

移动 Ad hoc 网络中基于自适应策略的稳定链路选择算法

张 晖^① 董育宁^{①②③}

^①(南京邮电大学通信与信息工程学院 南京 210003)

^②(南京大学计算机软件新技术国家重点实验室 南京 210093)

^③(苏州大学江苏省计算机信息处理技术重点实验室 苏州 215006)

摘 要: 该文提出了一种基于自适应策略的稳定链路选择算法, 定义了稳定邻居度量和本地运动度量两种稳定测度。在此基础上, 通过引入模糊隶属度函数得出稳定测度的重要性权值, 利用重要性加权的方法即可根据网络状况自适应地得到链路的稳定概率, 从而为选择最稳定链路及路由提供依据。仿真结果表明该算法能很好地适应当前的网络状况, 明显优于基于 LF 因子和基于剩余生命时间的链路选择算法, 稳定性能显著提高。

关键词: MANET; 链路稳定性; 模糊隶属度函数; 自适应策略

中图分类号: TN915

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)12-2986-05

Adaptive Strategy Based Stable Link Selection Algorithm for Mobile Ad hoc Networks

Zhang Hui^① Dong Yu-ning^{①②③}

^①(College of Communication and Information Engineering, Nanjing University of Posts and
Telecommunications, Nanjing 210003, China)

^②(State Key Lab. for Novel Software Technology, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

^③(Jiangsu Provincial Key Lab of Computer Information Processing Technology, Suzhou
University, Suzhou 215006, China)

Abstract: An adaptive strategy based stable link selection algorithm is proposed in this paper, in which the stable neighbor metric and local movement metric are defined. On the basis, by use of the weighting method and weighting coefficients of the two metrics that are acquired by the fuzzy membership function, the stability probability of each link can be computed adaptively so as to find the most stable link or route in a route discovery. The simulation results show that the algorithm can effectively adapt to the network conditions, and outperforms the longevity factor based algorithm and the residual lifetime based algorithm in selecting stable links.

Key words: MANET; Link stability; Fuzzy membership function; Adaptive strategy

1 引言

Ad hoc 网络是一种特殊的无线移动通信网络, 具有多跳路由和拓扑变化频繁的特点。因此, 选择稳定(长寿)的路由对于提供端到端通信的 QoS 保障是十分重要的。而路由是由链路组成的, 任一链路的断开都将导致整个路由的断开, 路由的稳定性取决于链路的稳定性。选择稳定性高的链路能有效地减少重路由次数、增加路由的存在时间, 进而提高路由的稳定性。近年来, 选择稳定链路或稳定路由的算法不断涌现, 成为当前研究的热点之一。

文献[1,2]提出了根据全球定位系统GPS获取的节点位置

及运动信息选择稳定链路的方法, 但这类方法在室内环境下失效且大多民用场合都不具备GPS接收设备。文献[3]和文献[4]分别引入长寿因子 (Longevity Factor, LF)和邻居稳定性因子 (Neighbor Stability Factor, NSF)用于评价链路的稳定性, 它们均建立在链路越老越稳定的思想上。文献[5,6]均采用剩余生命时间作为链路稳定性度量, 选择最稳定链路。目前对基于剩余生命时间的链路选择算法研究比较多, 但该类算法仍存在预测不够准确, 当网络拓扑频繁变化时, 算法性能变差。

Bhattacharya等人^[7]首次提出了将数据压缩方法LZ78作为预测算法以解决蜂窝系统中位置管理问题。文献[8]同样采用LZ78算法结合从GPS获取的节点位置信息建立预测模型, 实现稳定分簇的目的。在上述思想的基础上, 本文提出了一种基于自适应策略的稳定链路选择算法。利用LZ78算法对节点不同运动特性的学习及预测, 分别得到稳定邻居度量和本地运动度量两种稳定测度。根据稳定测度的特点, 引入

2006-08-28 收到, 2007-06-19 改回

江苏省自然科学基金(BK2005147), 教育部科学技术研究重点项目(205060), 南京大学计算机软件新技术国家重点实验室开放基金(2005), 苏州大学江苏省计算机信息处理技术重点实验室开放课题(2006)和南京邮电大学攀登计划项目(NY206019)资助课题

运动因子和组合运动因子来描述本地节点的运动特性及当前的网络状况。通过理论分析与仿真实验相结合的方法,得出上述两种因子与稳定测度相对重要性的关系。在此基础上,通过引入模糊隶属度函数得出稳定测度的重要性权值,从而可以自适应地计算链路的稳定概率,为选择最稳定链路及路由提供依据。

