

基于无标度网络的无线传感器网络拓扑演化模型研究^①

郑耿忠^{②***} 刘三阳^{***} 齐小刚^{***} 郑 巍^{*}

(^{*} 西安电子科技大学计算机学院 西安 710071)

(^{**} 韩山师范学院数学与信息技术系 潮州 521041)

(^{***} 西安电子科技大学理学院 西安 710071)

摘 要 针对无线传感器网络抗毁性的问题,从复杂网络的视角提出了两个基于无标度网络的无线传感器网络拓扑演化模型。这两个演化模型先借助分簇算法实现传感器簇头的均匀分布,然后按照一定的连接策略,进行簇间的拓扑演化。根据提出的拓扑演化模型,设计了相应的拓扑演化算法,并对拓扑演化模型的动态特性进行了分析。仿真结果表明,由于新模型设计考虑了节点剩余能量、节点饱和度等问题,因此演化而成的网络拓扑更加符合无线传感器网络的实际应用,并且具有很好的抗毁性,进一步提高了网络的鲁棒性。

关键词 无标度网络,无线传感器网络(WSNs),拓扑演化,动态特性,抗毁性

0 引言

无线传感器网络在实际应用中一般都需要部署大量的传感器节点,由于节点往往工作在恶劣的环境中,并且通常采用能量有限的电池提供能量,因而很容易因能源耗尽或遭自然界破坏而出现部分节点失效的情况,此外,也可能因遭目的性的破坏而直接或间接地导致整个网络的瓦解。因此,如何节省节点能量和提高整个网络的抗毁性则成为无线传感器网络研究的重要课题。

抗毁性是评价无线传感器网络性能的一个重要指标,它指在部分节点受到能量、恶劣环境影响及蓄意攻击而失效时,网络保持其绝大部分节点仍然连通即网络维持其效能的能力。目前国内外对无线传感器网络的研究主要集中在路由协议、拓扑控制、定位、覆盖、功率控制等关键技术和一些硬件平台的设计上^[1],而对抗毁性的研究还不是很多。文献[2]提出了一种基于连通和覆盖相结合的无线传感器网络抗毁模型,当一个区域的节点间不连通时,它可以通过覆盖邻近区域的主要节点重新获得连通,从而保证网络的连通性。文献[3]研究了如何使用最少中继节点保证节点和基站之间的全连通,从而提高网络的抗毁性。文献[4]给出了一种通过增加中继

节点以改变节点通信范围,从而实现无线传感器网络容错的方法。文献[5]针对恶劣环境下传感器节点的部署问题构造了一个能量有效的容错拓扑,通过构建 k 连通网络,使得即使在部分节点失效的情况下, k 重覆盖仍然能保持网络的连通性。文献[6]利用软件再生方法学设计了一个实用的无线传感器网络抗毁模型。以上研究工作大都集中在通过构造 k 重覆盖网络或增加中继节点等冗余机制来实现无线传感器网络的抗毁性,很少有从复杂网络的角度来研究无线传感器网络的抗毁性问题。无标度特性的发现是复杂网络研究中的一大突破,无标度网络模型与以前的模型相比更加准确地把握了现实世界中复杂网络的最基本特征,对现实世界中的复杂网络如万维网、因特网等的结构给出了更为恰当的描述^[7],从而使得对这些网络及其动力学的研究能够构筑在更为合理的模型之上,也为研究无线传感器网络这种特殊复杂网络的抗毁性提供了一种合理的模型。本文利用复杂网络理论,在传统的 BA 无标度网络模型^[8]的基础上,提出了两种新的基于无标度网络的拓扑演化模型。与文献[8]的模型不同,本文所提出的模型在拓扑演化的连接策略上根据无线传感器网络的特点,充分考虑了节点剩余能量、节点适应度、节点饱和度及节点最大通信范围等问题,

① 国家自然科学基金(60974082, 60703118)和中央高校基本科研业务费(JY10000970013)资助项目。

② 男,1975 年生,博士生,副教授;研究方向:网络优化与无线传感器网络;联系人,E-mail: zgengz@126.com
(收稿日期:2010-04-28)

