

# IEEE 802.11 移动自组织网络节点竞争窗口长度的概率分布

葛永明<sup>1</sup>, 朱艺华<sup>2</sup>, 龙胜春<sup>2</sup>, 彭 静<sup>3</sup>

(1. 浙江机电职业技术学院, 浙江杭州 310053; 2. 浙江工业大学计算机科学与技术学院, 浙江杭州 310023; 3. 浙江农林大学信息工程学院, 浙江杭州 311300)

**摘 要:** 在基于 IEEE 802.11 的移动自组织网络中, MAC (Medium Access Control) 层提供了 DCF (Distributed Coordinate Function) 以控制节点对无线信道的争用. DCF 包括了 BEB (Binary Exponential Backoff) 算法. 该文对 BEB 的重要参数——竞争窗口 CW (Contention Window) 进行研究, 通过随机建模, 导出了竞争窗口长度的概率分布, 并进行数值分析. 研究结果可应用于 IEEE 802.11 移动自组织网络.

**关键词:** IEEE 802.11 标准; 移动自组织网络; 竞争窗口; 随机分析

**中图分类号:** TN92      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2010) 08-1841-04

## Probability Distribution of the Contention Window Size in the IEEE 802.11 Based Mobile Ad Hoc Networks

GE Yong-ming<sup>1</sup>, ZHU Yi-hua<sup>2</sup>, LONG Sheng-chun<sup>2</sup>, PENG Jing<sup>3</sup>

(1. Zhejiang Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Hangzhou, Zhejiang 310053, China; 2. College of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China; 3. School of Information Engineering, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Hangzhou, Zhejiang 311300, China)

**Abstract:** In an IEEE 802.11 based mobile ad hoc network (MANET), the wireless channel is accessed through the DCF (Distributed Coordinate Function), which is provided at the MAC (Medium Access Control) layer of the IEEE 802.11 standard to control channel contention among nodes. The DCF embeds the BEB (Binary Exponential Backoff) algorithm. The key parameter CW (contention window) of the BEB is investigated by stochastic analysis modeling so that the probability distribution of the contention window size is derived. Numeric results are presented to analyze the performance of the BEB. The derived probability distribution is applicable in MANETs.

**Key words:** IEEE 802.11 standard; mobile ad hoc networks; contention window; stochastic analysis

### 1 引言

IEEE 802.11 标准<sup>[1]</sup>规定了构建无线局域网的物理层 PHY (Physical) 和 MAC (Medium Access Control) 层. 其中, MAC 提供了点协调功能 (PCF, Point Coordinate Function) 与分布式协调功能 (DCF, Distributed Coordinate Function) 以支持节点对无线信道的访问. 在基于 IEEE 802.11 的移动自组织网络中, 节点采用 DCF 访问信道.

在移动自组织网络中, 节点之间的通信会受到无线电干扰以及其它因素的影响, 从而导致数据帧发送失效. 为了进行可靠传递, IEEE 802.11 标准采用确认 (ACK, Acknowledgement) 与重传机制: 如果节点 A 要发送数据包 (下称 Data 包) 给节点 B, 只有节点 A 在收到节点 B 的确认数据包 (下称 ACK 包) 之后才认为数据是发

送成功的. 如果 Data 包或者 ACK 包丢失, 则节点 A 认为发送不成功, 需要重新发送 Data 包.

DCF 采用 CSMA/CA (Carrier Sensing Multiple Access/Collision Avoidance) 机制控制节点对信道的访问, 采用二进制指数回退算法 BEB (Binary Exponential Backoff) 降低数据包碰撞概率 (BEB 的细节将在下节中叙述). 在 BEB 中, 竞争窗口参数 CW (Contention Window) 对节点发送数据包的等待时间、吞吐量等重要指标有着重要的影响. 因此, 已有许多学者对之进行研究. 例如, F. Cali 等研究了竞争窗口规模对最大化吞吐量的影响<sup>[2]</sup>. Q. Ni<sup>[3]</sup> 与 B. Li<sup>[4]</sup> 等人研究了快速缩小竞争窗口的方法. H. Ma 等研究了高密度网络的 BEB, 提出了 CWTO (Contention Window Transmission Opportunity) 自适应算法, 在对竞争窗口进行优化的基础上最大化吞吐量并提高移动台占

用信道的公平性<sup>[5]</sup>. Q. Nasir 提出基于历史的自适应回退算法,这种方法可以根据网络的状态控制竞争窗口的振荡,以提高 QoS (Quality of Service)性能<sup>[6]</sup>. 文献[7]给出了支持业务区分的 BEB 算法.

