

文章编号:1001-9081(2009)10-2638-06

## 支持多速率自适应的 IEEE 802.11 网络性能分析

毛建兵,毛玉明,冷甦鹏,白翔

(电子科技大学 通信抗干扰技术国家级重点实验室,成都 610054)

(explorer99us@sina.com)

**摘要:**针对基于自动速率回退(ARF)算法的多速率 IEEE 802.11 网络,给出了 ARF 算法分析的一种离散时间 Markov 链模型。模型的建立,考虑了节点在发送过程中,通过 Basic 与 RTS/CTS 模式的选择,对是否因为信道传输误码导致的失败进行的区分。利用算法模型,分析了节点在以随机概率选择不同发送模式的方式下,其采用各个传输速率的稳态概率分布,并在此基础上结合协议避让机制的研究,给出了多速率网络系统吞吐量性能的计算方法。通过大量的仿真实验,验证了模型分析方法具有很好的准确性,并讨论了算法以及 MAC 协议参数设置对网络性能的影响。

**关键词:**IEEE 802.11;多速率;自动速率回退算法;马尔可夫链模型;速率自适应

中图分类号:TP393.02 文献标志码:A

## Performance analysis of IEEE 802.11 multirate networks with rate adaptation

MAO Jian-bing, MAO Yu-ming, LENG Su-peng, BAI Xiang

(National Key Laboratory of Communication, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 610054, China)

**Abstract:** The discrete-time Markov chain model for the Automatic RateFallback (ARF) rate adaptation algorithm was proposed to analyze the performance of IEEE 802.11 ARF-based multirate networks. In the analytical model, the ability to differentiate the frame losses caused by link errors from those caused by collisions according to the choice of transmission modes between Basic and RTS/CTS was taken into consideration. By exploiting the model, the probability of transmitting with a specific data rate in stationary state was obtained for the case where a node chose the transmission mode with a random probability. Furthermore, the system throughput analysis was made with reference to the backoff mechanism. Simulation results show that the proposed model analysis could well predict the performance of multirate networks. In addition, the influence of the parameter settings of both ARF and MAC protocol on the network performance was investigated.

**Key words:** IEEE 802.11; multirate; Automatic RateFallback (ARF) algorithm; Markov chain model; rate adaptation

### 0 引言

为了适应不同环境条件下无线信道传输质量的改变, IEEE 802.11 提供了多种数据传输速率的支持。例如, IEEE 802.11b 提供了 1,2,5.5 以及 11Mbps 等 4 种传输速率支持<sup>[1]</sup>。更高速率的传输要求有更好的信道质量保证,为了获得更好的数据传输性能,节点需要根据信道质量的改变在多种传输速率之间进行切换。尽管如此, IEEE 802.11 标准中并没有包含相应的算法指定。目前在大多数基于 IEEE 802.11 的网络产品中,应用比较广泛的算法是自动速率回退(Automatic Rate Fallback, ARF)<sup>[2]</sup> 算法。ARF 算法最初由 Lucent 提出并应用于其 WaveLan-II 无线网络产品中,其主要特点是机制简单并且易于实现。节点通过分别计数统计已完成的连续成功传输和失败传输次数决定是否需要切换到更高或是更低的传输速率上去。

由于 IEEE 802.11 MAC 协议中节点采用 CSMA/CA<sup>[3]</sup> 机制接入信道,因此当网络中多个节点竞争共享信道时,传输可能发生碰撞,并且随着节点数量的增加,碰撞发生的可能性越大<sup>[3]</sup>。ARF 算法设计没有考虑碰撞情况下的传输失败,因此在组网应用中,碰撞发生使得 ARF 做出不必要的降低传输速

率处理,从而导致网络性能急剧下降<sup>[4-5]</sup>。针对 ARF 算法的上述缺点,一些文献提出了采用区分传输失败机制的增强 ARF 算法。文献[4-5]作者指出,采用 RTS/CTS 可以有效地区分两类传输失败,并且 ARF 算法仅在确定发生信道传输错误时才作相应的处理,这样可以有效地提升网络的吞吐量性能。

为了降低 RTS/CTS 引入的协议开销,文献[6]作者提出以概率  $P_{ns}$  随机选择采用 RTS/CTS 模式发送的机制,并且  $P_{ns}$  随着碰撞的概率大小以及由此造成的开销量进行动态的调整。文献[7]作者提出的 CARA 算法同样采用了 RTS/CTS 对碰撞导致的丢失进行区分,算法采用的自适应 RTS/CTS 选择根据节点之前是否成功传输的状态进行。当节点前一次成功传输时,节点选择 Basic 模式进行数据发送,而当节点前一次发送失败后,节点将选择采用 RTS/CTS 模式发送。此外,文献[8-9]作者还提出了基于窗口大小调整选择 RTS/CTS 模式发送以区分隐藏节点传输引起的碰撞丢失的机制。

本文对基于 ARF 算法的 IEEE 802.11 多速率网络进行了性能分析。针对 ARF 算法以传输成功与失败次数的统计进行速率动态切换的机制,我们给出了一种算法的 Markov 链分析模型。该模型考虑了节点发送模式的选择对其区分因为碰撞和信道传输错误导致的丢失的影响,并且可以应用于不

收稿日期:2009-04-22;修回日期:2009-06-18。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60802044);国家 863 计划项目(2005AA121122)。

作者简介:毛建兵(1981-),男,四川乐山人,博士研究生,主要研究方向:无线自组织网络、无线传感器网络;毛玉明(1956-),男,四川德阳人,教授,博士生导师,主要研究方向:网络体系结构与协议、宽带通信网、无线通信网;冷甦鹏(1973-),男,四川攀枝花人,副教授,博士,主要研究方向:下一代无线网络、无线自组织网络;白翔(1977-),男,四川眉山人,博士,主要研究方向:无线接入网、短波无线网络。

同传输速率阶段 ARF 算法拥有不同的参数设置的情形。利用该模型,结合考虑 IEEE 802.11 协议的指数退避信道接入机制,我们对 ARF 算法作用下的多速率自适应 IEEE 802.11 网络的吞吐量性能进行了分析。通过 NS-2 网络仿真实验,验证了模型分析方法可以很好地用于计算获得系统的吞吐量大小。进一步地,我们还分析讨论了 ARF 算法和 IEEE 802.11 协议参数设置对网络性能的影响。

## 1 相关工作

文献[3]作者利用 Markov 链模型对 IEEE 802.11 DCF (Distributed Coordination Function) 协议性能进行了分析。基于 Bianchi 的模型扩展,文献[10~12]对多速率条件下的网络性能进行了分析,但分析仅考虑了网络中节点以固定大小的不同传输速率共享信道的情况,而没有对采用多速率切换算法条件下的网络性能进行讨论。文献[13]中利用三维 Markov 链对具有多速率切换机制条件下的二进制指数退避过程进行建模并分析不同信道质量条件下的网络性能,但是模型分析仅考虑了节点在两种不同传输速率下进行切换的情形,并且由于模型较为复杂难以获得确切的解析表达式。

