

一种无线传感器网络簇间拓扑演化模型及其免疫研究*

王亚奇[†] 杨晓元

(武警工程学院电子技术系网络与信息安全武警部队重点实验室, 西安 710086)

(2011年7月31日收到; 2011年9月4日收到修改稿)

基于复杂网络理论, 研究由于节点失效所导致的无线传感器网络性能下降的问题, 提出一种新的簇间拓扑演化模型, 在此基础上讨论病毒的免疫策略, 并给出一种新的免疫机理. 理论分析表明, 该模型演化生成的网络不仅具有较强的容错性, 而且还可以有效避免节点因能量很快耗尽而过早死亡. 研究还发现, 对于网络全局信息未知的情况, 与随机免疫和熟人免疫策略相比, 本文所提免疫策略能够获得较好的免疫效果. 通过数值仿真对理论分析进行验证.

关键词: 复杂网络, 无线传感器网络, 拓扑演化, 免疫策略

PACS: 02.50.Le, 05.65.+b, 05.70.Np

1 引言

无线传感器网络是由大量微型传感器节点和基站构成的一种自组织、分布式网络系统, 它集数据采集、数据处理以及数据传输于一体^[1]. 由于无线传感器网络在军事、环境、生物、医疗保健、交通运输以及空间探索等领域具有广泛的应用价值^[2], 因此受到了人们的极大关注. 作为普适计算系统中的一种典型应用^[3], 无线传感器网络通过大量部署在监测区域内的传感器节点来收集覆盖区域内被感知对象的信息, 并通过多跳路由通信的方式将数据传递给基站, 基站则负责对来自网络中各个节点的数据进行分析和处理. 传感器节点通常采用电池供电, 并且被监测区域内的环境一般比较恶劣(如战场、极地等), 这经常会导致传感器节点由于电源能量受限的原因而失效或废弃. 因此, 有限的节点能量严重阻碍了无线传感器网络的推广应用, 那么如何设计出能量高效的网络是该类网络研究中所面临的一个重要问题^[4].

为了提高无线传感器网络能量的利用效率, 人们构建了一些以能量效率为导向的网络路由协议, 该类协议通常包括 LEACH 协议^[5]、PEGASIS 协

议^[6]以及 PEDAP 协议^[7]等. LEACH 协议的基本思路是首先以自组织的方式随机选择网络中部分传感器节点作为簇头, 随后簇头汇聚本簇内所有成员节点收集的信息并发送给基站. PEGASIS 协议的特点是通过将网络中所有传感器节点构造成一条链来大幅减少与基站通信的节点数量, 这在增强信息聚合能力的同时也降低了每一轮的能量损耗. PEDAP 协议的基本思想是把传感器网络中的所有节点构造成一棵最小汇集树, 每经过一定的轮数后基站都要重新计算路由信息以便排除失效的节点. 此外, Kalpakis 等^[8]分别提出了一种整数规划解决方案和一种启发式解决方案来降低网络中传感器节点的能量损耗. Liang 等^[9]则建立了一种通用的能耗数据采集成本协议, 通过最大限度地增加传感器节点的信息采集量来达到减少节点能耗、延长网络生命周期的目的.

上述路由协议或方案虽然能够提高无线传感器网络的能量效率, 但是在实际应用环境中, 由于能量耗尽、硬件故障以及病毒攻击等因素造成的传感器节点失效问题却依然存在, 而部分传感器节点的失效将会严重影响整个网络的可靠性以及稳定性. 因此, 有关无线传感器网络容错性的研究就

* 国家自然科学基金(批准号: 61103231)和江苏省高等学校研究生科研创新计划(批准号: CX10B_193Z, CXZZ11_0401)资助的课题.

[†] E-mail: wyq.njupt@gmail.com

显得尤为重要. 目前, 人们主要通过构造多重覆盖网络或增加工作节点数量来提高整个无线传感器网络的容错性, 并提出了几种容错机理^[10-12], 这些机理虽然能够增强网络的容错性, 但却降低了系统的整体性能, 以至于影响了网络的寿命. 随着复杂网络理论的迅速发展^[13], 人们研究发现无标度网络通常具有很强的容错性^[14], 因此基于复杂网络理论来探讨无线传感器网络的容错机理开始受到人们的重视. Zhang^[15] 基于经典无标度网络的生成规则, 提出了一种改进的无线传感器网络演化模型, 并分析了该演化模型的抗攻击能力. Hawick 等^[16] 则采用小世界网络模型研究了无线传感器网络的容错性问题, 得出了小世界特征的引入也能够提高网络的容错性能等结论. 然而, 上述两者忽略了无线传感器网络多跳方式通信的特点, 并且也没有体现出节点剩余能量对网络性能的影响. Zhu 等^[17] 借助于复杂网络理论, 并依据无线传感器节点的能量以及连通度提出了两种网络演化模型, 在此基础上分析了模型的容错性能, 然而该模型认为任意一个传感器节点覆盖区域内的其他节点数目固定不变, 这显然与实际不符. Chen 等^[18] 构建了一种具有无标度特性的局域世界演化模型, 以此来获得较强的容错性能, 但该模型中会出现部分簇头节点拥有过多连边的情况, 这将导致这些簇头节点因能量很快耗尽而过早死亡.

