伯努利节点网络模型的拓扑鲁棒性分析方法

冯 涛[1,2],李洪涛[1],袁占亭[1],马建峰[2]
(1. 兰州理工大学 计算机与通信学院,甘肃兰州 730050;
2. 西安电子科技大学 计算机网络与信息安全教育部重点实验室,陕西西安 710071)

摘 要: 基于网络连通和恢复能力提出连接鲁棒性和恢复鲁棒性两种测度指标,根据随机故障和恶意攻击两种网络失败类型将连接鲁棒性分为随机故障鲁棒性和恶意攻击鲁棒性,将恢复鲁棒性分为随机故障节点恢复鲁棒性、随机故障边恢复鲁棒性、恶意攻击节点恢复鲁棒性、恶意攻击边恢复鲁棒性,并给出了这六个测度指标的确切定义.利用这六个测度指标分析了伯努利节点网络模型的拓扑鲁棒性,得出不同情形下拓扑结构与这六个测度指标的关系,结果表明:无线网络平面拓扑结构的恶意攻击鲁棒性要优于层次拓扑结构,而其随机故障鲁棒性要劣于层次拓扑结构;平面拓扑结构的边恢复鲁棒性要优于层次拓扑结构,而其节点恢复鲁棒性要劣于层次拓扑结构.

关键词: 无线通信网络; 连接鲁棒性; 恢复鲁棒性; 伯努利节点模型
中图分类号: TP393.02 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 07-1673-06

Analysis Method of Robustness for Topology of Bernoulli Node Model

FENG Tao[1,2], LI Hong-tao[1], YUAN Zhan-ting[1], MA Jian-feng[2]
(1. *School of Computer and Communication, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu* 730050, *China*;
2. *Ministry of Education Key Laboratory of Computer Networks and Information Security, Xidian University, Xi'an, Shaanxi* 710071, *China*)

Abstract: Robustness is divided into connectivity robustness and recovery robustness according to connectivity and recovery. Then we divide connectivity robustness into random-fault robustness and hostile-attacks robustness, and divide recovery robustness into node recovery robustness and edge recovery robustness according to type of network failure, besides we define the concepts of connectivity robustness and recovery robustness. Then these concepts are used to evaluate the degree of robustness of Bernoulli node model, and the conclusion is achieved that the hostile-attacks robustness of hierarchy structure is less robust than planar structure while the random-fault robustness is more robust than planar structure, and that the node recovery robustness of hierarchy structure is more robust than planar structure while edge recovery robustness is less robust than planar structure.

Key words: wireless network; connectivity robustness; recovery robustness; Bernoulli node model

1 引言

通信网络在运行中经常会受到干扰或破坏,导致其性能降低甚至功能丧失.网络拓扑结构对外界破坏的抵抗能力即网络拓扑结构鲁棒性已经成为网络研究的重要特征之一[1,2].Ash 等人[3]采用进化算法来优化拓扑结构.Wang 等人[4]认为优化网络效率可以提高网络对随机故障的鲁棒性.Kwon 等人[5]指出无标度网络演化模型比随机图演化模型具有更多的反馈结构,同时无标度网络演化模型系统的鲁棒性也比较高.上述研究都是通过网络连通性作为度量网络鲁棒性的判断依据,较少考虑网络遭到破坏后的恢复能力.

文献[6]利用网络中剩余的可用连接数作为网络拓扑容忍能力高低的判断依据,通过大量实验数据分析,得出拓扑及其对节点失败容忍能力的关系,及该关系对统计规律的定性描述.文献[7]利用拓扑容错度和容侵度作为网络拓扑对节点失败容忍能力高低的评价标准,得出在传感器网络分层拓扑中其拓扑容错度随簇头节点比例提高递减、而容侵度随之递增的理论结果,但该文并未对网络遭到破坏后拓扑结构的恢复能力进行分析.DU[2]等人虽然考虑了网络受到破坏后的恢复能力,但缺乏相关网络模型理论的支撑,只是通过仿真实验比较了不同网络拓扑结构的鲁棒性.

