

## 一种最小竞争窗口自适应调整的 802.11 退避算法

朱颖 夏海轮 武穆清

(北京邮电大学通信网络综合技术研究所 北京 100876)

**摘要:** 该文在对原有的 IEEE 802.11 DCF 研究的基础上, 提出了一种基于最小竞争窗口自适应调整的退避算法 (Minimum Contention Window Self-adaptive Adjusting, MCWSA)。该算法的思想是每个站点根据网络中当前的时隙利用率和理论上最优时隙利用率进行比较, 周期性动态调整自身的最小竞争窗口, 以适应不同的网络拥塞状况。仿真表明, 该算法提高了 IEEE 802.11 局域网在拥塞情况下的性能, 在饱和吞吐量和时延上都有不同程度的改善。  
**关键词:** IEEE 802.11; 退避算法; 自适应调整; 时隙利用率; 最小竞争窗口

中图分类号: TN915.04

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)04-0961-05

## A Self-adaptive Minimum Contention Window Adjusting Backoff Algorithm in IEEE 802.11 DCF

Zhu Ying Xia Hai-lun Wu Mu-qing

(Institute of Communication Networks Integrated Technique,

Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract:** A backoff algorithm based on Minimum Contention Window Self-adaptive Adjusting (MCWSA) is proposed in this paper. The idea of this algorithm is that every node in the network adjusts self minimum contention window periodically, according to the comparing result of the present slot utilization and the optimal value, to adopt the congestion status. Simulation result proves that MCWSA can enhance the IEEE 802.11 performance in saturation throughput and delay.

**Key words:** IEEE 802.11; Backoff algorithm; Self-adaptive adjusting; Slot utilization; Minimum contention window

### 1 引言

IEEE 802.11 标准<sup>[1]</sup>定义的 MAC 协议中的分布式协调功能(Distributed Coordination Function, DCF)是采用以时隙为单位的离散时间刻度和二进制指数退避策略(Binary Exponential Backoff, BEB)。由于 MAC 接入机制对无线网络的性能有着很大的影响, 目前已有各种改进算法, 如采用新的退避过程取代 BEB 退避策略。文献[2]提出了乘性递增线性递减(Multiple Increase Linear Decrease, MILD)算法, 虽然改善了节点公平性, 但会使节点较长时间地处于较大的竞争窗口的状态, 有可能反而降低网络吞吐量。针对其不足, 文献[3]提出的指数递增指数递减(Exponential Increase Linear Decrease, EIED)算法, 递增和递减指数参数可以灵活配置, 但如何根据网络状态选择最佳的指数参数需要进一步研究。文献[4]采用碰撞倍增和成功减半的策略, 可以看成是 EIED 的一种特例, 这里称之为 MIMD(Multiple Increase Multiple Decrease)算法。另外, 还有以不同的网络性能为指标来调整 RTS 门限、最小竞争窗口等 DCF 参数来改善网络性能。如文献[5,6]通过建模分析帧发送时延得出混合模式传输下最优的 RTS 门限值。文献[7]通过收集网络冲突时间和

空闲时间的比值来推导最大吞吐量。但不足之处是它们都需要估算或前提是已知网络中站点数。而文献[8]利用公式代换避开了直接估算网络中站点数, 而是观察节点平均重传次数来计算混合模式下能耗最少的 RTS 门限值。文献[9]在文献[7]的基础上, 利用网络冲突和空闲时间的理论最优比值随站点数增加近似不变的特性来动态调整最小竞争窗口, 无需估算站点数, 但参数收集和更新算法比较复杂。文献[10]提出的 DCC 算法能自适应调整每个节点的发送概率, 其采用的时隙利用率能较好地表征网络拥塞程度, 值得借鉴。通过研究上述各改进退避算法, 借鉴文献[10]中的时隙利用率的概念并结合最优化参数提出了一种最小竞争窗口自适应调整算法(MCWSA)。仿真表明 MCWSA 算法在网络饱和吞吐量和时延上比 BEB, MIMD 都有不同程度的改善。