文献[14~15]作者首先引入了 ARF 速率切换的 2 维 Markov 链模型分析网络的性能,文献[16]作者进一步分析了有速率测探机制下的 ARF 算法性能,其模型采用了三维 Markov 链结构。尽管如此,文献[14~16]的模型分析并没有在 ARF 算法中考虑对碰撞导致的传输丢失进行区分。文献[4,13]的分析表明,没有考虑区分碰撞导致的传输丢失情况下,网络性能将急剧下降,ARF 算法无法有效地选择与当前信道质量状况相适应的传输速率。文献[17]作者通过建立实验床环境对多速率 IEEE 802.11 网络的性能进行了研究,其对比分析结果表明,采用 RTS/CTS 进行传输丢失区分可以非常有效地提升网络的吞吐量性能。文献[18]作者对多速率网络 Basic 和 RTS/CTS 模式下的网络性能分析结果表明,采用 RTS/CTS 可以使得网络获得接近理论最优的吞吐量性能。尽管如此,文献[18]作者的分析没有考虑 ARF 算法在多速率网络中的速率切换作用。相对于 Basic 模式,RTS/CTS 会引入较大的网络开销,但是可以用来对传输失败进行区分,对 ARF 的速率调整是有利的,因此我们有必要进一步研究不同发送模式的选择将给 ARF 作用下的多速率网络性能带来怎样的影响。

## 2 系统模型与分析

### 2.1 ARF 算法 Markov 链模型

考虑一个基于 IEEE 802.11 的多速率网络,分别以  $R_i$  ( $1 \leq i \leq M$ ) 表示其  $M$  种不同的传输速率。与文献[14,16]类似,为了简化模型分析的复杂性,我们假设网络中均为相同类型的节点并且其信道传输的质量特性一致。以  $r(t)$  表示节点在时刻  $t$  采用的传输速率( $r(t) \in \{1, 2, \dots, M\}$ ) 对应表示第  $i$  个速率  $R_i$ , $c(t)$  表示节点在时刻  $t$  已连续成功( $c(t) > 0$ ) 或是失败( $c(t) < 0$ ) 传输数据的计数。采用 ARF 算法,节点在经历 10 次连续成功传输后,传输速率从  $R_i$  提高到  $R_{i+1}$ ;当节点连续 2 次传输失败后,节点需要将速率从  $R_i$  降低到  $R_{i-1}$ 。考虑到更一般的情况,我们假设节点在不同速率阶段有不同的速率切换门限值,分别以  $Th_u(i)$  和  $Th_d(i)$  表示节点在  $R_i$  速率阶段执行速率提升和降低的门限取值。取时刻  $t$  为节点完成一次数据传输后的离散时间,根据节点数据传输结果的不

同以及是否采用 RTS/CTS 进行丢失区分,状态  $\{r(t), c(t)\}$  将有不同的转移方式。图 1 给出了状态  $\{r(t), c(t)\}$  转移的 Markov 链模型,其中  $\{r(t), c(t)\}$  所表示的状态以二元组  $(i, j)$  对应表示,  $u_i = Th_u(i) - 1$  和  $d_i = Th_d(i) - 1$ 。 $P_{i,j}^{suc}$  表示节点在状态  $(i, j)$  下成功发送数据的概率, $P_{i,j}^{fail}$  表示节点在状态  $(i, j)$  下数据传输失败的概率, $P_{i,j}^{col}$  表示节点在状态  $(i, j)$  下确定信道接入遭遇碰撞的概率。 $P_{i,j}^{suc}$ , $P_{i,j}^{fail}$  和  $P_{i,j}^{col}$  的计算表示将在接下来的讨论中给出。当节点速率  $r(t) = 1$  和  $r(t) = M$  时,节点不再有速率降低和提升,因此相应地在模型中以  $c(t) = -1$  和  $c(t) = 1$  简化表示。

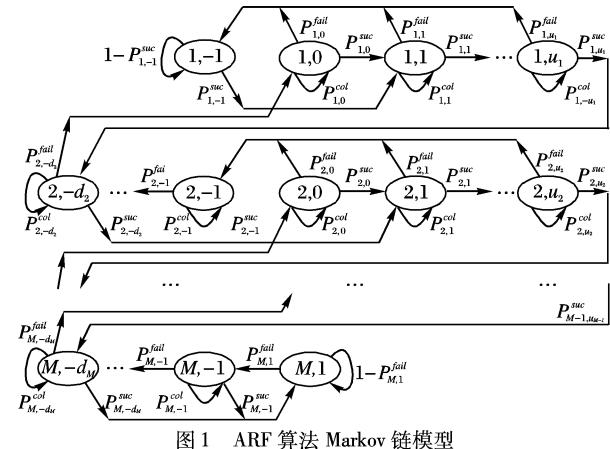


图 1 ARF 算法 Markov 链模型

### 2.2 Markov 链模型状态转移概率

考虑节点只有在采用 RTS/CTS 模式发送时才能对碰撞或是误码导致的数据传输失败进行区分。定义节点数据发送过程的  $A \sim E$  事件,其中  $A \sim C$  发生在节点以 RTS/CTS 模式发送条件下,  $D \sim E$  发生在节点以 Basic 模式发送条件下。

$A$ : RTS/CTS 交互失败,超时时间内没有收到 CTS; $B$ : RTS/CTS 交互成功,Data 传输因产生误码而发送失败; $C$ : RTS/CTS 交互成功,且 Data 成功传输; $D$ : Data 传输失败,超时时间内没有接收到 ACK; $E$ : Data 成功传输,接收到 ACK 确认。以  $p$  表示节点信道接入碰撞的概率,  $p_{i,e}$  表示节点以速率  $R_i$  传输时因误码产生数据错误的概率,上述  $A \sim E$  事件在速率  $R_i$  条件下发生的概率分别为:

$$\begin{cases} P_i(A) = p \\ P_i(B) = (1-p)p_{i,e} \\ P_i(C) = (1-p)(1-p_{i,e}) \\ P_i(D) = 1 - (1-p)(1-p_{i,e}) \\ P_i(E) = (1-p)(1-p_{i,e}) \end{cases} \quad (1)$$

对于  $A \sim E$  不同事件的发生,节点的状态  $\{r(t), c(t)\}$  将经历不同的转移变化。为了表示算法设计在节点处于不同状态  $\{r(t), c(t)\}$  时可能采取的发送模式选择策略,我们在模型中引入  $P_{i,j}^{rts}$  表示节点在状态  $(i, j)$  时采用 RTS/CTS 模式进行下一次数据发送的概率,  $0 \leq P_{i,j}^{rts} \leq 1$ , 其中  $P_{i,j}^{rts} = 0$  和 1 分别表示节点确定地选择采用 Basic 和 RTS/CTS 模式发送,  $P_{i,j}^{rts} \in (0, 1)$  表示以随机概率的形式选择 RTS/CTS 模式。

