{E^2[T]} \end{aligned} \quad (A2)$$

将式(A1)代入式(A2)可得

$$\frac{dr_j}{d\tau_i} = L_i \tau_j \frac{(1-A)^2 T^s + A(2-A)T^c}{E^2[T]} \quad (A3)$$

由式(11)有

$$\frac{\partial f(r_i)}{\partial \tau_i} = -\sum_{j \neq i} \frac{df(r_j)}{d\tau_i} = -\sum_{j \neq i} \frac{df(r_j)}{dr_j} \frac{dr_j}{d\tau_i} \quad (A4)$$

将式(A3)代入式(A4)则有

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

附录2 式(16)的证明 将式(13),即 $\theta = df(r_j)/dr_j$ 代入式(15)可得

$$\theta = \frac{(1-A)^2 T^s + A(2-A)T^c}{(1-A)E[T]} \sum_{j \neq i} \theta \tau_j \quad (A5)$$

$$1 = \frac{(1-A)^2 T^s + A(2-A)T^c}{(1-A)E[T]} \sum_{j \neq i} \tau_j \quad (A6)$$

由第2节: $A_{-k} = \sum_{j \neq i} \tau_j \approx \sum_j \tau_j = A$, 将其代入式(A6)可得

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

附录3 式(17)的证明 由式(16)可得

$$(1-A)E[T] = A(1-A)^2 T^s + A^2(2-A)T^c \quad (A7)$$

将式(5)中 $E[T]$ 的表达式代入式(A7),可得

$$\begin{aligned} A(1-A)^2 T^s + (1-A)A^2 T^c + (1-A)^2 \\ = A(1-A)^2 T^s + A^2(2-A)T^c \end{aligned} \quad (A8)$$

经过化简式(A8)可得

$$A^2 T^c = (1-A)^2 \quad (A9)$$

由式(A9)可解得

$$A^* = \sum_i \tau_i^* = \left(1 + \sqrt{T^c}\right)^{-1} \quad \text{证毕}$$

参考文献

- [1] 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.
- [2] Mo J and Walrand J. Fair end-to-end window-based congestion control [J]. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2000, 8(8): 556-567.
- [3] 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.
- [4] 王兴建, 胡爱群, 黄玉划. 基于效用最大化的IEEE 802.16带宽分配算法 [J]. *电子与信息学报*, 2007, 29(1): 218-222.
- [5] Boyd S and Vandenberghe L. *Convex optimization* [M]. Cambridge, Cambridge University Press, 2004: 215-223.
- [6] Cagal M. On selfish behavior in CSMA/CA networks [C]. *Proc. of IEEE INFOCOM'05, Miami, 2005: 342-351.*
- [7] Qiao D and Shin K G. Achieving efficient channel utilization and weighted fairness for data communications in IEEE 802.11 WLAN under DCF [C]. *Proc. of IEEE IWQoS'02, New York, 2002: 227-236.*
- [8] Bianchi Giuseppe and Timirello Ilenia. Kalman filter estimation of the number of competing terminals in an IEEE 802.11 network [C]. *Proc. of IEEE INFOCOM'03, San Francisco, 2003: 226-232.*
- [9] IEEE Std. 802.11 b. *Wireless LAN Medium Access Control and Physical Layer Specifications* [S]. 1999.

- 张国鹏: 男, 1978年生, 博士生, 研究方向为无线 Ad hoc 网络。
 邹向毅: 男, 1982年生, 硕士生, 研究方向为无线网络架构。
 赵力强: 男, 1974年生, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为无线通信网多址接入协议。
 张海林: 男, 1963年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为 OFDM 和 MIMO 无线通信系统。