### 2 网络拥塞状况的衡量

自适应算法需要根据网络状况来动态调整自身的参数以达到最优的网络性能。文献[10]中提出的时隙利用率的概念可以很好地反映网络当前的拥塞程度, 其定义如下:

$$\text{Slot\_utilization} = \frac{\text{Slot}_{\text{busy}}}{\text{Slot}_{\text{all}}} = \frac{\text{Slot}_{\text{collide}} + \text{Slot}_{\text{success\_send}}}{\text{Slot}_{\text{all}}} = 1 - (1 - \tau)^n \quad (1)$$

$\tau$  为每个站点在时隙开头的发送概率,  $n$  为网络中站点数。

当网络繁忙时, 信道忙的时隙数在总的时隙中所占比重加大, 即时隙利用率加大。而网络空闲时, 空闲时隙数增多, 即时隙利用率减小。但如何寻找一个最佳的时隙利用率来作为网络拥塞状况的衡量标准至关重要。文献[11]给出了 WLAN 中饱和情况下的站点最佳发送概率:

$$\tau = \frac{\sqrt{[n + 2(n-1)(T_c^* - 1)]/n - 1}}{(n-1)(T_c^* - 1)} \quad (2)$$

其中  $T_c^*$  为以时隙数为单位表示的平均冲突时长。这就是在站点数和平均冲突时长一定的情况下, 为获得理论上最大饱和吞吐量, 各站点需要满足的发送概率, 它与采用何种退避算法无关。因此, 可将式(2)代入式(1)求出不同站点数下(假设平均冲突时长为  $4772\mu\text{s}$  的最优时隙利用率理论值, 如图 1 所示。

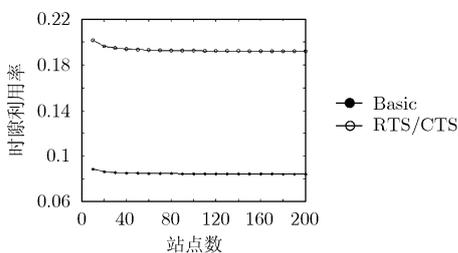


图 1 Basic 模式下和 RTS/CTS 模式下网络最佳时隙利用率

我们发现无论哪种模式下, 网络理论最优时隙利用率随站点数增加而变化很小, 近似保持恒定。这一性质为我们的自适应算法提供了很好的最优值参照。该理论最优值可作为不同站点数情况下网络拥塞程度的一个衡量标准。

### 3 MCWSA 算法描述

#### 3.1 MCWSA 算法设计思想

由于 802.11 中退避过程的特点, 最小竞争窗口的大小会对网络性能产生很大的影响。文献[11]分析表明, 在网络拥塞的情况下, 增大最小竞争窗口值会明显提高网络吞吐量, 减少冲突。在网络空闲情况下, 过大的竞争窗口反而会增加网络空闲时隙数, 降低吞吐量。这说明要获得最优的网络性能需要根据网络状况来动态调整最小竞争窗口值。而网络拥塞状况的衡量可以利用文献[10]中提出的时隙利用率, 好处是网络中每个站点都可以分布式独立计算。由于无线信道的共享特性, WLAN 中的每个节点都可以侦听到单跳范围内其它站点的发帧情况。根据一段时间内统计的网络实际时隙利用率和上节得出的最优时隙利用率比较可得出目前网络相对于最佳状况是拥塞还是空闲, 然后相应地调整最小竞争窗口值并向全网广播此次调整情况对所有站点进行同步更新。为尽量减小算法开销, 更新操作捎带在数据帧中。

由于网络拥塞状况不会在某一时刻瞬间解除, 为改善节点间公平性, 在最小竞争窗口动态调整的基础上我们进一步对退避过程进行优化。在 BEB 和 MILD 的窗口回退速率之

间进行折衷, 采用成功则窗口减半的方式。这样较好地兼顾了公平性和网络带宽利用率的问题, 而且过程简单易于进行建模分析。

#### 3.2 MCWSA 算法具体实现

设  $cw_{\min}$  为最小竞争窗口值,  $T_{\text{period}}$  为竞争窗口更新周期。  $S_{\text{busy}}$  为时隙忙的个数,  $S_{\text{all}}$  为更新周期内经历的所有时隙个数,  $S_{\text{U}_{\text{opt}}}$  为最优时隙利用率,  $D_{s\_u}$  为时隙利用率浮动容忍门限。