图 1 所示的 Markov 链模型中,状态之间的非空一步转移概率如下。

1) 节点状态为  $(i, j)$  时,如果发生事件  $A$ ,传输确定遭遇碰撞,  $\{r(t), c(t)\}$  表示的状态将不发生改变;

$$\begin{aligned} P(i, j \mid i, j) &= P_{i,j}^{col} = P_{i,j}^{rts} \times P_i(A); \\ 1 \leq i \leq M, -d_i \leq j \leq u_i, \\ (i, j) &\notin \{(1, -1), (M, 1)\} \end{aligned} \quad (2)$$

2) 节点状态为  $(i, j)$  时, 如果发生事件  $B$  或  $D$ , 节点认为数据在当前速率条件下传输失败, 因此计数器  $c(t)$  需要相应改变以反应这一数据丢失信息:

$$\left\{ \begin{array}{l} P(i, -1 \mid i, j) = P_{i,j}^{fail} = P_{i,j}^{rts} \times P_i(B) + (1 - P_{i,j}^{rts}) \times \\ P_i(D); 1 \leq i \leq M, 0 \leq j \leq u_i \\ P(i, j-1 \mid i, j) = P_{i,j}^{fail} = P_{i,j}^{rts} \times P_i(B) + (1 - P_{i,j}^{rts}) \times \\ P_i(D); 2 \leq i \leq M, -d_i + 1 \leq j \leq -1 \end{array} \right. \quad (3)$$

当  $j = -d_i$  时, 又一次的数据传输失败将使得节点降低发送速率。

$$\begin{aligned} P(i-1, 0 \mid i, -d_i) &= P_{i,-d_i}^{fail} = P_{i,j}^{rts} \times P_i(B) + \\ &(1 - P_{i,j}^{rts}) \times P_i(D); \\ 2 \leq i \leq M \end{aligned} \quad (4)$$

特别地, 节点已经处于最低发送速率  $r(t) = 1$  状态时, 连续的数据传输失败将使得节点仍然停留在状态  $(1, -1)$ , 并且当事件  $A$  发生时, 节点状态也不发生改变, 因此其状态转移概率为:

$$\begin{aligned} P(1, -1 \mid 1, -1) &= P_{1,-1}^{fail} \parallel P_{1,-1}^{col} = P_{1,-1}^{rts} \times P_1(A) + P_{1,-1}^{rts} \times \\ &P_1(B) + (1 - P_{1,-1}^{rts}) \times P_1(D); \\ i = 1, j = -1 \end{aligned} \quad (5)$$

3) 节点状态为  $(i, j)$  时, 如果发生事件  $C$  或  $E$ , 数据传输成功完成, 计数器  $c(t)$  相应改变如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} P(i, 1 \mid i, j) = P_{i,j}^{suc} = P_{i,j}^{rts} \times P_i(C) + (1 - P_{i,j}^{rts}) \times P_i(E); \\ 1 \leq i \leq M, -d_i \leq j \leq 0 \\ P(i, j+1 \mid i, j) = P_{i,j}^{suc} = P_{i,j}^{rts} \times P_i(C) + (1 - P_{i,j}^{rts}) \times \\ P_i(E); 1 \leq i \leq M-1, 1 \leq j \leq u_i - 1 \end{array} \right. \quad (6)$$

当  $j = u_i$  时, 又一次的成功传输将使得节点提高发送的速率。

$$\begin{aligned} P(i+1, -d_{i+1} \mid i, u_i) &= P_{i,u_i}^{suc} = P_{i,j}^{rts} \times P_i(C) + \\ &(1 - P_{i,j}^{rts}) \times P_i(E); \\ 1 \leq i \leq M-1 \end{aligned} \quad (7)$$

特别地, 节点已经处于最高发送速率  $r(t) = M$  状态时, 连续的成功传输将使得节点仍然停留在状态  $(M, 1)$ , 因此其状态转移概率为:

$$\begin{aligned} P(M, 1 \mid M, 1) &= P_{M,1}^{suc} \parallel P_{M,1}^{col} = P_{i,j}^{rts} \times P_i(A) + P_{i,j}^{rts} \times \\ &P_i(C) + (1 - P_{i,j}^{rts}) \times P_i(E); \\ i = M, j = 1 \end{aligned} \quad (8)$$

以  $b_{i,j} = \lim_{t \rightarrow \infty} P(r(t) = i, c(t) = j)$  表示 Markov 链中状态  $(i, j)$  的稳态分布概率, 根据上述 Markov 链状态转移关系, 我们容易得到 Markov 链的系统平衡方程并对稳态分布概率进行求解。利用  $b_{i,j}$ , 节点采用速率  $R_i$  传输的概率  $\Delta_i$  表示如下:

$$\Delta_i = \sum_{j=-d_i}^{u_i} b_{i,j} \quad (9)$$

$X$  由于节点每次速率  $R_i$  改变只发生在相邻速率之间, 因此, 根据文献[14]的研究, 我们可以宏观地将速率切换过程

视为一个生灭过程, 如图 2 所示, 其中  $\lambda_i$  ( $1 \leq i \leq M-1$ ) 和  $\mu_i$  ( $2 \leq i \leq M$ ) 分别表示节点速率从  $R_i$  切换到  $R_{i+1}$  以及从  $R_i$  切换到  $R_{i-1}$  的变化速率。根据生灭过程的性质<sup>[14]</sup>, 有:

$$\Delta_i = \Delta_1 \prod_{j=1}^{i-1} \frac{\lambda_j}{\mu_{j+1}}; 2 \leq i \leq M \quad (10)$$

$$\lambda_{i-1} \Delta_{i-1} = \mu_i \Delta_i; 2 \leq i \leq M \quad (11)$$

由图 1 所示的 Markov 链模型分析可知, 速率切换仅发生在状态  $\{i, -d_i\}$  和  $\{i, u_i\}$  之上, 因此可以有如下关于  $\lambda_i, \mu_i$  与  $b_{i,j}$  的关系式:

$$\lambda_i \Delta_i = b_{i,u_i} P\{i+1, -d_{i+1} \mid i, u_i\} = b_{i,u_i} P_{i,u_i}^{suc} \quad (12)$$

$$\mu_i \Delta_i = b_{i,-d_i} P\{i-1, 0 \mid i, -d_i\} = b_{i,-d_i} P_{i,-d_i}^{fail} \quad (13)$$

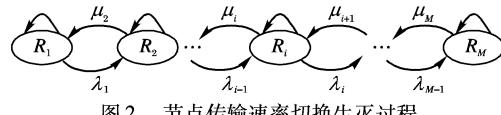


图 2 节点传输速率切换生灭过程

### 2.3 随机概率 RTS/CTS 发送模式分析

本节考虑节点随机采用 RTS/CTS 模式发送的情形, 并且节点在不同状态下选择 RTS/CTS 模式发送的概率一致, 即在任意状态  $(i, j)$  下均有  $P_{i,j}^{rts} = p_x$ 。相应地,  $P_{i,j}^{suc}, P_{i,j}^{fail}, P_{i,j}^{col}$  计算如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{i,j}^{suc} = P_i^{suc} = (1-p)(1-p_{i,e}) \\ P_{i,j}^{fail} = P_i^{fail} = p(1-p_x) + p_{i,e}(1-p) \\ P_{i,j}^{col} = P_i^{col} = p_x p \end{array} \right. \quad (14)$$

