

一种新的 MANET 节点—链路稳定度模糊评估模型^{*}

王 桐^{1,2}

(1. 湖北经济学院 信息管理学院, 武汉 430205; 2. 武汉大学 计算机学院, 武汉 430072)

摘 要: 利用模糊数学思想, 针对 MANET 提出了一种稳定性评估模型, 即节点—链路模糊稳定度模型。该模型通过对位置临界点和速度进行综合模糊建模, 用模糊值精确衡量 MANET 中节点与链路的稳定性高低。理论和模拟分析证明了该模型能更有效地对 MANET 的稳定性和生存能力进行定量评估。在该模型下, MANET 中节点与链路在大尺度时间区间内的稳定性要高于小尺度时间区间内的稳定性。

关键词: 移动自组网; 模糊稳定度模型; 链路强度; 临界区; 节点—链路稳定度模型

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2013)01-0215-06

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.01.055

New fuzzy link-node stability evaluation model for mobile Ad hoc networks

WANG Tong^{1,2}

(1. College of Information Management, Hubei University of Economics, Wuhan 430205, China; 2. School of Computer, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: This paper proposed a stability assessment model: node-link fuzzy stability model for MANET based on fuzzy mathematical thinking. This model's central idea was to integrate fuzzy modeling of the critical location point and speed. It used fuzzy values to accurately measure the stability of the level of nodes and links in MANET. Compared to other assessment methods, this fuzzy stability model could be more effective in its quantitative evaluation of the stability of the survival parameters of MANET. Under this model, the stability of node and link in MANET at large-scale time interval is higher than that of the one at small-scale time interval.

Key words: MANET; fuzzy stability model; link strength; transition region; link-node stability model

在无线 Ad hoc 网络中, 影响网络生存能力的因素有很多, 如终端速度、节点密度、能量消耗、处理路由更新的效率(和路由协议的复杂度相关)等。可以看到, 目前对于节点移动给生存性带来的影响已经有很多研究。然而, 节点密度也会影响网络的吞吐率、时间延迟等一些关键性的生存参数; 能量消耗情况更多的是在网络生命时间领域内进行分析。因此, 这些研究只是覆盖了无线 Ad hoc 网络生存性研究中的某一些方面, 而另外一类非常重要的影响生存性的因素, 即对网络稳定性方面的研究比较滞后。到目前为止, 还没有看到比较好的方法来评估网络稳定性。

从整体上看, 无论是终端速度、节点密度、能量消耗, 还是处理路由更新的效率等这一类生存性参数, 其底层的决定因素都与网络的稳定性有关, 而 MANET 的稳定性主要取决于节点与链路的稳定性。节点的稳定和链路的稳定密不可分, 节点越稳定, 则意味着链路改变率小或者虽然较大但是可以预测。可以想到, 在一个相对稳定的网络环境中, 较高稳定性使得网络能有更高的机率获得好的生存性。

在网络稳定性的评估方面, 目前还没看到比较直接的研究, 大多数研究都是基于网络中节点度的改变率、平均节点度、链路持续时间等指标从侧面来反映网络的稳定性。然而, 没有证据表明节点度改变率的大小会使网络稳定性发生同等的变化。同样, 平均节点度只是一个宏观的衡量指标, 对于连续时间上的稳定性变化缺乏度量能力; 而链路持续时间等指标只是

单方面地认为时间长短是唯一衡量依据, 并未将稳定性大小同时间长短建立对应关系, 缺乏定量评估的能力。

本文试图借助模糊数学原理对无线自组网的稳定性进行分析。首先通过分析临界点的概念, 引出影响稳定性的关键性因素, 即节点位置及相对速率。通过对链路的存在性进行模糊建模, 对存在性进行定量刻画, 解决了传统方法在链路存在性上二元论的局限性。在此基础上, 将链路稳定性建模成一个封闭时间区域上存在性连续变化的度量指标, 给出了 RWP 模型在一定时间区间上的模拟结果。进一步地, 通过分析在一定时间区域内隶属于某个节点的所有链路的稳定性变化, 建立节点的稳定度模型, 并对模拟结果进行分析。

1 相关工作

在无线 Ad hoc 网络中的每个节点都可以独立移动, 因而链路稳定性与两个节点间链路的变化趋势和速度有直接关系。一般而言, 在信号发送功率确定的前提下, 节点间的相对速度会影响链路的持续时间, 而节点的通信模型和节点间的欧氏距离则决定了链路的质量。因此, 在理想化的 UDG 通信模型与 q-UDG、shadow 通信模型中链路质量的变换情况有所不同。

决定节点速度变化的是移动模型, 目前常用的模型有 random、Manhattan grid、Gauss-Markov、RWP 及 RD 模型。决定节点间欧氏距离的是节点空间位置的时间分布情况, 然而, 就算

收稿日期: 2012-06-04; **修回日期:** 2012-07-10 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(60633020, 60970117, 61173137); 湖北省自然科学基金重点资助项目(2010CDA004); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(3104002); 湖北省教育厅科技处指导资助项目(B20121901)

作者简介: 王桐(1979-), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为计算机通信与网络(wangt.netlab@gmail.com)。

是在最简单的移动模型的情况下,对于空间分布的研究都是非常困难的^[1,2]。对于网络稳定性的研究,目前主要集中在链路稳定性和路径稳定性的研究上。因为路径是由若干段链路所构成的,路径和链路从某方面讲是一致的,链路的稳定性研究目前主要集中在如下几个方面:

a) 链路持续时间(LDT)。在这一部分研究中,无线 Ad hoc 网络中链路的稳定性通常认为是由该链路在时间 t 内的存在概率 p 所决定^[3], p 越大则认为其在时间 t 内具有越高的稳定性。若 LDT 过小,则会导致路由重新计算及丢包,造成网络不稳定。因此如何提高链路持续时间被认为是提高稳定性的直接方法。然而,高的路径持续时间并不代表高的稳定性^[4],因此稳定性与 LDT 不能直接划等号。

