

移动 Ad hoc 网络中基于链路稳定性预测的按需路由协议

胡曦 李喆 刘军

(东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110004)

摘要: 移动 Ad hoc 网络拓扑的高度动态变化是造成传统按需路由协议的路由频繁通断的主要原因, 因此在传统按需路由协议的基础上进行链路稳定性预测扩展, 增强路由稳定性具有十分重要的意义。该文利用分组的接收功率把节点间的相对运动划分为靠近和远离两种类型, 然后在不同相对运动类型下根据节点间距离得到了的链路平均维持时间。在路由过程中, 中间节点利用得到的链路平均维持时间设置请求报文的转发延迟, 通过一定转发规则选择稳定性较强的链路构成路径。仿真结果表明进行链路稳定性预测扩展后的按需路由协议能够有效增强路由的稳定性, 并提高网络性能。

关键词: 移动 Ad hoc 网络; 按需路由协议; 链路稳定性预测; 链路平均维持时间

中图分类号: TN915.04

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)02-0284-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00089

A Link Stability Prediction-Based on-Demand Routing Protocol in Mobile Ad hoc Networks

Hu Xi Li Zhe Liu Jun

(College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: The high dynamic topology change is the main reason to cause the frequent breakages of routes of traditional on-demand routing protocols in mobile Ad hoc networks. Therefore it is significant to extend the traditional on-demand routing protocol by the link stability prediction which will improve route stability. Based on the received signal strength, the relative motions of neighbor nodes are classified into two categories: separate and near. Then in each category, the link mean duration which is used to predict the link stability is calculated on the basis of the distance between two neighbor nodes. In routing process, mid-nodes forward the received RREQ packets after a delay which is decided by the link mean duration predicted, and then with the forward rule which is proposed, a stable route can be found. Simulation results show that this extended traditional on-demand routing protocol can improve the route stability and the network performance.

Key words: Mobile Ad hoc networks; On-demand routing protocol; Link stability prediction; Link mean duration

1 引言

移动 Ad hoc 网络(MANET)中的各个节点能够以任意可能的速度和移动模式移动, 节点间通过无线信道形成的网络拓扑随时可能发生变化。因此, 在 MANET 中选择一条相对稳定的路径进行路由, 避免频繁的重路由操作, 降低网络拓扑动态变化对路由协议性能的影响, 成为 MANET 路由协议研究的热点。

由于 Ad hoc 网络中的传统路由协议缺乏保证路由由稳定性的有效机制, 因此近年来, 研究人员对于增强传统路由协议的路由稳定性进行了研究。按照稳定性预测的方法对基于稳定性的路由协议进行分类, 大致可以分为借助辅助设备、借助移动模型、

依靠节点自身能力 3 类以及一些其他方法。

借助辅助设备(如 GPS 等)进行路由稳定性预测的路由协议, 如文献[1-3]。借助这些设备, 节点能够获得详细的移动参数, 如速度、位置等, 通过一定的计算得到稳定性估计, 从而选择稳定性较好的路径。但是这些设备的使用会受到环境的限制, 并且设备本身的性能对路由算法的性能影响较大, 同时要求每个节点配备这些设备, 这会增加节点自身的消耗和组网的经费。

借助移动模型进行路由稳定性预测的路由协议, 如文献[4-7]。在预测过程中都利用了已有的节点移动模型。由于在模型中节点的移动一般都具有某种概率分布的特征, 从而根据这些概率分布估计链路的稳定性。这些模型虽然是对节点在真实环境中的移动情况的模拟, 但是任何一种模型都无法完全地模拟出节点移动的各种情况^[8]。因此使得此类路

2009-01-19 收到, 2009-09-25 改回

国家高技术研究发展计划项目(2007AA0742)资助课题

通信作者: 胡曦 hx214412xh@163.com

由算法也只能应用于某类的节点移动。

依靠节点自身能力进行路由稳定性预测的路由协议是在路由过程中利用节点自身能够获得的某些参量对路由的稳定性做出估计, 如文献[9-12]。其中文献[9]是通过接收功率判断构成链路的两节点间的距离, 在距离满足一定大小关系时认为此链路稳定, 并优先选择这样的链路构成路径。文献[9-12]是通过节点接收功率的变化来判断构成链路的两节点的相对运动, 由此对链路的稳定性做出估计, 并选择稳定性最好的链路构成路径。

