

关于无线传感网络演化模型抗毁性分析*

齐小刚¹, 王慧芳¹, 郑耿忠², 谢满德³, 段莉⁴

¹(西安电子科技大学 数学与统计学院, 陕西 西安 710071)

²(韩山师范学院 计算机科学与工程系, 广东 潮州 521041)

³(浙江工商大学 计算机与信息工程学院, 浙江 杭州 310018)

⁴(总参通信化部 通信装备维修中心, 北京 100081)

通讯作者: 齐小刚, E-mail: xgqi@xidian.edu.cn

摘要: 抗毁性是评价无线传感网络拓扑结构的重要性能之一, 如何构建一个健壮的网络显得尤为重要. 基于复杂网络理论, 提出一种关于节点度、剩余能量、传输距离的网络演化模型, 简称 DEDA. 同时引入了几种适合无线传感网络的指标来评价网络的抗毁性. 利用计算机仿真技术, 比较了不同模型演化所形成的网络拓扑结构在随机和故意攻击下的抗毁性. 实验结果表明, DEDA 模型演化形成的无线传感网络在随机攻击和故意攻击下提供了更好的抗毁性.

关键词: 无线传感网络; 抗毁性; 演化模型; 随机攻击; 故意攻击

中文引用格式: 齐小刚, 王慧芳, 郑耿忠, 谢满德, 段莉. 关于无线传感网络演化模型抗毁性分析. 软件学报, 2014, 25(Suppl. (1)): 131-138. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14015.htm>

英文引用格式: Qi XG, Wang HF, Zheng GZ, Xie MD, Duan L. Analysis on resilience of wireless sensor networks growth model. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2014, 25(Suppl. (1)): 131-138 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14015.htm>

Analysis on Resilience of Wireless Sensor Networks Growth Model

QI Xiao-Gang¹, WANG Hui-Fang¹, ZHENG Geng-Zhong², XIE Man-De³, DUAN Li⁴

¹(School of Mathematics and Statistics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

²(Department of Computer Science and Engineering, Hanshan Normal University, Chaozhou 521041, China)

³(College of Computer and Information Engineering, Zhejiang Technology and Business University, Hangzhou 310018, China)

⁴(Communication Equipment Maintenance Center, General Staff Department (GSD), Beijing 100081, China)

Corresponding author: QI Xiao-Gang, E-mail: xgqi@xidian.edu.cn

Abstract: Resilience has become one of the most important indicators in evaluating the topological structure of wireless sensor networks. How to construct a robust topology of WSNs is even more important. Based on complex networks theory, a topology evolution model—DEDA, which considers the node degree, the remaining energy and the transmission distance, is proposed. Some resilience metrics are introduced to analyze the resilience of WSNs and computer simulations are performed to compare the resilience of several topologies that are generated with different growth models. The experimental results show that DEDA model provides better resilience against both random and deliberate attacks.

Key words: wireless sensor network; resilience; growth model; random attack; deliberate attack

无线传感网络是一种面向多任务的无线自组织网络系统, 通常由大量密集部署在某个监控区域或离监控区域近的微小传感器节点组成. 它的主要任务是从周围环境中收集数据信息, 然后将收集到的数据传送给汇聚

* 基金项目: 国家自然科学基金(71271165, 61373174); 广东省高等学校高层次人才项目(粤财教【2013】246号); 浙江省科技厅重点创新团队资助项目(2010R50041); 浙江省科技厅重大优先主题资助项目(2011C14024); 韩山师范学院博士启动项目资助

收稿时间: 2014-05-10; 定稿时间: 2014-08-26

节点以作进一步处理.与传统的传感器相比,微型传感器节点具有体积小、成本低、自组织能力强的特征,其在军事和民用以及其他各个领域具有广泛的应用前景^[1,2].但是传感器节点采用携带电池的方式供电,受体积和成本的限制,单个传感器节点仅能携带有限的电池能量,因此能量快速消耗会引起节点的过早死亡.另一方面,传感器节点部署在比较恶劣的环境中,这也很容易造成节点故障.环境因素、能量消耗或军事攻击所引起的节点失效会导致网络拓扑发生变化,造成通信链路时通时断,从而影响网络的整体性能.而传感器网络的生存时间依赖于活跃节点及网络的连通区域.因此,设计一个健壮的拓扑结构对改善传感器网络的性能具有重要的意义^[3,4].

