

文章编号:1001-9081(2011)07-1952-04

doi:10.3724/SP.J.1087.2011.01952

基于耦合映像格子的有向网络相继故障

马秀娟, 马福祥, 赵海兴

(青海师范大学 计算机学院, 西宁 810008)

(ma_xiujuan2010@yahoo.cn)

摘要:针对现实世界中存在大量的有向网络,根据有向网络中边的有向性,提出适合描述有向网络耦合映像格子(CML)的相继故障模型,利用仿真分析的方法研究了BA无标度有向网络和ER随机图有向网络在该模型作用下的相继故障行为。仿真中,对节点数固定的网络采用蓄意攻击和随机攻击两种策略进行攻击,并记录相关数据。通过对所得数据的分析发现:1)这两类有向网络的相继故障进程比同规模的无向网络要剧烈;2)当网络遭受攻击时,有向网络比无向网络更加脆弱;3)ER随机图网络相继故障发生过程中引起网络相继故障规模增长的4个临界值之间存在线性关系。

关键词:有向网络;耦合映像格子;相继故障;复杂网络

中图分类号:TP393 **文献标志码:**A

Cascading failure in coupled map lattices with directed network

MA Xiu-juan, MA Fu-xiang, ZHAO Hai-xing

(School of Computer Science, Qinghai Normal University, Xining Qinghai 810008, China)

Abstract: There are a large number of directed networks in the real world. According to a directional edge in the network, a cascading failure model was proposed which is suitable to describe the coupled map lattices with directed network. In this paper, using simulation methods, the cascading failures with BA (Barabási-Albert) scale free and ER (Erdős-Rényi) random graph directed networks in this model was researched. Two attack strategies: deliberate attack and random attack were adopted in this fixed node number network, and relevant data were recorded. By analyzing the data, following conclusions can be made: 1) the cascading failures are much easier to occur in directed network than in undirected network; 2) when the networks are attacked, directed networks are more vulnerable than undirected networks; 3) in ER random graph networks, there is linear relationship among four thresholds with fault size increasing when network faults occur.

Key words: directed network; Couple Map Lattice (CML); cascading failure; complex network

0 引言

近年来,随着耦合映像格子(Couple Map Lattice, CML)在复杂系统时空动力学方面的广泛应用^[1],研究人员已经开始研究具有小世界或无标度特性的网络及其CML中的动力学行为,如时空混沌、同步等^[2-3]。

文献[4-5]研究了全局耦合网络和无标度网络CML的相继故障。文献[2]研究了小世界网络CML的相继故障。文献[3]对无标度网络CML相继故障传播过程中的同步现象进行了分析,同时在文献[6]中对局域世界网络CML的相继故障也作了较为深入的研究。文献[7]提出了相继故障的拥塞模型。文献[8-9]根据网络中节点度的信息研究了社团网络的相继故障过程。文献[10]根据加权复杂网络中加权流再分配原则提出了相继故障的边扰动模型。之后,文献[11]提出了一种基于耦合映像格子的边扰动相继故障模型,该模型是在原来的CML模型上做了修改,从边的角度研究了网络的相继故障行为。上述研究都是从蓄意攻击和随机攻击两种策略出发深入研究了在这两种攻击策略下几类网络的CML的相继故障行为,并对它们的相继故障行为进行比较,同时在相关参数方面给出了较好的结果。

但目前,对耦合映像格子相继故障的研究都是基于无向网络的,还少见对有向网络耦合映像格子相继故障的相关研究结果。但现实世界中存在着大量的有向网络,例如:神经网络、食物链网络和电子邮件网络等。了解有向网络耦合映像格子相继故障的行为特点对改善有向网络的安全性和可靠性有着非常重要的意义,因此对有向网络耦合映像格子相继故障的研究是必要的。

本文首先提出了适合描述有向网络耦合映像格子的相继故障模型;然后利用仿真分析的方法将该模型作用于具有无标度特性的有向网络和度分布均匀的随机有向网络中,对网络分别进行随机攻击和蓄意攻击,并得到了相关的数据;最后通过对数据的分析,研究了这两类有向网络耦合映像格子相继故障的行为,得到了这两类有向网络耦合映像格子相继故障的特点,同时在相关参数方面给出了一些结果。

