

## 基于定长时隙的多跳 Ad Hoc 网络 DCF 协议马尔可夫链模型<sup>\*</sup>

雷磊<sup>1+</sup>, 许宗泽<sup>1</sup>, 蔡维玲<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(南京航空航天大学 信息科学与技术学院, 江苏 南京 210016)

<sup>2</sup>(南京师范大学 数学与计算机科学学院, 江苏 南京 210024)

### Markov Model of DCF Protocol Based on Fixed Slot in Multi-Hop Ad Hoc Networks

LEI Lei<sup>1+</sup>, XU Zong-Ze<sup>1</sup>, CAI Wei-Ling<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(College of Information Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

<sup>2</sup>(College of Mathematics and Computer Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210024, China)

+ Corresponding author: E-mail: leilei@nuaa.edu.cn

**Lei L, Xu ZZ, Cai WL. Markov model of DCF protocol based on fixed slot in multi-hop ad hoc networks. Journal of Software, 2010,21(3):564–574.** <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3550.htm>

**Abstract:** This paper points out the limitations of the existing Markov model of DCF protocol based on un-fixed slot in ad hoc networks, and analyzes the difficulty of the modeling of DCF protocol in multi-hop ad hoc networks in detail. On the basis of this, this paper proposes a Markov model of DCF protocol based on fixed slot in multi-hop ad hoc networks. By solving this model, the theoretic value which reflects the saturated throughput performance of multi-hop ad hoc networks is obtained. The effectiveness of this model is demonstrated by the simulations in GloMoSim environment.

**Key words:** ad hoc network; DCF protocol; model; fixed slot; Markov chain

**摘要:** 指出了现有的基于不定长时隙的 DCF 协议马尔可夫链模型的局限性,并在详细分析多跳 ad hoc 网络环境中 DCF 协议建模的难点问题基础上,提出了一种基于定长时隙的多跳 ad hoc 网络 DCF 协议马尔可夫链模型.通过模型的求解,得到了反映多跳 ad hoc 网络饱和吞吐量性能的相关性能指标的理论值,并结合 GloMoSim 网络仿真环境中的仿真实验,证明了模型的有效性.

**关键词:** ad hoc 网络; DCF 协议; 模型; 定长时隙; 马尔可夫链

**中图分类号:** TP393      **文献标识码:** A

IEEE 802.11 DCF(distributed coordination function)<sup>[1]</sup>是无线局域网中的标准协议,它通过载波检测机制和二进制指数退避(BEB)算法避免发送节点之间的冲突,并提供了两种传输模式,即收/发节点两次握手的基本传

\* Supported by the Aeronautical Science Foundation of China under Grant No.20090152001 (航空科学基金); the National Science Foundation of Jiangsu Higher Education Institutions of China under Grant No.09KJB520007 (江苏省高校自然科学基金项目); the Perspective Research Foundation of Production Study and Research Alliance of Jiangsu Province of China under Grant No.BY2009100 (江苏省产学研前瞻性联合研究项目); the Scientific Research Activate Funding of NUAAs of China under Grant No.S0918-042 (南京航大科研启动基金)

Received 2008-06-10; Revised 2008-10-16; Accepted 2008-12-29

输模式和收/发节点 4 次握手的 RTS/CTS 模式.由于 RTS/CTS 控制帧握手机制可以部分地解决多跳 ad hoc 网络中的隐终端问题<sup>[2]</sup>,因而 DCF 协议的 RTS/CTS 模式已被广泛应用于 ad hoc 网络的各种仿真和测试床,成为了事实上的 ad hoc 网络 MAC 协议规范.

DCF 协议的建模与分析一直是 ad hoc 网络研究领域的热点问题<sup>[2-8]</sup>.文献[2]首先采用了二维马尔可夫链对单跳 ad hoc 网络环境中的 DCF 协议进行建模,并通过该模型的求解得到了网络饱和吞吐量的理论值.文献[3]通过对 DCF 协议的建模,分析了单跳 ad hoc 网络中节点的数据包延迟性能和响应时间.文献[4]在文献[2]提出二维马尔可夫链模型的基础上,将节点的空闲和休眠状态加入模型,并运用该模型分析了单跳 ad hoc 网络的能量效率.在多跳 ad hoc 网络的研究中,DCF 协议的建模也大多是在文献[2]提出的模型基础上开展的.其中,文献[6]通过建模分析了在信道非饱和的条件下,多跳 ad hoc 网络中 DCF 协议的性能.文献[7]结合收/发节点之间的距离信息,采用三维马尔可夫链对多跳 ad hoc 网络环境中的 DCF 协议建模.然而,该模型却没有考虑对于基于载波检测的无线网络,节点的载波检测范围大于传输范围的实际情况<sup>[9]</sup>,以及在多跳 ad hoc 网络环境中,接收节点冲突干扰范围对 RTS 帧和 Data 帧发送冲突概率造成的影响.文献[8]将多跳 ad hoc 网络环境中,节点发送 RTS 帧失败后的退避过程和发送 Data 帧失败后的退避过程分别看作是两个独立的过程,并采用了一种四维马尔可夫链对 DCF 协议建模.然而,由 IEEE 802.11 DCF 协议标准可知,即使发送节点成功地向接收节点发送了 RTS 帧,但如果在随后的 Data 帧传输过程中发生了冲突,则该发送节点在重发 Data 帧以前,还必须再次与接收节点完成 RTS/CTS 控制帧握手.因此,无论是因为 RTS 帧还是 Data 帧冲突导致数据帧传输失败,退避过程都只发生在发送节点向接收节点发送 RTS 帧以前,因而,文献[8]中的建模与分析存在着一定的误区.

本文第 1 节简单回顾文献[2]提出的单跳 ad hoc 网络 DCF 协议马尔可夫链模型,并根据该模型的特点,将此类模型定义为基于不定长时隙的 DCF 协议马尔可夫链模型.第 2 节详细分析多跳 ad hoc 网络环境中 DCF 协议建模的难点,并在前人工作<sup>[2-8]</sup>的基础上提出一种基于定长时隙的多跳 ad hoc 网络 DCF 协议二维马尔可夫链模型.第 3 节通过数值分析的方法对该模型求解,得到反映多跳 ad hoc 网络饱和和吞吐量性能的一系列相关性能指标的理论值,并通过仿真实验证明模型的有效性.第 4 节对全文进行总结.

