



MAC 机制下的无线自组织网络病毒传播特性

徐巧玉, 张超琦, 蒋路茸

(浙江理工大学信息学院, 杭州 310018)

摘 要: 为了深入研究病毒在具有 MAC 机制且拓扑不同的无线自组织网络中的传播特性, 采用基于拓扑特征的病毒传播模型, 分别对节点数量为 2000 的随机网络、无标度网络、LEACH 网络中有或无 MAC 机制时的病毒传播特性进行了仿真和分析。结果表明: MAC 机制能够抑制无线自组织网络中病毒传播的速度和规模; 当网络拓扑不同时, 其 MAC 机制的抑制强度也会不同, 相比较而言, 簇团结构最不利于 MAC 机制抑制作用的发挥; 在相同网络环境下, 无标度网络的安全性最好, LEACH 网络的安全性最差。研究结果对无线自组织网络中病毒传播的防范具有指导意义。

关键词: 病毒传播; MAC 机制; 随机网络; 无标度网络; LEACH 协议

中图分类号: TP309.5

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2020)03-0216-08

Research on spreading characteristics of mobile ad hoc network virus under MAC mechanism

XU Qiaoyu, ZHANG Chaoqi, JIANG Lurong

(School of Informatics Science and Technology, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to further study the spreading characteristics of viruses in mobile ad hoc networks with MAC mechanisms and different topologies, a virus spreading model based on topological characteristics was adopted to simulate and analyze the spreading characteristics of viruses in random network with the node number of 2000, scale-free network and LEACH network with or without MAC mechanism. The results show that MAC mechanism can inhibit the speed and scale of virus spreading in mobile ad hoc networks. The suppression intensity of MAC mechanism is different with various network topologies. Comparatively speaking, the cluster structure in the network is the most detrimental to the MAC mechanism inhibition. With the same network environment, scale-free network has the best security, and LEACH network has the worst security. The research results have guiding significance for the prevention of virus transmission in mobile ad hoc networks.

Key words: virus spreading; MAC mechanism; random network; scale-free network; LEACH protocol

0 引 言

无线自组织网络是一种由众多节点组成、采用无线通信方式、动态自主组网的多跳网络^[1]。无线自组织网络因其不需要固定的基础设施和灵活性强

等特点,被认为是一种有前途的无线网络^[2]。但是,由于无线信道的开放性、单个设备计算性能较低等原因,无线自组织网络易受病毒攻击^[3]。通过网络途径传播的计算机病毒(Computer virus,简称网络病毒),是一种能够破坏网络功能或者数据的恶意程

收稿日期:2019-09-02 网络出版日期:2019-12-03

基金项目:国家自然科学基金项目(61602417);浙江省重点研究开发计划(2015C03023);浙江理工大学“521 人才培养计划中青年骨干人才”计划

作者简介:徐巧玉(1994-),女,浙江杭州人,硕士研究生,主要从事网络病毒方面的研究。

通信作者:蒋路茸, E-mail:jianglurong@zstu.edu.cn

序,具有传播性、隐蔽性、感染性、潜伏性、可激发性、表现性和破坏性等特点。

随着物联网的普及,无线自组织网络作为物联网的重要实现载体,已广泛应用于城市规划、医疗监护、环境监测、智能家居、军事通信等诸多领域,成为人类社会不可或缺的一部分^[4]。无线网络迅速发展的同时,网络病毒也在不断进行技术“进化”,使得网络病毒的破坏性不断增强。大规模的病毒感染事件时有发生,产生的损失难以计量;2007年,短短的两个多月内“熊猫烧香”病毒不断入侵个人电脑,给上百万个人用户、网吧及企业局域网用户带来无法估量的损失^[5];2017年5月Wannacry勒索病毒爆发,全球近百个国家的网络遭受攻击,多家服务机构出现业务中断和数据丢失情况^[6];2018年8月,台积电部分计算机和设备感染了WannaCry病毒,使得生产线停止运作,造成了巨大的经济损失^[7]。目前,网络病毒已成为信息化社会的一大毒瘤,时刻威胁着人类的生产、生活安全。而且,无线自组织网络节点具有信道开放、单节点计算能力较弱、能量有限的特点,使得其对病毒威胁比传统的有线网络更为脆弱^[8]。因此,有必要对无线自组织网络中病毒传播现象及其规律进行深入研究。

关于无线自组织网络中的病毒传播规律的研究已有较多成果。例如Upadhyay等^[9]提出了一种电子流行病毒的SITR模型,分析了cyrtoid类型功能响应的无线自组织网络中蠕虫的攻击行为。Liu等^[10]考虑到信道干扰和动态链接,在扩展模式和通信模式下研究了移动性对无线自组织网络中恶性软件传播的影响。胡笑梅等^[11]针对病毒具有潜伏期的特性,研究了一类具有时滞的SIRSA网络病毒传播模型,分析得到了局部Hopf分支的时滞临界点。现有的无线自组织网络病毒传播研究成果适用范围较小,其研究结果仅适用于某种特定的网络结构下的病毒传播研究,通用性不强。