1 基于CML的有向网络相继故障模型

考虑到有向网络边的有向性,本文在汪小凡、许建提出的CML相继故障模型^[4-5]和崔迪、高自友等人提出的CML边扰动相继故障模型^[11]的基础上提出了适合描述有向网络的相继故障模型,如下所述:

收稿日期:2010-12-08;修回日期:2011-01-27。 基金项目:科技部973前期研究专项(2010CB334708);国家自然科学基金资助项目(60863006);新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-06-0912)。

作者简介:马秀娟(1977-),女,青海西宁人,讲师,硕士,主要研究方向:复杂网络、网络的相继故障; 马福祥(1975-),男,青海大通人,副教授,硕士,主要研究方向:嵌入式操作系统、计算机网络; 赵海兴(1969-),男,青海湟中人,教授,博士生导师,主要研究方向:随机网络的可靠性、图和超图多项式、化学分子图。

设有向网络包含 N 个节点,其 CML 的相继故障模型为:

$$x_i(t+1) = \left| (1 - \varepsilon_1 - \varepsilon_2)f(x_i(t)) + \varepsilon_1 \sum_{j=1, j \neq i}^{N_1} A_{ji} \frac{f(x_j(t))}{\deg^+(i)} + \varepsilon_2 \sum_{i=1, i \neq j}^{N_2} A_{ij} \frac{f(x_i(t))}{\deg^-(i)} \right| \quad (1)$$

其中 $x_i(t)$ 表示第 i 个节点在 t 时刻的状态。 N 个节点的连接信息用邻接矩阵 $A = (a_{i,j})_{N \times N}$ 表示,若节点 i 与 j 之间有有向边,且该边是以 i 为头, j 为尾则 $a_{ij} = 1$;若该边以 j 为头, i 为尾,则 $a_{ji} = 1$;若 i 和 j 之间无边相连,则 $a_{ij} = a_{ji} = 0$,这里不允许节点和自身相连。 N_1 表示有向网络中所有节点的入度之和, N_2 表示有向网络中所有节点的出度之和。 $\deg^+(i)$ 是节点 i 的入度, $\deg^-(i)$ 是节点 i 的出度。 $\varepsilon_1 \in (0, 1)$ 表示节点 i 的入边的耦合强度, $\varepsilon_2 \in (0, 1)$ 表示节点 i 的出边的耦合强度。非线性函数 f 表征节点自身的动态行为,这里选择为混沌 Logistic 映射: $f(x) = 4x(1-x)$,当 $0 \leq x \leq 1$ 时, $0 \leq f(x) \leq 1$ 。式(1)中绝对值的符号保证节点的状态非负。

如果节点 i 的状态在 m 个时序内始终在 $(0, l)$ 内,即 $0 < x_i(t) < l, t \leq m$,那么称节点 i 处于正常状态。如果在 m 时刻,节点 i 的状态 $x_i(m) \geq 1$,那么称节点在此刻发生故障。这种情况下,节点在以后的任意时刻状态恒等于零,即 $x_i(t) = 0, t > m$ 。在节点状态按照式(1)迭代演化的网络中,如果所有 N 个节点的初始状态都在 $(0, 1)$ 内,并且没有外部扰动,那么所有的节点将永远保持正常状态。

假设在 m 时刻给某个节点 i 施加一个外部扰动 $R \geq 1$,如式(2)所示:

$$x_i(t+1) = \left| (1 - \varepsilon_1 - \varepsilon_2)f(x_i(t)) + \varepsilon_1 \sum_{j=1, j \neq i}^{N_1} A_{ji} \frac{f(x_j(t))}{\deg^+(i)} + \varepsilon_2 \sum_{i=1, i \neq j}^{N_2} A_{ij} \frac{f(x_i(t))}{\deg^-(i)} + R \right| \quad (2)$$

在这种情况下,节点 i 在第 m 时刻发生故障。因此,对所有的 $t > m$ 有 $x_i(t) = 0$ 。在第 $m+1$ 时刻,与 i 直接相邻的节点都将受到 m 时刻 i 节点的状态 $x_i(m)$ 的影响,并且这些节点的状态值按照式(1)计算得出。此时计算出来的节点状态值也有可能大于 1,从而会引起新一轮的节点故障。这个过程反复进行,节点故障就会不断扩散,最终导致网络的崩溃。

