

通过自适应调整最小竞争窗口最大化 IEEE 802.11 DCF 的饱和吞吐量

李云^{①②} 陈前斌^① 隆克平^① 吴诗其^②

^①(重庆邮电学院光互联网及无线信息网络研究中心 重庆 400065)

^②(电子科技大学抗干扰国防重点实验室 成都 610054)

摘要 最大化 802.11 DCF 的饱和吞吐量对充分利用无线局域网宝贵的带宽资源具有重要意义。该文在分析 802.11 DCF 的饱和吞吐量与最小竞争窗口、最大回退等级、网络中竞争信道的节点数的关系的基础上, 推导了根据网络中竞争信道的节点数, 计算最小竞争窗口的最佳值的简单公式。给出了估计竞争信道的节点数并据此动态调整最小竞争窗口的最佳值的自适应算法。同时, 该文对估计竞争节点数的算法的准确性和计算最小竞争窗口最佳值的公式的准确性进行了仿真分析, 并比较了改进后的 802.11 DCF 的饱和吞吐量与原 802.11 DCF 的饱和吞吐量的大小。仿真结果证明了上述公式、算法是准确和有效的。

关键词 无线局域网, 802.11, 分布式协调功能, 饱和吞吐量

中图分类号: TP393.17

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)10-1930-05

Self-adaptively Adjusting the Minimum Contention Windows to Maximizing the Saturated Throughput of IEEE 802.11 DCF

Li Yun^{①②} Chen Qian-bin^① Long Ke-ping^① Wu Shi-qi^②

^①(Special Research Centre for Optical Internet & Wireless Information Networks, Chongqing University of Posts & Telecommunications, Chongqing 400065, China)

^②(National Defense Key Lab of Anti-interference Communication Technology, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract It is important to maximize the saturated throughput of 802.11 DCF for fully utilizing wireless bandwidth. The saturated throughput of 802.11 DCF is related to minimum contention windows, maximum backoff stage and the contending nodes in the networks. Based on the analysis to this relationship, this paper induces a simple formula to calculate the optimized minimum contention windows for maximizing the saturated throughput of 802.11 DCF, and gives a self-adaptive contention nodes estimation algorithm, according to which and the simple formula, the optimized minimum contention windows is adapted dynamically. The accuracy of above formula and algorithm is valuated by simulation. The saturated throughput of improved 802.11 DCF and the saturated throughput of 802.11 DCF are compared in this paper. The simulation results prove that the above formula and algorithm are accurate and effective.

Key words WLAN, 802.11, Distributed Coordination Function (DCF), Saturated throughput

1 引言

IEEE 802.11^[1]为WLAN提供了具体的介质访问控制(MAC)和物理层(PHY)规范。在MAC子层, 802.11 建议了两种介质访问控制机制, 即点协调功能(Point Coordination Function, PCF)和分布式协调功能(Distributed Coordination Function, DCF)。PCF是一种由接入点(Access Point, AP)控制的轮询机制, 用于支持无冲突和时延受限业务。DCF是一种基于带冲突避免的载波侦听多重访问(CSMA/CA)的分布式介质访问控制机制, 它为数据包的发送提供了两种信道访问模式, 即基本访问模式和RTS/CTS模式。

自从 802.11 的草案被提出以来, 人们对 802.11 DCF 的性能作了相应分析, 并提出了一些改进方案。文献[2,3]的作者建立了 802.11 DCF 回退机制的马尔可夫模型, 并定量分析了 802.11 DCF 的饱和吞吐量。文献[4]分析了有限负载下 802.11 DCF 的吞吐量。文献[5]在考虑传输差错的情况下给出了 802.11 DCF 的性能分析模型。文献[6]给出了一种 802.11 DCF 的改进机制以减小 DCF 的分组碰撞概率。文献[7-9]通过仿真的方法讨论了 802.11 DCF 在无线 Ad hoc 网络中的公平性问题。文献[10]从理论上分析了当无线局域网中不同节点的数据发送速率不同时, 802.11b 的性能。文献[11,12]分析了 802.11 DCF 的业务区分能力, 并通过改进 802.11 DCF 实现了一定的业务区分功能。

本文将在文献[3]分析 802.11 DCF 的饱和吞吐量时, 建立的二维离散时间马尔可夫链的基础上, 通过分析 802.11 DCF 的饱和吞吐量与节点在任一时隙 δ 的发送概率 τ 的关

