

多跳 Ad Hoc 网络中 TCP 性能的改进研究分析

秦 军¹, 王小丽², 付珍珍²

(1. 南京邮电大学 教育科学与技术学院, 江苏 南京 210003;

2. 南京邮电大学 计算机学院, 江苏 南京 210003)

摘 要:传统 TCP 是为有线网络设计的, 它的拥塞控制机制是假设丢包都是由网络拥塞引起的, 然而影响 Ad Hoc 网络中 TCP 性能的因素是多方面的, 涉及到网络体系结构里面多个层次之间的问题。由于 Ad Hoc 网络的特性使得传统 TCP 的性能急剧下降, 文中首先分析了 Ad Hoc 网络中影响 TCP 性能的主要因素, 从协议层入手, 分析了各协议层对 TCP 性能的影响; 然后, 在对现有改进方案了解的基础上分析比较了目前改善 Ad Hoc 网络中 TCP 性能的具有典型的跨层改进方案, 为将来的研究工作打下了基础。

关键词:多跳 Ad Hoc 网络; TCP 协议; 跨层改进

中图分类号:TP31

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2012)03-0011-04

Improvement of TCP Performance in Mult-Hop Ad Hoc Networks

QIN Jun¹, WANG Xiao-li², FU Zhen-zhen²

(1. College of Edu. Science and Techn., Nanjing University of Posts & Telecomm., Nanjing 210003, China;

2. College of Computer, Nanjing University of Posts & Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: The original TCP was designed for wire network. Its congestion control fact mechanism assumes that all packet loss is caused by congestion. However various factors influence the TCP performance in the Ad Hoc networks, which involves many layers of network architecture. The TCP's poor performance in Ad Hoc is due to the Ad Hoc character. It first analyzes several major causes for the decline of TCP performance in Ad Hoc networks, based on the protocol layer, it analyzes the effect on TCP performance caused by each layer, then on the basis of understanding present improvement proposals, many present typical cross-layer improvement proposals that improve TCP performance are analyzed and compared. This laies the foundation for the future research work.

Key words: mult-hop Ad Hoc networks; TCP; cross-layer improvement

0 引 言

移动自组织网络 (Mobile Ad Hoc Networks, MANET) 是当前无线通信领域一种新型的正在发展的网络技术, 目前它已从军事通信迅速渗透到相关的民用通信领域^[1]。Ad Hoc 网络是由一些自带无线接收器和发射器装置的无线节点组成的一个多跳的、临时性的自治系统。由于 Ad Hoc 网络的自组织性, 多跳及网络拓扑动态变化特点, 使得传统 TCP 协议无法在 Ad Hoc 网络上直接使用。

传输控制协议 (TCP)^[2] 已经成为应用最广泛、最成功的 Internet 标准协议栈, 因此作为 Internet 扩展的

Ad Hoc 网络也必然采用它。然而, TCP 是基于传输链路误码率很低, 链路是准静态的这个假设设计的, 因而它不能辨别出数据包丢失是由于网络拥塞, 路由失效或链路故障所导致的, 只是简单的将包丢失看做是网络拥塞的结果以启动拥塞控制的过程: 超时重传未被确认的数据包, 定时器指数退避的重新传输, 并减小窗口的大小, 甚至还会进入慢启动过程, 这些都不是我们所希望的。当路由失效时, 重传的分组不能到达目的节点, 而且浪费了链路带宽; 当路由恢复时, 由于慢启动机制, 吞吐量仍会很低。即传统的 TCP 协议在 Ad Hoc 网络中常常会引起不必要的重传和吞吐量的下降。此外, 它并不考虑节点的移动和无线多跳路由对传输层协议的影响, 如此为了适应 Ad Hoc 复杂的网络环境必须对其做些改进。

我们发现降低 Ad Hoc 网络中 TCP 性能的因素是多方面的, 涉及到网络体系结构里面多个层次之间的

收稿日期: 2011-08-15; 修回日期: 2011-11-21

基金项目: 江苏省科技支撑计划项目 (BE2009157)

作者简介: 秦 军 (1955-), 女, 教授, 硕士生导师, 研究方向为计算机网络技术、多媒体技术、数据库技术; 王小丽 (1985-), 女, 江苏泰州人, 硕士研究生, 研究方向为计算机在通信中的应用。

