

## IEEE 802.11 DCF 中带优先级的退避算法

严少虎 卓永宁 吴诗其 郭伟

(电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室 成都 610054)

**摘要:** 该文针对 IEEE 802.11 DCF 提出一个带优先级的退避算法。算法的基本思想是网络中的节点在侦听信道的同时, 搜集其他节点发送数据的统计信息, 并在本地维护一个关于节点已发送数据量的统计表。当节点有数据需要发送时, 将根据表中的统计数据以及本节点的优先级来计算竞争窗口。计算机仿真证明, 该算法能很好地完成网络的信道容量在不同优先级的节点之间按一定的比例分配, 同时还可提高整个网络的吞吐率。

**关键词:** 退避算法, 优先级, IEEE 802.11, 分布式协调功能

中图分类号: TP393.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2005)08-1315-05

## Priority Backoff Algorithm for IEEE 802.11 DCF

Yan Shao-hu Zhuo Yong-ning Wu Shi-qi Guo Wei

(National Key Laboratory of Communication, UEST of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract** A Priority Backoff Algorithm (PBA) for IEEE 802.11 DCF is presented in this paper. The basic idea of PBA is each station should collect statistical data of other stations' transmission while sensing the channel, and maintaining a sent data table for all stations in network. When the station has data to transmit, it will calculate contention window based on the statistical data in sent data table and its own priority. Computer simulation proves that PBA can properly assign network capacity among stations in proportion to their priorities as well as enhance the network saturation throughput.

**Key words** Backoff algorithm, Priority, IEEE 802.11, Distributed coordination function

### 1 引言

IEEE 802.11 标准<sup>[1]</sup>提供了无线局域网(WLAN)中具体的媒质访问控制(MAC)和物理层(PHY)规范, 其中的分布式协调功能(Distributed Coordination Function, DCF) 是一种分布式的 MAC 协议, 它采用了随机访问机制。随机接入协议中非常重要的一个部分就是如何解决碰撞。为了减小碰撞概率, 大多数随机接入协议中都规定了退避过程。在 IEEE 802.11 DCF 中, 退避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), 其特点是一旦碰撞发生, 竞争窗口(也称为退避窗口)将以二进制指数规律增长。BEB 算法实现简单有效, 因而被很多分布式无线网络 MAC 协议采用, 如 MACA(Multiple Access Collision Avoidance)、FAMA (Floor Acquisition Multiple Access)等。

随机退避机制对无线网络 MAC 协议的性能有很大影响, 自 70 年代以来就有众多的文献广泛地研究它。文献[2,3]在研究 IEEE 802.11 DCF 的性能时, 分析了 BEB 算法的参数, 如最小/最大退避窗口, 最大退避级别对 DCF 性能的影响。文献[4]通过对 IEEE 802.11 DCF 退避算法的仿真分析, 发现

适当的竞争窗口对网络性能有重要的影响。文献[5]则分析了指数规律退避算法的性能和稳定性。文献[6]则提出了 IEEE 802.11 网络下一种近似最优退避算法(Asymptotically Optimal Backoff, AOB), 它能根据网络的负载情况动态调整退避窗口的大小, 从而得到近似最优的性能。

无线网络 MAC 协议的性能, 不能单从信道利用率, 亦即网络饱和吞吐率来看, 这仅仅是它的一个方面。IEEE 802.11 DCF 能较好地支持尽力而为的业务, 其中的 BEB 却被证明是不公平的, 尤其是在网络负载比较重的时候, 存在捕获效应。文献[7]提出了乘性增加线性递减(Multiple Increase Linear Decrease, MILD)的退避算法, 以提供较好的公平性。然而, IEEE 802.11 DCF 没有提供任何的优先级机制以及业务区分特性。鉴于此, 文献[8]提出了 IEEE 802.11 DCF 网络环境下基于退避机制的优先级方案, 其思想是通过不同的退避参数, 如最小退避窗口, 退避窗口增长因子, 最大退避级别, 来划分不同的优先级。不过, 该方案使用 3 个参数联合控制, 实际应用中较为繁琐, 而且没有考虑提升网络性能。