目前,国际上更多的关注了有线网络拓扑结构鲁棒

收稿日期:2010-08-17;修回日期:2010-09-29
基金项目:国家 863 高技术研究发展计划(No.2007AA01Z429);国家自然科学基金(No.60972078);甘肃省高等学校基本科研业务费(No.0914ZTB186);甘肃省自然科学基金(No.2007GS04823);兰州理工大学博士基金(No.BS14200901);网络安全与密码技术福建省高校重点实验室开放课题(No.09A006)

性,但是无线通信网络节点由于随机故障(random-fault)或遭到恶意攻击(hostile-attacks)更易成为失效节点.无线失效节点会引发网络拓扑分割,进而导致网络性能下降甚至使网络功能完全丧失.本文从网络抵御破坏的能力以及受到破坏后恢复能力两方面研究无线通信网络拓扑的鲁棒性,采用连接鲁棒性和恢复鲁棒性作为测度指标.根据网络失败类型将连接鲁棒性分为随机故障鲁棒性和恶意攻击鲁棒性,将恢复鲁棒性分为节点恢复鲁棒性和边恢复鲁棒性,并给出了测度指标的确切定义;针对无线通信网络的伯努利节点网络模型,给出了不同情形下网络拓扑结构与测度指标之间的函数关系.

2 网络模型及相关定义

图 $G=(V,E)$表示无线通信网络拓扑,其中 V 代表节点集合,E 代表边的集合.$|V|$表示集合 V 节点数目,本文认为图中的边为无向边.如果一个子图 $G'=(V',E')$,$V'\in V$,V'中任意两点间都有一条边,则称 G'为 G 的连通子图.如果图 $G=(V,E)$由一个连通子图构成,记为 $G_1=(V_1,E_1)$,$G_2=(V_2,E_2)$,$\cdots$,$G_l=(V_l,E_l)$,则 $G_1,G_2,\cdots,G_l$ 称为图 G 的 l 个连通分支.若 $V'\in\{V_1,V_2,\cdots,V_l\}$且

$$|V'|=\max\{|V_1|,|V_2|,\cdots,|V_l|\} \tag{1}$$

则称 $G'=(V',E')$为图 G 的最大连通分支.记

$$C=\frac{|V'|}{|V|} \tag{2}$$

表示 G'对 G 的覆盖率.

定义 1[7] 在伯努利节点网络模型 $G=(V,E)$中,节点数目$|V|=n$,删除 $N_r(n)$个节点,剩余子图由 m 个连通分支组成,$G_1=(V_1,E_1)$,$G_2=(V_2,E_2)$,$\cdots$,$G_m=(V_m,E_m)$,$1\leqslant m\leqslant N_r+1$,则可用节点数目为 $A_m(n)=\max\{|V_1|,|V_2|,\cdots,|V_m|\}$,若其覆盖率 $C_m(n)$满足公式:

$$\lim_{n\to\infty}C_m(n)=\lim_{n\to\infty}\frac{A_m(n)}{n}=1 \tag{3}$$

则称图 $G=(V,E)$可容忍该 $N_r(n)$个节点的失败.

本文采用单位面积内均匀分布 n 个伯努利节点网络模型来表示无线通信网络,所谓伯努利节点[8]就是在传统的网络模型中,所有节点都在概率 $p(0<p\leqslant 1)$下独立活动,当 p 取值为簇头在所有节点中的比例时,表示层次结构;当 $p=1$ 时,所有的节点都是簇头,表示平面结构.

假设活动的簇头节点占所有节点的比例为 $p(n)$,记失败节点个数为 $N_r(n)$,则失败节点可能是簇头节点也可能是普通节点.设失败簇头节点数目为 $N_{r1}(n)$,失败普通节点数目为 $N_{r2}(n)$.则 $N_r(n)$可表示为:

$$N_r(n)=N_{r1}(n)+N_{r2}(n) \tag{4}$$

记失败簇头节点占失败节点总数的比例为 $p_1(n)$,即:

$$p_1(n)=\frac{N_{r1}(n)}{N_r(n)} \tag{5}$$

当失败是由随机故障导致时,所有节点失败的概率是相同的,故 $p_1(n)=p(n)$;当失败是由恶意攻击导致时,失败节点主要集中在簇头上,故 $p_1(n)=1$.

定义 2[8] 在伯努利节点网络模型 $G=(V,E)$中,其节点数目 $V=n$,活动节点的概率为 $p(n)$,任意选择 $N_r(n)$个节点,其中活动节点所占的比例为 $p_1(n)$,$p_1(n)$由公式(4)、(5)所确定.若图 $G=(V,E)$可容忍 $N_r(n)$个节点的失败,则当$p_1(n)=p(n)$时,称图 $G=(V,E)$是 $N_r(n)$ 容错的,当 $p_1(n)=1$ 时,称图 $G=(V,E)$的$N_r(n)$容侵的.