问题。为此,交互传输层、网络层和 MAC 层协议来提高 TCP 协议的性能将是一种有效的手段。目前针对这些因素已经出现了一些解决方案,这些方案的基本思路是通过层间协作让 TCP 知道分组丢失的原因,从而启用相应的策略。文中从协议层入手,分析了各协议层对 TCP 性能的影响,并分析了目前典型的跨层改善 TCP 性能的研究方案。

1 Ad Hoc 网络中数据链路层及网络层对 TCP 性能的影响

无线 Ad Hoc 网络是一个多跳的、临时的、对等的自治系统,它由一组带有无线收发装置的移动节点组成^[3]。正是由于 Ad Hoc 网络无中心、自组织、多跳路由的特点使得它要面临很多其他无线通信网络所没有的特殊问题,这些问题引起 TCP 性能的下降,但是这些影响 TCP 性能的问题并不是由网络模型中的某一层造成的,各层协议对 TCP 性能的下降都产生一定的影响。

1.1 数据链路层对 Ad Hoc 网络中 TCP 性能的影响

数据链路层解决的主要问题包括介质接入控制,点对点的数据传送、同步、纠错以及流量控制等^[2]。Ad Hoc 网络的信道不是普通的共享广播信道而是多跳共享的无线广播信道即当一个节点发送信息时,只有最近的相邻节点可以收到,而一跳之外的其他节点无法感知到。那些感知不到的节点也可能会同时发送信息,从而导致冲突。在 Ad Hoc 网络中,报文的冲突只在局部发生,并不是所有节点都能感受到。一个节点正确接收的数据包,而包可能会在其他节点发生冲突。也可能在数据包接收节点处发生冲突,但发送节点是不知道的。换句话说,此时发送节点和接收节点感知的信道的状态不一定是相同的,这将带来隐藏终端、暴露终端和其他问题。

隐藏终端是那些在接收节点的通信覆盖范围之内,在发送节点的通信覆盖范围以外的节点。因为无法感知发送节点的发送可能会发送报文给相同的接收节点,致使数据包在接收节点处冲突。从而降低了信道的利用率,如图 1 所示。当 M 向 N 发送信息时,由于 Q 不在 M 通信覆盖范围内,Q 感知不到 M 发送,Q 是隐终端。若此时 Q 同时也向 N 发送信息,则会在 N 引起冲突。

暴露终端是指那些在发送节点的通信覆盖范围以内而在接收节点的通信覆盖范围以外的节点。暴露终端感知到发送节点的发送而延迟报文的发送,但由于它不在接收节点的通信范围之内,所以其实它的发送并不会造成报文冲突,这样就会引起不必要的发送延迟,这就可能会引起 TCP 发送端的超时,从而不必要

的启动拥塞控制机制,如图 2 所示。当 M 向 N 发送信息时,若此刻 Q 也试图向 R 发送信息,由于 Q 能感知到 M 的发送,所以 Q 会等待 M 发送结束后再向 R 发送信息,因而造成不必要的时延。

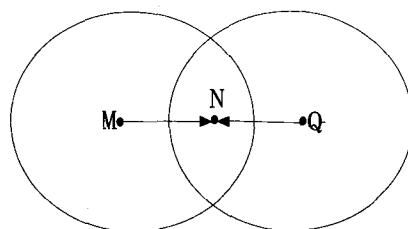


图 1 隐藏终端问题

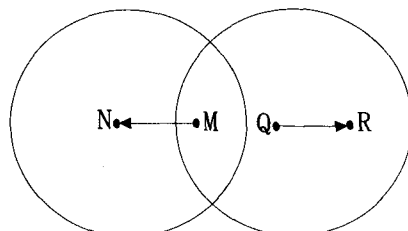


图 2 暴露终端问题

Ad Hoc 网络这种特殊的信道共享方式,目前被广泛使用的那些信道接入技术很难完全适用于 Ad Hoc 网络,因此必须为它设计专门的信道接入协议。隐藏终端和暴露终端的存在为 Ad Hoc 网络信道接入协议的设计提出了特殊的要求。要想减少或消除报文的冲突,提高信道利用率,就必须设法减小或消除隐终端和暴露终端的影响。

1.2 网络层对 TCP 性能的影响

影响主要包括三个方面:

(1) 中间节点处理分组的能力。

一般情况下,Ad Hoc 网络中节点数据通信时需要中间节点的转发,中间节点会缓存这些数据,当中间节点缓存队列满了之后会丢弃以后到来的数据^[4]。因为分组的丢失,发送端长时间收不到接收端的 ACK,系统将会以为网络发生拥塞,启动拥塞控制机制,重传这些数据。