无线传感网络的抗毁性是指网络在低能量、恶劣环境或故意攻击下虽有部分结构和功能散失,但仍能维持正常运行的能力^[5].抗毁性已成为无线传感网络拓扑设计过程中有必要考虑的重要性能之一.近些年关于提高无线传感网络抗毁性的研究很多,Hajaghayi 等人^[6]基于最小生成树原理提出了求最小权重 k -连通子图的近似算法.Thallner 和 Moser^[7]针对动态传感网络提出了拓扑控制算法,在包含几个网关节点和大量传感器节点的双层网络中,他们构建了一个低能耗的拓扑结构.韩晓峰等人^[8]利用中继节点恢复异构无线传感网络中不连通的区域.虽然以上算法有很多优点,例如实现网络高的可靠性和好的抗毁性,但多余节点的存在或者 k -连通区域降低了网络的整体性能,并且这些算法也没有从复杂网络演化过程角度分析研究无线传感网络的抗毁性.无线传感网络作为一种特殊的复杂网络,也具有小世界和无标度网络的特征,这些特征可用于分析网络拓扑结构.朱海林等人^[9]提出了基于高能效的无线传感网络演化模型,简称 EAEM.实证研究发现,由 EAEM 演化形成的拓扑结构具有无标度网络的特征.但是 EAEM 模型演化过程只考虑了节点的度和剩余能量,没有考虑节点间的传输距离.因此,本文的主要工作就是改进 EAEM 模型.在 EAEM 的基础上,提出了基于节点度、剩余能量、传输距离的网络演化模型,简称 DEDA,并且利用一些评价指标分析了 DEDA 演化模型的抗毁性能.

本文第 1 节简单介绍复杂网络理论.第 2 节给出一些抗毁性评价指标,即累积度分布、网络最大连通子图大小和其平均最短路径长.第 3 节提出两种网络演化模型,即 EAEM 和 DEDA.第 4 节给出仿真不同网络拓扑结构特征,并分析和比较两种网络演化模型在随机攻击和故意攻击下的抗毁性能.最后对全文进行总结.

1 复杂网络理论

近年来,利用复杂网络理论来构建各种实际网络拓扑结构的研究方兴未艾.复杂网络的特征是不规则且动态演化的^[10].毫无疑问,自然界和人类社会中的很多系统可描述为复杂网络,例如,社会网^[11]、科协合作网^[12]、万维网^[13]及供应链网^[14]等.复杂网络理论已被认为是刻画和研究自然界与人类社会中各种复杂体系结构的一种全新而有效的工具.系统的部件视为节点,部件间的关系可视为边.

复杂网络理论在网络抗毁性中的应用主要涉及两种方法:小世界理论和无标度网络理论.1998 年,Watts 和 Strogatz 在《Nature》杂志上发表文章,提出了小世界模型^[15],揭示了网络的小世界特性,即具有规则网络的高聚合系数,又有随机网络短的平均路径长.小世界现象在自然界中是很常见的,这里用一个形象的例子说明该现象,若将一个小世界网络中的点代表一个人,而连接线代表人与人认识,则这个小世界网络可以反映陌生人由彼此共同认识的人而连接的小世界现象.随后 Barabasi 和 Albert 两位学者在《Science》杂志上发表文章,他们通过实证研究发现,大多数现实网络的度分布近似服从“幂率分布”,其特征是只有少数节点的度很高,而大部分节点的度往往很小^[16].因此,对于无标度网络,当节点受到随机攻击时,对网络造成的影响一般很小,只有小概率会发生大的影响,但受到故意攻击时,网络中的一些重要节点会被优先破坏.此时,网络的连通性瞬间变差,影响网络的正常运行.对大多数网络来说,平均路径长代表着网络的传输效率,平均路径长越短,消耗的资源就会越少,这样就延长了网络的工作时间,提高了网络的性能.小世界网络和无标度网络的发现对复杂网络理论的应用做出了很大的贡献.网络增长模型揭示的是网络如何演化的过程,即加入的新节点如何与已存节点相连的过程.不同的网络增长模型遵从不同的演化规则,最终产生的拓扑结构也不同.常见的演化模型有 3 种^[17]:(1) 随机网络(ER)演化模型:首先给定网络的节点数,然后任意两点之间以相同的常数概率连接在一起完全随机地构成网络.(2) 小世界(small-world)模型:对规则网络中每个节点的所有边,以概率 p 断开一个端点,并重新连接,所连接