随着研究的不断深入,人们发现网络病毒的传播受媒体访问控制机制(Media access control, MAC机制)的影响。MAC机制是一种常见的无线网络通信机制,能够合理分配信道资源,有效处理信道争端问题^[12]。张永棠^[13]认为Random-MAC能有效地降低病毒繁殖速度,间接降低病毒传播速度。Shakya等^[14]在网络节点具有节点空间相关性和MAC机制的网络中研究病毒传播时,发现MAC机制能够抑制网络病毒传播。庄克琛等^[15]认为,MAC机制中不同的休眠/监听时间占空比会对网

络病毒传播速度和规模造成不同程度的影响,休眠/监听时间的占空比越小,病毒传播受到的抑制效果越强烈。然而,现有的关于通信机制影响的无线自组织网络病毒传播研究相对较少,且研究的网络拓扑相对单一。

为了更深入更全面地了解MAC机制对病毒传播的影响,本文使用基于拓扑特性的SIR模型,研究病毒在具有MAC机制的随机网络、无标度网络、LEACH(Low-energy adaptive clustering hierarchy)网络三种无线自组织网络中的传播过程,对比分析三种网络环境下的病毒传播规律,了解不同拓扑环境下MAC机制对病毒传播的影响强度以及作用机制。除此之外,本文还对比了有或无MAC机制情况下的病毒传播过程,以验证MAC机制影响病毒传播这一结论。

1 网络环境

1.1 MAC机制

MAC机制应用于数据链路层,在无线自组织网络中主要用以解决网络信道争端、分配信道使用权和通信资源等问题^[16],其通信失败原理示意图如图1所示。当没有使用MAC机制作用时,计算机A就不会事先确认信道是否繁忙,而是直接向计算机B传输数据。在使用了MAC机制作用后,计算机A在数据传播之前需要监听信道,如果目标计算机B空闲,那么此时计算机A就可以向目标计算机B传输数据;如果此时信道已经被其他计算机使用并正在传输数据,则计算机A发送的数据将被繁忙的信道所淹没,目标计算机将无法收取数据。网络病毒在传输过程中像其他常规数据一样受到MAC机制的限制。因此,本文针对无线自组织网络中的病毒数据传播研究时,充分考虑了在MAC机制下的病毒传播规律。

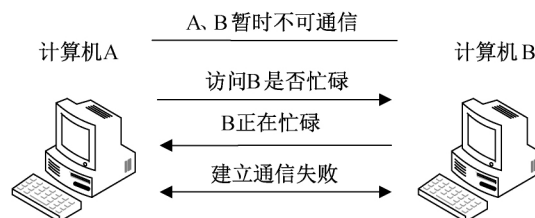


图1 MAC机制通信失败原理示意图

1.2 网络拓扑模型

网络拓扑是指传输媒体连接各种设备的方式,它决定整个网络的物理布局。通常情况下,网络拓扑满足幂律分布,具有层次性和局部节点度很大等特点^[17]。网络模型取决于网络拓扑,网络拓扑不同

则网络模型也不一样。本文针对随机网络、无标度网络和 LEACH 网络^[18]三个网络模型进行仿真和分析。

1.2.1 随机网络

随机网络又称随机图,是任意两个节点之间以随机连接概率 p_e ($0 < p_e < 1$) 进行连接的网络模型。假定随机网络中有 30 个节点,节点间的随机连接概率 $p_e=0.1$,则该网络的拓扑结构如图 2 所示。随机网络具有节点度分布较为集中的特性^[19],其中任意一个节点所连接的相邻节点数量为该节点的节点度 k ,网络中所有节点的节点度数学期望值为网络平均度 $\langle k \rangle$ 。随机网络节点度高度集中于网络平均度附近,且网络平均度 $\langle k \rangle$ 呈现泊松分布的特性,满足 $\langle k \rangle = N \times p_e$,其中 N 为节点总数。对随机网络的节点度分布进行研究,拥有 2000 个节点的随机网络节点度分布如图 3 所示,其中节点度分布高度集中于 $\langle k \rangle = 8$ 附近。因此,在进行随机网络病毒传播研究时,设定网络平均度 $\langle k \rangle$ 为 8。