本文第2节给出本文算法的理论模型和基础;第3节提出了基于自适应策略的稳定链路选择算法;第4节给出仿真验证;最后是结束语。

2 理论模型与基础

节点的运动特性可分为两种:一是节点自身的运动特性,一般静态或运动程度不大的节点适合做稳定链路的路由器;另一个是若干个节点的组合运动或团队运动,例如公路上一起行驶的几辆汽车。对组合运动,虽然他们各自本身的运动速度可能都很大,但相互间距离变动不大,链路也较稳定。因此,我们使用两种运动测度对上述不同运动特性加以刻画:一是两个节点互为一跳邻居的稳定性,即稳定邻居度量;另一个是节点自身的运动测度,即本地运动度量。

2.1 稳定邻居度量

为方便表述,本文总是用标号 n_i 表示所考虑的本地节点。一旦进入网络,节点 n_i 初始化其邻居节点表,邻居节点表由邻居 ID 号及相应的稳定邻居状态树组成。假设某节点 n_{i-1} 首次进入节点 n_i 的一跳邻域, n_i 将 n_{i-1} 的 ID 号加入邻居节点表内,并开始产生两节点的状态序列。可用符号 a , b 表示节点 n_i 与节点 n_{i-1} 之间的链接状态 $S(i, i-1)$:

(1)若节点 n_{i-1} 是节点 n_i 的邻居,则 $S(i, i-1) = a$, 即两节点处于稳定链接状态。

(2)若节点 n_{i-1} 不是节点 n_i 的邻居,则 $S(i, i-1) = b$, 即两节点处于断开状态。

设某一段时期内, $S(i, i-1)$ 可表示为下述符号序列: $bbbbbaaaa aabbbbaabb bb\dots$ 。它是节点 n_i 与节点 n_{i-1} 之间的链接状态历史记录。根据 LZ78 算法^[7,8], 本文将符号序列 $S(i, i-1)$ 解析为: “ $b, bb, bba, a, aa, aab, bbaa, ab, bbb, \dots$ ”, 并用一个树结构进行存储和维护, 生成的稳定邻居状态树如图 1 所示。其中树根表示邻居为 n_{i-1} 的空节点, 从树根向下每一层节点表示在其父节点(符号)出现的条件下, 子节点上符号出现的频度(用括号中的数字表示)。

稳定邻居状态树是对过去历史的存储与维护, 随着输入

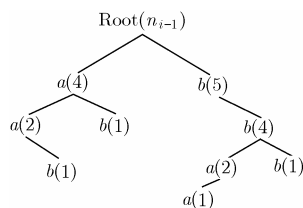


图 1 稳定邻居状态树

符号的不断累积, 树的深度会不断增加, 用于预测的历史信息也不断丰富, 但过于久远的历史对现在及将来的影响微乎其微, 因此在数学上可表示为一个高阶马尔可夫模型 $\{X_n, n = 0, 1, \dots\}$, 设该模型阶数为 N :

$$\begin{aligned} P(X_M = x_M / X_0 = x_0, \dots, X_{M-N} = x_{M-N}, \dots, X_{M-1} = x_{M-1}) \\ = P(X_M = x_M / X_{M-N} = x_{M-N}, \dots, X_{M-1} = x_{M-1}), \\ M \geq N > 0 \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $0, 1, \dots, M$ 表示马尔可夫链 X_n 的抽样时刻, 即周期性地产生状态符号的时刻(周期为 T)。 x_0, x_1, \dots, x_M 表示对应时刻随机过程的取值, 取值于状态空间 $I = \{a, b\}$ 。

设 sub_tree 为状态树的子树且其各层祖宗节点及根节点与转移概率中的 N 个条件参数值 $x_{M-N}, \dots, x_{M-2}, x_{M-1}$ 一一对应, 则该马尔可夫链的条件转移概率可根据状态子树上不同深度的树叶分支计算得出:

$$\begin{aligned} P(X_M = x_M / X_{M-N} = x_{M-N}, \dots, X_{M-1} = x_{M-1}) \\ = \frac{NUM(x_M)}{SUM} \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $NUM(x_M)$ 表示 sub_tree 上状态符号 x_M 出现的频度数, SUM 表示 sub_tree 上所有状态符号出现的频度总数。