本文在上述研究的基础上, 基于随机游走机理^[19], 提出一种新的簇间拓扑演化模型. 该演化模型具有如下特点: 1) 为了提高整个网络的能量效率, 演化模型中新加入节点的优先连接取决于网络中已有簇头节点的剩余能量值; 2) 为了解决因节点度过大而导致能量很快耗尽的问题, 演化模型对节点度的大小进行限制. 该演化模型对簇头节点的分布环境没有特殊要求, 因此可广泛应用于各种大规模部署并且以多跳方式进行通信的无线传感器网络. 另外, 针对无线传感器网络所面临的越来越严峻的安全威胁, 本文讨论了该演化模型上的病毒免疫策略^[20], 并给出一种新的随机游走免疫机理. 研究表明, 本文所提演化模型的度分布具有无标度特性, 并且度分布中的重尾现象随节点最大度限定值的增大而明显减弱, 这不仅增强了网络拓扑的容错性, 而且还能够维持整个网络能量的动态平衡, 从而提高了网络的稳定性和可靠性. 研究还发现, 目标免疫和本文给出的免疫机理能够有效控制网络

中病毒的传播, 免疫效果明显优于随机免疫和熟人免疫. 由于不需要了解网络的全局信息, 本文所提免疫机理具有广泛的应用前景. 最后, 通过仿真实验对所得结论进行了验证.

2 簇间拓扑演化模型

当无线传感器网络组织完成以后^[1], 网络中传感器节点的大部分能量都将被用来传输数据, 因此, 可以假设在簇间拓扑演化的过程中, 每个簇头节点的剩余能量保持不变. 考虑到簇头节点能量的有效性对构建无线传感器网络的重要性^[18,21], 在本文提出的簇间拓扑演化模型中, 首先以簇头节点能量值作为建立新连接时的判断依据, 即能量越高的节点被选择互联的可能性越大; 其次, 为了限制簇头节点拥有过多的连边, 约定任何一个簇头节点 j 可能的连接不超过它的最大度 $k_{j,\max}$, 而 $k_{j,\max}$ 的大小则取决于该节点的剩余能量 E_j . 令 k_{\max} 为任意一个簇头节点具有最大能量 E_{\max} 时能够连接的边数, 即节点的最大度限定值为 k_{\max} , 从而可得^[17]

$$k_{j,\max} = \frac{E_j}{E_{\max}} k_{\max}. \quad (1)$$

可采用相关簇生成算法^[22] 在大规模部署的无线传感器网络中生成均匀分布的簇头节点, 基于随机游走的思想, 给出本文提出的簇间拓扑演化机制如下:

1) 初始化: 选取基站和它的邻居簇头节点共 m_0 个节点作为初始点, 并且使基站与它们两两相连.

2) 随机选取其中一个簇头节点作为随机游走的起始点.

3) 游走的每一步, 游走者游走到当前簇头节点 i 的邻居节点 j 的概率 $\Pi_{i \rightarrow j}$ 取决于该节点的当前能量值 E_j 以及它的连接度 k_j :

$$\Pi_{i \rightarrow j} = \frac{E_j}{\sum_{l \in \Lambda_i} E_l} \cdot \left(1 - \frac{k_j}{k_{j,\max}}\right), \quad (2)$$

(2) 式中 Λ_i 为簇头节点 i 的邻域, 随后簇头节点 j 被标记 (若 j 已经被标记过, 则从该节点出发继续行走), 重复游走过程直到 m ($m \leq m_0$) 个不同的簇头节点被标记. 需要补充说明的是游走过程可能会在相同的两个节点之间重复进行多次, 为了加快网络的生成, 可以对重复次数进行限定.

4) 一个新簇头节点添加到网络中, 并与 m 个被标记的簇头节点建立新的连接.

5) 循环执行 2)—4) 步直到网络中所有簇头节点都被相互连接.

从上述演化机制可知, 当一个簇头节点 j 的剩余能量值较大时, 它被选中建立新连接的可能性也会比较大, 但是这种可能性会随着该节点的度与最大度比值 $k_j/k_{j,\max}$ 的增大而减小, 当它的连接度达到最大值时, 该节点被标记的概率为 0, 即不会再次被连接. 因此, 该演化机制能够维持整个网络中节点能量的动态平衡, 从而可以有效避免部分节点因能量过早耗尽而很快死亡.

3 演化模型理论分析

在复杂网络理论中, 节点度分布是一个非常重要的统计参量, 下面借助于平均场理论来分析本文所提演化模型中簇头节点度的分布规律 [23].