3 网络鲁棒性基本概念

3.1 连接鲁棒性

网络中某些节点在遭受破坏后,剩余的节点之间仍然能够继续保持连通的能力,称为连接鲁棒性.现实中对无线通信网络的破坏方式主要有两类,一类是由错误导致的故障,另一类是由攻击导致的入侵.

基于上述的破坏方式,本文采用连接鲁棒性的指标为[9]:

$$R=\frac{C}{(N-N_r(n))} \tag{6}$$

式中:N 表示初始网络规模;$N_r(n)$表示从网络中去除的节点个数;C 表示当节点被去除后网络中最大的连通子图的节点个数.

若 R 满足公式:

$$\lim_{n\to\infty}R=\lim_{n\to\infty}\frac{C}{(N-N_r(n))}=1 \tag{7}$$

则称图 $G=(V,E)$可容忍该 $N_r(n)$个节点的失败.此公式表明,对于某种结构的拓扑图 G,当节点个数 N 足够大时,若 $N_r(n)$个失败节点对其可用性的影响可以忽略不计,则认为这种拓扑结构可容忍该 $N_r(n)$个节点的失败.

定义 3 和定义 4 中,符号 Ω 和 Φ 由下面的公式给出:

$f(n)=\Omega(g(n))\Leftrightarrow$存在常数 c 和 n_0,使得 $n>n_0$时,

$$f(n)\geqslant cg(n) \tag{8}$$

$f(n)=\Phi(g(n))\Leftrightarrow$存在常数 c_1,c_2 和 n_0,使得 $n>n_0$ 时,

$$c_1g(n)\leqslant f(n)\leqslant c_2g(n) \tag{9}$$

定义 3　若图 $G=(V,E)$是 $N_r(n)$容错的,且存在 $m(n)$,满足 $m(n)=\Omega(N_r(n))$,使得删除这 $m(n)$个节点后,所得 R 满足公式:

$$\lim_{n\to\infty}R=\lim_{n\to\infty}\frac{C}{(N-m(n))}\neq 1 \tag{10}$$

则图 $G=(V,E)$的随机故障鲁棒性为 $\Phi(N_r(n))$,记为 RFCR = $\Phi(N_r(n))$.

定义 4　若图 $G=(V,E)$是 $N_r(n)$容侵的,且存在 $m(n)$,满足 $m(n)=\Omega(N_r(n))$,使得删除这 $m(n)$个节点后,所得 R 满足公式:

$$\lim_{n\to\infty}R=\lim_{n\to\infty}\frac{C}{(N-m(n))}\neq 1 \tag{11}$$

则图 $G=(V,E)$的恶意攻击鲁棒性为 $\Phi(N_r(n))$,记为 HACR = $\Phi(N_r(n))$.

定义 3 和定义 4 通过拓扑所能容忍的故障或者攻击节点的最大个数,给出随机故障鲁棒性与恶意攻击鲁棒性的定义,可以用来讨论某类拓扑结构所能容忍的失败节点个数与总节点个数的函数关系.

3.2　恢复鲁棒性

现实中如果很难获得特定个人的信息,通过询问与该个体有关系的人群,可以在一定程度上恢复该个体的信息,该策略已经用于网络寻找恐怖集团中的关键人物[10].基于上述现实,本文将恢复鲁棒性定义为:当一个网络中部分节点被破坏后,能够通过某些简单的策略将消失的网络结构元素(包括点和边)进行恢复的能力.针对节点和边两种情况,采用恢复鲁棒性指标分别为[2]:

$$D=1-\left[\frac{(N_r(n)-N_d(n))}{N}\right] \tag{12}$$

$$E=1-\left[\frac{(M_r(n)-M_e(n))}{M}\right] \tag{13}$$

式中:D 表示节点恢复鲁棒性指标;E 表示边恢复鲁棒性指标;$N_r(n)$表示从网络中去除的节点个数;$N_d(n)$表示通过某种策略恢复的节点个数;M 表示初始网络中边的数量;$M_r(n)$为从网络中去除的边的条数;$M_e(n)$表示通过某种策略恢复的边的条数.

