

一种基于数据重传率的无线自组织网络 TCP 公平性策略

叶斌 胡谷雨 潘志松

(解放军理工大学指挥自动化学院 南京 210007)

摘要: IEEE 802.11 MAC 协议被广泛应用于多跳无线网络的研究与示范网中, 802.11 协议采用 RTS/CTS 策略减少了“隐终端”问题对无线 TCP 性能的影响。但在多条并行链路间, “隐终端”问题的存在使得中间链路节点不能有效的接入到信道, 导致 TCP 性能和公平性严重下降。该文提出了一种新的基于传输层数据重传率方法, 对于受到严重干扰的中间链路不断获取它的数据重传率, 在重传率增加时动态减少 802.11 退避计时器竞争窗口大小, 增加其接入信道能力, 从而提高其 TCP 性能和公平性。仿真结果证明, 使用基于传输层数据重传率方法, 不仅能基本上保证并行链路 TCP 的稳定性, 还可以极大地提高中间链路 TCP 公平性。

关键词: 公平性; 无线 TCP; 重传率; 吞吐量

中图分类号: TP393.17

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)10-2466-05

A Fair Algorithm for Wireless Ad hoc Networks Based on Data Retransfer Ratio

Ye Bin Hu Gu-yu Pan Zhi-song

(Department of Computer Science ICA, PLAUST, Nanjing 210007, China)

Abstract: The 802.11MAC protocol has been used widely in static multihop wireless network. It reduces the effect of hidden terminal for TCP performance, but it does not remove the effect of hidden terminal fully. But, the fairness of middle links will be affected due to the hidden terminal and make the throughput badly descend. This paper proposes a new way based on data retransfer ratio. When the data retransfer ratio increase, dynamic reduce the size of contention window of backoff timer, enhance the probability of use channel and improvement the TCP fairness. The simulational results show that the proposed algorithm can ultimately avoid the instability of TCP flow and increase the fairness of middle links.

Key words: Fairness; Wireless TCP; Retransfer ratio; Throughput

1 引言

无线自组织网络(wireless Ad hoc networks)是一种新型的无线网络。与传统的带固定设备(如基站)的无线网络相比, 其显著特点是网络中没有固定的通信设施, 网络中所有通信节点都是移动的, 每个移动节点既是终端又是路由器, 能够提高包的存储转发功能。因此, 无线自组织网络具有很高的可靠性和灵活性, 可广泛应用于敌对和不易建设固定通信设施的环境中, 如野战通信、紧急搜救、临时会议等。

IEEE 802.11分布协调功能(Distributed Coordination Function, DCF)是一种基于带冲突避免的载波侦听多重访问(CSMA/CA)的随机访问机制。对碰撞包的重传采用二进制指数回退策略^[1]。它是为无线局域网(Wireless LAN, WLAN)制定的MAC规范。

基于IEEE 802.11DCF的无线自组织网络中的TCP流存在严重的不公平性, 这一点已得到许多学者的注意。文献[2]

明确地考虑了基于IEEE 802.11框架结构的无线自组织网络中TCP不公平性问题。文献[3]分析了单跳无线节点间TCP公平性问题。文献[4]通过改进802.11回退算法来改进在不同TCP分组长度下的公平性, 其基本思想是每个节点根据自己实际得到的带宽与应允的带宽之间的比来设置竞争窗口。文献[5]给出了公平性模型与冲突解析之间的转换机制, 并由此推导出了能够取得成比例的公平性的退避算法。文献[6]对单条直线链路TCP稳定性进行了分析。但是, 之前的研究考虑的拓扑结构都比较简单, 基本上是一条链状拓扑上不同节点间的TCP公平性, 没有考虑多条并行链路间TCP流的公平性。

本文结合IEEE802.11DCF和TCP本身, 对无线自组织网络中并行链路间TCP流的不公平性进行仿真。采用跨层思想, 将传输层的数据重传率作为TCP流不公平发生的一个重要条件, 通过重传率的变化动态改变MAC层竞争窗口的大小, 从而提高并行链路间TCP流的公平性。通过仿真分析, 证明了改进算法可以有效地提高链路间TCP流的公平性。

2 无线自组织网络中 TCP 流公平性的分析

为了对无线自组织网络里TCP流公平性问题进行仿真分析,我们采用了LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory)开发的仿真平台NS-2^[6]。仿真拓扑如图1所示,相邻节点间的距离为250m,干扰范围是550m,相邻节点在彼此的发送和接收范围之内。仿真的物理层和数据链路层采用IEEE802.11DCF,路由协议使用DSR,TCP版本为Newreno。模拟时间为100s,无线信道带宽为2Mbps。

