

面向链路稳定性的 MANET 路径建立机制

吴大鹏 武穆清 甄岩 孙兵
(北京邮电大学宽带通信网实验室 北京 100876)

摘要: 为了适应拓扑动态变化的 Ad hoc 网络, 该文提出了一种面向链路稳定性的路由机制, 节点根据少量接收信号强度样本值建立牛顿插值多项式描述连续时间域上的信号强度, 进而在不预测节点运动方向和速度等相关参数的情况下估计链路生存时间, 按照链路生存时间和跳数两个约束条件, 源节点逐跳建立稳定的端到端路径。仿真结果表明, 所建立的牛顿插值多项式能够准确地逼近节点随机移动过程中的实际接收信号强度, 并且该路由机制能够有效地减少路由重建次数, 降低数据包丢弃概率。

关键词: 移动 Ad hoc 网络; 路由协议; 链路生存时间; 牛顿插值多项式

中图分类号: TN915.04

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)09-2226-06

Reliable Routing Mechanism in MANET Towards Link Stability

Wu Da-peng Wu Mu-qing Zhen Yan Sun Bing

(Broadband Communication Networks Lab, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: Based on the estimated link lifetime, a novel routing mechanism is proposed in this paper to establish the reliable end-to-end path in Ad hoc networks. In order to describe the received signal strength continuously in time domain, the Newton Interpolation Polynomial is constructed according to the received signal strength; and then, the link lifetime is estimated with no prediction on speed, direction and other movement parameters. With the constraint of link lifetime and hop counts, the source nodes set up the paths to destination nodes in hop-by-hop mode. Simulation results show that the received signal strength can be described by Newton interpolation polynomial accurately while the mobile nodes are moving randomly; moreover, the route discovery times and packet drop ratio can be reduced by the routing mechanism.

Key words: Mobile Ad hoc networks; Routing protocol; Link lifetime; Newton interpolation polynomial

1 引言

广泛应用于移动 Ad hoc 网络(Mobile Ad hoc Network, MANET)的路由协议都是以跳数作为参数建立路径, 当网络中的链路由于节点移动而失效时, 使用该链路进行通信的路由也将随之断裂, 源节点将重新触发路由发现过程, 这将导致控制开销增加, 数据包丢弃概率上升, 可见在 MANET 中为源节点和目的节点建立稳定的端到端路径至关重要^[1]。研究人员提出了多种方法预测节点移动参数^[2-6], 并根据估计结果建立稳定路由, 但是节点之间的相对运动参数随机改变, 采用任何方法都难以对节点移动速度以及移动方向参数进行准确判断^[7]; 同时这些路由机制需要采用全局泛洪来更新节点的稳定性判定信息, 极大地增加了控制开销^[8]; 此外, 移动参数预测方法只能适用于一个或者某几个

移动模型, 难于进行扩展^[9-11]。

本文提出了一种基于链路生存时间估计的路由机制, 节点根据接收功率建立牛顿插值多项式, 以从连续时间域上描述节点所接收信号的强度, 进而选取参考点预测链路生存时间, 节点根据所估计结果逐跳建立到达目的节点的端到端路径。与前面所提出的各种方法不同, 该机制在不借助 GPS 设备的条件下, 准确地估计链路生存时间, 从而在路径建立过程中准确地选择链路, 提高 Ad hoc 网络承载多媒体业务的能力; 同时该机制并不针对特定的移动模型, 对各种随机移动行为具有很好的适应性, 提高了路由机制的扩展性。

2 链路生存时间估计方法

节点之间的距离以及信号发射功率决定了接收信号强度, 结合 MANET 研究中所使用的自由空间传播模型或者平坦反射表面传播模型可知接收功率与收发天线之间的距离存在确定关系, 接收天线处

的功率为 $P_R = P_T G_t G_r \lambda^2 / (4\pi d)^2$ 或者 $P_R = P_T G_t G_r \cdot h_t^2 h_r^2 / d^4$, 其中 d 为天线之间的距离, P_T 为传输功率。

