

doi:10.11959/j.issn.2096-3750.2017.00019

## 无线传感器网络病毒传播动力学模型研究

罗小娟, 朱煜, 黄如

(华东理工大学信息科学与工程学院, 上海 200237)

**摘要:** 针对无线传感器网络中病毒传播的问题, 引入流行病理论的研究方法, 提出一种具有免疫机制的病毒传播动力学模型。数值计算与实验仿真结果显示, 当在网络的少量节点中引入免疫机制时, 可以有效降低病毒传播速率, 提高网络的抗病毒能力。同时, 节点的通信半径、转移概率和节点密度等因素对传感网病毒传播有较大影响, 动态调节这些参数可以使网络整体性能达到平衡。

**关键词:** 无线传感器网络; 病毒传播模型; 免疫机制; 流行病理论

**中图分类号:** TP393

**文献标识码:** A

## Analysis of spreading dynamics of virus in wireless sensor networks

LUO Xiao-juan, ZHU Yu, HUANG Ru

(School of Information Science and Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

**Abstract:** For virus propagation in wireless sensor networks, based on the epidemic theory, a virus propagation model with immune mechanism was proposed. Numerical calculations and experimental results show that when a small number of network nodes are added with immune mechanism, the virus propagation rate can be effectively reduced and the anti-virus capability of the network can be improved. At the same time, communication radius, transfer probability and node density of nodes have great influence on the propagation of sensor network virus. Dynamic adjustment of these parameters can make the whole network performance balance.

**Key words:** wireless sensor networks(WSN), virus spreading model, immune mechanism, epidemic theory

### 1 引言

无线传感器网络(WSN, wireless sensor network), 是由许多在空间中分布的传感器节点通过自组织及多跳形成的一种无线通信网络, 这些装置使用传感器协作地监控不同位置的物理或环境状况(如气味、压力、压强、声音、温度、湿度、运动或污染物)。无线传感器网络的发展最初起源于战场监测、敌友兵力监控、目标追踪、生物和化学武器探测等军事应用。而现今传感器网络越来越多地应用于民用领域, 如环境监测、智能家居、医疗监护、农业信息监控以及交通控制等。近年来, 随着应用领域不断增多, 无线传感器网络安全受到越来越多的重视, 其中, 病毒传播引起的

安全问题也成为了业界研究热点<sup>[1~6]</sup>。

Mohammad等在文献[7]中研究了传感器网络中的蠕虫病毒传播, 描述了一个基本的无线传感器网络中的蠕虫病毒传播模型, 随后通过仿真分析了不同的网络环境和协议参数对蠕虫病毒传播的影响。Feng等在文献[8]中把基本的流行病传染模型应用到无线传感器网络中, 之后结合实际应用提出一种改进的模型SIR(susceptible infective recovered)来进一步描述病毒从单个节点扩散至整个网络的传播动力学, 并且利用仿真证明在引入了维持机制后, 可以更加真实有效地分析网络中病毒传播过程。Socievole在文献[9]中提出了一种改进的SIS模型, 通过引入一种反病毒机制来提高网络的反病毒能力。Yezekael等在文献[10]中利用流行病传播理论对无线传感器网络病毒传播进行建

收稿日期: 2017-08-14; 修回日期: 2017-09-15

基金项目: 上海市自然科学基金资助项目(No.15ZR1408700)

**Foundation Item:** The National Science Foundation of Shanghai (No.15ZR1408700)

模与分析, 通过数值分析发现, 病毒的传播行为与节点的密度和能量的消耗等有关。

本文主要研究了在无线传感器网络中病毒传播的动力学过程。病毒最初从单一节点开始向其邻居节点进行传播, 而邻居节点在受到感染后也不断重复这一过程。本文首先分析了无线传感器网络中的 SI(susceptible infective)模型, 当传感器网络中不存在反病毒机制时, 均可看作是这个模型。通过理论证明和仿真可知, 在该模型下, 一旦一个节点感染了病毒, 就会快速向外传播, 直到整个网络均受到感染。在实际网络中, 由于传感器节点的失效或加入一些反病毒机制的作用, 网络中的传播行为会发生一些改变。本文提出了一种改进的 SIR 模型, 通过引入一种免疫类型节点, 增强了网络抗病毒的能力。通过理论与仿真验证, 节点的通信半径、转移概率和节点密度等因素对于传感网病毒传播有较大影响, 动态调节这些参数可以使网络整体性能达到平衡。