2 有向网络耦合映像格子的相继故障

2.1 有向网络的构造

2.1.1 BA 无标度有向网络

1999 年 Barabási 和 Albert^[13] 提出了一个以增长和择优连接机理演化的无标度网络模型,它揭示了各类现实网络最普遍的现象,但该模型只是一个无向的网络模型,它无法体现有向网络的一些主要特性,为了研究有向网络 CML 的相继故障,本文在已有的 BA 无标度网络模型的构造算法的基础之上提出了以下的 BA 无标度有向网络模型算法。

1) 初始网络:初始给定 m_0 个节点, m_0 条有向边,首尾连接;设定网络的规模 N 。

2) 增长机制:每一时刻将 $N - m_0$ 中的一个节点作为新节点加入到网络中,同时增加 min 条入边和 $mout$ 条出边;网络中不允许重连边,也不允许自身连边;节点连接到网络后, N 减 1。

3) 择优机制:新节点连入边时按照择优概率: $p = \frac{\deg(i)^-}{\deg_{\max}^-}$ (其中 $\deg(i)^-$ 是老节点 i 的出度, \deg_{\max}^- 是网络中的最大出度)选择连接入边的节点;新节点连出边时按照择优

概率 $p = \frac{\deg(i)^+}{\deg_{\max}^+}$ (其中 $\deg(i)^+$ 是老节点 i 的入度, \deg_{\max}^+ 是网络中的最大入度)选择连接出边的节点。

2.1.2 ER 随机图有向网络

20 世纪 60 年代,Erdős 和 Rényi 建立了随机图理论,并提出了随机图模型^[14],该模型也是一个基于无向网络的模型,为了进一步研究 ER 随机图有向网络,本文在已有的无向随机图网络构造算法的基础上提出了 ER 随机图有向网络算法,如下所述:

- 1) 初始,给定 $N(N \gg 1)$ 个独立的节点;
- 2) 以相同概率 $p(p < 1)$ 随机选择两个节点 i 和 j ,以 i 为始点,以 j 为终点,连接一条由 i 到 j 的有向边,并使网络中的每个节点都有出边和入边,以保证有向网络的连通性;
- 3) 最终形成一个由 N 个节点, $pN(N-1)/2$ 条有向边构成的 ER 随机图有向网络。

2.2 BA 无标度有向网络 CML 相继故障的仿真分析

根据以上两类有向网络的算法构造了 BA 无标度有向网络和 ER 随机图有向网络,并在这两类网络上应用了上述的有向网络相继故障模型,通过计算机仿真得到了相关数据,并对这些数据进行了分析。

仿真采用 C 语言编程实现,所有数据取 50 次实验的平均值。仿真中,首先根据 3.1 节中的算法构造节点数固定的 BA 无标度有向网络和 ER 随机图有向网络,并设定相应的参数。BA 无标度有向网络的相关参数为:节点数 $N = 2000$, $\varepsilon_1 = 0.2$, $\varepsilon_2 = 0.6$, $m_0 = 4$, $min = 3, 5, 7$, $mout = 1$;ER 随机图有向网络中的相关参数为:节点数 $N = 2000$, $p = 0.25$, $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.4$ 。然后对网络中的节点进行攻击,并将得到的数据输出到文本文件以进行分析。攻击网络时主要考虑两种引发相继故障的策略:随机攻击和蓄意攻击,前者模拟有向网络中随机发生的节点故障,初始将扰动施加给随机选择的一个节点;后者模拟有向网络遭受蓄意攻击的情况,攻击时选择相对重要的节点,即初始时将扰动施加给网络中度最大的节点。