(2) 路由频繁失效对 TCP 性能的影响。

重建路由所花费的时间通常比 TCP 的超时重传计时器的时间要长,TCP 不可避免的要启动拥塞控制机制,因此就会降低 TCP 的传输速率,导致 TCP 的吞吐量下降。其次,重建路由时 TCP 无法发送数据,也接收不到接收端发送的 ACK,致使部分发送端重新发送已经接收到的数据,浪费了网络的带宽。另外,路由频繁的切换会产生数据包的乱序情况,使得 TCP 发送端因为收到重复的 ACK 而进入拥塞控制状态,降低了 TCP 的传输性能。

(3) 链路中断误报对 TCP 性能的影响。

链路断开的真假对 TCP 性能的影响很大,假的断

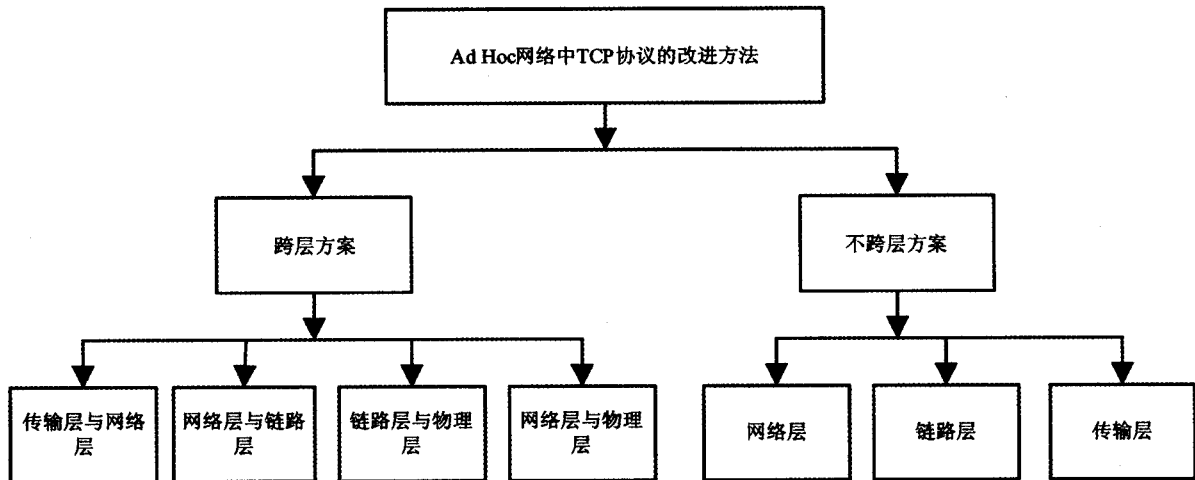


图3 Ad Hoc 网络中 TCP 性能的改进方案

开消息会引起重寻路由,引起 TCP 传输的超时,降低了 TCP 的性能。

2 改进 Ad Hoc 网络中 TCP 性能研究方案

由前文的分析总结了影响 Ad Hoc 网络中 TCP 性能的主要因素有以下几点:

(1) 比特误码:无线信道通信质量差,误码率高,因此无线网络中传输的数据经常发生丢失。在 Ad Hoc 网络中,当发生丢包时,传统 TCP 无法辨别出是误码丢包还是拥塞丢包。

(2) 路由失效:拓扑结构的频繁变化使得路由发生中断,过多的路由重新计算,造成 TCP 超时,频繁启动拥塞控制机制,降低了 TCP 的性能。

(3) Ad Hoc 网络的特性:Ad Hoc 网络除了一般无线网络的高误码率和链路的不对称特性外,还具备自身独有的一些特性。例如:MAC 层的不公平性,隐终端和暴露终端。

近几年,大量的研究人员针对上文提到的影响因素提出了多种改进 TCP 性能的方案,这些方案主要分为两大类:跨层改进方案和不跨层改进方案^[5],如图 3 所示。

在图 3 中,跨层方案依据 OSI 参考模型的多层相互间的协作,上层协议充分利用下层网络提供的服务来明确网络的状态,从而改善 TCP 性能的目的。不跨层方案是直接对 OSI 模型中的某一层进行修改,可以分别修改传输层,网络层和链路层协议。