根据 2.2 节状态转移概率的分析, 可以得到如下(15)~(20) 系统平衡方程:

$$b_{i,j} = b_{i,1} \left( \frac{P_{i,1}^{suc}}{1 - P_i^{col}} \right)^{j-1} = b_{i,1} \left( \frac{(1-p)(1-p_{i,e})}{1 - p_x p} \right)^{j-1}; \quad 1 \leq i \leq M-1, 1 \leq j \leq u_i \quad (15)$$

$$b_{i,j} = b_{i,-1} \left( \frac{P_{i,-1}^{fail}}{1 - P_i^{col}} \right)^{-j-1} = b_{i,-1} \left[ \frac{p(1-p_x) + p_{i,e}(1-p)}{1 - p_x p} \right]^{-j-1}; \quad 2 \leq i \leq M, -d_i + 1 \leq j \leq -1 \quad (16)$$

$$b_{i,-d_i} = \frac{b_{i-1,u_i-1} P_{i-1}^{suc} + b_{i,-d_i+1} P_i^{fail}}{1 - P_i^{col}} = \frac{b_{i-1,u_i-1} (1-p)(1-p_{i-1,e})}{1 - p_x p} + \frac{b_{i,-d_i+1} [p(1-p_x) + p_{i,e}(1-p)]}{1 - p_x p}; \quad 2 \leq i \leq M \quad (17)$$

$$b_{i,0} = b_{i+1,-d_i+1} \frac{p(1-p_x) + p_{i+1,e}(1-p)}{1 - p_x p}; \quad 1 \leq i \leq M-1 \quad (18)$$

$$b_{i,-1} = \begin{cases} \frac{\sum_{j=0}^{u_i} b_{i,j} P_i^{fail}}{P_i^{suc}} = \frac{[p(1-p_x) + p_{i,e}(1-p)] \sum_{j=0}^{u_i} b_{i,j}}{(1-p)(1-p_{i,e})}, & i = 1 \\ \frac{\sum_{j=0}^{u_i} b_{i,j} P_i^{fail}}{1 - P_i^{col}} = \frac{[p(1-p_x) + p_{i,e}(1-p)] \sum_{j=0}^{u_i} b_{i,j}}{1 - p_x p}, & 1 < i \leq M \end{cases} \quad (19)$$

$$b_{i,1} = \begin{cases} \frac{\sum_{j=-d_i}^0 b_{i,j} P_i^{suc}}{1 - P_i^{col}} = \frac{[(1-p)(1-p_{i,e})] \sum_{j=-d_i}^0 b_{i,j}}{1 - p_x p}, \\ 1 \leq i \leq M-1 \\ \frac{\sum_{j=-d_i}^{-1} b_{i,j} P_i^{suc}}{P_i^{fail}} = \frac{((1-p)(1-p_{i,e})) \sum_{j=-d_i}^{-1} b_{i,j}}{p(1-p_x) + p_{i,e}(1-p)}, \\ i = M \end{cases} \quad (20)$$

为了表示方便,定义如下变量:

$$A_i = \frac{p(1-p_x) + p_{i,e}(1-p)}{1 - p_x p}, \quad B_i = \frac{(1-p)(1-p_{i,e})}{1 - p_x p} \quad (21)$$

由式(15)和(20), $\Delta_i$  可表示为:

$$\Delta_i = \sum_{j=-d_i}^{u_i} b_{i,j} = \sum_{j=-d_i}^0 b_{i,j} + \sum_{j=1}^{u_i} b_{i,j} = \frac{b_{i,1}}{B_i} + b_{i,1} \sum_{j=1}^{u_i} B_i^{j-1} = \frac{(1 + \sum_{j=1}^{u_i} B_i^j) b_{i,u_i}}{B_i^{u_i}} = \frac{1 - B_i^{u_i+1}}{(1 - B_i) B_i^{u_i}} b_{i,u_i} \quad (22)$$

于是,结合式(12), $\lambda_i$  可以表示如下:

$$\lambda_i = \frac{b_{i,u_i} P_i^{suc}}{\Delta_i} = \frac{(1 - B_i) B_i^{u_i}}{1 - B_i^{u_i+1}} (1 - p)(1 - p_{i,e}) \quad (23)$$

利用式(16)和(19), $\Delta_i$  还可以进行如下表示:

$$\Delta_i = \sum_{j=-d_i}^{u_i} b_{i,j} = b_{i,-d_i} + \sum_{j=-d_i+1}^{-1} b_{i,j} + \sum_{j=0}^{u_i} b_{i,j} = b_{i,-d_i} + b_{i,-1} \sum_{j=-d_i+1}^{-1} A_i^{j-1} + \frac{b_{i,-1}}{A_i} = b_{i,-d_i} + \frac{(1 - A_i^{d_i}) b_{i,-d_i+1}}{(1 - A_i) A_i^{d_i-1}} \quad (24)$$

由式(17)变换有:

$$\begin{aligned} b_{i,-d_i} &= \frac{b_{i-1,u_{i-1}} P_{i-1}^{suc} + b_{i,-d_i+1} P_i^{fail}}{1 - P_i^{col}} = \frac{\lambda_{i-1} \Delta_{i-1}}{1 - p_x p} + b_{i,-d_i+1} A_i = \\ &\frac{\mu_i \Delta_i}{1 - P_i^{col}} + b_{i,-d_i+1} A_i = \frac{b_{i,-d_i} P_i^{fail}}{1 - P_i^{col}} + b_{i,-d_i+1} A_i = \\ &(b_{i,-d_i} + b_{i,-d_i+1}) A_i; \quad 2 \leq i \leq M \end{aligned} \quad (25)$$

联合式(24)和(25),消去  $b_{i,-d_i+1}$  可得:

$$\Delta_i = b_{i,-d_i} + \frac{1 - A_i^{d_i}}{(1 - A_i) A_i^{d_i-1}} \times \frac{1 - A_i}{A_i} b_{i,-d_i} = \frac{1}{A_i^{d_i}} b_{i,-d_i} \quad (26)$$

于是,结合式(13), $\mu_i$  可以表示如下:

$$\mu_i = \frac{b_{i,-d_i} P_i^{fail}}{\Delta_i} = A_i^{d_i} [p(1-p_x) + p_{i,e}(1-p)] \quad (27)$$

将  $\lambda_i$  和  $\mu_i$  代入式(10),并结合正规化条件  $\sum_{i=1}^M \Delta_i = 1$ ,可以得到  $\Delta_i$  关于变量  $p, p_{i,e}, p_x, u_i$  及  $d_i$  的函数表达关系。

