

IEEE 802.11 无线网络的两步指数退避算法

朱艺华^{*①} 徐 晖^① 彭 静^②

^①(浙江工业大学计算机科学与技术学院 杭州 310023)

^②(浙江农林大学信息工程学院 临安 311300)

摘要: IEEE 802.11 标准引入二进制指数退避(Binary Exponential Backoff, BEB) 算法以降低节点发送数据包碰撞的概率。然而, BEB 存在着不足之处, 当数据包碰撞概率较大时, 节点的竞争窗口长度会出现振荡, 即节点每次发送数据包之前, 需要多次加倍扩大竞争窗口长度, 而在发送成功之后又把竞争窗口长度缩小到最小值, 这个过程反复出现。为了克服竞争窗口振荡问题以增加吞吐量, 该文提出两步指数退避(Two-step BEB, TBEB)算法, 利用 2 维马尔可夫链进行建模, 导出 TBEB 算法中节点的退避状态概率分布、平均竞争窗口长度、平均退避次数、每发送一个数据帧所耗时间以及吞吐量等指标, 并通过仿真进行验证。通过求解一个简单的优化问题, TBEB 可以获得最优竞争窗口长度复位值, 使吞吐量达到最优。

关键词: 无线网络; IEEE 802.11 标准; 竞争窗口; 退避算法

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)11-2575-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00101

Two-step Backoff Algorithm for IEEE 802.11 Based Wireless Networks

Zhu Yi-hua^① Xu Hui^① Peng Jing^②

^①(School of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

^②(School of Information Engineering, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Lin'an 311300, China)

Abstract: To reduce packet collision probability, Binary Exponential Backoff (BEB) algorithm is presented in IEEE 802.11 standard. The BEB, however, exhibits the shortcoming that Contention Window (CW) oscillation occurs when packet collision probability is large. That is, it repeats frequently that the CW size has to be doubled several times from its minimum value so that the node is able to transmit a frame successfully and then the node resets the CW size to the minimal value again. To overcome CW oscillation, a Two-step BEB (TBEB) algorithm is proposed in this paper. Additionally, the statistics of the TBEB, such as the probability distributions of backoff, the average CW size, the average number of backoffs, the time needed by the node for transmitting a frame, and throughput, are all derived from a two-dimension Markov model, and they are validated by simulations. The TBEB is able to maximize the throughput by resetting its CW to the best size obtained from solving the simple optimization problem proposed in this paper.

Key words: Wireless network; IEEE 802.11 standard; Contention Window (CW); Backoff algorithm

1 引言

IEEE 802.11 无线网络的 MAC(Medium Access Control)层提供了分布式协调功能(Distributed Coordinate Function, DCF), 以支持节点对无线信道的访问^[1]。为了进行可靠数据包传递(本文对帧与数据包不加区别), IEEE 802.11 标准采用确认(ACKnowledgement, ACK)与重传机制: 如果发送

节点在规定时间内未能收到来自接收节点的 ACK 帧(如所发送的帧丢失或 ACK 丢失), 就重传数据帧, 直至收到 ACK 为止。为了克服隐藏节点问题并降低发送数据帧碰撞概率, DCF 采用 CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance)机制和二进制指数退避(Binary Exponential Backoff, BEB)算法以控制节点对信道的访问。

自从BEB算法被提出以来, 对它的改进一直是学术界的研究热点。例如, 在BEB算法对吞吐量的影响方面, 文献[2]提出了802.11退避机制的马尔可夫模型, 并定量分析了它的饱和吞吐量; 在竞争窗口长度的配置与复位方面, 文献[3]提出一种估计算

2011-01-29 收到, 2011-08-29 改回

国家自然科学基金(61070190), 浙江省自然科学基金(Z1100455, Y1090781), 浙江省重大科技专项重点国际合作项目(2009C14033), 浙江省教育厅(2271000024)和浙江林学院科研发展基金(2351000583)资助课题

*通信作者: 朱艺华 yhzhu@zjut.edu.cn

法,通过观察退避阶段空闲时隙的个数来估计网络中活跃节点数,并在节点数变化或者流量变化时以此估计值确定竞争窗口长度;严少虎等人^[4]让节点在侦听信道的同时,设置并维护一个节点已发送数据量的统计表,并根据表中数据以及节点的优先级来计算竞争窗口长度。上述研究尚未涉及BEB算法的下述弱点:在数据包碰撞概率较大时,节点在数据包发送成功之后,将竞争窗口复位到初始值(即最小竞争窗口长度),会引起竞争窗口长度的振荡(以下简称“竞争窗口振荡”)——要发送一个数据帧需要多次加倍扩大竞争窗口长度,但在数据帧发送成功之后竞争窗口长度又复位到最小值,而且这种现象反复出现^[5]。为了克服BEB的这个弱点,本文提出两步退避(Two-step BEB, TBEB)算法。TBEB与BEB的本质区别在于:节点在数据帧发送成功之后,把它的竞争窗口长度设置为一个适当的值,并非复位到最小值。

