

# 面向路径的无线多跳网络端-端吞吐量分析

刘永强, 严 伟, 赵 通, 赵慧周

(北京大学计算机系, 北京 100871)

**摘 要:** 基于 802.11 DCF 机制的无线多跳网络性能深受 MAC 层的介质访问机制和上层路由机制相互作用的影响. 本文面向自组织网络路径, 给出了端-端最优吞吐量的模型以及计算其上下界的方法. 本文的研究更加注重无线多跳网络的实际特性: 分组调度可以任意方式调度, 节点的载波侦听范围大于其传输范围. 研究发现路径的端到端吞吐量与路径长度、分组发送速率和分组调度策略等因素密切相关. 本文还分析了其他因素对端-端带宽的影响程度. 本文从面向路径的分析模拟工作中得出的一些独特结论相信将有助于上层应用程序以及路由协议的研究.

**关键词:** 802.11 DCF; 无线多跳网络; 跨层次干扰; 面向路径分析; 端-端吞吐量

**中图分类号:** TN915 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 05-0971-05

## Path-Oriented End-End Throughput Analysis in Wireless Multi-Hop Networks

LIU Yong-qiang, YAN Wei, ZHAO Tong, ZHAO Hui-zhou

(Department of Computer Science and Technology, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** The performance of 802.11DCF based ad hoc networks deeply relies on the complex interaction between medium access mechanism and routing scheme. In this paper, we model the interaction and present the method for computing upper and lower bounds of the optimal end-to-end throughput for a given path in the ad hoc networks. Different from the previous researches, we work with a more realistic scenario: the packet is scheduled arbitrarily and the carrier sense range of a node is longer than its transmission range. Furthermore, we analyze other affecting factors in depth, such as multiple routing and packet drop. Some different and interesting conclusions are drawn from our path-oriented analysis. We believe that the conclusions can be helpful guidelines for upper level applications and routing design.

**Key words:** 802.11 DCF; wireless multi-hop networks; cross layer interaction; path-oriented analysis; end-to-end throughput

### 1 引言

随着无线技术的不断进步, 无线多跳网络以无线 Mesh 网络、传感器网络、移动自组织(ad hoc)网络的形式广泛应用于军事、交通、环保等各个领域. 当前, 无线多跳网络研究的热点已经从网络接入和网络互联等基本组网问题转向如何提高网络性能等深层次问题. IEEE 802.11 DCF 协议作为无线局域网(WLAN)的 MAC 层规范, 目前已被广泛应用于无线网络的各种仿真和测试床中, 因此本文研究涉及的 MAC 层协议为 802.11 DCF 协议<sup>[1]</sup>.

针对 802.11DCF 的研究展开已久, 大多数工作关注的重点在于自组织(ad hoc)操作模式下协议的不良表现. 这些问题大致可归结为三类: 隐藏终端问题<sup>[2]</sup>、灰色地带问题<sup>[3]</sup>以及介质访问控制和路由模式相互影响导致的性能严重下降问题<sup>[4-6]</sup>.

本文把 ad hoc 网络的路径作为研究对象, 分析了 MAC 层和上层相互作用的影响并给出计算端-端最优吞吐量的上限和下限. 相比已有的研究工作<sup>[7-10]</sup>, 本文的主要特色之一在于采用了更接近实际的网络场景和特别考虑了上层因素(如发送速率和路由模式)对端-端带宽的影响. 以前的研究在对端-端最大吞吐量进行分析时都基于一种假设, 那就是分组传输由一个全能的中心控制实体实施完美调度, 而这在实际分布式 ad hoc 网络中是不可能做到的; 而且以前的分析通常忽略了载波侦听范围远远大于传输范围这个事实. 我们的分析表明大的载波侦听范围能破坏路径的空间重用度, 从而降低端-端吞吐量. 例如, 如果传输范围和侦听范围相同, 则采用多路径路由对吞吐量的改进可达到 50%<sup>[11, 12]</sup>; 然而, 如果载波侦听范围大于传输范围, 我们的研究表明多路径路由对吞吐量的改进只有 30%. 模拟结果也验证了我们的分析.