2005-02-21 收到, 2005-07-14 改回

国家 863 计划项目(2003AA121540), 国家自然科学基金(90304004), 重庆市教委科学技术研究基金(050310、KJ050503), 重庆市科委自然科学基金项目(8817)和人事部 2003 年度归国人员择优资助项目联合资助课题

系, 以及 τ 与 DCF 的最小竞争窗口 CW_{min} , 最大回退等级 m , 网络中竞争信道的节点数 n 之间的关系, 得到最大化 802.11 DCF 的饱和吞吐量时的 τ 值 (τ_{opt}) 与 DCF 的最小竞争窗口 CW_{min} , 最大回退等级 m 和网络中竞争信道的节点数 n 之间的简化关系式。然后, 进一步给出了一种通过估计网络中的竞争节点数自适应调整 CW_{min} , 以使 τ 逼近 τ_{opt} , 从而最大化 802.11 DCF 饱和吞吐量的算法。

2 802.11 DCF

802.11 DCF 采用了一种随机访问机制。当节点有新的数据包需要发送时, 它首先监测信道, 如果信道持续空闲一段时间——在 802.11 中, 称这段时间为“DCF 帧间间隔”时间(DCF InterFrame Space, DIFS)——在基本访问模式下, 则发送节点发送封装了上层数据包的 MAC 帧(在 RTS/CTS 模式下, 发送 RTS 帧); 否则, 节点继续监测信道, 在忙时监测期间, 当信道空闲的总时间等于 DIFS 时, 节点在发送 MAC 数据帧(或 RTS 帧)之前需随机选择一延迟时间(这就是 DCF 的冲突避免特性)进行回退(backoff)。另外, 为了避免某节点长时间占用信道, 节点在两次连续的数据包发送之间必须进行随机延迟。

对随机延迟时间的量度, DCF 采用了离散时间刻度, 即延迟时间以时隙 δ 为单位, 而一个 δ 等于任一节点监测到其他终端发送数据包的发现时间。具体地说, $\delta = \text{传播延迟} + \text{收、发转换时间} + \text{忙诊断时间}$ 。对于随机延迟时间, DCF 还采用指数回退策略, 在发送数据包时, 延迟时间在 $[0, w-1]$ 之间均匀选取, w 被称为竞争窗口, 它跟某个特定包的传送失败次数有关。对于第一次发送尝试, $w = CW_{min}$, 在每次发送失败之后, w 乘 2, 直到 $w = CW_{max} = 2^m \times CW_{min}$ 。同时, 节点将选择的随机延迟时间赋值给延时计数器。之后, 当节点监测到信道空闲时间达一个时隙时, 延时计数器减 1; 当监测到信道忙时, 延迟计数器保持, 并在信道空闲时间等于 DIFS 时重新激活延时计数器。当延迟计数器值等于 0 时, 节点发送数据包。图 1 表示了 DCF 的回退过程, 在图 1 中, A, B, C, D 4 个节点共享一无线信道。

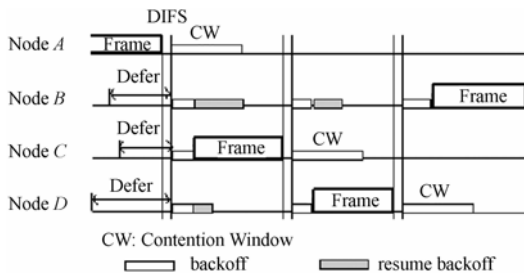


图 1 DCF 回退过程

Fig.1 Backoff procedure of DCF

3 最大化 802.11 DCF 饱和吞吐量的自适应算法

3.1 根据竞争信道的节点数 n 计算 CW_{min} 的最佳值 (w_{opt}) 的公式推导

文献[3]假设: (1) n 个终端竞争一无线信道, 且各终

端总有数据包等待发送, 即各终端的发送队列总是非空; (2) 在各终端的每一次发送尝试中, 各包发生碰撞的概率 p 恒定且互不相关的条件下, 得到 802.11 DCF 的性能模型为二维离散时间马尔可夫链 $\{s(t), b(t)\}$ 。其中, $s(t)$ 是表示给定移动终端在时间 t 的回退等级的随机过程, 其状态空间为 $[0, 1, 2, \dots, m]$; $b(t)$ 为表示给定终端在时间 t 的回退计数器的值的随机过程, 其状态空间为 $[0, 1, 2, \dots, 2^m \times CW_{min} - 1]$ 。根据 $\{s(t), b(t)\}$ 的一步转移概率, 文献[3]得到 802.11 DCF 的饱和吞吐量的表达式为

