

重置概率可变的自适应网络病毒传播研究

田 飞¹, 陈翰雄², 黄雅云², 陈春玲¹

(1. 南京邮电大学 计算机学院, 江苏 南京 210003;

2. 南京邮电大学 通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003)

摘 要: 自适应网络是反映网络动力学和节点动力学相互作用、相互反馈的网络。针对链接重置概率与病毒传播率呈线性正相关关系的自适应网络, 建立了基于可变重置概率的自适应网络 SIS 病毒传播模型的动力学方程。利用非线性微分动力学系统, 研究病毒在自适应复杂网络上的传播行为, 并通过分析非线性系统对应的雅可比矩阵特征方程, 研究系统平衡点的存在条件并对其进行稳定性分析。研究发现, 当病毒传播阈值 $R_0 < 1$ 时, 系统的无病平衡点局部渐进稳定, 不存在地方病平衡点; 当病毒传播阈值 $R_0 > 1$ 时, 系统无病平衡点不稳定, 存在唯一的地方病平衡点, 且该地方病平衡点局部渐进稳定。最后通过数值仿真验证了所得结论的正确性。结果表明, 当病毒传播阈值小于 1 时, 病毒将逐渐消亡; 当病毒传播阈值大于 1 时, 网络中的病毒将持续传播。

关键词: 自适应网络; 重置概率; 传播临界值; 稳定性

中图分类号: TP39

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2015)10-0140-05

doi: 10.3969/j.issn.1673-629X.2015.10.031

Research on Epidemic Spreading on Adaptive Network with Varied Resetting Probability

TIAN Fei¹, CHEN Han-xiong², HUANG Ya-yun², CHEN Chun-ling¹

(1. College of Computer Science and Technology, Nanjing University of Posts and Telecommunications,
Nanjing 210003, China;

2. College of Telecommunications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications,
Nanjing 210003, China)

Abstract: The adaptive network is the kind of network that reflects the relation of interaction and mutual feedback between node dynamics and network dynamics. Based on a specific adaptive epidemic spreading model, in which the resetting probability is affected significantly, linearly and positively by the virus transmission rate, a modified susceptible-infected-susceptible epidemic model with varied resetting probability in adaptive networks is presented. Epidemic spreading dynamics is studied by nonlinear differential dynamic system. The existing condition and local stability of the equilibrium in this network model are investigated by analyzing its corresponding characteristic equation of Jacobian Matrix of the nonlinear system. It is shown that when the epidemic threshold $R_0 < 1$, the disease-free equilibrium is asymptotically locally stable and endemic equilibrium does not exist. And if $R_0 > 1$, the disease-free equilibrium is not stable and there exists the only asymptotically locally stable endemic equilibrium. Numerical simulations are given to verify the results of theoretical analysis. The result shows that when the epidemic threshold is less than 1, the disease will die out, and when the epidemic threshold is greater than 1, the disease will continue to spread in the network.

Key words: adaptive network; resetting probability; epidemic threshold; stability

1 概 述

典型的病毒传播模型中, 网络中所有节点的基本状态有: 易染状态 S (Susceptible)、感染状态 I (Infec-

ted)、免疫状态 R (Recovered)。针对这三种状态的不同转换过程, 人们提出了多种病毒传播模型, 如 SI 模型^[1]、SIS 模型^[2]、SIR 模型^[3]、SIRS^[4]模型等。Sator-

收稿日期: 2014-11-28

修回日期: 2015-03-03

网络出版时间: 2015-08-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61373137)

作者简介: 田 飞(1990-), 男, 硕士研究生, 通讯作者, 研究方向为网络信息安全及病毒传播; 陈春玲, 教授, 研究方向为软件技术及其在通信中的应用、网络信息安全等。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20150826.1603.080.html>

ras 等^[5-7]通过对均匀网络和无标度网络中 SIS 病毒传播模型的研究发现,与均匀网络中存在的正的传播阈值不同,无标度网络中的传播阈值趋近于 0,表明在极低病毒传播率的无标度网络中,病毒也能够一直传播下去。但是,Satorras 等的研究基于一个重要前提,即病毒传播的网络为网络拓扑结构不变的静态网络,节点的状态和网络中的边,相互独立,互不影响^[5-7]。然而,在真实的病毒传播过程中,网络的拓扑结构并非是静止不变的。在现实网络中,非感染个体为了减少被感染的概率,会有意识地断开与感染个体间的链接,并随机地选择一个非感染个体形成新的链接,进而导致整个网络拓扑结构的变化。同时,网络拓扑结构的变化,反过来又对病毒的传播过程产生影响,网络节点状态和网络拓扑结构之间形成一种相互作用、相互影响的反馈回路,这种具有反馈回路的系统称为自适应网络^[8]。