约定无线传感器网络中簇头节点总数为 N , 任意一个簇头节点 i 被随机选取为游走起始节点的概率为 $p(i) = 1/N$. 若用 $p(j)$ 表示从簇头节点 i 游走到它的邻居节点 j 的概率, 由贝叶斯公式可得 [18]

$$p(j) = \frac{p(j|i)p(i)}{p(i/j)}, \quad (3)$$

(3) 式中的条件概率 $p(j|i)$ 表示游走者以簇头节点 i 作为起始节点, 随机游走到它的邻居簇头节点 j 的概率; 同理条件概率 $p(i/j)$ 的含义是游走者以簇头节点 j 作为起始节点, 随机游走到该节点的邻居簇头节点 i 的概率. $p(j|i)$ 和 $p(i/j)$ 表达式分别为

$$p(j|i) = \Pi_{i \rightarrow j} = \frac{E_j}{\sum_{l \in A_i} E_l} \cdot \left(1 - \frac{k_j}{k_{j,\max}}\right), \quad (4)$$

$$p(i/j) = \Pi_{j \rightarrow i} = \frac{E_i}{\sum_{l' \in A_j} E_{l'}} \cdot \left(1 - \frac{k_i}{k_{i,\max}}\right), \quad (5)$$

(5) 式中 A_j 表示簇头节点 j 的邻域, 上述两式中的 $\sum_{l \in A_i} E_l$ 和 $\sum_{l' \in A_j} E_{l'}$ 可分别表示为

$$\sum_{l \in A_i} E_l = k_i \langle E_l \rangle, \quad (6)$$

$$\sum_{l' \in A_j} E_{l'} = k_j \langle E_{l'} \rangle, \quad (7)$$

(6) 式中 $\langle E_l \rangle$ 表示簇头节点 i 的邻居节点具有的平均能量值, 同理 (7) 式中的 $\langle E_{l'} \rangle$ 表示簇头节点 j 的

邻居节点具有的能量平均值. 把 (4)—(7) 式代入 (3) 式可得

$$\begin{aligned} p(j) &= \frac{k_j E_j \langle E_{l'} \rangle}{k_i E_i \langle E_l \rangle N} \cdot \frac{1 - \frac{k_j E_{\max}}{k_{\max} E_j}}{1 - \frac{k_i E_{\max}}{k_{\max} E_i}} \\ &= \frac{k_{\max} E_j - k_j E_{\max}}{k_{\max} E_i - k_i E_{\max}} \cdot \frac{k_j \langle E_{l'} \rangle}{N k_i \langle E_l \rangle}. \end{aligned} \quad (8)$$

由本文所提簇间拓扑演化机理可知, 在每一个时步都将有一个拥有 m 条连边的新簇头节点加入到网络, 因此簇间拓扑演化是一个动态增长的过程. 显然, 在每一个时步, 簇头节点 j 的度 k_j 将随着新节点加入网络并与之连接而不断增加. 约定 k_j 为一个连续型的时变量, 并且其变化率正比于 $p(j)$, 基于平均场理论可得 k_j 对应于时间 t 的变化率为

$$\begin{aligned} \frac{\partial k_j}{\partial t} &= m p(j) \\ &= m \frac{k_{\max} E_j - k_j E_{\max}}{k_{\max} E_i - k_i E_{\max}} \cdot \frac{k_j \langle E_{l'} \rangle}{N k_i \langle E_l \rangle}. \end{aligned} \quad (9)$$

为了研究问题的方便且不失一般性, 这里可以假设 [24]

$$N k_i = N \langle k_j \rangle = \sum_i k_i. \quad (10)$$

若簇头节点 i 在第 i 个时步加入网络, 则 t 时步网络中簇头节点总数为 $N = m_0 + t$. 对于一个较长时间的演化过程 ($t \rightarrow \infty$), 各簇头节点度的总和可表示为

$$\sum_i k_i = 2mt + m_0 - 1 \approx 2mt. \quad (11)$$

结合 (9)—(11) 式可得

$$\begin{aligned} \frac{\partial k_j}{\partial t} &= \frac{k_{\max} E_j - k_j E_{\max}}{(m_0 + t)k_{\max} E_i - 2mt E_{\max}} \\ &\quad \times \frac{(m_0 + t)k_j \langle E_{l'} \rangle}{2t \langle E_l \rangle}, \end{aligned} \quad (12)$$

(12) 式可进一步变为

$$\begin{aligned} \frac{dk_j}{k_j(k_{\max} E_j - k_j E_{\max})} &= \frac{(m_0 + t) \langle E_{l'} \rangle}{2 \langle E_l \rangle} \\ &\quad \times \frac{dt}{((m_0 + t)k_{\max} E_i - 2mt E_{\max})t}. \end{aligned} \quad (13)$$

解上述微分方程可得

$$\begin{aligned} k_j^{-1}(t) &= (k_{\max} E_j)^{-1} \left(E_{\max} + C^{-1} \right. \\ &\quad \left. \times \left(\frac{2mt}{(m_0 + t)k_{\max} E_i - 2mt E_{\max}} \right)^{-[f(E)]/2} \right), \end{aligned} \quad (14)$$