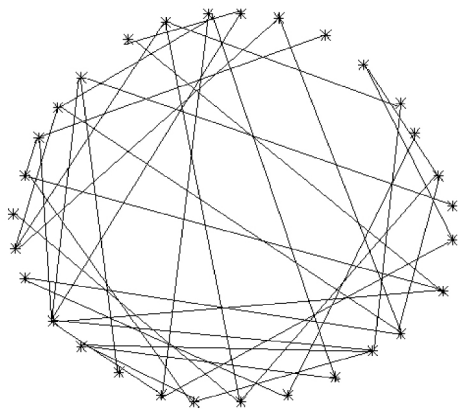


图2 随机网络拓扑示意图

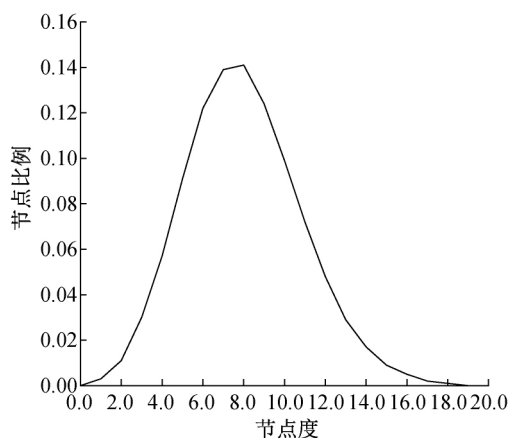


图3 随机网络节点度分布示意图

1.2.2 无标度网络

无标度网络是指节点的度分布服从或接近幂律分布的一种网络^[20]。无标度网络具有严重的异质

性,即网络的节点度分布呈现无标度特性,极少数节点拥有较多的连接边,而大多数节点只有很少量的连接边^[21]。无标度网络的生成规则为:在一个具有 m_0 个节点的小规模全连接初始网络中,根据择优连接原则不断加入新的节点,每次向网络新增 m 个节点,新增的节点以较大概率与原先网络中具有较高度的节点相连接^[20]。无标度网络拓扑结构如图 4 所示,该网络为拥有 4 个初始节点的全面连接网络,通过每次新增 2 个节点,最终形成 28 个节点规模的无标度网络。

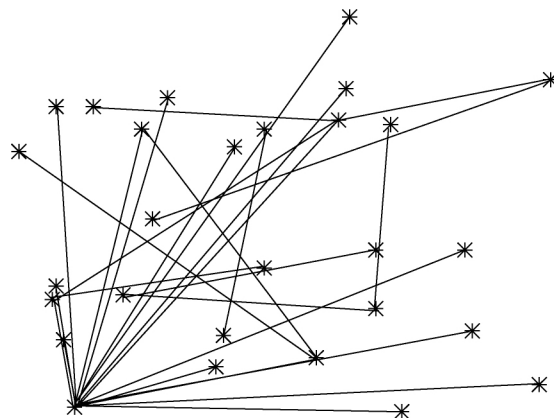


图4 无标度网络拓扑示意图

1.2.3 LEACH 网络

LEACH 是一种在无线网络中应用较为广泛的基于能量均衡策略的层次化拓扑生成算法^[22]。根据 LEACH 算法生成网络拓扑时,首先需要选举生成簇头,簇头选举成功后,非簇头节点会自动依附簇头节点行成不同的簇。每个簇中只允许存在一个簇头节点和多个簇成员。簇形成的具体过程如下:

a) 选举簇头。设网络中编号为 n 的节点被选为簇头的概率阈值为 $T(n)$ 。在第 r 轮选举簇头阶段,节点 n 会发出自身选举信号,并随机生成一个 $0 \sim 1$ 之间的随机数 x 。如果 $x < T(n)$,则节点 n 将会成为簇头,并且标上簇头序号 X (即簇组号);如果 $x > T(n)$,节点 n 在本轮中将不被选为簇头节点。节点 n 被选为簇头的概率阈值 $T(n)$ 表达式为:

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1 - p(r \bmod (1/p))}, & n \in G \\ 0, & n \notin G \end{cases} \quad (1)$$

其中: r 为竞选的轮次,由于本文中不涉及竞选轮次,所以令 $r=1$; p 为网络簇头在总节点中所占的比例; G 表示最近的 $1/p$ 轮中没有当选簇头的节点的集合。由于簇头充当了一个局部网络的管理者和数据转发者的角色,因此簇头节点的能量消耗较大。若一个节点在较近几轮中曾当选过簇头,那么该节点在

下一轮中再次当选簇头的概率较小。所以 LEACH 算法中的簇头选举机制是一种能量均衡机制。

b) 生成簇内网络。当簇头节点成功选出后, 每个簇头节点将会向其他节点以广播的形式发送信息, 非簇头节点接收到该信息之后, 将会根据自身与簇头节点的位置, 选择最近的簇头节点, 并向其发送信息, 请求加入该簇。

c) 周期重选簇头节点, 更新网络结构。由于簇头节点的能量消耗大, 因此网络结构将会周期性地更新, 选出剩余能量较大的节点作为新的簇头, 使得网络中节点的能量消耗较为均衡。

依据此方式, 对整个网络进行划分。一个由 7 个簇头节点和 84 个非簇头节点构成的 LEACH 网络拓扑如图 5 所示。

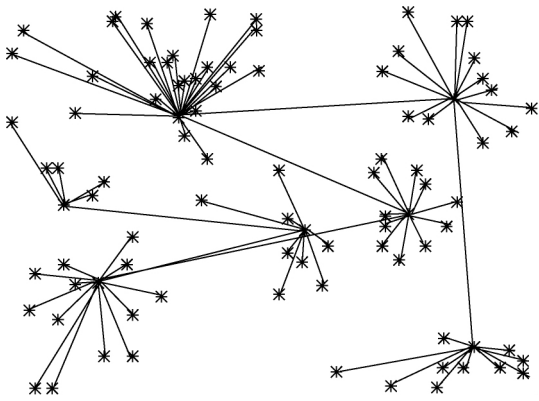


图 5 LEACH 网络拓扑示意图

自动分簇方式形成的网络有一特征, 即节点度分布的不均匀性^[23], 簇头节点的节点度极高, 而非簇头节点的节点度均为 1。

2 病毒传播模型

2.1 传统 SIR 传播模型

SIR 模型是一种典型的网络传染病模型^[24-25], 该模型将网络内的节点分成三类: 易被病毒感染的易感节点 S (susceptible), 染上病毒且能感染其他人的感染节点 I (infected), 以及感染后失效或病愈免疫的免疫态节点 R (removed)。其中免疫态也被称为移除态。免疫态节点不具有感染性。由于网络病毒与传染病病毒比较相似, SIR 模型及其变种模型被广泛应用到了无线自组织网络中的病毒传播研究^[26-27]。