的新端点从网络中的其他节点里随机选择,如果所选的节点已经与该节点相连,则再随机选择其他节点来重新连接。 $p=0$ 时是规则网络; $p=1$ 时为随机网络;当 $0 < p < 1$ 时,存在一个很大的 p 区域,此时网络拥有较大的集聚程度和最小距离,这就是小世界模型。(3) 无标度(BA)网络:节点被连接的概率与节点度成正比。这 3 种网络模型成为引导现实网络拓扑演化的基本准则^[11-14]。之后还有很多研究对 Barabasi 和 Albert 模型进行了改进和推广。

2 网络抗毁性指标

广义抗毁性是指节点受到故障或攻击以后,网络仍能保持正常运行的能力。狭义的网络抗毁性主要是指网络节点失效以后,网络拓扑结构中依然存在一个规模与网络节点总数成正比的连通区域存在。为了评价无线传感网络的抗毁性能,提出了合适抗毁性指标。本文将采用节点累积度分布、网络最大连通子图大小(即包含的节点数)和平均最短路径作为评价指标。

2.1 累积度分布

在复杂网络中,度是节点属性中最简单但也是最重要的性质。节点的度越大,表示这个节点越重要。节点的度分布可用函数 $p(k)$ 来表示,它反映了网络的宏观统计特征。 $p(k)$ 是指随机选中的节点的度恰好为 k 的概率。其表达式如下:

$$p(k) = \text{frequency}(k) / N \quad (1)$$

其中, N 表示传感网中的传感器节点总数。

网络中节点的度分布情况也可用累积度分布函数 $P(k)$ 来描述。 $P(k)$ 表示的是一个随机选定的节点度恰好大于或等于 k 的概率,其物理意义能充分反映网络特征并且减少幂尾噪声(如 BA 网络的幂率分布)。

$$P(k) = \sum_{k' \geq k} p(k') \quad (2)$$

其中, $p(k')$ 表示节点度为 k' 的概率。

2.2 最大连通子图(LCC)大小

网络的连通性可用最大连通子图大小来反映。一个网络总是存在一个最大的连通子图,这个子图内所包含的节点比网络中的其他连通子图都要多,并且任意两个节点之间都存在通路。最大连通子图的大小是指子图中所含的节点数目。

2.3 最大连通子图的平均最短路径

一般情况下,网络利用平均最短路径来表示网络的传输效率。最大连通子图的平均最短路径是指对连通区域所有节点间最短路径长的平均。对于无线传感网络来说,路径越短,时延就越小,能耗也越少。这样既减少了传输数据的时延,又延长了网络的生存时间^[18]。

$$L = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \neq j} l_{ij}, \quad i, j \in G_s \quad (3)$$

其中 l_{ij} 是指节点 i 和节点 j 间的最短距离, n 是最大连通区域 G_s 中的节点个数。

3 网络演化模型

本节的主要工作是改进 EAEM 模型,并且在此模型上提出了 DEDA 演化模型。

3.1 EAEM模型

目前很多关于无线传感器网络的演化模型都是基于能量的角度进行研究,而 EAEM 模型^[9]是该类方法的一个典型代表,该模型考虑了节点度和节点剩余能量两个因素,且在优先连接阶段只有一步就完成了连接过程,其演化过程如下。

- a) 增长:初始网络有 m_0 个传感器节点,每次加入一个新的传感器节点和 $m(m < m_0)$ 条边。
- b) 优先连接:当一个新节点进入网络时,它将从现有网络中选择 m 个不同的节点连接,设节点 i 被连接的概

率 $P(i)$ 与其度数、节点的剩余能量有关. 节点的剩余能量与度的乘积越大, 被连接到新节点的概率就越大. $P(i)$ 表达式为

$$P(i) = \frac{E_{ri}k_i}{\sum_j E_{rj}k_j} \quad (4)$$

考虑到每条边连接到节点 i 都会消耗一些能量, 因此假设每连接一条边时, 节点消耗常数 a 的能量. 那么, 每次连接边后, 节点 i 的剩余能量 E_{ri} 为

$$E_{ri} = E - ak_i \quad (5)$$

其中, E 是节点 i 的初始能量. 由等式(4)可知, 当 $k_i = E/a$ 时, E_{ri} 变成 0. 等式(4)意味着 k_i 越接近 E/a , 节点 i 的剩余能量就变得越少, 其被连接的可能性也变小.