本文的主要贡献和创新在于:提出了TBEB,利用2维马尔可夫过程导出在TBEB算法之下节点退避状态转移概率、平均竞争窗口长度、平均退避次数、每发送一个数据帧所耗时间以及吞吐量等指标,并提出一个优化模型,以获得使吞吐量最大的竞争窗口最优复位值。研究结果可应用于IEEE 802.11无线网络以控制节点对无线信道的竞争与使用,提高信道使用率。

2 TBEB算法

IEEE 802.11的BEB算法(下称“标准BEB算法”)把时间分割成多个时隙(time slot),引入了竞争窗口概念,它由一些时隙组成。本文称竞争窗口所包含的时隙个数为“竞争窗口长度”,其值为 $W+1$,其中, $W \in [CW_{\min}, CW_{\max}]$ 称为竞争窗口参数,被初始化为 CW_{\min} ^[1]。

IEEE 802.11标准的DCF规定:当一个节点要发送数据帧时,它先监听信道,若信道连续空闲时间长度达到分布式帧间隔 DIFS(Distributed Inter-Frame Space),节点就执行BEB:在集合 $\{0,1,\dots,W\}$ 中随机选择一个整数 k (下称“退避值”),并设置其退避时间为 k 个时隙。如果 $k=0$,则这个节点立即发送数据帧;否则,每隔一个时隙监听信道是否空闲。一旦监听到信道空闲,退避值减去1;在退避值达到0时,这个节点就将数据帧发送出去。节点在发出帧之后,等待接收方的ACK帧。如果在数据帧发送出去之后且在重传定时器超时未能收到接收节点的确认帧,则发送节点的竞争窗口长度加倍,并重启上述BEB算法。在 W 的值达到 CW_{\max}

后,竞争窗口的长度不再加倍,但仍然需要重复上述退避过程。一旦节点发送数据帧成功,则 W 恢复到初始值 CW_{\min} 。

对于一个参数为 W 的竞争窗口,它有 $W+1$ 个不同的退避值(即 $0,1,\dots,W$),对应于 $W+1$ 个不同的时隙。本文以 L_0 表示初始竞争窗口长度,则 $L_0=CW_{\min}+1$;把节点在第 $1,2,\dots,m$ 次加倍竞争窗口之后的竞争窗口长度依次记为 L_1,L_2,\dots,L_m ,其中 m 是竞争窗口长度加倍次数的最大值,即 $L_m=CW_{\max}+1$ 。显然, $L_i=2^i L_0, i=1,2,\dots,m$ 。一般来说,竞争窗口参数 W 的取值范围跟物理层PHY有关,例如,对于跳频物理层(FH PHY), $CW_{\min}=15$ 且 $CW_{\max}=1023$ ^[1],所对应的竞争窗口长度的最小值与最大值分别为16与1024,即 $L_0=16, L_m=1024, m=6$ 。

TBEB与标准BEB算法之间的主要相同之处在于:节点在成功发送一个数据帧之后,在当前竞争窗口长度不超过 L_x 时,TBEB与标准BEB均将竞争窗口长度复位为最小值 L_0 ,其中 x 是区间 $[0,m]$ 内的一个数,称为“复位值”。两者的主要异同之处在于:在节点当前竞争窗口长度大于 L_x 时,一旦节点成功发送了一个数据帧,TBEB算法采用两步复位方法:先将竞争窗口长度复位为 L_x ,在再一次成功发送一个数据帧之后将它复位为最小值 L_0 。设置 L_x 的目的是缓解竞争窗口振荡。由于在信道竞争不激烈时,节点的竞争窗口长度被加倍的概率很小,因此,即使我们选取了一个较大的复位值 x ,TBEB与BEB算法的效果是一样的,这是因为节点的竞争窗口长度不会超过 L_x 。也就是说,在信道竞争不激烈时,TBEB总是将竞争窗口长度复位为最小值 L_0 ,即TBEB算法不会比BEB算法带来额外的等待开销。