SIR 模型中, 易感态 (S)、感染态 (I) 和免疫态 (R) 三种状态的节点数之和是一个常数, 即网络中的总节点数。SIR 模型中节点状态转换示意图如图 6 所示。当网络中存在 I 态节点时, I 态节点以概率

β 去感染其相邻节点中的 S 态节点, 同时 I 态节点以概率 γ 转变为免疫 R 态节点。

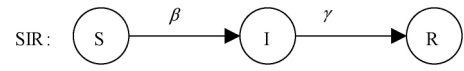


图 6 SIR 模型示意图

在病毒传播的时刻 t , 各状态节点所占比例满足以下关系:

$$\frac{ds(t)}{dt} = -\beta \times i(t) \times s(t) \quad (2)$$

$$\frac{di(t)}{dt} = \beta \times i(t) \times s(t) - \gamma \times i(t) \quad (3)$$

$$\frac{dr(t)}{dt} = \gamma \times i(t) \quad (4)$$

其中: $s(t)$ 、 $i(t)$ 、 $r(t)$ 分别表示 t 时刻易感态 S 节点数占总节点数的比例、感染态 I 节点数占总节点数的比例以及免疫态 R 节点数占总节点数的比例, 且满足 $s(t) + i(t) + r(t) = 1$ 。

2.2 无线自组织网络中的病毒传播 SIR 模型

2.2.1 随机网络中的 SIR 模型

由于随机网络中节点度分布高度集中, 因此随机选取一个节点, 根据平均场理论可以认为该节点的节点度等于网络平均度 $\langle k \rangle$ 。假设每个易感节点的邻居节点中出现感染态节点的概率与网络中所有正处于感染态节点的比例成正比。由于每个感染节点首先被其中一个携带病毒的相邻节点感染, 所以该感染节点的节点度减 1, 即 $\langle k \rangle - 1$ 。结合 SIR 模型, 可得:

$$\frac{ds(t)}{dt} = -\beta \times \frac{\langle k \rangle - 1}{\langle k \rangle} \times i(t) \times s(t) \quad (5)$$

$$\frac{di(t)}{dt} = \beta \times \frac{\langle k \rangle - 1}{\langle k \rangle} \times i(t) \times s(t) - \gamma \times i(t) \quad (6)$$

$$\frac{dr(t)}{dt} = \gamma \times i(t) \quad (7)$$

记病毒传播效率为 λ , $\lambda = \beta/\gamma$, 不失一般性, 令 $\gamma = 1$ ^[28]。将 $\lambda = \beta/\gamma$ 且 $\gamma = 1$ 代入式 (5) — (7) 得到:

$$\frac{ds(t)}{dt} = -\lambda \times \frac{\langle k \rangle - 1}{\langle k \rangle} \times i(t) \times s(t) \quad (8)$$

$$\frac{di(t)}{dt} = \lambda \times \frac{\langle k \rangle - 1}{\langle k \rangle} \times i(t) \times s(t) - i(t) \quad (9)$$

$$\frac{dr(t)}{dt} = i(t) \quad (10)$$

2.2.2 无标度网络中的 SIR 模型

由于无标度网络和 LEACH 网络中度分布是不均匀的, 因此不能像随机网络一样, 设定统一的节

点度。

在无标度网络中,假设在 t 时刻,节点度为 k 的节点中易感、感染、免疫态的节点分别占 $sk(t)$ 、 $ik(t)$ 、 $rk(t)$ (三者均大于等于 0),这三者满足如下方程组:

$$\frac{dsk(t)}{dt} = -\lambda \times k \times sk(t) \times \omega(t) \quad (11)$$

$$\frac{dik(t)}{dt} = \lambda \times k \times sk(t) \times \omega(t) - ik(t) \quad (12)$$

$$\frac{drk(t)}{dt} = ik(t) \quad (13)$$

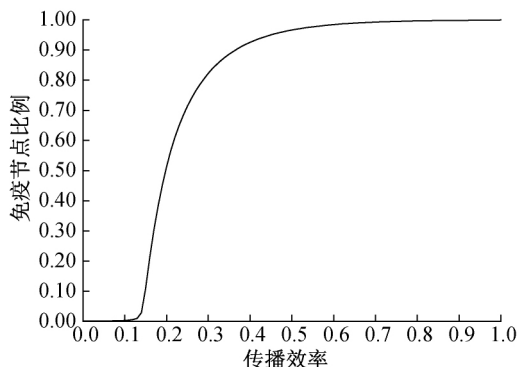
其中 $\omega(t)$ 表示随机选择一条边,这条边恰好连着感染节点的概率。假设随机选择一条边,该边连接节点度为 k 的节点概率与 $k p_k$ 成正比,将其归一化得:

$$\frac{k \times p_k}{\langle k \rangle}, \text{ 其中 } p_k \text{ 为网络中节点度为 } k \text{ 的节点比例。}$$