## 1 基于不定长时隙的单跳 ad hoc 网络 DCF 协议马尔可夫链模型

### 1.1 网络时间轴划分为不定长时隙 $\sigma$

在 DCF 协议中,网络时间轴由一系列连续且长度相等的时隙  $\delta$  组成, $\delta$  的长度取决于节点物理层采用的调制方式.然而,文献[2]的建模却将单跳 ad hoc 网络中发送节点的时间轴划分为一系列连续但长度不等的时隙  $\sigma$ , $\sigma$  的取值由信道状态决定.在信道持续保持空闲的情况下, $\sigma$  的长度与 DCF 协议规定的定长时隙  $\delta$  的长度相等;而如果在某一个  $\delta$  时隙内,网络中有节点开始发送信号导致信道变忙,则从该  $\delta$  时隙开始,到信道再次恢复空闲的  $\delta$  时隙之间的所有时间仅为一个  $\sigma$  时隙.结合 DCF 协议的随机退避机制可知,在随机退避过程中,每一个  $\sigma$  时隙即对应于发送节点退避计数器的一次递减过程.图 1 给出了采用  $\delta$  和  $\sigma$  这两种不同的时隙划分网络时间轴的方法.

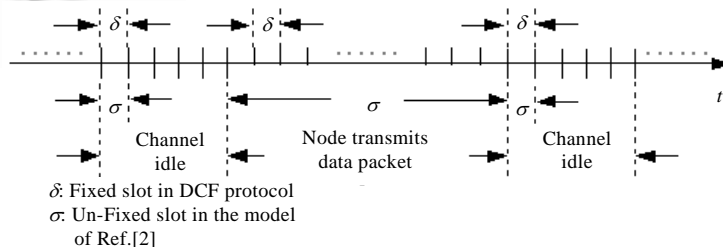


Fig.1 Two different slots to divide the time axis of the network

图 1 两种不同的时隙划分网络时间轴

### 1.2 模型的特点与局限性

文献[2]采用如图 2 所示的二维马尔可夫链模型对单跳 ad hoc 网络中 DCF 协议的发送节点退避机制进行建模.该模型假定在每个  $\sigma$  时隙中,数据包发生冲突的概率  $p$  恒定且独立,分别采用随机过程  $s(t)$  和  $b(t)$  表示在当前  $\sigma$  时隙中,某一个节点所处的退避阶段和当前退避计数器的值.用  $W_i$  表示第  $i$  级退避阶段节点竞争窗口的大小, $W_0$  表示  $CW_{min}$ .通过模型的求解,即可得到单跳 ad hoc 网络的饱和吞吐量.

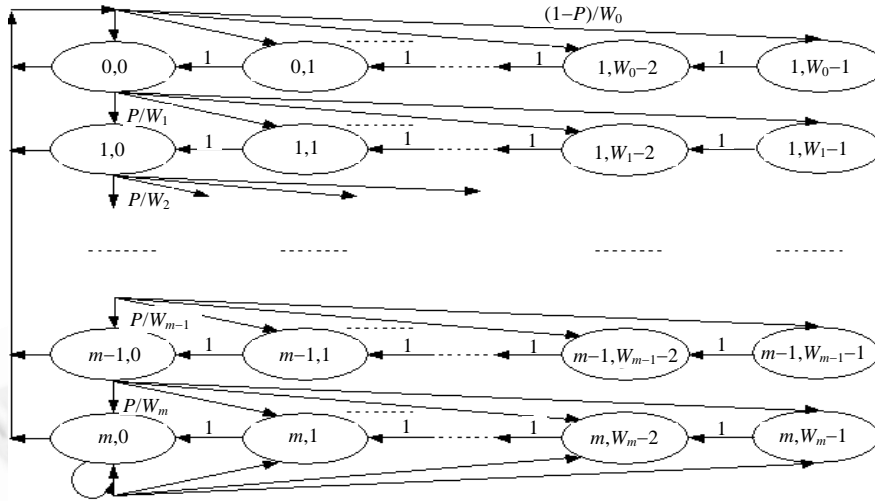


Fig.2 Markov model of DCF protocol in single hop ad hoc network

图 2 单跳 ad hoc 网络 DCF 协议马尔可夫链模型

由图 2 可知,文献[2]中的二维马尔可夫链模型的最显著特点是将发送节点的时间轴划分为一系列连续的不定长时隙  $\sigma$ ,而每一个  $\sigma$  时隙对应于节点退避计数器的一次递减过程.根据这一划分,文献[2]首先将二维马尔可夫链模型的稳态分布概率表示成条件冲突概率  $p$  的函数,然后计算出节点在每一个  $\sigma$  时隙中发送信号的概率  $\tau$ ,并根据  $\tau$  得到了在一个  $\sigma$  时隙内,网络中至少有一个节点发送信号的概率  $P_{tr}$  和信道上一次数据传输成功的概率  $P_s$ ,最后由  $P_{tr}$  和  $P_s$  即可得到单跳 ad hoc 网络的饱和吞吐量  $S$ .由于目前大多数 DCF 协议的建模工作都是在该模型的基础上开展的,因此根据上述特点,本文将此类模型定义为基于不定长时隙的 DCF 协议马尔可夫链模型.

然而,该模型却同时具有以下两点局限性:

(1) 该模型本身是针对单跳 ad hoc 网络设计的,它无法应用于多跳 ad hoc 网络环境下 DCF 协议的性能分析.这是因为在单跳 ad hoc 网络环境中,由于载波检测机制的作用,冲突只可能发生在 RTS 帧的发送过程中.只要发送节点成功地向接收节点发送了 RTS 帧,则该发送节点必然能够无冲突地向接收节点发送 Data 帧.因此,在文献[2]的模型中,当节点在一个  $\sigma$  时隙中发送数据包时,只可能出现以下两种情况:

- ① 节点成功完成了数据包的传输,退避阶段降为 0, $\sigma$  时隙的长度等于  $T_s$ ;
- ② 节点发送 RTS 帧的过程中发生了冲突,退避阶段加 1, $\sigma$  时隙的长度等于  $T_c$ .