3 TBEB算法中节点退避状态概率分布

以数对 (i, j) 表示节点的退避状态。其中, i 称为“退避阶段数”,表示节点当前的竞争窗口长度被扩大的次数,即当前竞争窗口长度为 $L_i=2^i L_0, i=0,1,\dots,m; j$ 表示节点当前所取的退避值, $j \in \{0,1,\dots,L_i-1\}$ 。于是,节点的退避状态空间 $\Omega = \{(i, j) | i=0,1,\dots,m; j \in \{0,1,\dots,L_i-1\}\}$ 。设 p 是节点发送数据帧失败的概率。以 $(s(t), b(t))$ 表示 t 时刻节点所处的状态,并定义以下单步状态转移概率 $P\{u, v | i, j\} \equiv P\{s(t+1) = u, b(t+1) = v | s(t) = i, b(t) = j\}$ 。

2维随机过程 $(s(t), b(t))$ 是状态空间为 Ω 的马尔可夫过程,其嵌入马尔可夫链的状态转移情况如图1所示,其中,弧线所连接的箭头表示这些箭头的

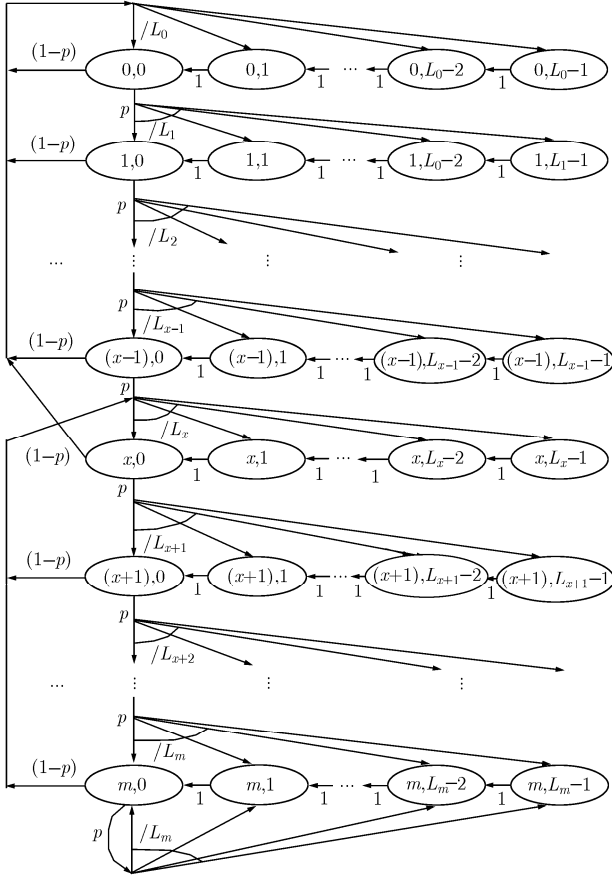


图1 TBEB算法中节点的退避状态转移图

转移概率需要除以弧线旁边所注的数值, 例如, 在图中第 2 行, 从状态(0,0)转移到状态(1,0),(1,1),..., (1, L₁-1)的概率均为 p/L₁。图 1 中, 各状态转移概率可以概括为

$$\left. \begin{aligned}
 P\{i, k | i, k+1\} &= 1, & i &= 0, 1, \dots, m; \\
 & & k &= 0, 1, \dots, L_i - 1 \\
 P\{0, k | i, 0\} &= (1-p)/L_0, & i &= 0, 1, \dots, x; \\
 & & k &= 0, 1, \dots, L_0 - 1 \\
 P\{x, k | i, 0\} &= (1-p)/L_x, & i &= x+1, x+2, \dots, m; \\
 & & k &= 0, 1, \dots, L_x - 1 \\
 P\{i, k | i-1, 0\} &= p/L_i, & i &= 1, 2, \dots, m; \\
 & & k &= 0, 1, \dots, L_i - 1 \\
 P\{m, k | m, 0\} &= p/L_m, & k &= 0, 1, \dots, L_m - 1
 \end{aligned} \right\} (1)$$

式中, 第 1 行表示退避值减 1; 第 2 行和第 3 行分别表示当节点的竞争窗口长度为 L_i(i=0,1,...,x)和 L_i(i=x+1,x+2,...,m)时, 在退避值减小到 0 时, 节点以概率 1-p 成功地发送了数据帧, 竞争窗口长度分别复位为 L₀和 L_x, 并分别在 [0, L₀-1]和 [0, L_x-1]中随机选择一个退避值; 第 4 行表示, 当竞争窗口长度为 L_{i-1}且退避值减小到 0 时发送数据帧失败, 窗口长度被加倍变为 L_i, 重新选择一个退避值; 第 5 行