文献[5,6]在假定 free space 传输模型的情况下,认为只要通过 GPS 获得节点的速度和当前位置信息,就可以通过公式预测链路失效时间(LET)。文中使用的是一种理想化的移动模型,即每个节点以预定的速度匀速移动,移动方向随机选择,当移动到区域边缘时反弹回来继续移动。然而文中仅仅只考虑了距离,没有考虑距离和发射功率的关系。文献[7]对 RWP 和 RW 模型的 LDT 进行了概率分析,得出的结论是:LDT 依赖于节点间形成连接时的距离以及相对速度,且 LDT 的概率分布接近类正态分布,大部分链路的 LDT 在 20 s 左右时其 PDF 都在 0.1 以下。在文献[8,9]中提出了三元组的概念,对链路的存在性进行了预测并给出了概率上的分析。文献[10]研究了 MANET 中的多播路由问题,提出了链路预期持续时间的概念,并将其作为稳定性的度量。

b) 以节点速度为视角的研究。MANET 中节点的移动被认为是影响稳定性最大的因素之一。在 RWP 模型中,节点的停顿时间越长,其移动性越差^[11]。然而影响节点移动的并不只有停顿时间一种参数,文献[12]使用了平均速度度量节点移动性,而文献[13]使用了最大速度来衡量。这些研究没有考虑节点间的相对移动,因为即使节点移动速度很快,只要节点间的位置相对固定的话,链路的稳定性也是较高的。文献[14]提出了相对速度的衡量标准,使用了相对速度和平均空间相关度并在一种移动模型下研究了该指标和链路速率改变的关系。对于不同的移动模型,它并没有提出一个具有一致性的衡量指标。更重要的是,单纯使用相对移动指标并没有考虑到节点突发移动带来的链路动荡,因为即使平均相对移动速度不高,也可能存在相对移动速度改变过大的情况。Kwak 等人^[15]更进一步提出在使用相对移动指标的过程中,如果节点之间的距离很远,则即使相对移动速度很大,也不会对两者之间的链路状况造成影响,相反,如果两者距离较近,则会有较大的影响。同时,文中对于速度的预测一部分是基于 GPS,另一部分是基于接收信号强度。该方法的局限性在于其过分依赖于信号的精度,并且信号的模式也要预先知道。

此外,还有关于节点度的改变率^[16~18]和路径持续时间^[19]的相关工作。

2 节点—链路稳定度评估模型

为了引出节点—链路稳定度评估模型,首先用一个例子来阐述该模型的中心思想。

选取有着四个节点 A、B、C、D 的网络场景,分别用实心圆点进行标注。不失一般性地,设节点 A 为网络的中心节点,且每个节点的信号传输半径相同,由图中的大圆表示,大圆的边

即代表信号的边缘(临界点)。网络中节点的相对位置大体上可以分为图 1~4 这几种情况。

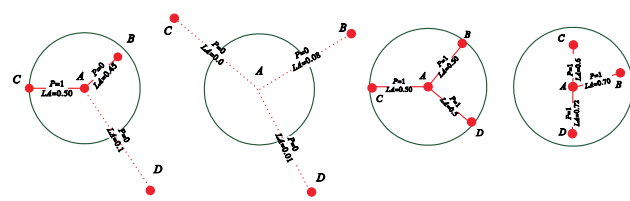


图1 部分节点处于临界点时 图2 全部节点处于非连接区域时 图3 全部节点处于临界点 图4 全部节点处于连接区域

显然,这四种情况网络的生存性是不一样的。在图 1 中,节点 C 处于临界点,在该点处,链路 AC 极不稳定,任何一点向外移动的趋势都会导致节点 AC 通信失败。图 3 中,该时刻所有节点都处于临界点,因此整个网络可以看成是处于极不稳定的状态。对于图 1、3 这两种情况,经典的研究中的节点度、平均节点度、链路持续时间等指标都不能很好地刻画它们生存性的差异,其原因在于对于临界点缺乏有效的建模机制。

图 2 和 4 是两种特殊情况。在图 2 中,所有节点(即 B、C、D)都处于信号边缘以外,即非连接状态。此时网络处于相对的稳定非连接状态,基于节点度的生存性理论会认为此时该网络生存性最低。然而,任何路由协议都不会选择这些不存在的链路(因为链路都处于非连接的稳定状态),因而反映出来的网络生存性会因为上层路由没有选择这些链路而不会有较大的变化。由此可以看出,生存性是否最低除了看节点连接状态,还要考察稳定度。图 4 中,所有节点都离信号边缘有比较大的距离,如果根据速度的大小选择一个适当的时间闭区间,可以认为在该区间内网络处于非常稳定的状态,并且此时网络的连接性也好。总的来说,为了能够区分及比较如图 1~4 所示的不同网络情况,本文基于模糊理论提出了一个评估模型,用来反映网络稳定性和生存能力。

从上面的分析可以看到,传统方法的局限性在于对临界点没有进行较好的建模,因此本文提出的节点—链路稳定度模型首先会对链路的存在性进行模糊建模。引入参数 LA , 表示存在性的模糊度量(简称模糊度)来区分不同的网络情况。如在图 1 与 3 中,节点 C 处于临界点,因此其 $LA = 0.5$,从模糊数学的角度讲,此时链路处于最模糊的状态,而 LA 接近于 0 或 1 时都表示此时链路的存在性比较确定。各种情况下的 LA 值如图 1~4 所示。

2.1 链路存在性模型

定义 1 链路存在度。设 P_{cs} 为接收节点能检测到的最低功率值信号, P_{tr} 和 P_{thres} 分别为发送节点的发射功率及接收节点能正确接收到信号的最低功率, v 为两节点之间的相对速率。令实数集论域 $X = (0, P_{tr}]$, 则链路存在度可以定义为 X 上的模糊集 $\tilde{L}$, $\tilde{L}$ 为论域 X 到实数集 $[0, 1]$ 上的模糊映射, 即 $\tilde{L}: X \rightarrow [0, 1], x \mapsto \tilde{L}(x)$, 令

$$\tilde{L}(x) = \int_X (1 - \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\pi v P_{thres}}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{2x^2}{v P_{thres}}} dx) / x \quad (1)$$

在区间 $[P_{cs}, P_{tr}]$ 上的函数图形如图 5 所示。

设 P_{thres} 为节点能正确接收信号的接收功率阈值,并假定载波感应距离为正确接收信号半径的两倍。当节点处于信号 P_{thres} 边缘时,链路存在性最不确定,因此此时链路的存在性模糊度应该为 0.5,即其存在性达到模糊极点,而当节点处于极限远时,链路肯定不存在,即模糊度为 0,而处于极限近时肯定