收稿日期: 2005-06-29; 修回日期: 2006-11-12

基金项目: 国家自然科学基金(No. 60673181); 思科教育科研项目

本文的另一个贡献在于我们的工作还深入考虑了其他因素(例如多路径路由和丢包率)对端-端吞吐量的作用,并给出了几个具有参考价值的结论.例如,当源端的发送速率超过某个特定的点时,空间重用度遭到严重破坏,从而导致端-端吞吐量的下降.这说明,通过恰当的基于流量控制的路由协议完全有机会获得较高的吞吐量,这对面向流媒体应用程序至关重要.

本文的其余部分结构是:第二部分描述了本文的相关技术背景;第三部分给出了面向路径的分析模型和计算端-端最优吞吐量上下限的等式,然后分析多路径路由和丢包率两个因素对吞吐量的影响;第四部分给出了评估本模型的模拟结果和统计分析;最后在第五部分给出本文的结论和未来的工作展望.

## 2 相关研究

### 2.1 802.11 DCF 协议概述

本文的研究工作基于 802.11 DCF 协议,为便于后面的叙述,下面给出协议的概要说明.有关 802.11 标准的详细描述见文献[1].

当一个站需要发送数据报时必须首先侦听信道活动.如果信道空闲时间达到分布式帧间间隔(DIFS),则该站可发送数据报;否则,该站持续侦听信道,直到信道空闲 DIFS 长时间.为最小化各站同时发送数据报造成的冲突概率,协议规定在真正发送分组之前各站必须等待一个随机回退(back-off)时间(即协议的冲突避免特性).DCF 定义了 4 次握手机制确保数据报的发送,该机制称为 RTS/CTS,其原理如图 1 所示.

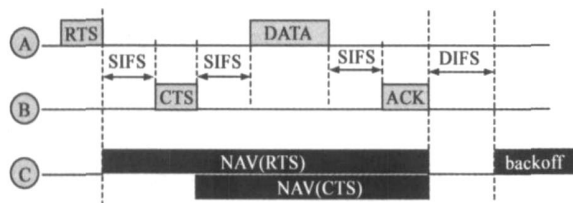


图 1 RTS/CTS 的访问模式

### 2.2 隐藏终端问题与路径延迟

RTS/CTS 机制能保证在 WLAN 环境下报文的成功发送.但在多跳自组织网络中节点的载波侦听范围大于其传输范围,使得隐藏终端问题依然存在.考虑如图 2 所示的链式拓扑结构. $r$  是站 A 的传输半径,在此范围内的站能成功接收来自 A 的报文; $R$  是 D 的载波侦听半径,在此范围内的站不能正确接收来自 D 的报文,但能侦听到信道为忙而保持沉默.

现在,假设 A 要给 B 发送数据,同时 D 正在给 E 发送数据报.由于隐藏终端问题使得从 D 发出的数据报到达 E 开始直到 A 结束当前的回退阶段有一段时间间隔,在这段时间间隔内路径上没有任何数据报在传输.

我们把被浪费了的这段时间称为路径延迟时间.本文的第三部分指出这段路径延迟时间是由隐藏终端问题造成的,并且影响到路径的端-端吞吐量.

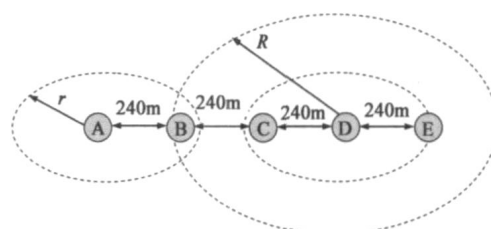


图 2 隐藏终端问题导致的路径延迟

## 3 端-端吞吐量特性分析

### 3.1 面向路径的吞吐量分析

与已提出的面向节点的分析模型不同,本文的模型面向路径并且关注端-端传输时间,因此工作的难度和分析的复杂性都较前有所增加.

纵观整个路径,当路径上没有数据报在传输时,所有试图传输的节点都将遭遇同样的竞争,而与它们已往的传输历史无关.一旦某个节点抓住路径,位于该节点载波侦听范围内的其他节点必须保持沉默直到该节点传输的数据报被路径上的下一跳收到.基于这个观察,我们注意到数据报从源端到达目的端的传输延迟(或者在目的端的分组到达时间间隔)是  $T$  的若干倍,就像流水线操作一样. $T$  由节点等待 DCF 的时间、因 RTS 冲突导致的回退时间以及帧传输时间构成.按照图 1 给出的访问模式, $T$  可表达成:

$$T = DIFS + T_{RTS} + T_{CTS} + 3 \times SIFS + T_{DATA} + T_{ACK} + W \quad (1)$$

其中: $T_{RTS}$  和  $T_{CTS}$  分别表示传输 RTS 和 CTS 帧的时间; $T_{DATA}$  是传输一个 MAC 数据帧(包括 PHY 头、MAC 头和载荷)所需要的时间; $T_{ACK}$  是传输一个 ACK 帧(包括 PHY 头和 MAC 头)所需要的时间; $DIFS$  和  $SIFS$  的值由 PHY 层(DSSS 或 FSSS)确定; $W$  是平均等待和回退时间.