另一方面, 在 Ad hoc 网络中, 节点的运动模式是经常性重复的, 因此可将该马尔可夫链 X_n 看成平稳随机过程。假定 $K \geq 0$ 为时间轴上的偏移量, 设当前时刻是 $M + K - 1$, 当前 N 阶状态符号串为 $x_{M-N}, \dots, x_{M-1} \in I$, 下一时刻为 $t = M + K$, 由式(2)及 X_n 的平稳性可得:

$$\begin{aligned} Pr_t(x_M) = P(X_{M+K} = x_M / X_{M-N+K} \\ = x_{M-N}, \dots, X_{M-1+K} = x_{M-1}) \\ = \frac{NUM(x_M)}{SUM} \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $Pr_t(x_M)$ 为下一时刻 t 节点 n_i 和节点 n_{i-1} 处于 x_M 状态的概率。因此稳定邻居度量即节点 n_i 和节点 n_{i-1} 在下一时刻 t 处于稳定链接状态 a 的概率为 $Neigh_t(n_i, n_{i-1}) = Pr_t(a)$ 。

2.2 本地运动度量

从节点自身运动特性考虑, 若节点 n_i 的一跳邻居变化个数很大(离开或进入), 则该节点很可能处于很大的运动状态; 反之, 如果它的邻居没有变化, 则它很可能处于静态或很小的运动状态, 适合作为稳定链路的路由器。因此可用符号 a' , b' 表示节点 n_i 自身运动的状态:

(1)若节点 n_i 其一跳邻居变化个数($Changenum_i$)小于 L , 则节点处于静态或小运动状态 a' 。其中 $L \geq 1$ 是节点设定的阈值。

(2)若节点 n_i 其一跳邻居变化有 L 个以上发生变化, 节点处于大运动状态 b' 。

与前一小节类似, 可以通过 LZ78 算法建立本地运动状态树, 并根据式(2), 式(3)可得节点 n_i 在下一时刻 t 节点处于小运动状态 a' 的概率(本地运动度量): $Move_t(n_i) = Pr_t(a')$ 。

3 基于自适应策略的稳定链路选择算法

稳定邻居度量和本地运动度量分别对节点的组合运动程度及自身运动程度加以刻画,反映了链路不同侧面的稳定性。因此链路的稳定概率应由这两种测度组成。考虑链路 l_i , 假设它由节点 n_{i-1} 和节点 n_i 组成。由重要性加权的方法可得链路 l_i 在 t 时刻稳定概率:

$$P_t(l_i) = w_0 \times \text{Move}_t(n_{i-1}) + w_1 \times \text{Move}_t(n_i) + w_2 \times \text{Neigh}_t(n_{i-1}, n_i) \quad (4)$$

其中 w_0, w_1, w_2 为重要性权值, $0 \leq w_0, w_1, w_2 \leq 1, w_0 + w_1 + w_2 = 1$ 。

3.1 内部规律

为使式(4)更好地适应当前的网络状况并能根据节点当前的运动状态自适应地调整重要性权值,有必要找出影响两种稳定测度相对重要性的因素。因此根据两种测度的特点,需要仔细研究与节点运动特性相关的内部规律,通过理论分析与仿真实验相结合的方法找出其中规律和联系。首先定义两种因子以反映网络状况:(1)定义节点 n_i 的运动因子:

$$\alpha_i = k_\alpha \times \text{Changnum}_i / \text{ND}_i \quad (5)$$

其中 k_α 为平滑系数,选取 $k_\alpha = 10$ 。 Changnum_i 为 n_i 邻居变化个数, ND_i 为 n_i 的邻居密度,可以通过实时探测得到。由前面论述可知, α_i 与 n_i 的自身运动特性有关。(2)定义节点 n_i 与 n_{i-1} 的组合运动因子,

$$\beta_{i,i-1} = \text{TN} / T \quad (6)$$

其中 TN 表示节点 n_i 与 n_{i-1} 最近一次成为邻居算起到当前时刻(此时两节点仍互为邻居)的时间跨度, T 为抽样周期。显然, $\beta_{i,i-1}$ 反映了节点 n_i 与 n_{i-1} 的组合运动特性。