若 D 满足公式:

$$\lim_{n\to\infty}D=\lim_{n\to\infty}\left\{1-\left[\frac{(N_r(n)-N_d(n))}{N}\right]\right\}=\lim_{n\to\infty}\frac{C}{(N-N_r(n))} \tag{14}$$

则称图 $G=(V,E)$在失败节点为 $N_r(n)$时的节点恢复为 $N_d(n)$.此公式表明,对于某种结构的拓扑图 G,当节点个数 N 足够大时,若在 $N_r(n)$个节点失败后恢复 $N_d(n)$个节点对其可用性的影响可以忽略不计,则认为图 $G=(V,E)$在失败节点为 $N_r(n)$时的节点恢复为 $N_d(n)$.

若 E 满足公式:

$$\lim_{n\to\infty}E=\lim_{n\to\infty}\left\{1-\left[\frac{(M_r(n)-M_e(n))}{M}\right]\right\}=\lim_{n\to\infty}\frac{C}{(N-N_r(n))} \tag{15}$$

则称图 $G=(V,E)$在去除边为 $M_r(n)$时的边恢复为 $M_e(n)$.此公式表明,对于某种结构的拓扑图 G,当边数 M 足够大时,若在 $M_r(n)$条边失败后恢复 $M_e(n)$条边对其可用性的影响可以忽略不计,则认为图 $G=(V,E)$在去除边为 $M_r(n)$时的边恢复为 $M_e(n)$.

定义 5 和定义 6 中,符号 Θ 和 R 由下面的公式给出:

$f(n)=\Theta(g(n))\Leftrightarrow$存在常数 c 和 n_0,使得 $n>n_0$ 时,

$$f(n)\leqslant cg(n) \tag{16}$$

$f(n)=R(g(n))\Leftrightarrow$存在常数 c_1,c_2 和 n_0,使得 $n>n_0$ 时,

$$c_1g(n)\leqslant f(n)\leqslant c_2g(n) \tag{17}$$

定义 5　当网络 $G=(V,E)$遭受随机故障或恶意攻击,若失败节点为 $N_r(n)$时的节点恢复为 $N_d(n)$,存在 $l(n)$,满足 $l(n)=\Theta(N_d(n))$,使得在恢复节点为 $l(n)$时,所得 D 满足公式:

$$\lim_{n\to\infty}D=\lim_{n\to\infty}\left\{1-\left[\frac{(N_r(n)-N_d(n))}{N}\right]\right\}\neq\lim_{n\to\infty}\frac{C}{(N-N_r(n))} \tag{18}$$

则称图 $G=(V,E)$在失败节点为 $N_r(n)$时的节点恢复鲁棒性为 $R(N_d(n))$,记为 RF-NRR/HA-NRR = $R(N_d(n))$.

定义 6　当网络 $G=(V,E)$遭受随机故障或恶意攻击,若失败边为 $M_r(n)$时的边恢复为 $M_e(n)$,存在 $l(n)$,满足 $l(n)=\Theta(M_e(n))$,使得在恢复边为 $l(n)$时,所得 E 满足公式:

$$\lim_{n\to\infty}E=\lim_{n\to\infty}\left\{1-\left[\frac{(M_r(n)-M_e(n))}{M}\right]\right\}\neq\lim_{n\to\infty}\frac{C}{(N-N_r(n))} \tag{19}$$

则称图 $G=(V,E)$在失败边为 $M_r(n)$时的边恢复鲁棒性为 $R(M_e(n))$,记为 RF-ERR/HA-ERR = $R(M_e(n))$.

定义 5 和定义 6 通过拓扑边恢复和节点恢复给出节点恢复鲁棒性和边恢复鲁棒性的定义.可以用来讨论某类拓扑结构失败节点(边)数和恢复节点(边)数与总节点(边)数的函数关系.

表 1　本文根据网络失败类型定义的六类鲁棒性

网络失败类型	连接鲁棒性	恢复鲁棒性	
随机故障	RFCR	RF-NRR	RF-ERR
恶意攻击	HACR	HA-NRR	HA-ERR

4 无线通信网络节点失效情况分析

无线通信网络层次结构通过一定的策略选举部分节点为活动节点,称为簇头,组成骨干网转发数据,其他节点称为普通节点,根据自身情况加入不同的簇,只负责信息采集不负责消息转发.网络中的失败节点可能是普通节点或者是簇头节点,它们对网络可用性的影响是不同的,普通节点失败,除自身不可用外,不会影响其他节点;而簇头节点失败时可能产生两方面的影响,一方面是簇头及簇头内的节点都不可用,另一方面由此被隔离的簇头节点及所有簇内节点都不可用,如图 1 所示.