$$T = \frac{E[P]}{T_s - T_c + \frac{\delta(1 - P_r)/P_r + T_c}{P_s}} \quad (1)$$

其中 $E[P]$ 为数据包长度的均值, T_s 为某节点成功发送时信道被检测为忙的平均时间, T_c 为当碰撞发生时, 信道被非碰撞节点检测为忙的平均时间, P_r 为在一给定时隙至少有一个节点发送的概率, P_s 为在只有一个节点发送的条件下某次发送成功的概率。 $P_r = 1 - (1 - \tau)^n$, $P_s = \frac{n\tau(1 - \tau)^{n-1}}{P_r}$ 。

$E[P]$ 由上层协议决定, δ 和具体的物理层特性与天线的收发转换时间有关, 它们通常为常量。对于 802.11 DCF 的基本访问模式和 RTS/CTS 模式, T_c , T_s 有不同的值^[3], 但在给定的访问模式下, 它们的值通常也为常量。因此, 根据式(1)有, 当

$$\frac{\delta(1 - P_r)/P_r + T_c}{P_s} \quad (2)$$

的值最小时, 802.11 DCF 的饱和吞吐量最大。我们将使式(2)取得最大值的 τ 值定义为 τ_{opt} 。

对式(2)求导并设其等于 0 得

$$(1 - \bar{T}_c) \cdot (1 - \tau)^n - n \cdot \bar{T}_c \cdot \tau + \bar{T}_c = 0 \quad (3)$$

τ_{opt} 是方程式(3)的解。

$$\text{在 } \tau_{opt} \ll 1 \text{ 的条件下, } (1 - \tau)^n \approx 1 - n\tau + \frac{n(n-1)}{2} \cdot \tau^2,$$

将其代入式(3), 解得 τ_{opt} 的近似表达式为

$$\tau_{opt} = \frac{\sqrt{[n + 2(n-1)(\bar{T}_c - 1)]/n - 1}}{(n-1)(\bar{T}_c - 1)} \approx \frac{1}{n\sqrt{\bar{T}_c/2}} = \frac{1}{nk} \quad (4)$$

其中 $\bar{T}_c = T_c / \delta$, $k = \sqrt{\bar{T}_c/2}$ 。

下面, 我们将结合式(4)以及 τ 的表达式^[3]:

$$\tau = \frac{2(1 - 2p)}{(1 - 2p)(CW_{min} + 1) + p \cdot CW_{min} (1 - (2p)^m)} \quad (5)$$

其中

$$p = 1 - (1 - \tau)^{n-1} \quad (6)$$

进一步推导使 $\tau = \tau_{opt}$ 时 w_{opt} , m , n 应满足的关系式。

将式(4)代入式(5), 得到为了使 $\tau = \tau_{opt}$, w_{opt} , m , n 应满足的方程为

$$\frac{1}{nk} = \frac{2(1-2p)}{(1-2p)(w_{opt}+1) + pw_{opt}(1-(2p)^m)} \quad (7)$$

网络中竞争信道的节点数 n 不能通过算法控制, 我们可以通过估计的 n 值, 由算法自适应调整 CW_{min} 和(或) m 的值来使 τ 逼近 τ_{opt} 。为算法实现的简单起见, 我们选择 m 的值为 802.11 提供的建议值 5, 文献[3]也证明了当 m 的值大于 5 之后, 802.11 的饱和吞吐量变化很小。

现在, 要根据估计的 n 值计算 w_{opt} , 必须先通过数值计算对由式(5)和式(6)构成的非线性方程组求解, 求出 p 的近似值, 再由式(7)计算 w_{opt} 。显然, 这种计算的量较大, 为使计算简单, 我们需要进一步推导 w_{opt} 的近似表达式。

将式(4)带入式(6), 得

$$p = 1 - (1 - \tau)^{n-1} = 1 - \left(1 - \frac{1}{nk}\right)^{n-1} = 1 - \left(1 - \frac{1}{nk}\right)^n \bigg/ \left(1 - \frac{1}{nk}\right) \quad (8)$$