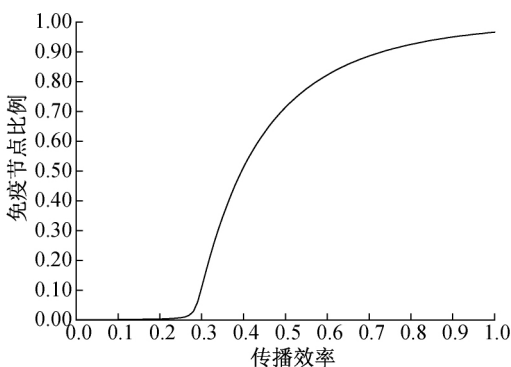
设定节点度为 k 的感染节点的概率为 $ik(t)$ 。由于该感染节点是被它其中一个相邻感染节点传染,所以需要 $k-1$,重新归一化为:

$$\frac{(k-1) \times p_k}{\langle k \rangle} \times ik(t) \quad (14)$$

最后随机选择一条边,该边所连接节点的节点

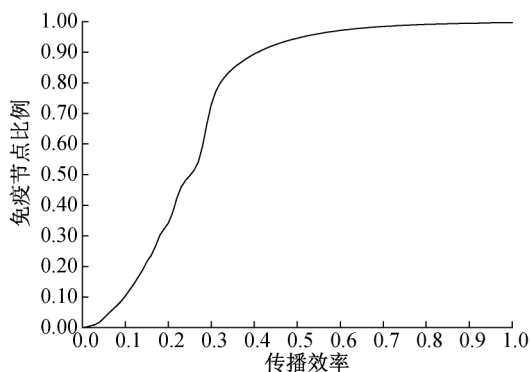


(a) 随机网络无 MAC 机制

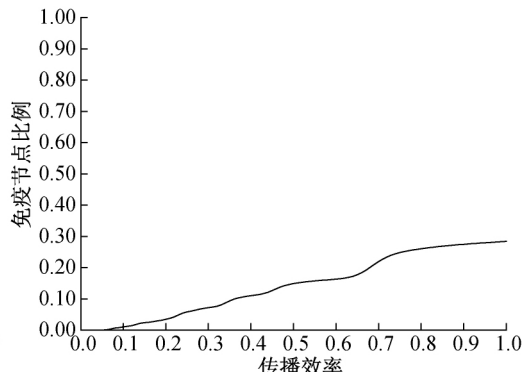


(b) 随机网络使用 MAC 机制

图 7 随机网络中传播效率 λ 对病毒传播规模的影响



(a) 无标度网络无 MAC 机制



(b) 无标度网络使用 MAC 机制

图 8 无标度网络中传播效率 λ 对病毒传播规模的影响

度需要进行加权求和,得:

$$\omega(t) = \sum_k \frac{(k-1) \times p_k}{\langle k \rangle} \times ik(t) \quad (15)$$

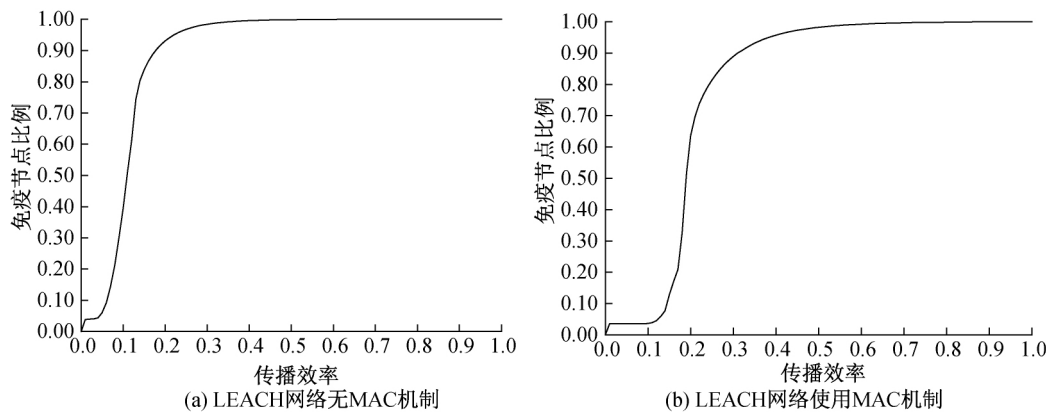
无标度网络中的 SIR 模型同样适用于 LEACH 网络和其它度 ω 不规则的网络。

3 仿真与分析

本文对具有 MAC 机制的节点数量 $N = 2000$ 的随机网络、无标度网络、LEACH 网络中病毒传播规律进行了仿真和分析。首先对病毒传播效率 λ 影响病毒传播规模的规律进行研究,然后在此基础上研究了三种网络结构下的病毒传播随时间的变化规律。为了尽可能消除偶然性,取其 100 次仿真结果的平均值作为最终结果。