链路从建立到断裂的过程可以根据不同的相对运动参数划分为多个运动阶段(Epoch), 相同运动阶段内的节点之间相对运动速度和方向保持不变。文中首先采用相同运动阶段内的数据估计链路生存时间, 然后通过截断方法将其扩展到多个运动阶段的情况。图 1 描述了节点 P 在节点 S 的传输范围内运动的情况, 节点之间的相对移动速度和运动距离决定了链路生存时间, 为了能够准确地根据当前节点所接收信号的强度计算节点移动速度, 我们等间隔选取 3 个接收信号强度样本点, 分别为 A 、 D 和 E , 其在时间域内满足 $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \Delta t$ 。这些接收信号强度通过计算节点收到邻居节点广播的 Hello 消息得到。由于本机制基于按需路由协议 AODV, Hello 消息的广播属于路由协议的控制消息, 节点通过定期广播的方式维护路由, 以适应动态的网络拓扑结构。因此本机制借用按需路由协议原有的控制消息, 没有引入额外的控制消息。若所有的样本点都不能满足该约束条件, 则按照本文提出的方法对特定时刻的接收信号强度进行估计, 该特定时刻即为参考点(Reference Point, RP), 这些参考点满足上述等间隔约束条件, 具体选择方法将在后面进行详细介绍。根据上述选定的参考点, 运用余弦定理可以准确计算节点间相对运动速度, 如图所示, d_i , d_j 和 d_k 分别表示各个采样点或者参考点时刻与两个节点之间的距离, $d_i = SA$, $d_j = SD$, $d_k = SE$, 可得

$$v = \frac{\sqrt{2(d_i^2 + d_k^2 - 2d_j^2)}}{2 \times \Delta t} \quad (1)$$

若节点当前位于点 M 处, 即节点在 M 处触发链路生存时间估计过程, 同时 A 和 D 为相对运动速

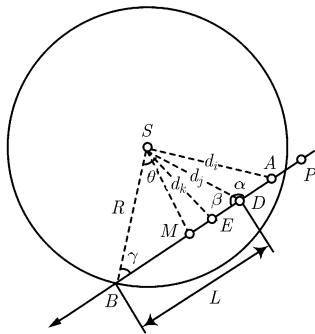


图 1 节点运动过程

度计算过程中所使用的两个参考点。则 $\triangle SAD$ 3 条边长度均可通过接收信号强度获知, 且 $\angle \beta = 180^\circ - \angle \alpha$, $\angle \theta = \angle BSD$, 由正弦定理可得

$$L = \frac{R \times \sin \theta}{\sin \beta} = \frac{R \times \sin \left(\angle \alpha - \sin^{-1} \frac{SD \times \sin \beta}{R} \right)}{\sin \beta} \quad (2)$$

可见, 链路生存时间需要根据参考点处的相关信息进行估计, 对于图 1 所示的运动过程, 当前节点位置, 即点 M , 并不一定被选择为参考点, 因此, 需要采用其它参考点对链路生存时间进行估计, 若 D 点是相对运动过程中时间域上的一个参考点, 则可知链路从 D 点开始到链路断裂整个过程的持续时间为

$$T_d = \frac{L}{V} = \frac{R \times \sin \theta}{v \times \sin \beta} = \frac{2 \times \Delta t \times R \times \sin \theta}{\sin \beta \times \sqrt{2(d_i^2 + d_k^2 - 2d_j^2)}} \quad (3)$$

显然, 节点可以根据接收信号时间来推导链路生存时间 T_L , 其中 T_L 为参考点 D 与触发估计过程时刻的时间差, 即节点从 D 点到 E 点所需要的时间。

$$T_L = T_d - T_I \quad (4)$$

可见, 链路生存时间可以通过接收信号强度对其进行准确地估计, 但是该过程需要在样本空间中寻找到 3 个等间隔参考点以计算移动速度, 因此, 节点对接收功率值的采样策略至关重要。目前广泛应用于 MANET 的路由协议多采用按需的方式建立和维护路由, 节点在不发送数据的情况下并不进行相关通信, 其它节点无法对接收信号强度进行高频率被动采样, 若缩短路由维护信息广播周期, 则这些路由维护信息之间的碰撞概率也随之增加, 同时还将与网络中正在传输的数据包竞争无线资源; 另外, MANET 节点能量有限, 对接收信号进行大量采样、存储以及计算将会消耗过多的能量, 降低节点生存时间。因此, 节点需要能够根据有限的接收信号强度采样点模拟整个运动过程的接收信号情况, 进而寻找满足估计链路生存时间条件的参考点。

