

# 无线自组织网络中的自适应竞争窗口退避算法

范 菁<sup>1</sup>, 高 飞<sup>1</sup>, 王万升<sup>1</sup>, 陈跃斌<sup>1,2</sup>

(1. 云南民族大学物理与电子电气工程学院, 昆明 650031; 2. 中国电子科技大学通信与信息工程学院, 成都 610054)

**摘 要:** 基于无线自组织网络 IEEE 802.11 协议原理, 改进 Ad Hoc 网络标准 DCF 算法, 提出一种自动调整最小竞争窗口的退避算法——ABEB 算法, 建立算法的二维 Markov 链模型, 导出其稳态分布概率, 分析其性能并进行了仿真。研究结果表明, 与标准 DCF 算法相比, 该算法的吞吐量平均提高了 18%, 时延平均降低了 11%。

**关键词:** 无线自组织网络; IEEE 802.11 协议; DCF 算法; 退避算法; 性能

## Adaptive Contention Window Backoff Algorithm for Wireless Ad Hoc Networks

FAN Jing<sup>1</sup>, GAO Fei<sup>1</sup>, WANG Wan-sheng<sup>1</sup>, CHEN Yue-bin<sup>1,2</sup>

(1. School of Physics and Electronic Electric Information Engineering, Yunnan Nationalities University, Kunming 650031;

2. School of Communication and Information Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdou 610054)

**【Abstract】** Based on the protocol of IEEE 802.11 for wireless Ad Hoc networks, the Distributed Coordination Function (DCF) of Ad Hoc networks is modified, and an adaptive minimum contention window binary exponential backoff algorithm namely ABEB is present. The bidimensional discrete-time Markov chain model for ABEB algorithm is established, and the stationary distribution probabilities of the algorithm are deduced. The performance of the algorithm is analyzed, and the algorithm is simulated. Compared with DCF algorithm, the study results show that the throughput of ABEB algorithm increases by 18% while the access delay decreases by 11% on average.

**【Key words】** wireless Ad Hoc networks; IEEE 802.11; Distributed Coordination Function(DCF); backoff algorithm; performance

无线自组织网络由于具有无须事先构建通信基础设施、网络中各节点地位平等、可自由移动并可通过无线信道进行通信等优点<sup>[1-3]</sup>而被广泛研究。其中的主流协议 IEEE 802.11 及其 DCF(Distributed Coordination Function) 算法<sup>[2-5]</sup>一直是学术界研究重点。DCF 算法的核心是采用二进制指数回退方式<sup>[1]</sup>来避免终端发送数据包冲突和碰撞, 其优点是算法控制较简单, 便于应用; 不足是系统吞吐量较小、时延较大、公平性稍差。

### 1 Ad hoc 网络 ABEB 算法思想

在充分考虑与标准 DCF 算法兼容的基础上, 本文设计了 ABEB 算法。算法的前提是:

(1) 理想通道条件, 即没有隐终端和通道捕获, 丢包仅由冲突引起。

(2) 系统工作于饱和状态, 即每个终端都有数据包等待传输, 每个终端的传输队列保持非空。

(3) 每次传输不考虑数据包所经历的回退重传次数, 数据包传输的冲突概率恒定为  $p$ , 且  $p$  可视为条件冲突概率。

ABEB 算法的基本思想如下:

(1) 当系统启动时, 所有数据终端的初始竞争窗口  $W_0$  为一个给定的最小竞争窗口  $W_{\min}$ 。

(2) 若在第  $i-1$  次数据重发时仍存在传输冲突, 则进入下一次(第  $i$  次)退避过程, 第  $i$  次终端竞争窗口  $W_i$  可定义为

$$W_i = 2W_{i-1}$$

(3) 当在第  $i$  次数据重发中没有传输冲突, 则表明在该次重发时隙内数据已成功发送或者没有数据发送, 若数据已成

功发送, 则将该次数据终端竞争窗口  $W_i$  记为  $W_{\text{succ}}$ ; 若没有数据发送, 则时间计数器递减。

(4) 对于成功发送数据并进入下一次数据传送竞争过程的终端, 当  $W_{\text{succ}} > 1$  时, 令下一个数据的竞争窗口  $W_0 = W_{\text{succ}}/2$ ; 否则,  $W_0 = W_{\text{succ}}$ 。

## 2 ABEB 算法模型及其性能分析

### 2.1 ABEB 算法二维 Markov 链模型

根据 Ad Hoc 网络 ABEB 算法思想和离散时间 Markov 链理论:

(1)  $p$  为条件冲突概率, 即数据传输中存在冲突时的前提条件是必定有一个数据包在信道上传输。

(2) 数据终端回退时间计数器值的随机过程  $b(t)$  和数据终端在某一时刻  $t$  所在的回退阶段  $(0, 1, \dots, m)$  的随机过程  $s(t)$  是相互独立的。

(3)  $\{s(t), b(t)\}$  所组成的二维随机过程在状态空间上是离散的, 其从现在状态到未来某时刻某状态的转移概率  $P$  与以往状态及历程无关, 仅与现在状态有关。

因此, 可用图 1 所示二维离散时间 Markov 链模型来描述 ABEB 算法。

**基金项目:** 云南省自然科学基金资助项目(2005F0028Q); 云南省教育厅科学研究基金资助项目(6Y0006D)

**作者简介:** 范菁(1976-), 女, 讲师、硕士, 主研方向: 计算机网络技术, 智能计算; 高飞, 教授、硕士; 王万升, 助教、硕士; 陈跃斌, 副教授、博士研究生

**收稿日期:** 2007-06-30 **E-mail:** fanjing9476@163.com

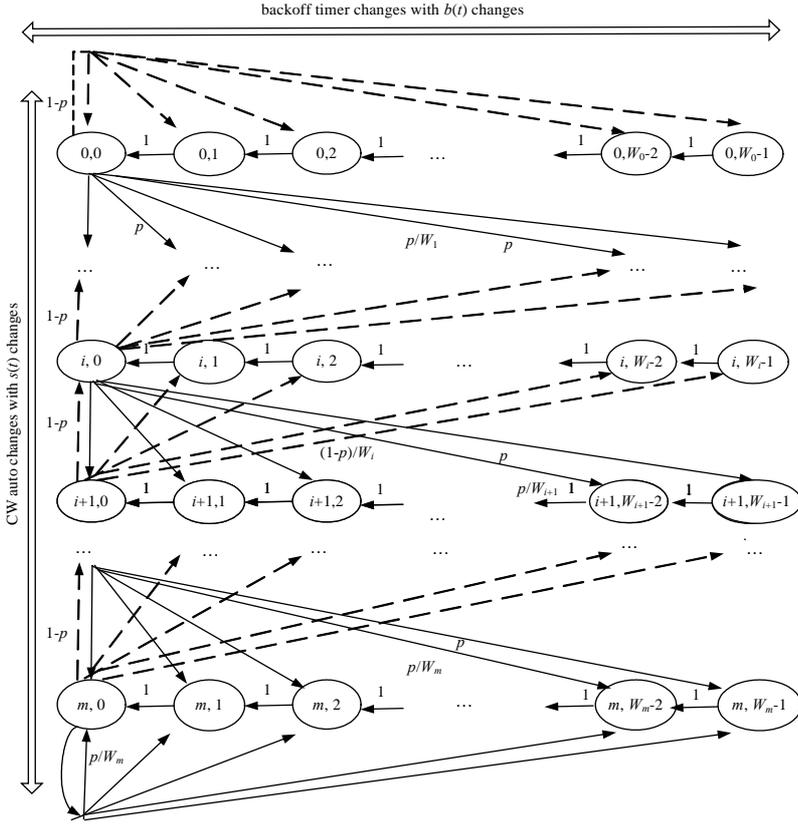


图1 ABEB算法的二维离散时间Markov链模型

在图1中， $s(t)$ 表示系统所有数据终端在某一时刻 $t$ 所在回退阶段 $(0,1,\dots,m)$ 的随机过程； $b(t)$ 表示一给定数据终端回退时间计数器值的随机过程； $p$ 表示数据传输中存在冲突的概率，是一个恒定值。若令 $b(t)=k$ ，定义 $s(t)=2^k W_0$ ，并简记 $s(t)=i$ ，则图1所示的模型所对应的非零一步转移概率 $P$ 可用式(1)表示：

$$\begin{cases}
 P\{i,k | i,k+1\} = 1 & k \in [0, W_i - 2] \quad i \in [0, m] \\
 P\{i,k | i+1,0\} = \frac{(1-p)}{W_i} & k \in [0, W_i - 1] \quad i \in [1, m-1] \\
 P\{i,k | i-1,0\} = \frac{p}{W_i} & k \in [0, W_i - 1] \quad i \in [1, m] \\
 P\{m,k | m,0\} = \frac{p}{W_m} & k \in [0, W_m - 1]
 \end{cases} \quad (1)$$