(1) 定义新的帧类型。802.11 标准中 MAC 帧首部<sup>[1]</sup>的类型域共 6bit, 标识当前帧的类型。其中值 0x20 表示数据帧, 0x28~0x3F 值为保留。定义 0x30 为网络良好数据帧, 0x31 为网络空闲数据帧, 0x32 为网络拥塞数据帧。这样可以在不改变帧格式的情况下实现算法, 不仅可以消除额外的算法开销而且有利于和原来的 802.11 网络兼容。

(2) 在更新周期  $T_{\text{period}}$  时间内, 每个站点都监听并收集其它站点的发帧情况。如有站点发送成功或发生冲突(包括自己), 则  $S_{\text{busy}}$  递增。

(3) 如到达更新周期, 首个信道竞争成功的站点将自身统计出的  $S_{\text{busy}}$  和  $S_{\text{all}}$  的比值作为当前的时隙利用率  $S_{\text{U}_{\text{current}}}$ , 与最优时隙利用率进行比较。如  $S_{\text{U}_{\text{current}}} > S_{\text{U}_{\text{opt}}} + D_{s\_u}$ , 网络拥塞; 如  $S_{\text{U}_{\text{current}}} < S_{\text{U}_{\text{opt}}} - D_{s\_u}$ , 网络空闲; 否则, 网络状况良好。根据目前的网络状态选用相应的自定义数据帧类型发送数据帧。如果发生冲突, 则将本次冲突纳入统计, 计算新的时隙利用率和网络状态, 下次重复操作同上直到发送成功或收到其它站点发出的更新操作。

(4) 站点如监听到以上自定义类型的数据帧, 无论是否发往自己, 根据类型所指定的网络状态调整自己的  $cw_{\min}$  值。网络拥塞则  $cw_{\min}$  加倍、空闲则  $cw_{\min}$  减半、良好则不变。然后, 将  $S_{\text{busy}}$ ,  $S_{\text{all}}$  计数器清零, 开始下一周期新的更新过程。

### 4 MCWSA 算法建模及性能分析

#### 4.1 马尔科夫链模型

我们使用和文献[11]中相同的假设前提条件来分析处于饱和状况下的协议性能, 以离散时间 Markov 链进行建模, 见图 2。与文献[4]不同的是我们这里的 MCWSA 算法模型的最小竞争窗口  $cw_{\min}$  是可以自适应调整的, 因此最大窗口倍增次数  $m'$  也是可变的, 但站点的最大重传次数  $m$  不变。

按照 MCWSA 算法, 竞争窗口大小  $w_i$  变化如下:

$$\begin{cases} w_i = 2^i W, & 0 \leq i \leq m' \\ w_i = 2^{m'} W, & i > m' \end{cases} \quad (3)$$

其中  $i$  表示退避阶段,  $W = (cw_{\min} + 1)$ ,  $2^{m'} W = (cw_{\max} + 1)$ 。

以  $b_{i,k}$  表示 Markov 链各状态的稳态概率,  $P$  为节点发帧产生碰撞的概率,  $n$  为网络中的节点数,  $\tau$  为节点在每个时隙开始时的发帧概率。由以上 Markov 链可得到如下稳态方

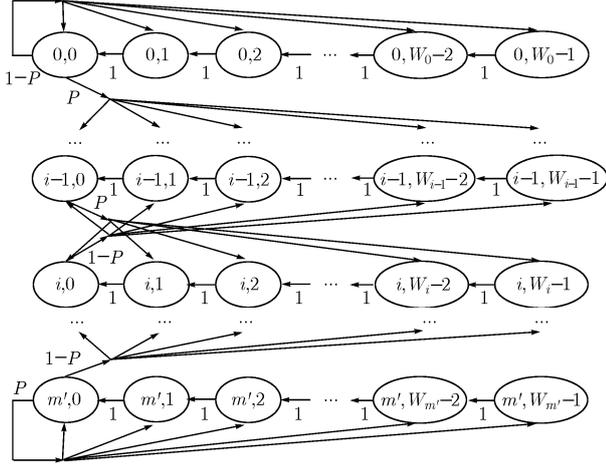


图 2 MCWSA 退避算法的 Markov 链模型

程：

$$b_{i,0} = q^i b_{0,0}, \quad 0 \leq i \leq m' \quad (4)$$

$$b_{i,k} = \frac{w_i - k}{w_i} b_{i,0}, \quad 0 \leq i \leq m', k \in [1, w_i - 1] \quad (5)$$