由节点发送冲突概率  $p$  为独立常数的假设可知,出现上述两种情况的概率分别为  $(1-p)$  和  $p$ .然而,本文在第 2.1.3 节的分析中指出,在多跳 ad hoc 网络中,即使发送节点成功与接收节点完成了 RTS/CTS 控制帧握手,在该发送节点向接收节点发送 Data 帧的过程中却仍然有可能发生冲突.因此,在多跳 ad hoc 网络中,数据包发送冲突概率包括了 RTS 帧发送冲突概率  $p_{RTS}$  和 Data 帧发送冲突概率  $p_{Data}$  两部分,而且这两种不同的冲突过程导致信道变忙的持续时间并不相同.然而,无论是因为 RTS 帧,还是 Data 帧发送冲突导致数据包发送失败,发送节点都要将退避阶段加 1,并在新的 CW 窗口中随机选取退避计数器的值.因此,采用文献[2]中的模型无法区分这两类

不同的发送失败过程。

(2) 该模型没有考虑到当发送节点向接收节点重发 RTS 帧的次数超过重发门限时,发送节点丢弃当前正在传送的数据包,并将退避阶段降为 0 的过程。而事实上,DCF 协议对 RTS 帧和 Data 帧的重传次数都有明确的规定:在某一个数据包的发送过程中,如果节点重传 RTS 帧的次数大于 7,或者重传 Data 帧的次数大于 4,则发送节点将丢弃该数据包,并将退避阶段降为 0。

## 2 基于定长时隙的多跳 ad hoc 网络 DCF 协议马尔可夫链模型

由第 1.2 节中的分析可知,在多跳 ad hoc 网络环境中,基于不定长时隙  $\sigma$  的马尔可夫链模型无法有效地区分 RTS 帧和 Data 帧发送失败导致的发送节点退避过程,因而无法应用于多跳 ad hoc 网络中 DCF 协议的性能分析。为了有效地实现这种区分,本文在详细分析多跳 ad hoc 网络环境下 DCF 协议建模的难点问题的基础上,提出了一种基于定长时隙  $\delta$  的 DCF 协议二维马尔可夫链模型。

### 2.1 多跳 ad hoc 网络环境下 DCF 协议建模的难点问题

#### 2.1.1 RTS 帧和 Data 帧的发送冲突概率

文献[10]给出了多跳 ad hoc 网络中,接收节点相对于某一干扰发送节点的冲突干扰范围  $r_{ij}$  的计算公式:

$$r_{ij} = d_{ix} \sqrt[4]{\frac{SINR_{rx} P_{ij}}{P_{ix}}} \quad (1)$$

其中,  $d_{ix}$  为发送节点和接收节点之间的距离,  $SINR_{rx}$  为接收节点判决信号是否能被正确接收的信号噪声干扰比门限,  $P_{ij}$  和  $P_{ix}$  分别为干扰节点和发送节点的信号发射功率。由于网络中所有节点均采用相同的功率发送各类控制帧和数据帧,因而  $P_{ij}$  的值与  $P_{ix}$  相等。假定  $SINR_{rx}$  的值取 10dB, 节点的传输范围为  $r_{ix}$ , 则由公式(1)可知, 当收/发节点之间的距离  $d_{ix} > 0.56r_{ix}$  时, 接收节点的冲突干扰范围将大于节点的传输范围; 而当收/发节点之间的距离  $d_{ix} < 0.56r_{ix}$  时, 接收节点的冲突干扰范围将小于节点的传输范围。由 DCF 协议的发送规约可知, 在接收节点的冲突干扰范围小于节点传输范围的情况下, 接收节点冲突干扰范围内的发送节点能够正确侦听接收节点应答的 CTS 帧, 从而通过虚拟载波检测机制避免冲突, 保证发送节点成功向接收节点发送 Data 帧。为了突出多跳 ad hoc 网络环境下 RTS 帧发送冲突概率和 Data 帧发送冲突概率之间的区别, 本文在建模中假定接收节点相对于所有干扰节点的冲突干扰范围均大于节点的传输范围。

为了确定多跳 ad hoc 网络环境下 RTS 帧和 Data 帧的发送冲突概率  $p_{RTS}$  和  $p_{Data}$ , 本文首先定义了 RTS 帧冲突范围和 Data 帧冲突范围的概念。考虑图 3(a) 所示的网络拓扑, 当节点 0 向节点 1 发送 RTS 帧时, 如果节点 1 冲突干扰范围内的其余发送节点与节点 0 同时发送信号, 则必然导致接收节点 1 在接收 RTS 帧的过程中发生冲突。本文将接收节点的冲突干扰范围称为 RTS 帧冲突范围, 如图 3(a) 中阴影区域所示。

考虑节点的物理载波检测范围  $r_{cs}$  的取值约为传输范围  $r_{ix}$  取值的 2.2 倍的载波检测网络实际情况。当节点 0 和节点 1 完成了 RTS/CTS 控制帧握手后, 由文献[11]可知, 物理载波检测机制能够为发送节点 0 物理载波检测范围内的其余发送节点提供一种同步机制, 使得这些发送节点延迟发送, 避免冲突。然而, 当节点 0 向节点 1 发送 Data 帧时, 节点 0 物理载波检测范围之外、节点 1 冲突干扰范围之内其余发送节点仍然可能同时发送信号, 从而导致 Data 帧发生冲突。因此, 本文将发送节点物理载波检测范围之外、接收节点冲突干扰范围之内区域称为 Data 帧冲突范围, 如图 3(b) 中阴影区域所示。

假定接收节点的 RTS 帧冲突范围内的发送节点数目为  $a$ , Data 帧冲突范围内的发送节点数目为  $b$ , 发送节点在一个  $\delta$  时隙内发送 RTS 帧和 Data 帧的概率分别为  $\tau_{RTS}$  和  $\tau_{Data}$ , 则由上述 RTS 帧冲突范围和 Data 帧冲突范围的定义即可得到在一个  $\delta$  时隙内 RTS 帧和 Data 帧的发送冲突概率分别为

$$p_{RTS} = 1 - (1 - \tau_{RTS} - \tau_{Data})^{a-1} \quad (2)$$

$$p_{Data} = 1 - (1 - \tau_{RTS} - \tau_{Data})^{b-1} \quad (3)$$

由  $r_{ij} > r_{ix}$  的假设条件可知, 收/发节点之间的距离  $d_{ix}$  的取值在区间  $(0.56r_{ix}, r_{ix})$  内服从均匀分布。假定网络中节

