

# IEEE802.11DCF 机制的三维 Markov 模型分析与仿真

董明忠

(昆明理工大学, 云南 昆明 650093)

**摘 要:** IEEE802.11 分布式协调机制(DCF)是颇具影响力的无线网络标准,协议基于载波检测/碰撞退避多址接入协议和时隙退避算法。针对 IEEE802.11DCF 饱和状态不能解决无线网络复杂的工作机制,提出三维 Markov 链(3M)模型,分析 IEEE802.11DCF 的非饱和性能,各站点在发送成功后随机产生新的数据分组,且到达率满足 Poisson 分布。三维 Markov 模型的仿真与理论分析吻合,这表明 3M 对系统的吞吐率、延迟性能、稳定性等参数有明显的提高与改善。

**关键词:** IEEE802.11DCF; 三维 Markov 模型; 非饱和

**中图分类号:** TP391.9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-629X(2009)07-0152-04

## Analysis and Simulation IEEE802.11 DCF Mechanism Based on Three - Dimensional Markov Model

DONG Ming-zhong

(Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

**Abstract:** IEEE 802.11 distributed coordination mechanism (DCF) is a considerable influence in the wireless LAN standards Agreement on carrier detection / multiple access protocol and giving the collision slot backoff algorithm. IEEE802.11DCF saturated wireless network to solve this levy complex mechanism, 3-D Markov chain (3M) model. IEEE802.11DCF analyse the properties of unsaturated. After the success of the transmission stations in a randomly generated new data, and meet the poisson distribution arrival rates. Simulation and theoretical analysis of three - dimensional Markov model, which shows the throughput of the system 3M delay performance parameters such as a marked improvement in stability and improvement.

**Key words:** IEEE802.11DCF; three - dimensional Markov model; unsaturated

### 0 引 言

众多协议无线网协议都是在 IEEE802.11DCF 的框架下进行研究,如公平性、TCP 性能、冲突退避、隐藏和暴露终端等问题<sup>[1]</sup>。IEEE 802.11DCF<sup>[1]</sup>基本介质访问控制机制,提供异步的数据服务。基于 CSMA/CA 的 IEEE802.11DCF,它具有两种介质访问模式:基本访问模式(basic access method)和可选的 RTS/CTS(request to send/clear to send)访问模式。

文献[2,3]为了分析 IEEE 802.11 DCF 的饱和吞吐率,假设在理想信道(没有隐藏节点或独占信道现象),有固定数目的节点,且每个节点总是有数据包要发送,首先针对每一个单一的节点,根据指数退避机

制,建立二维 Markov 模型,其思想是:该节点在任意选取的一个时隙内发送的稳态概率  $\tau$ ,此概率不依赖于所使用的访问模式(即基本访问模式或 RTS/CTS 访问模式),而且发生在任意选取的一个时隙内的事件,将吞吐率表示为概率  $\tau$  的函数。Haitao Wu<sup>[1]</sup>等人对 Bianchi 的模型进行了改进,考虑了重传次数限制,即重传次数达到最大限制的阈值时,当前数据包将被丢弃,竞争窗口将被重置为最小竞争窗口大小。Bianchi 和 Haitao Wu 的 Markov 模型都没有考虑退避过程中的冻结状态,而且都是只分析了 DCF 在饱和负载情况下的吞吐率性能,并没有分析介质访问延迟。

文中提出三维离散马尔可夫模型是基于非饱和状态下的系统分析,对 IEEE802.11DCF 机制进行建模仿真。所谓非饱和状态是指,各站点在成功发送数据后,依据泊松分布随机产生新的数据分组。

### 1 三维 Markov 模型理论

假设某个 Ad Hoc 网络包含  $n$  个站点:各站点在成

收稿日期:2008-09-26;修回日期:2008-12-30

基金项目:云南省教育厅科学研究基金项目(5Y0647D);昆明金汇通无线与微波技术研究所横向基金项目(KMJHT20060012);云南省无线电管理委员会横向基金项目(YNR2007014)