更加符合无线传感器网络拓扑演化的实际形式,而文献[8]的演化模型在拓扑演化时只考虑了网络节点度的问题。仿真结果表明,由新模型演化生成的网络拓扑具有很好的抗毁性,保证了无线传感器网络中数据的可靠传输,提高了网络的鲁棒性。

1 基于无标度网络的无线传感器网络拓扑演化

1.1 CHMM 算法

为实现无线传感器网络的簇间拓扑演化,需要事先实现网络中簇的合理分布。本文利用我们前面已有的工作——基于模块度的分簇分层 (clustering hierarchy based on modularity measure, CHMM) 算法^[9],对网络进行簇的划分。CHMM 算法不仅考虑了网络中每个节点的剩余能量问题,还兼顾了簇内节点的能量分布情况,使得整个网络中簇头的分布更加合理,能量分布更加均衡。与低能耗自适应分簇分层 (low-energy adaptive clustering hierarchy, LEACH) 算法相比,该算法能够获得一个更合理和更稳定的簇分布,并且能有效地提高传感器网络的寿命。图 1 给出了用 CHMM 算法对网络进行分簇的示意图。从图中可以看出,算法中簇头节点包括了尽可能多的节点且分布均匀合理,在算法中簇首节点不会彼此覆盖,避免了多个簇首节点相距较近的情况。

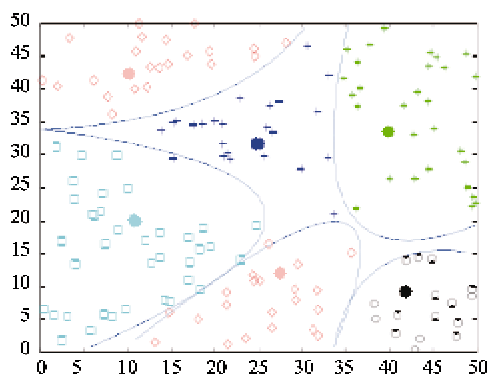


图 1 用 CHMM 算法对网络分簇示意图

1.2 拓扑演化机制

在真实网络中,节点选择新的连接边一般不采用 BA 无标度网络模型的全局择优方法,而是通过随机行走的方式选择邻居节点。例如万维网络中,一个新节点可能以一些随机节点为起点,通过页面超链进行浏览漫游,并将漫游中遇到的一些节点作为自己的新邻居,建立自己到这些节点的超链。人

际关系网络中,新加入的个体可能通过朋友的介绍认识新的朋友,从而建立新的人际关系连接。由此可见,随机行走的连接构造方式比全局择优方式更具现实意义。

基于上述原因,本文提出的无线传感器网络拓扑演化模型,采用随机行走的方式。演化过程首先利用 CHMM 算法实现无线传感器网络中簇头的合理分布,然后按照某种确定性的连接策略,通过随机行走的方式,按照 BA 无标度网络的演化机制有选择地建立簇头之间的连接关系进行簇间的拓扑演化。根据无线传感器网络的实际特点,本文提出的拓扑演化模型在连接策略上主要考虑了以下四方面的因素:

(1) 节点剩余能量 E_i : 无线传感器网络中,为延长节点的寿命,从簇头节点剩余能量考虑,可以认为簇头节点剩余能量越少,该簇头被连接的概率应该越少。

(2) 节点适应度 η_i : 在无线传感器网络中,节点获得新连接的能力与其固有的竞争能力(适应度)有关,适应度强的簇头节点可能比那些连接度高但适应度低的节点获得更多的新边,也就是“适者生存”规则。

(3) 节点饱和度 $k_{\max}$: 无线传感器网络中剩余能量多的簇头节点有更多的机会连接更多的边,但也容易使得这些节点过早地消耗能量,导致网络产生能量空洞,为此引入“节点饱和度”来限制每个簇头节点的最大连接度。

(4) 节点最大通信半径 $d_{\max}$: 无线传感器网络中簇头节点的通信范围是有限的,新加入的簇头 i 与已有簇头 j 之间的距离不能超过簇头节点的最大通信半径,即 $d_{ij} \leq d_{\max}$ 。