3.1 传播效率 λ 对病毒传播规模的影响

传播效率 λ 指病毒感染概率 β 与节点移除概率 γ 的比值,即 $\lambda = \beta/\gamma$ 。不同的传播效率 λ 代表不同种类的病毒,病毒的传播能力随传播效率的增大而增强。图 7—图 9 分别代表随机网络、无标度网络、LEACH 网络中传播效率 λ 对病毒传播规模的影响。

图9 LEACH 网络中传播效率 λ 对病毒传播规模的影响

对比图7—图9,在同一病毒传播条件下,无论是随机网络、无标度网络还是 LEACH 网络,有 MAC 机制下病毒传播稳定后,免疫态所占比例的曲线要低于无 MAC 机制下的相对应曲线,尤其是图8(a)和图8(b)的差异更加明显。根据式(8)—(10)和式(11)—(13)推导可知, SIR 模型的病毒传播阈值为 $\lambda_c = \frac{\langle k \rangle}{\langle k^2 \rangle}$ 。但由于随机网络的节点度分布相对均匀,且文中仿真使用的随机网络平均度为 8,所以随机网络中的病毒传播阈值为 $\lambda_c = \frac{1}{\langle k \rangle}$,其数值约为 0.125。对于无标度网络,节点度具有较大的浮动性,当 $N \rightarrow \infty$,导致 $\langle k^2 \rangle \rightarrow \infty$, $\lambda_c \rightarrow 0$,所以只要病毒有效传播效率大于传播阈值 0,病毒就能在网络中传播。但是由于 LEACH 网络簇团结构的特殊性,使得 LEACH 网络中的病毒传播动

态过程与无标度网络中的有所不同,存在“二次阈值”的现象。图7(a)和图9(a)印证了上述阈值推导结论。此外,图7(b)和图9(b)中的病毒爆发阈值(即纵坐标由 0 快速增大的转折点)明显增大,说明有 MAC 机制作用下正常传播环境中病毒传播更加困难。上述差异直观地反映了 MAC 机制不仅会抑制病毒传播规模,还会提高病毒爆发阈值,增加其传播难度。

3.2 三种网络环境下病毒传播随时间的变化

MAC 机制和拓扑结构对病毒传播的速度也有影响。图10—图12中的分图(a)分别表示 $\lambda = 0.5$ 条件下随机网络、无标度网络、LEACH 网络中各状态节点比例在无 MAC 机制下的直接传输情况下随时间变化的情况;图10—图12中的分图(b)则表示使用 MAC 机制条件下,随机网络、无标度网络、LEACH 网络中各状态节点比例随时间变化的情况。

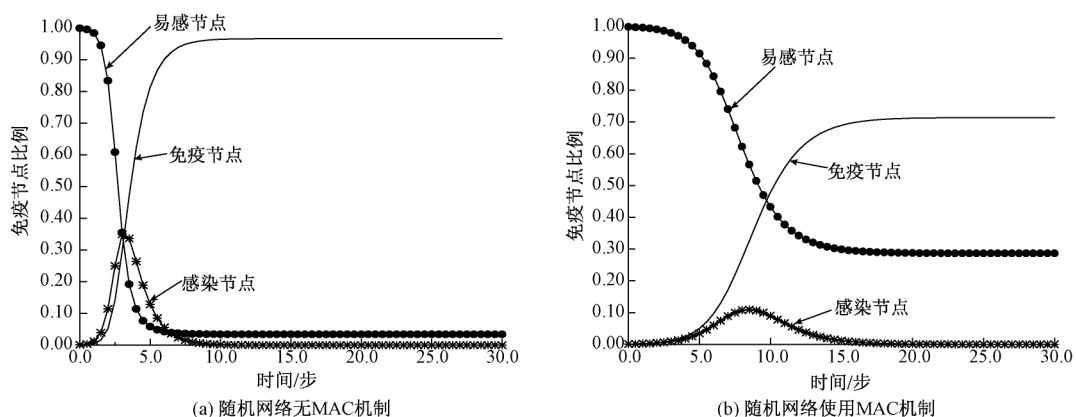


图10 随机网络各状态节点比例时间变化图

随着病毒在网络中不断传播,部分易感态节点被感染,并随后转化为免疫态。正如图10—图12中显示的曲线变化趋势所示,随着时间的推移,易感态节点比例减小,免疫态节点比例增大。对比图10—图12的分图(a),发现三种网络中的曲线弯曲程度都不相同,图

12的免疫节点曲线最陡、最高;图11的免疫节点曲线最平缓。图10—图12的分图(b)观察结果亦是如此。实验结果表明:三种网络结构中,病毒在 LEACH 网络中的传播速度最快,感染规模最大,而病毒在无标度网络中的传播速度最慢,感染规模最小。