作为有效地简单近似估计工具, 插值多项式可以通过有限采样点在时间域内对接收功率数值进行逼近, 相比于分段插值, 低阶牛顿插值多项式的曲线在整个定义域区间内更加平滑, 并且避免了龙格现象; 样条插值虽然能够满足连续性和平滑性的要求, 但是对于计算能力有限的 MANET 节点来说, 牛顿插值多项式的迭代计算方式有效地简化了计算过程。

$$\begin{aligned} N_n(x) = & f(x_0) + f(x_0, x_1)(x - x_0) + f(x_0, x_1, x_2) \\ & \cdot (x - x_0)(x - x_1) + \dots + f(x_0, x_1, x_2, \dots, x_n) \\ & \cdot (x - x_0) \dots (x - x_{n-1}) \end{aligned} \quad (5)$$

通过式(5)所示牛顿插值多项式,我们能够获得整个样本空间中任意时刻的节点接收信号强度,这是准确地估计链路生存时间的前提条件。为了提高估计结果的准确性,我们采用中值和截断两种方法对参考点的选取进行优化。根据牛顿插值多项式的性质可知,误差在样本空间的中部较小,因此,我们采用中值的方法选取样本空间的中点作为一个参考点,另外两个参考点则位于其两侧。若估计过程所选取的参考点不属于同一个运动阶段,则估计结果将会出现严重误差。对于这种情况来说,我们选取截断的方式对插值多项式样本空间内数据进行处理,即只保留插值多项式样本空间中与最后一个运动阶段有关的数据,为了提高估计结果的准确程度,依然按照中值方法,选取截断之后样本空间的中点作为一个参考点。此外, Δt 也将影响链路生存时间估计结果的准确程度,若其数值选取过大,则节点之间的运动参数在连续参考点之间非常有可能发生改变,若数值选取过小,牛顿插值多项式的误差将在链路生存时间估计过程中被放大,上述两种情况都将使得估计结果出现较大偏差。

本文仿真分析部分分别对牛顿插值多项式在节点之间运动参数是否改变两种情况进行了计算机仿真,讨论了间隔时间 Δt 的选取问题,并对该估计机制的有效性进行了验证。

3 路由建立过程

基于链路生存时间估计方法,本文提出了一种新的面向路径稳定性的按需路由机制(On-Demand routing protocol based on Link Duration Estimating, ODLDE),该机制基于按需路由协议 AODV,修改了路由建立过程,没有引入额外的控制消息。网络中的各个节点按照第 2 节所提出的方法估计链路生存时间,综合考虑链路生存时间以及路径跳数两个因素,通过时间窗口机制和计数器选择稳定链路建立端到端路径,其路径建立原理如图 2 所示。

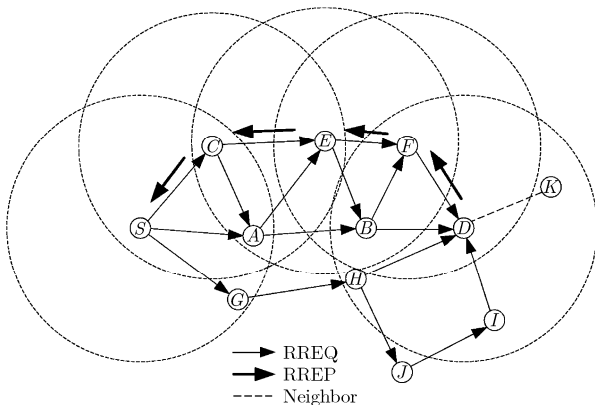


图 2 路径建立过程

数据包丢弃概率随端到端路径上链路数量的增加而上升,若路径跳数过多,则使得该路径虽然稳定,但依然需要重传大量数据包;同时数据流内部干扰也将更加严重,因此在选择路径的过程中,节点还需要考虑到跳数问题,在本文提出的 ODLDE 机制中将此参数限制为 1,也就是说,节点将不选择比最短路径跳数多于两跳的路径,通过这种方式,节点所建立的端到端路径能够在满足稳定性的同时有效地减少网络流量。

为了使得路由应答(Route REPLY, RREP)有多个反向路径,每个中间节点将为相同的节点转发两次路由请求(Route REQuest, RREQ)数据包;目的节点以及中间节点根据链路生存时间选择反向路径上的下一跳节点。按照这种方式,目的节点将收到多个 RREQ 数据包,节点采用时间窗的方法缓存这些从不同路径到达的 RREQ 数据包,同时结合计数器方法对 RREQ 的数量进行限制,当时间窗口的定时器结束或者 RREQ 计数器到达预先设定的门限值的时候,目的节点开始计算反向路径。

