

# 自组网可靠性评价方法

闵 军<sup>1</sup>, 张海呈<sup>2</sup>, 朱桂斌<sup>3</sup>

(1. 宜宾学院网络与多媒体管理中心 四川 宜宾 644000;

2. 重庆通信学院软件工程系 重庆 沙坪坝 400035; 3. 重庆通信学院通信工程系 重庆 沙坪坝 400035)

**【摘要】**网络可靠性是网络性能评估指标的一个方面,对于网络系统级的性能评估有重要意义。该文通过构建随时间变化的表征网络节点连通性状态的关联矩阵,在节点故障和移动性变化的情况下,对自组网网络可靠性进行了研究,提供了一种自组网可靠性定量评价方法。通过大量的随机试验表明,该方法能有效验证自组网的可靠性。

**关键词** 自组网; 评价; 关联矩阵; 可靠性

**中图分类号** TP393

**文献标识码** A

## Reliability Evaluating Method of Ad hoc Network

MIN Jun<sup>1</sup>, ZHANG Hai-cheng<sup>2</sup>, and ZHU Gui-bin<sup>3</sup>

(1. Network and Multimedia Management Center, Yibin University Yibin Sichuan 644000;

2. Software Engineering Department, Chongqing Communication College Shapingba Chongqing 400035;

3. Department of Communication Engineering, Chongqing Communication College Shapingba Chongqing 400035)

**Abstract** The reliability of network reflects one aspect of network's performance, it plays an important part in the evaluation of system performance. In this paper, a new estimate index of network reliability is introduced and an incidence matrix is used to depict the connectivity of the network nodes in a dynamic network model. A determinant arithmetic of the network connectivity and a calculate method are presented to achieve reliability evaluation for Ad hoc network. Simulation results through random trials indicate that the method presented in this paper is usable to validate the reliability of the dynamic Ad hoc network.

**Key words** Ad hoc network; evaluation; incidence matrix; reliability

自组网(Ad hoc networks)<sup>[1]</sup>是一种移动通信和计算机网络相结合的网络,整个网络没有固定的基础设施,可以在不能利用或不便利用现有网络基础设施的情况下提供一种通信支撑环境,拓宽了移动网络的应用场合,可以广泛应用于国防战备、灾难救助、偏远地区等无法得到有线网络支持或某些只是临时需要通信的环境。

在自组网中,由于用户终端的随机移动、节点的随时开机和关机、节点的故障或者被故意破坏、无线发信装置发送功率的变化、无线信道间的互相干扰以及地形等综合因素的影响,移动终端间通过无线信道形成的网络拓扑结构随时可能发生变化,而且变化的方式和速度都是不可预测的。具体的体现就是拓扑结构中代表移动终端的顶点的增加或消失,代表无线信道的有向边的增加和消失、网络拓

扑结构的分割和合并等。网络拓扑结构的变化将使得网络的可靠性、抗毁性以及服务性能发生动态变化,其结果将在可用性指标中反映出来<sup>[2-3]</sup>。

当前,对于自组网网络性能测试和评价的研究主要集中在通信终端物理性能测试、接入层协议测试和路由协议测试等方面<sup>[4-5]</sup>,对于可靠性和抗毁性的评价研究很少,且基本都是定性描述,主要依据网络中各个节点由于地位平等和采用分布式操作,因此网络具有比较良好的抗单节点故障性能。文献[2]从网络可靠性的概念、可靠性分析角度介绍了三种自组织网络的可靠性评估算法(基于跳面节点的可靠性算法、可靠性的上下界估计算法和经验值估计算法)和作为一种新的研究方向的效能系数评估法,对自组网可靠性和抗毁性的评价提供了一种设计参考,但文献缺乏量化结果作为验证。文献[3]提

收稿日期: 2008-02-26; 修回日期: 2008-04-30

基金项目: 国家自然科学基金(10577007); 重庆市重点自然科学基金(CSTC.2007ba2017)

作者简介: 闵 军(1966-), 男, 硕士, 副教授, 主要从事网络管理、网络编程等方面的研究; 张海呈(1974-), 男, 硕士, 讲师, 主要从事网络协议设计、网络仿真等方面的研究; 朱桂斌(1972-), 男, 博士, 副教授, 主要从事网络管理、网络优化等方面的研究。