稳定测度的性能(在选择稳定链路方面)比较决定了它们在式(4)中的相对重要性。若某种测度性能较好(与另一种测度比较)则该种测度就相对重要,若其性能好的程度越大(与另一种测度比较)则该种测度就越重要。通过在具有各种不同节点运动特性的场景下进行仿真并应用上述原理分析,可得如下规律:随着 α_{i-1} 或 α_i 的增大,节点 n_{i-1} 或 n_i 的本地运动度量的性能比两节点的稳定邻居度量的性能下降快得多。随着 $\beta_{i,i-1}$ 的增大,节点 n_{i-1} 和 n_i 的稳定邻居度量的性能比两节点的本地运动度量的性能上升快得多。因此, α_i , α_{i-1} 或 $\beta_{i,i-1}$ 的增大均使得两节点的稳定邻居度量的相对重要性 w_2 提高了。

3.2 自适应策略

如前所述,稳定测度的相对重要性与运动因子 α_{i-1} , α_i 与组合运动因子 $\beta_{i,i-1}$ 直接相关。但是,它们的重要程度与上述因子的具体函数关系不确定,更类似于一种模糊关系。实际上,稳定测度重要性本身就是一种模糊的概念。因此对于链路 l_i , 定义模糊集 $A(l_i) = "n_i$ 与 n_{i-1} 的稳定邻居度量重要",

论域为 $U(l_i) = \{\mu_{i,i-1} \mid \mu_{i,i-1} = (\alpha_i + \alpha_{i-1})\beta_{i,i-1}\}$, 隶属度函数为 $0 \leq F(\mu_{i,i-1}) \leq 1$ 。 $\mu_{i,i-1}$ 由运动因子 α_{i-1} , α_i 与组合运动因子 $\beta_{i,i-1}$ 组成,反映了当前网络状况。若重要性权值 $w_2 = 0$, 节点 n_i 和 n_{i-1} 的稳定邻居度量不起任何作用,则该稳定邻居度量必不重要。此时 $\mu_{i,i-1} \notin A(l_i)$ 即 $F(\mu_{i,i-1}) = 0$ 。若 w_2 增大,此时隶属度应增大。若 $w_2 = 1$, 节点 n_i 和 n_{i-1} 的稳定邻居度量起唯一作用。此时 $\mu_{i,i-1} \in A(l_i)$ 即 $F(\mu_{i,i-1}) = 1$ 。因此重要性权值 w_2 可看成在某种网络状况下的隶属度,即 $w_2 = F(\mu_{i,i-1})$ 。

由 3.1 节,若 $\mu_{i,i-1}$ 增加, w_2 必然增加,因此其隶属度应该增大,即 $F(\mu_{i,i-1})$ 为 $\mu_{i,i-1}$ 的递增函数:

令 $\lim_{\mu_{i,i-1} \rightarrow \infty} F(\mu_{i,i-1}) = 1$ 和 $F(0) = 0$ 。利用增量法^[9]可得

$$dF(\mu_{i,i-1}) / d\mu_{i,i-1} = k_F \times \mu_{i,i-1} \times (1 - F(\mu_{i,i-1})) \quad (7)$$

其中 $k_F > 0$ 为收敛系数,仿真中选取 $k_F = 1$ 。解微分方程得:

$$w_2 = F(\mu_{i,i-1}) = 1 - ce^{-\mu_{i,i-1}^2/2} \quad (8)$$

其中 c 为积分系数。由于 $F(0) = 0$, 代入式(8)得: $c = 1$ 。

另外, w_0 、 w_1 均表示本地运动度量的相对重要性。为简单起见,令 $w_0 = w_1$, 即

$$w_0 = w_1 = (1 - w_2) / 2 = 0.5 \times e^{-\mu_{i,i-1}^2/2} \quad (9)$$

因此结合式(4),式(8)及式(9)可得基于自适应策略的链路 l_i 的稳定概率。本地节点计算与每个邻居节点形成链路的(基于自适应策略的)稳定概率,从中选择具有最大该种稳定概率的链路的算法即是基于自适应策略的稳定链路选择算法(本文算法)。

4 仿真验证

为实现本文算法,我们设计了一个C++类(仿真工具为 ns-2^[10])。为便于性能比较,定义两种性能指标:(1)平均断开次数:单位时间(每 100s)内网络中每个节点利用链路选择算法从邻居节点中选择与其具有最大稳定性测度的邻居形成链路的平均断开次数。(2)平均生命时间:网络中每个节点利用链路选择算法从邻居节点中选择与其具有最大稳定性测度的邻居形成链路的平均存在时间。在 Ad hoc 网络中,不同的节点可能表现出不同的运动样式。因此,仿真中不同的节点综合地采用 Random Waypoint 模型及 RPGM 模型(相关模型介绍见参考文献[11])。仿真环境如下:拓扑大小为 600m × 600m, 抽样更新周期 $T = 0.5\text{s}$, 阈值 $L = 2$, 仿真时间为 1000s。每个数据点均为 10 次仿真得到的平均值。