点的分布密度为 $\rho$ ,则由公式(1)及 RTS 帧冲突范围和 Data 帧冲突范围的定义即可将参数  $a$  和  $b$  表示成随机变量  $d_{ix}$  的函数,并可通过概率密度分布函数求得  $a$  和  $b$  的数学期望值.在本文的模型求解和仿真实验验证中,为了能更准确地说明模型求解得到的理论值是否与仿真实验得到的实验结果一致,本文将参数  $a$  和  $b$  的值设置为常数,因而收/发节点之间的距离  $d_{ix}$  为固定值.同时,与文献[2]类似,本文在多跳 ad hoc 网络中对 DCF 协议的建模也基于发送冲突概率恒定的假设,即无论节点当前的发送过程是在发送一个新的数据包还是重发上次没有发送成功的数据包,在每一个  $\delta$  时隙中,它所发送的 RTS 帧或 Data 帧都以恒定且独立的概率  $p_{RTS}$  或  $p_{Data}$  与网络中其他节点发送的信号发生冲突.

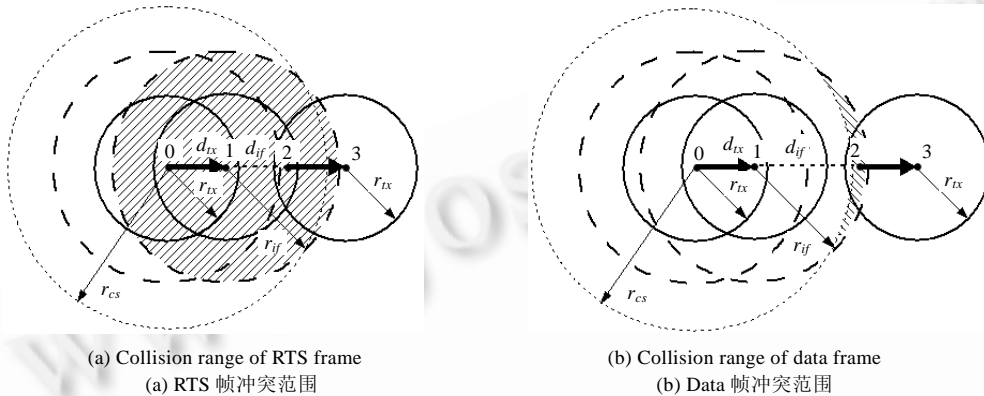


Fig.3 Collision range of the receiver

图 3 接收节点的冲突范围

### 2.1.2 多跳 ad hoc 网络的饱和吞吐量

假定网络总覆盖区域面积为  $A_{total}$ ,由发送节点冲突干扰范围和接收节点冲突干扰范围的并集组成的单跳传输区域面积为  $A_{single}$ ,本文将信道的共享系数 $\lambda$ 定义为  $A_{total}$  与  $A_{single}$  的比值,而将多跳 ad hoc 网络的饱和吞吐量  $S_{total}$  定义为  $\lambda$ 与单跳传输区域的饱和吞吐量  $S_{single}$  的乘积.

### 2.1.3 发送节点的数据包重传门限

在本文的建模中,考虑了当数据包重传次数超过重传门限时,发送节点丢弃该数据包,并将退避阶段降为 0 的过程.按照 DCF 协议的规定,在一次数据包的发送过程中,发送节点需要分别维护 RTS 帧重传次数计数器及 Data 帧重传次数计数器这两个不同的变量,无论是 RTS 帧还是 Data 帧的重传次数超过了重传门限,节点都应该丢弃该数据包.由于在 DCF 协议的建模与分析中,网络饱和吞吐量是人们重点关注的性能指标,而重传门限主要影响的是某一数据分组发送成功的概率,对网络饱和吞吐量影响并不大.因此,为了简化分析,本文将节点丢弃数据包的条件简化为节点重传 RTS 帧和 Data 帧的次数之和大于重传门限,即在数据包的发送过程中,发送节点只需要维护一个重传总次数计数器变量.

## 2.2 建模与计算推导

如图 4 所示,本文的模型包括以下 5 个过程:

(1) 节点发送前的退避过程  $\{s(t), b(t)\}$ :  $s(t)$  和  $b(t)$  分别表示在当前  $\delta$  时隙中,节点所处的退避阶段和退避计数器的剩余值.节点在退避过程中的每一个状态的概率用  $P_{B(i,k)}(0 \leq i \leq m-1, 0 \leq k \leq 2^i W_0 - 1)$  表示.假定节点的重传门限为  $m$ ,竞争窗口的最小值为  $W_0$ ,在退避过程中,节点因为检测到其他节点发送的信号而暂停退避计数器递减的概率为  $p_{suspend}$ ,假定  $p_{suspend}$  的取值恒定且独立;

(2) RTS 帧发送成功过程  $\{s(t), TR_S(t)\}$ : 假定 RTS 帧发送成功过程由  $R_S$  个  $\delta$  时隙组成,  $s(t)$  和  $TR_S(t)$  分别表示在当前  $\delta$  时隙中,节点所处的退避阶段和当前 RTS 帧发送成功过程所剩的时隙数. RTS 帧发送成功过程中的每一个状态的概率用  $P_{TRS(i,k)}(0 \leq i \leq m-1, 0 \leq k \leq R_S - 1)$  表示;



$$P_{B(1,k)} = \frac{(W_1 - k)P_{B(0,0)}\varepsilon}{W_1(1 - p_{suspend})} \quad (0 < k < W_1)$$

因此,对于  $i \in (0, m)$  有

$$P_{B(i,k)} = \frac{(W_i - k)P_{B(i-1,0)}\varepsilon}{W_i(1 - p_{suspend})} \quad (0 < i \leq m, 0 < k < W_i) \quad (5)$$