其中

$$f(E) = \frac{E_j \langle E_l' \rangle}{E_i \langle E_l \rangle}. \quad (15)$$

通常情况下,网络中的簇头节点剩余能量值可能会服从多种不同分布,如均匀分布、幂律分布以及指数分布等^[17].若满足均匀分布,对于(15)式则有 $f(E) = 1$.在每一个时步,当一个新簇头节点加入时都要与网络建立 m 个连接,由此可得初始条件 $k_j(t_j) = m$,并代入(14)式得

$$k_j(t)$$

$$= m \left(\frac{((m_0 + t)k_{\max}E_i - 2mE_{\max}t_j)t}{((m_0 + t)k_{\max}E_i - 2mE_{\max}t)t} \right)^{f(E)/2}. \quad (16)$$

(16)式表明,无线传感器网络中所有簇头节点的度都以相同的方式进行演化,即按幂函数规则变化,而区别就是由于不同节点的剩余能量以及加入网络时间不同,幂函数的截距也可能各不相同.利用(16)式可得出 t 时步簇头节点 j 的度 $k_j(t)$ 小于 k 的概率为

$$p(k_j(t) < k) = p \left(t_j > \frac{(m_0 + t)E_i k_{\max} m^{2/f(E)} t}{((m_0 + t)E_i k_{\max} - 2mE_{\max}t)k^{2/f(E)} + 2E_{\max}m^{1+2/f(E)}t} \right). \quad (17)$$

假设在相同的时间间隔内,新的簇头节点被添加到网络中,因此 t_j 的概率分布具有常数概率密度

$$p(t_j) = \frac{1}{m_0 + t} \quad (18)$$

把(18)式代入(17)式可得

$$\begin{aligned} p(k_j(t) < k) &= 1 - p \left(t_j \leq \frac{(m_0 + t)E_i k_{\max} m^{2/f(E)} t}{((m_0 + t)E_i k_{\max} - 2mE_{\max}t)k^{2/f(E)} + 2E_{\max}m^{1+2/f(E)}t} \right) \\ &= 1 - \frac{E_i k_{\max} m^{2/f(E)} t}{((m_0 + t)E_i k_{\max} - 2mE_{\max}t)k^{2/f(E)} + 2E_{\max}m^{1+2/f(E)}t}. \end{aligned} \quad (19)$$

由(19)式可解得本文所提演化模型中簇头节点的度分布函数 $P(k)$ 为

$$\begin{aligned} P(k) &= \frac{\partial p(k_j(t) < k)}{\partial k} \\ &= \frac{2k_{\max}E_i((m_0 + t)E_i k_{\max} - 2mE_{\max}t)(mk)^{2/f(E)} t}{f(E)k \left(((m_0 + t)E_i k_{\max} - 2mE_{\max}t)k^{2/f(E)} + 2E_{\max}m^{1+2/f(E)}t \right)^2}. \end{aligned} \quad (20)$$

当 $t \rightarrow \infty$ 时,(20)式可进一步化简为

$$P(k) = \frac{2k_{\max}E_i(E_i k_{\max} - 2mE_{\max})(mk)^{2/f(E)}}{f(E)k \left((E_i k_{\max} - 2mE_{\max})k^{2/f(E)} + 2E_{\max}m^{1+2/f(E)} \right)^2}. \quad (21)$$

与 k_{\max} 相比, E_{\max} 和 m 的取值通常较小,因此可忽略(21)式分母中的 $2E_{\max}m^{1+2/f(E)}$ 项,此时该式可化简为

$$P(k) \approx \frac{2k_{\max}E_i m^{2/f(E)}}{f(E)(k_{\max}E_i - 2mE_{\max})k^\gamma}, \quad (22)$$

其中的度分布指数 $\gamma = 1 + 2/f(E)$.由(22)式可知,本文所提演化机制生成的网络节点度分布具有无标度特性,并且受到了最大度限定值 k_{\max} 的影响,这表明该演化模型不但容错性较强,而且还能够限制节点度的无限增大,从而达到了维持整个网络能量动态平衡的目的.从(22)式还可以看出,度分布指数 γ 只与簇头节点的剩余能量有关,而与时间 t

以及参数 m 均无关.由于该演化模型对簇头节点的实际分布环境没有具体要求,因此可广泛应用于各种各样的大规模部署并且以多跳方式进行通信的无线传感器网络.

4 仿真结果与讨论

本节通过仿真实验,从以下两个方面来进一步分析本文所提簇间拓扑演化模型的性能:1)节点度分布及其演化;2)免疫策略.仿真过程中选取的参数如下:网络中的簇头节点总数为 $N = 2000$,网络初始节点数 $m_0 = 5$, m 的取值分别为 $m = 2, 3, 4$;

为了说明节点最大度限定对演化模型特性的影响, k_{\max} 的取值分别为 $k_{\max} = 20, 40, 60, N$, 其中 $k_{\max} = N$ 表示不考虑 k_{\max} 的影响, 即对节点度的最大值不进行限制; 在网络模型演化过程中约定每个节点的剩余能量满足 $[0.5, 1]$ 之间的均匀分布, 并且节点最大能量值为 $E_{\max} = 1$; 在讨论病毒的免疫策略时, 忽略了不同簇头节点之间存在的差异^[25], 约定所有节点在单位时步内被某个邻居节点感染的概率即病毒的有效传播率均为 $\lambda = 0.01$; 在病毒传播的初始时刻, 随机选择网络中的一个簇头节点作为感染节点. 所有数据均为至少 50 次独立运行的平均值.