### 3.2 理想分组调度策略下的吞吐量上限

下面针对单条路径通过分析其空间重用度来描述计算该路径最优吞吐量的上限.路径的空间重用度定义为在  $T$  时间槽内可同时传输的数据报数量.

如图 3 所示,当路径上的中间节点 4 在转发数据报到下一跳结点 5 时,当前能允许的传输只能在节点 S 和节点 1 之间进行.这是因为节点 4 的载波侦听范围覆盖了节点 2 和 3.在理想调度策略下,所有的数据报都以均衡的步伐沿着路径传播,那么以流水线的形式每隔 4 跳就可并发传输.目的端的数据报到达时间间隔应该是  $4T$ ,此时路径的空间重用度达到 2.因此,单条路径的端-端吞吐量上限是:

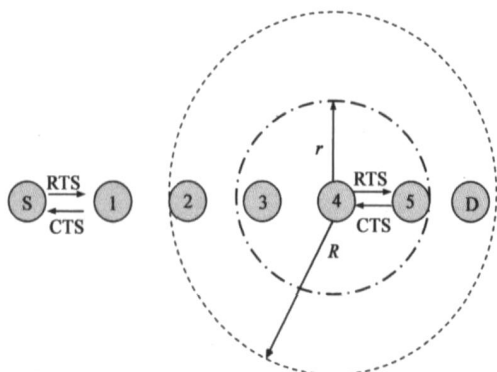


图 3 单条路径上空间重用度

$$TH^{upper} = \frac{E[P]}{\min(4, H_L) \times T} \quad (2)$$

其中:  $E[P]$  是数据载荷的平均长度;  $H_L$  是路径的跳数;  $T$  是两跳之间的单位传输时间, 由式(1)给出。

### 3.3 任意分组调度策略下的吞吐量下限

上面的实例表明为取得最优吞吐量, 每个节点的发送速率必须严格控制并小心调度, 这在实际环境下很难做到。例如, 在图 3 所示的网络中, 节点 1 准备转发报文给节点 2 节点 S 可能与节点 1 竞争信道。实际上节点 S 很有可能抓住信道, 这样节点 1 只能将数据报 1 和 2 排入发送队列。这部分我们将针对这种数据报的意外调度情况下路径的空间重用度进行讨论, 然后给出计算端-端吞吐量下限的计算方法。

如图 3 所示的网络中, 源端和目的端相隔 6 跳。源端的数据报发送间隔必须保持  $4T$  才能保证在时间  $6T$ 、 $10T$ 、 $14T$  和  $18T$  的空间重用度为 2, 目的端的数据报到达间隔是  $4T$ ; 当源端的发送速率超过最优值 ( $4T$ ), 由于源端与其他节点产生竞争而导致数据报的调度变得不可预测。受隐藏终端问题的影响路径的空间重用度降为 1。因此目的端的数据报到达时间间隔大于  $4T$ , 即吞吐量随数据报调度加快(或者发送速率增大)而下降。

为了计算端-端吞吐量的下限, 必须找出节点之间间隔多大的跳数才足以保证它们能同时传输数据报。正如上面分析的那样, 4 跳能保证在理想调度策略下的数据报并发传输; 但在任意调度策略下 4 跳是无法保证节点的并发传输, 而且 5 跳也不能保证所有场景下都能并发传输。

事实上整体看来, 当路径长度大于 6 跳时, 路径的空间重用度应该是 2。然而, 2.2 讨论的路径延迟时间必须加以考虑。因此, 吞吐量的下限可表示成:

$$Thr^{lower} = \frac{E[P]}{\min(H_L, 6) \times T + \max(H_L - 6, 0) \times T_{pdr}^{avg}} \quad (3)$$