## 2 无线传感器网络中的病毒传播 SI 模型

### 2.1 无线传感器网络模型

本文采用的无线传感器网络模型中, 假设有  $N$  个传感器节点随机静态分布在一片区域内, 且密度为  $\delta$ 。最初只有中心的一个节点感染病毒, 即病毒的传播是由区域中心向外扩散的, 当网络中的某一个节点的邻居节点(局域内的节点)均已被感染时, 该节点对于网络中的病毒传播就不再有贡献了, 如图 1 中黑色方形节点。图 1 所示的白色圆形节点为已感染且可以向外传播病毒的节点, 黑色圆形节点为易受感染节点。其中,  $S(t)$  为  $t$  时刻易受到感染的节点个数,  $I(t)$  为  $t$  时刻已感染病毒的节点个数,  $R_c$  为单个节点的通信半径。

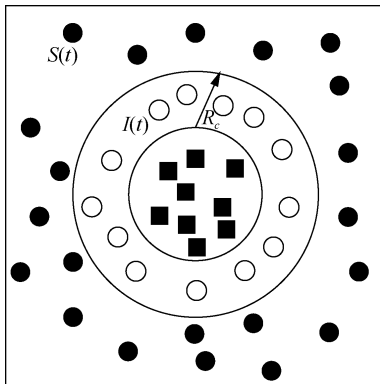


图 1 无线传感器网络病毒传播模型

### 2.2 SI 模型下的病毒传播过程

若不考虑网络中的反病毒机制和失效节点等因素, 则总节点可分为 2 类: 易受感染的节点  $S$  类和已感染的节点  $I$  类, SI 模型状态转换如图 2 所示。

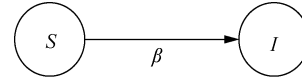


图 2 SI 模型

SI 模型中的病毒传播方程<sup>[8]</sup>为

$$\begin{cases} \frac{dI(t)}{dt} = \beta S(t)I(t) \\ I(0) = I_0 \end{cases} \quad (1)$$

单位时间内一个节点可以传染的节点数量与当时的健康节点数量成正比, 比例系数为  $\beta$ 。

在无线传感器网络模型中, 有

$$N(t) = S(t) + I(t) \quad (2)$$

设在  $t$  时刻能够对其他节点传播病毒的节点数为  $I'(t)$ 。且根据图 1 可知

$$I'(t) = I(t) - \delta\pi(r(t) - R_c)^2 \quad (3)$$

其中,  $r(t)$  是在  $t$  时刻, 包含所有已感染节点的圆的半径。

由于  $I(t) = \delta\pi r(t)^2$ , 继而可得

$$I'(t) = 2\delta\pi r(t)R_c - \delta\pi R_c^2 \quad (4)$$

为简化模型, 且一般有  $r(t) \gg R_c$ , 得

$$I'(t) = 2\delta\pi r(t)R_c \quad (5)$$

一个节点可以感染到的节点个数记为  $\eta$ , 且有

$$\eta = \delta\pi R_c^2 \quad (6)$$

但是在  $\eta$  中并不完全是易感染的节点, 其中, 易感染的节点大约比例为  $\frac{S(t)}{N}$ 。如图 3 所示, 节点  $j$  只可以传播给黑色圆形节点。