实证研究表明, 由 EAEM 模型演化得到的网络拓扑具有无标度网络特征^[9], 故其在随机攻击下很健壮, 但在蓄意攻击下就变得很脆弱.

3.2 DEDA模型

由于 EAEM 模型只考虑节点度和节点的剩余能量, 而没有考虑其传输距离. 因此, 在 DEDA 模型演化过程中考虑了节点间的距离, 并将 EAEM 模型中优先连接部分分为两步: 第 1 步连接与节点 i 的度数和剩余能量有关; 第 2 步连接与到节点 i 的距离有关. 距离越短, 被连接的概率就越大. DEDA 模型演化过程如下:

a) 增长: 初始网络有 m_0 个传感器节点, 每次加入一个新的传感器节点和 $m(m < m_0)$ 条边.

b) 优先连接: 当一个新节点进入网络时, 它将从已存网络中选择 m 个不同的节点连接, 我们设节点被连接的概率与其度数、剩余能量和距离有关. 节点的剩余能量与度数的乘积越大, 被连接的概率就越大. 距离越短, 被连接的概率也越大. 优先连接分为两步:

1) 新节点的第 1 条边与已存节点 i 连接, 节点 i 被连接的概率为 $P(i)$, 其表达式见式(3)和式(4).

2) 新节点的其他边与节点 j 相连 (i 和 j 不是同一个节点). 连接概率 $P(j)$ 与节点间的距离 d_j 有关. $P(j)$ 的表达式为

$$P(j) = \frac{d_j^{-1}}{\sum_i d_i^{-1}} \quad (6)$$

图 1 用一个简单的例子说明 DEDA 模型的演化过程. 在这个例子中, 每个新节点进入系统都会带入两条边, 这两条边将选择不同的节点相连. 初始时, 网络有 3 个互相连接的传感器节点 1, 2 和 3. 节点 4 是第 1 个进入系统的新节点, 它将随机地从其他 3 个节点中选择两个节点与之相连, 即节点 1 和节点 2. 当节点 5 进来时, 它的第 1 条边将优先选择度数与剩余能量乘积高的节点相连, 假设节点 4 的度数和剩余能量的乘积高于其他节点, 则节点 4 有更高的概率被优先连接; 节点 5 的第 2 条边则从剩下的节点 1, 2 和 3 中选择距离更近的节点优先连接. 此例中, 节点 5 的第 2 条边与节点 1 相连. 类似地, 在第 4 步中, 假设节点 4 的剩余能量与度数的乘积高于其他节点, 则节点 6 分别选择节点 2 和节点 4 优先连接. 随着越来越多的节点进入系统, DEDA 网络就会按照此连接规则形成. 下一节将对 DEDA 演化模型所形成的网络拓扑进行抗毁性分析, 并且将其与 EAEM 演化模型作比较.

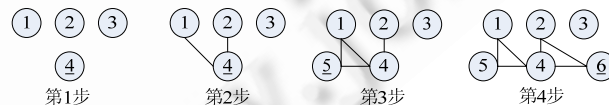


Fig.1 An example of the DEDA growth model, ID for the new node is underscored

图 1 DEDA 模型演化例子, 带下划线的数字代表新的节点

4 实验结果

事实上, 构建真实的无线传感网络很困难, 所以本文借助计算机仿真技术模拟以上所提出的演化模型, 通过模拟比较分析了不同演化模型的抗毁性能. 仿真中将 $n=1000$ 个传感器节点均匀地撒放在 D 为 $250\text{m} \times 250\text{m}$ 的

方形区域中,同时假设所有节点的初始能量相同.网络仿真参数见表 1.

Table 1 Simulation parameters

符号	取值	描述
m_0	3	初始节点数
m	2	每次要连接的节点个数
E	1J	每个节点的初始能量
a	0.025J	节点每连接一条边消耗的能量
N	1000	网络节点个数
D	250m×250m	节点所在的区域范围

4.1 累积度分布

图 2 给出了网络规模为 1 000 个节点时 $y(k)=2m^2/k^3$ 分布与 EAEM 模型的实际度分布情况.从图 2 中可以看出, EAEM 的度分布近似服从指数为 3 的幂率分布,这说明 EAEM 形成的拓扑结构具有无标度网络的特征.