由于 Ad hoc 网络具有不依赖于基础设施, 自组织, 多跳等特点, 本文在依靠节点自身能力的基础上, 用链路平均维持时间预测链路的稳定性, 在按需路由协议的基础上进行扩展, 提出了一种基于链路稳定性预测的按需路由协议(Link Stability Prediction-based On-Demand Routing Protocol, LSP-ODRP)。LSP-ODRP 根据节点间的不同相对运动类型利用节点间距离计算得到了链路平均维持时间。在路由选择过程中利用得到的链路平均维持时间设置请求报文的转发延迟, 并通过一定转发规则选择稳定性较强的链路构成路径。由于不依赖于其他设备和移动模型, 因此本文提出的 LSP-ODRP 具有更好的适应性。

2 LSP-ODRP 设计

2.1 链路稳定性预测

定义 1 假设当前时刻 t 节点 A 和 O 之间存在链路 L_{ao} , 那么从当前时刻 t 开始到 L_{ao} 断开所经历的时间, 称为链路维持时间 D_{ao} 。

两个节点 A 和 O 间的相对运动可以等效为节点 O 静止, 节点 A 以相对速度 v_r 通过节点 O 的通信范围, 如图 1 所示。在当前时刻 t , 节点 A 和 O 构成链路 L_{ao} , 两节点间距离为 d 。节点 A 在移动 r 距离后 L_{ao} 断开, 则由定义 1 有 L_{ao} 的维持时间 D_{ao} :

$$D_{ao} = \frac{r}{v_r} = \begin{cases} \frac{d \cos \phi + \sqrt{R^2 - d^2 \sin^2 \phi}}{v_r}, & \text{图1(a)} \\ \frac{-d \cos \phi + \sqrt{R^2 - d^2 \sin^2 \phi}}{v_r}, & \text{图1(b)} \end{cases} \quad (1)$$

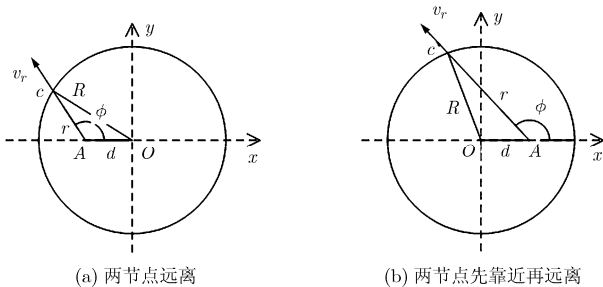


图 1 节点间相对运动的两种不同情况

其中 R 表示节点的通信半径, v_r 和 ϕ 分别表示相对速度 v_r 的速率和方向角。

定义 2 链路平均维持时间 \bar{D}_{ao} 是链路维持时间 D_{ao} 的期望。其定义式如下:

$$\bar{D}_{ao}(d) = E[D_{ao}(v_r, \phi; d)] \quad (2)$$

式(2)的计算分为以下 3 个步骤:

(1)使用 TwoRayGround 模型^[13]来描述无线电波在自由空间中的传播, 根据此模型, 在获得节点接收功率后, 可以计算得到两节点间的距离 d 。

(2)无论两节点各自具有怎样的运动矢量, 它们之间的相对运动最终都可以归结为远离和靠近两种情况, 所以在只依靠节点自身能力的条件下对节点间的相对运动作如下划分:

类型 1 两个节点之间远离, 直到无法构成链路, 如图 1(a)所示。

类型 2 两个节点之间先靠近, 然后再远离。直到无法构成链路, 如图 1(b)所示。

(3)由式(2)得到链路 L_{ao} 的平均维持时间 $\bar{D}_{ao}(d)$

$$\bar{D}_{ao}(d) = E[D_{ao}(v_r, \phi; d)] = \iint_{v_r, \phi} D_{ao}(v_r, \phi; d) f(v_r, \phi) dv_r d\phi \quad (3)$$