2.2.1 BA 无标度有向网络相继故障行为分析

1) BA 无标度有向网络相继故障的特点。

图 1 和图 2 中的数据显示了当 $min = 3, 5, 7$, $mout = 1$ 时 BA 无标度有向网络在随机攻击和蓄意攻击两种策略下发生相继故障的情况。图 1 中的数据显示了无标度有向网络单个节点受到随机攻击时,其故障规模 I 随扰动幅值的变化曲线。从图中数据可以看出当扰动幅值 R 增加时,故障规模也会增加,并最终达到崩溃。其中当 $min = 3$ 时,故障规模增加得最快,当 $min = 7$ 时,故障规模增加得最慢。另外,在随机攻击策略下,当 $min = 3, 5, 7$ 时,网络达到全局故障的扰动临界值分别是 $R_3 = 1.7$, $R_5 = 2.4$, $R_7 = 2.7$ 。图 2 中的数据显示了蓄意攻击无标度有向网络中度最大的节点后网络的故障规模随其扰动幅值的变化曲线。图中数据表明当扰动幅值 R 增大时,其故障规模也会增加,并最终达到崩溃。和随机攻击的方式类似,在蓄意攻击策略下,当 $min = 3$ 时,故障规模增加最快, $mout = 7$ 时,故障规模增加得最慢。另外当 $min = 3, 5, 7$ 时,达到全局故障的扰动临界值分别为 $R_3 = 1.5$, $R_5 = 1.9$, $R_7 = 2.3$ 。通过分析发现,无标度有向网络 CML 的相继故障的特点和无标度无向网络的情形非常相似^[6],但值得注意的是,在无标度有向网络中,两种攻击策略下其故障规模都会在一开就出现较多的故障节点,这种情况在蓄意攻击方式下更为突出,这说明无标度有向网络其相继故障的进程在蓄意攻击

方式下比在随机攻击方式下更为剧烈,即在相同的扰动幅值下,蓄意攻击更容易引起有向网络的全局故障,这一特点可以从图 3 显示的数据得到印证。此外,图 4 中的数据表明了无标度有向网络其 CML 的相继故障规模随时刻 t 的扩散过程。通过分析得到,BA 无标度有向网络在 5 个时序内会陆续达到崩溃,但在蓄意攻击策略下相继故障的扩散过程更快。

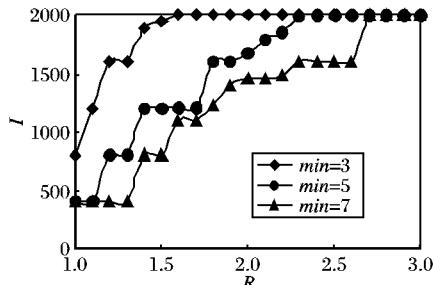


图 1 BA 无标度有向网络单个节点的随机攻击

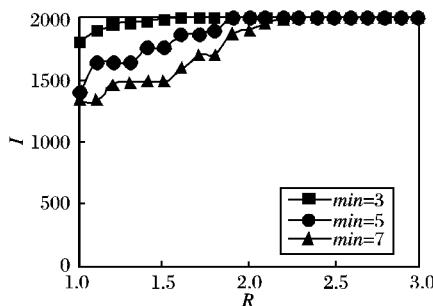


图 2 BA 无标度有向网络蓄意攻击度最大的节点

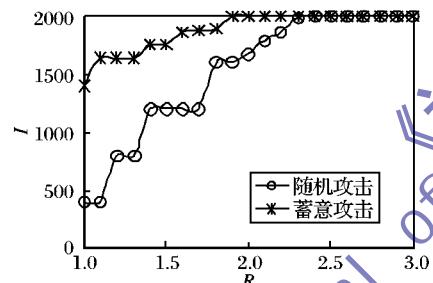


图 3 BA 无标度有向网络蓄意攻与随机攻击比较 ($min = 5$)

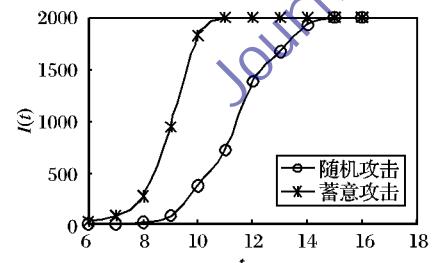


图 4 BA 无标度有向网络 CML 相继故障扩散过程

2) BA 无标度有向网络与无向网络的相继故障比较。

通过对 BA 无标度有向网络 CML 相继故障的仿真分析发现,其相继故障的很多特点都与 BA 无标度无向网络的情形类似,但它们之间也有一些相异的地方。图 5 和图 6 中的数据表明了它们的不同之处。