其中:  $E[P]$  为数据载荷的平均长度;  $H_L$  是跳计数;  $T$  是两跳之间的单位传输时间;  $T_{pdr}^{avg}$  是平均路径延迟时间。

### 3.4 影响端-端吞吐量的因素分析

除了发送速率, 可获得的端-端吞吐量还依赖于 MAC 层机制和其他上层因素的相互作用。多路径和缓冲区大小这两个因素对吞吐量的影响较大。下面给出这种影响的解析表达或者直观解释。

#### (1) 多路径路由

源端和目的端之间存在多条路径可获得比单条路径更大的吞吐量。然而, 路径之间的干扰使得这种改进有一定的限制。

正如图 4 所示,

当节点 3 正在给节点 4 转发数据报, 节点 S 能否传输受到节点 1 和节点 5 竞争结果的制约。因此采用独立的多条路径并不能使吞吐量加倍。为了计算多路径的最大吞吐量, 必

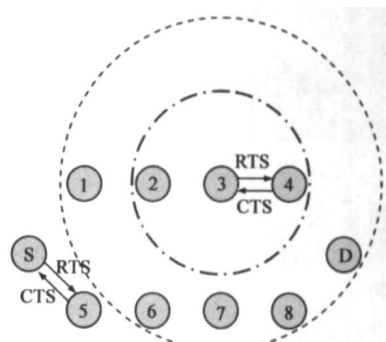


图 4 多路径上的最大空间重用度

须进行理想的数据报调度。源端每隔 3 跳发送一个数据报将负载分布在两条路径上, 从而使得目的端的到达时间间隔是  $3T$ 。

定理 1 给定源端和目的端之间一组独立的路径。当路径数是 2, 并且最长路径比最短路径不多于 3 跳时, 在理想调度策略下, 最大可获得吞吐量:

$$Th_m = \frac{E[P]}{\min(3, H_{minL}) \times T} \quad (4)$$

其中  $H_{minL}$  是最短路径的长度。比较式(2), 可以得出结论, 即理想调度策略下多路径可获得的吞吐量改进是 30%。

#### (2) 中间节点的缓冲区大小

式(3)基于这样的假设, 即中间节点的缓冲区足够长到能缓冲所有被延迟的数据报。事实上, 即使源端可连续往路径上发送数据报, 如果中间节点的缓冲区有限仍将制约端-端吞吐量。

当路径长度小于 4 跳时, 高发送速率导致的额外数据报在源端就被丢弃。从路径的角度看, 这种源端丢弃行为对整个路径的传输效率不会产生影响, 因此也不会对端-端吞吐量产生负面作用。然而, 当路径长度大于 4 跳时, 中间节点将因为隐藏终端问题而降低抓住路径的概率, 使得进入中间节点的数据报多于流出中间节点的数据报。因此, 如果过量的输入数据报导致中间节点的缓冲区溢出, 端-端吞吐量将急剧下降。从面向路径的角度看, 中间节点的丢包行为之所以降低了路径的传输效率主要原因在于丢包行为本质上浪费了传输这些数据报已消耗的时间。

#### 4 模拟结果与性能分析

我们采用 ns-2 模拟器<sup>[13]</sup>对本文提出的模型以及计算端端吞吐量的上下限计算公式进行了验证。模拟的拓扑结构是由均匀分布的静态站点组成的一个链。考虑到更加接近实际的情况,我们将传输半径设为 250 米,载波侦听半径设为 550 米,相邻节点距离 240 米。源端只产生 CBR 流量。当路径长度(即路由跳数)从 1 变化到 10 时,在目的端记录可达的吞吐量。结果图中每个数据点取 802.11DCF MAC 随机种子运行 10 次的平均值。

首先,在固定路径长度下调制源端的发送速率以期达到最大的端端吞吐量;然后,在同样固定路径长度下,源端以超过最优值的任意速率发送数据报,把目的端记录下获得的最大和最小吞吐量分别与采用式(2)和式(3)计算值比较。统计分析表明模拟结果与分析数据几乎达到 95% 的吻合(如图 5 所示)。因此,利用式(2)和(3)来估计无线多跳网络中端端吞吐量的上下限是精确的。