自适应网络作为复杂网络的一种特殊形式,能更贴切地反映现实世界中病毒传播的真实状况,引起越来越多的复杂网络研究者的关注,取得了许多重要成果^[8-16]。其中,Gross 等^[8-9]提出自适应网络中的 SIS 模型。Shaw 等^[10-12]提出自适应网络中的 SIRS 模型。鲁廷玲等^[13-15]研究了自适应网络中病毒传播的稳定性及其分岔行为。宋玉蓉等^[16]利用元胞自动机研究了自适应网络中的 SIS 病毒传播模型。通过以上研究发现,自适应网络作为一种动态系统,网络特征参数的变化及相互关联可引起整个系统病毒传播行为的较大差异。

自适应网络中,病毒以传播率 p 在群体中传播和扩散。当一个易染节点 S 发现其邻居节点被感染后(该邻居节点变为感染节点 I),会有意识地断开该链接,并随机选择一个易染节点相连接。这个过程以 ω 的概率发生,称为 SI-链接的自适应重置。在以往的研究中,往往假定 ω 与病毒传播率 p 无关。然而,在实际情况下,随着病毒在网络中的传播和扩散,病毒传播率 p 会不断发生变化,而 ω 也会相应地随着 p 的变化而变化。如 SARS^[17]、H1N1^[18] 疫情突发时,随着感染个体数目的增加,病毒传播率也呈增长趋势。随着病毒的不断传播和扩散,人们的防范意识也不断增加,导致健康个体更加有意识地加强自我保护,自适应重置概率 ω 变大。当疫情得到控制后,病毒传播率 p 慢慢变小至 0,病毒在群体中慢慢消亡,群体中的所有个体都成为 S 节点,相应的, ω 也归为 0。如此,实际情况中病毒在群体中的传播率 p 与自适应重置概率 ω 表现为某种程度上的正相关关系。

文中基于 Gross 等提出的自适应网络中 SIS 病毒传播模型,假定 ω 与 p 表现为简单线性正相关关系,利

用非线性微分动力学方程,分析和研究可变重置概率自适应网络中病毒传播模型平衡点特征及其系统稳定性。

2 重置概率可变的自适应网络 SIS 模型

2.1 理论模型

在自适应网络的 SIS 病毒传播模型中,研究自适应重置概率 ω 与病毒传播率 p 呈现某种程度上的正相关关系,理论模型中假定

$$\omega = \delta p \tag{1}$$

其中, $\omega, p \in (0,1)$, 故必有 $0 < \delta \leq 1$ 。

自适应网络 SIS 传播模型中,节点有两种状态:易染状态(或称健康状态) S 、感染状态 I 。假设 S 节点和 I 节点在网络中的密度分别为 s, i , 则根据归一化条件,得

$$s + i = 1 \tag{2}$$

在自适应网络中,节点的状态处在不断变化的过程中,即网络中链接所连接的节点状态会不断变化,因此链接的属性也处于一个动态变化的过程中。设 SI-链接、SS-链接、II-链接的平均密度分别为 $l_{\text{SI}}, l_{\text{SS}}, l_{\text{II}}$, 则满足归一化条件

$$l_{\text{SI}} + l_{\text{SS}} + l_{\text{II}} = \frac{\langle k \rangle}{2} \tag{3}$$

其中, $\langle k \rangle$ 表示网络的节点平均度。

根据 Gross 等提出的自适应网络 SIS 病毒传播模型的微分动力方程组^[8-9], 建立基于可变重置概率的 SIS 病毒传播模型的动力学方程如下:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}i &= pl_{\text{SI}} - ri \\ \frac{d}{dt}l_{\text{II}} &= pl_{\text{SI}}\left(1 + \frac{l_{\text{SI}}}{s}\right) - 2rl_{\text{II}} \\ \frac{d}{dt}l_{\text{SS}} &= (r + \delta p)l_{\text{SI}} - \frac{2pl_{\text{SI}}l_{\text{SS}}}{s} \end{aligned} \tag{4}$$