表示, 当竞争窗口长度达到最大值 L_m时, 如果发送失败, 则竞争窗口大小不变, 并重新选择一个退避值。

当系统处于稳态时, 以 q_{i,j}表示节点处于状态(i, j)的概率。由所有状态概率之和为 1, 得

$$\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^{L_i-1} q_{i,j} = 1 \quad (2)$$

此外, 由状态转移图 1, 可以导出以下平衡方程组^[6]:

$$\left. \begin{aligned}
 q_{0,j} &= \frac{1-p}{L_0} \sum_{k=0}^x q_{k,0} + q_{0,j+1}, & j &= 0, 1, \dots, L_0 - 2 \\
 q_{0,L_0-1} &= \frac{1-p}{L_0} \sum_{k=0}^x q_{k,0}
 \end{aligned} \right\} (3)$$

$$\left. \begin{aligned}
 q_{i,j} &= \frac{p}{L_i} q_{i-1,0} + q_{i,j+1}, & i &= 1, 2, \dots, x-1, \\
 & & j &= 0, 1, \dots, L_i - 2
 \end{aligned} \right\} (4)$$

$$q_{i,L_i-1} = \frac{p}{L_i} q_{i-1,0}, \quad i=1, 2, \dots, x-1$$

$$\left. \begin{aligned}
 q_{x,j} &= \frac{p}{L_x} q_{x-1,0} + \frac{1-p}{L_x} \sum_{k=x+1}^m q_{k,0} + q_{x,j+1}, \\
 & & j &= 0, 1, \dots, L_x - 2
 \end{aligned} \right\} (5)$$

$$q_{x,L_x-1} = \frac{p}{L_x} q_{x-1,0} + \frac{1-p}{L_x} \sum_{k=x+1}^m q_{k,0}$$

$$\left. \begin{aligned}
 q_{i,j} &= \frac{p}{L_i} q_{i-1,0} + q_{i,j+1}, & i &= x+1, x+2, \dots, m-1, \\
 & & j &= 0, 1, \dots, L_i - 2
 \end{aligned} \right\} (6)$$

$$q_{i,L_i-1} = \frac{p}{L_i} q_{i-1,0}, \quad i=x+1, x+2, \dots, m-1$$

$$\left. \begin{aligned}
 q_{m,j} &= \frac{p}{L_m} q_{m-1,0} + \frac{p}{L_m} q_{m,0} + q_{m,j+1}, \\
 & & j &= 0, 1, \dots, L_m - 2 \\
 q_{m,L_m-1} &= \frac{p}{L_m} q_{m-1,0} + \frac{p}{L_m} q_{m,0}
 \end{aligned} \right\} (7)$$

由式(3)-式(7)依次可以导出

$$q_{0,j} = \frac{L_0-j}{L_0} (1-p) \sum_{k=0}^x q_{k,0}, \quad j=0, 1, \dots, L_0 - 1 \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned}
 q_{i,j} &= \frac{L_i-j}{L_i} p q_{i-1,0}, & i &= 1, 2, \dots, x-1, \\
 & & j &= 0, 1, \dots, L_i - 1
 \end{aligned} \right\} (9)$$

$$\left. \begin{aligned}
 q_{x,j} &= \frac{L_x-j}{L_x} \left[p q_{x-1,0} + (1-p) \sum_{k=x+1}^m q_{k,0} \right], \\
 & & j &= 0, 1, \dots, L_x - 1
 \end{aligned} \right\} (10)$$

$$\left. \begin{aligned}
 q_{i,j} &= \frac{L_i-j}{L_i} p q_{i-1,0}, & i &= x+1, x+2, \dots, m-1, \\
 & & j &= 0, 1, \dots, L_i - 1
 \end{aligned} \right\} (11)$$

$$q_{m,j} = \frac{L_m - j}{L_m} p(q_{m-1,0} + q_{m,0}), j = 0, 1, \dots, L_m - 1 \quad (12)$$

