

加权网络中改进的熟人免疫策略研究

胡如北^a, 蒋国平^b, 宋 波^c

(南京邮电大学 a. 计算机学院; b. 自动化学院; c. 通信与信息工程学院, 南京 210003)

摘 要: 在仅知道节点本地信息的情况下, 基于加权网络的特点, 提出一种边权优先的改进熟人免疫策略。借助经典的 SI 病毒传播模型, 考虑节点之间病毒传播概率的差异性, 在人工网络和真实网络中进行仿真分析, 结果表明, 在加权网络中, 边权优先的改进熟人免疫策略获得的免疫临界值比经典的熟人免疫策略低, 免疫效果好, 并且计算复杂度比目标免疫策略低, 所需的节点信息少。BBV 网络的优先连接特性越明显, 改进熟人免疫策略的效果越好。
关键词: 边权优先; 熟人免疫策略; BBV 网络; 病毒传播; SI 模型

中文引用格式: 胡如北, 蒋国平, 宋 波. 加权网络中改进的熟人免疫策略研究[J]. 计算机工程, 2016, 42(8): 91-95, 100.

英文引用格式: Hu Rubei, Jiang Guoping, Song Bo. Research on Improved Acquaintance Immunization Strategy in Weighted Network[J]. Computer Engineering, 2016, 42(8): 91-95, 100.

Research on Improved Acquaintance Immunization Strategy in Weighted Network

HU Rubei^a, JIANG Guoping^b, SONG Bo^c

(a. School of Computer Science and Technology; b. School of Automation;

c. School of Telecommunications & Information Engineering,

Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

【Abstract】 In the case of only knowing nodes local information, using the weighted networks' characteristics, this paper proposes an Improved Acquaintance Immunization strategy based on Weight-priority (IAI-WP). Using the classic susceptible-infected model and considering the difference of the viral spreading probability between different nodes, simulation results in artificial networks and real networks show that, in weighted networks, the immunization strategy gets lower density of infected individuals and has better effect than the classic acquaintance immunization. And the strategy needs lower computational complexity and less nodes information than the targeted immunization. Moreover, it is shown that the more obvious the preferential attachment in BBV network is, the better effect of IAI-WP is.

【Key words】 Weight-priority (WP); acquaintance immunization strategy; BBV network; virus spreading; SI model

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2016.08.017

1 概述

近年来, 复杂网络已经成为研究的热点, 对其研究也越来越深入。现实生活中的许多系统可以用复杂网络来描述, 如: 演员合作网, 电力交通网, Internet 网和食物链网^[1]。在研究过程中, 研究人员为方便研究, 把复杂网络简化成无权网络, 发现了复杂网络的小世界和无标度特性, 在此基础上提出各式各样经典的复杂网络模型, 如: ER 随机图^[2], WS 小世界模型^[3], BA 无标度网络^[4]。上述模型较好地体现出

复杂网络的一些特性, 但是只局限在无权网络的范畴。而在现实网络中, 很多网络是加权网络, 如: 在科学家合作网络中, 研究人员合作的密切程度不同, 城市交通网络中不同道路车辆流量也是不同的^[5]。在加权网络中, 节点之间的连边不仅代表节点之间有联系, 还可以表示出联系的紧密程度。随着对航空交通网络(WAN)、科学家合作网络(SCN)等实际网络研究的深入, 研究人员发现了这些网络的节点度、点权、边权都满足幂律分布^[6-8]。根据以上研究, Barrat 等人于 2004 年提出 BBV 网络模型^[9], 由于

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61374180, 61373136); 教育部人文社会科学研究计划基金资助项目(12YJAZH120); 江苏省“六大人才高峰”基金资助项目(RLD201212)。