本文针对 IEEE 802.11 DCF, 提出一个带优先级的退避算法(Priority Backoff Algorithm, PBA), 其基本思想是网络中的节点在侦听信道的同时, 搜集其他节点发送数据的统计信息, 并在本地维护一个关于各节点已发送数据量的统计表。当节点有数据需要发送时, 将根据表中的统计数据以及本节点的优先级来计算竞争窗口。对于网络中的不同节点, 设置不同的优先级, 以使其分享到不同的网络容量, 亦即达到不同的最大数据发送速率。计算机仿真证明, 该算法能很好地完成网络的信道容量在不同优先级的节点之间按一定的比例分配, 同时由于其竞争窗口调节机制可有效地减小碰撞概率, 该算法还可提高网络的饱和吞吐率。

## 2 带优先级的退避算法基本思想

IEEE 802.11 DCF 规定了两种媒体接入方式, 一种是基本方式, 一种是 RTS/CTS 方式。基本方式下, 发送方直接发送数据帧(DATA)给收方, 收方在正确接收后发确认帧(ACK)给发送方。而 RTS/CTS 方式下, 收发双方在真正的数据传送开始之前, 会交换 RTS 帧和 CTS 帧预约信道。为了减少碰撞, 在 DATA 帧的帧头以及 RTS, CTS 和 ACK 帧的帧体中, 均有一个 Duration 域, 用以通知其他节点该次发送需要持续的时间, 其他节点正确收到这个信息后, 更新自己的网络分配矢量(Network Allocation Vector, NAV), 并在这段时间内保持静默。

假定网络中各个节点相互之间能够正常通信, 当某个节点发送数据时, 如果发生碰撞, 其他节点与接收节点一样, 都不能正确接收, 而如果发送成功, 其他节点也可以检测到。按照标准要求, 节点在侦听信道的同时, 要从相应的帧中分析 Duration 域, 以便完成 NAV 的更新。由于需要做校验以判断接收是否正确, 节点势必要将 DATA 帧完整地接收下来, 才能从中提取 Duration 域。与此同时, 节点可以很容易地分析出该次发送所包含的数据量以及数据帧的源地址。显然, 这些功能都可在 MAC 层实现, 不会增加太多的负担。因此, 节点就可以对数据发送过程做相关的统计, 以完善分布式协调的能力。需要注意的是, 节点只统计成功发送的 DATA 帧。可见, 这里只是充分利用了每个 DATA 帧携带的信息, 而并不影响原有的通信过程。例如, 当节点 A 听到节点 B 正在发送数据给节点 C 时, A 可以检测到这次发送的数据量, 并对 B 的发送做记录和统计, 当然 A 可以对包括自身在内的所有节点的发送过程做统计。网络中任一节点都可维护一个关于其他节点的已发送数据统计表(Sent Data Table, SDT), 在需要的时候就可以用 SDT 的数据来做相关的计算。

另一方面, 为了区分节点的优先级, 每个节点在发送数

据时, 需要在发送的数据包中附带优先级信息。一个办法就是在 MAC 帧头中新加一个字段。为了尽可能地减少对标准的修改, 这里只对 MAC 帧格式作一个细小的改动。分析发现, 可以修改的字段只有序列控制(Sequence control)字段。序列控制字段长度为 16 个比特, 由序列号和分段号两个子字段构成。

图 1 给出了标准的序列控制字段格式及修改后的格式。优先级由 3 个比特表示, 可以定义 8 个不同的值, 基本上能满足一般应用的需要, 而分段号字段减少了 1 个比特, 序列号字段减少了 2 个比特, 不会对协议的应用产生太多的负面影响。