图 3 给出了 EAEM、DEDA 两种模型的累积度分布,为确保有一个公平的对照,我们要求每个演化模型形成的网络有相同的节点数和边数.仿真结果表明,DEDA 无线传感网络虽然也有一些度数大的传感器节点,但这些大度数节点并没有像 EAEM 网络那样多.在传感网络中,节点的度数越大,其传输的数据量也越大,即负载越大,相应消耗的能量也变多.当能量消耗过多时就会造成网络中的节点过早死亡,从而影响网络的正常通信.因此,较 EAEM 模型而言,DEDA 延长了网络的生存时间(这在无线传感网络中是很关键的).

下一步模拟网络攻击.研究复杂网络抗毁性时,节点的攻击一般分为两种类型:随机攻击和故意攻击^[19].对无线传感网来说,随机攻击对应于节点自身特征约束(成本低、电池能量有限等)及自然灾害(海啸、地震等)所引起的节点故障或死亡,这两种因素引起的节点失效称为随机攻击,还有另一种攻击主要是来自恐怖袭击或军事方面,其所引起的节点失效称为故意攻击,此类攻击就是选择网络中的重要节点作为攻击目标.仿真过程中,随机攻击就是随机地从网络中选择一定比例的节点删除.故意攻击就是优先选择一些大度数节点,即按节点度由大到小的顺序删除,并且每次删除以后,更新节点的度.节点移除以后,与之相连的边也随即删除(在现实世界里,攻击只是使节点的部分边失效).大量关于复杂网络抗毁性的研究表明,这种简单而又初始的删除方法可以很好地揭示网络的重要性质.仿真过程中,每次删除 50 个节点(占总节点数的 5%).删除以后,根据不同的评价指标来评估各种拓扑的抗毁性.

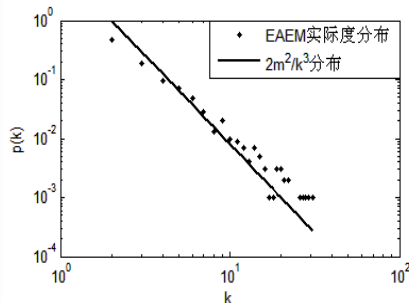


Fig.2 Degree distributions for EAEM
图 2 EAEM 模型的度分布

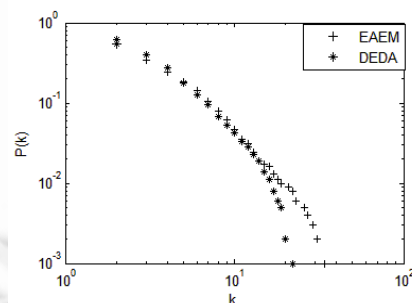


Fig.3 Cumulative degree distributions
图 3 累积度分布

4.2 随机攻击的仿真

首先,利用所提出的抗毁性指标分析网络在随机攻击下的性能.图 4 揭示了传感网络拓扑在随机攻击下的连通性能.其中用最大连通子图的大小来反映连通性.实验结果表明,当节点删除 90%时,两种网络的最大连通子图大小都几乎变为 0,表明此时网络都变得不连通.由图 4 我们还可以看到,最大连通子图的大小与节点的删除比率几乎成线性关系,并且它们二者的发展趋势也很接近,这说明 DEDA 网络和 EAEM 网络在随机攻击下有几乎一样的连通性能.

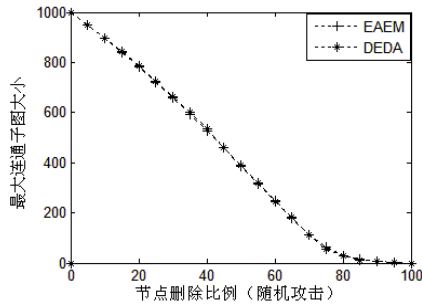


Fig.4 Size of LCC (random),

each data point is the average of 20 runs
图4 网络在随机攻击下最大连通子图大小, 图中每个点是运行 20 次所取的平均值