Gross 提出的微分动力学方程^[8-9]显示了自适应网络的网络节点动力学和网络拓朴动力学的特征。简单来说,方程组中方程 1 表示了病毒以概率 p 沿 SI-链接在网络中传播,同时,感染个体以概率 r 恢复到易染状态;方程 2 表示了 SI-链接与 II-链接相互转换的过程;方程 3 表示的是 SI-链接以概率 ω 转换为 SS-链接的过程。在网络的自适应重置过程中,不允许出现重边和自环。

将式(2)和式(3)代入式(4),得

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}i &= pl_{\text{SI}} - ri \\ \frac{d}{dt}l_{\text{SI}} &= 2rl_{\text{II}} + \frac{2pl_{\text{SI}}}{1-i}\left(\frac{\langle k \rangle}{2} - l_{\text{SI}} - l_{\text{II}}\right) - \end{aligned}$$

$$p l_{SI} (1 + \frac{l_{SI}}{1-i}) - (r + \delta p) l_{SI} \tag{5}$$

$$\frac{d}{dt} l_{II} = p l_{SI} (1 + \frac{l_{SI}}{1-i}) - 2 r l_{II}$$

这样,将 Gross 等提出的关于自适应网络 SIS 模型的微分方程组转变为关于 i, l_{SI}, l_{II} 的微分方程组,设 $S = \{ (i, l_{SI}, l_{II}) \mid i \in (0, 1), l_{SI} \geq 0, 0 \leq l_{II} \leq \frac{\langle k \rangle}{2} \}$ 为系统的非负集合。

2.2 系统平衡点分析

当系统达到稳态时, i, l_{SI}, l_{II} 都达到一个稳定值而不再随时间变化,此时方程组(4)右端为 0,解方程组可以得到系统平衡解 $E = \{ i, l_{SI}, l_{II} \} \subset D$ 。

在稳态情况下,可以得到链接密度关于感染节点密度的关系式:

$$\begin{aligned} l_{SI} &= \frac{ri}{p} \\ l_{II} &= \frac{i}{2} (1 + \frac{ri}{p(1-i)}) \\ l_{SS} &= \frac{r + \delta p}{2p} (1-i) \end{aligned} \tag{6}$$

当 $i = 0$ 时,系统中感染节点的数目为 0, SI-链接、II-链接的数目也为 0, 即 $l_{SI} = 0, l_{II} = 0$, 得到无病毒平衡解:

$$\begin{aligned} E_0 &= (i, l_{SI}, l_{II}) = (0, 0, 0) \\ \text{当 } i \neq 0 \text{ 时,可以得到系统的地方病平衡解:} \\ E^* &= (i^*, l_{SI}^*, l_{II}^*) \end{aligned}$$

联立式(2)和式(5), $i = i^*$ 满足

$$(1 - \delta) i^2 + (2\delta - \langle k \rangle - 1) i + (\langle k \rangle - \delta - \frac{r}{p}) = 0 \tag{7}$$

系统(5) 的基本再生数为

$$R_0 = \frac{p \langle k \rangle}{r + \delta p} = \frac{\langle k \rangle}{\delta + \frac{r}{p}} \tag{8}$$

设 $f(i) = (1 - \delta) i^2 + (2\delta - \langle k \rangle - 1) i + (\langle k \rangle - \delta - \frac{r}{p})$ 。记 $A = 1 - \delta$, $B = 2\delta - \langle k \rangle - 1$, $C = \langle k \rangle - \delta - \frac{r}{p}$, 已知 $\lambda \in (0, 1]$, $\langle k \rangle \geq 1$, 可知 $B < 0$ 。分两种情况讨论:

(1) 当 $\delta = 1, A = 1 - \delta = 0$ 时, 当且仅当 $R_0 > 1$ 时, 此时 $C > 0$, 方程(7)存在惟一正解 $i^* = \frac{-C}{B}$, 但 $B + C = \delta - (1 + \frac{r}{p}) < 0$, 即 $\frac{-C}{B} < 1$, 知 $0 < i^* < 1$ 。