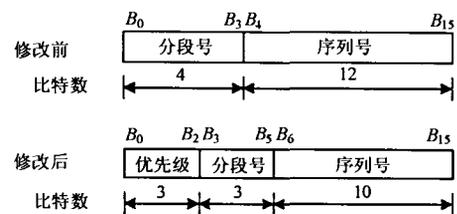


图 1 序列控制字段的格式修改

## 3 带优先级退避算法的具体实现

带优先级退避算法(PBA)是一个全分布式的算法, 它不需要节点之间主动交换退避的相关信息。该算法包括侦听及更新本地数据、发送前计算竞争窗口两个主要的过程。为了说明方便, 简称 IEEE 802.11 DCF 中规定的退避算法为 BEB。

### 3.1 侦听及更新本地数据

网络中的任何节点, 不发送数据时, 需要侦听其他节点的发送, 而与标准 DCF 的不同之处在于, 此时节点需要记录网络中一次成功发送的数据量, 该次发送的源节点, 及源节点的优先级。这里假定每个节点的优先级是预先设定的, 且不会动态改变。每个节点的已发送数据统计表 SDT 格式如图 2, 当然包括自己本身的对应项(网络初始化时, R 和 S 均为 0)。

节点 ID(n)
优先级 (P)
已发送数据量 (R)
已发送数据量 (加权后) (S)

图 2 已发送数据统计表格式

由于一个节点只对应于一个 MAC 地址, 节点 ID 就可以用地址来表示。PBA 定义的 8 个优先级从高到低分别为 0, 1, ..., 7。设节点 n 的优先级为  $P_n$ , 用  $r_n$  来表示该节点某次发送的数据量,  $s_n$  表示经优先级加权后该节点发送的数据量, 具体的算法如下:

$$s_n = r_n / (3 - P_n / 3) \quad (1)$$

节点将在 SDT 中, 把新近一次统计的数据  $s_n$  累加到  $n$  节点对应的数据  $S_n$  上。对于优先级比较高的节点, 发送同样数量的数据, 在 SDT 中, 所累加的数值相对要小一些。当然, 任何节点在成功发送一个数据包时, 也会按同样的算法在 SDT 中更新自己所对应的项。

### 3.2 发送前计算竞争窗口

IEEE 802.11 DCF 中规定, 节点在发送之前必须进行退避, 不管这之前该节点是否成功发送数据。所以, 每个节点在发送数据之前, 需要首先计算本次退避的时隙数, 也就是需要确定竞争窗口。PBA 与 BEB 最大的不同在于, 对于要发送的新数据包, BEB 总是选用最小竞争窗口  $CW_{min}$ , 而 PBA 则将根据当前的网络状态来计算一个合适的竞争窗口, 因而对网络的状态有一定的自适应能力。下面分别讨论第一次发送数据包和重传时的竞争窗口计算方法。

3.2.1 第一次发送 PBA 规定, 对于上层新到达的数据包在首次发送时所选用的竞争窗口将由网络的当前状态来决定, 具体而言就是网络中平均每个节点已发送数据量, 本节点已发送数据量, 以及本节点的优先级和上次发送所采用的竞争窗口。当然, 这里的已发送数据量是按式(1)的算法作过加权后的累加值。

任一节点都可以利用本地 SDT 中的统计数据来计算网络中平均每个节点已发送的数据量 AVS, 其中  $N$  是网络中节点数。

$$AVS = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N S_k \quad (2)$$

节点在发送数据前, 首先检查自己已发送数据量与这个网络平均值 AVS 之间的差值, 然后根据这个差值来计算一个合适的竞争窗口。差值的计算方法如下(为了计算方便, 这里用 8 倍平均数据包的长度  $L$  来做归一化)。

$$D = (S - AVS) / (8L) \quad (3)$$

当该节点已发送的数据量  $S$  高于网络平均值 AVS 时, 应适当的增大竞争窗口, 以便让其他节点能以更高的概率接入信道。反之, 如果低于 AVS, 则应适当减小竞争窗口, 争取在更短的时间内发送数据, 以期尽快达到网络的平均水平。如果  $S$  与 AVS 相差不大, 节点可以按照原有的竞争窗口继续发送新数据包。为了减小碰撞的概率, 这时对竞争窗口作随机化处理, 但均值维持原有竞争窗口大小。具体的竞争窗口调节算法如下:

$$CW_{k+1} = F(CW_k, D) = \begin{cases} CW_k \cdot D^2, & D > 1 \\ CW_k / (-D), & D < -1 \\ \lfloor CW_k \cdot (0.5 + \text{Random}(1.0)) \rfloor, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