存在,模糊度为1。图5中三条曲线的差别主要是在相对速度参数 v 上, $v_1 < v_2 < v_3$,可见速度越大,曲线越平缓,且各个位置的模糊度量越接近0.5,速度的大小会对稳定性带来直接的影响。在区域边缘,速度越大越不能肯定链路的存在性,当速度接近极限时,从图6中的虚线可以看出所有存在性的度量已经完全失效。对于速度和位置这两种关键性的参数,模糊存在度模型很好地进行了刻画,每个节点的状态都和链路的存在建立了连续的映射关系。式(1)不论是从理论上还是物理上,其意义都非常明显。

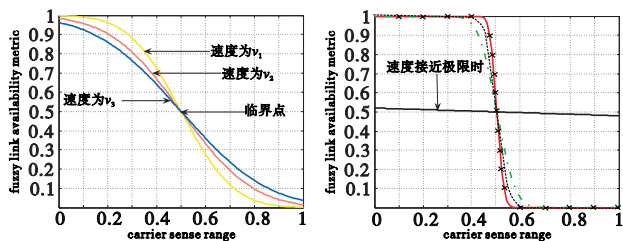


图5 链路存在度

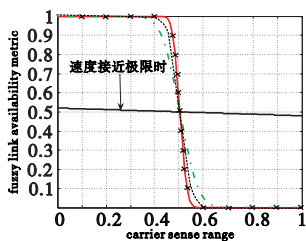


图6 速度极限情况

2.2 链路稳定度模型

定义2 链路稳定度设时间序列集 $T \subset Z^+$,且 U 是 T 上左端点为 a 、右端点为 b 的有界闭区间,即 $U = \{t_a, t_{a+1}, \dots, t_{b-1}, t_b\}$,其中 $t_j - t_{j-1} \geq 1, j \in [a+1, b]$ 。易知MANET在 U 上的链路存在度是一集合 $S = \{A | A \in F(U)\}$,其中 $F(U)$ 是 U 上所有模糊集的集合。对任意 $A \in S$,令 $LS(A) = \frac{1}{(b-a) \ln 2} \sum_{x=t_a}^{t_b} S(\tilde{L}_A(x))$,称 LS 是 S 上的稳定度函数, $LS(A)$ 是 $A \in S$ 的稳定度。其中函数 $S(\cdot)$ 为Shannon函数,即 $S: [0, 1] \rightarrow [0, 1]$,且

$$S(x) = \begin{cases} 0 & x=0,1 \\ -x \ln x - (1-x) \ln(1-x) & x \in (0,1) \end{cases}$$

S 的函数图像如图7所示。可以看到,该函数的特点是在自变量取值为0.5时,该函数达到最大值 $\ln 2$,且函数图像关于 $x=0.5$ 轴对称。函数取值最小为0,其分别对应于自变量取值为0或1时,从模糊数学的角度来说,此时表明系统处于确定状态。

可以看到,链路稳定度指标有两个极限情况。若在整个时间闭区间上,节点都处于临界点或速度很大时,存在性度量都处于0.5处,因此计算出来的链路稳定度指标数值为1,即最不稳定状态。而节点远离临界点或者速度较低时,存在性度量都处于0或1处,因此计算出来的链路稳定度指标数值为0,即最稳定状态。

为了确定链路在 $t \in [t_1, t_2]$ 区间内的稳定性,需要考察在每个时刻链路的存在度以及度量在该区间内的链路存在度模糊集的模糊程度。因此本文引入熵的思想来进行度量。

设 P_{thres} 为节点能正确接收信号的接收功率阈值,则在邻域 $\delta \subset (P_{\text{thres}} - \varepsilon, P_{\text{thres}} + \varepsilon)$ 内,链路的稳定性变化是最剧烈的,即认为此时链路的稳定性最低。而在邻域 $\delta \subset (P_{\text{thres}} - \varepsilon, P_{\text{thres}} + \varepsilon)$ 外,存在两种情况:a)接收功率超过 P_{thres} 之后,越大则意味着距离越近,因而链路存在且稳定性越高;b)接收功率低于 P_{thres} 之后,越低则意味着距离越远,因而链路不存在,且不存在的稳定性越高。

2.3 节点稳定度模型

定义3 节点稳定度。设网络的节点集 $N = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$,则在 t 时刻节点 i 的所有链路的稳定度是集合 $N' = \{v_i\}$ 到 N 的一个模糊映射,可以用模糊行向量表示为 $A = \{a_1, a_2, \dots,$

$a_n\}$,其中 $a_j \triangleq LS(v_i v_j), a_i = 1$ 。设时间序列集 $T \subset Z^+$,且 U 是 T 上左端点为 a 、右端点为 b 的有界闭区间,即 $U = \{t_a, t_{a+1}, \dots, t_{b-1}, t_b\}$,其中 $t_j - t_{j-1} \geq 1, j \in [a+1, b]$ 。在时间区间 U 上节点的稳定度可定义为 $NS(A) = \frac{1}{(b-a) \ln 2} \sum_{x=t_a}^{t_b} S(LS(x))$ 。

定义4 网络稳定度。在 t 时刻网络中所有节点之间的链路的稳定度是集合 N 上的模糊映射,且可以用模糊矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ 表示。其中 a_{ij} 满足:

$$a_{ij} \triangleq \begin{cases} LS(v_i v_j) & i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, n; i \neq j \\ 1 & i=j \end{cases}$$

设时间序列集 $T \subset Z^+$,且 U 是 T 上左端点为 a 、右端点为 b 的有界闭区间,即 $U = \{t_a, t_{a+1}, \dots, t_{b-1}, t_b\}$,其中 $t_j - t_{j-1} \geq 1, j \in [a+1, b]$,则在时间区间 U 上网络的稳定度可定义为 $NSS(A) = \frac{1}{(b-a) \ln 2} \sum_{x=t_a}^{t_b} S(NS(x))$ 。