2.1 跨层改进方案

严格的分层协议的体系结构设计缺乏足够的灵活性,不符合动态网络的特点,网络性能一般得不到有效保障,为了满足 Ad Hoc 网络的特殊要求,应该采用一种新型的跨层协议栈和跨层设计方法^[6]。

现有典型的跨层改进方案有如下几种:

(1) TCP-F。

TCP-F 是通过传输层和网络层的协作设计的,它依靠显示通知来区分路由失败和网络拥塞引起的丢包^[7]。正常情况处于 Established 状态,当路由代理发现了路由中断后,将会显示地发送一个路由失败通知(RFN)给 TCP 传输的发送端;当发送端收到 RFN 时,就进入 Snooz 状态,不再继续发送数据,同时启动路由失败定时器,一直等收到路由重建报文(RRN)后才能回到活动状态。路由失败定时器超时后,就采取拥塞控制算法。文献[7]对该方案进行了仿真,表明改进后的 TCP 性能明显优于传统的 TCP。

(2) TCP-ELFN。

TCP-ELFN 也是一种基于网络层反馈的方案。TCP 发送端收到显示路由失败报文后,进入 stand-by 状态,TCP 停止发送数据包,锁定一切变量。但与 TCP-F 不同的是,在 stand-by 状态下,TCP 发送端将探测分组周期性地发送给接收端,若找到新的路由,接收端就向发送端发送 ACK 报文,收到 ACK 报文后,发送端脱离 stand-by 状态,恢复正常状态。文献[8]表明该方案的 TCP 吞吐量比传统 TCP 吞吐量有了很大的增益,而且解决了传统 TCP 在链路断开时启动的不必要的拥塞控制机制问题,但遗憾的是它对像高信道误码率等因素的影响也是没有办法的。

(3) ATCP。

ATCP 的基本思想与前述的并没有本质区别,都是基于网络层反馈的报文在几个状态之间进行转换,TCP 发送端可以处于 persist, congestion control, retransmit 三种状态^[9]。该方案是在网络层和运输层之间插入一个 ATCP 层,该层负责监听网络的状态,同时过滤和预处理 ECN 消息和正常的 TCP 报文段头等,使 TCP 发送端能正确的进入三种状态。当网络发生了拥塞,通过 ECN 消息通告,则 TCP 进入拥塞控制状态。为了

检测因链路错误导致的丢包,ATCP 检测到来的 ACK 报文。当 ATCP 收到 3 个重复的 ACK 时,它并不是立即上传给 TCP 层,而是先将 TCP 置为 persist 状态,并同时重传 TCP 缓存中的已经丢失的包。等到收到下一个 ACK 时,ATCP 恢复正常的状态。ATCP 的状态变化如图 4 所示:

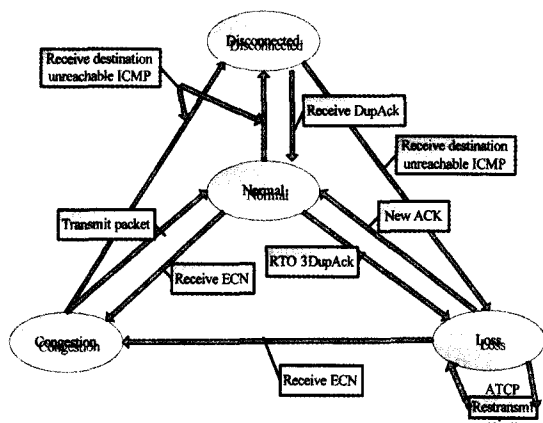


图 4 ATCP 的状态变换图

(4) TCP-Bus.

TCP-Bus 的思想是试图在网络层解决因节点移动而被丢弃的数据包的思想来提高 TCP 的性能^[10]。此思想与 TCP-F 协议相似,TCP-Bus 同样使用显式网络反馈机制:ERDN 和 ERSN 来通知发送端路由的中断与重建。当中间节点检测到路由中断时,就发送 ERDN 消息给源端,源端在收到 ERDN 消息后立即停止一切传输。同样的,在路由重建后中间节点就把 ERSN 消息发送给发送端,发送端收到消息后就恢复正常传输。TCP-Bus 接收到路由失效的通告后,不但把定时器标记为无效,并在路由消息中告诉 TCP 源端要重传哪些数据包。TCP-Bus 解决了不必要重传的问题。文献[10]对该方案进行了仿真,仿真实验表明,在路由失败比较频繁的情况下,TCP-Bus 的吞吐量相对于传统 TCP 提高了大约 30%。

(5) Split TCP.