4.1 度分布及其演化

图 1 给出了簇间拓扑演化模型的度分布与最大度限定值 k_{\max} 之间的关系, 其中 $m = 3$. 从图 1 可以看出, 当 k_{\max} 的取值变化时, 演化模型的节点度分布都具有无标度特性, 并且度分布指数 $\gamma \approx 3$, 这表明本文所提演化模型具有较强的容错性, 同时也验证了上述理论分析的正确性. 图 1 还表明, 随着 k_{\max} 的减小, 节点度分布中的重尾现象也随之明显减弱, 这说明对节点的最大连接度进行限制能够大幅减少网络中关键簇头节点数量, 降低了网络的非均质程度, 从而增强了网络抵御选择攻击的能力.

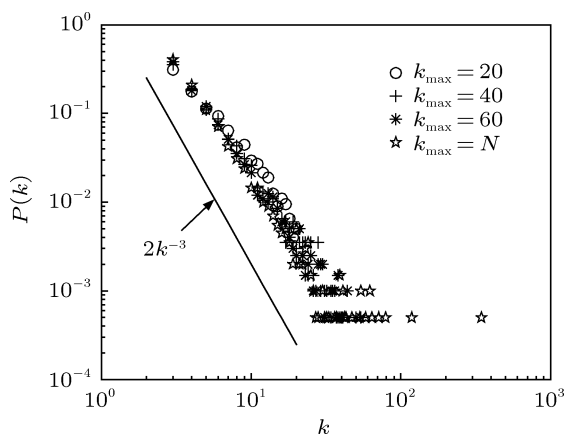


图 1 演化模型度分布 $P(k)$ 与 k_{\max} 的关系图

图 2 表明了簇间拓扑演化模型的度分布随 m 的变化情况, 其中 $k_{\max} = 20$. 从图 2 可知, 随着 m 取值的增大, 节点度分布曲线的截距也会随之增大, 但对度分布指数没有影响, 因此本文所提演化模型的无标度特性与参数 m 无关. 然而, m 取值的大小

将会影响演化网络的稀疏程度, 因此在保证网络具有较强容错性的同时, 为了使演化网络的拓扑结构变得简单, 通常可以选取较小的 m .

图 3 显示了在最大度限定值 k_{\max} 取值不同的情况下, 簇头节点 i 的度 k_i 随时间 t 的演化关系, 其中 $m = 3$. 由图 3 可知, 当 t 较小时, k_i 随着 t 的增大而增大. 然而, 随着簇间拓扑演化的进行, 当达到最大度限定值 k_{\max} 后, k_i 的值将保持不变, 这就保证了网络簇头节点不会拥有太多的连边, 也就很好地避免了节点因能量很快耗尽而过早死亡, 从而延长了无线传感器网络系统的生命周期, 提高了系统的整体性能.

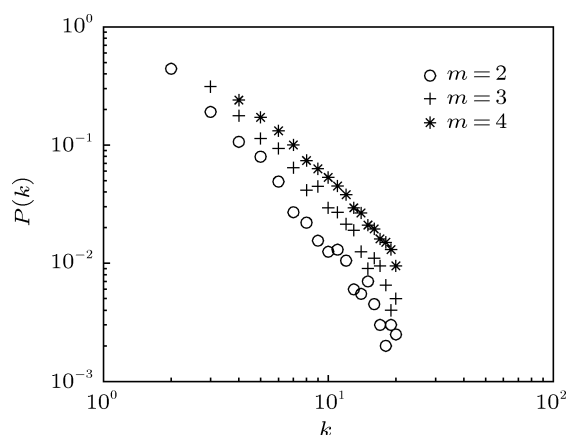


图 2 演化模型度分布 $P(k)$ 随 m 的变化图

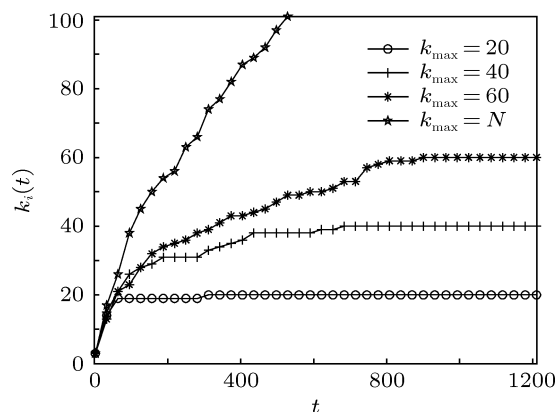


图 3 $k_i(t)$ 随时间 t 的演化关系

4.2 免疫策略

病毒的侵入短时间内会使整个无线传感器网络面临瘫痪的危险, 因此如何有效应对病毒的攻击, 从而保护关键节点完成基本的感知任务是传感网络面临的严重挑战^[26]. 对网络实施免疫是一种控制网络病毒传播的重要方法^[27], 节点一旦被免疫, 就意味着和它们相连接的边被删除, 从而可以