$$\text{其中 } q = p/(1-p), \quad p = 1 - (1-\tau)^{n-1} \quad (6)$$

而对于所有的状态有

$$\sum_{i=0}^{m'} \sum_{k=0}^{w_i-1} b_{i,k} = 1 \quad (7)$$

将式(3)~ 式(6)代入式(7)可得

$$b_{0,0} = \frac{2(1-2q)(1-q)}{W(1-(2q)^{m'+1})(1-q) + (1-2q)(1-q^{m'+1})} \quad (8)$$

因此，当网络处于稳态时，各节点在每个时隙开始时发送帧的概率可计算如下：

$$\tau = \sum_{i=0}^{m'} b_{i,0} = \frac{1-q^{m'+1}}{1-q} b_{0,0} \quad (9)$$

将式(6)，式(8)代入式(9)即可联合算出  $\tau$  随站点个数  $n$  和最小竞争窗口  $W$  值变化的不同值。其中最小竞争窗口  $W$  和窗口最大倍增次数  $m'$  是可变的，变化规律见 3.2 节。

#### 4.2 性能分析

利用以上推出的式(9)，式(2)和式(1)以及文献[11]中的节点发送概率公式，我们可以计算出在不同的节点数情况下的最佳时隙利用率、BEB 算法的时隙利用率理论值、MCWSA 算法在不同最小竞争窗口下的时隙利用率理论值，如图 3 所示。这样可以从理论计算值的角度选取几种情况来看 MCWSA 算法中退避过程和最小竞争窗口动态调节机制的效果。

由图 3 可看出，最优时隙利用率曲线是最小的，最大的是 BEB 算法。因为在网络拥塞的情况下，时隙利用率越大，导致的冲突概率越大，成功发送的情况所占比重越小。而随着最小竞争窗口的增大，MCWSA 的时隙利用率正逐渐逼近最优情况。这正是 MCWSA 算法要达到的效果，根据网络拥塞状况不断调节最小竞争窗口来获得或逼近最优网络性能。

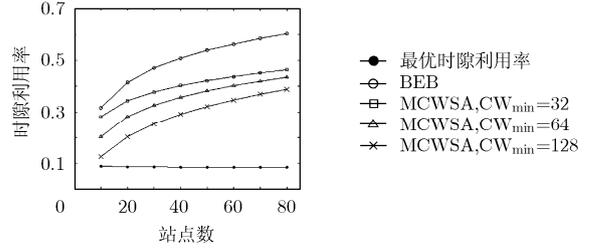


图 3 站点数 vs 时隙利用率

## 5 仿真分析

### 5.1 仿真模型

使用 OPNET 仿真工具，采用 802.11b 的 DSSS 传输模式，所有站点均在单跳通信范围内，传输范围 200m 且每站点随机选择目的站点进行通信。数据帧有效载荷为 1000byte，发帧间隔为 0.02s。利用第 2 节所述方法获取 MCWSA 所要的最优时隙利用率，并参照文献[9]选取时隙利用率浮动容忍门限  $D_{s_u}$  的值，具体参数如表 1 所示。为了评估在不同网络规模下协议的性能，我们在站点数  $n$  为 10 到 80 这八组场景下进行仿真，其中每组场景取不同的随机种子测 10 次取平均值(confidence interval 取 80%)。

表 1 仿真参数设置

参数	数值
数据帧负荷	8000bit + 160bit
时隙大小	20μs
最优时隙利用率	0.084 (Basic) 0.192(RTS)
时隙利用率浮动容忍门限	0.01 (Basic) 0.03(RTS)
$cw_{min}$ 更新周期	0.5s
数据帧速率	2Mbit/s
控制帧速率	1Mbit/s
初始最小竞争窗口	32
最大竞争窗口	1024
最大重传次数, $m$	7