由式(1), 式(8)-式(12), 可以获得节点的状态概率分布如下(详细推导过程略):

$$q_m = 2p^m \left\{ (1-p)L_0 \left[\sum_{i=0}^{m-1} (2p)^i - p \sum_{i=0}^{x-1} (2p)^i \right] + (1-p + p^{x+1}) + (2p)^m L_0 \right\} \quad (13)$$

$$q_{i,j} = \frac{L_i - j}{L_i} \frac{(1-p)^2 q_m}{p^{m-i}}, i = 0, 1, 2, \dots, x-1, j = 0, 1, \dots, L_i - 1 \quad (14)$$

$$q_{i,j} = \frac{L_i - j}{L_i} (1-p) \frac{q_m}{p^{m-i}}, i = x, x+1, x+2, \dots, m-1, j = 0, 1, \dots, L_i - 1 \quad (15)$$

$$q_{m,j} = \frac{L_m - j}{L_m} q_m, j = 0, 1, \dots, L_m - 1 \quad (16)$$

4 TBEB算法的关键统计指标

利用上述概率分布, 可以求出TBEB算法的一些统计指标。利用式(13)-式(16), 可以导出TBEB算法中节点的平均竞争窗口长度为

$$\bar{L} \equiv \sum_{i=0}^m L_i \sum_{j=0}^{L_i-1} q_{i,j} \quad (17)$$

以 B_j 表示节点取退避值 j 的概率。我们注意到, 对于给定的退避阶段数 i , 退避值 j 只能在 $[0, L_i-1]$ 中取值, 且在 $i=m$ 时, 节点可取的退避值最多。由于 $L_0 < L_1 < \dots < L_m$, 因此, 节点所取的退避值 j 与节点所处的退避阶段数 i 有以下关系: 当 $0 \leq j \leq L_0-1$ 时, $i=0, 1, 2, \dots, m, B_j = \sum_{i=0}^m q_{i,j}$; 当 $L_0 \leq j \leq L_1-1$ 时, $i=1, 2, \dots, m, B_j = \sum_{i=1}^m q_{i,j}$; 当 $L_1 \leq j \leq L_2-1$ 时, $i=2, 3, \dots, m, B_j = \sum_{i=2}^m q_{i,j}$; 依此类推。为了书写方便, 本文约定: $L_{-1} \equiv 0$ 。这样, 利用式(13)-式(16), 可得节点所选取的退避值的均值:

$$\bar{T} \equiv \sum_{j=0}^{L_m-1} jB_j = \sum_{k=0}^m \sum_{j=L_{k-1}}^{L_k-1} jB_j = \sum_{k=0}^m \sum_{j=L_{k-1}}^{L_k-1} j \sum_{i=k}^m q_{i,j} \quad (18)$$

下面, 我们考虑吞吐量。与文献[2]一样, 基于饱和条件(Saturation condition)假定, 即节点在任一时隙其发送队列不空, 均有帧等待发送。显然, 节点在每发送一个帧均经历监听、退避和发送这3个阶段。以 T_s, T_B, T_X 分别表示发送一个帧所需要的监听时间、退避时间和发送时间的平均长度。易知, 退避时间等于退避均值与时隙长度之积, 即 $T_B = \sigma \bar{T}$, 其中, σ 是一个时隙的长度^[1]。

根据IEEE 802.11标准的DCF协议, 在发送一个帧之前, 节点需要监听信道空闲时间至少达到DIFS

之后, 才启用BEB算法确定其退避时间, 在退避值为0时, 才把这个帧发送出去。如果一个帧未被接收节点正确接收, 即接收节点应用FCS(Frame Check Sequence)检查时发现帧出错(物理层会把这一情况反馈给MAC层), 这时, 节点必须在监听到信道空闲时间大于扩展帧间隔EIFS(Extended Inter-Frame Space)时, 才启用BEB算法确定其退避时间^[1]。因此, 平均监听信道时间

$$T_s = (1-p)\text{DIFS} + p\text{EIFS} \quad (19)$$

此处, DIFS与EIFS分别按式(20)和式(21)取值^[1]:

$$\text{DIFS} = \beta + 2\sigma \quad (20)$$

$$\text{EIFS} = \beta + 8\delta + \gamma + \eta + \text{DIFS} \quad (21)$$

其中 β 和 δ 分别是短帧间隔 (Short Inter-Frame Space, SIFS)和ACK包的长度(用字节表示); γ 和 η 分别是物理层发送PLCP(Physical Layer Convergence Protocol)前缀和发送PLCP头部所需要的时间。

设数据帧的长度为 Γ bit, 节点发送帧的速率为 R (b/s)。根据802.11标准, 发送节点只有在收到ACK帧之后, 才认为发送成功。因此, 节点成功发送一个帧所消耗的时间

$$T_{\text{success}} \equiv (\gamma + \eta + \Gamma/R) + \beta + \delta/R \quad (22)$$