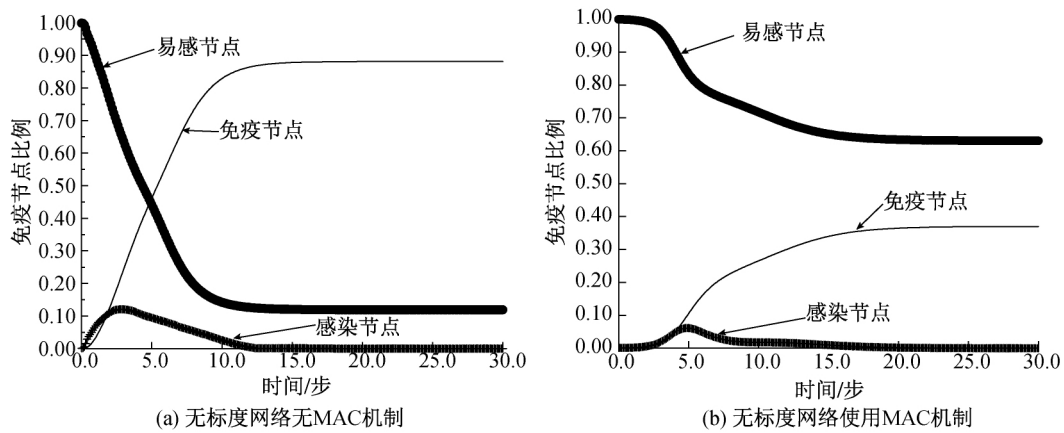


图 11 无标度网络各状态节点比例时间变化图

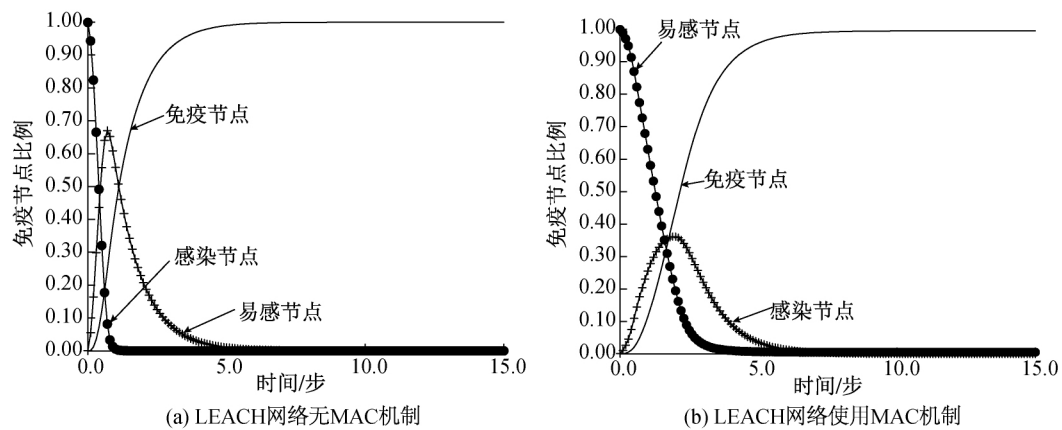


图 12 LEACH 网络各状态节点比例时间变化曲线

进一步分析发现,网络拓扑的差异是造成上述病毒传播结果不同的主要原因。网络拓扑反映了节点间的连接关系,而节点间的连接关系模式会对病毒传播过程造成影响。随机网络中,节点度分布均匀,使得每一时间步上病毒传播过程较为稳定,但 MAC 机制信道监听作用会削弱一部分的病毒传播可能性,从而导致 MAC 机制下随机网络中病毒传播的速度和规模要小于无 MAC 机制情况下的。但 LEACH 网络比随机网络更加有助于病毒传播。在 LEACH 网络中,簇团结构的特殊性(即簇头节点节点度很大,非簇头节点节点度均为 1),使得簇头节点在病毒传播中起到了关键传播节点的作用,加速了病毒在不同簇之间的扩散传播。在无 MAC 机制的 LEACH 网络中,病毒能够通过簇头节点间的联系快速渗透整个网络。即使在具有 MAC 机制的 LEACH 网络中,病毒也能利用簇头节点相对快速地找到跨簇传播途径。除非有效地控制所有的簇头节点,否则 LEACH 网络中的病毒传播很难抑制。而作为三种网络中结构最为复杂的无标度网络,其网络结构的异质性限制了病毒传播的可能性,尤其是小节点度的节点,可供病毒传播的选择性小。而

在具有 MAC 机制的无标度网络中,能够通过变相地断开节点间联系,达到显著阻碍病毒传播的目的。因此,相同网络环境下,无标度网络的安全性最好,其次是随机网络,而 LEACH 网络的安全性最差。使用了 MAC 机制的网络中免疫态节点比例增长趋势相比不使用 MAC 机制网络中免疫态节点比例的增长趋势更为平缓。这说明与无 MAC 机制的网络相比,使用 MAC 机制的网络中病毒传播速度较慢,感染规模较小。因此,在无线网络中 MAC 机制能有效地抑制病毒传播的速度和规模。

4 结 语

本文主要针对随机网络、无标度网络、LEACH 网络这三种无线自组织网络的拓扑特点,分别研究病毒在有或无 MAC 机制的三种网络下的传播特性。研究表明,MAC 机制会抑制病毒传播的速度和规模,而且网络拓扑会影响 MAC 机制的作用强度。网络拓扑不同,MAC 机制的抑制强度也会有所不同,病毒传播速度和规模也各异。相对而言,MAC 机制在异质性较强的网络结构中能有效发挥作用,而簇团结构则会削弱 MAC 机制的抑制效果。