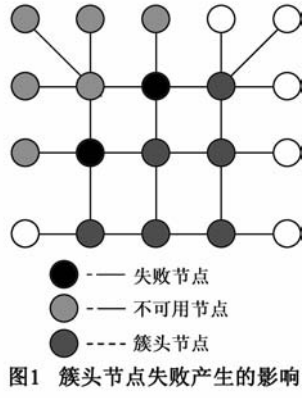


图1 簇头节点失败产生的影响

4.1 影响连接鲁棒性的节点失效情况分析

设网络中有 $N_{r1}(n)$个失败节点,并设这 $N_{r1}(n)$个节点最多能导致 $F_f(n)$个簇头不可用.失败节点必须连成一条线才能使网络断裂,影响整个网络拓扑,如图 2 所示.$N_{r1}(n)$个失败节点最多导致多少节点不可用的问题,转化成相应的数学问题,如图 3 所示.

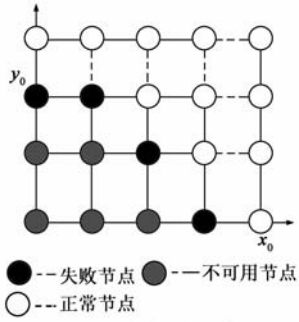


图2 网络分裂示意图

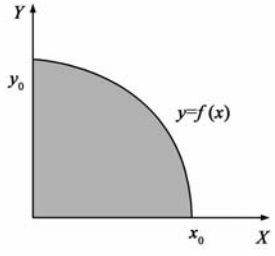


图3 网络分裂数学示意图

设函数 $f(x)$在第一象限内的长度为 $N_{r1}(n)$,使得该曲线分割的面积 $F_f(n)$最大.即在约束条件(21)下,$F_f(n)$取得最大值.

$$F_f(n)=\int_0^{x_0} f(x)\mathrm{d}x \tag{20}$$

$$N_{r1}(n)=\oint \mathrm{d}s \tag{21}$$

求得:
$$F_f(n)=\frac{N_{r1}(n)^2}{\pi} \tag{22}$$

可以得到剩余可用节点数目为:

$$A(n)=n-\left(\left\lfloor F_f(n)\cdot\left(\frac{1}{p(n)}-1\right)\right\rfloor+N_{r2}(n)\right) \tag{23}$$

要使拓扑能容忍 $N_r(n)$个节点失败,须有式(5)成立,那么可以得出:

$$N_r(n)=\begin{cases} c_1\cdot n^{1-\varepsilon_1}, & p_1(n)=0 \\ \min\left(c_1\cdot\dfrac{p^{1/2}(n)}{p_1(n)}\cdot n^{1/2-\varepsilon_1}, c_2\cdot\dfrac{1}{1-p_1(n)}\cdot n^{1-\varepsilon_2}\right), & p_1(n)\in(0,1) \\ c_2\cdot n^{1/2-\varepsilon_1}\cdot p^{1/2}(n), & p_1(n)=1 \end{cases} \tag{24}$$

其中 c_1,c_2 和 $\varepsilon_1,\varepsilon_2$ 是常数,$\varepsilon_1,\varepsilon_2\in(0,1/2]$.

至此可以得结论:在无线通信网络模型中,如果簇头节点的比例为 $p(n)$,簇头节点失败的概率为 $p_1(n)$,则该拓扑连接鲁棒性为 $\Phi(N_r(n))$,其中 $N_r(n)$由公式(24)给出.

4.2 影响节点恢复鲁棒性的节点失效情况分析

假设网络中不可用节点总数为 $B(n)$,要使断裂的部分恢复与可用节点连接成为一个正常网络,则需要恢复的节点至少连成一条线,如图 4 所示.转化成相应的数学问题(如图 3 所示),需要恢复的节点个数至少为 $f(x)$在第一象限内的长度 $N_d(n)$.即:

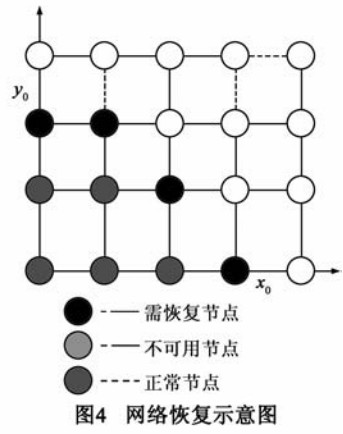


图4 网络恢复示意图

$$B(n)=\int_0^{x_0} f(x)\mathrm{d}x \tag{25}$$

$$N_d(n)=\oint \mathrm{d}s \tag{26}$$

求得:
$$N_d(n)=(\pi B(n))^{1/2} \tag{27}$$

网络中不可用节点的数目为:

$$B(n)=N_r(n)\cdot\left[1+p_1(n)\cdot\left(\frac{1}{p(n)}-1\right)\right] \tag{28}$$