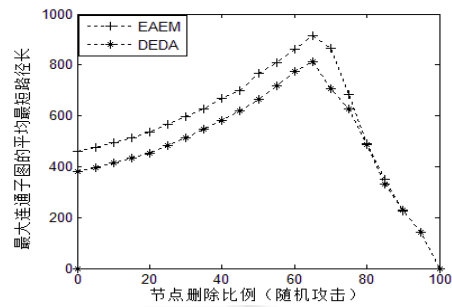


Fig.5 The average shortest path length in LCC (random),

each data point is the average of 20 runs
图5 网络在随机攻击下最大连通子图的平均最短路径,图中每个点是运行 20 次所取的平均值

其次,分析、比较两种网络在随机攻击下的传输效率.仿真过程中用最大连通域的平均最短路径来反映网络的传输效率.图 5 中,随着节点的删除,DEDA、EAEM 两种网络的平均最短路径长的总体趋势都是先逐渐变大然后变小.当删除比例在 0~80%时,DEDA 网络的平均最短路径长度小于 EAEM 网络,故在此范围内 DEDA 的传输效率优于 EAEM.节点删除 80%以后,二者的平均最短路径长很接近,甚至相同.所以从最大连通子图的平均最短路径分析,DEDA 较 EAEM 的抗毁性要好.

4.3 故意攻击的仿真

利用所提出的抗毁性标准分析网络在故意攻击下的性能.图 6 分析比较了网络在故意攻击下的连通性.与随机攻击相比较,网络连通性能在故意攻击下下降得更快,并且二者的节点在删除 40%后网络就几乎被瓦解了.比较 EAEM 和 DEDA 两种模型发现,无论删除多少节点,DEDA 的连通性一直好于 EAEM.

其次分析网络在故意攻击下的传输效率.与随机攻击一样,用平均最短路径反映网络传输效率.图 7 和图 5 有类似的性质.对于 EAEM 网络,节点删除 15%以后其平均最短路径长就急速下降;而 DEDA 网络在删除 20%后才开始下降.当删除比例在 0~17%时,DEDA 网络的平均最短路径长小于 EAEM;在 17%~35%时,DEDA 大于 EAEM;在 35%~45%期间时 DEDA 又低于 EAEM.但是,二者在 0~17%间的相对差值小于在 35%~45%间的相对差值,并且这两种网络在节点删除 30%以后其性质就很接近.因此,从最大连通子图的平均最短路径分析,DEDA 的整体抗毁性略优于 EAEM.

总而言之,不论是随机攻击还是故意攻击,在所提出的抗毁性标准基础上,DEDA 的抗毁性能均优于 EAEM 模型.

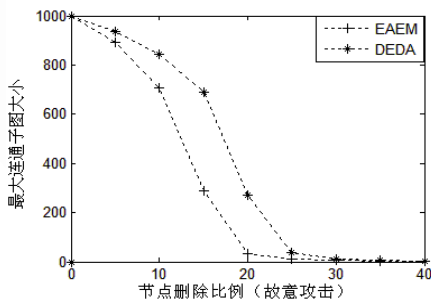


Fig.6 Size of LCC (targeted),

each data point is the average of 20 runs
图6 网络在故意攻击下最大连通子图大小, 其中每个点是运行 20 次所取的平均值

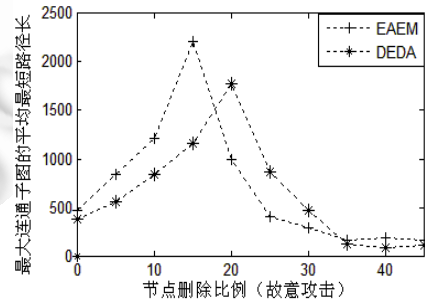


Fig.7 The average shortest path length in LCC (targeted),

each data point is the average of 20 runs
图7 模拟网络在故意攻击下最大连通子图平均最短路径,其中每个点是运行 20 次所取的平均值

5 结束语

本文在 EAEM 模型的基础上提出了基于节点度、剩余能量、传输距离的演化模型,即 DEDA 模型.较 EAEM 演化模型,该模型在连接过程中还考虑到了传输距离,所以更适用于无线传感网络的实际应用.利用仿真技术,分别从度分布、连通性、传输效率这 3 方面比较了 EAEM、DEDA 两种网络在故意攻击和随机攻击下的抗毁性.对各种攻击,虽然 DEDA 模型较 EAEM 的抗毁性不是一直最优的,但从整体比较分析可知,其抗毁性能仍优于 EAEM 模型.