出了一种基于选路拓扑的网络抗毁性研究方法, 通过构造选路拓扑建立链路集影响度评估模型, 给出了面向网络实际通信能力的抗毁性概念定义及测度表达, 提出了一种影响网络抗毁度的关键链路集选择启发式算法, 对构造健壮性网络提供了准确的参考数据。文献[6]从节点的重要性出发, 定义网络均衡度作为自组网可靠性的度量, 用以判断在节点可靠性和链路可靠性相同的条件下不同拓扑结构的网络的均衡性, 反映了网络的抗毁性、生存性以及有效性, 为评估网络的可靠性提供了依据。文献[7]提出了一种路由可靠性评估模型, 对两种主动路由协议适应网络拓扑变化的可靠性进行了理论分析, 但该模型作为通用的可靠性评估手段还有待进一步完善。

网络的可靠性和抗毁性在理论上可以采取相同的分析方法, 它们都是分析通信网节点或链路不能正常工作时网络性能变化情况的, 差异仅为前者是指由节点和链路自身原因引起的工作不稳定, 后者是指故意干扰破坏或自然灾害等外部因素引起节点和链路工作不稳定<sup>[8]</sup>。

只考虑节点或链路不稳定因素引起网络性能变化的网络评估方法, 其评价结果自然同时反映出网络的可靠性能和抗毁性能。通信网可靠性研究最核心的问题是如何计算网络保持连通的概率(即可靠性计算问题)和系统可靠性的最优化问题<sup>[9-10]</sup>。

因此, 本文采用了一种评价自组网可靠性的方法, 通过评估动态拓扑情况下网络的连通率指标对网络可靠性进行量化, 其评价结果能反应网络的可靠性和抗毁性能。

### 1 自组网可靠性评估方法

网络的可靠性 $R$ 主要与节点设备的可靠性 $R_n$ 、链路设备的可靠性 $R_l$ 和网络拓扑结构 $T$ 有关, 节点和链路设备的可靠性越高, 网络拓扑结构的连通性越高, 则网络的可靠性越高<sup>[9-11]</sup>。

自20世纪70年代以来, 通信网可靠性的研究方面发展了许多理论, 提出了不少通信网可靠性的评估方法<sup>[12-13]</sup>, 及相应的可靠性指标测度方法, 如确定性测度、概率性测度和完成性测度。

与传统固定网络不同的是, 在自组网中, 节点的移动会使网络拓扑结构不断发生变化, 而且变化的方式和速度通常是难以预测的。因此, 其网络可靠性还与节点的移动性 $N_i(m, v, t)$ (即节点移动性与节点移动模式 $m$ 、移动速度 $v$ 和时间 $t$ 有关)导致的网

络拓扑结构动态变化相关。

现有网络可靠性评估方法主要针对节点位置固定的网络, 没有考虑网络节点自由移动造成链路连接性动态变化情况下的网络可靠性评价, 难以直接应用到网络拓扑结构动态变化的自组网中。

为此, 有必要采用一种更符合自组网网络特性的网络可靠性评价方法, 以满足自组网性能分析的需要。基于上述分析, 自组网中网络可靠性可以表示为:

$$R = f[R_n, R_l, T, N_i(m, v, t)] \quad (1)$$

式(1)表明了影响自组网可靠性的主要因素, 可以作为分析自组网网络可靠性的设计依据, 但是难以直接应用来通过解析的方法对网络的可靠性进行数值计算。

为了对网络的连通概率进行计算, 本文给出如下网络模型。

设一个节点数为 $n$ 的自组网随机分布于一个给定区域内, 各节点的初始位置已知, 每个节点 $i(i=1, 2, \dots, n)$ 在 $t$ 时刻的坐标位置为 $(x_i(t), y_i(t))$ ( $t=0$ 为初始时刻), 移动方位角 $\theta_i(t)$ 和移动速度 $v_i(t)$ 由节点移动模型决定。

设网络中每个节点的通信距离为 $r$ , 即当两节点之间距离 $d_{ij}(t)$ 不大于 $r$ 时可直接通信, 否则需要由中间节点转发以实现通信。在 $t$ 时刻, 有:

$$\begin{cases} x_i(t) = x_i(0) + \int_{t=0}^t v_i(t) \cos \theta_i(t) dt \\ y_i(t) = y_i(0) + \int_{t=0}^t v_i(t) \sin \theta_i(t) dt \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可知,  $t$ 时刻任意两节点 $i, j$ 之间的欧氏距离为:

$$d_{ij}(t) = \sqrt{[x_i(t) - x_j(t)]^2 + [y_i(t) - y_j(t)]^2} \quad (3)$$

忽略地形地物对无线传输链路的影响, 两个节点之间链路的可达性仅考虑通信距离的情况下, 构建用以表征网络中任意节点在 $t$ 时刻直接连通性状态的关联矩阵 $\mathbf{H}_{n \times n}(t)$ 如下:

$$\mathbf{H}_{n \times n}(t) = \begin{pmatrix} h_{11}(t) & h_{12}(t) & \cdots & h_{1n}(t) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{i1}(t) & h_{i2}(t) & \cdots & h_{in}(t) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{n1}(t) & h_{n2}(t) & \cdots & h_{nn}(t) \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中

$$h_{ij}(t) = \begin{cases} 1 & d_{ij}(t) \leq r, \quad \text{且 } i \neq j \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$h_{ij}(t)=1$ 表示 $t$ 时刻节点 $i$ 和 $j$ 直接连通,  $h_{ij}(t)=0$ 表示

$t$ 时刻节点 $i$ 和 $j$ 不直接连通,  $\mathbf{H}_{n \times n}(t)$ 实际上为 $n$ 阶0-1对称矩阵。根据各个元素 $h_{ij}(t)$ 的取值, 可以判断在不同的 $t$ 时刻网络中是否有分割出现。

在任意给定时刻 $t$ , 按一定比例 $\rho$ 从网络中随机抽掉 $\lfloor \rho_n \rfloor$ 个节点来模拟网络中部分节点受到出现故障或遭到破坏而退出网络的情况, 通过剩余 $m(m=n-\lfloor \rho_n \rfloor)$ 个节点所构成的网络对应的 $\mathbf{H}_{m \times m}(t)$ , 可以判断由剩余节点所构成网络的连通性。

设每次在 $n$ 个节点中抽取的 $\lfloor \rho_n \rfloor$ 个节点都是随机的, 实验 $k$ 次, 其中判断网络为连通的次数为 $l$ , 则 $t$ 时刻网络可靠性的网络连通率为:

$$R(t) = l/k \quad (6)$$

## 2 网络可靠性计算步骤

1) 网络初始化完成, 节点抽取比例 $\rho$ , 最大实验次数 $M$ , 最大仿真时间 $T_{\max}$ , 网络可靠性计算时间间隔 $\Delta t$ 。  $t:=0$ , 节点 $i(i=1,2,\dots,n)$ 坐标 $x_i(t):=x_i(0)$ 、 $y_i(t):=y_i(0)$ , 实验次数 $k:=1$ , 网络连通次数 $l:=0$ 。

2) 根据节点运动模型按照式(2)计算 $t$ 时刻网络中节点 $i(i=1,2,\dots,n)$ 坐标 $x_i(t)$ 、 $y_i(t)$ 。

3) 根据节点坐标按照式(3)计算任意两个节点 $i$ 和 $j$ 之间距离 $d_{ij}(t)$ , 并根据式(4)和式(5)得到 $\mathbf{H}_{n \times n}(t)$ 。

4) 按照节点序列号在 $n$ 个网络节点中随机选择 $\lfloor \rho_n \rfloor$ 个节点作为故障节点, 删除 $\mathbf{H}_{n \times n}(t)$ 中以故障节点为行和列的所有元素, 得到 $\mathbf{H}_{m \times m}(t)$ , 其中 $m=n-\lfloor \rho_n \rfloor$ 。

5) 连通性判断。

(1) 将 $\mathbf{H}_{m \times m}(t)$ 对角线上元素 $h_{ii}$ 全部置为0,  $S:=\phi$ ;

(2) 在 $\mathbf{H}_{m \times m}(t)$ 的第 $i$ 行中找出值为1的所有元素, 设这些元素所在列的列标对应的节点构成的集合为 $\{j, j+1, j+2, \dots\}$ , 该集合构成了节点 $i$ 的直接连通节点集合。  $S:=S \cup \{i\} \cup \{j, j+1, j+2, \dots\}$ ;

(3) 将第 $i$ 行元素全部置为0, 然后分别在 $\{j, j+1, j+2, \dots\}$ 中元素所对应的列中搜索值为1的元素, 并记录其行标号所对应的节点 $\{i+\tau, i+\tau+1, i+\tau+2, \dots\}$ , 它们对应于与 $\{j, j+1, j+2, \dots\}$ 中节点直接联通的节点,  $S:=S \cup \{i+\tau, i+\tau+1, i+\tau+2, \dots\}$ ;