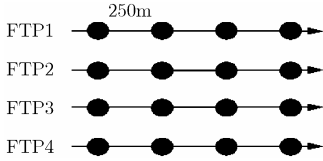


图1 并行链路拓扑

在每条链路上建立一条TCP连接,其上承载FTP流量,FTP流从1.0s开始,100s后结束,每隔1s,计算该秒内TCP的平均吞吐量。结果如图2所示。这里为了提高链路上TCP稳定性,对IEEE802.11里的RTS/CTS握手协议进行了改进,基本思想如下:初始状态时每个节点不限制ShortRetryLimit的大小,每次成功发送一个数据帧后记录之前RTS/CTS发送失败的次数,发送下一个新的数据时节点根据上一次记录的RTS失败次数来决定当前ShortRetryLimit的值。如式(1)所示:

$$\bar{\delta}_{i+1} = \lambda \times \bar{\delta}_i + (1 - \lambda) \times \delta_{i+1} \quad (1)$$

其中 $\bar{\delta}_i$ 是前一次发送数据成功前RTS发送失败次数, λ 是平滑参数, $\bar{\delta}_{i+1}$ 为当前发送数据需要设定的ShortRetryLimit重传次数, δ_{i+1} 为默认状态下RTS/CTS重传次数。当计算出的重传次数小于7时将强制设定为默认的重传次数(7次)。

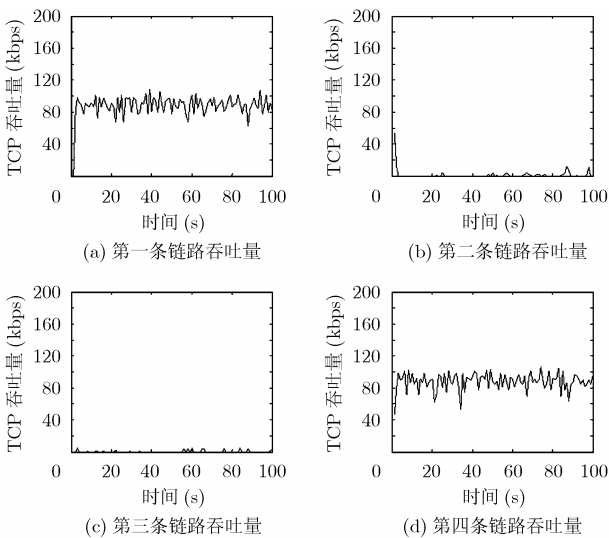


图2 4条并行链路平均吞吐量

采用这种动态自适应RTS/CTS重传机制,链路中的每个节点可以按照流量大小和链路状态动态调节重传次数,提高链路吞吐量和稳定性。同时,将前一次发送数据成功时的失败次数作为下一次设定重传次数的重要依据,充分考虑到了当前链路状态对下一时刻的影响。算法简单,不会增加数据帧头的长度,系统开销不大。式(1)中 λ 的值也可以根据负载大小和链路状态加以调节,对于高负载高误码率的链路,可选择较大的 λ 值,增加对上一次失败信息的利用;反之,对于低负载低误码率的链路,则可以选择较小的 λ 值,保持默认的重传次数(在不做说明的情况下仿真中 λ 都取经验值0.8)。

众所周知,IEEE802.11DCF采用了一种随机访问机制。当移动终端有新的数据包需要发送时,它首先检测信道,如果信道持续空闲一段时间则发送数据包;否则,移动终端继续检测信道。另外,为了避免某移动终端长时间占用信道,移动终端在2次连续的数据包发送之间必须进行随机延迟。对于随机延迟时间,DCF还采用指数回退策略,在发送数据包时,延迟时间在 $[0, CW-1]$ 之间均匀选取,CW被称为竞争窗口,它跟某个特定包的传送失败次数有关。对于第一次发送尝试, $CW = CW_{min}$, CW_{min} 被称为最小竞争窗口,在每次发送失败之后,CW乘2,直到 $CW = CW_{max} = 2^m \times CW_{min}$ (m 为传送失败次数)。同时,移动终端将选择的随机延迟时间赋值给延时计数器。之后,当移动终端检测到信道空闲时,延时计数器减1;当检测到信道忙时,延时计数器保持。当延时计数器值等于0时,移动终端发送数据包。由图2可以看出,由于“隐终端”问题的干扰,链路2和链路3很难接入到信道,导致竞争窗口不断增加。从而使它们在同别的TCP流竞争接入信道过程中一直处于劣势,在100s的时间内大多次的吞吐量为0。而链路1和4则由于受到的干扰小而使包传送成功率较高,使得竞争窗口没有显著增加,从而在同别的TCP流竞争中一直处于优势。如果没有一些自适应变化,那么这种情况将一直持续下去。这就是为什么在图2里链路2和3的TCP吞吐量比起链路1和4来说明显处于不公平状态。