其中 $D_{ao}(v_r, \phi; d)$ 由式(1)给出, 而 $f(v_r, \phi)$ 计算如下:

由雅可比变换可以得到

$$f(v_r, \phi, v_o) = \frac{f(v_o, v_a, \theta_a)}{|J(v_o, v_a, \theta_a)|} = \frac{1}{2\pi b^2} \cdot \frac{v_r}{\sqrt{v_o^2 + v_r^2 + 2v_o v_r \cos \phi}} \quad (4)$$

其中 v_o , v_a 及 θ_a 相互独立, 且 v_o 和 v_a 服从 $[0, b]$ 的均匀分布 (其中 b 表示节点最大移动速度), θ_a 服从 $[-\pi, \pi]$ 的均匀分布。然后在式(4)中对 v_o 积分, 得到

$$f(v_r, \phi) = \int_{v_o} f(v_r, \phi, v_o) dv_o = \frac{1}{2\pi b^2} \int_{v_o} \frac{v_r}{\sqrt{v_o^2 + v_r^2 + 2v_o v_r \cos \phi}} dv_o \quad (5)$$

从而, 由式(1), 式(3)和式(5)可计算出链路平均维持时间 \bar{D}_{ao} 。其中如图 1 所示, $\phi \in [-\pi, -\pi/2] \cup [\pi/2, \pi]$, 且区间具有对称性, 所以:

(1)在类型 1, 即两个节点远离的情况下

$$\begin{aligned} \bar{D}_{ao}(d) &= 2 \int_{\pi/2}^{\pi} \int_0^{\infty} D_{ao}(v_r, \phi; d) f(v_r, \phi) dv_r d\phi \\ &= \frac{1}{\pi b^2} \int_0^{\pi/2} \int_0^b (-d \cos \phi + \sqrt{R^2 - d^2 \sin^2 \phi}) \\ &\quad \cdot \ln \left| \frac{b + \sqrt{b^2 - v_o^2 \sin^2 \phi}}{v_o - v_o \cos \phi} \right| dv_o d\phi \end{aligned} \quad (6)$$

(2)在类型 2, 即两个节点靠近的情况下

$$\begin{aligned}\bar{D}_{ao}(d) &= 2 \int_{\pi/2}^{\pi} \int_0^{\infty} D_{ao}(v_r, \phi; d) f(v_r, \phi) dv_r d\phi \\ &= \frac{1}{\pi b^2} \int_0^{\pi/2} \int_0^b (d \cos \phi + \sqrt{R^2 - d^2 \sin^2 \phi}) \\ &\quad \cdot \ln \left| \frac{b + \sqrt{b^2 - v_o^2 \sin^2 \phi}}{v_o - v_o \cos \phi} \right| dv_o d\phi\end{aligned}\quad (7)$$

由此, 得到了不同相对运动类型下链路平均维持时间 \bar{D}_{ao} 与节点间距离 d 的准确表达式(6)和式(7)。

对于典型的 LucentWaveLAN 环境, 节点能识别的最低能量值为 3.65×10^{-10} W, 此时的通信范围为 250 m^[11], 因此, 在后面的讨论中取节点的传输半径 $R=250$ m。节点最大移动速度 $b=20$ m/s, 最小移动速度为 0 m/s。

2.2 对 \bar{D}_{ao} 计算公式的近似

由于 Ad hoc 网络节点的自身特点, 若直接应用式(6), 式(7)计算链路的平均维持时间会造成很大的开销。所以利用非线性拟合方法对它们进行近似。这里使用的是 1stOpt 综合优化软件包。利用 1stOpt 软件分别得到了式(6), 式(7)的近似表达式(8), 式(9)。

$$\bar{D}_{ao}(d) = 21.9043 - 0.071 \cdot d - 2.553 \times 10^{-7} \cdot d^3 \quad (8)$$

$$\bar{D}_{ao}(d) = 21.9043 + 0.0637 \cdot d - 2.553 \times 10^{-7} \cdot d^3 \quad (9)$$