本文也对 IEEE 802.11 网络回退算法进行研究,主要贡献与创新之处在于:利用随机分析与建模,通过构造状态转移图,导出了竞争窗口长度的概率分布以及竞争窗口的平均长度. 研究成果可应用于移动自组织网络以控制节点对无线信道的争用,提高信道使用效率.

## 2 竞争窗口数学模型

BEB 把时间分隔成多个时长为  $\tau$  的时隙 (time slot), 竞争窗口由时隙组成,它所包含的时隙个数称为“竞争窗口长度”,其值为  $CW + 1$ ,其中,  $CW$  称为竞争窗口参数,它的取值范围为  $[CW_{\min}, CW_{\max}]$ ,初始值为  $CW_{\min}$ .  $CW$  的取值范围跟 PHY 有关,例如,对于跳频物理层,  $CW_{\min} = 15$ ,  $CW_{\max} = 1023$ ; 而对于红外线物理层,  $CW_{\min} = 63$ ,  $CW_{\max} = 1023$ <sup>[1]</sup>.

BEB 通过调整  $CW$  的值以动态调整竞争窗口长度. 节点在发送数据包之前,需要监听信道,在所监听的信道空闲时间达到 DIFS (Distributed Inter-Frame Space) 之后,这个节点启动 BEB 算法:在区间  $[0, CW]$  内随机抽取一个整数  $x$  (下称“回退值”),并对每个时隙监听信道是否空闲,如是,则将  $x$  的值减 1,一旦  $x$  为 0,这个节点就将数据包发送出去. 如果数据包发送不成功需要重发,则竞争窗口长度加倍 (即新的竞争窗口长度调整为  $2(CW + 1)$ ),并重启上述 BEB 回退算法. 在  $CW$  的值达到  $CW_{\max}$  之后,  $CW$  的值不再加倍,但仍然需要重复上述回退过程. 一旦发送成功,  $CW$  恢复到初始值  $CW_{\min}$ .

我们将节点第  $i$  次回退时竞争窗口长度记为  $L_i$ ,  $i = 0, 1, \dots, m$ . 其中,  $L_0$  表示初始竞争窗口长度,即  $L_0 = CW_{\min} + 1$ ;  $L_m$  表示最大竞争窗口长度,即  $L_m = CW_{\max} + 1$ . 设网络中有  $n$  个节点,节点的集合记为  $V$ . 假设这些节点在任一时隙均参与竞争信道,即它们需要连续不断地发送数据包. 易知,各个节点启用 BEB 回退算法之后,各自的竞争窗口大小是不同的,以  $SCW(v)$  表示节点  $v$  的竞争窗口长度. 我们根据竞争窗口长度值将网络中的节点分组,令  $G_k = \{v \mid SCW(v) = L_k\}$ ,并将集合  $G_k$  的节点个数记为  $|G_k|$  ( $k = 0, 1, \dots, m$ ). 于是,  $\sum_{k=0}^m |G_k| = n$ ,  $\bigcup_{k=0}^m G_k = V$ ,  $G_i \cap G_k = \Phi$ ,  $i \neq k$ .

对于  $V$  中任一节点  $v$ ,我们可以用图 1 所示的状态转移图刻画这个节点在 BEB 算法之下竞争窗口变化情况. 图中,圆圈表示节点所处的状态;圆圈内的数字  $0, 1, \dots, m$  表示相应状态下的竞争窗口长度分别为  $L_0, L_1,$

$\dots, L_m$ . 此外,  $a_{i,j}$  表示从状态  $i$  转移到状态  $j$  的概率.