作者简介: 胡如北(1990-), 男, 硕士研究生, 主研方向为网络安全、复杂网络传播动力学; 蒋国平, 教授、博士生导师; 宋 波, 博士研究生。

收稿日期: 2015-08-19 **修回日期:** 2015-09-23 **E-mail:** 15951935731@139.com

BBV 网络模型和现实网络系统特性吻合的较好,成为加权网络研究中常用的网络模型。本文的研究将建立在 BBV 网络模型上。

复杂网络中病毒传播也成为研究人员的关注热点,现实生活中一些致命性病毒的传播给社会带来很大的恐慌和巨大的经济损失,如:2003 年的 SARS 病毒,2015 年的 MERS 病毒。深入对复杂网络中病毒传播的研究,对现实世界中生物病毒以至于网络病毒的免疫和预防,甚至是谣言的监管和防控具有重要的意义。科研人员在分析病毒传播原理和研究其传播动力学时,借助经典的 SI, SIS 和 SIR 病毒传播模型^[10],提出一些积极有效的免疫策略。经典的免疫策略有随机免疫、目标免疫和熟人免疫^[11]。随机免疫是随机从网络中选取一定数量的节点免疫,对所有的节点无差别对待,无论节点度的大小。这种免疫策略在均匀网络中效果较好,在无标度网络中效果不佳。熟人免疫则是随机选取一些节点,然后随机选取它们的一个邻居节点进行免疫。熟人免疫适用于无标度网络,不需要知道任何节点的信息,达到了良好的免疫效果。目标免疫是建立在知晓网络全局信息的基础上,免疫网络一部分度大的节点,此免疫策略在无标度网络上效果最好。随着研究的深入,研究人员还提出了局域控制^[12]、双熟人免疫^[13]、基于覆盖的免疫^[14]、考虑交通流量的改进熟人免疫^[15]等免疫策略。

无权网络中的病毒免疫策略也可以推广运用到加权网络中,同时针对加权网络中节点具有边权的特点,研究人员提出了基于边权的重连策略^[16]、边权弱化免疫^[17]、边介数优先目标免疫^[18]等免疫策略。边权弱化免疫的思想就是降低所选取目标节点的边权值,通过降低边权来遏制病毒传播的速度。弱化免疫无需删除节点,保证了网络的连通性和较高网络连通效率的同时也有效遏制了病毒的传播。边介数优先目标免疫是通过删除介数最大的一些边把网络分割成孤立网络,从而达到阻断病毒传播的目的。此免疫策略的缺点是需要知道全局信息,并且每删除一条边需要重新计算网络中所有边的介数,计算复杂度较高。

加权网络中节点具有权值,权值的大小表示节点之间联系的紧密。根据此特点,基于熟人免疫^[11]的思想,本文提出边权优先的改进熟人免疫策略(Improved Acquaintance Immunization based on Weight-priority, IAI-WP),即从随机从网络中选取节点,然后选取节点权值最大的一条边相连的节点进行免疫。此免疫策略只需要所选取节点的本地信息,无需知道邻居节点的信息。

2 网络构造实验步骤

2.1 BBV 加权网络模型

该网络模型的度分布、点权分布和边权分布呈现幂律分布的特征,度分布和点权分布正相关。

BBV 加权无标度网络模型的构造算法步骤如下^[19]:

(1) 初始 N_0 全连通的种子节点,网络生长,并赋每条边的权值为 w_0 。

(2) 每步增加一个节点,且每步增加的节点发出 $m(m \leq N_0)$ 条边,按照点权优先原则连接到已有的节点 i 。新节点连接到某个已存在节点 i 的偏好性概率为 $\Pi_{\text{new} \rightarrow i} = \frac{s_i}{\sum_j s_j}$,其中, s_i 表示与节点 i 相连所有边的

权重的总和,即点权; $\{j\}$ 代表所要连接点的集合。

(3) 每条新边的权重为 w_0 ,且新边会引起网络权重的变化:新节点连接到节点 i 会使节点 i 的点强度增加一个常量参数 δ ,节点 i 的点强度变为 $s_i = s_i + w_0 + \delta$ 。

(4) 增加的小量 δ 按如下的规则分配到 i 节点的其他边上: $w_{ij} \rightarrow w_{ij} + \Delta w_{ij}$, $\Delta w_{ij} = \delta \frac{w_{ij}}{s_i}$ 。