其中，第1式表示每个时隙开始，后退时间递减；第2式表示当某一数据终端在时刻 $t$ 处于 $i+1$ 状态时成功发送数据包，则产生下一个新的数据包并回退至 $i$ 状态进入下一个竞争发送过程，此时新数据包的最小竞争窗口 $W_0$ 为 $i+1$ 状态时数据包成功发送时所对应竞争窗口值的一半：

$$W_0 = W_{\text{succ}}/2 \text{ (即 } W_i = W_{i+1}/2)$$

第3式表示在第 $i-1$ 状态时，数据发送存在冲突，则进入该数据发送的下次竞争发送过程，并产生新的竞争窗口，且 $W_i = 2W_{i-1}$ 。第4式表示一旦回退阶段到达 $m$ 值，在随后数据发送中 $m$ 不再增加。

## 2.2 ABEB算法二维Markov链稳态概率分布

当系统趋于稳定( $t \rightarrow \infty$ )时，二维离散时间Markov链 $\{s(t), b(t)\}$ 的稳态概率分布 $d_{i,k}$ 可用式(2)表示：

$$d_{i,k} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{s(t) = i, b(t) = k\}, \quad k \in [0, W_i - 1], \quad i \in [0, m] \quad (2)$$

由图1、式(1)和式(2)可知，当数据终端回退时间计数器 $k=0$ 时，二维离散时间Markov链稳态概率分布 $d_{i,0}$ 可表示为

$$d_{i,0} = \begin{cases} (1-p)d_{i+1,0} + (1-p)d_{i,0} & i = 0 \\ pd_{i-1,0} + (1-p)d_{i+1,0} & 1 \leq i < m \\ pd_{m-1,0} + pd_{m,0} & i = m \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)采用数学归纳法可以导出：

$$d_{i,0} = \left(\frac{p}{1-p}\right)^i d_{0,0} \quad (4)$$

根据图1、式(3)和ABEB算法二维离散时间Markov链的遍历性，ABEB算法二维离散时间Markov链的稳态概率分布 $d_{i,k}$ 可表示为

$$d_{i,k} = \frac{W_i - k}{W_i} d_{i,0} = \frac{W_i - k}{W_i} \begin{cases} (1-p)d_{i+1,0} + (1-p)d_{i,0} & i = 0 \\ pd_{i-1,0} + (1-p)d_{i+1,0} & 1 \leq i < m \\ pd_{m-1,0} + pd_{m,0} & i = m \end{cases} \quad (5)$$

## 2.3 ABEB算法的稳态吞吐量

由图1可知，系统每个数据终端在每时隙内发送数据的过程是离散、随机的，且每个数据终端在每时隙内成功发送数据的概率遵循二项分布。因此，每个数据终端在一个时隙内成功发送数据的概率 $P_{\text{succ}}$ 为

$$P_{\text{succ}} = C_n^1 \cdot q \cdot (1-q)^{n-1} \quad (6)$$

其中， $C_n^1$ 表示在一个时隙内 $n$ 个数据终端中只有一个数据终端发送数据，其他 $n-1$ 个数据终端在该时隙内并没有发送数据； $q$ 为任一数据终端在一个时隙内发送数据的概率。

在系统中，由于数据终端数 $n$ 很大时任一数据终端在一个时隙内发送数据的概率 $q$ 必定很小，且 $n$ 始终是一个正整数，任一数据终端在该时隙内发送数据的概率 $q$ 始终满足 $0 < q < 1$ ，即 $\lambda > 0$ ，因此当数据终端趋于无穷多(即 $n \rightarrow \infty$ )、系统趋于稳定(即 $t \rightarrow \infty$ )，且令 $\lambda = n \times q$ 时，根据式(6)和泊松定理可得

$$\lim_{n \rightarrow \infty, t \rightarrow \infty} P_{\text{succ}} = \lim_{n \rightarrow \infty, t \rightarrow \infty} C_n^1 \cdot q \cdot (1-q)^{n-1} = \lim_{n \rightarrow \infty, t \rightarrow \infty} n \cdot q (1-q)^{n-1} = \lambda e^{-\lambda} \quad (7)$$

