

## 移动自组网基于邻居变化率稳定路径选择方法\*

蔡一兵<sup>1,2+</sup>, 李海波<sup>1</sup>, 李忠诚<sup>1</sup>, 谢高岗<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(中国科学院 计算技术研究所 信息网络室,北京 100080)

<sup>2</sup>(中国科学院 研究生院,北京 100049)

### A Method of Selecting Steady Path Based on Neighbor Change Ratio in Mobile Ad Hoc Networks

CAI Yi-Bing<sup>1,2+</sup>, LI Hai-Bo<sup>1</sup>, LI Zhong-Cheng<sup>1</sup>, XIE Gao-Gang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(Information Network Division, Institute of Computing Technology, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

<sup>2</sup>(Graduate School, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-10-62565533 ext 9206, E-mail: cyb@ict.ac.cn

Cai YB, Li HB, Li ZC, Xie GG. A method of selecting steady path based on neighbor change ratio in mobile ad hoc networks. *Journal of Software*, 2007,18(3):681–692. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/681.htm>

**Abstract:** Node mobility is one of the dominant factors causing decreased performance in mobile ad hoc networks and restricting network scalability. Selecting stable paths is an effective way to reduce the impact of node mobility. Current methods of selecting stable paths in mobile ad hoc networks suffer from several shortcomings. They may need a hardware function support for geographical position location or cross-layer function support for sending signal strength information to upper layers. In this paper, a new method of selecting stable paths based on the neighbor change ratio is proposed. Neither the special hardware support nor the cross-layer support is needed in this new method. NCR-AODV (neighbor change ratio Ad hoc on-demand distance vector) routing protocol is an extension of the AODV (Ad hoc on-demand distance vector) on-demand route protocol with the new method. The new protocol selects the path which has smaller hop counts and less local topology changes to forward data. The simulation results show that NCR-AODV protocol decreases the long path break probability and improves the network performance.

**Key words:** mobile ad hoc network; routing protocol; path stability; route metrics

**摘要:** 节点移动是导致移动自组织网络性能下降、限制网络规模扩展的关键因素之一.寻找稳定路径是减小节点移动影响的有效手段.现有的稳定路径寻找方法存在以下局限:需要节点具有地理位置定位的硬件功能支持,或需要信号强度上传的交叉层功能支持.为此,提出了不需要特殊硬件支持、可独立于底层协议工作、基于邻居变化率

---

\* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60403031 (国家自然科学基金); the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2005AA121560 (国家高技术研究发展计划(863)); the Fundamental Research Project of the Institute of Computing Technology, the Chinese Academy of Sciences (中国科学院计算技术研究所基础研究项目); the Youth Innovation Foundation of the Institute of Computing Technology, the Chinese Academy of Sciences (中国科学院计算技术研究所青年创新基金)

Received 2005-11-30; Accepted 2006-06-09

的稳定路径选择方法.以 AODV(Ad hoc on-demand distance vector)按需路由协议为基础,扩展为 NCR-AODV (Neighbor change ratio Ad hoc on-demand distance vector)路由协议.新协议选择转发跳数少并且局部拓扑变化小的路径进行数据转发.仿真结果表明,NCR-AODV 协议减小了长路径中断概率,提高了网络性能.

关键词: 移动自组织网络;路由协议;路径稳定性;路由度量

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

移动自组织网络是由移动节点构成的无中心、自组织网络,节点通过无线多跳方式进行数据转发.节点移动是导致网络性能下降、限制网络规模扩展的关键因素之一<sup>[1]</sup>.已经建立的数据传输路径经常因为节点移动而中断.频繁的路由修复,消耗了移动自组织网络有限的网络资源.上游节点丢弃路由修复超时的数据分组,降低了数据分组投递率.路由修复时延加大了整个端到端分组传输时延.路径中断概率随转发跳数增加而变大,引起网络性能进一步恶化,影响了网络规模的扩展.近几年来,随着无线通信和移动终端技术的发展,包含大量移动节点的移动自组织网络的商业应用需求已经成为可能.因此,最大限度地减少节点移动造成的路径中断次数,对网络性能提高,尤其是大规模移动自组织网络扩展具有非常重要的意义.

选择稳定路径进行数据转发是降低节点移动影响的有效方法之一.现有的稳定路径选择方法分为两类:节点位置法<sup>[2-4]</sup>和节点接收信号强度法<sup>[5-7]</sup>.节点位置法将 GPS(global positioning system)定位信息附带在数据分组中,用于预测与相邻节点的链路有效期,选择最稳定路径,并在链路中断前重构转发路径.该方法需要 GPS 硬件功能支持,考虑到耗电、体积、成本、节点复杂性等因素,更适合军用移动自组织网络.节点接收信号强度法根据节点接收到的信号强度预测链路稳定性,转发路径只有在接收信号强度大于门限值时才允许建立,并在链路中断前主动进行路径重建.该方法需要交叉层功能支持,在实际设计中,有时难以从底层协议获取接收信号强度信息.目前,移动自组网路由协议大多数采用跳数作为路由度量选择最短路径.研究表明:移动环境下跳数度量实现简单、直接,但该度量本身不反映路径的稳定性<sup>[2]</sup>.

为此,本文提出了一种能够反映节点局部拓扑变化的稳定路径选择方法.该方法不需要地理位置定位硬件功能支持,可独立于底层协议工作.其基本思想是:节点周期性发送 hello 分组以检测节点本地连接性;通过比较不同时期的节点邻居集的差异,计算节点的邻居变化率,感知节点局部拓扑变化程度;路由形成时尽可能避免局部拓扑变化频繁的节点参与新路由,节点根据不同路径上各节点的邻居变化率的累乘值,选择转发跳数小且沿途局部拓扑变化小的路径作为转发路径.仿真结果表明:基于邻居变化率的稳定路径选择方法减小了长路径中断概率,改善了网络性能.

本文第 1 节提出基于邻居变化率的稳定路径选择方法.第 2 节结合新方法对 AODV 按需路由协议进行扩展.第 3 节对扩展 AODV(Ad hoc on-demand distance vector)路由与标准 AODV 路由进行仿真性能评估.最后是本文的结论.

## 1 基于邻居变化率的稳定路径选择方法

基于邻居变化率的稳定路径选择方法包括邻居变化率路由度量定义和节点邻居变化率检测机制两部分.