图 5 中的数据显示了当 $min = 5$ 时,在相同的扰动幅值下 BA 无标度有向网络出现的故障节点比无向网络要多,这表明有向网络比无向网络更加脆弱;另外,在两种攻击策略下,有向网络达到崩溃的扰动临界值也比无向网络要小。它们的临界值分别是 $R_{\text{有向蓄意攻击}} = 1.9, R_{\text{无向蓄意攻击}} = 2.6, R_{\text{有向随机攻击}} = 2.4, R_{\text{无向随机攻击}} = 4.8$ 。上述数据进一步说明 BA 无标度有向

网络比无向网络更容易达到崩溃。

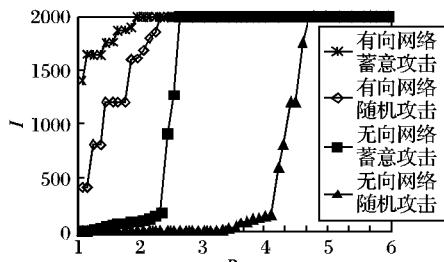


图 5 BA 无标度有向网络与无向网络 CML 相继故障比较

图 6 是 BA 无标度有向网络与无向网络 CML 相继故障扩散过程的曲线图,通过比较得知,BA 无标度有向网络和无向网络都会在 5 个时序内相继达到崩溃,但在两种攻击策略下有向网络的扩散过程都比无向网络剧烈,这也进一步说明了 BA 无标度有向网络更脆弱。

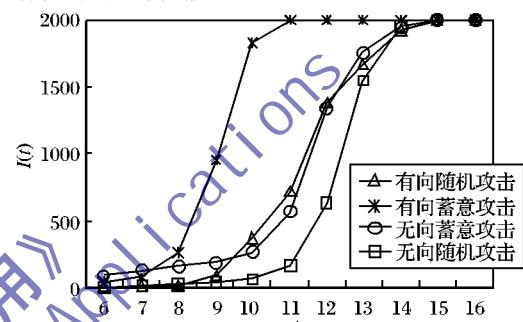


图 6 BA 无标度有向网络与无向网络 CML 相继故障扩散过程比较

2.2.2 ER 随机图有向网络相继故障分析

图 7 中的数据显示了 ER 随机图有向网络和无向网络在两种攻击策略下,故障规模和扰动幅值之间的关系曲线图。图中数据表明了以下三个特点:

1) ER 随机图有向网络和无向网络在两种攻击策略下都会发生相继故障,并最终达到崩溃。攻击过程中,当扰动幅值超过第一个临界值时,故障规模开始增长;在第二个临界值和第三个临界值之间,故障规模保持同一水平,当扰动幅值超过第三个临界值时,故障规模快速增长;当扰动幅值达到或超过第四个临界值时,网络将出现全局故障。

2) 在 ER 随机图网络中,相同的扰动幅值下蓄意攻击方式引起的相继故障的进程比随机攻击稍有增加,但增加的幅度不是很大。这是因为在 ER 随机图网络中,各节点的度分布较为均匀,因此在相同的扰动幅值下蓄意攻击方式不会使相继故障的规模有明显的增长。

3) 比较 ER 随机图有向网络和无向网络发现,引起 ER 随机图有向网络相继故障规模增长的临界值都比 ER 随机图无向网络要小得多。具体数据如表 1 所示。

通过对表 1 中的数据分析得知:ER 随机图有向网络比无向网络更容易引起相继故障,在相同的扰动幅值下 ER 随机图有向网络具有更高的脆弱性。这是因为在 ER 随机图有向网络中,节点间是通过有向边相连,因此 ER 随机图有向网络相继故障的进程比无向网络更加剧烈。

图 8 中的数据是 ER 随机图有向网络和无向网络 CML 相继故障扩散时序图,图中数据表明 ER 随机图有向网络和无向网络在三个时序内陆续发生相继故障;另外,从该图中可以看出,随机攻击和蓄意攻击方式下引起的相继故障的扩散没有太大的区别,这也进一步表明了 ER 随机图网络的均匀性使得两种攻击策略下相继故障的特点基本类似,但这种情况在有向网络中表现得比无向网络突出。同时,图中曲线也说