而  $P_{B(i,0)}$  则可以表示成

$$P_{B(i,0)} = \frac{P_{B(i-1,0)}\varepsilon}{W_i} + P_{B(i,1)}(1 - p_{suspend}) \quad (6)$$

在式(5)中,令  $k=1$ ,并带入式(6),有

$$P_{B(i,0)} = \frac{P_{B(i-1,0)}\varepsilon}{W_i} + \frac{(W_i - 1)P_{B(i-1,0)}\varepsilon}{W_i(1 - p_{suspend})}(1 - p_{suspend}) = P_{B(i-1,0)}\varepsilon \quad (0 < i \leq m) \Rightarrow P_{B(i,0)} = P_{B(0,0)}\varepsilon^i \quad (0 < i \leq m) \quad (7)$$

将式(7)带入式(5)可得:

$$P_{B(i,k)} = \frac{(W_i - k)P_{B(0,0)}\varepsilon^i}{W_i(1 - p_{suspend})} \quad (0 < i \leq m, 0 < k < W_i) \quad (8)$$

最后,可以将  $P_{B(0,k)}$  用  $P_{TRF(m,0)}$ ,  $P_{TDS(i,0)}$  和  $P_{TDF(m,0)}$  表示为

$$P_{B(0,W_0-1)} = \frac{1}{W_0} \left( P_{TRF(m,0)} + \sum_{i=0}^m P_{TDS(i,0)} + P_{TDF(m,0)} \right) \Rightarrow P_{B(0,k)} = \frac{W_0 - k}{W_0} \left( P_{TRF(m,0)} + \sum_{i=0}^m P_{TDS(i,0)} + P_{TDF(m,0)} \right) \quad (0 < k < W_0) \quad (9)$$

### (2) RTS 传输过程

RTS 发送成功过程和失败过程的每一个状态分别可以用  $P_{B(0,0)}$ ,  $\varepsilon$  和  $p_{RTS}$  表示为

$$P_{TRS(i,k)} = P_{TRS(i,R_S-1)} = P_{B(0,0)}\varepsilon^i(1 - p_{RTS}) \quad (0 \leq i \leq m, 0 \leq k \leq R_S - 1) \quad (10)$$

$$P_{TRF(i,k)} = P_{TRF(i,R_F-1)} = P_{B(0,0)}\varepsilon^i p_{RTS} \quad (0 \leq i \leq m, 0 \leq k \leq R_F - 1) \quad (11)$$

### (3) Data 传输过程

Data 发送成功过程和失败过程的每一个状态分别可以用  $P_{B(0,0)}$ ,  $\varepsilon$  和  $p_{RTS}$  表示为

$$P_{TDS(i,k)} = P_{TDS(i,D_S-1)} = P_{B(0,0)}\varepsilon^i(1 - p_{RTS})(1 - p_{Data}) \quad (0 \leq i \leq m, 0 \leq k \leq D_S - 1) \quad (12)$$

$$P_{TDF(i,k)} = P_{TDF(i,D_F-1)} = P_{B(0,0)}\varepsilon^i(1 - p_{RTS})p_{Data} \quad (0 \leq i \leq m, 0 \leq k \leq D_F - 1) \quad (13)$$

2. 将稳态时节点停留在各个状态的概率之和表示成  $P_{B(0,0)}$ ,  $p_{RTS}$ ,  $p_{Data}$  和  $p_{suspend}$  的函数.

#### (1) 退避过程

由式(7)~式(9),即可分 3 部分求出退避过程中节点停留在各个状态的概率之和:

$$\sum_{i=1}^m P_{B(i,0)} = \sum_{i=1}^m P_{B(0,0)}\varepsilon^i = \frac{P_{B(0,0)}\varepsilon(1 - \varepsilon^m)}{1 - \varepsilon} \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^{W_i-1} P_{B(i,k)} = \sum_{i=1}^m \sum_{k=0}^{W_i-1} \frac{(W_i - k)P_{B(0,0)}\varepsilon^i}{W_i(1 - p_{suspend})} = \frac{P_{B(0,0)}}{2(1 - p_{suspend})} \left[ \frac{2W_0\varepsilon(1 - (2\varepsilon)^m)}{1 - 2\varepsilon} + \frac{\varepsilon(1 - \varepsilon^m)}{1 - \varepsilon} \right] \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \sum_{k=0}^{W_0-1} P_{B(0,k)} &= P_{B(0,0)} + \sum_{k=1}^{W_0-1} \frac{W_0 - k}{W_0} \left( P_{TRF(m,0)} + \sum_{i=0}^m P_{TDS(i,0)} + P_{TDF(m,0)} \right) \\ &= P_{B(0,0)} \left[ 1 + \frac{(W_0 - 1)}{2} \left( \varepsilon^m p_{RTS} + \frac{1 - \varepsilon^{m+1}}{1 - \varepsilon} (1 - p_{RTS})(1 - p_{Data}) + \varepsilon^m (1 - p_{RTS}) p_{Data} \right) \right] \end{aligned} \quad (16)$$

#### (2) RTS 传输过程

由式(10)和式(11),即可将 RTS 帧发送成功和失败过程中节点停留在各个状态的概率分别表示为

$$\sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^{R_S-1} P_{TRS(i,k)} = \sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^{R_S-1} P_{B(0,0)}\varepsilon^i(1 - p_{RTS}) = P_{B(0,0)} \frac{R_S(1 - p_{RTS})(1 - \varepsilon^{m+1})}{1 - \varepsilon} \quad (17)$$

$$\sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^{R_F-1} P_{TRF(i,k)} = \sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^{R_F-1} P_{B(0,0)} \varepsilon^i p_{RTS} = P_{B(0,0)} \frac{R_F p_{RTS} (1 - \varepsilon^{m+1})}{1 - \varepsilon} \quad (18)$$

### (3) Data 传输过程

由式(12)和式(13),即可将 Data 帧发送成功和失败过程中节点停留在各个状态的概率分别表示为

$$\sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^{D_S-1} P_{TDS(i,k)} = \sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^{D_S-1} P_{B(0,0)} \varepsilon^i (1 - p_{RTS}) (1 - p_{Data}) = P_{B(0,0)} D_S (1 - \varepsilon^{m+1}) \quad (19)$$

$$\sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^{D_F-1} P_{TDF(i,k)} = \sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^{D_F-1} P_{B(0,0)} \varepsilon^i (1 - p_{RTS}) p_{Data} = P_{B(0,0)} \frac{D_F p_{Data} (1 - \varepsilon^{m+1})}{1 - p_{Data}} \quad (20)$$

3. 通过归一化条件,将  $P_{B(0,0)}$  表示成  $p_{RTS}$ 、 $p_{Data}$  和  $p_{suspend}$  的函数.