### 1.1 邻居变化率路由度量 $NCR_{path}$ 定义

设移动区域内随机分布  $N$  个节点,每个节点具有唯一标识,节点间通过无线多跳方式组网通信.移动自组织网络的  $t$  时刻拓扑图可用有向图  $G(t)=\langle V,E(t)\rangle$  表示,其中: $V=\{1,2,\dots,N\}$  表示节点集合; $E(t)=\{e_1,e_2,\dots,e_m\}$  表示  $t$  时刻无线链路集合.如果节点  $i$  可以收听到节点  $j$  发送的信号,则节点  $i,j$  之间存在有向边  $e(i,j)$ ,节点  $j$  是节点  $i$  的邻居.节点  $i$  的所有邻居构成节点  $i$  的邻居集.

节点  $i$  的邻居变化率定义如下:设  $t_1$  时刻节点  $i$  的邻居集为  $S_{i-t_1}$ ,  $t_2$  时刻邻居集为  $S_{i-t_2}$ ,  $t_2-t_1=T$ ,则

$$NCR_i = \frac{|S_{i-t_1} \cap S_{i-t_2}|}{|S_{i-t_1} \cup S_{i-t_2}|} \quad (1)$$

$NCR_i$ 反映了与节点  $i$  相关的无线链路的通断变化。 $NCR_i$  越大,表明节点  $i$  局部拓扑越稳定; $NCR_i$  越小,表明节点  $i$  局部拓扑变化越剧烈。在节点  $i$  移动且周围节点静止、节点  $i$  静止且周围节点移动的极端情况下, $NCR_i$  值都小。

源节点和目的节点之间可能存在多条路径。路由计算节点(源节点或目的节点)选择相对稳定的路径进行数据转发。确定相对稳定路径时考虑以下因素影响:1) 尽可能选择局部拓扑变化小的节点参与数据转发,避免局部拓扑变化激烈节点参与数据转发。路径中局部拓扑变化大的节点越多,路径发生中断的概率越大;2) 尽可能选择短路径。一方面,移动自组织网络拓扑动态变化,长路径发生中断的概率比短路径大;另一方面,移动自组织网络采用多跳共享窄带无线信道,长路径的端到端通信性能(如分组投递率、时延等)通常比短路径要差。

基于以上考虑,邻居变化率的路由度量定义为

$$NCR_{path} = \prod_{i \in path} NCR_i \tag{2}$$

$NCR_{path}$  是路径沿途各节点的邻居变化率的乘积。路由计算节点选择  $NCR_{path}$  值最大的路径进行数据转发。

采用式(2)的累乘处理方法,可以避免局部拓扑变化激烈的节点参与数据转发。如果节点  $i$  的邻居变化率  $NCR_i$  为 0,说明节点  $i$  的局部拓扑变化激烈。即使该条路径上的其余节点相对稳定且跳数相对小,路由计算节点也应该避免选择这条路径。如果采用累加处理方法,路由计算节点无法根据  $NCR_{path}$  数值判断路径是否包含局部拓扑变化激烈的节点;如果采用累乘处理方法,路由计算节点通过  $NCR_{path}=0$  即可推断路径包含了局部拓扑变化激烈的节点。

此外,利用节点邻居变化率  $NCR_i$  在[0,1]区间取值的特性,采用累乘处理方法,路由计算节点将趋向选择路径较短并且沿途局部拓扑变化小的路径。如果用累加处理方法代替累乘处理方法,路由计算节点将趋向选择长路径。两种处理方法的差异可用如图 1 所示的简单例子加以说明。图 1 的源节点和目的节点间存在两条路径。表 1 给出两种处理的结果。采用累加处理方法,目的节点将选择 Path1: $ns \rightarrow n1 \rightarrow n2 \rightarrow n3 \rightarrow nd$ 。采用累乘处理方法,目的节点将选择 Path2: $ns \rightarrow n4 \rightarrow n5 \rightarrow nd$ 。

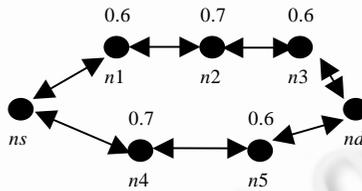


Fig.1 Network topology

图 1 网络拓扑

Table 1 Comparison of two route metrics

表 1 路由度量处理方法比较

Path	$\prod_{i \in path} NCR_i$	$\sum_{i \in path} NCR_i$
Path1: $ns \rightarrow n1 \rightarrow n2 \rightarrow n3 \rightarrow nd$	0.252	1.9
Path2: $ns \rightarrow n4 \rightarrow n5 \rightarrow nd$	0.42	1.3

1.2 节点邻居变化率 $NCR_i$ 检测机制

节点通过周期性广播 hello 消息获得局部拓扑连接信息,从中提取节点的邻居变化率  $NCR_i$ 。文献[8]指出: IEEE802.11MAC 协议的一跳单播分组投递率为 99.8%;一跳广播分组投递率仅为 92.6%。因此,设计节点邻居变化率检测机制时,应考虑 MAC 层不可靠广播分组传输的影响。具体机制包括:

- 局部拓扑连接获取:每隔  $hello\_interval$  周期,节点检查上个  $hello\_interval$  周期是否发送过广播分组。如果没有发送,则广播一个  $TTL=1$  的 hello 消息。节点通过收听邻居发送的广播分组检测局部拓扑连接,维护邻居集。

如果在过去的  $allow\_hello * hello\_interval$  周期内,节点没有收到某个邻居的任何广播分组(包括 hello 消息),节点认为与该邻居连接已经中断,将该节点从邻居集中删除;

- 节点邻居变化率计算:修正邻居变化率的邻居集统计方法,通过延长邻居集观察周期,减小 hello 广播消息 MAC 层不可靠传输对邻居变化率的影响.设  $Si_{t_1}$  为  $[t_1 - allow\_hello * T, t_1]$  时间段内所有出现过的邻居节点,  $Si_{t_2}$  为  $[t_2 - allow\_hello * T, t_2]$  时间段内所有出现过的邻居节点,  $t_2 - t_1 = T, T = hello\_interval$ .  $NCR_i$  计算同式(1).

MAC 层广播分组的不可靠传输和节点移动是 hello 消息丢失的两个主要原因.上述原因直接影响  $allow\_hello$  参数设置,进而影响节点邻居变化率计算值和路由性能.如果  $allow\_hello$  参数设置得太小,将无法减小 MAC 层广播消息不可靠传输的影响;如果  $allow\_hello$  参数设置得太大,则又无法及时反映因节点移动导致节点局部拓扑的变化.本文采用仿真方法,通过对比不同  $allow\_hello$  参数值对应的路由性能来确定最佳  $allow\_hello$  参数值.当  $allow\_hello = 3$  时,路由性能最优.