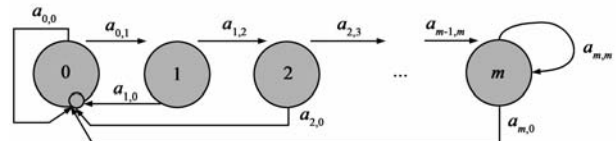


图 1 状态转移图

如果节点  $u, v \in V$  且所选择的回退值相同,则称节点  $v$  与节点  $u$  “回退值碰撞”. 设节点  $v \in G_i$  的回退值为  $x$ , 并设  $u \in G_j$ , 以  $P_{u,v}^c(j, i, x)$  表示节点  $u$  对节点  $v$  的回退值  $x$  碰撞的概率. 考虑到节点  $v$  与节点  $u$  的竞争窗口长度分别为  $L_i$  与  $L_j$ , 我们有:

$$P_{u,v}^c(j, i, x) = \begin{cases} 0, & j < i, x \geq L_j; \\ 1/L_j, & j < i, x < L_j; \\ 1/L_j, & j \geq i \end{cases} \quad (1)$$

从而,节点  $u$  在回退值  $x$  上不与节点  $v$  碰撞的概率  $\bar{P}_{u,v}^c(j, i, x) = 1 - P_{u,v}^c(j, i, x)$ . 以  $\text{Pr}_i^s$  表示  $G_i$  的节点  $v$  所选择的回退值与网络中其余节点的回退值不碰撞的概率,则

$$\begin{aligned} \text{Pr}_i^s &= \frac{1}{L_i} \sum_{x=0}^{L_i-1} \prod_{u \in V, u \neq v} \bar{P}_{u,v}^c(j, i, x) \\ &= \frac{1}{L_i} \sum_{x=0}^{L_i-1} \prod_{u \in \bigcup_{j=0}^{i-1} G_j} \bar{P}_{u,v}^c(j, i, x) \prod_{\substack{u \in G_i \\ u \neq v}} \bar{P}_{u,v}^c(i, i, x) \\ &\quad \cdot \prod_{u \in \bigcup_{j=i+1}^m G_j} \bar{P}_{u,v}^c(j, i, x) \\ &= \frac{1}{L_i} \sum_{x=0}^{L_i-1} \prod_{u \in \bigcup_{j=0}^{i-1} G_j} \bar{P}_{u,v}^c(j, i, x) \left(1 - \frac{1}{L_i}\right)^{|G_i|-1} \\ &\quad \cdot \prod_{j=i+1}^m \left(1 - \frac{1}{L_j}\right)^{|G_j|} \\ &= \frac{1}{L_i - 1} \prod_{j=i}^m \left(1 - \frac{1}{L_j}\right)^{|G_j|} \sum_{x=0}^{L_i-1} \prod_{u \in \bigcup_{j=0}^{i-1} G_j} \bar{P}_{u,v}^c(j, i, x) \end{aligned}$$

利用式(1)前两行,有:

$$\begin{aligned} &\sum_{x=0}^{L_i-1} \prod_{u \in \bigcup_{j=0}^{i-1} G_j} \bar{P}_{u,v}^c(j, i, x) \\ &= \left( \sum_{x=0}^{L_0-1} + \sum_{x=L_0}^{L_1-1} + \dots + \sum_{x=L_{i-1}}^{L_i-1} \right) \prod_{u \in \bigcup_{j=0}^{i-1} G_j} \bar{P}_{u,v}^c(j, i, x) \\ &= L_0 \prod_{j=0}^{i-1} \left(1 - \frac{1}{L_j}\right)^{|G_j|} \\ &\quad + (L_1 - L_0) \prod_{j=1}^{i-1} \left(1 - \frac{1}{L_j}\right)^{|G_j|} \\ &\quad + (L_2 - L_1) \prod_{j=2}^{i-1} \left(1 - \frac{1}{L_j}\right)^{|G_j|} + \dots \\ &\quad + (L_{i-1} - L_{i-2}) \left(1 - \frac{1}{L_{i-1}}\right)^{|G_{i-1}|} + (L_i - L_{i-1}) \\ &= (L_i - L_{i-1}) + \sum_{t=0}^{i-1} (L_t - L_{t-1}) \prod_{j=t}^{i-1} \left(1 - \frac{1}{L_j}\right)^{|G_j|} \end{aligned}$$