(2) 当 $0 < \delta < 1$ 时, 有 $A > 0$, 令 $\Delta = B^2 - 4AC = (\langle k \rangle - 1)^2 + \frac{4r}{p}(1 - \delta)$, 知 $\Delta > 0$, 故方程(7)有两

个解:

当 $R_0 = 1$ 时, 有 $C = 0$, 此时方程存在惟一正解 $i^* = \frac{-B}{A} = \frac{\langle k \rangle - \delta}{1 - \delta} + 1 \geq 2$, 不符合条件, 舍去;

当 $R_0 > 1$ 时, 有 $C > 0$, 方程(7)存在两个正解, 较小的正解为 $i_1^* = \frac{-B - \sqrt{\Delta}}{2A}$, 对应的地方病平衡点记为 E^* , 较大的正解为 $i_2^* = \frac{-B + \sqrt{\Delta}}{2A}$ 。取 $i = 1$, 代入

式(7), 有 $f(1) = -\frac{r}{p} < 0$, 因此较大正解 $i_2^* > 1$, 不符合条件, 舍去。

当 $R_0 < 1$ 时, 有 $C < 0$, 此时方程(7)存在唯一正解 $i^* = \frac{-B + \sqrt{\Delta}}{2A}$, 同上例分析, 知不符合条件, 舍去。

综上所述, 得到以下定理:

定理 1: 在节点自适应重置概率与病毒传播率呈线性正相关的自适应网络 SIS 模型中, 系统总是存在无病平衡点 E_0 ; 当系统基本再生数 $R_0 > 1$, 系统除了存在无病平衡点 E_0 , 还存在地方病平衡点 E^* 。

3 平衡点的稳定性分析

3.1 无病平衡点的稳定性

定理 2: 当 $R_0 < 1$ 时, 无病平衡点 E_0 是局部渐进稳定的。当 $R_0 > 1$ 时, 无病平衡点 E_0 是不稳定的。

证明: 无病平衡点 $E_0 = (i, l_{SI}, l_{II}) = (0, 0, 0)$ 的雅可比矩阵为 J_0 为

$$\begin{bmatrix} -r & p & 0 \\ 0 & (\langle k \rangle - 1 - \delta)p - r & 2r \\ 0 & p & -2r \end{bmatrix}$$

矩阵 J_0 的特征多项式为

$$M_0 = |\lambda E - J_0| = \lambda^3 + a_1 \lambda^2 + a_2 \lambda + a_3$$

其中, $a_1 = p + 3r - pC$; $a_2 = r(p + 2r) - 3prC$; $a_3 = -2pr^2C$ 。

(1) 当 $R_0 < 1$ 时, $C = \langle k \rangle - \delta - \frac{r}{p} < 0$ 。显然 $a_1 > 0, a_2 > 0, a_3 > 0$ 和 $a_1 a_2 - a_3 > 0$ 。根据 Routh-Hurwitz 稳定判据, 此时无病平衡点 E_0 是局部渐进稳定的。

(2) 当 $R_0 > 1$ 时, $C = \langle k \rangle - \delta - \frac{r}{p} > 0$ 。显然 $a_3 < 0$, 故矩阵 J_0 必有一个正特征值, 根据 Routh-Hurwitz 稳定判据, 此时无病平衡点 E_0 是不稳定的。

3.2 地方病平衡点的稳定性

定理 3: 系统的地方病平衡点 E^* 是局部渐进稳

定的。

证明:地方病平衡点 $E^* = (i^*, l_{\text{SI}}^*, l_{\text{II}}^*)$ 的雅可比矩阵 M^* 为

$$\begin{bmatrix} -r & p & 0 \\ \frac{r(r+\delta p)i}{p(1-i)} - \frac{r^2 i^2}{p(1-i)^2} & -p - \frac{4ri}{1-i} & 2r - \frac{2ri}{1-i} \\ \frac{r^2 i^2}{p(1-i)^2} & p + \frac{2ri}{1-i} & -2r \end{bmatrix}$$

矩阵 J^* 的特征多项式 $M^* = |\lambda E - J^*|$ 为:
 $M^* = \lambda^3 + b_1 \lambda^2 + b_2 \lambda + b_3$