### 5.2 仿真结果

首先要选取一个比较合理的最小竞争窗口更新时间，更新周期不能太小也不能太大。更新周期太小，自适应算法所需的网络状态统计值不能准确反映网络状况；更新周期太长，自适应算法不能及时调整竞争窗口，效果下降。通过选取不同的更新周期进行仿真测试比较，我们采用 0.5s 为更新周期。以下图 4 到图 7 即 MCWSA 在不同网络规模下和两种接入模式下与 BEB 和 MIMD 算法的性能比较。

由图 4 可以看出，MCWSA 的饱和吞吐量比 BEB 和 MIMD 有相当大的提高，提高值分别达到了 49%和 23%(站点数为 80 的情况)。而且随着站点数的增加，MCWSA 的吞

吐量曲线很平滑,并没有太大幅度的下降,这正是自适应窗口调节机制所起的作用。更重要的是我们可看到 MCWSA 的吞吐量曲线已经和理论最大吞吐量曲线十分逼近了。图 5 比较了在 Basic 模式下采用各算法的平均帧延迟特性。可以看出,MCWSA 算法的平均帧延迟比 BEB 算法和 MIMD 算法分别降低 31%和 19%(站点数为 80 的情况)。这表明自适应窗口调节机制极大地减少了冲突情况和重传次数。特别是 MCWSA 和 MIMD 的比较表明,同样是冲突减半的退避过程,采用自适应窗口调节比不采用优势明显。

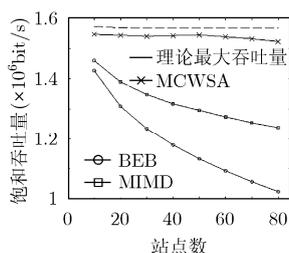


图 4 饱和吞吐量仿真值比较: Basic 模式

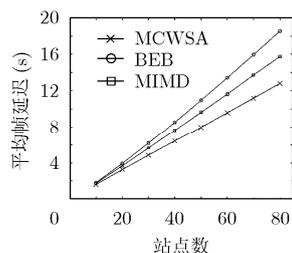


图 5 平均帧延迟仿真值比较: Basic 模式

图 6 和图 7 是在 RTS/CTS 模式下的性能比较。可看出 MCWSA 的帧时延与 MIMD 相差不大,略大于 BEB。这是由于 RTS/CTS 模式下,冲突的概率和冲突导致的时间浪费大大减小,折衷的窗口回退速率反而增加了时延。在饱和吞吐量上,站点数为 15 以下的性能要低于 BEB 和 MIMD,这是由于图 1 中最佳时隙利用率在站点数为 15 以下和 15 以上还是有相对较大的变化,而我们的最佳时隙利用率取的是站点数 15 以上的近似不变的定值,再加上我们选取的时隙利用率浮动容忍门限  $D_{s\_u}$  参考值并不是最佳的,所以导致在站点数较少时判断网络状况有一定的偏差,使得站点的最小竞争窗口较大。不过随着站点数的增多,竞争加剧,MCWSA 开始优于这两种算法。

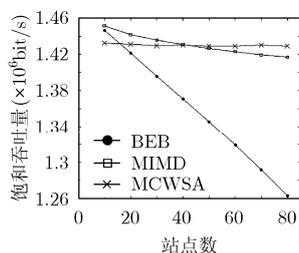


图 6 饱和吞吐量仿真值比较: RTS/CTS 模式

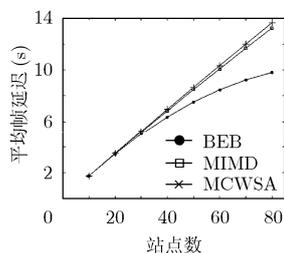


图 7 平均帧延迟仿真值比较: RTS/CTS 模式

以上分析表明,MCWSA 算法在 Basic 模式下饱和吞吐量和帧延迟上相对 BEB, MIMD 都有较大的改善,而且在吞吐量上接近理论最大值;在 RTS/CTS 模式下随着网络规模的扩大,对吞吐量的改善也渐渐的显现。这说明 MCWSA 算法所用的自适应最小窗口调节机制和冲突窗口减半策略