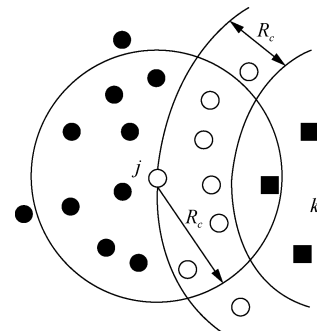


图 3 单个节点的病毒传播范围

将式 (5) 代入式 (1)，可得

$$\frac{dI}{dt} = 2\beta\delta\pi r(t)R_c \frac{N-I}{N}\eta \quad (7)$$

$$\frac{dS}{dt} = -2\beta\delta\pi r(t)R_c \frac{N-I}{N}\eta \quad (8)$$

由于  $I(t) = \delta\pi r(t)^2$ ，所以  $\sqrt{\delta\pi r(t)} = \sqrt{I}$ ，且有  $I(0) = 1$ 。解式 (7) 得

$$I(t) = N \left( \frac{2}{1 + \left( \frac{\sqrt{N}-1}{\sqrt{N}+1} \right) e^{-\frac{2\beta\sqrt{\delta\pi}R_c\eta t}{\sqrt{N}}}} - 1 \right)^2 \quad (9)$$

当  $t \rightarrow \infty$  时， $I(t) = N$ ，即所有节点最终都将被感染。

对 SI 模型进行仿真实现，假设网络中有 10 000 个节点，密度  $\delta = 0.1$ ， $\beta = 0.8$ ，节点的发射半径为  $R_c = 5$ 。图 4 分别考虑节点的通信半径  $R_c$  为 5、7.5 与 10 的情况。

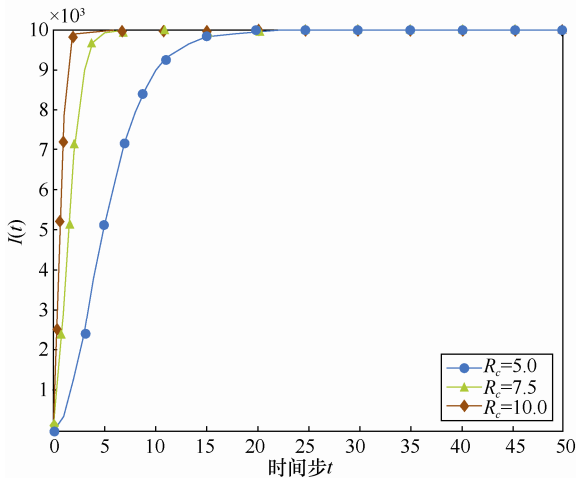


图 4 SI 模型下的病毒传播

### 3 改进的 SIR 病毒传播模型

当无线传感器网络中没有反病毒机制时，网络的传播模型可看作是 SI 模型。在该模型中，只要网络中的一个节点感染了病毒，经过一段时间的传播后，网络中所有的节点都将被感染，且当节点的通信半径越大时，传播速度越快。在许多应用场合中，节点由于能量耗尽等原因失效，或是网络中加入了反病毒措施，病毒传播过程会发生一些变化，而 SI 模型无法真实反映此时的传播规律。针对传感器网络中 SI 模型的不足，本文提出一种改进的 SIR 模

型，分析病毒在该模型下的传播动力学，通过理论与仿真证明在该模型中，网络可以在通过较小的额外开销下，通过调节各个参数，有效地增强网络的抗病毒能力。

#### 3.1 SIR 模型下的病毒传播过程

当考虑网络中节点失效与反病毒的机制后，增加了一种 R 类节点用来表示安全的节点，其状态转换如图 5 所示，其中， $\mu$  为 S 节点转移到 R 节点的概率， $\partial$  为 S 节点转移到 I 节点的概率， $\beta$  为 I 节点转移到 R 节点的概率。

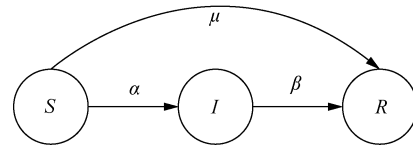


图 5 SIR 模型状态转换

SIR 模型中的病毒传播方程为

$$\begin{cases} \frac{dI(t)}{dt} = \partial S(t)I(t) - \beta I(t) \\ \frac{dS(t)}{dt} = -\partial S(t)I(t) - \mu S(t) \\ \frac{dR(t)}{dt} = \beta I(t) + \mu S(t) \end{cases} \quad (10)$$