设 $\left(1 - \frac{1}{nk}\right)^n = x$, 则 $x^k = \left(1 - \frac{1}{nk}\right)^{nk}$, 当 nk 足够大时, $x^k = \frac{1}{e}$, $x \approx \frac{1}{\sqrt[k]{e}}$, 将 x 的值代入式(8)得

$$p \approx 1 - \frac{1}{\sqrt[k]{e}} \bigg/ \left(1 - \frac{1}{nk}\right) \quad (9)$$

将式(9)代入式(7)并整理得

$$w_{opt} \approx \frac{2nk - 1}{1 + \left[1 - \frac{1}{\sqrt[k]{e}} \bigg/ \left(1 - \frac{1}{nk}\right)\right] \times \frac{1 - 2^m \left(1 - \frac{1}{\sqrt[k]{e}} \bigg/ \left(1 - \frac{1}{nk}\right)\right)^m}{1 - 2 \times \left(1 - \frac{1}{\sqrt[k]{e}} \bigg/ \left(1 - \frac{1}{nk}\right)\right)}} \quad (10)$$

利用式(10), 根据估计的竞争信道节点数 n , 我们便可直接计算 w_{opt} , 从而最大化 802.11 DCF 的饱和吞吐量。下面, 我们将给出实时估算网络中竞争信道的节点数 n 的算法。

3.2 竞争信道的节点数 n 的估计算法

竞争信道的节点数 n 的估计算法如下:

步骤 1 定义变量 co_n , 用于记录当前竞争信道的节点数, 其初值为 1, 表示只有本节点。

步骤 2 定义“节点地址-定时器”表, 其初始状态为空。该表的节点地址字段用于记录收到的 RTS 帧的 TA 字段或 CTS 帧的 RA 字段的值(有关 RTS 帧和 CTS 帧的格式请参考文献[1]), 定时器的值为收到 RTS 帧或 CTS 帧的时间与 α 的和(定义 α 为“节点地址-定时器”表中的表项的保持时间)。

步骤 3 在收到 RTS 帧或 CTS 帧后, 以 RTS 帧的 TA 字段或 CTS 帧的 RA 字段的值为键值查找“节点地址-定时器”表, 如果存在相应的表项, 则更新该表项对应的定时器的值为当前时间与 α 的和; 否则, 增加一节点地址为 RTS 帧的 TA 字段或 CTS 帧的 RA 字段的值、定时器的值为当前

时间加 α 的新的表项, 并将 co_n 加 1。

步骤 4 如果“节点地址-定时器”表中某表项的定时器超时, 则删除该定时器对应的表项, 并将 co_n 减 1。

根据上述算法, 节点便可实时估计网络中竞争信道的节点数(记录在变量 co_n 中)。当节点需要作随机回退时, 可首先根据 co_n 的值和式(10)计算 w_{opt} , 再在 $[0, 2^i w_{opt} - 1]$ 之间按均匀分布随机选择回退时间。 i 为当前回退等级, 即 RTS 帧或数据帧的重传次数。

在上述算法中, α 值的大小关系到估计的竞争节点数的准确性, α 过大, 会使估计值跟不上实际竞争节点数的变化; α 过小, 会导致过早删除相应的表项, 使估计的竞争节点数比实际的竞争节点数小。根据本文第 4 节的仿真中, 我们将给 α 的建议值。

另外, 本算法的进一步改进是让 α 随 co_n 值的变化而变化。当 co_n 值较大时, α 取较大的值; 当 co_n 值较小时, α 取较小的值。这样更新 α 值的原因在于: co_n 值越大表明竞争信道的节点越多, 收到同一节点发出的相邻两个 RTS 帧(或 CTS 帧)的时间间隔越长, 因此, 我们应适当延长定时器的超时时间, 反之亦然。

4 性能仿真分析

本节将在 RTS/CTS 模式下从 3 个方面对本文第 3 节给出的算法进行仿真分析: (1)是对不同的 n 值, 仿真分析通过式(10)计算的 w_{opt} 的准确性; (2)是在不同网络规模下(网络中竞争信道的节点数不同), 比较改进后的 802.11 DCF 的饱和吞吐量与原 802.11 DCF 的饱和吞吐量的大小; (3)是在不同网络规模下分析竞争节点数 n 的估计算法的准确性, 并给出 α 的建议值。具体的仿真参数见表 1。