这里, 限制计算所得的竞争窗口的取值区间为 [3,

$CW_{max}$ ], 如果小于最小值, 则直接设置竞争窗口为 3, 如果大于规定的  $CW_{max}$ , 则指定竞争窗口为  $CW_{max}$ 。另外, 网络初始化时, 每个节点均设置其竞争窗口为  $CW_{min}$ , 亦即  $CW_0 = CW_{min}$ 。显然, 按照上面的算法, 节点在发送第一个数据包时, 并不一定使用  $CW_{min}$ 。

在 MILD 算法中, 节点成功发送一个数据包, 竞争窗口将以固定的步长减小, 而不是像 BEB 那样直接退至  $CW_{min}$ 。PBA 则根据网络的当前状态以及相关统计数据来计算竞争窗口, 相比之下更加灵活。

3.2.2 重传过程 在重传过程中, IEEE 802.11 DCF 规定的竞争窗口调整算法如下, 其中  $i$  为重传次数, 取值为 0, 1, 2, ...。这也是 BEB 的主要特征。

$$CW^{i+1} = 2 \cdot CW^i \quad (5)$$

显然, 依照标准中的算法,  $CW$  随重传次数的增加而迅速增大, 其目的就是减少碰撞的概率, 但却会导致发送失败的节点再次接入信道的概率大大降低, 而成功发送的节点却有更高的概率接入信道, 亦即存在捕获效应。PBA 虽然沿用这种方法, 却不会有 BEB 的缺点, 因为式(4)的竞争窗口调整算法完全可以避免某一节点独占信道。

另外, 利用式(4)计算第  $k+1$  个数据包的竞争窗口时, 所依赖的仍然是第  $k$  个数据包初次发送时使用的竞争窗口, 而忽略第  $k$  个数据包在重传过程中调整后的竞争窗口值。

## 4 仿真结果及性能分析

下面将采用仿真的方法, 对 PBA 的性能进行分析。仿真平台为 UC Berkeley 大学的 NS2<sup>[10]</sup>, 采用 DSSS 的物理层, 相关参数如表 1 所示。

这里数据包长为固定的 512byte, 发送方式是采用基本方式还是 RTS/CTS 方式则由 RTS 门限决定。鉴于需要分析网络性能, 要求节点总是有数据包等待发送, 亦即处于饱和和状态, 且随机地选择目的节点进行发送。另外, 网络中的节点从 0 开始编号, 依次为 1, 2, 3, 直到  $N-1$  ( $N$  为网络节点数)。第  $n$  个节点的优先级设置为  $(n \bmod 8)$ , 且在仿真过程中固定不变。

表 1 网络仿真参数

参数名	参数值	参数名	参数值
信道速率(Mbps)	1	数据包载荷长度(byte)	512
传播时延(μs)	1	RTS 门限(byte)	1000/256
时隙大小(μs)	20	最小竞争窗 $CW_{min}$	32
SIFS(μs)	10	最大竞争窗 $CW_{max}$	1024
DIFS(μs)	50	单次仿真时间(s)	300

### 4.1 网络的饱和吞吐率

文献[2,3]的研究表明, IEEE 802.11 DCF 的网络饱和吞吐率会随着节点数的增多而下降, 原因在于节点数越多, 发生碰撞的概率就越大。图 3 给出了采用 PBA 和 BEB 的网络饱和吞吐率随节点数的变化情况, 横坐标对应的节点数为 8, 12, 16, ..., 40。图中同时给出了采用基本方式和 RTS/CTS 方式(在图中分别以“Bas”和“R/C”标示)发送的情况, 且所有的数据都是 5 次仿真结果的平均值。