## 2 NCR-AODV 协议

为了评估基于邻居变化率的稳定路径选择方法,对 AODV 协议<sup>[9]</sup>进行扩展.扩展后协议简称为 NCR-AODV 协议.与 AODV 协议的主要区别为: RREQ(route request)分组中增加邻居变化率路由度量  $NCR_{path}$  字段,中间节点转发 RREQ 分组时按照式(2)更新该字段; 为避免邻居变化率过时问题,不允许存在到达目的节点路由的中间节点直接回复 RREQ 分组; 当后续收到的 RREQ 分组的序列号相同但  $NCR_{path}$  值更大时,才允许中间节点转发重复 RREQ 分组; 节点更新路由表项的条件为目的序列号更大,或者目的序列号相同但  $NCR_{path}$  值更大.

NCR-AODV 协议的路由发现和维护过程如下:

当源节点想与某个目的节点通信而又没有相应路由信息时,启动路由发现过程.源节点广播 RREQ 分组,RREQ 分组包括源节点和目的节点地址、序列号、跳数和邻居变化率路由度量  $NCR_{path}$  等字段.源节点将 RREQ 分组的只允许目的节点回复 RREQ 分组的标志位设置为有效,禁止存在到达目的节点路由的中间节点直接回复 RREP(route request reply)分组.

中间节点收到第 1 个 RREQ 分组后,根据收到的 RREQ 分组记录当前  $NCR_{path}$  值,建立到源节点的反向路由.反向路由的目的节点是生成 RREQ 分组的源节点,下一跳节点是将 RREQ 分组发送给本节点的邻居节点.然后向周围邻居广播转发 RREQ 分组,直到 RREQ 分组到达目的节点.节点在转发 RREQ 分组过程中可能会收到来自不同邻居的同一 RREQ 分组的多个副本.对后续收到的重复 RREQ 分组,只有在序列号相同并且  $NCR_{path}$  值更大时,中间节点才更新路由表并转发 RREQ 分组.

当第 1 个 RREQ 分组到达目的节点时,目的节点建立到源节点的反向路由,并发送一个 RREP 单播分组给 RREQ 分组的发送者.目的节点可能会收到来自同一源节点的多个 RREQ 分组.如果后续收到的 RREQ 分组的序列号更大,或者序列号相同但  $NCR_{path}$  值更大时,目的节点修改反向路由表项,并再次发送 RREP 分组.RREP 分组沿着刚刚建立的反向路由向源节点传送,收到 RREP 分组的节点将建立到目的节点的转发路由.转发路由的目的节点是 RREP 分组的生成节点,下一跳是将 RREP 分组发送给本节点的邻居节点.NCR-AODV 只允许目的节点向源节点回复 RREP 分组以响应 RREQ 分组,不允许中间节点直接响应 RREQ 分组.

当一个已经建立的路径由于节点移动导致路径中断时,中断链路上游节点发送 RREQ 分组进行局部路由中断修复.如果中断链路上游节点在一定时间内没有收到目的节点回复的 RREP 分组,则中断节点发送 RERR(route error)分组给源节点,由源节点判断是否重新发起路由发现过程.由于禁止中间节点直接回复 RREP 分组,只允许目的节点回复 RREP 分组,因此可保证中断节点到目的节点之间修复路径的稳定性.

下面进一步讨论  $NCR_{path}$  值为 0 时的路由选择策略.假设目的节点陆续收到多个目的序列号相同但来自不同反向路由的 RREQ 分组,分以下 4 种情况进行讨论:

- 1) 如果首次收到的 RREQ 分组的  $NCR_{path}$  值不为 0,后续收到的 RREQ 分组的  $NCR_{path}$  值为 0,则目的节点不会更改路由,从而避免路径中出现邻居变化率为 0 的节点.

2) 如果首次收到的 RREQ 分组的  $NCR_{path}$  值为 0, 后续收到的 RREQ 分组的  $NCR_{path}$  值不为 0, 则目的节点将当前路径更改为后面接收的 RREQ 分组对应的路径. 同样, 也可避免路径中出现邻居变化率为 0 的节点.

3) 如果首次收到的 RREQ 分组的  $NCR_{path}$  值为 0, 后续收到的 RREQ 分组的  $NCR_{path}$  值也为 0, 则目的节点将保持现有路径不变. 在这种情况下, 目的节点先收到的 RREQ 分组对应路径的端到端时延通常小于后面收到的 RREQ 分组对应路径的端到端时延.

4) 如果收到的 RREQ 分组的  $NCR_{path}$  值都不为 0, 则只有在后续 RREQ 分组的  $NCR_{path}$  值更大时, 目的节点才更改路由.

上面 4 种情况均可归纳为: 节点更新路由由表项的条件为目的序列号相同, 但  $NCR_{path}$  值更大.

### 3 性能评估

#### 3.1 仿真场景设置

本文在网络仿真平台 NS2.28<sup>[10]</sup> 提供的 AODV 源码基础上实现了 NCR-AODV 路由协议. AODV 和 NCR-AODV 的数据发送缓冲区大小为 64 个数据分组, 用于缓存等待路由的数据分组. 数据分组和路由控制分组缓存在接口队列等待 MAC 层发送, 接口队列最多存放 50 个分组. MAC 层采用 IEEE802.11 DCF, 传输速率为 2Mbps, 节点发送范围为 250m, 干扰范围为 550m. 节点移动模型采用随机移动(random way-point)模型<sup>[11]</sup>: 每个节点停留预设停滞时间(pause time)后, 在规定的移动区域内随机选择一个目的位置, 然后在  $[0, \text{maxspeed}]$  速度区间内随机选择一个速度, 按该速度恒定移向目的位置. 节点到达目的位置后, 停留预设停滞时间, 然后重新选择新的目的位置和移动速度, 如此反复. 节点邻居变化率  $NCR_i$  检测机制的  $\text{allow\_hello}$  参数设置为 3,  $\text{hello\_interval}$  参数设置为 1s. 仿真时间为 900s, 每种仿真场景随机重复 5 次, 取平均值作为最终测试结果.

本文采用了两种网络场景: 长路径网络场景和通用网络场景.

长路径网络场景与文献[7]类似(如图 2 所示), 具体设置如下: 网络由 50 个移动节点和 10 个静止节点组成. 50 个移动节点在  $1500 \times 900\text{m}^2$  的矩形区域按照随机移动模型移动, 停滞时间为 0s, 节点最大移动速度设置为 0.5, 10, 15, 20 米/秒. 10 个静止节点作为 CBR 流的源节点或者目的节点, 放置在矩形区域的边缘, 在仿真过程中始终保持静止. 设置 3 种流量场景: 第 1 种场景只在 2 个静止节点间建立一对 CBR 流; 第 2 种场景在 6 个静止节点间建立 3 对 CBR 流; 第 3 种场景在 10 个静止节点间建立 5 对 CBR 流. CBR 分组大小为 512bytes, 发送速率为 4 分组/s. 长路径网络拓扑场景的主要仿真参数见表 2.