3 模拟

3.1 模拟参数

模拟的区域选择了二维平面上1 000 m × 1 000 m大小的方形区域,节点数目为50个,该数目相对于区域的大小来说比较适中,节点的最大移动速度为20 m/s,这个速度也比较符合现实情况。移动模型采用RWP模型,由于该模型有停顿时间参数,为了使结果较为简单,采用了停顿时间为0的设置。其他参数的设置如表1所示。

表1 模拟参数

参数	意义	取值
area/m ²	拓扑区域	1000 × 1000
N	网络节点数	50
R /m	信号传输半径	100, 250, 300, 400, 600, 700, 800
V_{max} /m/s	节点最大移动速度	20
V_{min} /m/s	节点最小移动速度	0
pause/s	停顿时间	0

3.2 节点分布

50个节点初始为均匀分布,模拟得出的网络拓扑如图8所示。

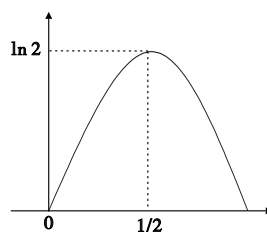


图7 Shannon函数

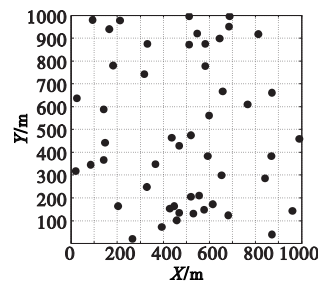


图8 50个节点均匀分布的初始网络拓扑图

为了研究整个网络的稳定性,随机选取了两个节点 i 和 j ,并设每个RWP步为一个epoch,在每个epoch中,节点的速度恒定不变。节点 i 的运动轨迹如图9所示,节点 i 在900 s的模拟时间内其epoch轨迹主要集中在网络区域的右边,且每个epoch的长度较小,而epoch数量较多,直观上感觉节点 i 不是很稳定,其原因可能与节点的初始位置分布及节点的初始速度大小等不确定因素有关。而节点 j 在900 s的模拟时间内epoch轨迹分布在整个区域(如图10所示),节点 i 和 j 的每个ep-

och 经历的时间也不相同。这些区别主要取决于初始位置及初始速度的选择上。

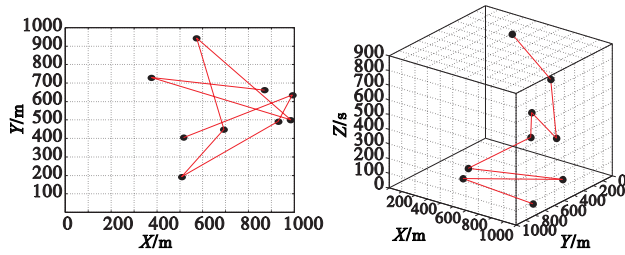


图9 随机选取的节点*i*(870.9894,660.1357)的RWP epoch 轨迹

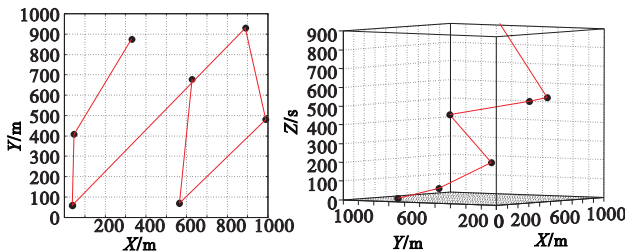


图10 随机选取的节点*j*(330.0409,874.1358)的RWP epoch 轨迹

为了进一步考察节点*i*和*j*在整个模拟时间内的链路变化趋势,作出了链路变化的二维及三维图形,如图11所示。从图11可以看到,距离的变化相当剧烈,且在时间间隔*T*内,距离的变化是不可预测的。表面上看,似乎网络的稳定性相当不好,然而实际情况会有所差别。

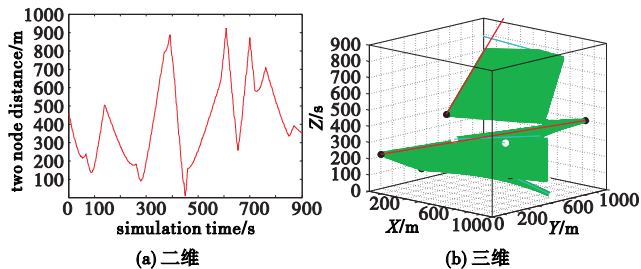


图11 节点*i*和*j*链路距离变化的二维及三维模拟

设节点*i*在*t*时刻的速度为 $v_i = (x_i, y_i)$,节点*j*在*t*时刻的速度为 $v_j = (x_j, y_j)$ 。设 θ 为速度向量与*x*轴的夹角,则相对速度 $relaVelocity_{ij}$ 满足:

$$relaVelocity_{ij} = (\|v_i\| \cos \theta_i + \|v_j\| \cos \theta_j, \|v_i\| \sin \theta_i + \|v_j\| \sin \theta_j)$$

其中: $\theta_i = \arccot \frac{x_i}{y_i}, \theta_j = \arccot \frac{x_j}{y_j}$ 。

图12给出了节点*i*和*j*在最大速度为20 m/s时,RWP模型下的相对速度和绝对速度的变化。可以看出相对速度的变化稍微剧烈,而绝对速度较为平缓。

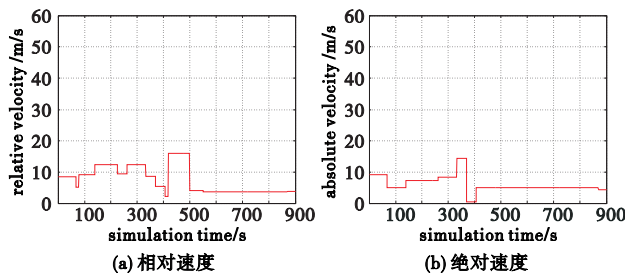


图12 两节点的相对速度及绝对速度变化

用计算机进行了12 h的模拟,生成了在前20 s网络中所有节点间链路之间距离的统计图,节点数保持为50个,则链路数目约为1 300条。图13给出了前20 s内网络链路距离频数统计。可以看出,节点间的距离多数集中在400 m附近,距离