在传感器网络模型中，有

$$N(t) = S(t) + I(t) + R(t) \quad (11)$$

此时可以有效传播的节点个数  $I'(t)$  为

$$I'(t) = 2\delta\pi r(t)R_c - \frac{I}{N}R \quad (12)$$

再根据式(6)可得到传播方程

$$\begin{cases} \frac{dI(t)}{dt} = \partial(2\delta\pi r(t)R_c - \frac{I}{N}R) - \frac{I}{N}R\eta - \beta I \\ \frac{dS(t)}{dt} = -\partial(2\delta\pi r(t)R_c - \frac{I}{N}R) - \frac{I}{N}R\eta - \mu(N - I - R) \\ \frac{dR(t)}{dt} = \beta I(t) + \mu(N - I - R) \end{cases} \quad (13)$$

用一般方法求解该方程较为困难，可以通过数值分析方法来分析其规律。在本文实验中，假设网络中有 10 000 个节点，初始条件为  $\delta = 0.1$ ， $\partial = 0.5$ ， $\beta = 0.01$ ， $\mu = 0.0002$ ，节点的发射半径为  $R_c = 5$ 。

#### 3.2 仿真结果分析

$I(t)$ 、 $S(t)$ 和  $R(t)$ 随时间变化的情况如图 6 所示。

在病毒爆发的初期，感染病毒的节点数快速上升，当到达某个峰值时，免疫的效果逐渐体现，网络中免疫节点数量逐步增加，感染病毒的节点数开始下降。与 SI 模型相比较，该模型中引入了  $R$  类节点，且  $S$  类节点可以直接转化为  $R$  类节点以免受到病毒等的危害。当在网络的少量节点中引入免疫机制时，可以有效降低病毒传播速率，提高网络的抗病毒能力。

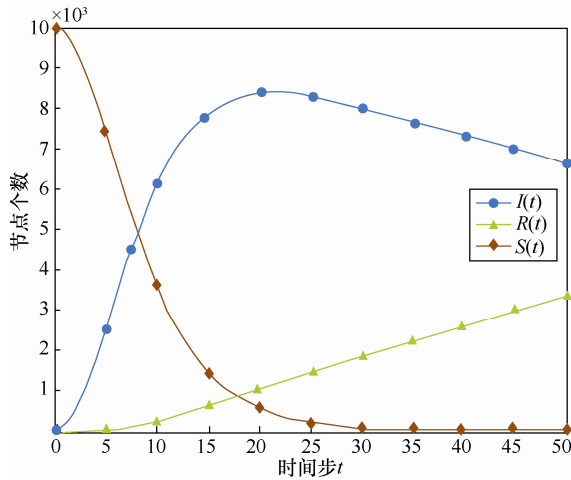


图 6  $I(t)$ 、 $S(t)$ 和  $R(t)$ 对比

改变节点通信半径  $R_c$  和传播概率  $\delta$  的情况下，均对  $I(t)$  有影响，结果如图 7 所示。节点通信半径增大与病毒传播率的增加，均会造成网络病毒传播速度加快，最大感染节点数增大，但同时感染节点数下降的速率也加快。

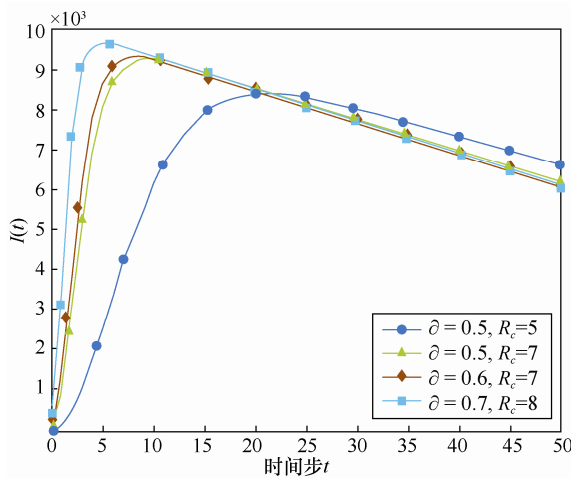


图 7  $R_c$ 和  $\delta$ 对  $I(t)$ 的影响

图 8 是改变节点通信半径  $R_c$  和传播概率  $\delta$  对  $S(t)$  的影响。节点通信半径增大与病毒传播率的增加，会造成易感染病毒的节点快速转化为  $I$  类节点