Split TCP 是针对 Ad Hoc 的路由频繁变化的特点提出的改进方案^[11]。Split TCP 的目的旨在提高 TCP 的吞吐量、改善其公平性。它的中心思想是将长的路由和 TCP 连接进行分割,在 TCP 端到端连接中设置 Proxy。代理 Proxy 上设有一个 CW(拥塞窗口),源端上设有一个 CW 和 end-to-end CW,前者用来控制发送方的数据包发送速率,后者用来控制数据包从缓冲队列中删除的速度。文献[11]的模拟实验表明:当代理为 3 到 5 跳距离时,如果同时启动 3 到 5 个 TCP 连接,Split TCP 不但能够使总的吞吐量提高 5%~30%,而且还可以使公平性提升 60%。但问题是过大的代

理缓存相应的会增加网络负担,TCP 性能就会下降。Split TCP 结构原理图如图 5 所示。

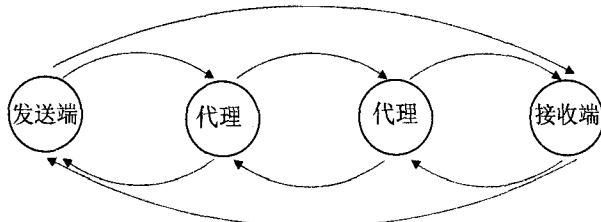


图 5 Split TCP 原理图

2.2 跨层改进方案的比较

跨层改进方案虽然违背了 TCP 协议“端到端”原则^[12],但确是改善 Ad Hoc 网络 TCP 性能的一种有效方法。文中列出的跨层改进方案都是利用中间节点的协作,能够让 TCP 源端比较准确的获取网络的真实状态,从而根据不同的情况采取适当的策略。事实证明在很大程度上提高了 TCP 的性能。文中将所列的改进方案进行了如下的比较,如表 1 所示。

表 1 现有典型跨层改进方案比较

改进方案	TCP-F	TCP-ELFN	ATCP	TCP-Bus	Split
协议层	传输层,网络层	传输层,网络层	传输层,网络层	传输层,网络层	传输层,网络层
解决的问题	拥塞路由中断	拥塞路由中断	拥塞路由中断,误码丢包	拥塞路由中断	拥塞路由中断
改进效果	性能显著提高	性能提高	吞吐量提高 30%	吞吐量提高 30%	吞吐量提高 5%~30%

3 结束语

文中总结了现有改进无线 Ad Hoc 网络中 TCP 性能的跨层合作方案。一般说来,跨层设计的方案优于单层改进方案。跨层的好处在于通过不同层间的交互,使得本地信息可以被不同的层之间共享,这样处理和通信的开销也减少了,系统整体性能也优化了。但是跨层协议栈的层间交互要比传统分层结构要复杂的多,各层不仅需要知道其他层的行为,而且需要增加更多的专用接口,通用性就降低了。但跨层的优势体现在:各层之间的相互协同能够消除冗余;控制方法采用消息驱动,信息可以在任意层之间交互;综合设计和优化的方法可以很好的适应应用需求和网络条件。考虑到无线信道带宽资源的有限和时变特点加上节点自身的局限性,跨层设计方法带来的好处弥补了层间协议设计复杂性的缺点。

(下转第 18 页)

参数 $\varepsilon = 0.01$, 参与建模的数据组数 $T = 13$ 。

图 4 为系统输出与期望输出的跟踪比较图, 可以看出, 当 $M = 2$ 时, 系统输出与跟踪期望输出几乎一致, 当 $M = 3$ 时, 跟踪效果更好。

从图形中可以宏观地看出跟踪效果, 为了进一步说明该方法的有效性, 表 1 给出了文中提出方法与基于 LMS 逆模糊模型方法的控制跟踪精度比较。设最

$$\text{小均方根误差 RMSE} = \sqrt{\sum_{k=1}^N (u(k) - \hat{u}(k))^2 / N}。$$

表 1 跟踪精度比较

算法	空间层数 M	均方根误差
LMS 算法	M=2	3.32×10^{-2}
	M=3	2.49×10^{-2}
文中算法	M=2	2.86×10^{-2}
	M=3	2.12×10^{-2}