### 3 系统性能分析

#### 3.1 系统吞吐量表示

利用前面的模型分析,本节我们导出系统的吞吐量性能表示。与文献[3]类似,以节点退避计数器动作的相邻时刻之间的一般时隙时间为信道事件分析单元。本文我们重点关注节点的自适应速率调整机制,不考虑是否区分传输失败对节点退避过程行为带来的影响,即无论采用 RTS/CTS 还是 Basic 模式,均假设节点仅在发生碰撞时才执行指数退避,而对于信道误码导致的传输失败则视为信道接入成功并重置竞争窗口为  $W_{\min}$ 。以  $\tau$  表示节点在一个时隙中发起信道接入的

概率。在多速率网络条件下,概率  $\tau$  不受节点传输速率的影响<sup>[14]</sup>。 $\tau$  可以计算表示为<sup>[12]</sup>:

$$\tau = \frac{2(1-2p)(1-p)}{(1-2p)(W_{\min} + 1) + pW_{\min}(1 - (2p)^{\bar{m}})} \quad (28)$$

其中  $\bar{m}$  表示最大退避阶数。

在一个时隙中,信道空闲的概率为  $P_{idle} = (1-\tau)^N$ 。以  $P_s$  表示一个时隙中节点成功完成数据传输的概率, $P_{s,i}$  表示成功完成数据传输并且传输速率为  $R_i$  的概率,这样有  $P_s = \sum_{i=1}^M P_{s,i}$ , 其中  $P_{s,i}$  可表示为:

$$P_{s,i} = \Delta_i N \tau (1 - \tau)^{N-1} (1 - p_{i,e}) \quad (29)$$

以  $P_{s-e}$  表示一个时隙中节点成功接入信道但是传输发生数据错误的概率, $P_{s-e,i}$  表示节点成功接入信道并且传输速率为  $R_i$  但是传输发生错误的概率,类似地,有  $P_{s-e} = \sum_{i=1}^M P_{s-e,i}$ ,  $P_{s-e,i}$  可以表示如下:

$$P_{s-e,i} = \Delta_i N \tau (1 - \tau)^{N-1} p_{i,e} \quad (30)$$

利用  $P_s$  和  $P_{s-e}$ ,碰撞发生的概率  $P_c$  可以表示为  $P_c = 1 - P_{idle} - P_s - P_{s-e}$ 。

根据文献[3]的思想,可以利用式(31)获得系统吞吐量  $S$ :

$$S = \frac{\sum_{i=1}^M P_{s,i} T_{p,i} R_i}{P_{idle} T_{idle} + \sum_{i=1}^M P_{s,i} T_{s,i} + \sum_{i=1}^M P_{s-e,i} T_{e,i} + T_c} \quad (31)$$

其中: $T_{p,i}$  表示节点采用速率  $R_i$  传输时,有效载荷部分传输占用信道的时间,即  $T_{p,i} = L/R_i$ ,  $L$  为数据大小; $T_{idle}$  为一个空闲信道时隙的时间; $T_{s,i}$  和  $T_{e,i}$  分别表示节点采用速率  $R_i$  传输时成功完成传输占用信道的时间和传输发生数据错误而失败占用信道的时间; $T_c$  表示传输碰撞发生时的信道占用时间。

#### 3.2 时隙时间计算

$T_{s,i}, T_{e,i}, T_c$  的计算与节点传输采用的模式相关,因此分别给出 RTS/CTS、Basic 以及混合传输模式下  $T_{s,i}, T_{e,i}, T_c$  的计算,并且相应地分别以“rts”、“baisc”、“mix”进行区分标识。以  $T_{h,i}$  表示节点以速率  $R_i$  传输数据时相应的 MAC 和 PHY 头部开销的传输时间, $T_{rts}, T_{cts}, T_{ack}$  分别表示 RTS、CTS 以及 ACK 帧传输的信道占用时间。当网络中所有节点均采用 RTS/CTS 模式时, $T_{s,i}, T_{e,i}, T_c$  可以表示如下:

$$\begin{cases} T_{s,i}^{nts} = T_{rts} + T_{cts} + 3 \times SIFS + T_{h,i} + T_{p,i} + T_{ack} + DIFS \\ T_{e,i}^{nts} = T_{rts} + T_{cts} + 3 \times SIFS + T_{h,i} + T_{p,i} + EIFS \\ T_c^{nts} = P_c (T_{rts} + EIFS) \end{cases} \quad (32)$$

当网络中所有节点均采用 Basic 模式时, $T_{s,i}, T_{e,i}$  可以表示如下:

$$\begin{cases} T_{s,i}^{basic} = T_{h,i} + T_{p,i} + SIFS + T_{ack} + DIFS \\ T_{e,i}^{basic} = T_{h,i} + T_{p,i} + EIFS \end{cases} \quad (33)$$

当节点之间发生碰撞时, $T_c$  的大小将取决于传输速率最小节点的信道占用时间。以  $n_i$  表示网络中采用速率  $R_i$  传输的节点数目。由于节点传输速率的自适应调节作用, $n_i$  的大小将随着时间的推移不断变化, $(n_1, n_2, \dots, n_M)$  的不同组合方式数量将达到  $\frac{(N+M-1)!}{N!(M-1)!}$ ,这使得  $T_c$  的计算在  $N$  和  $M$  较大时变得异常复杂。为了降低计算的复杂度,我们考虑采用“平均”的方法进行处理。在平稳状态下, $n_i$  有平均大小为  $\bar{n}_i = \Delta_i N$ 。首先考虑碰撞发生在相同传输速率的节点之间的情形,

以  $P'_{c,i}$  表示相同传输速率  $R_i$  的节点之间发生碰撞的概率,  $P'_{c,i}$  的计算由式(34)给出:

$$P'_{c,i} = \{1 - [(1 - \tau_i)^{\bar{n}_i} + \bar{n}_i \tau_i (1 - \tau_i)^{\bar{n}_i-1}]\} \times \prod_{j=1, j \neq i}^M (1 - \tau_j)^{\bar{n}_j} \quad (34)$$

当碰撞发生在传输速率不同的节点之间时,为了方便计算碰撞的平均信道占用时间,我们将碰撞事件按照遭遇碰撞的所有节点中传输速率最小值的不同进行分类。以  $P''_{c,i}$  表示碰撞中节点最小传输速率为  $R_i$  的碰撞发生概率,  $P''_{c,i}$  的计算由下式给出:

$$P''_{c,i} = [1 - (1 - \tau_i)^{\bar{n}_i}] \times \left[1 - \prod_{j=i+1}^M (1 - \tau_j)^{\bar{n}_j}\right] \times \prod_{j=1}^{i-1} (1 - \tau_j)^{\bar{n}_j} \quad (35)$$