本文主要是从拓扑演化的角度去分析网络的抗毁性,而忽视了从其他方面分析传感网络的抗毁性能,例如节点容量和链路的数据流量.因此,针对这方面的网络抗毁性研究将在后续的工作中展开.

References:

- [1] Akyildiz IF, Su W, Sankarasubramaniam Y, *et al.* A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 2002,40(8): 102–114.
- [2] Raghavendra CS, Sivalingam KM, Znati T. *Wireless Sensor Networks*. Springer-Verlag, 2004.
- [3] Bari A, Jaekel A, Jiang J, *et al.* Design of fault tolerant wireless sensor networks satisfying survivability and lifetime requirements. *Computer Communications*, 2012,35(3):320–333.
- [4] Chen IR, Wang Y, Wang DC. Reliability of wireless sensors with code attestation for intrusion detection. *Information Processing Letters*, 2010,110(17):778–786.
- [5] Masoum A, Jahangir AH, Taghikhaki Z. Survivability modeling of wireless sensor networks. In: *Proc. of the ISWCS 2008, IEEE Int'l Symp. on Wireless Communication Systems*. IEEE, 2008. 593–597.
- [6] Hajiaghayi MT, Immorlica N, Mirrokni VS. Power optimization in fault-tolerant topology control algorithms for wireless multi-hop networks. In: *Proc. of the 9th Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking*. ACM, 2003. 300–312.
- [7] Thallner B, Moser H. Topology control for fault-tolerant communication in highly dynamic wireless network. In: *Proc. of the 3rd Int'l Workshop on Intelligent Solutions in Embedded Systems*. IEEE, 2005. 89–100.
- [8] Han X, Cao X, Lloyd EL, *et al.* Fault-Tolerant relay node placement in heterogeneous wireless sensor networks. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2010,9(5):643–656.
- [9] Zhu H, Luo H, Peng H, *et al.* Complex networks-based energy-efficient evolution model for wireless sensor networks. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2009,41(4):1828–1835.
- [10] Boccaletti S, Latora V, Moreno Y, *et al.* Complex networks: Structure and dynamics. *Physics Reports*, 2006,424(4):175–308.
- [11] Girvan M, Newman MEJ. Community structure in social and biological networks. *Proc. of the National Academy of Sciences*, 2002, 99(12):7821–7826.
- [12] Glänzel W, Schubert A. Analysing scientific networks through co-authorship. *Handbook of Quantitative Science and Technology Research*. Springer-Verlag, 2005. 257–276.
- [13] Huberman BA, Adamic LA. Internet: Growth dynamics of the World-Wide Web. *Nature*, 1999,401(6749):131.
- [14] Thadakamaila HP, Raghavan UN, Kumara S, *et al.* Survivability of multiagent-based supply networks: A topological perspect. *IEEE Intelligent Systems*, 2004,19(5):24–31.
- [15] Watts DJ, Strogatz SH. Collective dynamics of 'small-world' networks. *Nature*, 1998,393(6684):440–442.
- [16] Barabási AL, Albert R. Emergence of scaling in random networks. *Science*, 1999,286(5439):509–512.
- [17] Wang XF, Chen G. Complex networks: Small-World, scale-free and beyond. *IEEE Circuits and Systems Magazine*, 2003,3(1): 6–20.
- [18] Li S, Li L, Yang Y. A local-world heterogeneous model of wireless sensor networks with node and link diversity. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2011,390(6):1182–1191.
- [19] Albert R, Jeong H, Barabási AL. Error and attack tolerance of complex networks. *Nature*, 2000,406(6794):378–382.



齐小刚(1973-),男,陕西宝鸡人,博士,教授,CCF 会员,主要研究领域为网络算法分析与设计,复杂系统建模与优化.
E-mail: xgqi@xidian.edu.cn



王慧芳(1989-),女,硕士,主要研究领域为无线传感网络的抗毁性.
E-mail: 626857924@qq.com



郑耿忠(1975-),男,博士,教授,主要研究领域为网络优化,无线传感器网络.
E-mail: zgengz@126.com



谢满德(1977-),男,副教授,CCF 会员,主要研究领域为无线传感器网络,社会网络,隐私保护.
E-mail: xiemd@zjgsu.edu.cn



段莉(1981-),女,高级工程师,主要研究领域为复杂系统建模与优化.
E-mail: Lduan2014@163.com

www.jos.org.cn

www.jos.org.cn