可以看到, 无论是基本方式还是 RTS/CTS 方式, PBA 的饱和吞吐率都比 BEB 要高, 这得益于 PBA 对竞争窗口的有效调节。在 PBA 方式下, 网络饱和吞吐率对节点数的增加不如 BEB 敏感, 这是因为 PBA 能根据网络的情况, 自适应地调节竞争窗口的大小。图 3 也反应出与基本方式相比, RTS/CTS 方式的网络吞吐率受节点数增长的影响不太明显。另外, PBA 在基本方式下的吞吐率大于 RTS/CTS 方式, 而同样的情况, 对 BEB 则正好相反, 这是因为两种网络碰撞概率的差异。对于特定的网络, 存在一个最佳的 RTS 门限, 使得网络的饱和吞吐率最大<sup>[9]</sup>, 而决定最佳 RTS 门限的根本因素就是网络中数据包的碰撞概率。简单地讲就是当碰撞概率比较低时, 采用基本方式比较有效, 而碰撞概率比较高时, RTS/CTS 方式则更有效。图 4 给出的网络中每一个数据包的平均重传次数则直观地反应了数据包的碰撞情况。显然, PBA 方式下的平均重传次数低于 BEB, 证明 PBA 对竞争窗口的调节比 BEB 有效。

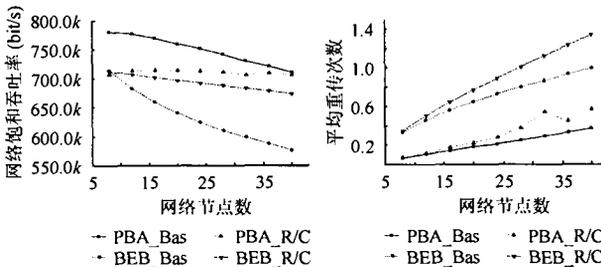


图 3 PBA 与 BEB 的网络吞吐率比较

图 4 PBA 与 BEB 的平均重传次数比较

### 4.2 不同优先级节点的最大吞吐率

PBA 与 BEB 相比, 其优点不仅在于能提高网络的饱和吞吐率, 更重要的是, PBA 加入了优先级机制, 并对不同优先级的节点进行区分。

现在分析网络中第 0-7 节点(对应的优先级为 0-7)的饱和吞吐率以及平均每个数据包的竞争窗口(相同优先级的节点具有几乎相同的特性)。根据 8 节点网络和 20 节点网络的仿真结果可以作出图 5 和图 6 的曲线。这里只是比较基本方式的情况, RTS/CTS 方式有着相似的结果。

从图 5 中可以看到, PBA 算法可以有效地控制各个节点的饱和吞吐率, 而且具有不同的优先级的节点所能达到的最大吞吐率与其优先级几乎呈线性关系。这是因为各节点总是尽力保持自己加权后的已发送数据量维持到网络的平均水平, 按式(1)的加权算法反推, 可知节点实际已发送数据与其优先级呈线性关系。当然, 这里的关系是一种相对关系, 该算法只能保证信道的带宽在不同的节点之间按优先级的比例分配, 而不能保证节点所获取信道带宽的绝对值, 图 5 也显示了这一点。因为 PBA 方式下, 网络中各个节点总是以被动方式获取调整竞争窗口所需要的信息。

图 6 给出了对不同优先级节点而言, 平均每个数据包的竞争窗口大小比较。可以看到, 节点发送前需要退避的平均时间随着自身优先级的降低而逐渐增大, 而竞争窗口越大, 接入信道的概率就越低, 其吞吐率也就越低, 这正好与图 5 的结果相吻合。