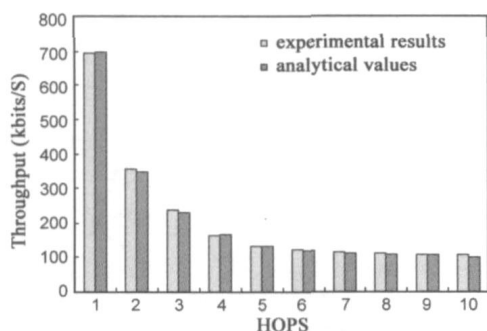


图 5 吞吐量的下限

然后,我们在 ns-2 上实现了 AOMDV<sup>[14]</sup>来验证多路径下的吞吐量估算。源端和目的端之间的两条路径独立,并且长度相等。我们的模拟场景是下列三种:

场景 I: 源端以交替传输模式地在两条路径上发送数据,发送时间间隔是 18.8ms,相当于最优发送间隔  $3 * T$ ; 场景 II: 数据报的调度模式与场景 I 相同,但是发送间隔为 6ms(超过了最优值,相当于等同  $T$ ); 场景 III: 发送间隔为 18.8ms,但是数据报的调度模式不同。源端沿着一条路径发送,直到发送失败才转而用另一条路径发送。

如图 6 所示,当路径长度大于 3 跳时,场景 II 和场景 III 的吞吐量远远低于场景 I。这说明数据报的调度以及发送速率对端端吞吐量的影响很大,根本原因在于隐藏终端破坏了空间的重用度。

正如在 3.4 讨论的那样,如果因为中间节点缓冲区溢出而导致数据报被丢弃,则端端吞吐量将急剧下降。为验证这个结论,我们比较了单条路径在三种不同条

件下的实验吞吐量: 最优发送速率下(谨慎调制发送速率保证达到几乎理想的数据报调度)、任意发送速率但不丢弃数据报、任意发送速率可丢弃数据报。模拟结果显示(篇幅有限省略了统计图示): 当路径长度小于 4 跳时,结果几乎是相同的。然而,在路径长度大于 4 跳时,数据报的丢失导致端端吞吐量的剧烈下降。发生数据报丢弃时的端端吞吐量最低,这和 3.4 的讨论完全一致。

从上面的模拟结果可以看出,在路径长度小于 4 跳时,跨层次的影响较小。但是,跨层次的影响不仅只对端端吞吐量而且对数据报的延迟抖动作用也不容小觑。为更好地理解这点,我们在路径长度为 3 时做这样的实验,分别以发送间隔为 6ms 和 18ms(最优发送间隔)发送 400 个数据报,在目的端记录数据报的到达时间间隔。图 7 给出了发送间隔为 18ms 下数据报的到达间隔分布。

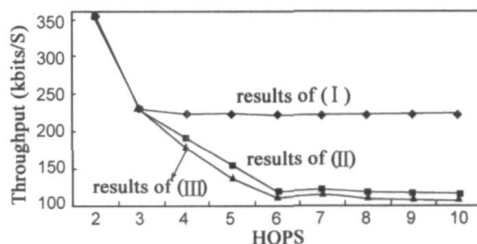


图 6 多路径下的吞吐量

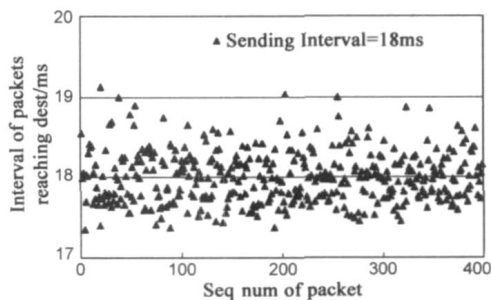


图 7 发送间隔为 18ms 时的数据报到达时间间隔分布

模拟结果显示: 虽然两种发送间隔下的平均到达间隔几乎相同(一个是 18.09547ms, 另一个是 18.0067ms),但发送间隔为 18ms 下的到达间隔分布优于 6ms 下的到达间隔分布。发送间隔为 6ms 下的到达间隔分布在 10ms 和 60ms 之间,变化较大。这样的延迟抖动对于视频和音频流媒体应用非常不利。另一方面,发送间隔为 18ms 下的到达间隔分布集中在 18ms 附近,变化非常小。平稳的延迟抖动是保障流媒体应用开展的基本条件。这个实验给了我们一个启示,那就是采用基于流量控制的路由协议有可能获得很好的网络性能。

#### 5 结论

本文的贡献在于采用跨层次的方法针对路径来分

析和计算无线自组织网络的端-端吞吐量. 我们的分析基于更加接近实际的假设: 节点的载波侦听范围大于其传输范围, 并且不要求数据报一定以理想策略调度. 关于 802.11 自组织网络, 我们得到几个有意义的结论:

(1) 如果路径长度小于 4 跳, 则端-端吞吐量仅取决于路径长度, 诸如数据报调度模式、数据报发送速率以及多路径路由等上层因素与吞吐量没有明显的关联.