其中

$$\begin{aligned} b_1 &= \frac{1}{1-i^*}[(3+i^*)r + (1-i^*)p] \\ b_2 &= \frac{pr}{(1-i^*)^2}[-Ai^{*2} + (\frac{3r}{p} - \delta)i^* + 1 + \frac{2r}{p}] = \\ &\quad \frac{pr}{(1-i^*)^2}X \\ b_3 &= \frac{2pr^2 i^*}{(1-i^*)^3}[A(i^* - 1)^2 + \frac{r}{p}] \end{aligned}$$

根据 i^* 满足方程(7),可得

$$X = (\frac{3r}{p} - \delta + B)i^* + 1 + \frac{2r}{p} + C$$

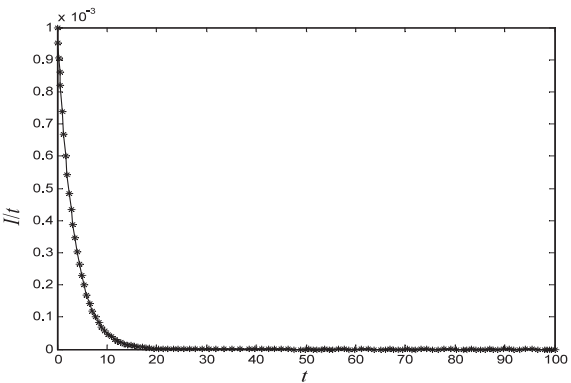
由于 $p, r \in (0,1)$ 和 $i^* \in (0,1]$,显然有 $b_1 > 0$, $b_3 > 0$ 。对于 $B + C = \delta - 1 - r/p$,有 $X = \frac{2r}{p}(1 + i^*) + (1 + C)(1 - i^*)$ 。当 $R_0 > 1$ 时, $C > 0$ 。从而 $X > 0$, 即 $b_2 > 0$ 。根据 Routh-Hurwitz 稳定判据,当 $b_1 b_2 - b_3 > 0$ 时,地方病平衡点 E_{lar}^* 是局部渐近稳定的。

4 数值仿真

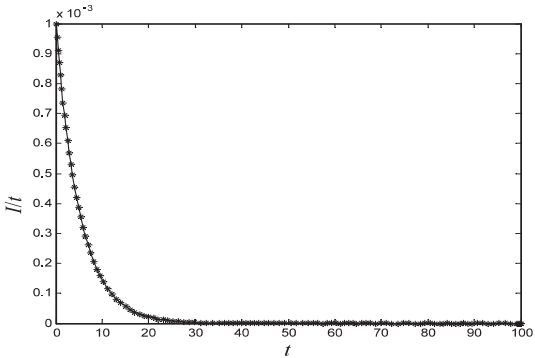
以上通过理论证明,在自适应重置概率与病毒传播率呈线性正相关的自适应网络 SIS 模型中,当系统的基本再生数 $R_0 < 1$,系统的无病平衡点局部渐进稳定;当 $R_0 > 1$,系统的无病平衡点是不稳定的,此时系统中存在惟一的地方病平衡点 E^* ,且 E^* 局部渐进稳定。以下通过仿真验证结论的正确性。

设网络节点总数 $N = 10^5$,网络中链接总数 $L = 10^6$,则网络节点平均度为 $\langle k \rangle = 20$,设恢复率 $r = 0.4$ 。对于 $\omega = \delta p$,令 $\delta = 0.5$,使 p 分别取 $(0.005, 0.01)$, $(0.1, 0.2)$,分别对应 $R_0 < 1, R_0 > 1$,数值仿真结果如图 1、图 2 所示。

由图 1 知,当 $p = 0.01$ 即 $R_0 < 1$ 时,系统中病毒渐渐消亡,系统存在无病平衡点,是不稳定的。由图 2 知,当 $p = 0.1$ 即 $R_0 > 1$ 时,系统不仅存在无病平衡点,还存在惟一的地方病平衡点,并渐进稳定于某个固定值,与理论分析一致。