(4) 将以 $\{j, j+1, j+2, \dots\}$ 中元素为列标的所有列中元素全部置为0, 以 $\{i+\tau, i+\tau+1, i+\tau+2, \dots\}$ 中元素为行标重复步骤(2)、(3)直至节点集 $S$ 中节点不再增加,  $S_{\text{last}}:=S$ ;

(5) 如果 $S_{\text{last}}$ 中节点数 $|S_{\text{last}}|=m$ , 则判定网络连通,  $l:=l+1$ ; 否则判定网络不连通。

6)  $k:=k+1$ ; 如果 $k \leq M$ , 则返回步骤4); 否则

按照式(6)计算 $R(t)$ ,  $t:=t+\Delta t$ 。

7) 如 $t \leq T_{\max}$ , 返回步骤2); 否则根据不同时刻 $t$ 计算的 $R(t)$ , 描绘网络可靠性随时间变化的曲线。

## 3 仿真实验

设初始化完成后网络中100个节点均匀分布于 $1\,000\text{ m} \times 1\,000\text{ m}$ 的区域内, 节点通信距离 $r=80\text{ m}$ , 各节点按照典型的随机点移动模型<sup>[1]</sup>运动, 当节点移动到区域边界时自动弹回区域内, 其方向角 $\theta_i(t)$ 和移动速度 $v_i(t)$ 是分别在 $[0, 2\pi]$ 、 $[0, 3]$ 范围均匀分布的随机变量, 随机抽取节点数的比例分别为 $\rho=5\%$ 和 $\rho=15\%$ , 对应每一时刻 $t$ 随机抽取节点试验次数 $M=1\,000$ , 仿真时间400 s, 网络可靠性计算间隔 $\Delta t=20\text{ s}$ 。仿真结果如图1和图2所示。

从图1和图2的仿真曲线图可以看出, 由于网络拓扑的自愈合能力, 自组网对于网络节点移动性和节点的故障具有很高的可靠性, 当 $\rho=5\%$ 和 $\rho=15\%$ 时, 网络可靠性分别在0.970和0.955上下浮动, 浮动范围分别为 $[0.967, 0.974]$ 和 $[0.962, 0.946]$ 。

对应每一时刻 $t$ , 随机试验次数 $M$ 取值越大则仿真结果越可靠, 为了控制仿真时间和计算量, 本文取 $M=1\,000$ 。

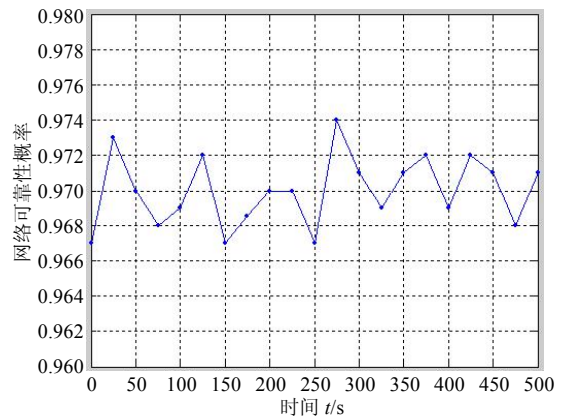


图1  $\rho=5\%$ 时网络可靠性曲线

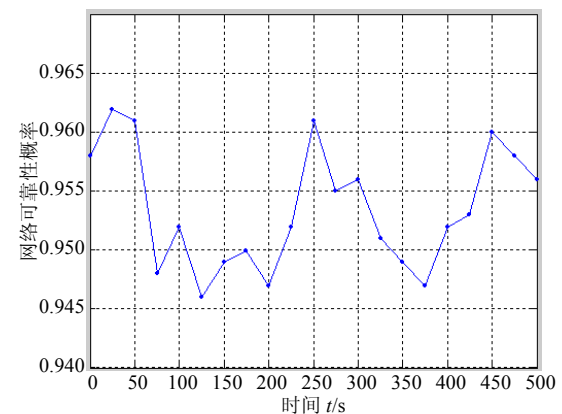


图2  $\rho=15\%$ 时网络可靠性曲线

(下转第456页)