通用网络场景设置与文献[1]相同, 具体设置为: 网络由 50 个移动节点组成, 在  $1500 \times 900\text{m}^2$  的矩形区域内按照随机移动模型移动. 节点最大速度为 20m/s, 停滞时间分别为 0s, 50s, 100s, 150s, 200s, 250s 和 300s, 共设 7 种移动场景. 设置 40 对 CBR 业务流, CBR 分组大小为 512bytes, 发送速率为 4 个分组/s, 用于模拟网络负载很重的应用场景.

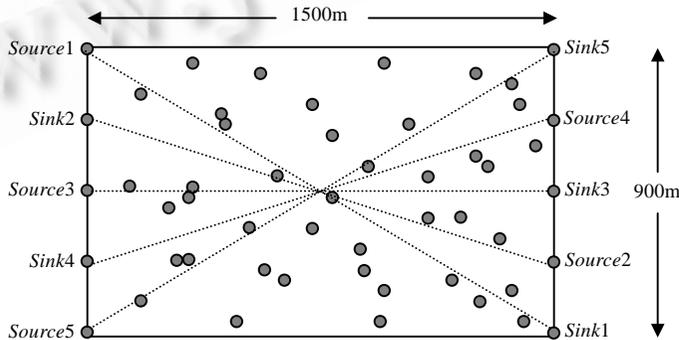


Fig.2 Long path simulation scenario

图 2 长路径网络场景图

**Table 2** Simulation parameters summary of long path simulation scenario**表 2** 长路径网络场景仿真参数摘要

Parameter	Value
Simulation time (s)	900
MAC layer	IEEE802.11 DCF
Channel bandwidth (Mbps)	2
Transmission range (m)	250
Simulation area (m <sup>2</sup> )	1500×900
Number of Static node	10
Number of Mobile node	50
Pause time (s)	0
Maximum speed (m/s)	0,5,10,15,20
Application	CBR
Packet size (bytes)	512
Number of CBR flows	1,3,5
allow_hello (s)	3
hello_interval (s)	1

在长路径网络场景中,源节点和目的节点位置固定,节点间平均距离为 8 跳.长路径网络场景用于观察网络规模扩展对路由性能的影响.在通用网络场景中,源节点和目的节点位置不固定,并设置了网络负载很重的应用场景.NCR-AODV 路由协议需要周期性地广播 hello 消息,会加重网络的负载.通用网络场景用于研究重网络负载对路由性能的影响.

### 3.2 性能评估指标

采用路径中断次数、归一化路由开销、数据分组投递率、端到端时延、端到端时延抖动对 AODV 和 NCR-AODV 进行比较.前两个指标用于反映路由对动态网络拓扑的适应性;后 3 个指标用于反映路由对网络性能的影响.各指标说明如下:

- 1) 路径中断次数:是指仿真期间路径各节点发现链路中断的总次数.中断次数越少,说明路由选择的转发路径的稳定性越好.该指标直接反映了路径稳定性.
- 2) 归一化路由开销:为成功发送一个数据分组到目的节点而发送的路由控制分组的个数.该参数用于评估路由控制开销,并间接反映动态环境下路径稳定性.
- 3) 端到端分组投递率:目的节点接收分组的个数与源节点发送分组的个数的比值.该参数综合反映了数据分组传输过程中路径中断修复、发送缓冲区溢出、接口队列溢出、MAC 分组冲突等因素对端到端分组投递率的影响.
- 4) 数据分组端到端时延:目的节点的分组接收时间与源节点的相应分组发送时间的平均差值.该参数包括了所有可能的时延:源节点路由发现时延、路径中断修复时延、多跳转发时延、接口排队时延、MAC 层分组重传时延、链路传播时延等.
- 5) 数据分组端到端时延抖动:目的节点接收的两个连续分组的端到端时延的差值.对于时延抖动敏感的多媒体业务,这是非常重要的指标.

### 3.3 仿真结果分析

#### 3.3.1 长路径网络场景仿真结果

综合观察图 3(a)、图 4(a)、图 5(a)、图 6(a)、图 7(a),在速度为 0m/s 的静止场景下,AODV 和 NCR-AODV 的路由性能基本相同;在速度不为 0m/s 的运动场景下,两种路由性能发生明显变化.为了更清晰地描述运动场景下路由性能的变化程度,图 3(b)、图 4(b)、图 5(b)、图 6(b)、图 7(b)给出以 AODV 路由性能为基准,NCR-AODV 在运动场景下路由性能改善的比例.

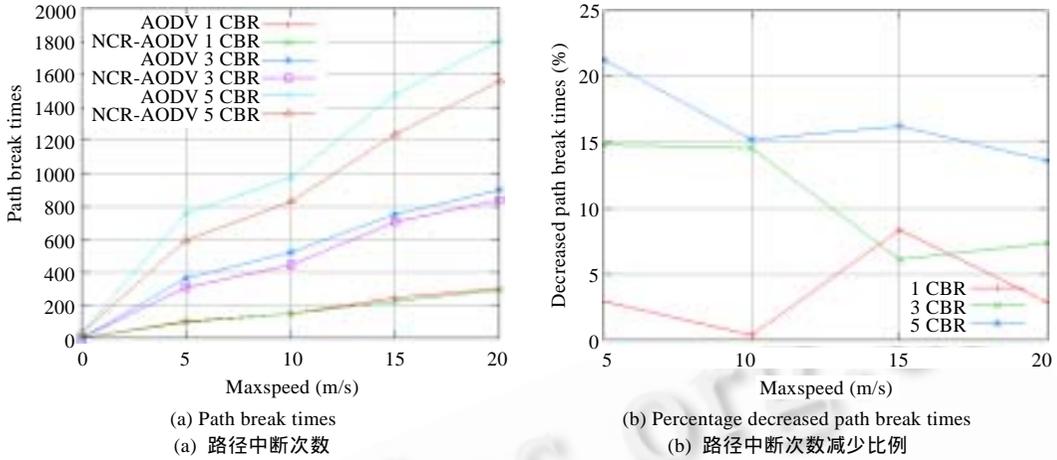


Fig.3 Simulation results of path break times for long path simulation scenario

图 3 长路径网络场景路径中断次数仿真结果

观察图 3(a)可以看到以下规律: 节点速度为 0m/s 时,3 种流量场景的路径中断次数基本接近.当节点速度逐步增加到 20m/s 时,3 种流量场景的路径中断次数持续上升,相互间差距迅速拉大,但每对 CBR 流的平均路径中断次数基本接近.这表明:节点移动是引起路径中断的主要因素,网络负载增加引起的 MAC 层分组发送失败是导致路由中断的次要因素; 在速度不为 0m/s 的运动场景下,NCR-AODV 路径中断次数均小于 AODV 路径中断次数,最大减少比例为 22%.NCR-AODV 采用累乘法计算邻居变化率路由度量,并且不允许存在到达目的节点路由的中间节点直接回复 RREQ 分组,保证了源节点和目的节点之间始终选择转发跳数小且沿途局部拓扑变化小的路径作为转发路径,从而减少了路径中断的次数.