要使拓扑在不可用节点为 $B(n)$时恢复良好,须有式(5)、(14)成立,由公式(24)、(28)得:

$$N_d(n)=\begin{cases} c_1\cdot n^{1/2(1-\varepsilon_1)}, & p_1(n)=0 \\ \min\left(c_1\left[(2-p_1(n))\cdot\dfrac{p^{1/2}(n)}{p_1(n)}\cdot n^{1/2-\varepsilon_1}\right]^{1/2}, c_2\cdot\dfrac{2-p_1(n)}{1-p_1(n)}n^{1/\varepsilon_1}\right), & p_1(n)\in(0,1) \\ c_2\cdot[n^{1/2-\varepsilon_1}\cdot p^{1/2}(n)\cdot(2-p_1(n))]^{1/2}, & p_1(n)=1 \end{cases} \tag{29}$$

其中 c_1,c_2 和 $\varepsilon_1,\varepsilon_2$ 是常数,且 $\varepsilon_1,\varepsilon_2\in(0,1/2]$.

至此可以得:在无线通信网络模型中,如果簇头节点的比例为 $p(n)$,簇头节点失败的概率为 $p_1(n)$,该拓

扑在失败节点为 $N_r(n)$时的节点恢复鲁棒性为 $R(N_d(n))$,其中 $N_d(n)$由公式(29)给出.

4.3 影响边恢复鲁棒性的节点失效情况分析

拓扑中不能恢复的边是因为该边连接的两个节点都丢失,所以边恢复性定义为:

$$E=1-\left(\frac{N_r(n)}{n}\right)^2 \tag{30}$$

要使拓扑在不可用节点为 $N_r(n)$时恢复良好,须有公式(5)、(15)成立,由公式(24)、(30)得:

$$N_d(n)=\begin{cases}1-c_1\cdot n^{-2(1-\varepsilon_1)}, & p_1(n)=0\\ \min\left(1-c_1\cdot\dfrac{p^{1/2}(n)\cdot n^{-(1/2+\varepsilon_1)}}{p_1(n)+1},1-c_2\cdot\dfrac{n^{-\varepsilon_2}/p(n)}{p_1(n)(1/p(n)-2)+2}\right), & p_1(n)\in(0,1)\\ 1-c_2\cdot n^{-(1/2+\varepsilon_1)}\cdot p^{1/2}(n), & p_1(n)=1\end{cases} \tag{31}$$

其中 c_1,c_2 和 $\varepsilon_1,\varepsilon_2$ 是常数,且 $\varepsilon_1,\varepsilon_2\in(0,1/2]$.

至此可以得:在无线通信网络模型中,如果簇头节点的比例为 $p(n)$,簇头节点失败的概率为 $p_1(n)$,该拓扑在失败节点为 $N_r(n)$时的边恢复鲁棒性为 $R(N_d(n))$,其中 $N_d(n)$由公式(31)给出.

5 分析与讨论

本节根据上节得出的结论,分析簇头节点比例 $p(n)$取不同值时对无线通信网络结构鲁棒性的影响,藉此获取无线通信网络结构鲁棒性与具体网络拓扑之间的映射关系.

5.1 伯努利节点网络模型的连接鲁棒性

在有 n 个伯努利节点的无线通信网络模型中,如果节点概率为 $p(n)$,那么该网络拓扑的随机故障鲁棒性和恶意攻击鲁棒性如下:

(1)当 $p(n)=1$ 时,所有节点都是簇头,显然 $p_1(n)=1$.此时 n 个节点组成了均匀分布的平面网络模型,其随机故障鲁棒性和恶意攻击鲁棒性相等:

$$\text{HACR}=\text{RFCR}=\Phi(n^{1/2-\varepsilon}) \tag{32}$$

其中 ε 是常数,并且 $\varepsilon\in(0,1/2]$.