大幅减少病毒的可能传播途径. 目前探讨较多的免疫策略包括随机免疫^[28]、目标免疫^[29]和熟人免疫^[30]. 下面首先分别讨论上述三种免疫策略在本文所提演化模型上的免疫效果, 随后基于随机游走机理提出一种新的免疫策略. 在探讨免疫策略的过程中, 本文采用的是 susceptible-infected (SI) 病毒传播模型^[31]. 在 SI 传播模型中, 网络中任何一个节点都处于如下两种可能的状态: 易染状态 S, 表示节点不携带病毒, 但是能够被病毒感染; 感染状态 I, 表示节点已经被病毒感染, 并且始终具有传染性. 定义在时刻 t , 网络中感染节点密度为 $i(t)$, 免疫节点密度为 f .

4.2.1 随机免疫策略

随机免疫是一种比较简单的免疫策略, 该策略完全随机地从网络中选取一定比例的节点进行免疫, 它对度大的节点(被感染的风险比较高)和度小的节点(被感染的风险比较低)平等对待, 即不考虑节点的优先顺序.

图 4 给出了采取随机免疫策略后, 网络中 t 时刻感染节点密度 $i(t)$ 与免疫节点密度 f 的对应关系, 其中 $m = 3, k_{\max} = 20$. 从图 4 可以看出, 当演化网络中仅有少量的簇头节点被选取进行免疫时 ($f = 0.02$), 病毒的传播速率几乎不发生变化. 这说明在对本文所提簇间演化网络实施随机免疫策略时, 要想完全阻止病毒的传播扩散, 几乎需要免疫网络中所有的簇头节点. 由此可知, 随机免疫策略对本文所提簇间演化网络的作用不大, 免疫效果较差.

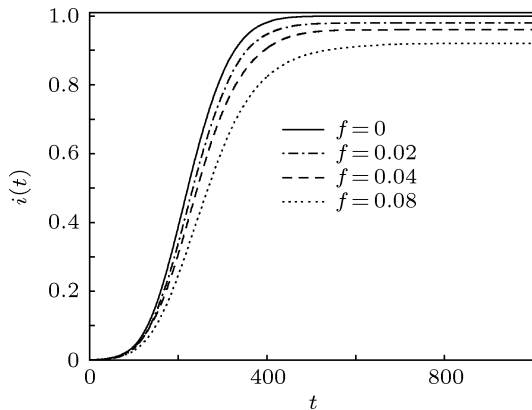


图 4 采取随机免疫后网络中感染节点密度 $i(t)$ 与 f 的对应关系

4.2.2 目标免疫策略

由上述可知, 本文所提簇间演化模型的度分布具有无标度特性, 因此如果网络中每个簇头节点的

度都已知, 根据网络的不均匀特性, 我们可以实施有选择的目标免疫, 即选取网络中少量度最大的簇头节点进行免疫.

图 5 描述了实施目标免疫策略后, 簇间演化网络中 t 时刻感染节点密度 $i(t)$ 与免疫节点密度 f 的对应关系, 其中 $m = 3, k_{\max} = 20$. 图 5 表明, 即使网络中被免疫簇头节点的密度较小 ($f = 0.02$), 目标免疫也能够降低它在病毒传播的初期阶段降低它在网络中扩散的速率, 并且这种趋势随着免疫节点密度的增大而显著增大. 由此说明目标免疫策略能够显著降低网络中被感染的簇头节点数量, 从而较好地控制了病毒的传播.

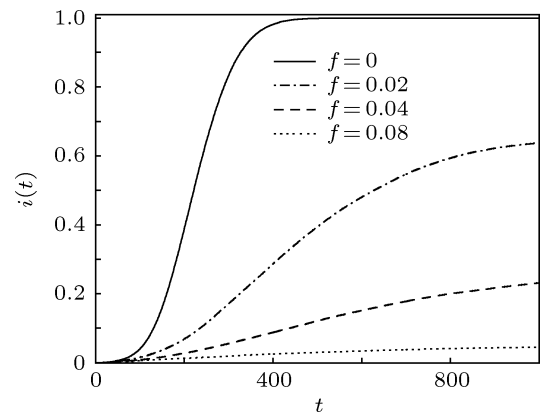


图 5 实施目标免疫后网络中感染节点密度 $i(t)$ 与 f 的对应关系

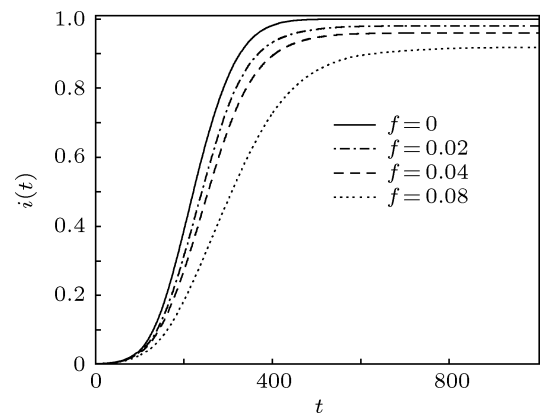


图 6 采用熟人免疫后网络中感染节点密度 $i(t)$ 与 f 的对应关系

4.2.3 熟人免疫策略

虽然目标免疫策略能获得较好的免疫效果, 但它也存在明显的缺点, 即需要了解网络的全局信息, 以便能够找出度最大的关键节点进行免疫, 而这对于庞大且不断变化的无线传感器网络、Internet 等大型复杂网络来说显然是不现实的. 下面我们讨论熟人免疫策略, 该方法的基本思路是首先从网络中随机选取一部分节点, 随后免疫这部分节点的邻居