由于节点停留在各种状态的概率之和为 1,即

$$1 = \sum_{i=1}^m P_{B(i,0)} + \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^{W_0-1} P_{B(i,k)} + \sum_{k=0}^{W_0-1} P_{B(0,k)} + \sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^{R_S-1} P_{TRS(i,k)} + \sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^{R_F-1} P_{TRF(i,k)} + \sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^{D_S-1} P_{TDS(i,k)} + \sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^{D_F-1} P_{TDF(i,k)} \quad (21)$$

因此,可以将  $P_{B(0,0)}$  用  $p_{RTS}$ 、 $p_{Data}$  和  $p_{suspend}$  表示为

$$P_{B(0,0)} = \left\{ \frac{\varepsilon(1 - \varepsilon^m)}{1 - \varepsilon} + \frac{\left[ \frac{2W_0 \varepsilon (1 - (2\varepsilon)^m)}{1 - 2\varepsilon} + \frac{\varepsilon(1 - \varepsilon^m)}{1 - \varepsilon} \right]}{2(1 - p_{suspend})} + \left[ 1 + \frac{(W_0 - 1)}{2} \left( \varepsilon^m p_{RTS} + \frac{1 - \varepsilon^{m+1}}{1 - \varepsilon} (1 - p_{RTS}) (1 - p_{Data}) + \varepsilon^m (1 - p_{RTS}) p_{Data} \right) \right] + \left. \frac{R_S (1 - p_{RTS}) (1 - \varepsilon^{m+1})}{1 - \varepsilon} + \frac{R_F p_{RTS} (1 - \varepsilon^{m+1})}{1 - \varepsilon} + D_S (1 - \varepsilon^{m+1}) + \frac{D_F p_{Data} (1 - \varepsilon^{m+1})}{1 - p_{Data}} \right\}^{-1} \quad (22)$$

4. 确定节点在一个  $\delta$  时隙中发送 RTS 帧和 Data 帧的概率  $\tau_{RTS}$  和  $\tau_{Data}$ .

由图 4 所示的二维马尔可夫链模型可知,节点在任一级退避阶段,当退避计数器的值递减到 0 时,节点发送 RTS 帧.因此,可以将节点在一个  $\delta$  时隙中发送 RTS 帧的概率  $\tau_{RTS}$  表示为

$$\tau_{RTS} = \sum_{i=0}^m P_{B(i,0)} = P_{B(0,0)} \frac{(1 - \varepsilon^{m+1})}{1 - \varepsilon} \quad (23)$$

同理,无论节点处在哪一级退避阶段,当节点成功发送 RTS 帧后,即可向接收节点发送 Data 帧.因此,可以将节点在一个  $\delta$  时隙中发送 Data 帧的概率  $\tau_{Data}$  表示为

$$\tau_{Data} = \sum_{i=0}^m P_{TRS(i,0)} = P_{B(0,0)} \frac{(1 - \varepsilon^{m+1})}{1 - \varepsilon} (1 - p_{RTS}) \quad (24)$$

5.  $P_{B(0,0)}$ 、 $p_{RTS}$ 、 $p_{Data}$  和  $p_{suspend}$  的联立求解.

本文在第 2.1.1 节的分析中,通过式(2)、式(3)给出了在 RTS 帧冲突范围内的发送节点数目  $a$ 、Data 帧冲突范围内的发送节点数目  $b$  已知的情况下,由  $\tau_{RTS}$  和  $\tau_{Data}$  求解  $p_{Data}$  和  $p_{suspend}$  的计算公式.同时,假定网络中任一发送节点物理载波检测范围内的所有发送节点的数目为  $c$ ,则可以得到节点在退避过程的一个  $\delta$  时隙中,因为检测到其他节点发送的 RTS 帧而暂停退避计数器递减的概率  $p_{suspend}$  的表达式为

$$p_{suspend} = 1 - (1 - \tau_{RTS})^{c-1} \quad (25)$$

最后,将式(2)、式(3)、式(22)~式(25)联立,并考虑  $[p_{RTS} + (1 - p_{RTS})p_{Data}] = \varepsilon$ ,即可得出在  $a, b, c, m$  和  $W_0$  的取值一定的条件下,  $p_{RTS}$ 、 $p_{Data}$  和  $p_{suspend}$  的解.

6. 多跳 ad hoc 网络饱和吞吐量的求解.

在第 2.1.2 节中已经提到,本文在建模与仿真分析中,将所有收/发节点对之间的距离均设置为相同的值,并将所有发送节点均匀分布在整个网络中.在  $a, b, c$  的取值一定的情况下,单跳传输区域的饱和吞吐量  $S_{single}$  的计算公式为



$$S_{single} = \frac{E[P]}{\delta D_S} \sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^{D_S-1} P_{TDS(i,k)} = \frac{E[P]}{\delta} P_{B(0,0)}(1 - \varepsilon^{m+1}) \quad (26)$$

其中,  $E[P]$  为数据包的平均负载,  $\delta$  与  $D_S$  的乘积表示成功发送一个数据包所需的时间, 而  $\sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^{D_S-1} P_{TDS(i,k)}$  表示在一个  $\delta$  时隙中数据包发送成功的概率. 在信道共享系数  $\lambda$  已知的情况下, 由第 2.1.2 节中的分析即可将多跳 ad hoc 网络的饱和吞吐量  $S_{total}$  估算为

$$S_{total} = \lambda S_{single} \quad (27)$$

### 3 数值结果与仿真实验

在第 2.1.2 节中已经提到, 本文在数值求解与仿真实验中, 将所有发送节点均匀静止地分布在整个网络中, 并将所有收/发节点对之间的距离设置为相同的值. 假定节点的传输范围  $r_{tx}=250\text{m}$ , 物理载波检测范围  $r_{cs}=550\text{m}$ , 收/发节点之间的距离为  $200\text{m}$ , 则由公式(1)可知, 接收节点相对于每一个干扰发送节点的冲突范围  $r_{if}$  均为  $356\text{m}$ . 根据第 2.1.1 节中的分析, 即可由  $r_{tx}, r_{cs}$  和  $r_{if}$  的值得到 RTS 帧冲突范围和 Data 帧冲突范围的大小. 又因为所有发送节点均匀分布在整个网络中, 因而根据 RTS 帧冲突范围、Data 帧冲突范围及节点物理载波检测范围的大小即可确定参数  $a, b, c$  的比值.