(2)当 $p(n)=c$(c 为常数,且 $0<c<1$)时,簇头节点占全部节点的比例一定,此时网络结构为层次网络模型,其随机故障鲁棒性 RFCR 为:

$$\text{RFCR}=\Phi(c^{-1/2}\cdot n^{1/2-\varepsilon}) \tag{33}$$

其恶意攻击鲁棒性 HACR 为:

$$\text{HACR}=\Phi(c\cdot n^{1/2-\varepsilon}) \tag{34}$$

其中 ε 是常数,并且 $\varepsilon\in(0,1/2]$.

把式(33),(34)对 c 求导得:

$$\text{RFCR}'(c)<0 \tag{35}$$

$$\text{HACR}'(c)>0 \tag{36}$$

结论 1　(1)无线通信网络平面拓扑结构的随机故障鲁棒性和恶意攻击鲁棒性相等;(2)平面拓扑结构的恶意攻击鲁棒性要优于层次拓扑结构,而其随机故障鲁棒性要劣于层次拓扑结构;(3)层次拓扑结构的随机故障鲁棒性随着簇头占节点总数目比例的提高而递减,恶意攻击鲁棒性随着簇头占总节点总数目比例的提高而递增.

5.2 伯努利节点网络模型恢复鲁棒性分析

在有 n 个伯努利节点的无线通信网络模型中,如果节点概率为 $p(n)$,那么该网络拓扑在失败节点为 $N_r(n)$时的恢复鲁棒性 $R(N_d(n))$如下:

(1)当 $p(n)=1$ 时,所有节点都是簇头,显然 $p_1(n)=1$.此时 n 个节点组成了均匀分布的平面网络模型,每个节点失败的概率相同,所以无论网络失败是由随机故障还是由恶意攻击造成,其节点恢复鲁棒性相等:

$$\text{RF-NRR}=\text{HA-NRR}=R(n^{1/4-\varepsilon/2}) \tag{37}$$

其边恢复鲁棒性也相等:

$$\text{RF-ERR}=\text{HA-ERR}=R(1-n^{-(1/2+\varepsilon)}) \tag{38}$$

其中 ε 是常数,并且 $\varepsilon\in(0,1/2]$.

(2)当 $p(n)=c$(c 为常数,且 $0<c<1$)时,簇头节点占全部节点的比例一定,此时网络层次模型.

①当网络失败是由随机故障造成时,$p_1(n)=p(n)=c$,则其节点恢复鲁棒性 RF-NRR 为:

$$\text{RF-NRR}=R([(2-c)c^{-1/2}\cdot n^{1/2-\varepsilon}]^{1/2}) \tag{39}$$

其边恢复鲁棒性 RF-ERR 为:

$$\text{RF-ERR}=R\left(1-\frac{c^{1/2}\cdot n^{-(1/2+\varepsilon)}}{c+1}\right) \tag{40}$$

其中 ε 是常数,并且 $\varepsilon\in(0,1/2]$.

把式(39),(40)分别对 c 求导得:

$$\text{RF-NRR}'(c)>0 \tag{41}$$

$$\text{RF-ERR}'(c)<0 \tag{42}$$

②当网络失败是由恶意攻击造成时,$p(n)=c$,$p_1(n)=1$,则其节点恢复鲁棒性 HA-NRR 为:

$$\text{HA-NRR}=R(c^{1/4}\cdot n^{1/4-1/2\varepsilon}) \tag{43}$$

其边恢复鲁棒性 HA-ERR 为:

$$\text{HA-ERR}=R\left(1-\frac{1}{2}c^{1/2}\cdot n^{-(1/2+\varepsilon)}\right) \tag{44}$$

其中 ε 是常数,并且 $\varepsilon\in(0,1/2]$.

把式(39),(40)分别对 c 求导得:

$$\text{HA-NRR}'(c)>0 \tag{45}$$

$$\text{HA-ERR}'(c)<0 \tag{46}$$

结论 2　(1)无线通信网络层次拓扑结构的节点恢复鲁棒性要优于平面拓扑结构,而其边恢复鲁棒性要劣于平面拓扑结构;(2)层次拓扑结构的节点恢复鲁棒性随着簇头占节点总数目比例的提高而递增,而边恢复鲁棒性随簇头占节点总数目比例的提高而递减;(3)

平面拓扑结构中,随机故障时的节点恢复鲁棒性和边恢复鲁棒性与恶意攻击时分别相等;(4)层次拓扑结构中,随机故障时的节点恢复鲁棒性劣于恶意攻击时节点恢复鲁棒性,而边恢复鲁棒性优于恶意攻击时边恢复鲁棒性.