分别改变节点最大运动速度 Maxspeed, 采用 RPGM 模型的节点比例(RPGM 组个数, 5 个节点为一组)对稳定邻居度量算法, 本地运动度量算法与本文算法的性能进行比较得到图 2 及图 3。稳定邻居度量算法即本地节点从邻居节点中选择与其具有最大稳定邻居度量的邻居形成链路的算法。本

地运动度量算法即本地节点从邻居中选择具有最大本地运动度量的邻居形成链路的算法。实际上, 稳定邻居度量算法与本地运动度量算法均为基于式(4)且权值固定的链路选择算法。从图 2, 图 3 中可以看出: 在网络状况不断变化的情况下, 本文算法的性能始终比上述两种固定权值的链路选择算法的性能要好, 能够很好地适应网络状况的变化, 根据当前网络状况调整重要性权值。

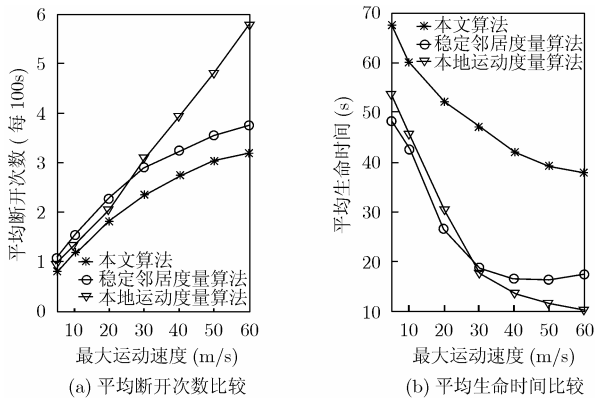


图 2 不同最大运动速度时的性能比较

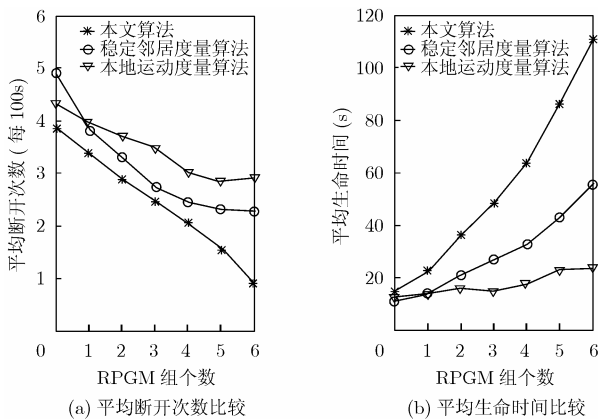


图 3 不同 RGM 组个数时的性能比较

为进一步验证本文算法的有效性, 将本文算法与 LF 算法^[3], 直方图算法^[5,6]进行比较。LF 算法即基于 LF 因子的链路选择算法, 选取具有最大 LF 因子的链路。直方图算法即基于剩余生命时间的链路选择算法, 选取具有最大剩余生命时间的链路。分别改变节点个数 Nodenum 与节点发射半径 r 进行仿真得到图 4 和图 5。由图 4 及图 5 可以看出: 不论改变节点个数还是改变发射半径, 本文算法选取的链路稳定性能均比 LF 算法和直方图算法选取的链路要好。由此可知, 应用本文算法选取的链路较之于文献中报道的几种方法更加稳定, 可以有效地减少链路断开次数, 增加其生命时间。