随着计算机网络、无线网络、物联网等技术的发展,网络病毒种类多样,影响因素繁多,研究工作任重而道远。本文只针对三种较为常见的网络结构中是否具有 MAC 通信机制条件下的病毒传播规律进行研究。今后的研究可从其他通信机制和不同网络结构、病毒传播类型等方面入手,深入研究更加复杂的网络结构中病毒的传播规律,探索不同因素对病毒传播的影响。

参考文献:

- [1] 宋佳,门宇博,雷丹丹,等.无线自组织网络 MAC 协议研究综述[J].数字技术与应用,2019,37(6):31-33.
- [2] Benyamina D, Hafid A, Gendreau M. Wireless mesh networks design: A survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2012, 14(2):299-310.
- [3] Sgora A, Vergados D, Chatzimisios P. A survey on security and privacy issues in wireless mesh networks [J]. Security and Communication Networks, 2013, 9 (13): 1877-1889.
- [4] 何鸿君,罗莉,董黎明,等.广义病毒的形式化定义及识别算法[J].计算机学报,2010,33(3):562-568.
- [5] 方堃宇.计算机病毒及防范措施初探[J].数字通信世界,2018(1):221.
- [6] Chen Q, Bridges R A. Automated behavioral analysis of malware: A case study of wannacry ransomware[C]// 2017 16th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA). IEEE, 2017: 454-460.
- [7] Rodriguez A, Okamura K. Generating Real Time Cyber Situational Awareness Information Through Social Media Data Mining [C]// 2019 IEEE 43rd Annual Computer Software and Applications Conference (COMPSAC). IEEE, 2019, 2: 502-507.
- [8] Chandan R R, Mishra P K. A review of security challenges in Ad-Hoc network[J]. International Journal of Applied Engineering Research, 2018, 13(22): 16117-16126.
- [9] Upadhyay R K, Kumari S. Bifurcation analysis of an E-epidemic model in wireless sensor network [J]. International Journal of Computer Mathematics, 2018, 95(9): 1775-1805.
- [10] Liu B, Zhou W, Gao L, et al. Malware propagations in wireless ad hoc networks[J]. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, 2018, 15(6): 1016-1026.
- [11] 胡笑梅,华纯良,王有刚,等.一类时滞网络病毒传播模型局部 Hopf 分支[J].安庆师范大学学报(自然科学版),2018,24(4):11-14.
- [12] 尚凤军,龚文娟,耿哲.基于链路预测和网络编码的 MAC 机制[J].通信学报,2016,37(1):17-27.
- [13] 张永棠.一种移动可信平台 ELF 文件完整性校验方法[J].井冈山大学学报(自然科学版),2017,38(2):55-60.
- [14] Shakya R K, Rana K, Gaurav A, et al. Stability analysis of epidemic modeling based on spatial correlation for wireless sensor networks[J]. Wireless Personal Communications, 2019, 108(3): 1363-1377.
- [15] 庄克琛,张宏,张琨,等.无线传感器网络中的病毒传播动力学研究[J].计算机科学,2013,40(3):187-191.
- [16] Akyildiz I F, Wang X D, Wang W L. Wireless mesh networks: A survey[J]. Computer Networks, 2005, 47(4): 445-487.
- [17] 吴亚军.计算机网络拓扑结构分析[J].软件导刊,2011,10(12):113-115.
- [18] Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks [C]//Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences. IEEE, 2000: 8020.
- [19] 黄斌,吴春旺,郑丰华,等.复杂网络中随机图模型研究[J].计算机工程与科学,2014,36(7):1377-1383.
- [20] Barabási A L, Bonabeau E. Scale-free networks[J]. Scientific American, 2003, 288(5): 60-69.
- [21] 王林,江秀萍,柯熙政.关于无标度网络中 Hub 节点的研究[J].计算机应用,2010,30(11):3062-3064.
- [22] Singh S K, Kumar P, Singh J P. A survey on successors of LEACH protocol [J]. IEEE Access, 2017, 5: 4298-4328.
- [23] Jiang L R, Jin X Y, Xia Y X, et al. A scale-free topology construction model for wireless sensor networks [J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2014, 10(8): 764698.
- [24] Jiang L R, Xu Q Y, Ouyang B, et al. Epidemic spreading in interdependent networks[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2018, 2018: 9374039.
- [25] 周康,路秋英.带有线性饱和治疗函数的 SIR 模型动力学研究[J].浙江理工大学学报,2017,37(6):874-880.
- [26] Ren J G, Yang X F, Yang L X, et al. A delayed computer virus propagation model and its dynamics[J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2012, 45(1): 74-79.
- [27] 王维,张鹏涛,谭营,等.一种基于人工免疫和代码相关性的计算机病毒特征提取方法[J].计算机学报,2011,34(2):204-215.
- [28] Wang W, Liu Q H, Zhong L F, et al. Predicting the epidemic threshold of the susceptible-infected-recovered model[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 24676.