由表 1 可见文中的算法优于文献[10]的算法, 当划分越细时即模糊规则越多时, 跟踪越精确。

4 结束语

基于数据学习建模算法的本质自适应特点, 易与自适应控制相结合, 是对一些不确定性和难以用精确数学模型表述的复杂大系统的解决方法的有效突破。文中基于数据学习, 结合自适应算法, 提出了一种基于数据学习的逆模糊建模方法, 利用建模数据在时间与空间相邻的特点, 从系统积累的数据中找出与当前模态相匹配的数据, 提高了逆控制模型精度, 并采用自适应算法在线调节系统模型参数, 跟其他逆模糊模型相比具有更好的跟踪效果。

参考文献:

- [1] Xu C, Shin Y C. A fuzzy inverse model construction method for general monotonic multi-input single-out-put (MISO) systems[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2008, 16(5): 1216-1231.
- [2] Erol O K, Eksin I. A new optimization method: big bang-big crunch[J]. Advances in Engineering Software, 2006, 37(2): 106-111.
- [3] Goncalves S P J, Mendonca L F, Sousa J M C, et al. Uncalibrated eye-to-hand visual servoing using inverse fuzzy models[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2008, 16(2): 314-353.
- [4] 孙明, 嵇启春. Smith 模糊自适应 PID 算法在热力站控制中的应用[J]. 计算机技术与发展, 2010, 20(12): 103-105.
- [5] 施其权, 李小明, 肖辞源. 一类新型快速模糊支持向量机[J]. 计算机技术与发展, 2010, 20(2): 244-246.
- [6] 王丽娟. 基于 $\alpha(t)$ 调整函数的模糊控制器优化研究[J]. 计算机技术与发展, 2011, 21(5): 44-47.
- [7] Chen J H, Huang T C. Applying neural networks to online updated controller for nonlinear process control[J]. Journal of Process Control, 2004, 14(2): 211-230.
- [8] 丁海山, 毛剑琴, 林岩. 基于模糊树模型的直接自适应模糊控制[J]. 自动化学报, 2008, 34(5): 574-580.
- [9] Ding Feng, Xiao Yongsong. A finite-data-window least squares algorithm with a forgetting factor for dynamical modeling[J]. Applied Mathematics and Computation, 2007, 186(1): 184-192.
- [10] 刘福才, 张艳欣, 王亚静, 等. 一种基于逆模糊模型的自适应逆控制方法[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(5): 961-966.

(上接第 14 页)

参考文献:

- [1] 郑少仁, 王海涛, 赵志峰, 等. Ad hoc 网络技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2005.
- [2] Forouzan B A, Fegan S C. TCP/IP 协议族[M]. 第 2 版. 谢希仁, 译. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [3] 沈奔, 秦军, 万丽. 无线 Ad Hoc 网络中 AODV 路由算法的研究与改进[J]. 计算机技术与发展, 2011, 21(3): 150-153.
- [4] 徐晓玲. Ad Hoc 网络的 TCP 性能分析与改进[D]. 兰州: 兰州大学, 2009.
- [5] 徐恒, 王新. 无线 Ad Hoc 网络中的 TCP 改进研究综述[J]. 计算机应用与软件, 2008, 25(2): 5-8.
- [6] 王海涛, 刘小明. Ad hoc 网络中跨层设计方法的研究[J]. 电信科学, 2005(2): 22-26.
- [7] Chandran K, Raghunathan S, Venkatesan S. A feedback based scheme for improving TCP performance in Ad-Hoc wireless networks[C]//Proc of the International Conference on Distributed Computing Systems. Amsterdam, Netherlands: [s. n.], 1998: 169-180.
- [8] Holland G, Vaidya N H. Analysis of TCP performance over mobile ad hoc network[C]//Proceeding of MobiCom, ACM Intern Conf on Mobile Computing and Networking. [s. l.]: [s. n.], 1999: 207-218.
- [9] Liu J, Singh S. ATCP TCP for mobile ad hoc networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2001, 19(7): 1300-1315.
- [10] Kim D, Toh C, Choi Y. TCP-Bus: Improving TCP Performance in Wireless Ad Hoc Networks[J]. Journal of Communications and Networks, 2001, 3(2): 175-186.
- [11] Kopparty S, Krishnamurthy S, Faloutsos M. Split TCP for mobile ad hoc networks[C]//Proc of IEEE GLOBECOM. Taipei, Taiwan: [s. n.], 2002.
- [12] 程剑, 洪佩琳, 李津生. 移动 Ad Hoc 网络中的 TCP 改进方案性能分析[J]. 计算机应用, 2005, 25(2): 265-269.