其中规定  $L_{-1} \equiv 0$ . 于是, 把此式代入前式, 我们得到:

$$\begin{aligned} \Pr_i^s &= \frac{1}{L_i - 1} \prod_{j=i}^m \left(1 - \frac{1}{L_j}\right)^{G_j} [(L_i - L_{i-1}) \\ &+ \sum_{t=0}^{i-1} (L_t - L_{t-1}) \prod_{j=t}^{i-1} \left(1 - \frac{1}{L_j}\right)^{G_j}] \\ &= \frac{1}{L_i - 1} (L_i - L_{i-1}) \prod_{j=i}^m \left(1 - \frac{1}{L_j}\right)^{G_j} \\ &+ \frac{1}{L_i - 1} \sum_{t=0}^{i-1} (L_t - L_{t-1}) \prod_{j=t}^m \left(1 - \frac{1}{L_j}\right)^{G_j} \\ &= \frac{1}{L_i - 1} \sum_{t=0}^i (L_t - L_{t-1}) \prod_{j=t}^m \left(1 - \frac{1}{L_j}\right)^{G_j} \quad (2) \end{aligned}$$

于是,  $G_i$  的节点  $v$  从回退状态  $i$  转移到回退状态  $i+1$  的概率:

$$\begin{aligned} a_{i,i+1} &= 1 - \Pr_i^s \\ &= 1 - \frac{1}{L_i - 1} \sum_{t=0}^i (L_t - L_{t-1}) \prod_{j=t}^m \left(1 - \frac{1}{L_j}\right)^{G_j} \quad (3) \end{aligned}$$

其中,  $i=0, 1, \dots, m$ , 且  $a_{m,m+1} \equiv a_{m,m}$ . 同理, 状态  $i$  到状态 0 的转移概率  $a_{i,0} = \Pr_i^s$ .

以  $P_i$  表示节点处于回退状态  $i$  的概率, 则

$$\sum_{i=0}^m P_i = 1 \quad (4)$$

从状态转移图 1, 我们可以得到以下平衡方程组<sup>[8]</sup>:

$$\begin{aligned} P_1 &= P_0 a_{0,1} \\ P_2 &= P_1 a_{1,2} = P_0 a_{0,1} a_{1,2} \\ P_3 &= P_2 a_{2,3} = P_0 a_{0,1} a_{1,2} a_{2,3} \\ &\vdots \\ P_{m-1} &= P_{m-2} a_{m-2,m-1} = P_0 \prod_{i=0}^{m-2} a_{i,i+1} \quad (5) \end{aligned}$$

此外, 由状态  $m$ , 我们有:

$$P_m = P_{m-1} a_{m-1,m} + P_m a_{m,m}$$

于是, 利用上式及式(5), 得:

$$\begin{aligned} P_m &= P_{m-1} \frac{a_{m-1,m}}{1 - a_{m,m}} \\ &= P_0 \frac{1}{1 - a_{m,m}} \prod_{i=0}^{m-1} a_{i,i+1} \quad (6) \end{aligned}$$

由式(4)~(6)得:

$$P_0 = \left(1 + \sum_{j=1}^{m-2} \prod_{i=0}^j a_{i,i+1} + \frac{1}{1 - a_{m,m}} \prod_{i=0}^{m-1} a_{i,i+1}\right)^{-1} \quad (7)$$

利用式(5)~(7), 就可以确定  $P_0, P_1, \dots, P_m$ . 于是, 我们得到竞争窗口的平均长度

$$M = \sum_{i=0}^m L_i P_i \quad (8)$$

### 3 数值分析

我们取  $CW_{\min} = 15$ ,  $CW_{\max} = 1023$ <sup>[1]</sup>. 换言之, 竞争窗口参数  $CW$  可以取以下七个数值: 15, 31, 63, 127, 255, 511, 1023, 并且  $L_0 = 16$ ,  $L_i = 2^i L_0$ ,  $i=0, 1, \dots, m$ . 这样,

$$M = L_0 \sum_{i=0}^m 2^i P_i.$$

为叙述清楚起见, 以下将正在启用 BEB 回退算法的节点称为“当前节点”. 我们将其余节点所采用的竞争窗口参数分别固定为  $CW = 15$ ,  $CW = 63$ ,  $CW = 255$  和  $CW = 1023$ .