式(8), 式(9)不仅能够很好的近似式(6), 式(7), 而且表达式简单, 易于计算。因此在应用中完全可以使用它们作为计算 \bar{D}_{ao} 的公式。

2.3 LSP-ODRP 描述

利用前面提出的链路稳定性预测算法, 本文设计了一种基于链路稳定性预测的按需路由协议(LSP-ODRP)。LSP-ODRP 使用按需路由的方式进行路由, 主要包括路由建立和路由维护两个部分:

2.3.1 路由建立 网络中节点周期发送 hello 分组, 收到 hello 分组的节点建立邻居列表, 记录邻居 ID 和对应的接收时刻和接收功率。以后利用收到的 hello 分组对这个邻居列表进行更新。

当某个节点(源节点)要与网络中的另一节点(目的节点)通信, 但源节点的路由表中没有到目的节点的可用路由信息时, 采用反应式机制, 由源节点发起路由寻找过程。路由寻找步骤如下:

(1)源节点广播路由请求报文(RREQ), 其中包含源地址、源序列号、广播序列号、目的地址、目的序列号、跳数和链路最小平均维持时间等参数。

(2)中间节点收到 RREQ 报文后, 操作如下:

(a)判断是否是重复的 RREQ 分组: 如果是则丢弃, 以防止发生环路; 如果不是, 则利用接收功率计算出此刻的两节点间距离 d 。

(b)检查邻居列表中是否有此 RREQ 经过的上一跳节点 ID, 若没有则增加一条表项, 记录上一跳节点的 ID 和此时的时刻和接收功率; 若有, 则将此 RREQ 的接收功率与邻居列表中同一节点对应的接收功率作比较: 如果接收功率减小, 说明这两个节点正在远离, 则按照式(8)计算出此链路的 \bar{D}_{ao} ; 如果接收功率变大, 说明这两个节点正在靠近, 则按照式(9)计算出此链路的 \bar{D}_{ao} 。

(c)根据更新规则更新 RREQ 中的最小链路平均维持时间域, 更新规则如下: 若域值为 NULL, 则域值设为当前得到的 \bar{D}_{ao} ; 若域值不为 NULL, 则将域值与当前得到的 \bar{D}_{ao} 进行比较, 若域值小于当前 \bar{D}_{ao} 则不更新; 反之, 则用当前 \bar{D}_{ao} 更新域值。

(d)转发 RREQ。根据最小链路平均维持时间域的域值 \bar{D}_{min} 计算节点转发 RREQ 的延迟, 计算公式如下:

$$\text{delay} = 0.5 - \frac{\bar{D}_{min}}{100} \quad (10)$$

由式(10)可知: 域值 \bar{D}_{min} 越小, 转发延迟越大; 反之, 转发延迟越小。

如果接收功率变大, 则节点在 delay 时间后立即转发 RREQ 报文; 如果接收功率变小, 则判断在 delay 时间内, 此节点是否收到至少 m 个邻居节点转发的相同 RREQ 报文, 如果是, 则认为其邻居节点的转发已足够 RREQ 的传播, 并将此 RREQ 丢弃; 否则, 在 delay 时间后就立即转发该 RREQ 报文。

(3)目的节点收到 RREQ 后, 经反向路由向源节点发送 RREP。

(4)在 RREP 通过反向路径发送给源节点的过程中, 这条路径上的节点更新它们的路由表, 建立起通向目的节点的正向路径。

(5)RREP 到达源节点, 完成寻路过程, 源节点即可使用得到的路由发送数据。

2.3.2 路由维护

(1)由发现不可达节点或链路的节点在自己缓存的路由信息中选择出不包含不可达节点或链路的满足要求的替代路径, 并立即回送错误信息, 使源节点选择新的路径进行传输, 这条替代路径在传输完由于断路产生的缓存数据后, 立即释放。