明有向网络相继故障的扩散比无向网络更加剧烈,进一步印证了ER随机图有向网络比无向网络更加脆弱。

表1 不同规模ER随机图有向网络和无向网络扰动临界值比较

扰动 临界值	1000个节点				2000个节点			
	有向网络		无向网络		有向网络		无向网络	
	随机攻击	蓄意攻击	随机攻击	蓄意攻击	随机攻击	蓄意攻击	随机攻击	蓄意攻击
R_1	7.3	7.7	16.1	13.1	13.6	13.3	24.1	23.5
R_2	9.5	9.6	20.4	17.7	15.5	15.8	28.9	28.7
R_3	11.7	11.4	23.8	21.1	19.7	19.7	34.8	33.8
R_4	13.6	12.9	25.3	23.3	21.5	21.4	37.2	36.0

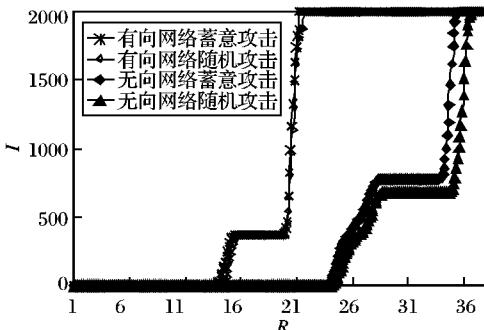


图7 ER随机图有向网络与无向网络CML相继故障比较

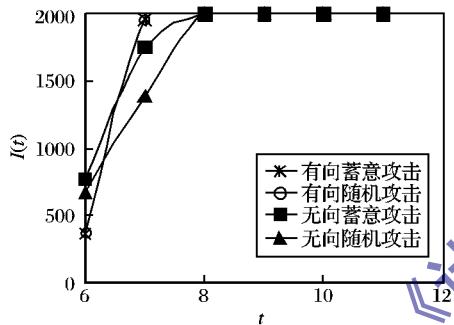


图8 ER随机图有向网络和无向网络CML相机故障扩散过程比较

另外,从图7中的数据还可以发现,存在4个使ER随机图有向网络相继故障规模发生改变的临界值,图9和图10中的数据说明了ER随机图网络其4个扰动值临界值之间存在线性关系,图中横坐标SORT表示临界值的种类,纵坐标R表示扰动临界值。图9中的数据说明,不同规模的ER随机图有向网络其4个扰动临界值之间都存在相应的线性关系。图10通过给网络规模为2000的ER随机图有向网络和无向网络临界值的曲线图添加线性趋势线来进一步印证这种线性关系。

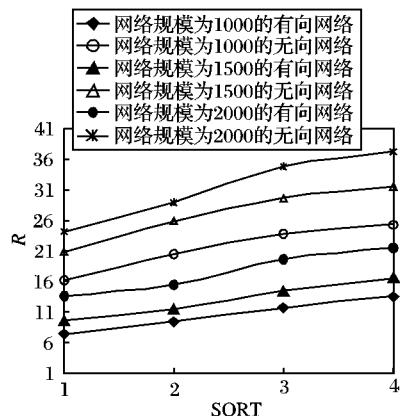


图9 不同规模的网络扰动临界值之间的关系

3 结语

通过将有向网络CML的相继故障模型作用到BA无标

度有向网络和ER随机图有向网络,可以得到如下结论:

- 1) 有向网络同无向网络一样具有既鲁棒又脆弱的性质,且蓄意攻击方式更容易引起有向网络相继故障的发生。
- 2) 相同规模的有向网络比无向网络更脆弱。
- 3) ER随机图网络相继故障发生过程中引起网络相继故障规模增长的4个扰动临界值之间存在一定的线性关系。

以上结论对进一步研究有向网络的相继故障行为提供了一定的参考依据。

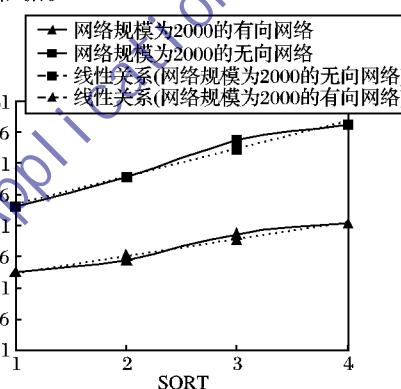


图10 ER随机图有向网络与无向网络扰动临界值之间的线性关系

参考文献:

- [1] KANEKO K. Coupled map lattices[M]. Singapore: World Scientific, 1992.
- [2] GADE P M, HU C K. Synchronous chaos in coupled map lattices with small-world interactions[J]. Physical Review E, 2000, 62(5): 6409 - 6413.
- [3] BAO Z J, CAO Y J, DING L J, et al. Synergetic behavior in the cascading failure propagation of scale-free couple map lattices[J]. Physica A, 2008, 387(23): 5922 - 5929.
- [4] ZHENG JIANFENG, GAO ZIYOU, ZHAO XIAOMEI. Modeling cascading failures in congested complex networks[J]. Physica A, 2007, 385(12): 700 - 706.
- [5] WANG XIAOFAN, XU JIAN. Cascading failures in coupled map lattices[J]. Physical Review E, 2004, 70(5): 056113.
- [6] XU JIAN, WANG XIAOFAN. Cascading failures in scale-free coupled map lattices[J]. Physica A, 2005, 349(3/4): 685 - 692.
- [7] BAO ZHEJING, CAO YIJIA. Cascading failures in local-world evolving networks[J]. Journal of Zhejiang University: Science A, 2008, 9(10): 13361340.
- [8] CUI DI, GAO ZIYOU, ZHAO XIAOMEI. Cascades in small-world modular networks with CML'S method[J]. Modern Physics Letters B, 2007, 21(30): 2055 - 2062.
- [9] CUI DI, GAO ZIYOU, ZHAO XIAOMEI. Cascades with coupled map lattices in preferential attachment community networks[J]. Chinese Physics B, 2008, 17(5): 1703 - 1708.

(下转第1979页)

t_{ld} 的差值,本文用它来衡量 LGD 的触发性能。 $\Delta t < 0$ 说明整个切换在链路断开前已经完成, Δt 越小表示 LGD 越早触发; $\Delta t > 0$ 说明整个切换在链路断开前还未完成,LGD 太迟触发,导致了服务的中断。

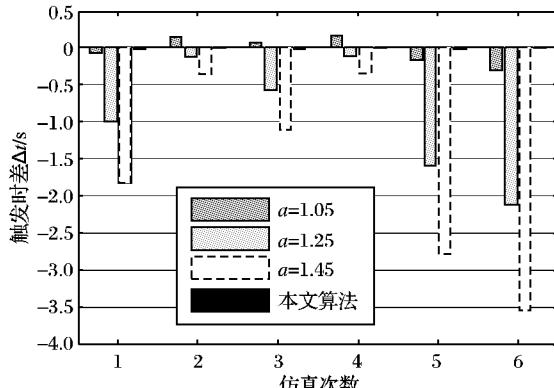


图 7 不同条件下的触发时差比较

表 3 图 7 仿真参数设置

网络参数	仿真次数					
	1	2	3	4	5	6
β_{start}	3	4	3	4	3	4
β_{final}	4	3	4	3	4	3
$v_{start}/(m \cdot s^{-1})$	1	4	4	4	1	1
$v_{final}/(m \cdot s^{-1})$	4	1	4	4	1	1

由图 7 可知,固定门限值($P_{LGD} = aP_{min}$, a 为门限系数)的触发机制在不同的仿真条件下会产生过早或太迟的 LGD 触发, $\Delta t \in [-3.45, 0.17]$ s;而本文算法实现了 LGD 及时有效地触发,避免了过早或太迟的触发, $\Delta t \in [-0.02, -0.01]$ s。

4.4 预测开销

本文用预测次数来表示预测开销,为了验证本文提出的基于信号衰减检测的灰色预测建模机制的有效性,假设终端在 RSS 值小于 P_{pred} 后,停留随机时间 1~1.5 s,然后继续按先前的速度和方向离开 WLAN, β 取 4。

图 8 显示了采用该机制和没有采用该机制的灰色预测在不同速度下的预测次数,可以看出该机制有效地减少了不必要的预测开销。虽然信号衰减算法也会消耗一定的资源,但其运算简单,相比于预测算法要小得多,因此可以节约终端资源。