3 基于传输层数据重传率的TCP公平性方法

3.1 基本思想及实现过程

从上面的分析可以知道,由于数据传输节点受到“隐终端”干扰,数据传输失败次数增加导致竞争窗口增大,使得节点在竞争接入信道时处于劣势是导致TCP吞吐量不公平的一个重要原因。

因此,数据传输的成功率与TCP流的公平性之间存在一定的联系。在TCP发送端很容易维护两个变量,即发送的数据总量total_sent和重发的数据总量total_ret,它们都是以发送和重发的数据帧为单位,则数据重传率 γ 计算如

下:

$$\gamma = \text{total_ret} / \text{total_sent} \quad (2)$$

它可以有效地反映数据包发送失败的情况。基于此，我们在每条链路的发送端设置一个数据重传率监控器，根据式(2)实时计算在每次发送数据前的数据重传率。同时，将计算得到的传输层数据重传率传送给 MAC 层，用于修改其接入信道时竞争窗口的大小。当发现传输层数据重传率过大时动态减少其 MAC 层竞争窗口的大小，使得其在竞争信道的过程中保持一定的优势。在 IEEE802.1 协议里，其退避时间表示如下： $\text{BackoffTime} = \text{Random}() \times \text{aSlotTime}$ 。其中， $\text{Random}()$ 为一个分布在 $[0, \text{CW} - 1]$ 段上的伪随机数， CW 称为竞争窗口。在改进的算法中，一个移动节点在完成某个数据帧的发送之后，即收到接收方对该数据帧的确认之后，在发送下一数据帧之前，首先在 MAC 层得到传输层传送的数据重传率大小。如果得到的数据重传率超过事先设定值时，将减少竞争窗口的大小，也就是在 $[0, \text{CW} \times \alpha - 1]$ (% 模运算符), $\alpha \geq 1$ 之间进行随机延迟(这里将 α 称为竞争窗口系数)，而不是像原来那样不断增加退避计时器的大小。这样，通过适当增大 α 值来减少由于受到干扰而使得数据重传率较高的移动节点减少连续发送两次数据帧之间的随机时延，从而增大其接入信道的概率。当然，前面已经提到， CW 有一个最小值。在进行完模运算后，如果发现得到的数值小于规定的最小值则按照系统规定的最小值进行退避，在下面的模拟中 CW 的最小值设定为 8。算法流程如图 3 所示：

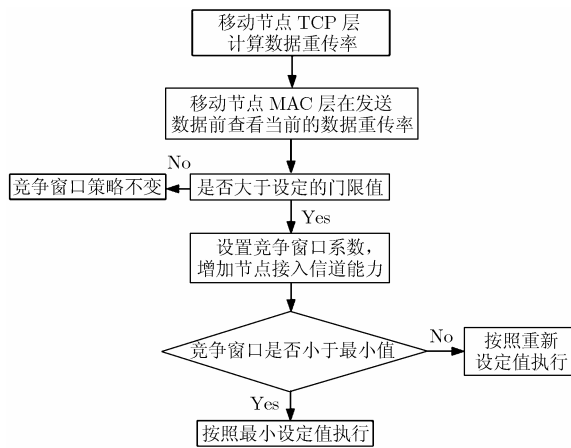


图 3 算法流程图

显然，不同的 α 值将对并行链路 TCP 流的公平性有不同的影响。在本文第 4 节将要介绍的性能仿真中，将对不同的 α 值进行仿真，并给出 α 的建议值。

3.2 传输层数据重传率分析

数据重传率可以表示数据是否成功传送的一个重要标准。数据重传率越大表示数据传输失败的次数越多，也就表示移动节点接入信道传输数据的能力越弱。为了更有效地说

明，对第 2 节中链路 2 和链路 3 的数据重传率统计结果在图 4 中给出。

图 4 里横坐标是链路 2 和链路 3 传输层不同数据重传率数目，相同情况没有标出。从图 4 中可以看出，链路 2 的数据重传率最大达到了 36%，最小值在 10% 左右。链路 3 的数据重传率最大达到了 11%，最小值在 5.5% 左右。如此大的数据重传率表示在传输数据时失败的次数很大，由此造成退避计时器竞争窗口不断增加，使得其接入信道的概率不断减小。