(5) 重复以上步骤,直到网络节点总数达到 N 个。

常量参数 δ 表示新接入节点对原有节点的增幅效果。 $\delta < 1$ 的典型场景是科学家合作网络中一个新的合作关系的产生,不会导致研究人员之前合作更加的频繁; $\delta \approx 1$ 常见的是交通网络,新加入的节点可以给原有的枢纽节点带来相应的交通流量; $\delta > 1$ 是一种极端情况,意味着新节点给其相连接的原有节点的流量带来倍增效果。通过改变 δ 的大小可以调整网络的结构,得到不同属性的网络^[9]。

2.2 边权优先的改进熟人免疫策略

熟人免疫(acquaintance immunization)是典型的分散式免疫(discentralized immunization),选取的免疫节点分散在网络各处。其基本思想如下:从 N 个节点中随机选取比例为 p 的节点,再从每一个被选出的节点中随机选择一个邻居节点进行免疫。此免疫策略只需要知道随机选择出来的节点以及它们相连的邻居节点,无需知道节点的度的大小和网络的全局信息。由于在无标度网络中,度大的节点意味着有许多节点与其相连;若随机选取一个节点,再选择其邻居节点时,度大的节点比度小的节点被选中的概率大得多,因此熟人免疫比随机免疫的效果好很多^[20]。

当网络中某一结点被感染时,与其联系紧密的邻居节点被感染的概率大于那些联系不密切的邻居节点,这个是与实际相符合的。加权网络中节点具

有边权值,在获取节点本地信息时,不仅可以知道节点的度,还可以知道节点与其邻居节点连接的紧密程度。借助此信息,本文提出边权优先的改进熟人免疫策略,具体步骤如下:

(1) 随机从网络中选取一个节点 i ,判断此节点 i 是否为孤立节点,假如否,则选取此节点 i ,假如是,则重新从网络中随机选取节点。

(2) 选取步骤(1)中得到的节点 i 所有边中权值最大的边相连的节点 j 进行免疫,即 $w_{ij} = \max\{w_{ik}\}$,其中, w_{ij} 表示节点 i 与节点 j 连边的边权; $\{k\}$ 表示与节点 i 相连的节点的集合。

(3) 重复步骤(1)、步骤(2),直到免疫的节点数达到目标数量。

本文提出的改进熟人免疫策略仅需要知道被选中节点所有边的权值,相对目标免疫等其他免疫策略而言,需要的信息较少。并且此策略和经典的熟人免疫策略一样,计算复杂度也相当小,无需大量的计算。除此之外,此策略也适合在真实网络中实际运用,实施步骤简单,可操作性强。

3 实验与结果分析

本文选取的人工网络是 BBV 网络,真实网络是科学家合作网络和北美航空网络。加权网络中被感染的节点的点权越大,此节点越危险。假如想保护网络,应该第一时间免疫网络中点权较大的节点,故本文的目标免疫是点权优先的目标免疫。本文使用 SI 病毒传播模型,网络中节点状态分为 2 种: S (Susceptible)为易染状态, I (Infected)为感染状态。本文中病毒传播的概率为 $\lambda_{ij} = \left(\frac{w_{ij}}{w_M}\right)^\alpha$, $\alpha = 0.5$,其中, w_{ij} 为节点 i 和节点 j 之间的边权值; w_M 为网络中最大的边权值; α 表示病毒的传染能力, α 越小代表病毒传播能力越强^[21]。实验设定的运行时间 T 为 100,进行 500 次仿真求平均值作为最后的感染节点的密度值。

3.1 在人工网络上的仿真结果

3.1.1 在 BBV 网络上的仿真结果

本文建立 3 个 BBV 网络, $N = 2\ 000$, $N_0 = 3$, $m = 3$, δ 分别为 0.5,1.0 和 3.0。主要参数如表 1 所示,其中, $\langle k \rangle$ 表示平均度; $k_{\max}$ 表示度最大值; $S_{\max}$ 表示点权最大值; $W_{\max}$ 表示边权最大值。

表 1 3 个 BBV 网络的主要参数对比

δ	$\langle k \rangle$	$K_{\max}$	$S_{\max}$	$W_{\max}$
0.5	5.994 0	235	455.011 6	13.540 5
1.0	5.994 0	342	1 011.300 0	54.929 3
3.0	5.994 0	662	4 798.700 0	892.561 5