$R_S, R_F, D_S$  和  $D_F$  的值取决于  $E[P]$  的大小, 假设物理层和 MAC 层头部长度之和为  $H$ , 信道的传播时延为  $\alpha$ , 则  $R_S, R_F, D_S$  和  $D_F$  的取值如下式所示:

$$\begin{cases} R_S = RTS + SIFS + \alpha + CTS + SIFS + \alpha + DIFS \\ R_F = RTS + \alpha + DIFS \\ D_S = H + E[P] + SIFS + \alpha + ACK + \alpha \\ D_F = H + E[P] + \alpha \end{cases} \quad (28)$$

本文在 MATLAB 环境中, 通过数值分析的方法对由式(2)、式(3)、式(22)~式(25)联立组成的方程组求解. 在求解过程中, 假定网络中所有节点发送的数据包长度均为 256 字节, 其余参数的取值见表 1. 图 5 给出了当竞争窗口的最小值  $W_0$  取不同值时,  $p_{RTS}, p_{Data}, p_{suspend}$  及  $S_{single}$  的取值随 RTS 帧冲突范围内发送节点的数目  $a$  变化的曲线.

**Table 1** Value of the parameters in the numerical calculations and simulations

表 1 数值计算与仿真参数值

Parameter	Value	Parameter	Value
Slot	20 $\mu\text{s}$	$R_S$	36slot
SIFS	10 $\mu\text{s}$	$R_F$	16slot
DIFS	50 $\mu\text{s}$	$D_S$	139slot
The length of PHY header	192bit	$D_F$	123slot
The length of MAC header	224bit	Standard signal transmit power	15dBm
The length of RTS (include PHY header)	352bit	Receive SINR threshold	10dB
The length of CTS/ACK (include PHY header)	304bit	Retransmit threshold (m)	5

由图 5 所示的计算结果可以看出, 单跳传输区域的饱和吞吐量  $S_{single}$  的取值与该区域内发送节点的数目直接相关.  $p_{RTS}, p_{Data}$  和  $p_{suspend}$  的值均随着发送节点数目的增加而增大, 而发送冲突概率的增大则必然导致  $S_{single}$  取值的减小. 在单跳传输区域发送节点数目一定的情况下,  $W_0$  的值越大, 则发送节点在发送前选取退避计数器初值的范围也越大, 因而节点发送冲突的概率也越小. 同时,  $W_0$  取值的增大会延长节点在发送前的随机退避时间, 从而限制了单个节点的吞吐量, 导致  $S_{single}$  取值的下降. 结合文献[2]中的分析可知, 上述  $S_{single}$  的取值随发送节点数目及  $W_0$  的变化趋势与单跳 ad hoc 网络中网络饱和吞吐量随发送节点的数目及  $W_0$  的变化趋势是一致的.

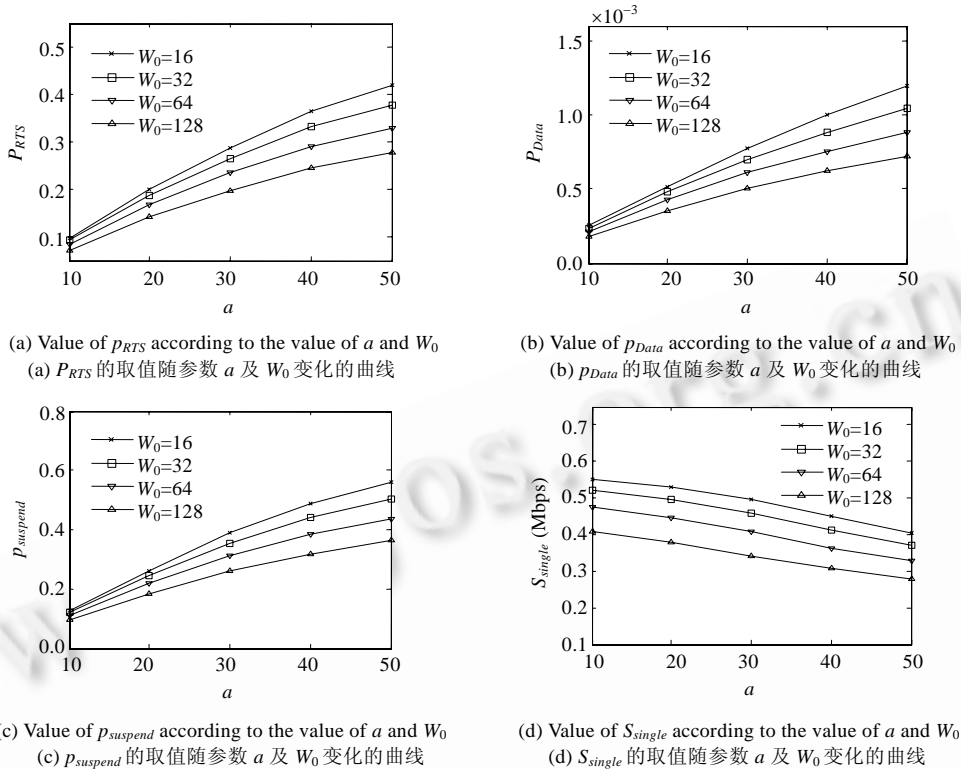


Fig.5 Theoretical value of the performance index in the single hop transmission range