具体路径建立过程如下:

(1)每个节点估计其与各邻居节点的链路生存时间。如前所述,每个中间节点只处理两个 RREQ 数据包。由于反向路径 A-C 已经建立,则节点 B 处理完来自节点 E 和节点 A(S-A-B)的 RREQ 数据包之后,将丢弃从节点 A(S-C-A-B)到来的另外一个 RREQ 数据包。

(2)若节点间反向路径完成建立,则节点将链路生存时间估计值放入路由表中,反向路径上的路由表如表 1 所示。

(3)假设节点 D 在当前网络拓扑情况下,选择节点 I 作为最大生存时间链路,则路径跳数为 5,而最短路径跳数为 3,按照上述路径选择原则,节点 D 将不选择该路径,而通过查找路由表选择满足约束条件的节点 F,并且将 RREP 数据包单播到节点 F。

表 1 反向路径路由表

节点	下一跳	跳数	生存时间(s)
D	F	4	25
	B	3	20
	H	3	21
	I	5	30
F	E	3	22
	B	3	19
E	C	2	28
	A	2	24

(4)节点 F 接收到节点 D 的 RREP 数据包之后按照相同的规则计算链路生存时间, 并选择节点 E 作为反向路径上的下一跳节点。

(5)节点 C 发现节点 S 在其邻居节点列表内, 则不需要对链路生存时间进行估计, 而直接将 RREP 数据包单播到该节点。

(6)根据上面的各个步骤, 稳定、高效的端到端路径 $S-C-E-F-D$ 完成建立。

4 仿真分析

4.1 链路生存时间估计机制性能仿真

如前所述, 链路生存时间估计的准确程度与参考点的选择直接相关, 该部分对两种采样间隔内的节点运动情况进行了仿真, 其中包括单个运动阶段和两个运动阶段, 并且分析了截断机制以及参考点间隔时间对链路生存时间估计结果的影响。图 3 与图 4 将按照上述构建插值多项式方法得到的数值与仿真过程中实际测量所得到的数值进行比较。

从仿真结果可以看出, 对于多个运动阶段的情况, 牛顿插值多项式依然能够以时间连续的方式非常准确地逼近实际接收功率数值, 进而节点可以合理地选择参考点, 通过式(3)估计链路生存时间, 由于实际应用中, 节点接收机分辨率存在一定限制, 不能连续反映接收信号强度随距离变化而改变的情况, 而插值多项式则能够更加接近实际情况, 因此, 实际应用过程中的估计误差将会更低; 此外, 结合仿真结果中的误差情况可知, 样本空间中部的平均

误差小于样本空间两端的平均误差, 该结论直接验证了前面所提出的中值方法的有效性。

表 2 给出了本文中不同参考点间隔时间对链路生存时间估计的影响程度, 其中 Single Epoch 场景采用中值方法选取参考点, 即以 $t = 3$ s 时刻为参考点, 当 $\Delta t = 0.25$ s 的时候, 由于节点的接收机分辨率有限, 无法连续地反映信号强度随节点之间距离变化情况, 难以准确地估计链路生存时间, 使得所产生的误差达到 30%以上, 当 Δt 逐渐增加, 根据插值多项式估计的参考点接收信号强度值能够准确地用于链路生存时间估计。

表 2 链路生存时间估计误差

场景	估计误差 (%)	估计误差 (%)	估计误差 (%)
	$\Delta t=0.25$ s	$\Delta t=0.5$ s	$\Delta t=1$ s
Single Epoch	32.665	0.31	0
Multi-Epoch MV1	14.065	9.33	17.121
Multi-Epoch MV2	23.346	9.00689E-5	0

Multi-Epoch MV1 和 Multi-Epoch MV2 两场景主要区别为是否对样本空间进行截断处理, 其中 MV1 为没有截断的情况, 即以 $t = 3.75$ s 作为参考点, 而 MV2 为以 $t = 5$ s 作为参考点。对于 MV1 场景来说, 当间隔时间 Δt 为 0.25 s 的时候, 牛顿插值多项式在估计接收信号强度过程中所引起的误差在链路生存时间估计过程中被放大, 所估计结果误差较大, 当 $\Delta t = 1$ s 的时候, 由于各个参考点并不属于相同运动阶段, 估计误差依然较高, 接近 20%; 当对样本空间截断之后, 节点保留第 2 个运动阶段的数据, 依然采用中值方法选取参考点, 即场景 MV2, 估计误差随着 Δt 的增加而极大降低, 可见, 截断方法使得节点避免选择不同运动阶段的参考点, 有效地降低了估计误差。