表 1 仿真参数

Tab.1 Simulation parameters

参数名	参数值	参数名	参数值	参数名	参数值
信道 比特率	11Mbit/s	EIFS	88μs	CTS 大小	112bit
最大传播 时延	2μs	最大回 退等级	5	数据包 大小	8192bit
时隙长度	20μs	PHY 头 大小	192bit	ACK 大小	112bit
SIFS	10μs	MAC 头大小	144bit	CW_{min}	32
DIFS	50μs	RTS 大小	160bit	CW_{max}	256

4.1 通过式(10)计算的 w_{opt} 的准确性

在计算 w_{opt} , 我们需要先根据 T_c 的表达式确定 k 的表达式。在文献[3]中, 作者给出的 T_c 的表达式为

$$T_c = RTS + DIFS + \sigma$$

其中, RTS 为 RTS 帧的发送时间, σ 为电磁波的传播时间。但在本文中, 我们修改 T_c 的表达式为

$$T_c = RTS + EIFS + DIFS + \sigma \quad (11)$$

原因在于: 当两个以上由不同节点发出的 RTS 帧发生碰撞时, 其中的某个节点通常已经正确传送了部分比特, 网络中其他节点的物理层在收到这些比特后将通知 MAC 子层接收 MAC 帧, 但由于随后的碰撞, MAC 帧不能被正确恢复, 在这种情况下, 根据 802.11 的建议, 其他节点应延迟 EIFS 并等信道空闲 DIFS 后再每隔一个时隙将回退计数器的值减 1(当该节点的回退计数器的值大于 0 时)或开始发送 RTS 帧(当该节点的回退计数器的值等于 0 时)。因此, 我们修改文献[3]给出的 T_c 的表达式为式(11)。

根据式(11), 我们得到 k 的表达式为

$$k = \sqrt{T_c} / 2 = \sqrt{T_c} / (2\delta) = \sqrt{(TS + EIFS + DIFS + \sigma) / (2\delta)}$$

在确定了 k 的表达式之后, 我们便可以对不同的竞争节点数 n 值, 分别由联立式(5)、式(6)和式(7), 用计算机数值解法求得的 w_{opt} ; 以及由式(10)直接计算求得 w_{opt} , 两种方法求得的 w_{opt} 示于图 2。

由图 2 可以看出, 两者计算的结果几乎完全相等, 这说明在已知竞争信道的节点数 n 的情况下, 我们能利用计算 w_{opt} 的近似式(10), 准确计算出 w_{opt} 的值。

4.2 改进后的 802.11 DCF 与原 802.11 DCF 的饱和吞吐量比较

采用仿真平台 NS-2^[13], 对不同的竞争节点数 n , 我们分别在 $CW_{min} = 32$ (32 为 802.11 对 CW_{min} 的建议值)和 $CW_{min} = w_{opt}$ 下得到的饱和吞吐量如表 2 所示, 由表 2 知, 改进后的 802.11 DCF 的饱和吞吐量比原 802.11 DCF 的饱和吞吐量大, 其增加的百分比如图 3 所示。

表 2 不同竞争节点数 n , 改进后的 DCF 的饱和吞吐量与原 802.11 DCF 的饱和吞吐量

Tab.2 Throughputs of enhanced DCF and 802.11 DCF according to different number of contending nodes, n

n	原 802.11 DCF 的饱和吞吐量(kbps)	改进后的 802.11 DCF 的饱和吞吐量(kbps)	增加的百分比(%)
2	6898	7721	10.8
5	7342	7571	3.12
10	7393	7489	1.3
15	7425	7427	0.0
20	7313	7422	1.5
30	7224	7383	2.2
50	7016	7316	4.3
80	6870	7259	5.7
100	6719	7212	7.3
120	6635	7187	8.3
150	6461	7134	10.4
180	6247	7082	13.4
200	6067	7019	15.7

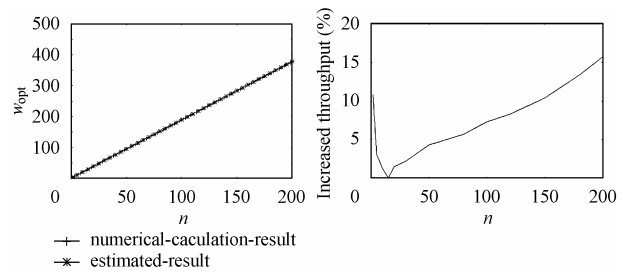


图 2 通过数值解法计算的 $w_{opt} - n$ 曲线与式(10)表示的 $w_{opt} - n$ 曲线
Fig.2 $w_{opt} - n$ curves obtained by numerical calculation and equation (10), respectively