作者简介:董明忠(1972-),男,副教授,硕士,主要研究方向为网络协议与信息安全、嵌入式电子产品开发。

功发送数据后,随机产生新的数据分组,新分组的到达服从 Poisson 分布,平均分组到达率为  $\mu = \lambda$ 。

首先,分析某个站点竞争信道的过程。令  $r(t)$  表示:在时刻  $t$  该站点发送缓冲区中是否包含数据。如果没有数据,则  $r(t) = 0$ ,该站点空闲;如果包含数据,则  $r(t) = 1$ ,该站点竞争信道。令  $s(t)$  表示: $r(t) = 1$  时,该站点在时刻  $t$  退避级数,取值范围为  $[0, m]$ ;  $b(t)$  表示: $r(t) = 1$  时,该站点的退避时隙计数器在时刻  $t$  的取值,取值范围为  $[0, W_j - 1]$ ,  $W_j = 2^j W_0$ ,  $W_0 = CW_{\min}$ ,  $j \in [0, m]$ 。显然,  $r(t)$ 、 $s(t)$  和  $b(t)$  分别描述三个随机过程  $\{r(t), s(t), b(t)\}$  来描述该站点竞争信道的过程,如图 1 所示。由于时隙 Aloha 的作用,假定各站点每次发送数据帧时,数据帧的碰撞概率与过去的碰撞次数无关,即碰撞概率  $p$  恒定而且相互独立。这个三维随机过程在时刻  $t+1$  的状态  $\{r(t+1), s(t+1), b(t+1)\}$  只与前一个时刻  $t$  的状态  $\{r(t), s(t), b(t)\}$  有关,与时刻  $t$  以前的状态,如  $\{r(t-1), s(t-1), b(t-1)\}$  等无关,而且,状态和时间都是离散的。所以,随机过程  $\{r(t), s(t), b(t)\}$  是三维 Markov (3M),如图 1 所示。

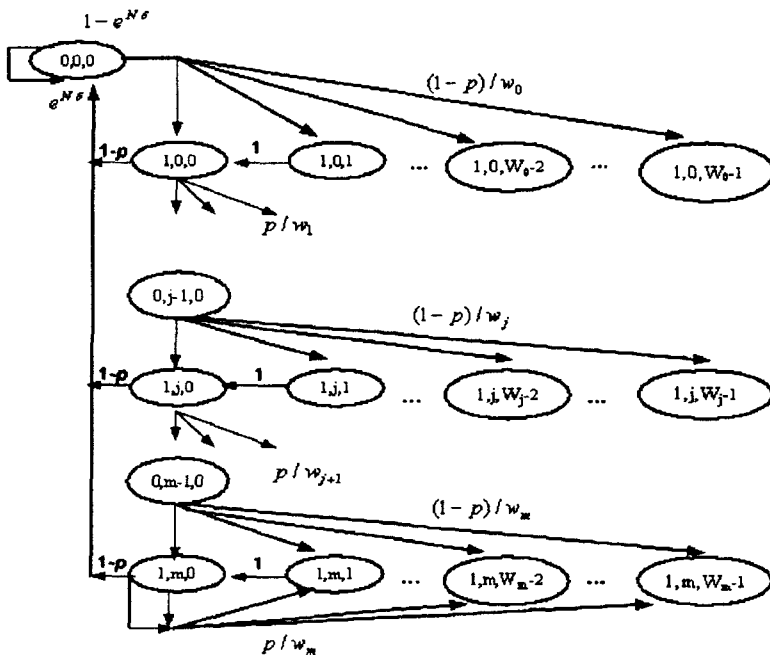


图 1 三维马可夫模型(3M)

为简化分析,令

$$P\{i_1, j_1, k_1 | i_0, j_0, k_0\} = P\left\{\begin{array}{l} r(t+1) = i_1, s(t+1) = j_1, \\ b(t+1) = k_1 | r(t) = i_0, s(t) = j_0, b(t) = k_0 \end{array}\right\} \quad (1)$$

由图 1 可知:

$$P\{1, j, k | 1, j, k+1\} = 1 \quad 0 \leq k \leq W_j - 2, 0 \leq$$

$$j \leq m \quad (2)$$

$$P\{1, j+1, k | 1, j, 0\} = p/w_{j+1} \quad 0 \leq k \leq W_{j+1} - 1, 0 \leq j \leq m-1 \quad (3)$$

$$P\{1, m, k | 1, m, 0\} = P/W_m \quad 0 \leq k \leq W_m - 1 \quad (4)$$

$$P\{0, 0, 0 | 1, j, 0\} = 1 - p \quad 0 \leq j \leq m \quad (5)$$

$$P\{(0, 0, 0 | 0, 0, 0)\} = e^{-\lambda} \quad (6)$$

$$P\{1, 0, k | 0, 0, 0\} = (1 - e^{-\lambda})/W_0 \quad 0 \leq k \leq W_0 - 1 \quad (7)$$