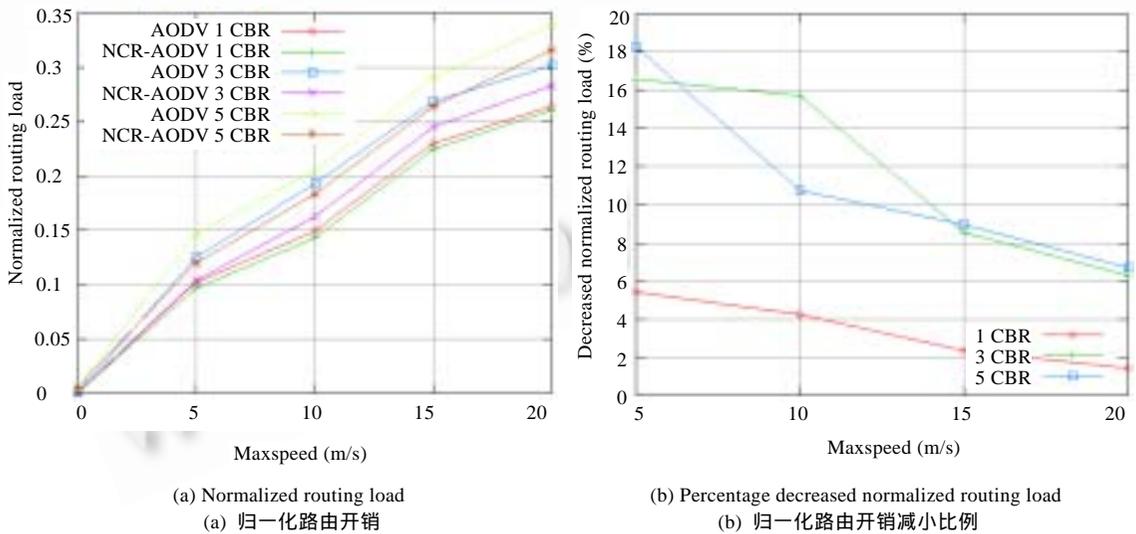


Fig.4 Simulation results of normalized routing load for long path simulation scenario

图 4 长路径网络场景归一化路由开销仿真结果

观察图 4(a)可以看到以下规律: 节点速度为 0m/s 时,3 种流量场景的归一化路由开销基本相同;当节点速度逐步增加到 20m/s 时,3 种流量场景的归一化路由开销持续上升,相互间差距迅速拉大.这表明节点移动速度的增加导致路径中断次数的增加,进而使路由中断修复的开销也增加; 在速度不为 0m/s 的运动场景

下,NCR-AODV 归一化路由开销均小于 AODV 归一化路由开销.观察图 4(b),对于 3 对流和 5 对流,归一化路由开销减小幅度达到 6%~18%.

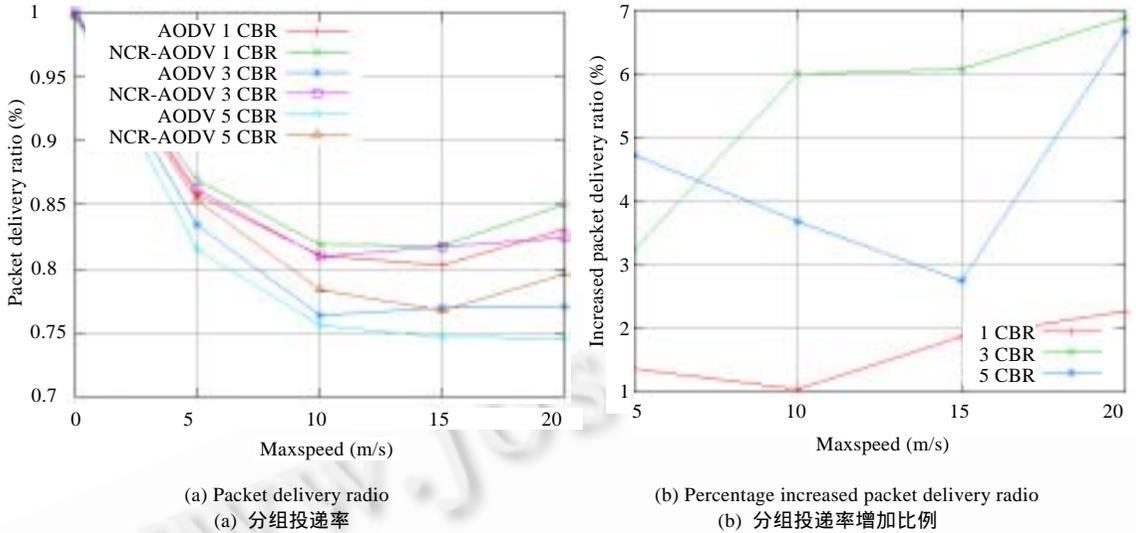


Fig.5 Simulation results of packet delivery ratio for long path simulation scenario

图 5 长路径网络场景分组投递率仿真结果

观察图 5(a)可以看到:在运动场景下,分组投递率随 CBR 流数量的增加而下降,在静止场景下基本保持不变.这说明:移动是引起分组投递率下降的主要因素;由 CBR 流增加引起的 MAC 分组冲突是次要因素.在运动情况下,NCR-AODV 的分组投递率均大于 AODV 的分组投递率.3 对 CBR 流和 5 对 CBR 流的分组投递率提高了 2.8%~6.8%.NCR-AODV 和 AODV 路由由协议采用相同分组缓存策略:中断路径上游节点缓存没有有效路由的数据分组.如果路由超时未修复,上游节点将丢弃相应数据分组.NCR-AODV 减小了路径中断次数,从而减小了因路径中断而丢弃的数据分组数,提高了分组投递率.