5 结语

本文提出了一种基于灰色预测的 LGD 触发机制,在该机制中,终端利用 MIH 的信息服务,获取到所需要的邻居网络信息,通过这些信息可以估计出切换所需时间,由此得到预测步长,然后根据预测的接收信号强度来动态确定 LGD 触发时刻。仿真表明,算法实现了 LGD 的动态触发,切换性能得到改善,同时减少了不必要的预测开销,节约了终端资源。

(上接第 1955 页)

- [10] WANG WENXU, CHEN GUANRONG. Universal robustness characteristic of weighted networks against cascading failure [J]. Physical Review E, 2008, 77(2): 026101~206105.
- [11] CUI DI, GAO ZIYOU, ZHENG JIANFENG. Tolerance of edge cascades with coupled map lattices methods [J]. Chinese Physics B, 2009, 18(3): 992~996.
- [12] 汪小帆, 李翔, 陈关荣. 复杂网络理论及其应用 [M]. 北京:

在下一步工作中,将会考虑更多不同的网络,以便更好地验证该机制的有效性;同时,也将尝试寻找其他更优的预测算法,从而进一步改善网络切换性能。

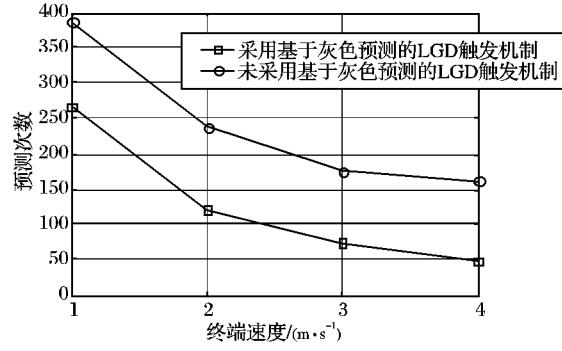


图 8 预测次数

参考文献:

- [1] ZHANG RUYUN, WANG YUHONG, HUANG KAIZHI, et al. Link quality oriented proactive vertical handover in heterogeneous wireless networks. [C]//IEEE International Symposium on Computer Network and Multimedia Technology. New York: IEEE, 2009: 1~4.
- [2] JIANG QING, ZHANG XITENG, CHAI RONG, et al. Measuring the performance of link layer triggers for the upward vertical handover in heterogenous wireless network[C]// IEEE International Conference on Wireless Networks and Information Systems. New York: IEEE, 2009: 205~208.
- [3] DIMOPOULOU L, LEOLEIS G, VENIERIS I O. Fast handover support in a WLAN environment: challenges and perspectives[J]. IEEE Network, 2005, 19(3): 14~20.
- [4] MHATRE V, PAPAGIANNAKI K. Using smart triggers for improved user performance in 802.11 wireless networks[C]// Proceedings of the 4th International Conference on Mobile Systems, Applications and Services. New York: ACM, 2006: 246~259.
- [5] MA CHI, FALLON E, QIAO YANSONG. VOSH: A velocity optimized seamless handover mechanism for WiMAX networks [EB/OL]. [2010-08-20]. <http://arrow.dit.ie/ittpapniv/21>.
- [6] YOO S J, CYPRER D, GOLMIE N. Predictive link trigger mechanism for seamless handovers in heterogeneous wireless networks[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2009, 9(5): 685~703.
- [7] IEEE 802.21. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks-Part 21: Media Independent Handover[S], IEEE, 2009.
- [8] 邓聚龙. 灰色控制系统[M]. 2 版. 武汉: 华中理工大学出版社, 2005.
- [9] ZHANG QIAN, GUO CHUANXIONG, GUO ZIHUA, et al. Efficient mobility management for vertical handoff between WWAN and WLAN[J]. IEEE Communication Magazine, 2003, 41(11): 102~108.
- [10] RAPPAPORT T S. Wireless communication principles and practice [M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009.

清华大学出版社, 2006.

- [13] BARABÁSI A L, ALBERT R. Emergence of scaling in random network[J]. Science, 1999, 286(5439): 509~512.
- [14] ERDOS P, RÉNYI A. On the evolution of random graphs[J]. Publication of the Mathematical Institute of the Hungarian Academy of Sciences, 1960(5): 17~60.