分别在 3 个网络上实施熟人免疫、IAI-WP 和目标免疫,仿真结果如图 1 所示。从图 1 中可以看出,与经典的熟人免疫相比,IAI-WP 可以取得更好的免疫效果,病毒的免疫临界值相对低。BBV 网络中度大的节点与很多小节点相连,实施熟人免疫随机选取种子节点的邻居节点时有很大概率可以选取到度大的节点,由于度和点权呈正比关系,也是选取到点权较大的节点。BBV 网络中权值大的边对应节点的点权相应大,实施 IAI-WP 一定可以选取到种子节点的邻居中点权大的节点。IAI-WP 相对熟人免疫可以免疫到点权更大的节点,把网络分割成小网络,从而得到很好的免疫效果。

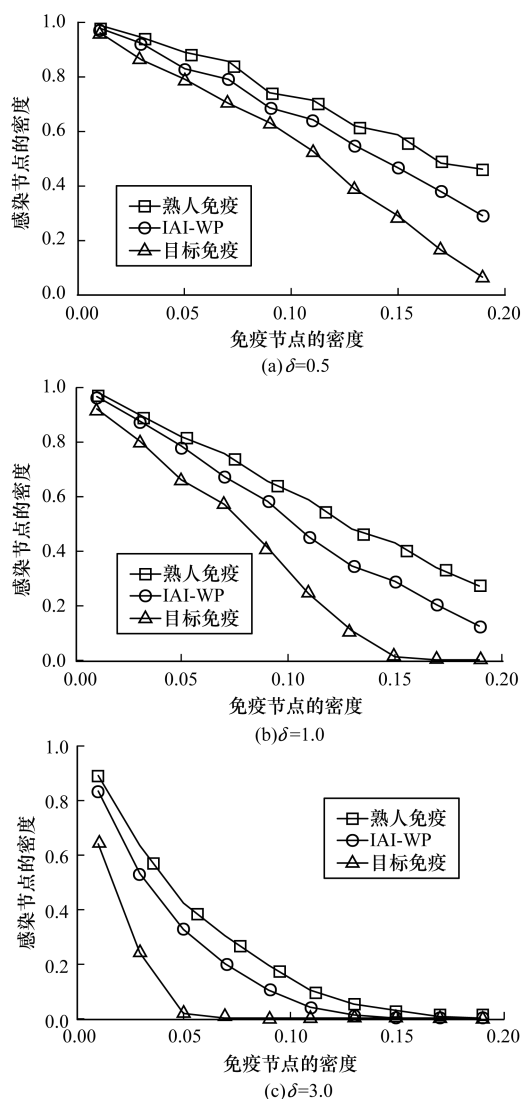


图 1 3 种免疫策略的效果对比

本文统计了 IAI-WP 和熟人免疫选取节点的点权值之和,如图 2 所示,与熟人免疫相比,IAI-WP 免疫到节点的点权值之和相对较大,验证了本文的上述猜想。

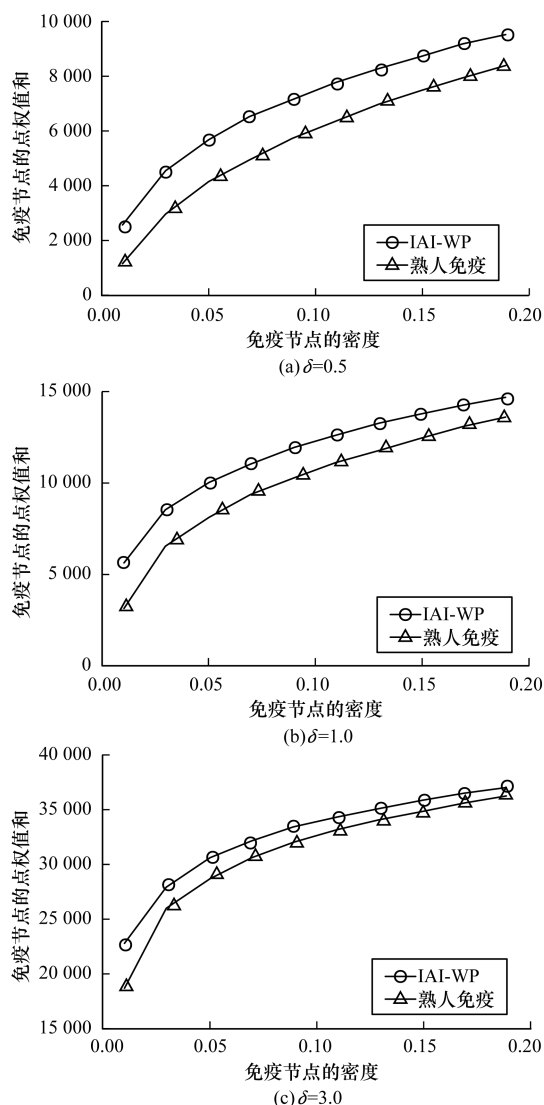


图2 不同免疫策略选取节点的点权值之和

3.1.2 对边权优先的改进熟人免疫策略影响