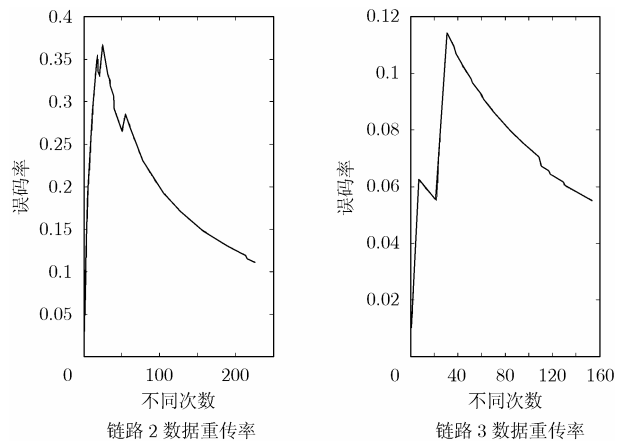


图 4 链路 2 和链路 3 数据重传率

因此，这里把数据重传率作为链路产生不公平现象的一个重要标志。在数据重传率超过一定门限时通知 MAC 层，MAC 层根据事先设定的数据重传率门限值判断链路是否发生了不公平现象，如果发现超过门限值，则动态调整发生不公平链路上退避计时器的大小，加大其接入信道的概率。同时，接入信道概率的增加也意味着数据传输成功率的增加，数据重传率也会得到相应的减少，这样可以有效提高并行链路 TCP 公平性。数据重传率门限可以依据具体的网络环境进行设置，如果网络环境较好，误码率和链路之间的干扰较少，可以将数据重传率门限设置的较低。如果网络环境比较恶劣，误码率和链路之间的干扰较大，可以将数据重传率门限设置的高一些，后面的仿真试验里我们将数据重传率的门限设定在 5%。

4 性能仿真

本节将通过仿真对本文第 3 节提出的基于传输层数据重传率 TCP 公平性方法进行评估，并给出竞争窗口系数 α 的建议值。

在仿真时，仍采用 NS-2，仿真拓扑如图 1 所示，对应的仿真参数如表 1 所示，其余参数同第 2 节。在物理层采用支持传播时延、定向扩散、共享接口的信号传播模型，数据链路层采用的是 IEEE 802.11DCF 媒体接入控制协议。为了方

便对使用了基于传输层数据重传率 TCP 公平性方法和不使用的进行比较,我们仍采用第2节建立的 TCP 连接,并用相同的方法统计 TCP 流的吞吐量。

表1 仿真参数

参数名	值
TCP 段长度	1460bits
信道比特率	2Mbps
时隙	20us
重传门限	5%

首先,我们取 $\alpha = 8, 10, 12$ 时,对应的并行链路 TCP 流的吞吐量和 100s 内平均吞吐量如图 5,图 6,图 7 和表 2 所示:

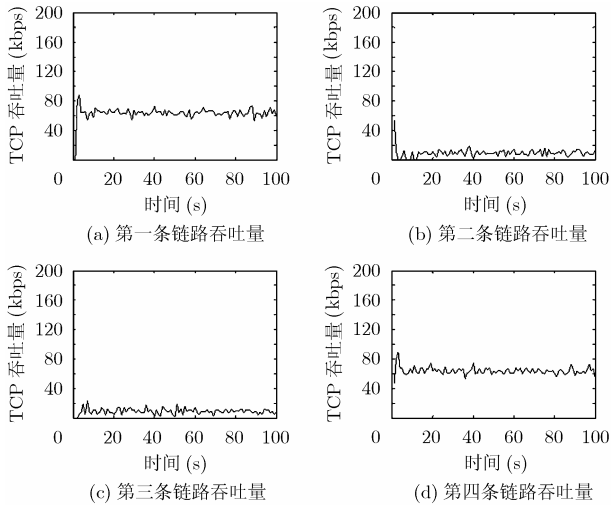


图5 书店并行链路吞吐量($\alpha=8$)