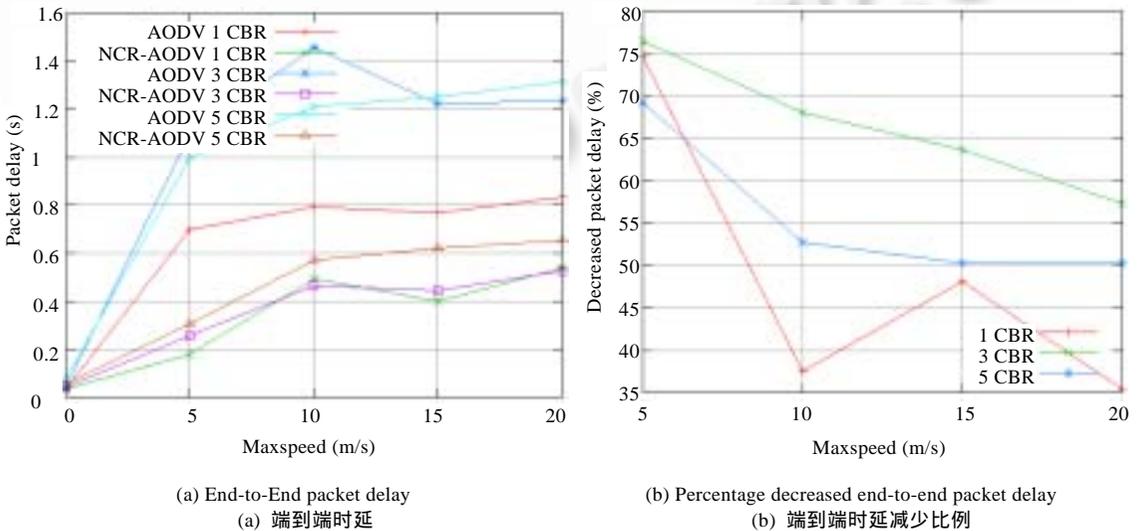


Fig.6 Simulation results of end-to-end packet delay for long path simulation scenario

图 6 长路径网络场景端到端时延仿真结果

从图 6(a)可观察到:节点速度为 0m/s 时,3 种流量场景的端到端时延基本接近;当节点速度从 0m/s 变化到

5m/s 时,端到端时延迅速增大,并且相互间差距也迅速拉大.网络从静止到运动端到端时延增加的主要原因是增加了路径中断修复时延.3 种流量场景的端到端时延相互间差距迅速拉大的原因,可能是路径中断修复增加了网络负载,导致 MAC 层分组重发时延变大.在运动场景下,NCR-AODV 的时延均小于 AODV 时延,并且改善非常明显.在 3 对 CBR 流和 5 对 CBR 流场景下,时延缩短了 50%~77%.时延显著改善的原因在于:NCR-AODV 减少了路径中断次数,导致路径中断修复操作减少,进而减小了路径中断修复时延和 MAC 分组重发时延.另外,AODV 虽然在路由发现时选择短路径,但是本地路由修复有时会导致路径变长<sup>[9]</sup>.而 NCR-AODV 采用累乘方法选择短路径,并禁止中间节点直接回复 RREQ 分组,由此避免了本地路由修复的路径变长问题,使得 NCR-AODV 的多跳转发时延小于 AODV 的多跳转发时延.路径中断修复时延、MAC 分组重发时延和多跳转发时延的减小,使得 NCR-AODV 的端到端时延减小改善显著.

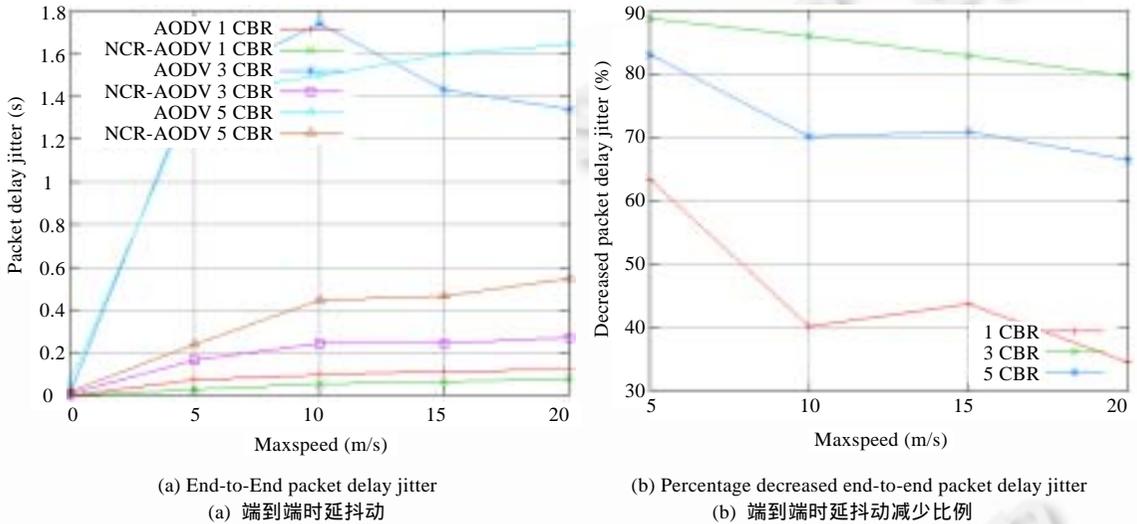


Fig.7 Simulation results of end-to-end packet delay jitter for long path simulation scenario

图 7 长路径网络场景端到端时延抖动仿真结果

从图 7(a)可观察到:在运动场景下,AODV 路由的端到端时延抖动随 CBR 流数的增加而迅速增加.一对 CBR 流的端到端时延抖动区间为 $[0.0008s, 0.12s]$ ,5 对 CBR 流的端到端时延抖动区间为 $[1.4124s, 1.74034s]$ .对于时延抖动敏感的多媒体业务,上述变化是难以容忍的.NCR-AODV 有效降低了端到端时延抖动,5 对 CBR 流的端到端时延抖动区间为 $[0.239276s, 0.549931s]$ ,减小幅度为 68%~83%.NCR-AODV 选择相对稳定的转发路径,减小了数据分组端到端时延,有助于端到端时延抖动的减小.

### 3.3.2 通用网络场景仿真结果

图 8 组图为 AODV 和 NCR-AODV 在通用网络场景下仿真结果,横坐标代表随机移动模型的停滞时间,纵坐标代表相应性能评估指标.图 8(a)的纵坐标代表路径中断次数,从该图可观察到以下规律:随着停滞时间的减小,AODV 协议和 NCR-AODV 协议的路径中断次数增加.在节点最大移动速度相同的情况下,停滞时间越小,网络拓扑变化越激烈,使得路径中断次数增加; NCR-AODV 协议的路径中断次数小于 AODV 协议的路径中断次数.图 8(b)的纵坐标代表归一化路由开销,从该图可以看到:采用邻居变化率路由度量后,为成功发送一个数据分组而用于路由发现和维持的控制分组个数,与标准 AODV 相比明显减少,最大减小幅度为 11%.图 8(c)的纵坐标代表端到端分组投递率,从该图可以看到:NCR-AODV 协议的端到端分组投递率都比 AODV 协议要好,最大改善幅度为 3%.图 8(d)的纵坐标代表端到端时延,与 AODV 的端到端时延相比,大部分情况下,NCR-AODV 协议的端到端时延减小了近 0.1s.图 8(e)的纵坐标代表端到端时延抖动,从图中可以看到:NCR-AODV 协议的端到端时延抖动比 AODV 端到端时延抖动要小,但改善幅度不太明显.