和  $R$  类节点。可以看出，当节点的通信半径和病毒有效传播率只少量增加时，健康的节点数也会加速消失。比较  $\delta=0.4, R_c=5$  与  $\delta=0.5, R_c=6$ ，当  $S(t)$  下降到相同的值时，后者只用前者近一半的时间。

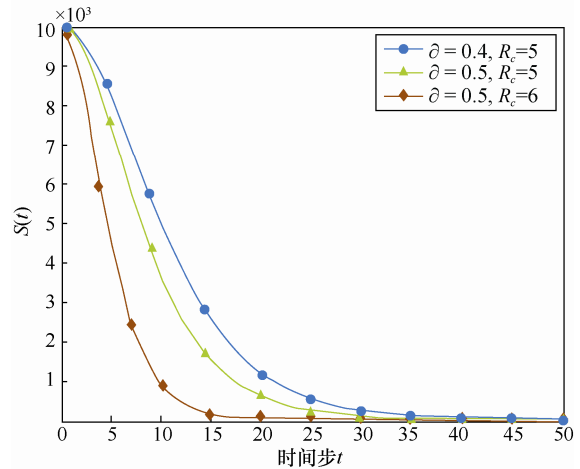


图 8  $R_c$ 和  $\delta$ 对  $S(t)$ 的影响

图 9 描述了改变  $\mu$  和  $\beta$  对  $I(t)$  的影响。当  $\mu$  和  $\beta$  均增大时，最大感染的节点数下降，感染节点数更加快速到达峰值，从峰值处下降速率加快。

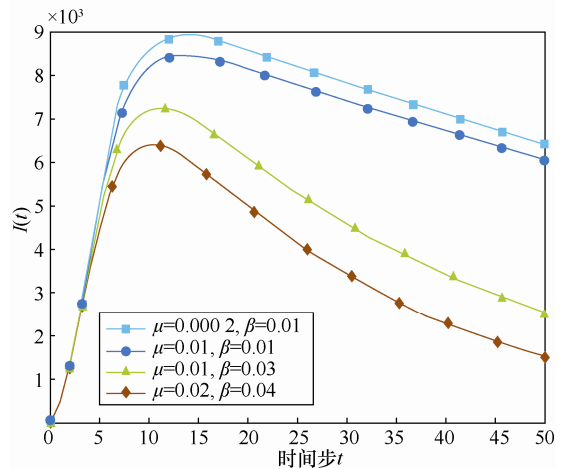
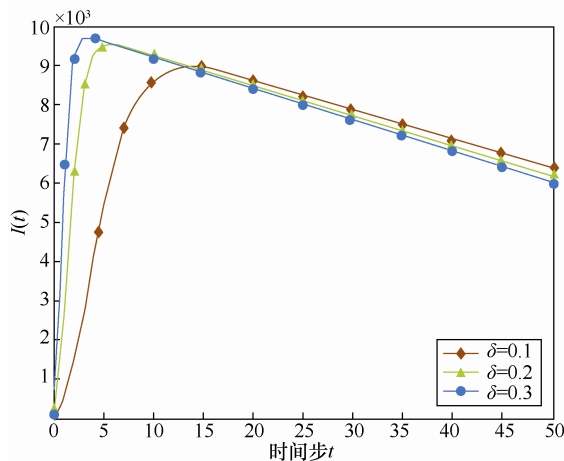