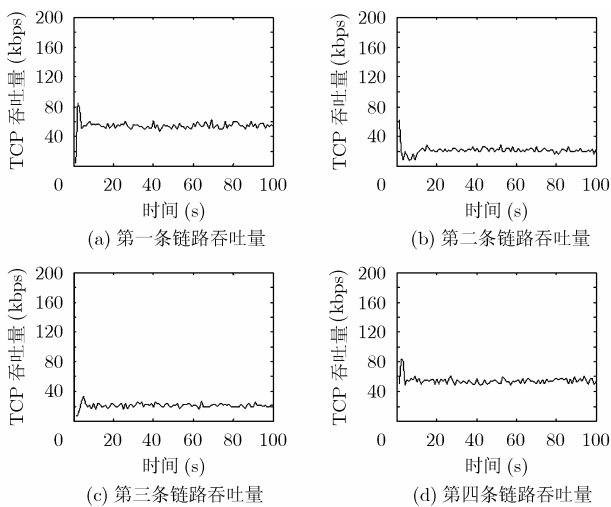


图6 并行链路吞吐量($\alpha=10$)

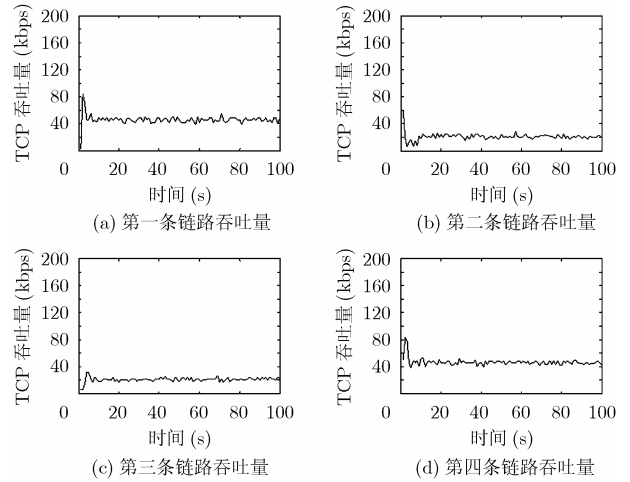


图7 并行链路吞吐量($\alpha=12$)

表2 在 α 不同取值下,并行链路的 TCP 流在 100s 内的平均吞吐量(kbps)

α	平均吞吐量 (FTP1)	平均吞吐量 (FTP2)	平均吞吐量 (FTP3)	平均吞吐量 (FTP4)
1	79	3.85	3.57	83
8	73	9.4	9	70
10	54	20	22	56
12	46	18	19	48

将图 5,图 6,图 7 与图 1 进行比较,再根据表 2 的仿真结果可知,将传输层数据重传率作为参数进行调整,不仅能在很大程度上改进并行链路中 TCP 流的公平性,同时能在较大程度上提高原来不公平链路上 TCP 流的平均吞吐量。当 α 大于 10 时,过大的 α 值已对改进 TCP 公平性没有多大意义,相反,会在一定程度上降低 TCP 流的平均吞吐量。对出现这样的结果的原因分析如下:适当地逐渐增大 α 的值,可以增加受到干扰链路接入信道的概率。当 α 达到一定数值时,计时器设置时间太短,在别的终端没有完成正在发送数据帧时就已经计数结束,这样仍然不能够成功的将数据帧发送出去,影响 TCP 的吞吐量。另一个原因是,当 α 过大时竞争窗口已经达到系统规定的最小值,对提高性能已经起不了作用。当然,在信道容量一定情况下,提高链路的公平性势必减少一些链路的吞吐量。图 5,图 6,图 7 中链路 1 和链路 4 的吞吐量比起图 1 中的来说都有一定程度的下降,这是由于它们将一部分信道资源提供给链路 2 和链路 3 使用,这比起某条或某几条链路独享信道意义更重大。并行链路中当 $\alpha = 10$ 时,链路 1 和链路 4 的平均吞吐量比正常情况下降了 30%左右,但链路 2 和链路 3 的平均吞吐量增加了 500%左右。由于受到“隐终端”干扰导致的并行链路 TCP 流不公平现象得到了很大的改善,每条并行链路比较公平地

分配了有限的信道资源。

下面我们再来看看在 $\alpha = 10$ 时对传输层数据重传率的统计情况, 如图 8 所示:

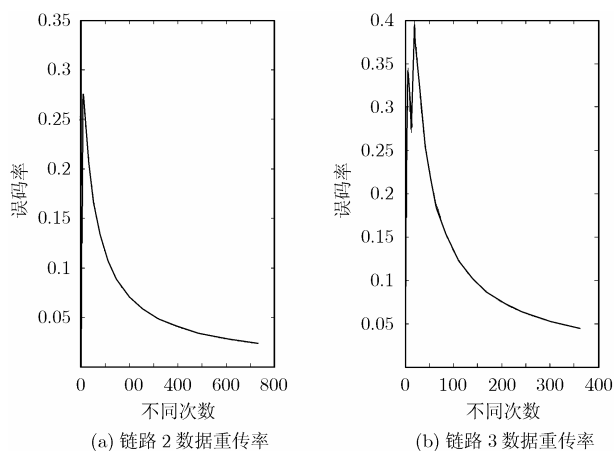


图 8 链路 2 和链路 3 数据重传率($\alpha=10$)

从图 8 可以看出, 初始阶段时它们的数据重传率都比较高。原因在于并行链路间干扰使得它们很难接入到信道, 造成数据不能成功地发送出去。这里设置了数据重传率门限为 5%, 在达到这个门限时, 通过将窗口竞争系数设置为 10 来增加它们接入到信道的概率。接入信道的概率增加也就意味着它们传送数据的成功率增加, 链路 2 和链路 3 在传输层的数据重传率逐步下降, 其平均吞吐量也有了很大的提高。

根据以上的仿真结果, 本文给出 α 的建议值: $8 \leq \alpha \leq 12$ 。对于如图 1 所示的并行链路拓扑, α 越大, MAC 层竞争窗口就越小, 链路中 TCP 流接入到信道的概率越大, 但正如表 2 所示, 过大的 α 会减少 TCP 流的吞吐量, 从而降低系统的性能。另外, 我们这里增加的传输层数据重传率监视器是动态的将信息由传输层通知 MAC 层, 不涉及对帧类型的增减、帧结构和收发双方协议的修改, 其实现简单, 且能同原 TCP 和 IEEE802.11 协议兼容。

5 结束语

在无线通信中, 无线信道是非常珍贵的有限资源。有效且公平的信道接入对于无线自组织网络具有重要的意义。本文揭示了无线自组织网络并行链路中 TCP 流的不公平性问题, 提出了一种基于传输层数据重传率地提高 TCP 流公平性方法, 通过引入竞争窗口系数来增加由于受到“隐终端”干扰, 而得不到公平接入信道的链路上 TCP 流的公平性。通过仿真试验证明, 这种方法在没有严重影响链路吞吐量的情况下可以有效地提高并行链路 TCP 流的公平性。

参考文献

- [1] IEEE standard-1999. Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer(PHY) specifications[S].
- [2] Pilosof S, Ramjee R, Shavitt Y, and Sinha P. Understanding TCP fairness over wireless LAN. In Proc. INFOCOM 2003, San Francisco, April 2003: 863-872.
- [3] Wu H, Peng Y, Long K, Cheng S, and Ma J. Performance of reliable transport protocol over IEEE 802.11 wireless LAN: analysis and enhancement. In Proc. INFOCOM 2002, New York, June 2002: 599-607.
- [4] Wang Y and Bensaou B. Achieving fairness in IEEE 802.11 DFWMAC with variable packet lengths. IEEE GLOBECOM 2001, San Antonio, Nov. 2001: 3588-3593.
- [5] Thyagarajan Nandagopal, KIM Tae-Eun, and GAO Xia, *et al.*. Achieving MAC layer fairness in wireless packet networks. Proc. ACM MobiCom 2000. Boston, MA, Aug 2000: 87-98.
- [6] 李云, 陈前斌, 隆克平, 吴诗其. 无线自组织网络中 TCP 稳定性的分析及改进. 软件学报, 2003, 14(6): 1178-1186.
- [7] Fall K K and Varadhan K Ns. Notes and Documentation, LBNL, August 1998. <http://www-mash.cs.berkeley.edu/us/>.

叶 斌: 男, 1978 年生, 博士生, 研究方向为无线网络 TCP 性能、网络管理。

胡谷雨: 男, 1964 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为网络管理、网络安全。

潘志松: 男, 1976 年生, 博士生, 研究方向为网络安全。