(2)当没有可以的替代路径时就由发现不可达节点或链路的节点向源节点或目的节点回送错误分组, 以使源节点或目的节点重新选择可用路由。

3 性能仿真

3.1 性能指标的计算

本文分别使用路由有效时间、路由失效次数考察路由的稳定性和分组递交率、路由开销考察网络

性能。

(1)路由有效时间是在仿真时间内每条路由的平均使用时长。

(2)路由失效次数是在仿真时间内可用路由的改变次数。

(3)分组递交率是仿真时间内目的节点收到的数据分组数与源节点发送的数据分组数的百分比。

(4)路由开销是仿真时间内控制分组数与数据分组数的百分比。

3.2 仿真及性能分析

仿真采用 NS2 软件。仿真场景是一个 1000×1000 m²的平面网络,节点随机放置,每个节点的通信范围为 250 m,无线传输模型采用 TwoRay Ground 模型,节点移动速度为 0~20 m/s。仿真中设置一对源节点和目的节点,使用恒定比特率 CBR 流来模拟数据流量,分组长度为 512 字节,发包率为 5 packets/s。仿真时间为 500 s。每种仿真情况都进行 10 次仿真。在改变节点停留时间时,设置的节点数目为 90;在改变节点数目时,节点的停留时间设为 2 s。

这里分别选择了经典 AODV 路由协议^[4];文献[9]中基于节点间距离的路由协议,这里称为 SSA;文献[10]中基于节点接收功率变化的单播路由协议,这里称为 PChUR 及本文提出的基于节点间相对运动和距离的 LSP-ODRP,这里 $m=1$ 。对于 SSA,设置的距离阈值为 0.8R。对于 PChUR,设置每跳链路完成一次通信所需的时间为 3 s。

(1)路由稳定性的性能 图 2 给出了不同路由协

议对路由稳定性的影响。从图 2(a), 2(b)可以看出,由于节点停留时间的增大使得网络拓扑的动态性不断降低,因此 4 种路由协议的路由稳定性都随着节点停留时间的增大而变好。AODV 由于没有考虑稳定性的问题,所以获得了最差的路由稳定性;而其他 3 种协议中都考虑了路由的稳定性问题,所以路由的稳定性都好于 AODV,其中 SSA 路由的稳定性要差于 PChUR 路由的稳定性,这是由于 SSA 中只根据节点间距离判断链路稳定性,使得判断的准确度较差,PChUR 中根据接收功率变化判断链路稳定性的准确度要更好一些。而 LSP-ODRP 由于能够准确地预测链路平均维持时间,因此获得了最好的路由稳定性。从图 2(c), 2(d)可以看到,由于节点数目的增加或减少,都会增加网络的不确定性,因此曲线没有出现一致的变化趋势。但是能够看出,AODV 具有最差的路由稳定性,然后是 SSA 和 PChUR,最好的是 LSP-ODRP。这是因为不同协议选择稳定路由的方法和机制都不相同,因此对路由稳定性的预测上就存在着不同的误差,预测误差小的协议往往能获得较好的路由稳定性。

(2)网络的性能 图 3 给出了不同路由协议对网络性能的影响。从图 3(a)可以看到 4 种路由协议的分组递交率随着节点停留时间的增大成上升趋势,但差别不大,原因是网络负载较轻,网络拓扑的动态性对网络性能的影响不大,但 LSP-ODRP 仍获得了最高的分组递交率,PChUR 高于 SSA,而 AODV 的分组递交率最低。从图 3(b)可以看到 4 种路由协议的路由开销随着节点停留时间的增大呈下降趋