其中,式(2)表示,在退避过程中,退避计数器在每个时隙的开始时刻减1;式(3)表示,当退避级数为  $j$  时,如果发送失败,退避级数加1,退避计数器的取值等概率地从  $[0, W_{j+1} - 1]$  选取;式(4)表示,当退避级数已经达到最大时,如果发送失败,退避级数不变;式(5)表示,站点将发送缓冲区内的分组成功发送出去后,进入空闲状态;式(6)表示,如果没有新分组到达,站点保持空闲;式(7)表示,如果新的分组进入发送缓冲区,站点进入退避过程,退避级数为0,退避计数器的取值等概率地从  $[0, W_0 - 1]$  选取。

$$\text{令 } b_{i,j,k} = \text{Lim} P\{r(t) = i, s(t) = j, b(t) = k\}, \\ i = \{0, 1\}, 0 \leq j \leq m, 0 \leq k \leq W_j - 1.$$

由图 1 可得:

$$b_{1,j-1,0} \cdot P = b_{1,j,0} \Rightarrow b_{1,j,0} = P b_{1,j-1,0} \quad 1 \leq j \leq m-1 \quad (8)$$

$$b_{1,m-1,0} \cdot P = (1 - P) b_{1,m,0} \Rightarrow b_{1,m,0} = \frac{P^m}{1 - P} b_{1,0,0} \quad (9)$$

$$\sum_{j=0}^m b_{1,j,0} = \frac{b_{1,0,0}}{1 - P} \quad (10)$$

对于任意  $k \in [0, W_j - 1]$ ,

$$b_{1,j,k} = \frac{W_j - k}{W_j} \cdot b_{1,j,0}$$

$$\begin{cases} (1 - P_c) \sum_{h=0}^m b_{1,h,0} & j = 0 \\ P_c \cdot b_{1,j-1,0} & 0 < j < m \\ P_c \cdot (b_{1,m-1,0} + b_{1,m,0}) & j = m \end{cases} \quad (11)$$

将公式(8~10)代入(11),可以推出:

$$b_{0,j,k} = \begin{cases} b_{1,0,0}/(1 - e^{-\lambda}) & j = k = 0 \\ 0 & \text{other} \end{cases} \quad (12)$$

所有的  $b_{i,j,k}$  都可以用  $P$  表示,而且  $\sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^{W_j-1} b_{i,j,k} = 1$ 。因此,可以求出所有的  $b_{i,j,k}$  都可以用  $b_{1,0,0}$  和  $P$  表示,而且  $\sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^{W_j-1} b_{i,j,k} = 1$ 。因此可以求出

$$b_{1,0,0} = [2(1 - e^{-\lambda})(1 - 2P)] / [2(1 - 2P)(1 - P) + (1 - e^{-\lambda})((1 - 2p)(W_0 + 1) + PW_0(1 - (2P)^m))] \quad (13)$$

不论退避级数是多少,只要退避计时器为零,该站点就发送数据。因此,该站点在任意时隙发送数据帧的概率为

$$\tau = \sum_{j=0}^m b_{1,j,0} = [2(1 - e^{-\lambda})(1 - 2p)(1 - p)] / [2(1 - 2p)(1 - p) + (1 - e^{-\lambda})((1 - 2p)(W_0 + 1) + pW_0(1 - (2p)^m))] \quad (14)$$

如果除了当前站点外,剩余  $n-1$  个站点中至少有一个站点也发送数据,那么就会发生碰撞。系统稳定后,各站点的发送概率都为  $\tau$ ,因此碰撞概率为:

$$P = 1 - (1 - \tau)^{n-1} \quad (15)$$

求解非线性方程(14)、(15)得  $\tau$  和  $P$ 。

现在分析所站点竞争信道的情况。在任意时刻至少有一个站发送数据的概率为:

$$P_r = 1 - (1 - \tau)^n \quad (16)$$

在至少一个站点发送数据的条件下,有且只有一个站点发送的概率为

$$P_s = \frac{n\tau(1 - \tau)^{n-1}}{P_r} = \frac{n\tau(1 - \tau)^{n-1}}{1 - (1 - \tau)^n} \quad (17)$$

模型中,时隙有 3 种状态:成功传输数据帧(概率为  $P_r P_s$ ,平均时间为  $T_s$ );信道冲突(概率为  $P_r(1 - P_s)$ ,平均时间为  $T_c$ );信道空闲(概率为  $1 - P_r$ ,时间为  $\sigma$ )。

$$\begin{cases} T_s = \text{DIFS} + \text{RTS} + \text{SIFS} + \text{CTS} + \text{SIFS} + \\ H + E + \text{SIFS} + \text{ACK} \\ T_c = \text{DIFS} + \text{RTS} \end{cases} \quad (18)$$