图 3 相对原 802.11 DCF 的饱和吞吐量, 改进后的 802.11 DCF 增加的饱和吞吐量的百分比
Fig.3 Increased throughput of enhanced DCF compared to old 802.11 DCF

由图 3 可以看出, 当网络规模较小(竞争无线信道的节点数较少)或网络规模较大(竞争无线信道的节点数较多)时, 改进后的 802.11 DCF 能明显增加整个网络的饱和吞吐量(最高可达 15%以上), 当网络规模适中时, 改进后的 802.11 DCF 也能在一定程度上增加整个网络的饱和吞吐量。

网络规模较小和网络规模较大时吞吐量增加的百分比比网络规模适中时更大的原因在于: 当网络规模适中时, 802.11 DCF 对 CW_{min} 的建议值与 w_{opt} 接近。

4.3 估计竞争节点数 n 的算法的准确性

只有在较准确估计网络中的竞争节点数 n 的前提下, 才能准确计算 w_{opt} 并根据网络中的竞争节点数 n 自适应调整 w_{opt} 。为了分析竞争节点数 n 的估计算法的准确性, 我们通过修改 NS-2 的 802.11 DCF 模块, 实现了相应的竞争节点数 n 的估计算法, 然后, 在仿真期间(仿真时间从第 8s 开始, 80s 结束), 每隔 8s 随机增减竞争信道的节点数, 在竞争信道的节点数分别为 2~10, 30~50, 120~150 3 种网络规模下, α 的取值分别为 0.5, 1.0, 2.0 时, 网络中实际的竞争节点数的某一样本与通过算法估计的竞争节点数对时间 t 的关系曲线如图 4 所示。

由图 4 的仿真结果知, 正如本文第 3.2 节分析的那样, α 越大, 算法对竞争节点 n 的估计值的变化越滞后于实际竞争节点数的变化; α 越小, 算法估计的竞争节点数比实际的竞争节点数越少。但总的来说, 对 α 的不同取值, 估计的竞争节点数与实际的竞争节点数相当接近。

由图 4 的仿真结果还可看出, 对相同的 α 值, 网络规模越大, 算法估计的竞争节点数比实际的竞争点数越小。原因在于: 网络规模越大, 同一节点发送相邻两个 RTS 帧(或 CTS 帧)的间隔时间越长, 导致其他节点越过早期删除“节点地址-定时器”表中的表项, 从而使估计的竞争节点数比实际的竞争节点数越小。

根据图 4 的仿真结果, 我们给出在不同网络规模下的 α 的建议值如表 3 所示。

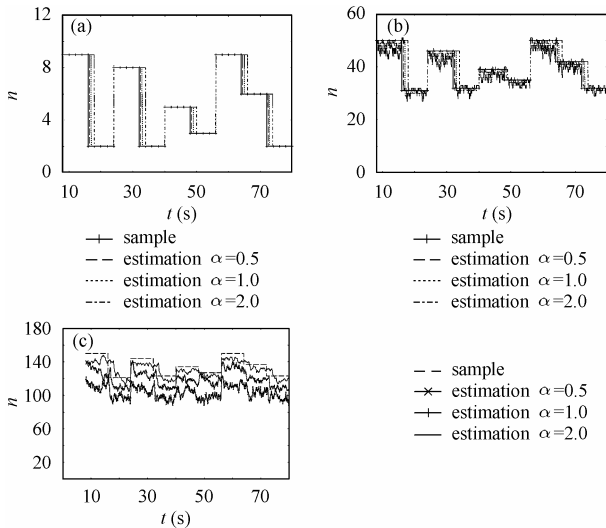


图 4 对不同的网络规模和不同的 α 值仿真得到的实际的 $n-t$ 样本曲线与算法估计的 $n-t$ 曲线

- (a) 竞争节点数在 2~10 之间随机变化
- (b) 竞争节点数在 30~50 之间随机变化
- (c) 竞争节点数在 120~150 之间随机变化

Fig.4 Simulated and estimated $n-t$ curves for different α and different networks sizes

- (a) Number of contending nodes randomly changes from 2 to 10
- (b) Number of contending nodes randomly changes from 30 to 50
- (c) Number of contending nodes randomly changes from 120 to 150