这样,碰撞中传输速率最低为  $R_i$  的碰撞事件发生的概率  $P_{c,i}$  为:

$$P_{c,i} = P'_{c,i} + P''_{c,i} \quad (36)$$

利用  $P_{c,i}$ ,碰撞发生的平均信道占用时间  $T_c$  可以通过下式计算获得:

$$T_c^{basic} = \sum_{i=1}^M P_{c,i} T_{c,i}^{basic} \quad (37)$$

其中  $T_{c,i}$  表示碰撞中传输速率最低节点的信道占用时间。

$$T_{c,i}^{basic} = T_{h,i} + T_{p,i} + EIFS \quad (38)$$

当网络中节点以概率  $p_x$  选择 RTS/CTS 模式发送时,  $T_{s,i}$ ,  $T_{e,i}$  可以表示如下:

$$\begin{cases} T_{s,i}^{mix} = p_x T_{s,i}^{rts} + (1 - p_x) T_{s,i}^{basic} \\ T_{e,i}^{mix} = p_x T_{e,i}^{rts} + (1 - p_x) T_{e,i}^{basic} \end{cases} \quad (39)$$

$T_c$  的计算需要考虑碰撞中节点具体所采用的发送模式。当所有发生碰撞的节点均采用 RTS/CTS 模式时,碰撞的持续时间为  $T_c^{mix}$ ;当碰撞中有节点采用 Basic 模式时,我们假设有节点以最大速率  $R_M$  传输一个数据帧的时间大于一个 RTS 帧的传输时间,因此碰撞的持续时间将取决于时间最长的 Basic 模式传输。以  $T_c^{mix}(m)$  表示碰撞发生在  $m$  个节点之间的平均碰撞持续时间,  $T_c^{mix}(m)$  可以计算如下:

$$T_c^{mix}(m) = p_x^m T_c^{rts} + \sum_{b=1}^m \sum_{i=1}^M C_m^b p_x^{m-b} (1 - p_x)^b P(b, i) T_{c,i}^{basic} \quad (40)$$

其中  $P(b, i)$  表示以 Basic 模式发送的  $b$  个节点中,存在最低速率为  $R_i$  的节点的概率。 $P(b, i)$  的表示如下:

$$P(b, i) = \sum_{k=1}^b C_b^k \Delta_i^k \left( \sum_{j=i+1}^M \Delta_j \right)^{b-k} \quad (41)$$

以  $P_c(m)$  表示碰撞发生在  $m$  个节点之间的概率,  $P_c(m)$  可以计算如下:

$$P_c(m) = C_N^m \tau^m (1 - \tau)^{N-m} \quad (42)$$

这样,联合  $T_c^{mix}(m)$  和  $P_c(m)$ ,  $T_c$  可以最终表示如下:

$$T_c^{mix} = \sum_{m=2}^N P_c(m) T_c^{mix}(m) \quad (43)$$

当节点数量  $N$  较大时,式(43)的计算复杂度非常大。为了减小计算量,通常只需要考虑碰撞发生在少数的不超过  $m'$  个节点同时传输的情况下,而更多节点同时传输发生碰撞的概率非常小,可以忽略<sup>[3]</sup>。本文在计算过程中取  $m' = 3$  可以达到较好的准确性。

## 4 数值分析与仿真

本节利用 NS-2 对前面的模型分析进行仿真验证,并考查

RTS/CTS 模式的选择对多速率网络性能的影响。网络场景采用一个无中心结构的单跳 IEEE 802.11b 网络,MAC 协议参数设置遵照标准规范指定。网络中所有节点任意时间均处于饱和状态,其分组大小设置为 1200 B。节点可选择的传输速率  $M = 4$ ,包括 1, 2, 5.5 以及 11 Mbps,默认取参数  $Th_u(i) = 10$ ,  $Th_d(i) = 2$ 。

不失一般性,设置  $p_{i,e} = 0.1$ ,图 3(a)给出了网络中只有一个节点( $N = 1$ )发送时,ARF 算法作用下节点选择各个传输速率的稳态概率分布。可以看出,模型分析结果和仿真结果取得了很好的一致性。由于没有节点之间的碰撞,节点以较大的概率选择了 11 Mbps 的传输速率。进一步地,我们在多节点情况下对算法的模型分析进行了验证。设置节点数量  $N = 10$ ,  $p_{i,e}$  不变,分别采用  $p_x = 0$ ,  $p_x = 0.5$  以及  $p_x = 1$ ,得到各传输速率选择的分布结果如图 3(b~d)所示。从图上可以看出,Basic 模式下由于无法区分碰撞导致的丢失,因此节点更多地选择了较低的传输速率,而采用 RTS/CTS 模式时,节点的传输速率选择不受节点数量增加的影响。尽管设置  $p_x = 0.5$  较  $p_x = 0$  而言对节点速率的选择有所改善,但仍然不足以获得较为理想的速率选择结果。图 3 的结果表明,利用本文给出的模型分析方法,可以较好地预测 ARF 算法下节点对各传输速率的选择利用情况。

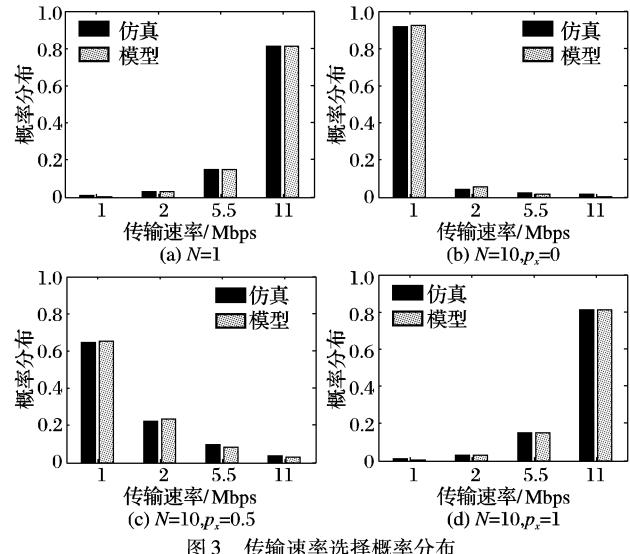


图 3 传输速率选择概率分布

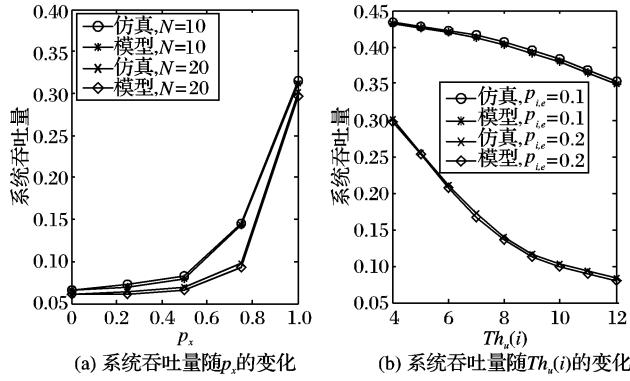


图 4 系统吞吐量随  $p_x$  和  $Th_u(i)$  的变化

图 4(a)描绘了节点数量  $N$  分别取 10 和 20 时系统吞吐量随  $p_x$  的变化曲线,其中  $p_{i,e}$  设置为 0.1, 系统吞吐量以 11 Mbps 信道速率进行归一化表示。图 4(b)描绘了网络中只有一个节点发送时 ( $p_x = 0$ ), 分别取  $p_{i,e} = 0.1$  和  $p_{i,e} = 0.2$  的系统吞吐量随  $Th_u(i)$  参数的变化曲线。仿真验证的结果表明,模