该模型包括四个重要特征:

(1) 簇分布 (cluster distribution): 利用 CHMM 算法实现网络节点合理的簇分布。

(2) 增长 (growth): 与无标度网络模型类似,即网络的规模是不断扩大的。

(3) 随机行走 (random walk): 新加入的簇头节点在网络中进行一轮随机行走构造局域网络。

(4) 策略连接 (politic attachment): 新加入的簇头节点在局域网络中以一定的概率选择簇头节点相连接。

1.3 拓扑演化模型

演化模型 I: 一个新簇头节点 j 与已经存在的簇头节点 i 相连的概率 Π_i , 与节点 i 的剩余能量 E_i 、

适应度 η_j 、通信半径 $d_{\max}$ 有关,并满足如下关系:

$$\Pi_i = \frac{E_i \eta_i}{\sum_j E_j \eta_j} \cdot P\{d_{ij} \leq d_{\max}\} \quad (1)$$

这里把 η_i 定义为 $\theta \frac{k_i}{t}$, θ 为比例系数, k_i 为节点度数, t 为网络拓扑的演化时间,其中, $P\{d_{ij} \leq d_{\max}\}$ 表示两节点间的距离小于节点间最大通信半径 $d_{\max}$ 的概率。

拓扑演化模型 II: 一个新簇头节点 j 与已经存在的簇头节点 i 相连的概率 Π_i , 与节点 i 的剩余能量 E_i 、适应度 η_j 、通信范围 $d_{\max}$ 、节点饱和度 $k_{i\max}$ 有关,并满足如下关系:

$$\Pi_i = \frac{E_i \eta_i (1 - \frac{k_i}{k_{i\max}})}{\sum_j E_j \eta_j (1 - \frac{k_j}{k_{j\max}})} \cdot P\{d_{ij} \leq d_{\max}\} \quad (2)$$

这里把 η_i 定义为 $\theta \frac{k_i}{t}$, θ 为比例系数, k_i 为节点度数, t 为网络拓扑的演化时间。

模型 II 的连接策略在模型 I 的基础上增加了“节点饱和度”这一约束条件,目的是防止节点因为过度连接而产生能量空洞。通过控制节点度的增长速度,可使网络拓扑演化更加符合实际。

1.4 拓扑演化算法

基于无标度网络的无线传感器网络拓扑演化算法描述如下:

步骤 1: 利用 CHMM 算法形成簇的合理稳定分布;

步骤 2: 由 sink 节点及其邻居簇头节点组成共 m_0 个节点的初始网络。

步骤 3: 在初始网络中随机选择一个簇头节点作为行走的开始节点,进行一个长度为 l 的随机行走,行走路径上的全部节点构成局域网络 $V_{\text{local-network}}$ 。

步骤 4: 以概率 Π_i (可选择式(1)或(2)式)从 $V_{\text{local-network}}$ 中随机选择 m 个不同的簇头节点,将新加入的簇头节点与 m 个簇头节点进行连接。

步骤 5: 返回步骤 3,直到网络中所有簇头节点都被互连。

2 网络拓扑演化的动态特性分析

2.1 演化模型 I 的动态特性分析

定理 1: 演化模型 I 的度分布是幂率分布的。

证明: 假设随机变量 k_i 是连续变化的,借助平

均场理论^[10],根据 Barabási 和 Albert 的无标度网络演化模型的平均场方程有

$$\frac{\partial(k_i)}{\partial(t)} \approx m \Pi_i = m \frac{E_i \eta_i}{\sum_j E_j \eta_j} \cdot P\{d_{ij} \leq d_{\max}\} \quad (3)$$

将 $\eta_i = \theta \frac{k_i}{t}$ 带入式(3)得

$$\frac{\partial(k_i)}{\partial(t)} = m \frac{E_i k_i}{\sum_j E_j k_j} \cdot P\{d_{ij} \leq d_{\max}\} \quad (4)$$