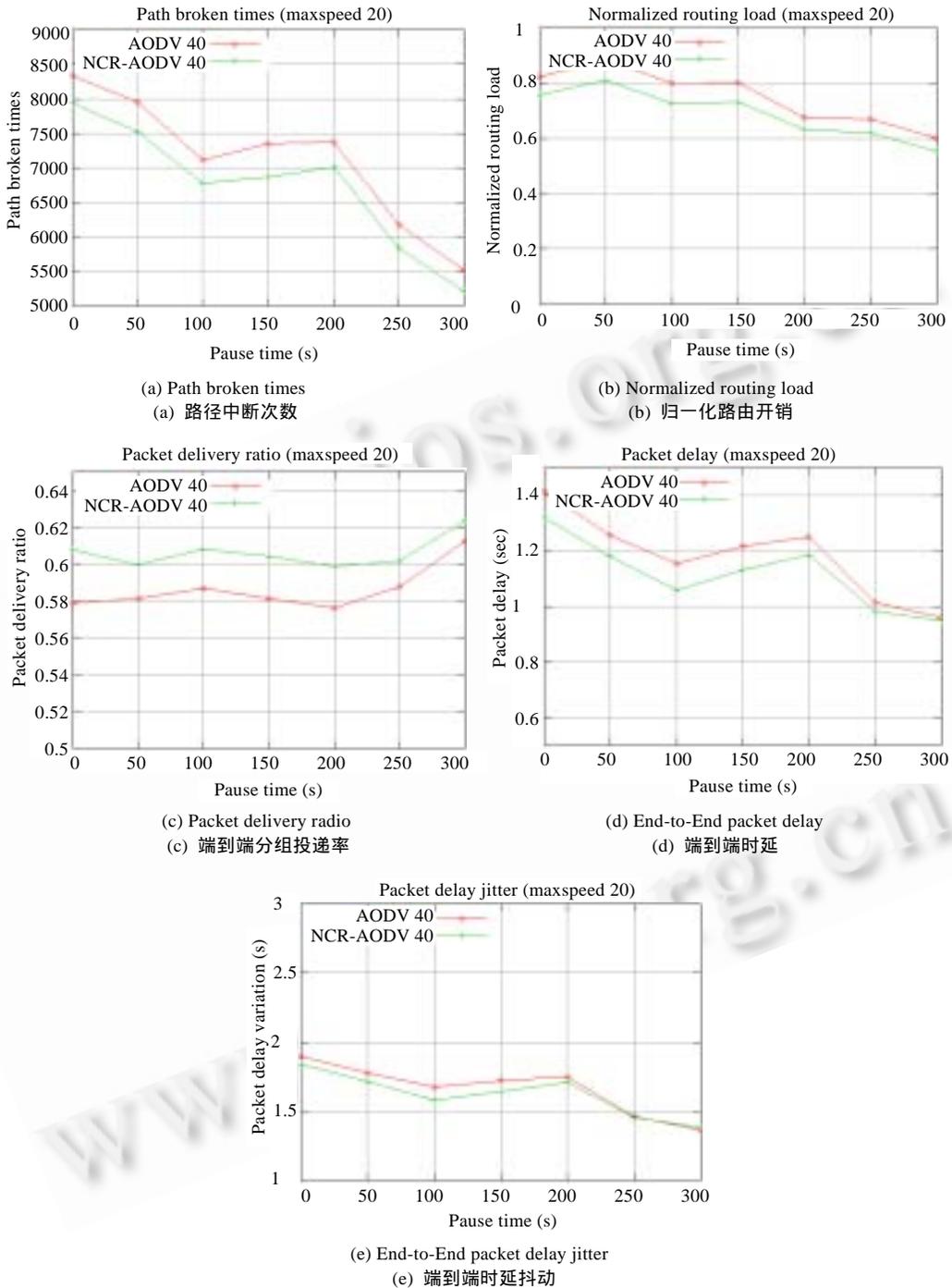


Fig.8 Simulation results for general simulation scenario

图 8 通用网络场景仿真结果

3.3.3 两种网络场景仿真结果对比

对比长路径网络场景和通用网络场景的仿真结果,可以得到以下结论:

- (1) 在长路径网络场景下,NCR-AODV 路由协议具有较好的网络规模扩展性.NCR-AODV 可以有效地减小

路径中断次数(最大减小比例为 22%),降低路由控制开销,提高端到端分组投递率.在端到端时延和时延抖动方面,改善幅度尤其明显.5 对 CBR 流的端到端时延减小幅度为 51%~69%,端到端时延抖动减小幅度为 68%~83%.

(2) 在通用网络场景下,NCR-AODV 路由协议具有较好的网络负载适应性.在重网络负载情况下,NCR-AODV 性能均比 AODV 性能要好.虽然 NCR-AODV 需要周期性发送 hello 消息,增加了网络负载,但在重网络负载情况下,并未引起路由性能恶化(与 AODV 相比),反而通过相对稳定路径的选择,减小了路由中断修复开销,弥补了周期性发送 hello 消息带来的额外开销,并且改善了端到端分组投递率、端到端时延和时延抖动等性能.

(3) NCR-AODV 协议的通用网络场景性能改善幅度不如长路径网络场景性能改善幅度明显.主要原因在于:长路径网络场景中,源节点和目的节点固定在移动区域的两侧,保证源节点和目的节点的平均距离为 8 跳;而在通用网络场景下,源节点和目的节点在移动区域中随机移动,有些情况下两者距离为 1 跳或者 2 跳,使得源节点和目的节点的平均距离变小.在短路径情况下,稳定路径选择带来的路由性能改善幅度不如长路径效果好.