型分析方法可以很好地获得 ARF 算法在不同网络情形下的吞吐量性能。从图 4 的结果来看,采用 Basic 模式获得的系统吞吐量最小。随着选择 RTS/CTS 模式发送的随机概率  $p_x$  的增加,系统吞吐量不断提高,而当完全采用 RTS/CTS 模式时系统吞吐量达到最大,尽管其中 RTS/CTS 控制帧的传输引入了一定的信道占用开销。这是因为碰撞丢失导致 ARF 算法引导节点选择较低的传输速率,结果造成了信道利用率进一步降低。图 4(b)的结果显示了 ARF 算法的  $Th_u(i)$  参数设置对系统吞吐量性能的影响。采用较小的  $Th_u(i)$  参数设置,有利于节点较快地选择更高的传输速率,即以更少的时间停留在低速传输状态阶段,因此系统的吞吐量性能得到了提高。

图 5 给出了在不同节点数量  $N$  网络条件下获得的系统吞吐量结果,其中  $p_{i,e}$  设置为 0.05,参数  $Th_u(i)=2$ 。从图 5 可以看到,Basic 模式只有在节点数量较少的情况下可以获得较好的吞吐量性能。随着节点数量的增加,Basic 模式下系统吞吐量发生了急剧的下降,而 RTS/CTS 模式下只发生了较小的变化。对比图 5(a)和(b)可以看到,减小  $Th_u(i)$  参数设置同样一定程度上改善了系统的吞吐量性能。

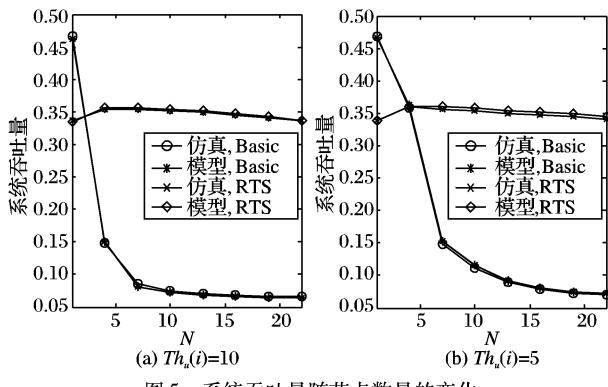


图 5 系统吞吐量随节点数量的变化

IEEE 802.11 协议的竞争窗口大小是影响网络性能的一个重要因素<sup>[3]</sup>,因此接下来有必要进一步考查不同竞争窗口设置下的多速率网络性能变化情况。设置  $p_{i,e}=0.05$ ,节点数量  $N=15$ ,分别采用 Basic 模式、RTS/CTS 模式和  $P_x=0.5$  的随机方式,并在 16 到 512 的范围内改变竞争窗口大小的设置。从分析结果可以看到,增加竞争窗口大小对 Basic 模式下的系统性能改善非常明显,而 RTS/CTS 模式下的系统性能变化比较平缓。通过增加竞争窗口大小,节点之间碰撞发生概率大大减小,因此 Basic 模式下多速率的选择受碰撞的影响减小,节点能够更多地选择较高速率的传输,系统性能得到改善。此外,还可以看出,在增加竞争窗口的过程中,三种方式下 Basic 模式获得了最大的系统吞吐量,并且其中存在一个较小的区间范围有  $P_x=0.5$  方式下的系统吞吐量大于 Basic 和 RTS/CTS 模式下的结果。

## 5 结语

IEEE 802.11 提供了多速率数据传输的支持以满足不同环境下提高信道传输性能的需要。本文给出了一种 ARF 算法的 Markov 链模型,并基于该模型对 ARF 算法作用下的多速率 IEEE 802.11 网络吞吐量性能进行了分析。通过数值计算与 NS-2 仿真实验结果的比较,验证了本文模型分析方法的正确性。本文的研究有助于重新认识节点在多速率网络条件下选择 Basic 或是 RTS/CTS 发送模式对网络性能的影响,并为今后进一步研究如何优化选择两种发送模式以改善网络的