文献[8]中推导  $T_s$ 、 $T_c$  后得到饱和平均介质访问延迟:

$$D = nT_s + \frac{1 - (1 - \tau)^n - n\tau(1 - \tau)^{n-1}}{\tau(1 - \tau)^{n-1}} T_c + \frac{1 - \tau}{\tau} \sigma \quad (19)$$

数据帧包括帧头和有效载荷, $H$  表示帧头的长度, $E$  表示平均有效载荷的长度。

当时归一化的系统吞吐量为:

$$S = \frac{\text{一个时隙内传输有效载荷的平均时间}}{\text{时隙的平均长度}} = \frac{P_r P_s E}{P_r P_s T_s + P_r(1 - P_s) T_c + (1 - P_r) \sigma} \quad (20)$$

## 2 仿真模拟分析

### 2.1 仿真环境

在 Opnet 仿真实验中,最大通信范围设为 100 米

近似为圆形区域,网络中不存在隐藏节点,且所有节点通过 IEEE 802.11 DCF 协议共享唯一信道。包括 10 个无线节点的一个网络拓扑,Client1~Client5 和 Server1~Server5 均为无线节点。

对包含 10、20、30、40、50、60 个节点的网络拓扑进行多组实验,每个网络拓扑中,定义一半节点为客户端(Client),一半节点为服务器(Server),定义每一个服务器对应一个客户端进行 FTP 业务传输<sup>[4,5]</sup>。不同节点数的网络拓扑实验中,分别基于基本访问模式和 RTS/CTS 访问模式,改变系统参数(如初始竞争窗口大小、数据包大小等)的设置,统计介质访问延迟与这些参数的关系。

### 2.2 仿真参数

在分析模型和仿真实验中,采用了与文献[4,6]相同的直接序列扩频(DSSS)的参数,见表 1。除了特别说明,文中的仿真实验中的数据包大小都设定为 1k 字节(即 8192 比特),仿真时间为 120 秒。

表 1 MAC 层和采用 DSSS 的物理层参数

数据包	8192 bits
MAC 层包头	224 bits
物理层包头	192 bits
ACK	112 bits + 物理层包头
RTS	160 bits + 物理层包头
CTS	112 bits + 物理层包头
信道速率	11 Mbit/s
传播延迟	1μs
时隙(slot)时间 $\sigma$	20μs
SIFS	10μs
DIFS	50μs

### 2.3 性能比较

由图 2 可知 3M 分组发送概率与 3M 分组成功发送概率分析,当各站点的平均分组到达率分别为 8、24、128packet/s,站点数目从 20 增加到 60 个。系统饱和前,随着分组到达率站点数的上升,网络负载增大。因为碰撞概率很小,发送概率与成功发送概率几乎相等,所以数据帧的发送概率与系统吞吐量随之增大,曲线非常吻合。

图 3 分别显示了基本访问模式(左半图)和 RTS/CTS 访问模式(右半图)下 MAC 层吞吐率的仿真结果。从这两个图中都可以看出:

(1)在基本访问模式和 RTS/CTS 访问模式下,三维 Markov 模型的 IEEE802.11 DCF 机制的吞吐率分别平均提高了 24.7% 和 8.7%;

(2)随着网络中活动节点数的变化,三维 Markov

模型的 IEEE802.11 DCF 机制的吞吐率性能表现得更加稳定,而标准的 IEEE802.11 DCF 机制的吞吐率随着网络中竞争节点数的增加而降低<sup>[6,7]</sup>。对于三维 Markov 模型,各站点的分组到达率越大,系统吞吐量增加越快。系统饱和后,网络负载继续增大,因碰撞造成的数据传输次数增多,碰撞概率增大。虽然数据帧的发送概率和成功发送概率增加,但系统吞吐量保持不变。