#### 4 总结及下一步工作

本文提出一种基于邻居变化率的稳定路径选择方法,并在 AODV 按需路由协议基础上扩展为 NCR-AODV 路由协议.新协议选择转发跳数小且沿途局部拓扑变化小的稳定路径进行数据转发.分析与仿真结果表明:在移动场景中采用邻居变化率进行路径选择,可有效减少长路径的中断次数,减小数据分组端到端时延和时延抖动,提高数据分组投递率.新方法不需要地理位置定位硬件功能支持,可独立于底层协议工作,对存在硬件或链路功能局限性、重视网络性能提升和网络规模扩展的移动自组织网络的特定应用具有参考价值.

下一步工作将开展基于邻居变化率的 TBRPF 路由协议扩展研究.TBRPF 路由协议<sup>[12]</sup>是移动自组织网络的典型主动路由协议,包括邻居发现模块和路由模块.邻居发现模块通过周期性发送增量分组,报告邻节点状态变化信息;路由模块根据缓存在拓扑表中的局部拓扑信息,应用 Dijkstra 算法和距离路由度量,计算到目的节点的最短路径.对 TBRPF 路由机理的初步分析表明:用邻居变化率路由度量代替距离路由度量,对 TBRPF 路由协议进行扩展是可行的.后续研究工作包括 TBRPF 路由协议的扩展、仿真实现、性能仿真评估等.

#### References:

- [1] Das SR, Perkins CE. Performance comparison of two on-demand routing protocols for ad hoc networks. *IEEE Personal Communications*, 2001,8(1):16–28.
- [2] Su W, Lee SJ, Gerla M. Mobility prediction in wireless networks. In: *Proc. of the 21st Century Military Communications Conf.* 2000. 491–495. [http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs\\_all.jsp?isnumber=19568&arnumber=905001](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?isnumber=19568&arnumber=905001)
- [3] Shah H, Nahrstedt K. Predictive location-based QoS routing in mobile ad-hoc networks. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications*. 2002. [http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs\\_all.jsp?arnumber=997009](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=997009)
- [4] Peng GG, Yang JH, Gao CS. A QoS routing protocol based on path stability in mobile ad hoc network. *Journal of Computer Research and Development*, 2004,41(6):916–922 (in Chinese with English abstract).
- [5] Dube R, Rais CD, Wang KY, Tripathi SK. Signal stability-based adaptive routing (SSA) for ad hoc mobile networks. *IEEE Personal Communications*, 1997,22(5):113–118.
- [6] Chang CY, Chang CT, Tu SC. Active route-maintenance protocol for signal-based communication path in ad-hoc networks. *Networks*, 2001,21(4):25–30.
- [7] Klemm F, Ye Z, Krishnamurthy S, Tripathi S. Improving TCP performance in ad hoc networks using signal strength based link management. *Ad Hoc Networks Journal*, 2004,12(4):175–191.
- [8] Broch J, MaNCRz DA, Johnson DB, Hu YC, Jetcheva J. A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols. In: *Proc. of the 4th Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking*. 1998. 85–97. <http://portal.acm.org/>
- [9] Perkins CE, Belding-Royer EM, Das SR. Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing. RFC3561, 2003. <http://www.ietf.org/rfc/rfc3561.txt>
- [10] NS2, URL. 2006. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>

[11] Camp T, Boleng J, Davies V. A survey of mobility models for ad hoc network research. Wireless Communication & Mobile Computing: Special issue on Mobile Ad Hoc Networking: Research, Trends and Applications, 2002,2(5):483-502.

[12] Ogier R, Templin F, Lewis M. Topology dissemination based on reverse-path forwarding (TBRPF). RFC3684, 2004. <http://www.ietf.org/rfc/rfc3684.txt>

附中文参考文献:

[4] 彭革刚,杨疆湖,高传善.移动自组网中基于路径稳定性的 QoS 路由协议.计算机研究与发展,2004,41(6):916-922.



蔡一兵(1971 - ),男,福建长汀人,博士生,工程师,主要研究领域为无线自组织网络.



李忠诚(1961 - ),男,研究员,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为下一代网络.



李海波(1984 - ),男,硕士生,主要研究领域为无线自组织网络.



谢高岗(1974 - ),博士,副研究员,CCF 高级会员,主要研究领域为网络测试,监控与管理,服务质量.



2007 年全国开放式分布与并行计算学术年会

征 文 通 知

由中国计算机学会开放系统专业委员会主办、广西大学计算机与电子信息学院承办的 2007 年全国开放式分布与并行计算学术年会 (DPCS 2007) 将于 2007 年 10 月 12 日~15 日在广西南宁市广西大学召开。本次年会录用的论文将由《小型微型计算机系统》和《微电子学与计算机》以正刊方式发表,欢迎大家积极投稿。会议将评选优秀论文,予以奖励并推荐到一级学报发表。同时,鼓励在年会召开期间组织讲座 (Tutorial),有意者请与广西大学钟诚、李陶深教授联系。现将有关征文事宜通知如下:

一、征文范围

(1) 开放式分布与并行计算模型、体系结构、算法及应用;(2) 开放式网络、数据通信、网络与信息安全、业务管理技术;(3) 开放式海量数据存储与 Internet 索引技术,分布与并行数据库及数据/Web 挖掘技术;(4) 开放式机群计算、网格计算、Web 服务、P2P 网络及中间件技术;(5) 开放式移动计算、移动代理、传感器网络与自组网技术;(6) 分布式人工智能、多代理与决策支持技术;(7) 分布、并行编程环境和工具;(8) 分布与并行计算算法及其在科学与工程中的应用;(9) 开放式虚拟现实技术与分布式仿真;(10) 开放式多媒体技术与流媒体服务,包括媒体压缩、内容分送、缓存代理、服务发现与管理技术。

二、投稿要求

1. 论文必须是未正式发表的、或者未正式等待刊发的研究成果。稿件格式应包括题目、作者、所属单位、摘要、关键词、正文和参考文献。

2. 务必附上第一作者简历(姓名、性别、出生年月、出生地、职称、学位、研究方向等)通信地址、邮政编码、联系电话和电子信箱。并注明论文所属领域。来稿一律不退,请自留底稿。

3. 论文投稿需提交激光打印稿一式 2 份和电子版 Word 文件。论文投寄地址和电子信箱如下:

530004 广西南宁市大学东路 100 号 广西大学计算机与电子信息学院 钟诚、李陶深教授收;E-mail: dpcs2007@sina.com

三、重要日期

征文投稿截止日期: 2007 年 6 月 15 日 论文录用通知日期: 2007 年 7 月 10 日

四、联系方式

会议承办方: 钟诚 0771-3236396, 13607819333, chzhong@gxu.edu.cn; 李陶深: 0771-3236627, 13768301390, tshli@gxu.edu.cn

专委会: 南京大学计算机系 陈贵海; 电话: 025-58916715; E-mail: gchen@nju.edu.cn

大会网站: <http://www.dpcs2007.com>