吞吐量性能提供了性能评估方法。

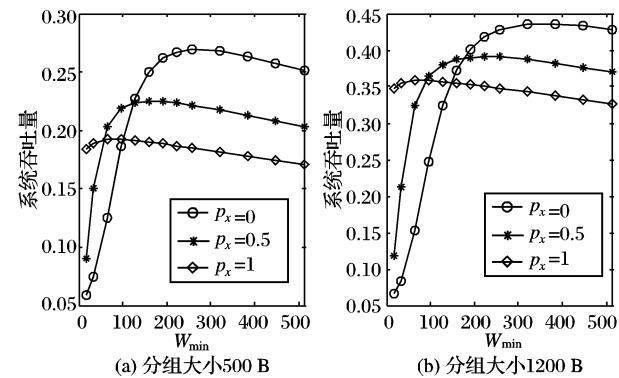


图 6 系统吞吐量随竞争窗口大小的变化

## 参考文献:

- [1] IEEE 802.11. Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications [S]. IEEE Std. 802.11, 2007.
- [2] KAMERMAN A, MONTEBAN L. WaveLAN-II: A high-performance wireless LAN for the unlicensed band [J]. Bell Labs Technical Journal, 1997, 2(3): 118–133.
- [3] 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.
- [4] PANG Q, LEUNG V C M, LIEW S C. An enhanced autorate algorithm for wireless local area networks employing loss differentiation [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57(1): 521–531.
- [5] PANG Q, LEUNG V C M, LIEW S C. A rate adaptation algorithm for IEEE 802.11 WLANs based on MAC-layer loss differentiation [C]//BroadNets'05: Proceedings of IEEE Second International Conference Broadband Networks. Boston: IEEE Press, 2005: 709–717.
- [6] CHEN X, QIAO D, YU J, et al. Probabilistic-based rate adaptation for IEEE 802.11 WLANs [C]//IEEE GLOBECOM 2007. Washington, DC: IEEE Press, 2007: 4904–4908.
- [7] KIM J, KIM S, CHOI S, et al. CARA: Collision-aware rate adaptation for IEEE 802.11 WLANs [C]//IEEE INFOCOM 2006. Barcelona: IEEE Press, 2006: 1–11.
- [8] WONG S H, YANG H, LU S, et al. Robust rate adaptation for 802.11 wireless networks [C]//Proceedings of the 12th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM Press, 2006: 146–157.
- [9] KHAN S, MAHMUD S A, LOO K K, et al. A cross layer rate adaptation solution for IEEE 802.11 networks [J]. Computer Communications, 2008, 31(8): 1638–1652.
- [10] YANG D, LEE T, JANG K, et al. Performance enhancement of multirate IEEE 802.11 WLANs with geographically scattered stations [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2006, 7(5): 906–919.
- [11] JOSHI T, MUKHERJEE A, YOO Y, et al. Airtime fairness for IEEE 802.11 multirate networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2008, 7(4): 513–527.
- [12] ERGEN M, VARAIYA P. Formulation of distributed coordination function of IEEE 802.11 for asynchronous networks: Mixed data rate and packet size [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57(1): 436–447.
- [13] XIONG L, MAO G. Performance analysis of IEEE 802.11 DCF with data rate switching [J]. IEEE Communications Letters, 2007, 11(9): 759–761.
- [14] CHOI J, PARK K, KIM C. Cross-layer analysis of rate adaptation, DCF and TCP in multi-rate WLANs [C]//IEEE INFOCOM 2007. Anchorage: IEEE, 2007: 1055–1063. (下转第 2646 页)

```

//解析 TCP 包, 并判断是否含有敏感字符, 如有就代表网络传
//输非安全
int DecodeTcpPack ( char * TcpBuf, int iBufSize ) { ... char *
TepData = TcpBuf + TcpHeaderLen; ...
if ( ( ParamDecode) && ( iBufSize >40) )
{
    if ( ( ! strSensitive) || ( strstr( TepData, strSensitive) ) )
        { stop_Anlys = true; m_ds = 1; }
}
}

算法核心假设检验部分的关键实现代码如下:
//采集部分...
np [ i ] = ( t1 * ( ( k1 * m_dtp[ i ] - k2 * m_ct[ i ] ) * m_di[ i ]/( k1 +
k2 ) ) + t2 * m_ds[ i ])/( t1 + t2 );
for( i = 0; i < = num; i ++ )
{
    np [ i ] = ( t1 * ( ( k1 * m_dtp[ i ] - k2 * m_ct[ i ] ) * m_di[ i ]/( k1 +
k2 ) ) + t2 * m_ds[ i ])/( t1 + t2 );
    S_np + = np[ i ];
}
S_EXP = S_np/n;
for( i = 0; i < = num; i ++ )
{ S_vnp + = ( np[ i ] - S_EXP ) * ( np[ i ] - S_EXP ); }
S_VAR = S_vnp/n;
...
//监控部分, 如采集部分一样获取样本均值
...C = Value_Z * sqrt( S_VAL )/sqrt( Sample_num );
if ( fabs( v_exp - S_EXP ) > = C )
{ m_security = false; }
else{ m_security = true; }
...

```

## 2.2 算法性能分析

测试中, 主要就该算法的网络负荷以及监控时间段内网络异常判断的正确率来进行分析。在测试环境中, 给定显著性水平  $\alpha$  为 0.05, 并采用一般的情况, 即各个权值均为平均分配, 均为 5。而测试的网络环境是主机均处于同一局域网内, 该局域网是主机、交换机和路由器等构成的三层网络体系架构。网络异常判断均只对一台主机进行监控, 异常判断正确率测试中, 通过一个小程序随机产生异常情况, 每一个样本值均做 30 次的测试, 计算其正确率。

在网络负荷的实验测试中, 首先假定传统模式是固定一小时 60 次即时检验, 其网络负荷是一个固定值, 所以如图 1 所示, 假设检验模式在每小时样本少于 60 个的时候网络负荷远小于传统模式。

在网络异常判断的实验测试中, 对比三个测试值, 分别是采用非固定次数即时检验的传统模式、非固定样本值的假设检验模式和采用固定次数即时检验的传统模式。值得提出的是传统模式并没有直接进行一段时间内的网络异常判断, 所以假定其判断方法为判断样本中异常所占的比例, 若大于正常的比例, 则判定网络异常, 若小于则安全。从图 2 的实验结

果可以明显看出: 假设检验模式的正确率远大于非固定传统模式, 而只有在样本个数很少的时候假设检验模式才略小于固定传统模式, 但此时固定的传统模式占用了相对来说非常大的网络负荷为代价。而且还可以发现在样本取 35 附近的时候正确率几乎达到最高值, 再增加样本容量已经不能提升太多正确率。

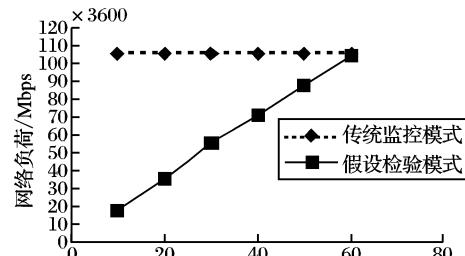


图 1 两种模式网络负荷比较

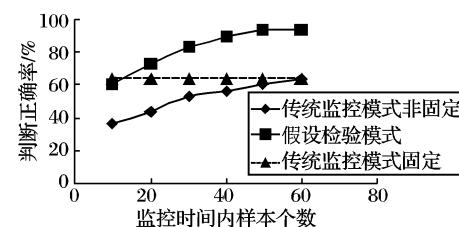


图 2 两种模式判断正确率比较

综上测试可以得到结论: 基于假设检验模式的网络异常判断比传统模式具有更低的网络负荷, 并且能对一段网络时间内的网络异常情况进行更为有效正确的判断。

## 3 结语

本文针对传统网络监控模式的缺点设计了基于假设检验的网络异常算法。该算法引入一个网络性能值  $NP$ , 通过采集正常网络情况和监控时间段内的该  $NP$  值样本, 运用假设检验的算法来进行网络异常的判断。使用 C++ 语言实现了该算法, 并与传统的网络监控模式进行了测试对比。可以得出基于假设检验的网络异常检验能够有效减少网络负荷, 提升监控时间段内网络异常判断的能力。

### 参考文献:

- [1] 王新昌, 杨艳, 刘育楠, 等. 一种基于局域网络监控日志的安全审计系统 [J]. 计算机应用, 2007, 27(2): 292–294.
- [2] 张小川, 陈庄, 向勇. 基于网络质量监控系统的实现 [J]. 计算机应用, 2006, 26(S1): 201–203.
- [3] 王旭仁, 毕学尧, 许榕, 等. 实时网络安全监控系统的设计和实现 [J]. 计算机工程, 2005, 31(4): 209–211.
- [4] 温研, 王怀民, 胡华平, 等. 分布式网络行为监控系统的研究与实现 [J]. 计算机工程与科学, 2005, 27(10): 13–15.
- [5] 夏新涛, 王中宇. 非统计假设检验原理及其应用 [J]. 计量学报, 2006, 27(2): 190–195.

(上接第 2643 页)

- [15] CHOI J, PARK K, KIM C. Analysis of cross-layer interaction in multirate 802.11 WLANs [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2009, 8(5): 682–693.
- [16] YUN J. Throughput analysis of IEEE 802.11 WLANs with automatic rate fallback in a lossy channel [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(2): 689–693.
- [17] RAMACHANDRAN K, KREMO H, GRUTESER M, et al. Scalability analysis of rate adaptation techniques in congested IEEE 802.11 networks: An orbit testbed comparative study [C]//IEEE WOWMOM 2007. Espoo, Finland, Piscataway: IEEE, 2007: 1–12.
- [18] CHEN D R, ZHANG Y J. On throughput limit of multi-rate IEEE 802.11 WLANs: Basic access vs. RTS/CTS access [C]// IEEE WCNC 2008. New York: IEEE, 2008: 1414–1419.