从表1可以看出, BBV 网络中 δ 越大, 优先连接特性越明显, 生成网络的边权值越分散, 网络中也越容易出现超级节点, 即点权很大的节点, 这是由于网络生成过程中新加入节点更倾向于点权大的节点相连。从图3可以看出, δ 越大, IAI-WP 的效果越好, 感染节点的密度下降越快。

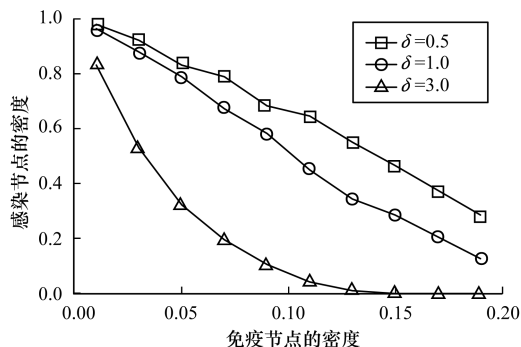


图3 不同网络结构下 IAI-WP 的效果对比

上述结果主要原因是 δ 越大, $W_{\max}$ 越大, 从而节点之间病毒传播概率降低, 病毒传播速度变慢。另外, IAI-WP 可以免疫到分散在网络中点权大的节点, 把网络分割成孤立节点和孤立网络, 有效降低节点的感染密度。

3.2 在真实网络上的仿真结果

3.2.1 在科学家合作网络上的仿真结果

Newman 在 2006 年统计了 1 589 位科学家之间的加权合作网^[22-23], 本文从 1 589 个节点中选取具有 379 个节点的最大连通片。最大连通片网络的度分布、点权分布、度-点权关系和边权分布如图4所示, 科学家合作网络中度、点权和边权呈幂律分布, 点权出现明显的重尾现象, 度分布具有垂头的现象, 故可以看出科学家合作网络是无标度网络。在此网络上分别实施熟人免疫、IAI-WP 和目标免疫, 图5表明, 在科学家合作网络中, 相对熟人免疫, IAI-WP 可以获得更低的免疫临界值, 取得更好的免疫效果, 验证了此免疫策略的有效性。