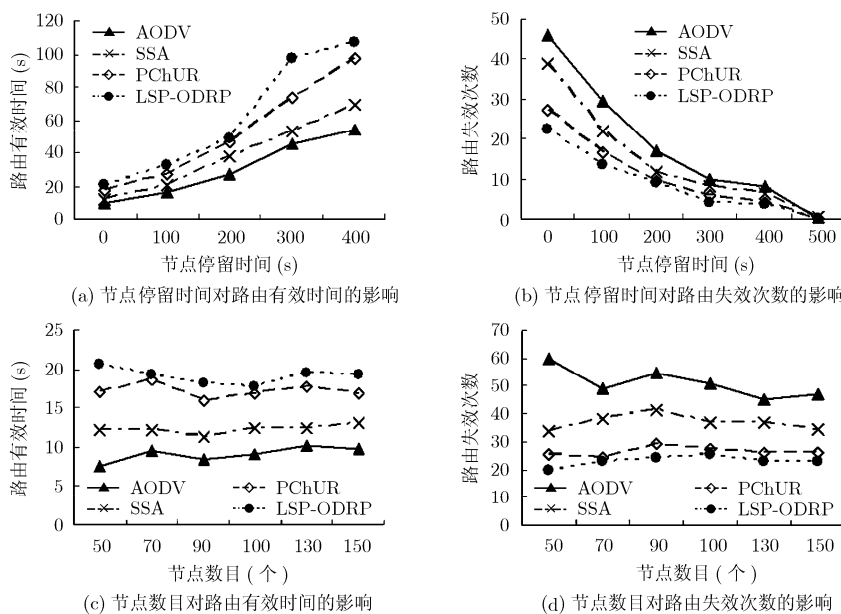


图 2 不同路由协议对路由稳定性的影响

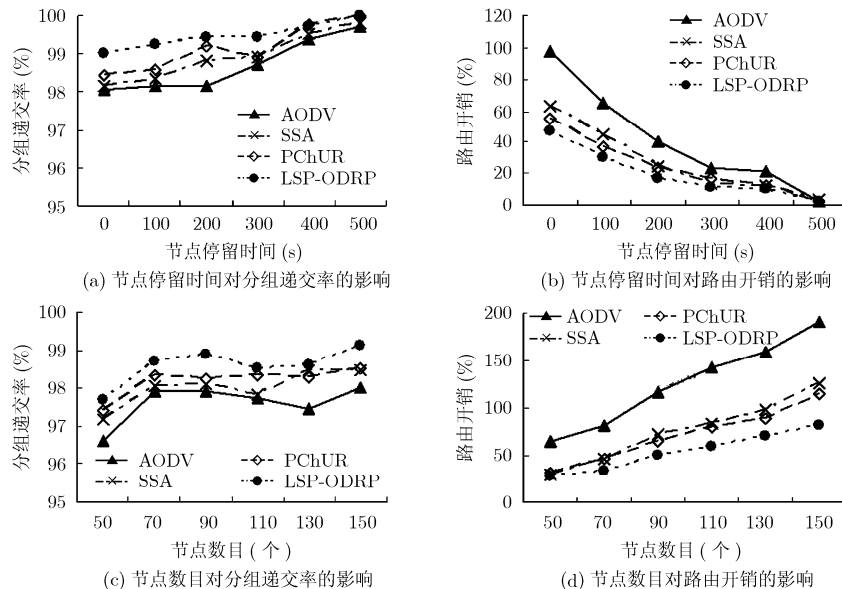


图 3 不同路由协议对网络性能的影响

势, 其中 AODV 由于路由变化的频繁而具有最大的路由开销, LSP-ODRP 由于转发条件的限制获得了最小的路由开销, 而 SSA 与 PChUR 差别不大。从图 3(c) 可以看到, 4 种路由协议的分组递交率都出现了较小的起伏变化, 路由稳定性的差异使得 LSP-ODRP 获得了最高的分组递交率, PChUR 和 SSA 次之, AODV 最低。从图 3(d) 可以看到, 4 种路由协议的开销都随着节点数目的增多而增大, 但 AODV 具有最大的路由开销而且开销增加较快, SSA 和 PChUR 具有相近的路由开销, 而 LSP-ODRP 由于不仅路由稳定性最好而且请求报文的转发限制, 使其获得了最小的路由开销。但无论是分组递交率还是路由开销, 都随着路由稳定性的增强而提高。

4 结论

本文提出的基于链路稳定性预测的按需路由协议在只依靠节点接收功率的前提下, 利用不同节点间的相对运动情况和节点间距离计算得到了链路平均维持时间, 由此对链路稳定性做出预测。在路由选择过程中利用链路稳定性决定 RREQ 的转发延迟, 选择出稳定性更好的路径, 从而提高了网络性能。

在本文研究中, 我们并未考虑路由过程中节点移动状态的改变对路由稳定性的影响, 因此研究在路由过程中如何根据节点移动状态的改变自适应调整路由是我们的下一步工作。

参考文献

[1] William Su Sung-Ju, Sung-ju Lee, and Mario Gerla. Mobility

prediction in wireless networks[C]. IEEE Military Communications Conference, Los Angeles, CA USA, 2000 Vol.1: 491-495.