根据式(7)，当系统趋于稳定时，系统吞吐量相对稳定。在某一个成功发送数据的时隙内，在 $n$ 个数据终端中，有且仅有一数据终端要发送数据，即

$$n \times q = 1 (\lambda = 1)$$

成立。则有

$$\lim_{n \rightarrow \infty, t \rightarrow \infty} P_{\text{succ}} = 1 \times e^{-1} = 1/e \quad (8)$$

由式(8)可知，在ABEB算法中，当系统趋于稳定时，系统饱和吞吐量的理论值趋于 $1/e$ 。

## 3 ABEB算法的仿真与分析

根据DCF协议、ABEB算法思想和图1的模型，应用C#.net开发工具对ABEB算法进行编程仿真，研究ABEB算法下系统吞吐量、系统延时等性能。在仿真中，为保证得到稳态无噪声数据，对每一组实验模拟了 $2 \times 10^7$ 个时隙，并只采集后 $1 \times 10^7$ 个时隙的仿真结果。

图2~图5分别为ABEB算法下系统吞吐量和系统延时的仿真结果，其中，图2和图3分别为ABEB算法在不考虑数据传输截断时的系统吞吐量和系统延时的仿真结果；图4和图5分别为ABEB算法在考虑数据传输截断( $m=6$ )时的系统吞吐量和系统延时仿真结果。图中的实线为ABEB算法的仿真结果，虚线为标准DCF算法的仿真结果。