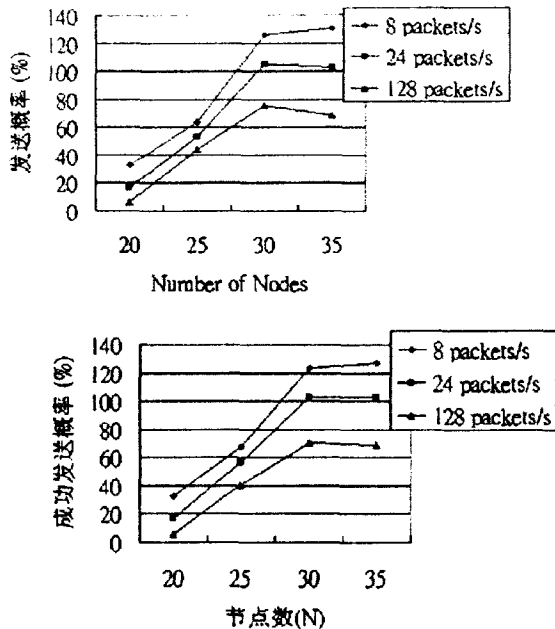


图2 3M 分组发送概率与成功发送概率

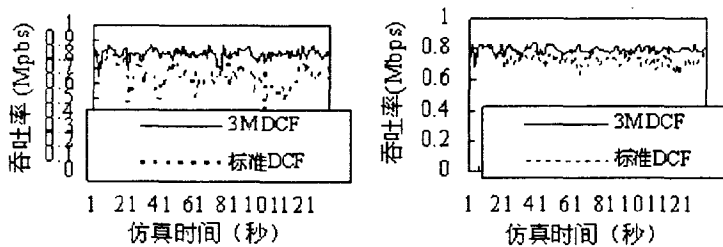


图3 两种模式下 MAC 层的吞吐率

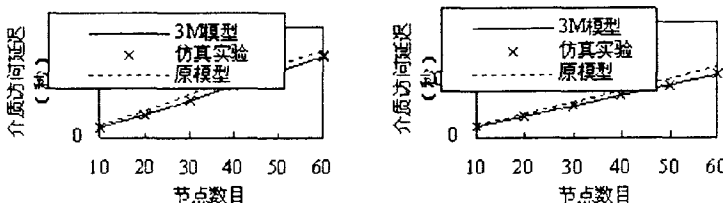


图4 两种模式下的介质访问延迟  
分析与仿真结果的比较

图4分别显示了基本访问模式(左半图)和 RTS/CTS 访问模式(右半图)下,数值计算与实验仿真的情况。可以看出,在两种模式下,用文中提出的三维

Markov 模型分析的结果(实线)与仿真实验(符号“×”)非常稳合,而用文献[8]的 Markov 模型分析的结果都明显偏大。究其原因,主要是由于文献[9]中的模型没有考虑退避过程中的冻结状态,分析出来的冲突概率就会比实际情况偏大,冲突时间变长,导致计算出的介质访问延迟比实际值偏大。

### 3 结束语

通过三维 Markov 模型分析了 IEEE802.11DCF 机制的非饱和性能,通过分组发送率、吞吐率、介质延迟的仿真实验对模型进行了验证,结果显示模型求解的分析值与仿真实验结果拟合的很好,并且仿真表明 3M 模型在饱和与非饱和情况下,其优化性能与稳定性都比原 IEEE802.11DCF 机制有所改善。后续研究是进一步计算活动节点与最优化竞争窗口、负载、分组的长度对介质延迟、吞吐率的影响,并通过三维 Markov 模型进行分析仿真。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 何昆鹏,李腊元. Ad Hoc 网络中按需路由协议的仿真与性能分析[J]. 计算机技术与发展, 2008, 18(3): 81-84.
- [3] 李 云. IEEE 802.11DCF 的 2 种媒体访问控制模式间的公平性分析[J]. 重庆邮电学院学报: 自然科学版, 2005(2): 36-40.
- [4] 王春江,耿方萍,刘元安,等. 一种应用于 Ad Hoc 无线局域网的随机接入协议[J]. 电子学报, 2005, 33: 21-25.
- [5] Mestdagh D J G, Spruyt P M P. A method to reduce the probability of clipping in DMT-based Transceivers[J]. IEEE Trans. on Comm, 1996, 44(10): 1234-1238.
- [6] Davis J A, Jedwab J. Peak-to-mean power control in OFDM, Golay complementary sequences and Reed-Muller codes[J]. IEEE Trans. on Information Theory, 1999, 45(7): 2397-2417.
- [7] 贺前华,陆以勤,韦 岗. 一种新的 HMM 训练方法[J]. 电子学报, 2000(9): 31-36.
- [8] 刘彩霞,郭江兴,程东年. 基于多维状态 Markov 模型的一种无线信道规划方法[J]. 通信与计算机, 2004(1): 41-45.
- [9] 陈羽中. IEEE802.11 DCF 退避机制分析和改进[J]. 应用科学学报, 2006(7): 12-14.