大于900和小于100的都非常少。

从概率方面进行模拟得出的结果如图14所示。在前20 s的时间内,距离的差别不是非常明显。例如,距离在400 m附近的链路的概率大约为0.4,而链路在300~600 m的区间内的区别都不是很大。相对来说,距离很近,如50 m以下,或者距离相隔很远,如900 m以上的情况就很少了,其出现的概率大约只有不到0.1。

虽然整个分布比较平缓,且图形边缘有明显的锯齿状变化,但是还是可以看出一些正态分布的迹象,从图13及14可以看得出来。

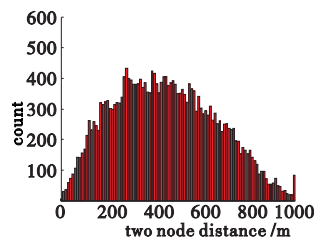


图13 前20 s网络链路距离频数统计

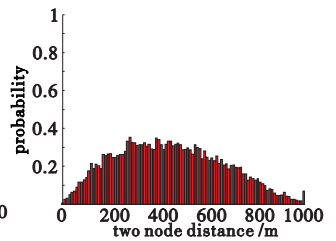


图14 前20 s网络链路距离概率统计

用计算机进行36 h模拟,生成了在前50 s网络中所有节点间链路距离的统计图,节点数保持为50个,图形边缘的锯齿状减弱了,整个网络呈现正态分布的特性更加明显,如图15、16所示。

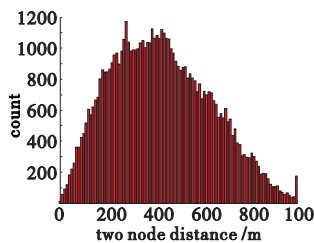


图15 前50 s内网络链路距离频数统计

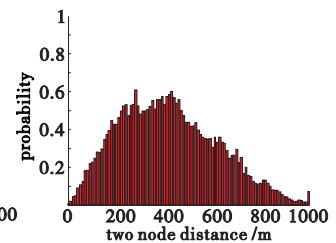


图16 前50 s网络链路距离概率统计

图17及18为51~70 s的链路距离统计图,其图形外观与图13及14非常相似。为了验证距离分布与正态分布的接近程度,用normplot工具绘制,如图19所示。

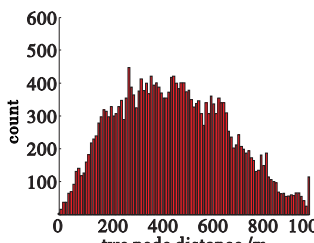


图17 51~70 s内网络链路距离频数统计

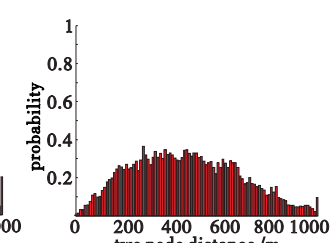


图18 51~70 s网络链路距离概率统计

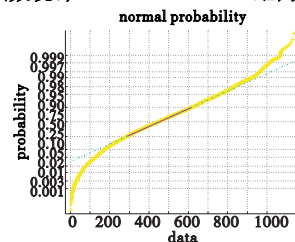


图19 链路距离和正态分布接近情况

图19中数据点接近直线,因此可以判断该概率分布可以用满足参数 $\mu = 428.8978, \sigma = 209.1180$ 的正态分布来模拟,即距离在400 m附近的链路存在的可能性最大。

对于 P_{thres} 分别为100 m、250 m、300 m、400 m时不同相对

速率下的链路存在性绘制如图 20 所示。

从图 20 中可以看出本文提出的度量和 P_{thres} 参数的关系。当 P_{thres} 参数增加时,在相等的距离变化下,链路存在性模糊度量值的变化是逐渐缓慢的,从物理上讲这样的情况也符合常理,即节点的信号范围越大,则链路存在的距离就越大。

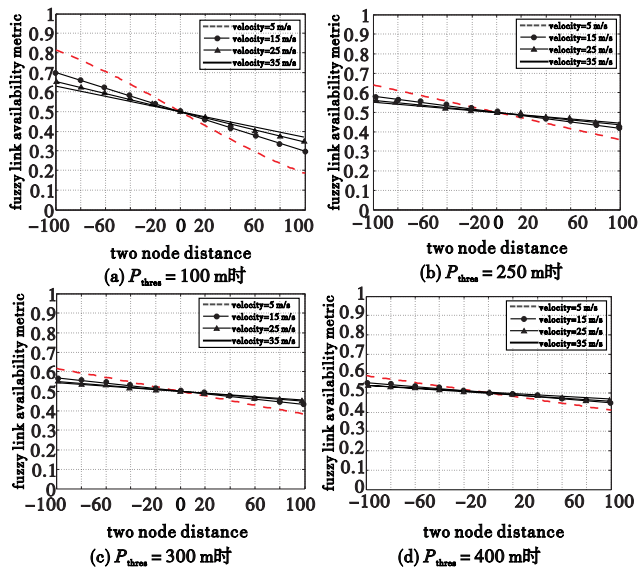


图20 链路存在性模糊度量

另外一个变化就是在 P_{thres} 相同的条件下,节点速度越大,链路存在性模糊度量值的变化就越平缓,且越接近于 0.5。图 20 中不同的曲线说明了这一点。

3.3 模拟结果

3.3.1 链路存在性模拟结果

首先选取了传输距离分别为 100 m、250 m、300 m 和 400 m 进行了模拟,结果如图 21 所示。可以看到,当传输距离为 100 m 时,链路的模糊存在性几乎接近于 0,意味着在大多数情况下,链路是几乎不存在的。

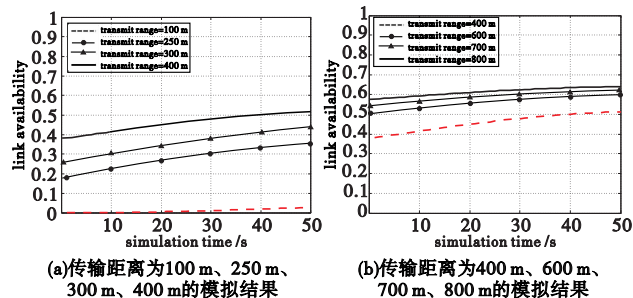


图21 前50 s链路模糊存在性度量

另一方面,当传输距离是 250 m 时,链路的模糊存在性在 0.18 ~ 0.35 之间,且变化缓慢;随着传输距离的增加,到了 400 m 时,链路的模糊存在性已经接近于 0.5。这也意味着此时链路的存在与否是最模糊的,其物理原因可以从图 21(a) 得知。由于多数链路之间的距离都集中在 400 m 附近,因此当传输距离为 400 m 时,节点时常处于临界点处,导致了节点间链路存在与否很难判断,即处于非常模糊的境地。