其中, 第1个括号内的式子表示发送 Γ bit数据帧所耗时间, 最后一项表示发送 δ bit ACK帧所耗时间, 数据帧与ACK帧发送的时间间隔为 β ^[1]。由于数据帧和ACK帧的任何部分受损均会导致发送失败, 因此, 可以取成功发送一个帧所需时间的一半, 即节点发送一个帧失败时所消耗的平均时间 $T_{\text{failure}} \equiv T_{\text{success}}/2$ 。于是, 节点发送一个帧所消耗的平均时间长度

$$T_X = (1-p)T_{\text{success}} + pT_{\text{failure}} = (1-p)T_{\text{success}} + p(T_{\text{success}}/2) = (1-p/2)T_{\text{success}} \quad (23)$$

因此, 由式(19)和式(23)可得, 节点发送一个帧所消耗的总时间为

$$\bar{D} \equiv T_s + T_B + T_X = [(1-p)\text{DIFS} + p\text{EIFS}] + \sigma \bar{T} + (1-p/2)T_{\text{success}} \quad (24)$$

由于节点只有在成功发送一个帧之后, 才能够将 Γ bit数据传递到接收端, 因此, 节点在发送一个帧时, 传递给接收端的比特平均值为 $\Gamma(1-p) + 0p = (1-p)\Gamma$ 。考虑到发送一个帧所消耗的总时间(包括等待时间与发送时间)为 \bar{D} , 我们定义吞吐率 θ 如下:

$$\theta \equiv \frac{(1-p)\Gamma}{\bar{D}} \quad (25)$$

由式(18), 式(22)和式(24)可以确定吞吐率 θ 的值。

至此，本文的TBEB算法可以求解以下吞吐量优化问题：

$$\left. \begin{aligned} \text{Max } \theta &\equiv \frac{(1-p)\Gamma}{D} \\ \text{w.r.t. } x & \\ \text{s.t. } x &= 0, 1, 2, \dots, m \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

归纳起来，节点采用本文的TBEB算法之后，通过求解上述优化问题获得最优解 x (因为对于实际的物理层，可选的 x 值在10个以下，因此，通过简单的穷举法就可以获得最优值 x)，然后，节点在成功发送一个帧之后，按以下方法复位竞争窗口长度：在当前竞争窗口长度大于 $L_x=2^x L_0$ 时，将竞争窗口长度复位为 L_x ，否则，与IEEE 802.11标准的BEB算法一样，将其复位为 $L_0=CW_{\min}+1$ 。

5 TBEB算法的模型正确性验证

本文第3节所采用的2维马尔可夫链建模方法与 Bianchi在文献[2]中所给出的2维马尔可夫链建模方法(下称“Bianchi模型”)是一致的，两者的主要异同之处在于：本文在Bianchi模型基础上增加了复位值 x 。我们发现，在 $x=0$ 时TBEB退化为标准BEB算法，即TBEB是标准BEB算法的推广，而且，在 $x=0$ 时，本文模型与Bianchi模型所得的概率分布^[2]是一致的。当 $x>0$ 时，我们采用仿真来验证本文模型，让节点发送 N 个数据包，并累加在发送每个数据包时节点所设置的竞争窗口长度、节点消耗的总时间、以及节点成功发送给接收节点的数据包所含的比特数，然后把累加的竞争窗口长度值除以 N 获得平均值，把累加的比特数除以消耗总时间获得吞吐量(bps)，以此来验证式(17)和式(25)所示的平均竞争窗口长度 \bar{L} 和吞吐量 θ 的吻合程度。根据这一思路，我们用MATLAB语言编制程序进行仿

真，取 $x=1, 2, \dots, 6$ ，并取 $p=0.01, 0.03, \dots, 0.09$ 。在 $N=10^8$ 时，吞吐量和平均竞争窗口长度的运行结果如图2和图3所示(此处仅给出 $x=3$ 时的结果， x 取其它值时，仿真结果类似)。图中，计算结果(下称“理论值”)的曲线是由式(17)和式(25)直接计算而得，相对误差等于仿真数值与理论值之差再除以仿真数值。