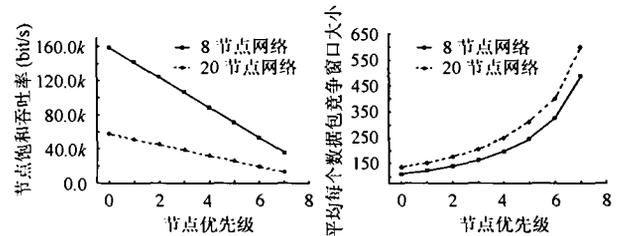


图 5 不同优先级节点的饱和吞吐率

图 6 不同优先级节点的平均竞争窗口大小

## 5 结束语

本文提出了一个适用于 IEEE 802.11 DCF 的带优先级退避算法(PBA)。该算法的基本出发点是充分利用标准定义的数据帧中所携带的信息。各节点统计网络中节点发送数据的情况, 并根据这些统计数据来计算退避时所选用的竞争窗口, 从而使节点的退避对网络有一定的自适应能力。PBA 使用了比 BEB 更加灵活的退避机制, 有效地减小数据包的碰撞概率, 从而可以提高网络的饱和吞吐率。与 BEB 相比, PBA 的优点主要体现在它可以使信道容量在各个节点之间按优先级的比例进行分配。计算机仿真的结果验证了这一点, 同时也证明 PBA 性能优于 BEB。

PBA 是一个全分布式的算法, 它不需要节点之间主动交换退避的相关信息, 因而适用于分布式的网络环境, 如无线 ad hoc 网络。但是, PBA 只能保证信道的带宽在不同优先级的节点之间按一定的比例分配, 这只是一个相对的关系, 而不是绝对值, 其根本原因在于各节点对竞争窗口的调节是基于自身和其他节点的比较。因此, 它仍然不能很好地支持实时业务, 尤其是网络负载比较重的时候。另外, 在拓

扑结构动态变化的网络中, PBA 的应用将面临一些困难, 原因在于这时节点的统计数据不能保证随时有效。如何解决这些问题, 正是下一步研究的内容。

### 参 考 文 献

- [1] Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, IEEE Standard 802.11-1999, IEEE Computer Society LAN MAN Standards Committee, Ed., 1999.
- [2] Binachi G. Performance Analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function. *IEEE J. on Selected Areas in Comm.*, 2000, 18(3): 535 – 547.
- [3] Tay Y C, Chua K C. A capacity analysis for the IEEE 802.11 MAC protocol. *Wireless Networks*, 2001, 7(2): 159 – 171.
- [4] Natkaniec M, Pach A R. An analysis of the backoff mechanism used in IEEE 802.11 networks, *Proceedings of Fifth IEEE Symposium on Computers and Communications, ISCC 2000, Antibes, France, July, 2000: 444 – 449.*
- [5] Byung-Jae K, Nah-Oak S, Miller L E. Analysis of the stability and performance of exponential backoff. *Wireless Communications and Networking Conference, WCNC 2003, New Orleans, Louisiana, USA, 16-20 Mar. 2003, Vol. 3: 1754 – 1759.*
- [6] Bononi L, Conti M, Gregori E. Design and performance evaluation of an asymptotically optimal backoff algorithm for IEEE 802.11 wireless LANs. *Proceedings of HICSS-33, Maui, Hawaii, Jan. 4-7, 2000: 3049 – 3058.*
- [7] Bharghavan V, Demaers A, Shenker S, Zhang L. MACAW: A media access protocol for wireless LANs. *Proceedings of ACM SIGCOMM'94, London, UK, Aug. 31-Sep. 2, 1994: C212 – C225.*
- [8] Yang Xiao. Backoff-based Priority Schemes for IEEE 802.11. *IEEE International Conference on Communications, ICC 2003, 11-15 May, 2003, Vol. 3: 1568 – 1572.*
- [9] Yan Shaohu, Zhuo Yongning, Wu Shiqi, Guo Wei. Adaptive RTS threshold for maximum network throughput in IEEE 802.11 DCF, *Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering, 2004, Vol. 5284: 332 – 343.*
- [10] <http://www.isi.edu/nsnam/> and related web pages it linked.

严少虎: 男, 1976年生, 博士生, 研究方向是移动自组织网中的 MAC 和路由技术.

卓永宁: 男, 1970年生, 讲师, 博士生, 研究方向是移动自组织网和移动通信、卫星通信.

吴诗其: 男, 1938年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向是移动通信和个人通信, 中国通信学会第三、四、五届理事, 国家“863”计划十五周年先进个人.

郭伟: 男, 1964年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为通信与信息系统, 中国电子学会和中国通信学会高级会员.