图 9  $\mu$ 和  $\beta$ 对  $I(t)$ 的影响

图 10 描述了节点密度  $\delta$  对于  $I(t)$  的影响。当  $\delta$  增大时，网络中的感染速度加快，最大感染节点个数增加。

通过仿真分析，可以得出在改进的 SIR 模型下病毒传播的规律。除了与传感器网络自身拓扑结构有关外，病毒传播还与节点的通信半径，病毒传播率，节点失效的概率(节点的能量消耗)和网络中节点的密度等关系密切，在实际中为了防止病毒快速传播，可以调节这些参数，使网络整体性能达到平衡。

图 10  $\delta$  对  $I(t)$  的影响

## 4 结束语

本文研究了在无线传感器网络中病毒传播的动力学过程, 分析了 2 种病毒传播模型: SI 模型和改进的 SIR 模型。传统的 SI 模型适合于节点永久有效或无反病毒机制的无线传感器网络, 一旦网络中有节点感染病毒, 最终会导致整个网络均被感染。考虑到实际应用中节点有一定概率失效, 且会有反病毒的机制, 本文引入了一种改进的 SIR 模型。该模型可以有效地降低病毒传播速率, 减少受到感染的病毒个数, 除了该模型的免疫节点外, 节点的通信半径、各状态的转移概率和节点密度等条件对于该模型下的病毒传播有较大影响, 实际中可以根据一定要求动态调节这些参数。

## 参考文献:

- [1] ALEXANDER S, ROBERTO B J. Estimating the state probability distribution for epidemic spreading in complex networks[J]. Applied Mathematics and Computation, 2016, 291: 197-206.
- [2] JUN W H. Hop-by-hop worm propagation with carry over epidemic model in mobile sensor networks[J]. Computers, 2015, 4(4): 283-292.
- [3] 苏晓萍, 宋玉蓉, 申情, 等. 一种具有 GAF 分簇结构的无线传感器网络中恶意软件传播模型[J]. 电信科学, 2011, 27(8): 33-38.  
SU X P, SONG Y R, SHEN Q, et al. A malware propagation model with GAF-based clustering in wireless sensor network[J]. Telecommunications Science, 2011, 27(8): 33-38.
- [4] 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.  
ZHUANG K C, ZHANG H, ZHANG K, et al. Analysis of spreading dynamics of virus in wireless sensor networks[J]. Computer Science, 2013, 40(3): 187-191.
- [5] 曹玉林, 王小明, 何早波, 等. 移动无线传感网中恶意软件传播的最优安全策略[J]. 电子学报, 2016, 44(8): 1851-1857.  
CAO Y L, WANG X M, HE Z B, et al. Optimal security strategy for malware propagation in mobile wireless sensor networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(8): 1851-1857.
- [6] 王田, 吴群, 文晟, 等. 无线传感网中移动式蠕虫的抑制与清理[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(9): 2202-2207.  
WANG T, WU Q, WEN S, et al. The inhibition and cleanup of the mobile worm in wireless sensor networks[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2016, 38(9): 2202-2207.
- [7] MOHAMMAD S H, SHENG W, YANG X, et al. On the race of worms and patches: modeling the spread of information in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2016, 11(12): 2854-2865.
- [8] FENG L P, SONG L P, ZHAO Q S, et al. Modeling and stability analysis of worm propagation in wireless sensor network[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015, 2015(1): 1-8.
- [9] SOCIEVOLE A, RANGO F D, SCOGLIO C, et al. Assessing network robustness under SIS epidemics: the relationship between epidemic threshold and viral conductance[J]. Computer Networks, 2016, 103: 196-206.
- [10] YEZEKAEEL H, QUANYAN Z. Epidemic protection over heterogeneous networks using evolutionary poisson games[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2017, 12: 1786-1800.

## 作者简介:



罗小娟 (1974-), 女, 博士, 华东理工大学讲师, 主要研究方向为无线传感器网络、物联网、网络安全。

朱煜 (1973-), 女, 华东理工大学教授、博士生导师, 主要研究方向为物联网、图像处理及其在材料学、医学、工业检测中的应用及数字信号处理。

黄如 (1975-), 男, 博士, 华东理工大学副教授, 主要研究方向为无线传感器网络、物联网、网络优化。