节点. 因此, 这种免疫策略属于一种局域控制方法, 其目的在于找出网络中度较大的节点进行免疫, 但能够有效回避目标免疫中需要知道网络全局信息的问题.

图 6 所示为采用熟人免疫策略后, t 时刻感染节点密度 $i(t)$ 与免疫节点密度 f 的对应关系, 其中 $m = 3, k_{\max} = 20$. 由图 6 可知, 网络中病毒的传播速率随着 f 的增大并没有明显降低. 对比图 4 和图 6 可知, 对于本文所提簇间演化网络, 熟人免疫的免疫效果和随机免疫基本一致, 这显然与以往研究得到的熟人免疫策略能够有效控制无标度网络病毒传播的结论不同.

4.2.4 基于随机游走的免疫策略

虽然获取无线传感器网络、Internet 等大型复杂网络的全局信息比较困难, 但要掌握这些网络的局部信息往往比较容易, 比如网络中某些节点的邻居节点度的信息^[32,33]. 基于此, 本文利用随机游走机理提出一种新的免疫策略, 该策略描述如下:

1) 从网络中随机选择一个簇头节点作为游走的起点;

2) 游走的每一步, 游走者都游走至当前节点的邻居节点中度最大的节点, 若该邻居节点未被免疫, 则免疫该节点, 随后从该节点继续游走;

3) 若该邻居节点已经被免疫, 则也从该邻居节点继续游走;

4) 重复游走过程直到网络中密度为 f 的簇头节点被免疫.

图 7 描述了采取本文提出的随机游走免疫策略后, 网络中 t 时刻感染节点密度 $i(t)$ 与免疫节点密度 f 的对应关系, 其中 $m = 3, k_{\max} = 20$. 由图 7 可知, 随着 f 的增大, 网络中被感染簇头节点的密度将会显著减小, 这表明本文所提免疫策略能够有效抑制网络中病毒的传播扩散, 其原因就在于该策略能够选取网络中度较大的节点来实施免疫. 对比图 4、图 6 和图 7 可知, 在网络全局信息未知的情

况下, 与熟人免疫以及随机免疫相比, 采用本文提出的免疫策略能够获得较好的免疫效果.

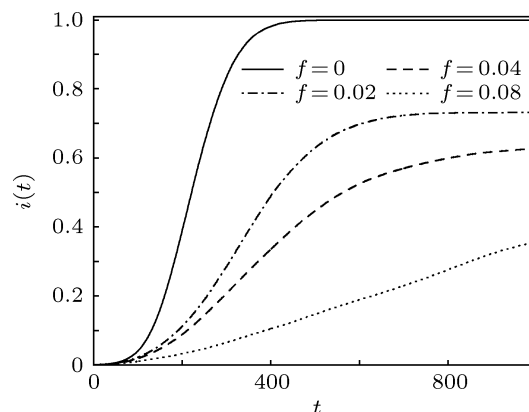


图 7 采取随机游走免疫后网络中感染节点密度 $i(t)$ 与 f 的关系图

5 结论

复杂网络理论为研究无线传感器网络的容错性提供了新的思路. 本文针对由节点失效导致网络性能下降的问题, 提出了一种新的簇间拓扑演化模型. 该模型以传感器节点剩余能量作为建立连接的判断依据, 并且对网络中节点度的大小进行了限制. 经研究发现, 首先, 该演化模型生成的网络具有无标度网络的特性, 因此能够获得较好的容错性能; 其次, 该模型动态平衡了整个网络的能量损耗, 避免了节点过早的因能量很快耗尽而死亡, 从而延长了网络的生命周期, 提高了网络的性能. 该演化模型对簇头节点的实际分布环境没有具体要求, 可广泛应用于各种无线传感器网络. 另外, 由于无线传感器网络面临着严峻的安全威胁, 本文借助于所提演化模型讨论了病毒的相关免疫策略, 并提出了一种新的随机游走免疫机理, 我们发现熟人免疫和随机免疫几乎不能够改变病毒的传播速率, 免疫效果较差, 而本文所提免疫机理和目标免疫优于上述两种免疫策略, 特别是本文所提免疫策略能够适用于全局信息未知的网络, 因此具有一定的应用价值.