式中 $\sum_j E_j k_j \approx L \bar{E} < k >$, 其中 L 为新加入的簇头节点局部范围内簇头节点的个数, $\bar{E}$ 为网络内簇头节点剩余能量的均值, $< k >$ 为簇头节点的平均度,且 $< k > \approx 2m$, 因此有

$$\frac{\partial(k_i)}{\partial(t)} = \frac{E_i k_i}{2L \bar{E}} \cdot P\{d_{ij} \leq d_{\max}\} \quad (5)$$

对式(5)解微分方程,由此得到一个簇头节点的度小于 k 的概率为

$$\begin{aligned} p(k_i(t) < k) &= p(e^{\frac{E_i}{2L \bar{E}} \cdot P\{d_{ij} \leq d_{\max}\} (t-t_i)} \cdot m < k) \\ &= p(t - \frac{2L \bar{E}}{E_i \cdot P\{d_{ij} \leq d_{\max}\}} \ln \frac{k}{m} < t_i) \end{aligned} \quad (6)$$

假设以相同的时间间隔添加新簇头节点到网络中,则随机变量 t_i 服从 $(0, t)$ 区间上的均匀分布,概率密度函数为

$$p(t_i) = \frac{1}{m_0 + t} \quad (7)$$

将式(7)带入式(6)可得

$$\begin{aligned} p(k_i(t) < k) &= 1 - p(t_i < t - \frac{2L \bar{E}}{E_i \cdot P\{d_{ij} \leq d_{\max}\}} \ln \frac{k}{m}) \\ &= 1 - \frac{t - \frac{2L \bar{E}}{E_i \cdot P\{d_{ij} \leq d_{\max}\}} \ln \frac{k}{m}}{m_0 + t} \end{aligned} \quad (8)$$

则演化模型 I 的度分布为

$$\begin{aligned} p(k) &= \frac{\partial p(k_i(t) < k)}{\partial k} \\ &= \frac{2L \bar{E}}{E_i \cdot P\{d_{ij} \leq d_{\max}\}} \cdot \frac{m}{k} \cdot \frac{1}{m_0 + t} \end{aligned} \quad (9)$$

式中, $P\{d_{ij} \leq d_{\max}\} = \frac{\pi d^2}{S}$, S 为簇头节点最大范围的通信面积,因此有

$$p(k) = \frac{\partial p(k_i(t) < k)}{\partial k} = \frac{2L \bar{E}}{E_i} \cdot \frac{m}{m_0 + t} \cdot \frac{S}{\pi d^2} \cdot \frac{1}{k} \quad (10)$$

式中令 $a = \frac{2L\bar{E}}{E_i} \cdot \frac{m}{m_0 + t} \cdot \frac{S}{\pi d^2}$, a 与参数 k 无关, 因此

模型 I 的度分布 $p(k) = a \cdot \frac{1}{k}$ 服从幂率分布。

2.2 演化模型 II 的动态特性分析

定理 2: 当簇头节点度的最大值 $k_{i\max} \rightarrow \infty$ 时, 演化模型 II 的度分布服从幂率分布。

证明: 假设随机变量 k_i 是连续变化的, 借助平均场理论^[10], 根据 Barabási 和 Albert 的无标度网络演化模型的平均场方程有

$$\frac{\partial(k_i)}{\partial(t)} \approx m\Pi_i = m \frac{E_i\eta_i(1 - \frac{k_i}{k_{i\max}})}{\sum_j E_j\eta_j(1 - \frac{k_j}{k_{j\max}})} \cdot P\{d_{ij} \leq d_{\max}\} \quad (11)$$

将 $\eta_i = \theta \frac{k_i}{t}$ 带入(11)式得

$$\frac{\partial(k_i)}{\partial(t)} = m \frac{E_i k_i (1 - \frac{k_i}{k_{i\max}})}{\sum_j E_j k_j (1 - \frac{k_j}{k_{j\max}})} \cdot P\{d_{ij} \leq d_{\max}\} \quad (12)$$

为简化后面的理论分析过程, 假设网络中只有少数簇头节点的度数达到其饱和值, 即只有少数 k_j 与 $k_{j\max}$ 相近甚至等于 $k_{j\max}$, 由此得式(12)中 $\sum_j E_j k_j (1 - \frac{k_j}{k_{j\max}})$