接下来选取了传输距离分别为 400 m、600 m、700 m 和 800 m 进行了模拟,结果如图 21(b) 所示。可以看到,在传输距离为 600 m 时,链路的模拟存在性要比 400 m 时好很多;随着传输距离的增加,到了 800 m 时,链路的模糊存在性已经接近于 0.65,这也意味着此时链路的存在性比距离为 400 m 时已确定许多。

另外,对传输距离分别为 100 m、250 m、300 m、400 m、600 m、700 m 和 800 m 时的不同时间段进行了模拟,结果如图 22 所示。从图 22 可以看出,传输距离为 100 m 时,链路的存在性很平稳,且非常接近于 0,可以说明此时大多数链路都不存在。而随着传输距离的增加,链路存在的模糊性也随之增加,到了 400 m 时,模糊性已经接近于 0.5,表示此时处于最模糊的情况。可以看到,链路的模糊存在性和前面两图非常相似,这从另一个方面验证了本文理论的正确性。

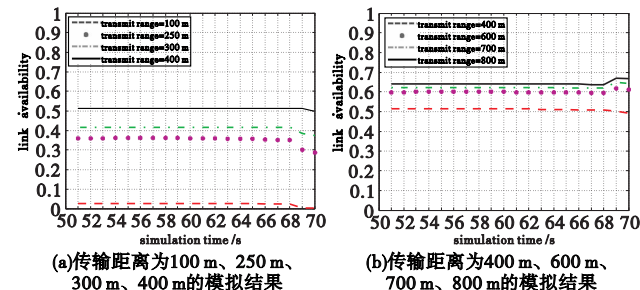


图22 后20 s区域内存在性度量

3.3.2 链路稳定性模拟结果

选取了传输距离分别为 100 m、250 m、300 m 和 400 m 进行了模拟,时间区域选择小尺度,即每个区间为 2 s,结果如图 23(a) 所示。可以看到,当传输距离为 100 m 时,链路的模糊稳定性在 0 ~ 0.2 之间,意味着在大多数情况下,链路是比较稳定的,节点的位置一般都远离临界点,呈现较稳定的非连接状态。另一方面,当传输距离是 250 m 时,链路的模糊稳定性在 0.7 ~ 0.9 之间,且变化缓慢,随着传输距离的增加,模糊稳定性值也在增加。在 400 m 时,链路的模糊稳定性接近于 1,这也意味着此时链路处于最不稳定的状态,因为此时节点多数情况下都位于临界点附近。

接下来选取了传输距离分别为 400 m、600 m、700 m 和 800 m 进行模拟,结果如图 23(b) 所示。可以看到,链路稳定性值随着传输距离的增加而降低,在 800 m 时,链路的模糊稳定性值最低,大约为 0.96,意味着 800 m 时链路的稳定性要高于 400 m 时的情况。另一方面观察图 23 不难理解,这也意味着此时链路是很稳定的。

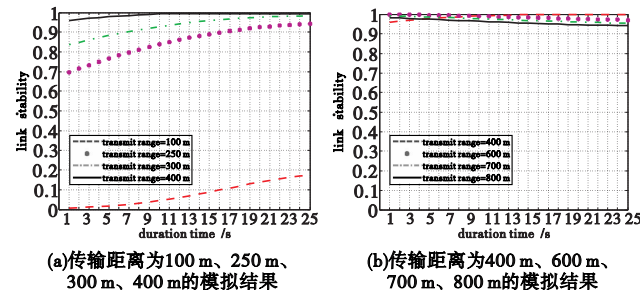


图23 小尺度下不同传输距离下链路模糊稳定性度量

接下来考察了当时间区域尺度发生变化时,链路的稳定性,并发现了一个有趣的现象。如图 24 所示,此时的稳定性都好于小尺度时的情况,这说明在本文的模糊度量模型下,RWP 模型的大尺度表现要好于小尺度的情况。

3.3.3 节点稳定度模拟结果

节点稳定度主要度量该节点和网络其他节点之间的紧密程度。首先选取了节点 j ,在小尺度时间区域,传输距离分别为 400 m、600 m、700 m 和 800 m 进行了模拟,结果如图 25 所示。可以看到,在整个时间区间上,节点 j 的稳定度相对变化比较平缓,表明其稳定性没有很大的波动。

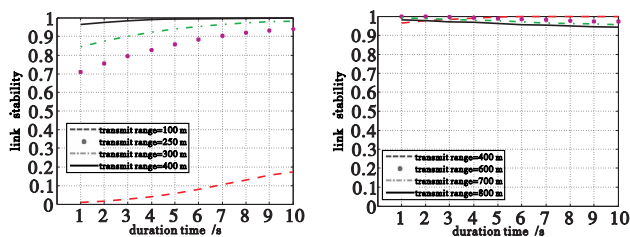
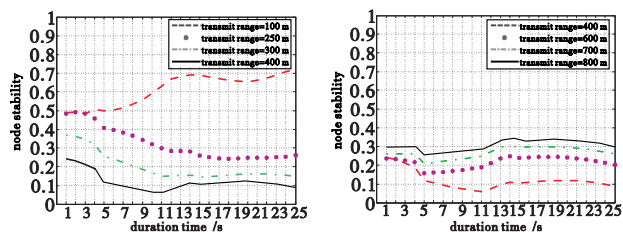
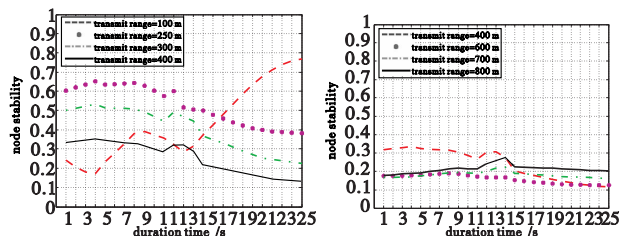