表 3 α 的建议值

Tab.3 Proposed values of α

网络规模	竞争节点数	α 的建议值
较小	≤ 20	0.5
适中	$> 20, \text{ 且 } \leq 100$	1.0
较大	> 100	2.0

5 结束语

充分利用宝贵的无线信道资源是在设计无线局域网的 MAC 协议时需要着重考虑的问题。本文在分析 802.11 DCF 的饱和吞吐量与 τ 值, 以及 τ 与 DCF 的最小竞争窗口 CW_{\min} 、最大回退等级 m 、网络中的竞争节点数 n 的关系的基础上, 推导了竞争节点数 n 与 w_{opt} 的简化关系式, 并给出了估计网络中竞争信道的节点数的自适应算法。仿真结果表明, 竞争节点数的估计算法能在不同网络规模下较准确地估计网络中实际的竞争节点数。根据估计的竞争节点数, 可以动态调整 w_{opt} , 从而达到最大化 802.11 DCF 饱和吞吐量的目的。

另外, 尽管本文只是在 DCF 的 RTS/CTS 模式下对算法作了仿真, 但本文所给出的算法同样能工作在 DCF 的基本访问模式下, 唯一的不同点是: 在基本访问模式下, T_c 取不同的值。有关基本访问模式下 T_c 的取值请参考文献[3]。

参考文献

- [1] IEEE standard for wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications, 1999 Edition.
- [2] Wu H T, Peng Y, Long K P, *et al.*. Performance of reliable transport protocol over IEEE 802.11 wireless LAN: Analysis and Enhancement. IEEE INFOCOM' 02, New York, USA, 2002, Vol.2: 599-607.
- [3] Binachi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2000, 18(3): 535-547.
- [4] Zaki A N, El-Hadidi M T. Throughput analysis of IEEE 802.11 DCF under finite load traffic. In First International Symposium on Communications and Signal Processing, 2004, Hammamet, Tunisia: 535-538.
- [5] Chatzimisios P, Boucouvalas A C, Vitsas V. Performance analysis of IEEE 802.11 DCF in presence of transmission errors. In IEEE International Conference on Communications, 2004, Paris, France, Vol. 7: 3854-3858.
- [6] Wang C G, Li B, Li L M. A new collision resolution mechanism to enhance the performance of IEEE 802.11 DCF. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2004, 53(4): 1235-1246.
- [7] Shugong X, Tarek S. Does the IEEE802.11 MAC protocol works well in multihop wireless ad hoc networks? *IEEE Communications Magazine*, 2001, 39(6): 130-137.
- [8] Yan M, Timoney J, Doyle L, *et al.*. Evaluation of channel fairness models for ad-hoc networks. In Proceedings of the First Joint IEI/IEE Symposium on Telecommunications Systems Research, 2001, Dublin, Ireland: 1-4.
- [9] Bensaou B, Wang Y, Ko C C. Fair medium access in 802.11 based wireless Ad-hoc networks. In First Annual IEEE & ACM International Workshop on Mobile Ad hoc Networking and Computing, 2000, Boston, USA: 99-106.
- [10] Martin H, Franck R, Gilles B S, *et al.*. Performance anomaly of 802.11b. IEEE INFOCOM'03, 2003, San Francisco, USA, Vol.2: 836-843.
- [11] Ahn G S, Andrew T C, Veres A, Sun L H. SWAN: service differentiation in stateless wireless ad hoc networks. IEEE INFOCOM'02, New York, USA, 2002, Vol.2: 457-466.
- [12] Jie H, Devetsikiotis M. Designing improved MAC packet schedulers for 802.11e WLAN. IEEE GLOBECOM '03, 2003 Vol.1: 184-189.
- [13] The networks simulator ns-2, [http:// www.isi.edu/nsnam/ns/ns_doc.pdf](http://www.isi.edu/nsnam/ns/ns_doc.pdf), 2003

李 云: 男, 1974 年生, 副教授, 博士, 主要研究方向为 MAC 协议性能分析和改进、无线 Ad hoc 网络 QoS、TCP 性能分析与改进。
 陈前斌: 男, 1967 年生, 教授, 博士, 研究方向为个人通信技术。
 隆克平: 男, 1968 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为 IP QoS、光突发交换、无线 TCP/IP 改进。
 吴诗其: 男, 1938 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为无线及卫星通信。