从图2和图3可以看出，随着发送失败概率 p 的增大，吞吐量逐渐减小，但竞争窗口长度随着增大，这与直观是吻合的。吞吐量仿真结果和理论值的误差小于10%；竞争窗口长度仿真结果和理论值的误差一直呈上升趋势，在 $p<0.1$ 时，误差在15%以内。通过仿真我们发现，在 $p>0.1$ 时，误差较大(限于篇幅，此处略去仿真结果图)。值得指出的是，Bianchi模型基于假设：“不管节点重传数据包多少次，其数据包碰撞的概率保持常数”^[2]。这与直观是不符的，这是因为节点每次重传需要扩大竞争窗口长度，这样节点就以较大的概率选到较大的退避值，从而降低发送数据包碰撞概率。事实上，我们已经得出与上述假设不同的结论，即重传之后节点发送数据包的概率会降低^[7]。因此，Bianchi模型对于重传次数较大(即失败概率 p 较大)时就会存在较大的误差。由于本文是基于Bianchi模型，因而，也不可避免存在类似的误差问题。但是，在 p 较小时(如 $p<0.1$)，本文结果是适用的。

6 数值分析

本文以FHSS物理层为例，分析TBEB算法的性能。取表1所示的参数，并取 $\delta=34$ Byte^[8]。由式(20)和式(21)可得DIFS=128 μ s, EIFS=556 μ s。由于在基于IEEE 802.11标准的无线网络中，链路层帧体长

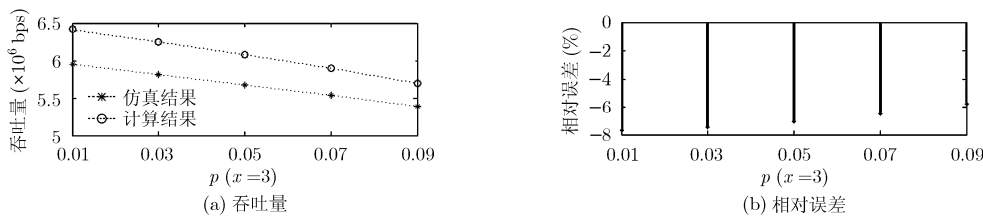


图2 吞吐量与相对误差

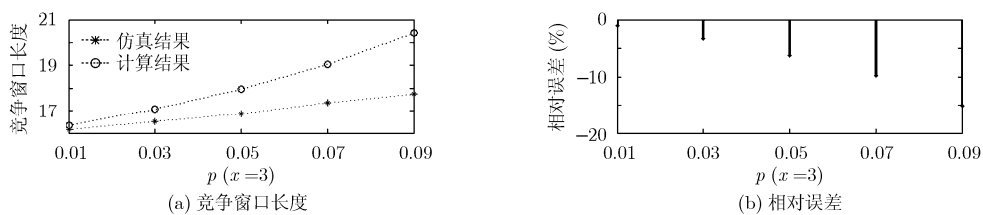


图3 竞争窗口长度与相对误差

表1 FHSS物理层参数^[1]

参数	数值
β	50 μs
σ	28 μs
γ	96 μs
η	32 μs
CW_{\min}	15
CW_{\max}	1023

度为0-2346 Byte^[1], 取数据包平均长度 $L=1300$ Byte^[9]。此外, 取信道的数据率 $R=10$ Mbps。

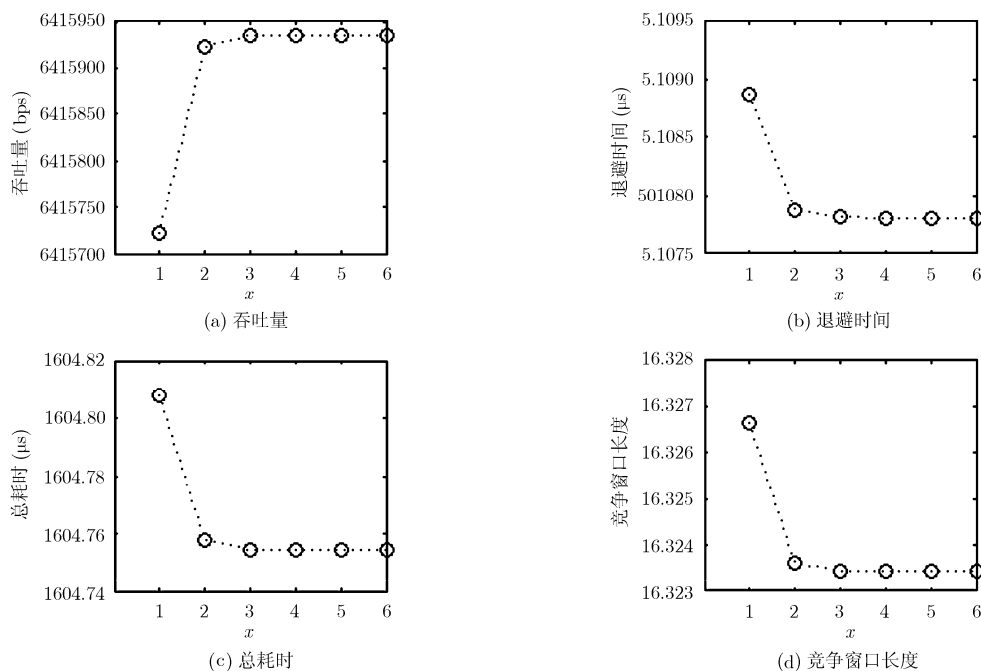
取 $p=0.01$, 通过计算式(17), 式(18), 式(24)和式(25), 得到图4。从这个图可以看出随着竞争窗口长度复位值 x 的增大, 吞吐量逐渐增大, 同时退避时间、发送一个帧所耗的总时间 \bar{D} 以及竞争窗口长度均呈现下降趋势。而且, 我们看出, 此时优化问题式(26)的最优解是 $x=3, 4, 5$ 或6。