图24 大尺度下链路模糊稳定性度量

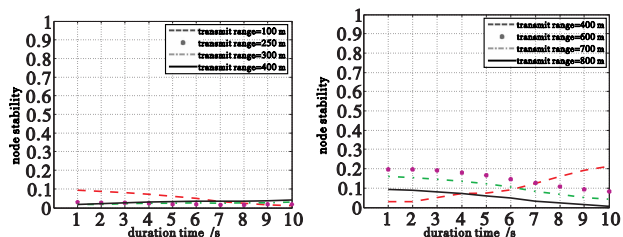
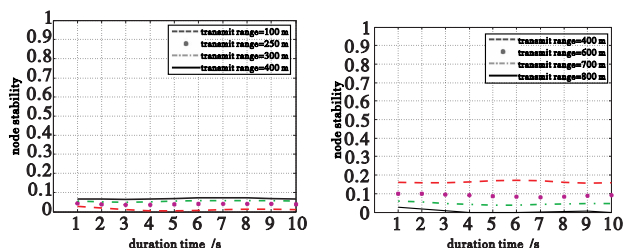
观察图 25, 在传输距离为 400 m 的情况下, 节点 j 的稳定度在 0.08 ~ 0.23 之间变化, 且均值接近于 0.1; 随着传输距离的增加, 节点的稳定度也在增加, 到了 800 m 时, 节点稳定度的模糊存在性已经接近于 0.35, 这也意味着此时节点的稳定度比较好。

图25 小尺度下不同传输距离下节点 j 模糊稳定度量

另一方面, 本文模拟了在小尺度下不同时间段的情况, 如图 26 所示。节点的稳定度在传输半径 400 m 下呈现一种非常不稳定的状态, 当传输半径增加到 800 m 时, 节点的稳定度才比较好, 接近于 0.2。

图26 小尺度下不同传输距离下节点 j 模糊稳定度量

如图 27 及 28 所示, 在大尺度下, 传输半径在 400 m 以上时节点的稳定度表现较为稳定, 当传输半径增加到 800 m 时, 节点的稳定度接近于 0.05。

图27 大尺度下不同传输距离下节点 j 模糊稳定度量图28 大尺度下不同传输半径的节点 j 模糊稳定度量

4 结束语

网络的稳定性是影响生存性的非常重要的因素, 对于稳定

性的量化定义和分析能够对生存性的研究产生重大促进作用。经典的研究方法认为稳定性与很多因素有关, 如平均节点度、最大速度、最大节点度、链路持续时间等, 对稳定性的研究转向对这些指标的研究上。然而, 侧面的研究不能完全揭示稳定性的实质, 一些指标固有的局限性限制了其在稳定性研究方面的作用。

本文提出了一个基于模糊机制的链路—节点稳定度模型, 由于模糊数学在定量分析上的优势, 使得该模型能有效评估移动无线网络中在大尺度和小尺度时间区域内节点和链路的稳定性。相比于一般传统的基于节点度、节点链路改变率等侧面指标, 该模型能够直接对稳定性进行度量。

通过本文的分析也可以发现一些需要改进的地方, 如需要进一步对该模型进行理论分析, 寻找模型在极限处的性质; 比较不同移动模型下稳定性的变化情况; 在模拟中改变节点数目、节点的移动范围等参数, 进一步观察稳定性的变化; 建立基于该模型的路由算法, 观察算法与稳定性的关系, 利用该稳定度模型进一步提高网络性能, 改善生存性等。

总的说来, 本文提出了节点—链路稳定度模型, 同时进行了较为全面的理论和模拟分析。结果证明, 相比于传统方法, 在定量评估稳定性方面, 该模型有着较大的优势。

参考文献:

- [1] BETTSTETTER C, RESTA G, SANTI P. The node distribution of the random waypoint mobility model for wireless Ad hoc networks [J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2003, 2(3): 257-269.
- [2] HYYTIA E, LASSILA P, VIRTAMO J. Spatial node distribution of the random waypoint mobility model with applications [J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2006, 5(6): 680-694.
- [3] De RANGO F, GUERRIERO F, FAZIO P. Link-stability and energy aware routing protocol in distributed wireless networks [J]. IEEE Trans on Parallel and Distributed Systems, 2012, 23(4): 713-726.
- [4] GERHARZ M, De WAAL C, FRANK M, et al. Link stability in mobile wireless Ad hoc networks [C]//Proc of the 27th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks. Washington DC: IEEE Computer Society, 2002: 30-39.
- [5] CAROFIGLIO G, CHIASSERINI C F, GARETTO M, et al. Route stability in MANETs under the random direction mobility model [J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2009, 8(9): 1167-1179.
- [6] SU W, LEE S J, GERLA M. Mobility prediction and routing in Ad hoc wireless networks [J]. International Journal on Network Management, 2001, 11(1): 3-30.
- [7] WU Y T, LIAO Wan-jiun, TSAO C L, et al. Impact of node mobility on link duration in multihop mobile networks [J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2009, 58(5): 2435-2442.
- [8] LI Zhuo-qun, SUN Ling-fen, IFEACHOR E C. Range-based mobility estimations in MANETS with application to link availability prediction [C]//Proc of IEEE International Conference on Communications. New York: IEEE Press, 2007: 3376-3382.
- [9] YAN Gong-jun, OLARIU S. A probabilistic analysis of link duration in vehicular Ad hoc networks [J]. IEEE Trans on Intelligent Transportation Systems, 2011, 12(4): 1227-1236.
- [10] TORKESTANI J A, MEYBODI M R. A link stability-based multicast routing protocol for wireless mobile Ad hoc networks [J]. Journal of Network and Computer Application, 2011, 34(4SI): 1429-1440.