让节点数  $n$  分别在区间  $[10, 100]$ 、 $[100, 1000]$ 、 $[1000, 7000]$  中取值并变化, 我们得到图 2-4.

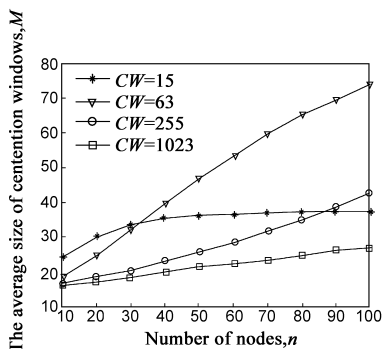
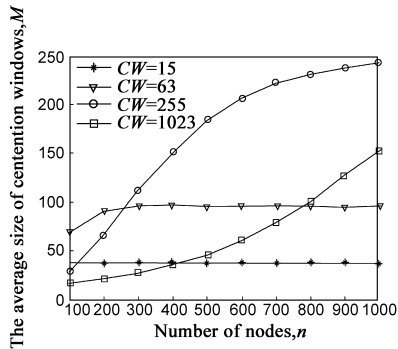
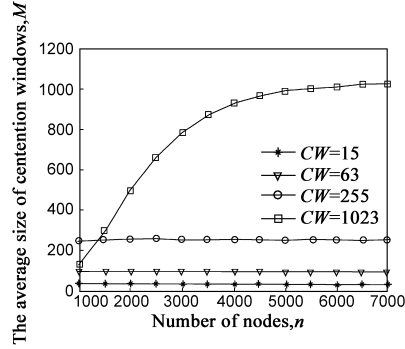
仔细观察这些图, 可以得出以下几个结论:

(1) 随着节点数  $n$  增大, 在 BEB 作用下, 当前节点的竞争窗口长度也加大. 这种现象在图 2 中可以清晰地看出, 它与我们的直观相吻合: 随着节点增多, 回退值碰撞概率也随之增大, 这导致当前节点需要多次回退, 从而增大了竞争窗口.

(2) 在节点数增大到一定程度之后, 竞争窗口长度趋于平稳. 这可以从图 2 的  $CW = 15$ , 图 3 的  $CW = 63$ , 以及图 4 的  $CW = 15$ 、 $CW = 63$ 、 $CW = 255$  这三种情况看出. 它说明: 当网络达到一定规模 (节点数达到一定数量) 之后, 竞争窗口长度将稳定在一定的值. 它揭示出 BEB 的一个弱点: 在数据包发送成功之后, 将竞争窗口参数  $CW$  复位到初始值, 会引起竞争窗口长度的振荡, 导致当前节点反复扩大及缩小竞争窗口长度. 例如: 当网络中的节点数达到 60 时, 如果其它节点的竞争窗口参数固定为  $CW = 15$ , 从图 2 可以看出, 当前节点的竞争窗口平均长度约为 35. 如果当前节点的初始竞争窗口参数取 15, 则它需要经过两次扩大竞争窗口, 即把竞争窗口参数从 15 调整到 31, 再从 31 调整到 63, 才能以低碰撞概率将一个数据包发送出去. 然而, 当这个数据包发送成功之后, BEB 又把竞争窗口参数复位为 15. 这样, 发送下一个数据包又需要两次扩大竞争窗口, 因此, 会出现反复振荡. 因此, 如何复位 BEB 的竞争窗口参数值得我们进一步研究.

(3) 在其他节点的竞争窗口长度取比较小的值时, 即使网络规模 (节点数) 相当大, 当前竞争窗口的长度维持在一个较低的稳定的值. 例如, 从图 4 可知, 即使节点数达到 1000 以上, 在其它节点的竞争窗口参数取值 15、63、255 时, 当前竞争窗口长度大约维持在 40、100、250, 这是因为在其他节点的竞争窗口较小时, 当前节点只需选择比其他节点稍大一点的竞争窗口, 就可以达到较低的碰撞概率, 从而使竞争窗口不再扩大.