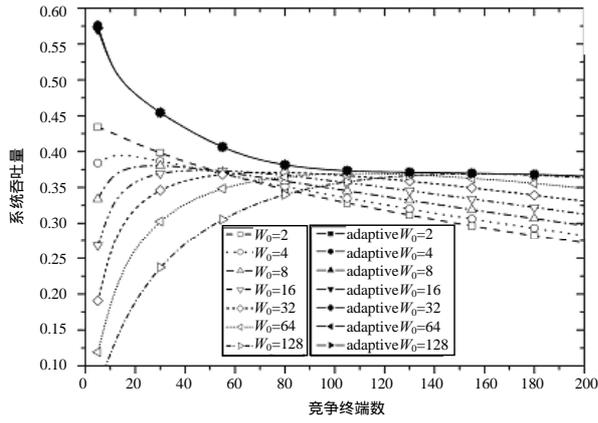


图2 不截断时标准 DCF 算法与 ABEB 算法的吞吐量

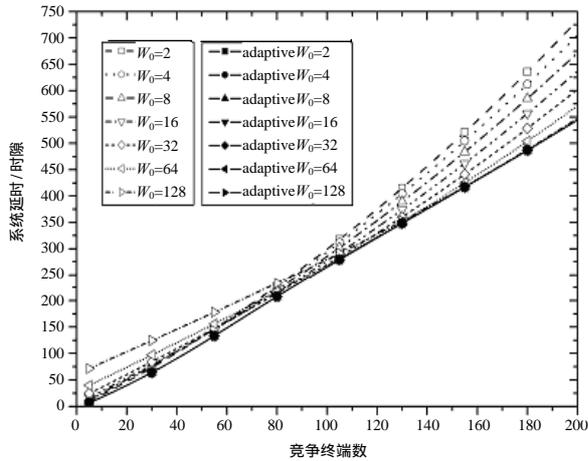


图3 不截断时标准 DCF 算法与 ABEB 算法的系统延时

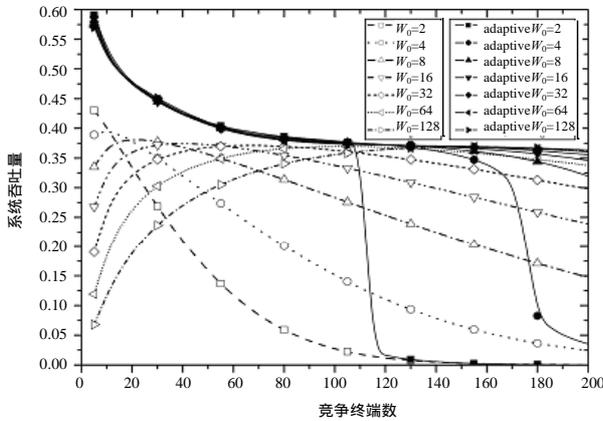


图4 截断时标准 DCF 算法与 ABEB 算法的吞吐量

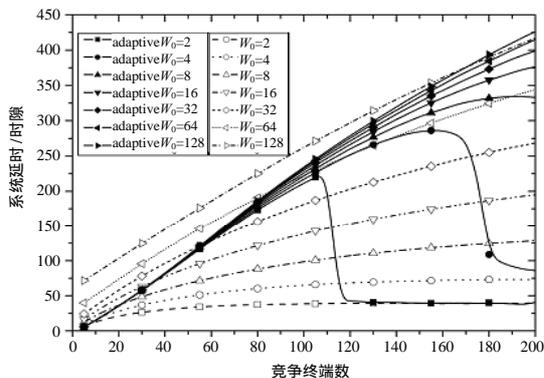


图5 截断时标准 DCF 算法与 ABEB 算法的系统延时

根据图 2~图 5, 在标准 DCF 算法中, 系统吞吐量随竞争终端数的增加迅速下降, 吞吐量下降程度与系统启动时初始碰撞竞争窗口  $W_0$  的取值关系密切,  $W_0$  越小, 吞吐量下降得越明显。而在 ABEB 算法中, 系统吞吐量都能较快地趋近于饱和吞吐量, 系统延时均不超过标准 DCF 算法。由图 2 和图 3 可知, 当不考虑数据传输截断时, ABEB 算法的系统吞吐量在数据终端数较小时远远高于标准 DCF 算法; 随着数据终端数增加, ABEB 算法能较快地趋近于系统的饱和吞吐量, 并使饱和吞吐量维持在  $1/e$ ; 系统延时均小于标准 DCF 算法; 数据终端最小初始竞争窗口的设定对最终结果没有影响。对于应用 ABEB 算法的系统来说, 在一个处于饱和状态且运行  $1 \times 10^7$  个时隙的系统中, 仅系统启动时的初始竞争窗口与初始设定值有关, 系统在此后运行过程中, 新数据传输时的最小竞争窗口  $W_0$  均由系统本身动态自适应选定, 当系统进入稳态或趋于稳定后则不受系统启动时初始竞争窗口的影响。由图 4 和图 5 可知, 在应用 ABEB 算法后, 当考虑数据传输截断时, 无论  $W_0$  如何取值, 系统均能较快地趋近于饱和吞吐量。随着系统吞吐量的提高, 其整体时延均不大于非截断时的时延。系统总体性能高于标准 DCF 算法。在 ABEB 算法中, 当初始竞争窗口较小时, 系统数据终端数与回退重传次数不匹配, 从而导致了系统的吞吐量和延时急剧下降。

#### 4 结束语

在采用 ABEB 算法时, 系统吞吐量能较快地趋近于饱和吞吐量的  $1/e$ , 系统延时均不超过标准 DCF 算法的系统延时, 且系统具有更好的吞吐量和时延性能, 吞吐量平均提高了 18%, 时延平均降低了 11%。本文的 ABEB 算法二维离散时间 Markov 链模型是合适的, 其建模思想对标准 DCF 改进算法建模具有一定的参考价值。

应用 C#.net 开发工具对 ABEB 算法进行编程可实现系统吞吐量和延时等性能的仿真。当不考虑数据传输截断时, ABEB 算法下系统吞吐量相比标准 DCF 算法有较大提高, 且能较快地趋近系统的饱和吞吐量, 系统延时均小于标准 DCF 算法的系统延时; 当考虑数据传输截断时, 无论系统初始碰撞竞争窗口有多少, ABEB 算法下系统均能较快地趋近于饱和吞吐量, 系统的整体时延均不大于非截断时的系统时延。

ABEB 算法仿真结果表明, 在考虑数据传输截断情况下, 当初始竞争窗口较小时, 系统数据终端数与回退重传次数不匹配, 系统的吞吐量和延时急剧下降。系统中每个数据终端在每时隙内成功发送数据的概率遵循二项分布, 当数据终端趋于无穷多、系统趋于稳定时, 系统饱和吞吐量呈泊松逼近。ABEB 算法下系统饱和吞吐量的理论值与仿真结果相吻合。

#### 参考文献

- [1] IEEE. Std.802.11-1999 Wireless LAN Medium Access Control and Physical Layer Specifications[S]. 1999.
- [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] Byung-jae K, Nah-Oak S, Miller L E. Performance Analysis of Exponential Backoff[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2005, 13(2): 343-355.
- [4] Chatzimisios P, Boucouvalas A C, Vitas V. Performance Analysis of the IEEE 802.11 MAC Protocol for Wireless LANs[J]. Journal of Commun. Syst., 2005, 18(6): 545-569.
- [5] Yang Xiao. A Simple and Effective Priority Scheme for IEEE 802.11[J]. IEEE Communications Letters, 2003, 7(2): 70-72.