图 5 单跳传输区域中各性能指标的理论值

最后,本文结合 GloMoSim<sup>[12]</sup>网络仿真环境中的仿真实验,对模型的有效性进行了验证.考虑边长为 2500m 的正方形仿真区域,由第 2.1.2 节的分析可知,此时信道的共享系数  $\lambda$  约为 11.61.发送节点呈网格状均匀静止地分布在仿真区域中,与发送节点对应的接收节点随机静止分布在该发送节点的周围,所有收/发节点之间的距离均为 200m.按照 DCF 协议的标准, $W_0$  的取值为 32.网络层数据包长度为 256byte,数据包发送间隔为 200ms,使得信道处于饱和状态.图 6 给出了当正方形仿真区域中分布不同数量的发送节点时,分别采用模型求解和仿真实验得到的网络平均吞吐量的理论值和仿真值的对比.由该图所示的对比结果可以看出,模型求解得到的网络平均吞吐量的理论值与仿真实验得到的仿真值近似相等,从而证明了模型的有效性.

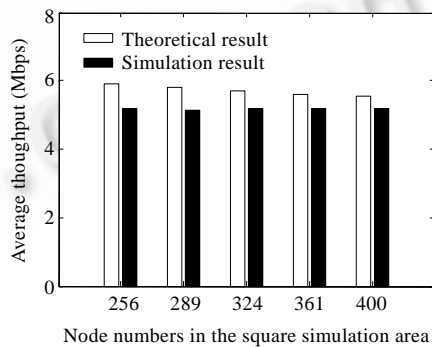


Fig.6 Validation of the effectiveness of the model

图 6 模型有效性的验证

#### 4 结束语

多跳 ad hoc 网络中 DCF 协议的建模与分析一直是 ad hoc 网络研究领域的热点问题,而现有的多跳 ad hoc 网络 DCF 协议的建模工作大多都是在文献[2]提出的二维马尔可夫链模型的基础上开展的.本文根据该模型的特点,将此类模型定义为基于不定长时隙的 DCF 协议马尔可夫链模型,并指出了此类模型的局限性.针对这些局限性,本文在详细分析多跳 ad hoc 网络环境下 DCF 协议建模难点问题的基础上,结合 DCF 协议以定长时隙  $\delta$  作

为节点时间轴单位的特点,将节点在每一个 $\delta$ 时隙内的状态用二维随机过程表示,提出了一种基于定长时隙 $\delta$ 的多跳 ad hoc 网络 DCF 协议马尔可夫链模型.与基于不定长时隙的 DCF 协议马尔可夫链模型相比,本文提出模型的最大优势在于,可以有效区分多跳 ad hoc 网络中 RTS 帧发送冲突和 Data 帧发送冲突这两类不同的发送失败过程,从而准确地描述了多跳 ad hoc 网络环境下 DCF 协议的发送规约.通过模型的求解,即可得到反映多跳 ad hoc 网络饱和吞吐量性能的相关性能指标的理论值.最后,本文结合 GloMoSim 网络仿真环境中的仿真实验证明了该模型的有效性.

## References:

- [1] IEEE Computer Society LAN MAN Standards Committee, ed. Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications. IEEE Standard 802.11-1999, 1999.
- [2] Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2000,18(3):535-547.
- [3] Cheng ST, Wu M. Performance evaluation of ad hoc WLAN by M/G/1 queueing model. In: Proc. of the Int'l Conf. on Information Technology: Coding and Computing. Las Vegas: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2005. 655-681.
- [4] Yu XT, Zhang ZC, Bi GG. A MAC protocol for improving energy efficiency of ad hoc networks. Chinese Journal of Computers, 2006,29(2):256-266 (in Chinese with English abstract).
- [5] Meerja KA, Shami A. Analysis of new distributed-media access-control schemes for IEEE 802.11 wireless local-area networks. IEEE Trans. on Vehicular Technology, 2007,56(4):1797-1812.
- [6] Barowski Y, Biaz S, Agrawal P. Towards the performance analysis of IEEE 802.11 in multi-hop ad-hoc networks. In: Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conf. New Orleans: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2005. 100-106.
- [7] He J, Pung HK. Performance modeling and evaluation of IEEE 802.11 distributed coordination function in multihop wireless networks. Computer Communications, 2006,20(9):1300-1308.
- [8] Xiao YK. Performance research on the MAC protocol and TCP in wireless ad hoc networks [Ph.D. Thesis]. Beijing: Tsinghua University, 2004 (in Chinese with English abstract).
- [9] Kamerman A, Monteban L. WaveLAN<sup>®</sup>- II: A high-performance wireless LAN for the unlicensed band. Technical Journal, 1997,2(3):118-133.
- [10] Xu K, Gerla M, Bae S. How effective is the IEEE 802.11RTS/CTS handshake in ad hoc networks. In: Proc. of the IEEE Global Telecommunications Conf. Taipei: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2002. 72-76.
- [11] Lei L, Xu ZZ. Analyzing and improving the DCF fairness in ad hoc network. Journal of Electronics & Information Technology, 2008,30(2):472-476 (in Chinese with English abstract).
- [12] Bajaj L, Takai M, Ahuja R, Tang K, Bagrodia R, Gerla M. GloMoSim: A scalable network simulation environment. Technical Report, 990027, UCLA Computer Science Department, 1997.

## 附中文参考文献:

- [4] 余旭涛,张在琛,毕光国.一种提高能量效率的 Ad Hoc 网络 MAC 层协议.计算机学报,2006,29(2):256-266.
- [8] 肖永康.无线 Ad Hoc 网络中 MAC 协议和 TCP 的性能研究[博士学位论文].北京:清华大学,2004.
- [11] 雷磊,许宗泽.Ad Hoc 网络中 DCF 公平性分析与改进.电子与信息学报,2008,30(2):472-476.



雷磊(1981—),男,江西南昌人,博士,讲师,主要研究领域为无线网络,认知无线电技术.



蔡维玲(1982—),女,博士,讲师,主要研究领域为模式识别及其在无线传感器网络中的应用.



许宗泽(1940—),男,教授,博士生导师,主要研究领域为数字通信,通信网技术.