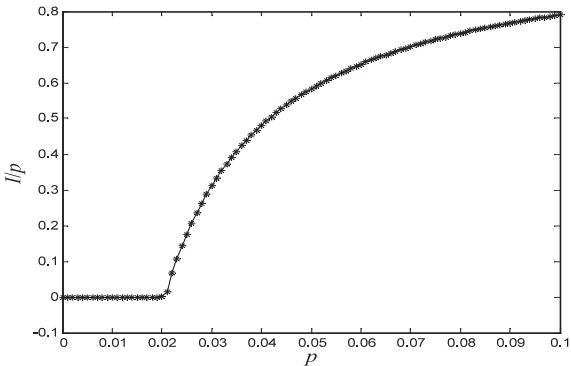


(a) $p = 0.005$

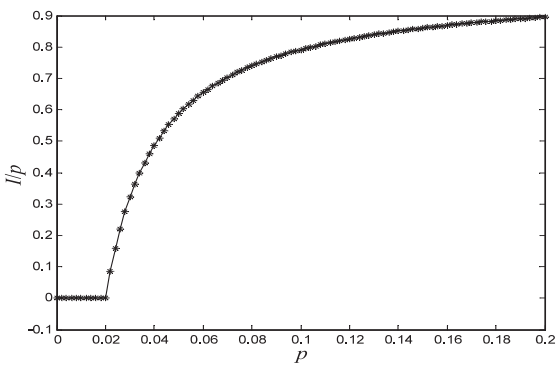


(b) $p = 0.01$

图 1 感染节点密度与时间关系图



(a) $p = 0.1$



(b) $p = 0.2$

图 2 感染节点密度与病毒传播率的关系图

5 结束语

文中建立了重置概率可变的自适应网络 SIS 病毒传播模型,用数学方法研究了系统的平衡点及其稳定

性。理论证明,在自适应重置概率与病毒传播率呈线性正相关的自适应网络 SIS 模型中,当系统的基本再生数 $R_0 < 1$,系统的无病平衡点局部渐进稳定,不存在地方病平衡点;当 $R_0 > 1$,系统不仅存在无病平衡点,还存在唯一的地方病平衡点,且局部渐进稳定。最后通过数值仿真验证了所得结论的正确性,对于研究网络节点自适应重置概率与病毒传播率的关系对网络中病毒传播的影响,具有较好的研究意义和参考价值。

参考文献:

- [1] Barrat A, Barthelemy M, Vespignani A. Dynamical processes on complex networks[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.
- [2] Kwon S, Kim Y. Epidemic spreading in annealed directed networks: susceptible – infected – susceptible model and contact process[J]. Physical Review E, 2013, 87(1): 012813.
- [3] Zhang H, Guan Z H, Li T, et al. A stochastic SIR epidemic on scale-free network with community structure[J]. Physical A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2013, 392(4): 974–981.
- [4] Hu Z, Teng Z, Jiang H. Stability analysis in a class of discrete SIRS epidemic models[J]. Nonlinear Analysis: Real World Applications, 2012, 13(5): 2017–2033.
- [5] Pastor-Satorras R, Vespignani A. Epidemic dynamics and endemic states in complex networks[J]. Physical Review E, 2001, 63(6): 066117.
- [6] Pastor-Satorras R, Vespignani A. Epidemic spreading in scale-free networks[J]. Physical Review Letters, 2001, 86(14): 3200–3203.
- [7] Pastor-Satorras R, Vespignani A. Epidemic dynamics in finite size scale-free networks[J]. Physical Review E, 2002, 65(3): 035108.
- [8] Gross T, Blasius B. Adaptive coevolutionary networks: a review[J]. J R Soc Interface, 2008, 5: 259–271.
- [9] Gross T, Lima C J D, Blasius B. Epidemic dynamics on an adaptive network[J]. Physical Review Letters, 2006, 96(20): 208701.
- [10] Shaw L B, Schwartz I B. Fluctuating epidemics on adaptive networks[J]. Phys Rev E, 2008, 77: 066101.
- [11] Shaw L B, Schwartz I B. Enhanced vaccine control of epidemics in adaptive networks[J]. Phys Rev E, 2010, 81: 046120.
- [12] Gross T, Kevrekidis I G. Robust oscillations in SIS epidemics on adaptive networks: coarse graining by automated moment closure[J]. Eur Lett, 2008, 82: 38004.
- [13] Lu Yanling, Jiang Guoping, Song Yurong. Stability and bifurcation of epidemic spreading on adaptive network[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(13): 13020.
- [14] Marceau V, Noel P A, Hebert-Dufresne L, et al. Adaptive networks: coevolution of disease and topology[J]. Phys Rev E, 2010, 82: 036116.
- [15] Taylor M, Taylor T, Kiss I Z. Epidemic threshold and control in a dynamic network[J]. Phys Rev E, 2012, 85: 016103.
- [16] Song Yurong, Jiang Guoping, Xu Jiagang. An epidemic spreading model in adaptive networks based on cellular automata[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60: 120509.
- [17] Lau J T F, Yang X, Tsui H Y, et al. Impacts of SARS on health-seeking behaviors in general population in Hong Kong[J]. Preventive Medicine, 2005, 41(2): 454–462.
- [18] Liu Tianyin. Study of influenza A(H1N1) spreading model on complex networks[J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(15): 222–224.
- [19] 孙践知, 刘乃瑞, 张迎新, 等. 机会网络典型路由算法性能分析[J]. 计算机工程, 2011, 37(16): 86–89.
- [10] 任智, 黄勇, 陈前斌. 机会网络路由协议[J]. 计算机应用, 2010, 30(3): 723–728.
- [11] Keranen A. Opportunistic network environment simulator[R]. Helsinki: Helsinki University of Technology, 2008.
- [12] 邱俊杰. 容迟网络路由技术研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- [13] Spyropoulos T, Psounis K, Raghavendra C S. Spray and wait: an efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks[C]//Proceedings of the 2005 ACM SIGCOMM workshop on delay-tolerant networking. [s. l.]: ACM, 2005: 252–259.
- [14] Broch J, Maltz D A, Johnson D B, et al. A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols[C]//Proceedings of the 4th annual ACM/IEEE international conference on mobile computing and networking. [s. l.]: IEEE, 1998: 85–97.
- [15] 杨炎. 延迟容忍网络路由算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.