[1] Pottle G J, Kaiser W J 2000 *Commun. ACM* **43** 51
 [2] Akyildiz I F, Su W, Cayirci E 2002 *IEEE Commun. Mag.* **40** 102
 [3] Burrell J, Brooke T, Beckwith R 2004 *IEEE Pervas. Comput.* **3** 38
 [4] Madan R 2006 *IEEE Trans. Wirel. Commun.* **5** 748
 [5] Heinzelman W R, Kulik J, Balakrishnan H 1999 *Proceedings of the 5th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking* New York, August 17—19, 1999 p174

[6] Lindsey S, Raghavendra C S 2002 *Proceedings of the IEEE Aerospace Conference* Washington, March 9—16, 2002 p1125
 [7] Tan H Ö, Körpeoglu I 2003 *ACM Sigmod Record* **32** 66
 [8] Kalpakis K, Dasgupta K, Namjoshi P 2003 *Comput. Netw.* **42** 697
 [9] Liang W F, Liu Y Z 2007 *IEEE Trans. Mobile Comput.* **6** 2
 [10] Li X Y, Wan P J, Wang Y 2003 *Proceedings of the 4th ACM International Symposium on Mobile AdHoc Networking and Comput-*

- ing Maryland, June 1—3, 2003 p117
- [11] Kashyap A, Khuller S, Shayman M 2003 *Proceedings of the 25th IEEE International Conference on Computer Communications* Barcelona, April 23—29, 2006 p1
- [12] Han X F, Cao X, Lloyd E L 2010 *IEEE Trans. Mobile Comput.* **9** 643
- [13] Barabfisi B A, Albert R 1999 *Science* **286** 509
- [14] Albert R, Jeong H, Barabfisi A L 2000 *Nature* **406** 378
- [15] Zhang X Y 2009 *Proceedings of the 5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing* Beijing, September 24—26, 2009 p1
- [16] Hawick K A, James H A 2010 *Int. J. Wirel. Mobile Comput.* **4** 155
- [17] Zhu H L, Luo H, Peng H P, Li L X, Luo Q 2009 *Chaos Solitons Frac.* **41** 1828
- [18] Chen L J, Liu M, Chen D X, Xie L 2009 *Chin. J. Comput.* **32** 69 (in Chinese) [陈力军, 刘明, 陈道蓄, 谢立. 2009 计算机学报 **32** 69]
- [19] Saramaki J, Kaski K 2004 *Physica A* **341** 80
- [20] Wang Y Q, Jiang G P 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6733 (in Chinese) [王亚奇, 蒋国平 2010 物理学报 **59** 6733]
- [21] Luo H, Luo J, Liu Y H 2006 *IEEE Trans. Comput* **55** 1286
- [22] Liu M, Gong H G, Mao Y C, Chen L J, Xie L 2005 *Journal of Software* **16** 2106 (in Chinese) [刘明, 龚海刚, 毛莺池, 陈力军, 谢立. 2005 软件学报 **16** 2106]
- [23] Barabgsi A L, Albert R, Jeong H 1999 *Physica A* **272** 173
- [24] Li X, Chen G R 2003 *Physica A* **328** 274
- [25] Shi H J, Duan Z S, Chen G R, Li R 2009 *Chin. Phys. B* **18** 3309
- [26] Wu S L, Tseng Y C, Lin C Y 2002 *The Computer Journal* **45** 101
- [27] Pei W D, Chen Z Q, Yuan Z Z 2009 *J. Cont. Theo. Appl.* **7** 151
- [28] Madar N, Kalisky T, Cohen R 2004 *Eur. Phys. J. B* **38** 269
- [29] Pastor-Satorras R, Vespignani A 2002 *Phys. Rev. E* **65** 036104
- [30] Cohen R, Havlin S, ben Avraham D 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 247901
- [31] Bai W J, Zhou T, Wang B H 2007 *Physica A* **384** 656
- [32] Gómez-Gardenes J, Echenique P, Moreno Y 2006 *Eur. Phys. J. B* **49** 259
- [33] Hu K, Tang Y 2006 *Chin. Phys.* **15** 2782

Study on a model of topology evolution of wireless sensor networks among cluster heads and its immunization*

Wang Ya-Qi[†] Yang Xiao-Yuan

(Network and Information Security Key Lab of Armed Police Force, Electronics Technology Dept., Engineering College of Armed Police Force, Xi'an 710086, China)

(Received 31 July 2011; revised manuscript received 4 September 2011)

Abstract

A new evolving network model based on complex network theory among the cluster heads is proposed to study the influence of node failure on the performance of wireless sensor network. According to the proposed model, we discuss the virus immunization strategies, and present a new immune mechanism. Theoretical analysis shows that such an evolving network not only has strong fault tolerance, but also can effectively avoid node premature death caused by the rapid energy depletion. It is also found that if the global network information is unknown, the proposed immunization strategies in this paper can obtain better immune effect than the random immunization and acquaintance immunization strategies. The theoretical analysis is verified by numerical simulations.

Keywords: complex networks, wireless sensor networks, topology evolution, immunization strategies

PACS: 02.50.Le, 05.65.+b, 05.70.Np

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61103231), and the Innovation Program of Graduate Scientific Research in Institution of Higher Education of Jiangsu Province, China (Grant Nos. CX10B_193Z, CXZZ11_0401).

[†] E-mail: wyq.njupt@gmail.com