是有效的。以后的改进工作是期望能根据不同的网络规模自适应选用最优的更新周期和时隙利用率浮动容忍门限  $D_{s\_u}$ ,并考虑到站点数较少情况下的最佳时隙利用率的取值问题,进一步改善 RTS/CTS 模式下的吞吐量和时延性能。

## 6 结束语

利用理论最佳网络参数情况下时隙利用率随站点数增加近似不变的特点,提出了最小竞争窗口自适应调整的 MCWSA 算法及其理论模型。该算法采用的自适应机制简单有效,能根据当前网络状况及时调整最小竞争窗口值,很大程度上降低了冲突的可能性。通过与 BEB 算法、MIMD 算法在不同站点数情况下的仿真结果比较表明,MCWSA 算法在 Basic 模式下的吞吐量和时延性能有较大的改善,RTS/CTS 模式下的性能仍有待于进一步提高。

## 参考文献

- [1] ANSI/IEEE Std 802.11, IEEE standard for Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications, New York, 1999.
  - [2] Bharghavan V, Demaers A, and Shenker S. MACAW: A media access protocol for wireless LANs. Proceedings of ACM SIGCOMM'94, London, UK, 1994: 212-225.
  - [3] Song N O, Kwak B J, and Song J. Enhancement of IEEE 802.11 distributed coordination function with exponential increase exponential decrease backoff algorithm. Vehicular Technology Conference, 2003, The 57th IEEE Semiannual, Orlando, Florida, 2003: 2775-2778.
  - [4] Wu H, Long K, and Cheng S. IEEE 802.11 distributed coordination function (DCF): Analysis and enhancement. In Proceedings of ICC'02, New York, 2002: 605-609.
  - [5] Chatzimisios P, Boucouvalas A C, and Vitsas V. Optimisation of RTS/CTS handshake in IEEE 802.11 wireless LANs for maximum performance. GlobeCom Workshops 2004, Dallas, TX, United States, 2004: 270-275.
  - [6] Zhang Liang and Shu Yantai. RTS threshold self-tuning algorithm based on delay analysis on 802.11 DCF. Wireless Communications, Networking and Mobile Computing 2005, Wuhan, China, 2005: 627-630.
  - [7] Cali F, Conti M, and Gregori E. IEEE 802.11 protocol: design and performance evaluation of an adaptive backoff mechanism. *IEEE Journal on Selected Area in Communications*, 2000, 18(9): 1774-1786.
  - [8] 严少虎, 卓永宁, 吴诗其, 郭伟. IEEE 802.11 DCF 中基于能耗最小的 RTS 门限自适应调整算法. *电子与信息学报*, 2005, 27(12): 1983-1987.
- Yan Shao-hu, Zhuo Yong-ning, Wu Shi-qi, and Guo Wei. An adaptive RTS threshold adjusting algorithm based on minimum energy consumption in IEEE802.11 DCF. *Journal*

- of Electronics & Information Technology*, 2005, 27(12): 1983-1987.
- [9] 彭泳, 程时瑞. 一种自适应无线局域网协议. *软件学报*, 2004, 15(4): 604-615.
- Peng Yong and Cheng Shi-duan. A self-adaptive wireless WLAN protocol. *Journal of Software*, 2004, 15(4): 604-615.
- [10] Bononi L, Conti M, and Donatiello L. Design and performance evaluation of a distributed contention control (DCC) mechanism for IEEE 802.11 Wireless Local Area Networks. In *Proceedings of the WOWMOM 98*, Dallas Texas, 1998: 59-67.
- [11] Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function. *IEEE Journal on Selected Area in Communications*, 2000, 18(3): 535-547.
- 朱 颖: 男, 1979 年生, 博士生, 研究方向为无线通信网路由、MAC 接入与跨层设计.
- 夏海轮: 男, 1980 年生, 博士讲师, 研究方向为 Ad hoc 网络服务质量关键技术研究.
- 武穆清: 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为宽带通信网中业务融合与接入、无线局域网以及业务质量控制.