(上接第 130 页)

second annual joint conference of the IEEE computer and communications. [s. l.]: IEEE, 2003: 825–835.

- [5] Eagle N, Pentland A. Reality mining: sensing complex social systems[J]. Personal and Ubiquitous Computing, 2006, 10(4): 255–268.
- [6] Diot C, Martin M, Erik N. Hagggle project[EB/OL]. 2004. <http://www.hagggleproject.org>.
- [7] Abdulla M, Simon R. Characteristics of common mobility models for opportunistic networks[C]//Proceedings of the 2nd ACM workshop on performance monitoring and measurement of heterogeneous wireless and wired networks. Chania: ACM, 2007: 105–109.
- [8] Thakur G S, Kumar U, Helmy A, et al. On the efficacy of mobility modeling for DTN evaluation: analysis of encounter statistics and spatio-temporal preferences[C]//Proc of 7th international conference on wireless communications and mobile computing. [s. l.]: IEEE, 2011: 510–515.
- [9] 孙践知, 刘乃瑞, 张迎新, 等. 机会网络典型路由算法性能

重置概率可变的自适应网络病毒传播研究

作者：

[田飞](#)，[陈翰雄](#)，[黄雅云](#)，[陈春玲](#)，[TIAN Fei](#)，[CHEN Han-xiong](#)，[HUANG Ya-yun](#)，[CHEN Chun-ling](#)

作者单位：

[田飞, 陈春玲, TIAN Fei, CHEN Chun-ling\(南京邮电大学 计算机学院, 江苏 南京, 210003\)](#)，[陈翰雄, 黄雅云, CHEN Han-xiong, HUANG Ya-yun\(南京邮电大学 通信与信息工程学院, 江苏 南京, 210003\)](#)

刊名：

[计算机技术与发展](#)

英文刊名：

[Computer Technology and Development](#)

年，卷(期)：

2015(10)

引用本文格式：[田飞](#). [陈翰雄](#). [黄雅云](#). [陈春玲](#). [TIAN Fei](#). [CHEN Han-xiong](#). [HUANG Ya-yun](#). [CHEN Chun-ling](#) [重置概率可变的自适应网络病毒传播研究](#)[期刊论文]-[计算机技术与发展](#) 2015(10)