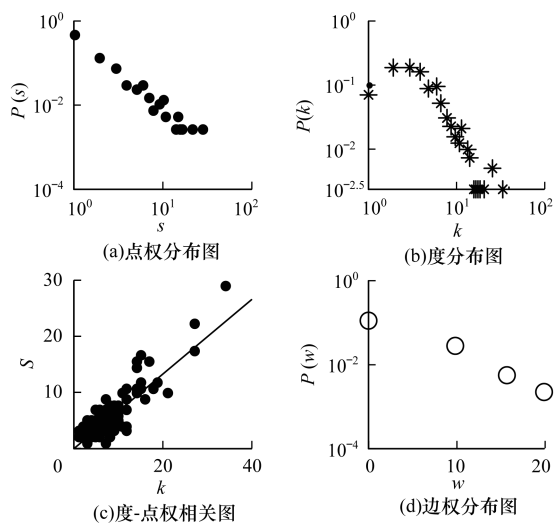


图4 科学家合作网络的特性图

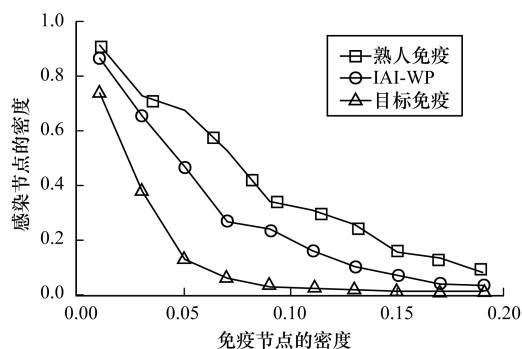


图5 科学家合作网络中3种免疫策略的效果对比

3.2.2 在北美航空网络上的仿真结果

本文的航空网络是北美航空网络^[24], 共有 332 个节点。其相关特性如图6所示, 可以看出网络

的无标度特征,度、点权和边权呈幂律分布,度和点权有正相关关系,点权和度的重尾现象比较明显。在此网络上分别实施熟人免疫、IAI-WP 和目标免疫,最后的效果比较如图 7 所示,IAI-WP 相对经典的熟人免疫取得较低的免疫临界值。当此网络中免疫节点的密度很低时,IAI-WP 和目标免疫的效果差不多,这是因为免疫节点较少,网络连通性被破坏的程度相当。当免疫节点密度增多时,可以看出免疫效果的差距。

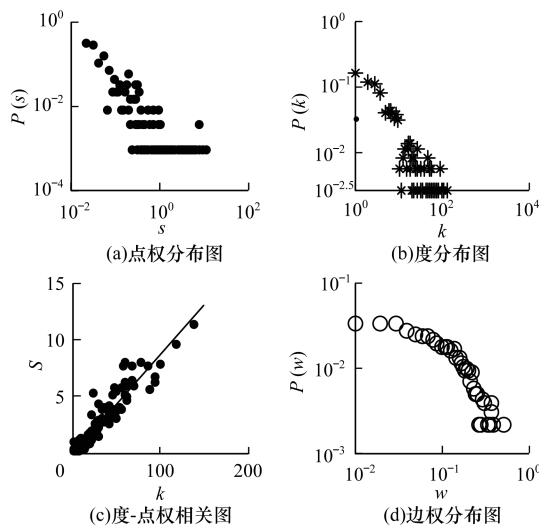


图6 北美航空网络的特性对比

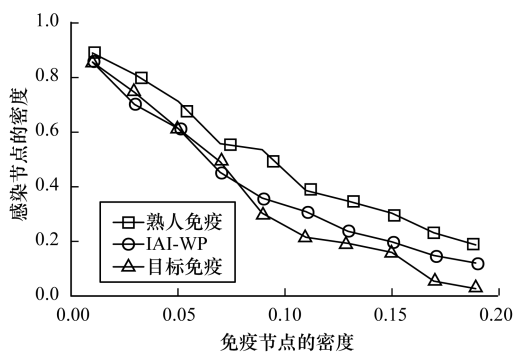


图7 北美航空网络中3种免疫策略的效果对比

4 结束语

本文提出适用于加权网络边权优先的改进熟人免疫策略(IAI-WP)。加权网络具有边权,边权不仅代表节点之间有联系,还可以表示联系的紧密程度,在熟人免疫的基础上,获取网络中随机选取的节点的本地信息,比较各边的边权、免疫边权值最大的一边的节点。在BBV网络、科学家合作网络和北美航空网络上的仿真实验结果表明,相比熟人免疫,IAI-WP 获得更低比例的感染节点,取得了更好的免疫效果,并且比目标免疫所需信息少,计算复杂度更低。另外,网络的优先连接特性越明显,IAI-WP 取得的

效果越好。本文提出的免疫策略的可实施性强,操作简单,可在现实网络中运用。

本文为加权网络中病毒传播的抑制提供了思路,可以扩展到社交网络中谣言的控制。基于加权网络的特性,下一步将研究在仅获得节点本地信息的情况下,结合深度优先搜索的改进熟人免疫策略,并探究此方法的有效性以及免疫效果。