(2) 当路径长度大于 4 跳, 发送速率和数据报调度将大大影响端-端吞吐量. 最坏情况下, 吞吐量的下降达到 30%.

(3) 多路径路由可改进端-端吞吐量, 但这种改进受到路径干扰的影响从而有限. 在理想的数据报调度策略下, 最大的改进为 30%; 而且, 增加路径的条数并不能改进吞吐量.

#### 参考文献:

- [1] Matthew S. Gast, 802.11 Wireless Networks: The Definitive Guide(影印版)[M]. 清华大学出版社, 2002.
- [2] B Bing. Measured performance of the IEEE 802.11 wireless LAN[A]. Proc LCN'99[C]. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 1999. 34-42.
- [3] Henrik Lundgren, Erik Nordström, Christian. Coping with communication gray zones in 802.11b based ad hoc networks[A]. Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Workshop on Wireless Mobile Multimedia, WOWMOM 2002[C]. New York, NY, USA: ACM Press, 2002. 49-55.
- [4] S Xu, T Saadawi. Does the IEEE 802.11 MAC protocol Work Well in Multihop Wireless Ad Hoc Networks[J]. IEEE Communication Magazine, 2001, 39(6): 130-137.
- [5] G Anastasi, E Borgia, M Conti, E Gregori. IEEE802.11 ad hoc networks: performance measurement[A]. Proceeding of IEEE ICDCS03[C]. Rhode Island USA, 2003. 758-783.
- [6] G Gaertner, V Cahill. Understanding link quality in 802.11 mobile ad hoc networks[J]. Internet Computing, IEEE, 2004, 8(1): 55-60.
- [7] G Bianchi. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function[J]. IEEE JSAC, 2000, 18(3): 535-547.
- [8] T C Hou, L F Tsao, H C Liu. Analyzing the Throughput of IEEE 802.11 DCF Scheme with Hidden Nodes[A]. Proceedings IEEE VTC[C]. Orlando, FL, USA, 2003. 2870-2874.
- [9] Ozdemir M, McDonald A B. Analysis of wireless ad hoc network performance: an M/MGI/1/K queueing model[A]. Proceedings of the 1<sup>st</sup> ACM International Workshop on Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc, Sensor, and Ubiquitous Networks[C]. New York, NY, USA: ACM Press, 2004. 107-111.
- [10] Fang Yue, McDonald A B. Theoretical network capacity of multihop wireless ad hoc networks[A]. Proceedings of the Sixth IEEE International Conference on Mobile and Wireless Communications Networks (MWCN 2004) [C]. Paris, France, 2004. 181-186.
- [11] Yong Shyang Liaw, Dadej A, Jayasuriya A. Throughput performance of multiple independent paths in wireless multihop network communications[A]. Proceedings of the 12<sup>th</sup> IEEE Conference on Communications[C]. Singapore: IEEE Communications Society, 2004. 4157-4161.
- [12] Liaw Y S, Dadej A, Jayasuriya A. Characterisation and throughput performance of multipaths in wireless multihop Networks[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Networks(ICON'04)[C]. Singapore, 2004. 780-784.
- [13] 徐雷鸣, 庞搏, 赵耀. NS 与网络模拟[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003.
- [14] Marina M K, Das S R. On demand multipath distance vector routing in ad hoc networks[A]. Proceedings of the 9<sup>th</sup> IEEE International Conference on Network Protocols[C]. Riverside, US, 2001. 14-23.

#### 作者简介:



刘永强 男, 北京大学计算机系博士毕业, 现在 NEC 中国研究院工作. 研究方向重点关注网络性能优化、分组调度算法及拥塞控制算法等. E-mail: lyq@net.pku.edu.cn



严伟 女, 北京大学计算机系副教授. 一直致力于下一代互联网 QoS、无线移动自组织网络的路由协议、拥塞控制及网络性能优化等方面的研究.



赵通 男, 北京大学计算机系讲师. 主要从事无线多跳网络的可用容量、路径带宽等性能优化的理论研究工作.