(下转第 231 页)

所示,其中债务链路平均构造报文数 = 债务链路构造总报文数/构造成功数。由于该数据的变化范围较大,图中采用了对数坐标。

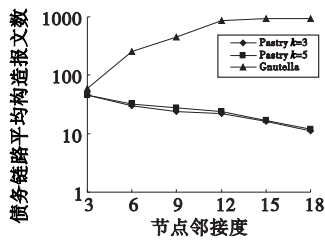


图7 节点邻接度与网络开销的关系($u=9$)

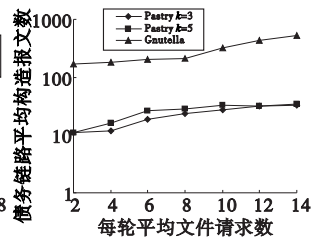


图8 节点邻接度为6时,每轮平均文件请求数 u 与网络开销的关系

实验考察了每轮平均文件请求数 $u=9$ 时的稠密程度不同的债务网络中债务链路平均构造报文数。图7表明,在结构化债务网络中,节点邻接度的增加有助于减少单位文件下载的网络开销;而对于非结构化债务网络,邻接度的增加却显著提高了文件下载的网络开销,路由算法的可扩展性不高。

实验还考察了当节点邻接度为6时每轮平均文件请求数与债务链路平均构造报文数的关系,即网络负载与路由算法的网络开销之间的关系。如图8所示,债务网络的路由算法对网络负载的差异不敏感,如对于采用贪婪路由的Pastry网络,高负载条件($u=14$)仅比低负载条件($u=2$)的网络开销高3倍;在Gnutella网络中,情况基本相同。

6 结束语

本文提出了一种基于债务的轻量级虚拟货币及完全分布的微支付机制,并提出了债务网络中基于局部信息的贪婪路由算法。该微支付机制可应用于P2P文件共享、分布式存储网络等领域,促进节点间的合作与服务的公平交易。但是由于债务关系的维护需要相当的开销,同时路由采用深度优先搜索算法,若将债务机制拓展到应用层多播和流媒体等其他应用领域,需进一步研究时延与开销控制等新问题。

参考文献:

- [1] YANG B, GARCIA-MOLINA H. PPay: micropayments for peer-to-peer systems[C]//Proc of the 10th ACM Conference on Computer and Communications Security. New York: ACM Press, 2003: 300-310.
- [2] VISHNUMURTHY V, CHANDRAKUMAR S, SIRER E G. KARMA: a secure economic framework for P2P resource sharing[C]//Proc of the 3rd Workshop on Economics of Peer-to-Peer Systems. 2003.
- [3] BUTTYAN L, HUBAUX J P. Stimulating cooperation in self-organizing mobile Ad hoc networks[J]. ACM/Kluwer Mobile Networks and Applications, 2003, 8(5): 579-592.
- [4] JAKOBSSON M. Ripping coins for a fair exchange[C]//Advances in Cryptology EuroCrypt, LNCS921. 1995: 220-230.
- [5] 刘军. 改进的公平微支付协议[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(27): 195-197.
- [6] 肖珊, 郎为民, 胡东华. 一种高效的移动微支付和认证协议[J]. 计算机应用研究, 2009, 26(8): 2992-2994.
- [7] KIYOMOTO S, TANAKA T, NAKAO K, et al. Implementation and evaluation of a micropayment system for mobile environments[J]. Trans of the Information Processing Society of Japan, 2007, 45(3): 870-879.
- [8] ZHONG Sheng, LI E, LIU Y G. On designing incentive-compatible routing and forwarding protocols in wireless Ad hoc networks: an integrated approach using game theoretical and cryptographic techniques[J]. Wireless Network, 2007, 13(6): 799-816.
- [9] FELEGYHAZI M, HUBAUX J P, BUTTYAN L. Nash equilibria of packet forwarding strategies in wireless Ad hoc networks[J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2006, 5(5): 463-475.
- [10] SRINIVASAN V, NUGGEHALI P, CHIASSERINI C F, et al. Cooperation in wireless Ad hoc networks[C]//Proc of the 22nd Annual Joint Conference of IEEE Computer and Communications. 2003: 808-817.
- [11] JARAMILLO J J, SRIKANT R. DARWIN: distributed and adaptive reputation mechanism for wireless Ad hoc networks[C]//Proc of the 13th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM Press, 2007: 87-98.
- [12] ZHU Ji, WEI Yu, LIU K J R. A belief evaluation framework in autonomous MANETs under noisy and imperfect[J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2010, 9(9): 1242-1254.
- [13] RIPEANU M. Peer-to-peer architecture case study: Gnutella network[C]//Proc of the 1st International Conference on P2P Computing. 2001: 99-100.
- [14] DAS S R, PERKINS C E, ROYER E M. Performance comparison of two on-demand routing protocols for Ad hoc networks[J]. IEEE Personal Communications, 2001, 8(1): 16-28.
- [15] CAMP T J, DAVIES V. A survey of mobility for Ad hoc network research[J]. Wireless Communication & Mobile Computing (WC-MC), Special Issue on Mobile Ad hoc Networking: Research, Trends and Applications, 2002: 483-502.
- [16] SONG Min, CUCKOV F. A mobility-aware general-purpose vehicular Ad hoc network clustering scheme[J]. Journal of Information Science and Engineering, 2010, 26(3): 897-911.
- [17] MELODIA T, POMPILI D, AKYILDIZ I F. Handling mobility in wireless sensor and actor networks[J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2010, 9(2): 160-173.
- [18] KWAK B J, SONG N O, MILLER L E. A mobility measure for mobile Ad hoc networks[J]. IEEE Communications Letters, 2003, 7(8): 379-381.
- [19] OH S, PARK I, KO S, et al. Transitional approaches in DTN routing algorithm[C]//Proc of the 14th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, Washington DC: IEEE Computer Society, 2011: 1-4.
- [20] LIU Ke-bin, MA Qiang, ZHAO Xi-bin, et al. Self-diagnosis for large scale wireless sensor networks[C]//Proc of IEEE INFOCOM. 2011: 1539-1547.
- [21] REN Wei, ZHAO Qing, SWAMI A. Connectivity of heterogeneous wireless networks[J]. IEEE Trans on Information Theory, 2011, 57(7): 4315-4332.
- [22] BAI F, SADAGOPAN N, KRISHNAMACHARI B, et al. Modeling path duration distributions in MANETs and their impact on reactive routing protocols[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2004, 22(7): 1357-1373.

(上接第220页)