6 小结

本文针对无线通信网络的具体情形,以连接鲁棒性和恢复鲁棒性来测度网络抵抗破坏的能力,得出不同情形下无线通信网络结构与测度指标之间的函数关系.文献[6]认为:节点连接数趋向于均匀的具有较好的容侵性,但容错性较差;连接越是集中在少数节点上的网络具有较高的容错但容侵性较低.这与本文的结论吻合,从侧面反映了本文定义与结论的有效性.在特定的鲁棒性要求下,该函数关系可以用于指导拓扑的设计,帮助解决拓扑控制中的一些具体问题.

表 2 无线通信网不同拓扑结构的鲁棒性

无线通信网络拓扑结构	连接鲁棒性		恢复鲁棒性			
			随机故障		恶意攻击	
	RFCR	HACR	RF-NRR	RF-ERR	HA-NRR	HA-ERR
平面拓扑结构	$\Phi(n^{1/2-\varepsilon})$	$\Phi(n^{1/2-\varepsilon})$	$R(n^{1/4-\varepsilon/2})$	$R(1-n^{-(1/2+\varepsilon)})$	$R(n^{1/4-\varepsilon/2})$	$R(1-n^{-(1/2+\varepsilon)})$
层次拓扑结构	$\Phi(c^{-1/2}\cdot n^{1/2-\varepsilon})$	$\Phi(c\cdot n^{1/2-\varepsilon})$	$R([(2-c)c^{-1/2}\cdot n^{1/2-\varepsilon}]^{1/2})$	$R\left(1-\frac{c^{1/2}\cdot n^{-(1/2+\varepsilon)}}{c+1}\right)$	$R(c^{1/4}\cdot n^{1/4-1/2\varepsilon})$	$R\left(1-\frac{1}{2}c^{1/2}\cdot n^{-(1/2+\varepsilon)}\right)$

参考文献

[1] Newman M E J, Barabasi A L, Watts D J. The Structure and Dynamic of Networks[M]. Princeton, NJ, USA: Princeton University Press, 2006.

[2] 杜巍,蔡萌,杜海峰.网络结构鲁棒性指标及应用研究[J].西安交通大学学报,2010,44(5):94 – 96.

[3] ASH J, NEWTH D. Optimizing complex networks for resilience against cascading failure[J]. Physical A: Statistical Mechanics and its Application, 2007, 380(7): 673 – 683.

[4] Wang Bing, Tang Huanwen, Guo Chonghui, et al. Optimization of network structure to random failure[J]. Physical A: Statistical Mechanics and its Application, 2007, 380(7): 673 – 683.

[5] Kwon Y K, Cho K H. Analysis of feedback loops and robustness in network evolution based an Booleam model[J]. BMC Bioinformatics, 2007, 8(9): 430 – 48.

[6] Albert R, Jeong H, Barabasi A L. Attack and error tolerance in complex networks[J]. Nature, 2000, 406(6749): 387 – 482.

[7] 王良民,马建峰,王超.无线传感器网络拓扑的容错度与容侵度[J].电子学报,2006,34(8):1446 – 1451.
Wang Liangmin, Ma Jianfeng, Wang Chao. Degree of fault-tolerance and intrusion-tolerance for topologies of wireless sensor Networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(8): 1446 – 1451. (in Chinese)

[8] Peng-jun Wan, Chih-wei Yi. Asymptotic critical transmission range for connectivity in wireless ad hoc networks with Bernoulli nodes[A]. Proceedings of the 5th ACM International Symposiumon Mobile ad hoc Networking and Computing (MOB IHOC 2004)[C]. Tokyo, Japan: ACM press, 2004. 1 – 8.

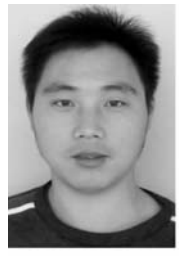
[9] Dodds S P, Watts D J, Sabel F C. Information exchange and robustness of organizational networks[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2003, 100(21): 12516 – 12521.

[10] Bohannon J. Counterterrorism′s new tool: ‘metanetwork’ analysis[J]. Science, 2009, 325(5939): 409 – 411.

作者简介

冯 涛 男,1970 年生于甘肃临洮,兰州理工大学计算机与通信学院副院长、研究员,研究方向为可证明安全协议理论、无线和移动网络安全.

E-mail: fengt@lut.cn



李洪涛 男,1984 年生于山东临沂,兰州理工大学计算机与通信学院硕士研究生,主要研究方向为无线和移动网络安全.