4.2 路由机制性能仿真

本文使用 OPNET 平台对所提出的 ODLDE 路由机制的性能进行仿真, 具体的仿真参数如下: 仿真场景为 $1500\text{ m} \times 500\text{ m}$, 节点最大移动速度为 20 m/s, 节点数量为 30, 数据包长度为 512 bit, 数据包间隔为 50 ms, 源节点数量为 15, 仿真时间为 2000 s。为了能够准确地说明采用 ODLDE 机制所建立端到端路径的稳定性, 我们选取节点移动过程中的暂停时间作为横坐标, 分别对路由重建次数、数据包传送概率以及端到端延迟 3 个方面的性能进行衡

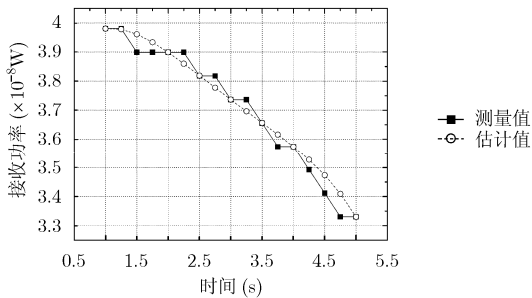


图 3 接收功率估计

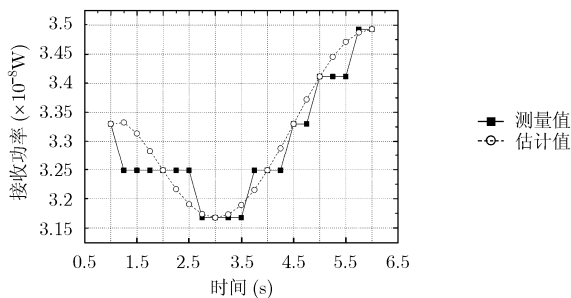


图 4 接收功率估计

量。

当采用 ODLDE 路由机制时, 节点根据所接收的其它节点信号强度对与其连接的链路生存时间进行预测, 进而选择较长生存时间的链路逐跳建立端到端路径, 按照这种方式建立的路径比较稳定。从图 5 中能够看出, 在整个仿真过程中, ODLDE 机制有效地减少了端到端路径重建次数, 降低了用于路径建立的控制开销。

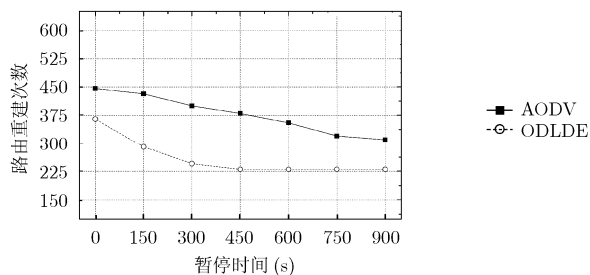


图5 路由重建次数

数据包传输成功概率受到多个因素影响, 其中路径断裂最为主要, 当路径断裂之后, 链路所连接的上游节点将缓冲数据包以等待路由重新建立, 在此段时间内, 节点的缓冲区将被迅速填满, 后续到达的数据包将被丢弃。通过建立稳定的端到端路径, ODLDE 路由协议能够有效地避免源节点产生的数据包在路径断裂的时候出现丢弃, 如图 6 所示, 采用 ODLDE 协议能够将数据包成功传输概率提高 12.5%左右, 有效地改善了网络传输能力。

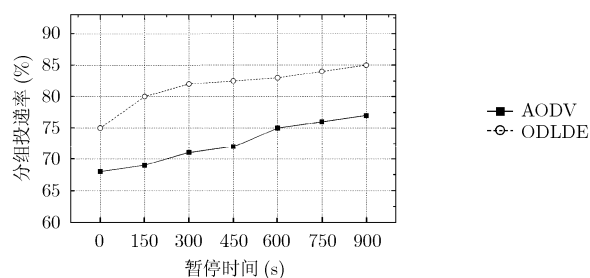


图6 数据包传送概率

显然, ODLDE 路由协议所建立的路径在跳数上通常大于 AODV, DSR 等以跳数作为路径选择参数的协议, 节点需要耗费更多的时间转发路由请求以及路由应答数据包; 虽然 ODLDE 路由协议能够降低数据包丢弃概率, 减少由于丢弃而导致的数据包重传, 从一定程度上补偿了端到端延迟性能, 但是影响数据包延迟性能的因素较复杂, 与传统有线网络不同, 除了传输延迟、传播延迟等, MANET 中的节点需要通过竞争接入信道, 而竞争失败的节