参考文献

- [1] Newman M E J. The Structure and Function of Complex Networks[J]. SIAM Review, 2003, 45(2): 167-256.
- [2] Erdős P, Rózi A. On Random Graphs I[J]. Publicationes Mathematicae Debrecen, 1959, 6: 290-297.
- [3] Watts D J, Strogatz S H. Collective Dynamics of 'Small-world' Networks[J]. Nature, 1998, 393(6684): 440-442.
- [4] Barabási A L, Albert R. Emergence of Scaling in Random Networks[J]. Science, 1999, 286(5439): 509-512.
- [5] 刘珊, 晏先浩, 王仲君. 点权有限的加权网络演化模型[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2007, 4(3): 59-65.
- [6] Barrat A, Barthélemy M, Pastor-Satorras R, et al. The Architecture of Complex Weighted Networks[J]. Proceedings of National Academy of Sciences of the United States of America, 2004, 101(11): 3747-3752.
- [7] Li Wei, Cai Xu. Statistical Analysis of Airport Network of China[J]. Physical Review E, 2003, 69(4).
- [8] Newman M E J. Clustering and Preferential Attachment in Growing Networks[J]. Physical Review E, 2001, 64(2).
- [9] Barrat A, Barthélemy M, Vespignani A. Weighted Evolving Networks: Coupling Topology and Weight Dynamics[J]. Physical Review Letters, 2004, 92(22).
- [10] Pastor-Satorras R, Vespignani A. Epidemics and Immunization in Scale-free Networks[J]. Physical Review Letters, 2001, 86(14).
- [11] Cohen R, Havlin S, Ben-Avraham D. Efficient Immunization Strategies for Computer Networks and Populations[J]. Physical Review Letters, 2003, 91(24).
- [12] 许丹, 李翔, 汪小帆. 复杂网络病毒传播的局域控制研究[J]. 物理学报, 2007, 56(3): 1313-1317.
- [13] Gallos L K, Liljeros F, Argyrakis P, et al. Improving Immunization Strategies[J]. Physical Review E, 2007, 75(4).
- [14] Echenique P, Gómez-Gardeñes J, Moreno Y, et al. Distanced Covering Problems in Scale-free Networks with Degree Correlations[J]. Physical Review E, 2005, 71(3).
- [15] 王亚奇, 蒋国平. 考虑网络流量的无标度网络病毒免疫策略研究[J]. 物理学报, 2011, 60(6): 6-13.
- [16] Song Bo, Jiang Guoping, Song Yurong. Epidemic Dynamics in Weighted Adaptive Networks[C]// Proceedings of the 9th International Conference on Parallel, Grid, Cloud and Internet Computing. Guangzhou, China: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2014: 69-73.
- [17] 田思, 李慧嘉, 赵岳. 复杂网络中的弱化免疫策略分析[J]. 计算机应用, 2012, 32(9): 2620-2623.

(下转第100页)