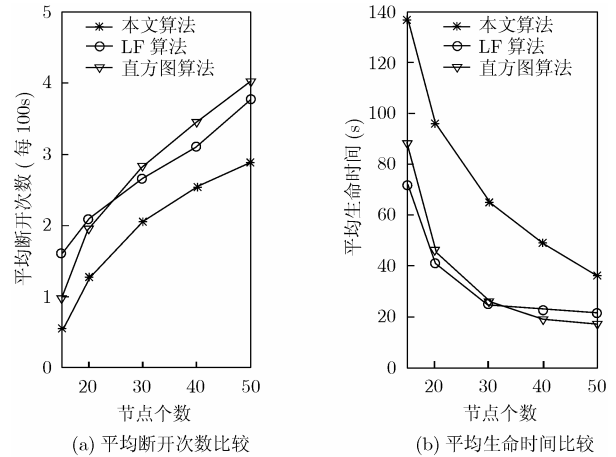


图 4 不同节点个数时的性能比较

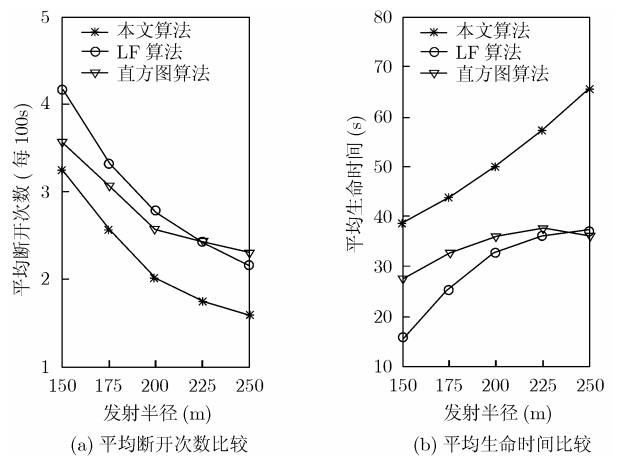


图 5 不同发射半径时的性能比较

5 结束语

本文提出了一种针对 Ad hoc 网络的基于自适应策略的稳定链路选择算法。该算法可以有效地选择稳定链路, 为源节点到目的节点之间选择多条稳定路由或一条最稳定路由提供依据。该算法无需通过 GPS 获取信息; 通过引入自适应策略, 该算法能很好地适应网络状况的变化。仿真对比验证了其有效性。下一步的工作方向是将该算法应用到路由协议(如 AODV)中, 以期形成新的基于稳定性的 QoS 路由协议。

参考文献

- [1] Kim Won-Ik, Kwon Dong-Hee, and Suh Young-Joo. A reliable route selection algorithm using global positioning systems in mobile Ad-hoc networks[C]. IEEE International Conference on Communications 2001, Helsinki, Finland, 2001, 10: 3191- 3195.
- [2] Su W, Lee S, and Gerla M. Mobility prediction and routing in Ad hoc wireless networks[J]. International Journal of Network Management, 2001, 11(1): 3-30.

- [3] Hsu C Y, Wu J C, and Wang S T. Finding stable routes in mobile Ad hoc networks[C]. 18th International Conference on Advanced Information Networking and Applications, Fukuoka, Japan, 2004, 2: 424-427.
- [4] Chen L and Lee C W. Neighbor stability routing in MANETs[C]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference 2005, New Orleans, USA, 2005, 4: 1964-1969.
- [5] Gerharz M, Waal C, and Frank M, *et al.* Link stability in mobile wireless Ad hoc networks[C]. 27th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks, Tampa, USA, 2002: 30-39.
- [6] Rango F D, Guerriero F, and Marano S, *et al.* A multi-objective approach for energy consumption and link stability issues in ad hoc networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2006, 10(1): 28-30.
- [7] Bhattacharya A and Das S K. LeZi-Update: An information-theoretic approach to track mobile users in PCS networks[C]. 5th Annual ACM Int'l Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'99), Seattle, USA, 1999: 1-12.
- [8] Sivavakeesar S, Pavlou G, and Liotta A. Stable clustering through mobility prediction for large-scale multihop intelligent ad hoc networks[C]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference 2004, Atlanta, USA, 2004, 3: 1488-1493.
- [9] 胡宝清. 模糊理论基础[M]. 第一版, 武汉: 武汉大学出版社, 2004: 291-293.
- Hu B Q. Fuzzy Theory Basis[M]. First edition, Wu Han: Wu Han University Press, 2004: 291-293.
- [10] Fall K and Varadhan K. *ns* notes and documentation [EB/OL]. <http://www-mash.cs.berkeley.edu/ns/>, 2003, 6.
- [11] Camp T, Boleng J, and Davies V. A survey of mobility models for Ad hoc network research [J]. *Wireless Communication & Mobile Computing* (WCMC), Special issue on Mobile Ad hoc Networking: Research, Trends and Applications, 2002, 2(5): 483-502.
- 张 晖: 男, 1982 年生, 博士生, 研究方向为 Ad hoc 网络 QoS 保障.
- 董育宁: 男, 1955 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为多媒体通信与图像处理.