点需要执行回退过程, 该计时器采用伪随机整数以及竞争窗口大小计算, 带有较大的随机性, 难于准确地对其进行分析; 另外文中所提出的用于缓冲到达的路由请求的时间窗口机制也将对数据包的平均端到端延迟产生影响。如图 7 所示, ODLDE 对延迟改善程度平均为 4.7%。

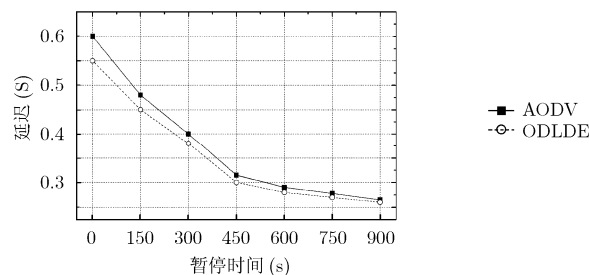


图7 端到端延迟

5 结论

本文提出一种用于 Ad hoc 网络的链路生存时间估计方法, 该方法能够在不依赖 GPS 设备的基础上应用于各种移动模型, 并且设计了面向链路稳定性的路由机制。仿真结果表明, ODLDE 路由协议能够有效地减少路由发现次数, 降低数据包丢弃率以及平均端到端延迟, 对于多媒体业务来说, ODLDE 路由协议能够为其提供稳定的传输。

参考文献

- [1] La R J and Han Y J. Distribution of path durations in mobile Ad hoc networks and path selection [J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2007, 15(5): 993-1006.
- [2] Akaidi M and Alchaita M. Link stability and mobility in Ad hoc wireless networks [J]. *IET Communications*, 2007, 1(2): 173-178.
- [3] Rohit D, Cynthia D R, and Wang K Y, et al.. Signal stability-based adaptive routing (SSA) for Ad hoc mobile networks [J]. *IEEE Personal Communications*, 1997, 4(1): 36-45.
- [4] Toh C K. Associativity-based routing for Ad-hoc mobile networks [J]. *Wireless Personal Communications*, 1997, 4(2): 103-139.
- [5] Zhang H and Dong Y N. A novel path stability computation model for wireless Ad hoc networks [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2007, 14(12): 928-931.
- [6] Hossain M J, Dewan M A A, and Chae O. Maximizing the effective lifetime of mobile Ad hoc networks[J]. *IEICE Transactions on Communications*, 2008, E91B(9): 2818-2827.
- [7] Namboodiri V and Gao L X. Prediction-based routing for vehicular Ad hoc networks [J]. *IEEE Transactions on*

- Vehicular Technology*, 2007, 56(4): 2332-2345.
- [8] Mauve M, Widmer J, and Hartenstein H. A survey on position-based routing in mobile ad-hoc networks [J]. *IEEE Network*, 2001, 15(6): 30-39.
- [9] 张晖, 董育宁. 基于移动预测模型的 Ad hoc 网络稳定链路度量[J]. 通信学报, 2008, 28(11): 30-37.
Zhang Hui and Dong Yu-ning. Link stability metric based on mobility prediction model in mobile Ad hoc networks [J]. *Journal on Communications*, 2008, 28(11): 30-37.
- [10] Akaidi M and Alchaita M. Link stability and mobility in Ad hoc wireless networks [J]. *IET Communications*, 2007, 1(2): 173-178.
- [11] 肖百龙, 郭伟, 刘军. 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. Pseudo gossip routing algorithm based link stability in mobile Ad hoc networks [J]. *Journal on Communications*, 2008, 29(6): 26-33.
- 吴大鹏: 男, 1979年生, 博士, 研究方向为无线多跳网络、互联网服务质量控制.
- 武穆清: 男, 1964年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为宽带通信网络接入理论与技术、通信网络流量工程与服务质量以及无线网络.
- 甄岩: 男, 1982年生, 博士生, 研究方向为无线多跳网络、网络可靠性.
- 孙兵: 男, 1983年生, 硕士生, 研究方向为无线多跳网络.