参考文献

- [1] Sahai A, Waters B. Fuzzy Identity-based Encryption[C]//Proceedings of Advances in Cryptology-EUROCRYPT'05. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2005:457-473.
- [2] Goyal V, Pandey O, Sahai A, et al. Attribute-based Encryption for Fine-grained Access Control of Encrypted Data[C]//Proceedings of the 13th ACM Conference on Computer and Communications Security. New York, USA: ACM Press, 2006:89-98.
- [3] Bethencourt J, Sahai A, Waters B. Ciphertext-policy Attribute-based Encryption [C]//Proceedings of 2007 IEEE Symposium on Security and Privacy. Washington D.C., USA: IEEE Computer Society, 2007:321-334.
- [4] 邓宇乔. 基于动态属性的加密方案[J]. 计算机工程, 2014, 40(4):136-140.
- [5] Hinek J, Jiang S, Safavi R, et al. Attribute-based Encryption with Key Cloning Protection[J]. Bulletin of the Korean Mathematical Society, 2008(4):803-819.
- [6] Yu Shucheng, Ren Kui, Lou Wenjing, et al. Defending Against Key Abuse Attacks in KP-ABE Enabled Broadcast Systems[C]//Proceedings of Conference on Security and Privacy in Communication Networks. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2009:311-329.
- [7] Li Jin, Ren Kui, Zhu Bo, et al. Privacy-aware Attribute-based Encryption with User Accountability [C]//Proceedings of Information Security Conference. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2009:347-362.
- [8] Wang Yongtao, Chen Kefei, Chen Jianhong. Attribute-based Traitor Tracing[J]. Journal of Information Science and Engineering, 2011, 27(1):181-195.
- [9] Ostrovsky R, Sahai A, Waters B. Attribute Based Encryption with Non-monotonic Access Structures[C]//Proceedings of the 14th ACM Conference on Computer and Communication Security. New York, USA: ACM Press, 2007:195-203.
- [10] 马海英, 曾国荪. 可追踪并撤销叛徒的属性基加密方案[J]. 计算机学报, 2012, 35(9):1845-1855.
- [11] Emura K, Miyaji A, Nomura A, et al. A Ciphertext-policy Attribute-based Encryption Scheme with Constant Ciphertext Length [C]//Proceedings of Conference on Information Security Practice and Experience. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2009:13-23.
- [12] Chen Cheng, Zhang Zhenfeng, Feng Dengguo. Efficient Ciphertext Policy Attribute-based Encryption with Constant-size Ciphertext and Constant Computation-cost [C]//Proceedings of Conference on Provable Security. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2011:84-101.
- [13] Herranz J, Laguillaumie F, Ràfols C. Constant Size Ciphertexts in Threshold Attribute-based Encryption [C]//Proceedings of PKC'10. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2010:19-34.
- [14] Attrapadung N, Libert B, de Panafieu E. Expressive Key-policy Attribute-based Encryption with Constant-size Ciphertexts [C]//Proceedings of PKC'11. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2011:90-108.
- [15] Hohenberger S, Waters B. Attribute-based Encryption with Fast Decryption [C]//Proceedings of Public-key Cryptography-PKC'13. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2013:162-179.
- [16] Naor D, Naor M, Lotspiech J. Revocation and Tracing Schemes for Stateless Receivers [C]//Proceedings of Advances in Cryptology-Crypto'01. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2001:41-62.
- [17] Boneh D, Franklin M. Identity-based Encryption from the Weil Pairing [C]//Proceedings of Advances in Cryptology-Crypto'01. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2001:213-229.
- [18] Beimel A. Secure Schemes for Secret Sharing and Key Distribution [D]. Haifa, Israel: Israel Institute of Technology, 1996.
- [19] Dan B, Xavier B, Euijin G. Hierarchical Identity Based Encryption with Constant Size Ciphertext [C]//Proceedings of Advances in Cryptology-Eurocrypt'05. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2005:440-456.
- [20] Waters B. Dual System Encryption: Realizing Fully Secure IBE and HIBE Under Simple Assumptions [C]//Proceedings of Advances in Cryptology-Crypto'09. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2009:619-636.

编辑 索书志

(上接第95页)

- [18] 李天华, 邹艳丽, 唐贤健, 等. 加权无标度网络的免疫策略研究[J]. 计算机工程, 2010, 36(22):158-160.
- [19] 苏义鑫, 廉城. 基于加权 BBV 网络的手机短信息传播研究[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(2):322-326.
- [20] 汪小帆, 李翔, 陈关荣. 网络科学导论 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2012.
- [21] Yan Gang, Zhou Tao, Wang Jie, et al. Epidemic Spread in Weighted Scale-free Networks [J]. Chinese Physics Letters, 2005, 22(2):510-513.
- [22] Newman M E J. The Structure of Scientific Collaboration Networks [J]. Proceedings of National Academy of Sciences of the United States of America, 2001, 98(2):404-409.
- [23] Newman M E J. Finding Community Structure in Networks Using the Eigenvectors of Matrices [J]. Physical Review E, 2006, 74(3).
- [24] Batagelj V, Mrvar A. Pajek Datasets [EB/OL]. [2015-08-15]. <http://vlado.fmf.uni-lj.si/pub/networks/data/> > .

编辑 索书志