## 参 考 文 献

- [1] BROOKS T, WESTWISK A L. A low 2 power differential CMOS bandgap reference[C]//Int So l Sta Circ Conf. [S.l.]: [s.n.], 1994: 248-249.
- [2] TZANATEAS G, SALAMA C A T, TSIVIDIS Y P. A CMOS bandgap voltage reference[J]. IEEE J Sol Sta Circ, 1979, 14(3): 655-657.
- [3] 程 军, 陈贵灿. 两种新型CMOS带隙基准电路[J]. 微电子与计算机, 2003, 7: 67-70.
- [4] 拉扎维. 模拟CMOS集成电路设计[M]. 陈贵灿, 程 军, 张瑞智, 等, 译. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
- [5] ALLEN P E, HOLBERG D R. CMOS模拟集成电路设计[M]. 冯 军, 李智群, 译. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [6] JOHNS D A, MARTIN K. 模拟集成电路设计[M]. 曾朝阳, 赵 阳, 方 顺, 译. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [7] BAKER R J, LI H W, BOYCE D E. 电路设计、布局与仿真[M]. 陈中建, 吉利久, 译. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [8] HILBIBER D. A new semiconductor voltage standard[J]. IEEE J of Solid-State Circuits, 1973, 1(8): 222-226.
- [9] BANBA H, SHIGA H, UMEZAWA S, et al. A CMOS bandgap reference circuit with sub-1 V operation[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1999, 34: 670.
- [10] SANSEN W M, EYNDE F O, STEYAERT M. A CMOS temperature-compensated current reference[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1988, 23(3): 821-824.
- [11] BROOKS T, WESTWISK A C. A low power differential CMOS bandgap Reference[J]. ISSCC Dig of Tech Papers, 1994: 248-249.

编辑 漆 蓉

(上接第438页)

## 4 结 束 语

由于自组网具有无需基站、组网灵活等优点,使其成为近几年的研究热点。当前对自组网的研究主要集中在路由协议、MAC协议、QoS保证和安全性方面,而对网络的可靠性等方面的研究则较少。本文采用连通关联矩阵和网络连通性判断等方法,通过网络连通率计算,给出了自组网可靠性评价的一种定量分析方法。基于本文评价方法所进行的大量仿真统计得到的试验数据验证表明,自组网是一种对节点和链路故障、节点移动性具有高可靠性的网络。当然,本文建立的可靠性评估模型也适用于静态网络,应用时只需将网络节点运动模型设置为静止即可。

本文只针对自组网中典型的节点随机点移动模型进行了验证,没有针对其他移动模型对进行相应的研究,这是下一步需要做的工作。

## 参 考 文 献

- [1] 郑相全. 无线自组网技术实用教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [2] 李 柯, 郭 伟, 任 智. 自组织网络的可靠性评估算法研究[J]. 中国测试技术, 2006, 32(4): 81-83.
- [3] 王新华, 徐连诚, 刘方爱. 一种基于选路拓扑的抗毁性评估模型[J]. 小型微型计算机系统, 2007, 28(5): 819-822.
- [4] 刘莎莎, 李仁发, 李 蕊. 一种跨层服务发现协议的设计与仿真分析[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(12): 3421-3429.
- [5] 郑相全, 郭 伟, 葛利嘉, 等. 一种基于跨层设计和蚁群优化的自组网负载均衡路由协议[J]. 电子学报, 2006, 34(7): 1199-1208.
- [6] 余旭涛, 张在琛, 毕光国. 一种Ad hoc网络可靠性度量—网络均衡度[J]. 应用科学学报, 2005, 23(6): 582-585.
- [7] CALEFFI MARCELLO, FERRAIUOLO GIANCARLO. On reliability of dynamic addressing routing protocols in mobile ad hoc networks[EB/OL]. [2008-01-23]. <http://arxiv.org/pdf/0801.4082>.
- [8] 郭 伟. 野战地域通信网可靠性的评价方法[J]. 电子学报, 2000, 28(1): 3-6.
- [9] LUO Peng-cheng, JIN Guang, et al. A review of study on reliability of communication network[J]. Mini-Micro Systems, 2000, 21(10): 1073-1077.
- [10] 丁开盛, 张学渊, 梁雄健. 通信网可靠性的定义及其综合测度指标[J]. 通信学报, 1999, 20(10): 41-44.
- [11] 潘 勇. 通信网络可靠性指标研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2006, 24(1): 1-5.
- [12] TORRIERI D. Calculation of node-pair reliability in large networks with unreliable nodes[J]. IEEE Trans on Relia, 1994, 43(3): 375-377.
- [13] WU Jun, TAN Yue-jin. Study on measure of complex network invulnerability[J]. Journal of Systems Engineering, 2005, 20(2): 128-131.

编辑 张 俊