取不同的参数进行分析, 我们发现: (1)随着失败概率 p 的增大, 吞吐量逐渐下降, 退避时间、发

送一个帧所耗的总时间 \bar{D} 、以及竞争窗口长度均呈现逐渐上升趋势, 这与直观是吻合的; (2)在 p 给定时, 对于复位值 x 的变化, 上述指标并非呈现单调趋势, 但可以通过优化模型式(26)解出使吞吐量最大的复位值 x 。

7 结束语

本文改进了IEEE 802.11标准的BEB算法, 提出了两步二进制指数退避算法TBEB。TBEB算法与BEB算法之间的主要异同之处在于: 在节点成功发送一个数据帧之后, TBEB不是像BEB算法一样将竞争窗口长度复位为最小值, 而是将它复位为使吞吐量最大的一个值, 这样做可以避免标准BEB算法所导致的竞争窗口振荡。TBEB算法可以应用于基于IEEE 802.11标准的无线网络。本文类似于Bianchi模型, 利用2维马尔可夫链对TBEB算法进行建模与分析, 由于在节点发送帧失败概率较大时, Bianchi模型所得结果与仿真结果的误差较大, 因此, 在发送帧失败概率较大时, 本文模型的误差也会比较大。我们将在未来探索解决这个问题的理论与方法。

图4 $p=0.01$ 时TBEB算法度量指标的值

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]. June 1997.
- [2] Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2000, 18(3): 535-547.
- [3] Kang S W, Cha J R, and Kim J H. A novel estimation-based backoff algorithm in the IEEE 802.11 based wireless network [C]. 7th IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), Las Vegas, Nevada, USA, 2010: 1-5.
- [4] 严少虎, 卓永宁, 吴诗其, 等. IEEE 802.11 DCF 中带优先级的退避算法[J]. *电子与信息学报*, 2005, 27(8): 1315-1319.

Yan S H, Zhuo Y N, Wu S Q, et al. Priority backoff algorithm

- for IEEE 802.11 DCF[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2005, 27(8): 1315-1319.
- [5] 葛永明, 朱艺华, 龙胜春, 等. 基于 IEEE 802.11 的移动自组织网络的最优竞争窗口[J]. 电子学报, 2010, 38(8): 1841-1844.
Ge Y M, Zhu Y H, Long S C, *et al.*. Probability distribution of the contention window size in the IEEE 802.11 based mobile ad hoc networks[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(8): 1841-1844.
- [6] Ross S M. Introduction to Probability Models[M]. 9th Edition, Singapore: Elsevier (Singapore) Pte LTD, 2007: 185-280.
- [7] Zhu Yi-hua, Tian Xian-zhong, and Zheng Jun. Statistics and performance analysis of the binary exponential backoff algorithm applied in IEEE 802.11 based mobile Ad hoc networks[C]. 2011 International Communications Conference, Kyoto, Japan, 2011: 1-6.
- [8] Gast M S. 802.11 Wireless Networks: The Definition Guide [M]. CA, US, O'Reilly Media, Inc., 2005.
- [9] Zhu Yi-hua and Leung V C M. Efficient power management for infrastructure IEEE 802.11 WLANs[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, 9(7): 2196-2205.
- 朱艺华: 男, 1961 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为无线网络的协议、算法、性能分析与优化.
- 徐 晖: 男, 1986 年生, 硕士生, 研究方向为无线网络数据可靠传输与路由协议.
- 彭 静: 女, 1980 年生, 硕士, 讲师, 研究方向为移动自组织网络路由协议与算法、移动商务.