[2] 谭长庚, 陈松乔, 龚晓霞. 移动自组网中基于预测机制的一种稳定路由算法设计[J]. 小型微型计算机系统, 2007, 28(1): 9-14.

Tan Chang-geng, Chen Song-qiao, and Gong Xiao-xia. Steady routing protocol with prediction in mobile Ad hoc networks[J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2007, 28(1): 9-14.

[3] Jin Lian, Layuan Li, and Xiaoyan Zhu. A multi-constraint QoS routing protocol with route-request selection based on mobile predicting in MANET[C]. International Conference on Computational Intelligence and Security Workshops, Harbin, Heilongjiang China, 2007: 342-345.

[4] Ming Yu, Aniket Malvankar, and Wei Su, *et al.* A link availability-based QoS-aware routing protocol for mobile ad hoc sensor networks[J]. *Computer Communications*, 2007, 30(18): 3823-3831.

[5] 肖百龙, 郭伟, 刘军等. 移动自组织网络基于链路稳定性的伪流言路由算法[J]. 通信学报, 2008, 29(6): 26-33.

Xiao Bai-long, Guo Wei, and Liu Jun, *et al.* Pseudo gossip routing algorithm based link stability in mobile Ad hoc networks[J]. *Journal on Communications*, 2008, 29(6): 26-33.

[6] Chen J K, Chen C, and Jan R H, *et al.* Expected link life time analysis in MANET under Manhattan grid mobility model[C]. The 11th international symposium on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems, Vancouver, BC Canada, 2008: 162-168.

[7] Cho Sungsoon and Hayes J P. Impact of mobility on connection in Ad hoc networks [C]. IEEE Wireless

- Communications and Networking Conference, New Orleans, LA USA, 2005, Vol.3: 1650-1656.
- [8] Camp T, Boleng J, and Davies V. A survey of mobility models for Ad hoc network research[J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2002, 2(5): 483-502.
- [9] Dube R, Rais C D, and Wang K Y, *et al.* Signal stability based adaptive routing for Ad hoc mobile networks[J]. *IEEE Personal Communication*, 1997, 4(1): 36-45.
- [10] Paul K, Bandyopadhyay S, and Mukherjee A, *et al.* A stability-based distributed routing mechanism to support unicast and multicast routing in Ad hoc wireless networks[J]. *Computer Communications*, 2001, 24(18): 1828-1845.
- [11] 洪利, 黄庭培, 邹卫霞等. 基于链路可用性预测的 AODV 路由协议研究[J]. *通信学报*, 2008, 29(7): 118-123.
Hong Li, Huang Ting-pei, and Zou Wei-xia, *et al.* Research of AODV routing protocol based on link availability prediction[J]. *Journal on Communications*, 2008, 29(7): 118-123.
- [12] Liu Jin-shan and Issarny V. Signal strength based service discovery (S3D) in mobile Ad hoc networks[C]. IEEE 16th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Germany, 2005, Vol. 2: 811-815.
- [13] Fall K, Varadhan K. The ns manual[Z]. 2007: 186-190.
- [14] Perkins C E, Mroyer E, and Das S. RFC 3561-Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing[S]. The Internet Engineering Task Force (IETF), 2003.
- 胡 曦: 男, 1980 年生, 博士生, 研究方向为 Ad hoc 网络。
李 喆: 女, 1967 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为 Ad hoc 网络、传感器网络、移动通信。
刘 军: 男, 1969 年生, 博士, 研究方向为 Ad hoc 网络及空间网络。