(4) 在节点数充分大时, 当前节点竞争窗口长度随着其他节点的竞争窗口长度的增大而增大. 这可以从图 4 看出: 当其他节点的竞争窗口参数取 15 时, 当前节点的竞争窗口长度最小, 而当其他节点的竞争窗口参数取 1023 时, 当前节点的竞争窗口长度也逼近 1023 (当节点数超过 5000 时).

图2 节点数与竞争窗口长度( $10 \leq n \leq 100$ )图3 节点数与竞争窗口长度( $100 \leq n \leq 1000$ )图4 节点数与竞争窗口长度( $1000 \leq n \leq 7000$ )

## 4 结论

在移动自组织网络中,节点通过无线信道发送数据包,因此,在网络达到一定规模即网络中的节点个数达到一定数量之后,需要采用一种机制让节点共享信道,以提高信道的利用率.IEEE 802.11 的 BEB 就是为实现这一目的而提出的,它让节点通过竞争使用无线信道.其中,竞争窗口参数  $CW$  对 BEB 的性能有着重要的影响,本文对之进行了研究,并导出了在 BEB 之下,当前节点使用具体的竞争窗口参数  $CW$  的概率分布,并依此导出了竞争窗口的平均长度.这些结果对改进 BEB 有着重要的应用价值.

## 参考文献:

- [1] LAN MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society. IEEE 802.11 Standard Wireless LAN Medium Access Control and Physical Layer Specifications[S]. 1997.
- [2] F Cali, M Conti, E Gregori. Dynamic tuning of the IEEE 802.11 protocol to achieve a theoretical throughput limit [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2000, 8(6): 785 - 799.
- [3] Q Ni, I Aad, C Barakat, T Tuletli. Modeling and analysis of slow CW decrease for IEEE 802.11 WLAN [A]. 14<sup>th</sup> Personal, Indoor and Mobile Radio Communications [C]. Beijing, 2003. 1717 - 1721.
- [4] B Li, R Battiti. Achieving optimal performance in IEEE 802.11 wireless LANs with the combination of link adaptation and adaptive backoff [J]. Computer Networks, 2007, 51(6): 1574 - 1600.
- [5] H Ma, S Roy. Contention window and transmission opportunity adaptation for dense IEEE 802.11 WLAN based on loss differentiation [A]. ICC 2008 [C]. Beijing, 2008. 2556 - 2560.
- [6] Q Nasir, M Albalt. Improved backoff algorithm for IEEE 802.11 networks [A]. The 2009 IEEE International Conference on Networking, Sensing, and Control [C]. Okayama, Japan, 2009. 1 - 6.
- [7] 李云, 隆克平, 赵为粮, 等. IEEE 802.11 无线局域网中一种支持业务区分的回退算法 [J]. 电子学报, 2006, 34

(10): 1877 - 1880.

Li Yun, Long Ke-ping, Zhao Wei-liang, et al. A novel service differentiated backoff algorithm in IEEE 802.11 WLAN [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(10): 1877 - 1880. (in Chinese)

- [8] Yi-hua Zhu, He-zhi Luo, Xiao Zhou et al. Reducing paging cost for distance-based location management schemes in PCS networks [J]. Chinese Journal of Electronics, 2007, 16(4): 691 - 694.

## 作者简介:



葛永明 男, 1968 年生于浙江绍兴, 硕士, 副教授, 主要研究方向: 无线局域网路由协议与算法.



朱艺华 男, 1961 年生于浙江玉环, 博士, 教授, 博士生导师, IEEE 高级会员, 中国计算机学会高级会员, 中国计算机学会传感器网络专委会及服务计算专委会委员, 中国电子学会高级会员, 主要研究方向为移动计算、无线网络的协议、算法、性能分析与优化, 在各类期刊及 IEEE 国际会议论文集上发表学术论文 110 余篇.

E-mail: yizhu@zjut.edu.cn



龙胜春 女, 1970 年出生于上海, 硕士研究生, 副教授, 主要研究方向: 无线传感器网络路由协议与算法.

彭静 女, 1980 年生于安徽砀山, 硕士, 讲师, 主要研究方向为移动自组织网络路由协议与算法、移动商务.