$\approx \sum_j E_j k_j = L\bar{E} \langle k \rangle = 2mL\bar{E}$, 因此有

$$\frac{\partial(k_i)}{\partial(t)} = m \frac{E_i k_i (1 - \frac{k_i}{k_{i\max}})}{\sum_j E_j k_j (1 - \frac{k_j}{k_{j\max}})} \cdot P\{d_{ij} \leq d_{\max}\}$$

$$= \frac{E_i k_i (1 - \frac{k_i}{k_{i\max}})}{2mL\bar{E}} \cdot P\{d_{ij} \leq d_{\max}\} \quad (13)$$

对式(13)解微分方程, 可得演化模型 II 的度分布为

$$p(k) = \frac{\partial p(k_i(t) < k)}{\partial k} = \frac{2L\bar{E}}{E_i(m_0 + t)} \cdot \frac{k_{i\max}}{k_{i\max}k - k^2} \cdot \frac{1}{P(d_{ij} \leq d_{\max})} \quad (14)$$

式中 $P\{d_{ij} \leq d_{\max}\} = \frac{\pi d^2}{S}$, S 为簇头节点最大范围的通信面积, 因此有

$$p(k) = \frac{\partial p(k_i(t) < k)}{\partial k} = \frac{2L\bar{E}}{E_i(m_0 + t)} \cdot \frac{S}{\pi d^2} \cdot \frac{k_{i\max}}{k_{i\max}k - k^2} \quad (15)$$

式中, 当 $k_{i\max} \rightarrow \infty$ 时, 即不考虑节点饱和度的限制

时, $p(k) \approx \frac{2L\bar{E}}{E_i(m_0 + t)} \cdot \frac{S}{\pi d^2} \cdot \frac{1}{k}$, 令 $a =$

$\frac{2L\bar{E}}{E_i(m_0 + t)} \cdot \frac{S}{\pi d^2}$, a 与参数 k 无关, 因此模型 II 的度

分布 $p(k) = a \cdot \frac{1}{k}$ 服从幂率分布。

3 仿真与分析

网络的度分布是网络拓扑结构的重要特征属性, 对网络可靠性、传播动力学行为具有重要影响。利用 Matlab 作为仿真工具, 我们对两种演化模型的度分布进行了仿真分析, 并对模型的抗毁性进行了比较, 表 1 给出了一些相关参数的描述。

表 1 仿真参数

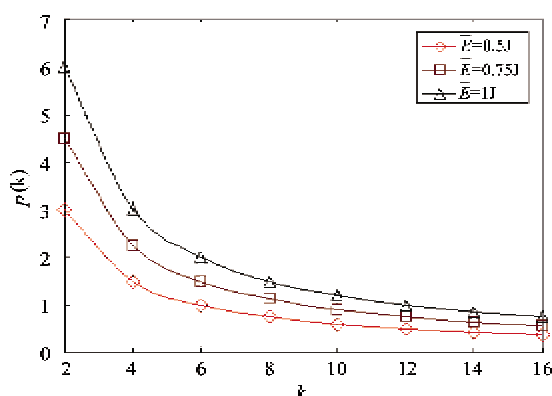
参数	描述	取值
m_0	网络中初始簇头节点的个数	3
m	在原有网络中用于与新加入的簇头节点连接而选取的节点个数	3
t	网络拓扑的演化时间	2000s
t_i	新簇头节点加入网络的时间	$t_i > 0$
L	新加入的簇头节点局部范围内簇头节点的个数	20
E_i	簇头节点的剩余能量	$0.5J \leq E_i \leq 1J$
$E_{\max}$	簇头节点最大能量	1J
$\bar{E}$	网络内簇头节点剩余能量的均值	0.5J, 0.75J, 1J
$d_{\max}$	簇头节点最大的通信半径	100m
d	新加入的簇头节点与网络中已有的簇头节点间距离	$10m \leq d \leq 100m$

图2表示的是演化模型I的簇头节点在不同剩余能量均值情况下度分布的曲线图。从图中可以看出,模型I的度分布是服从幂率分布的,因此经过模型I演化的网络拓扑具有无标度网络的特性,在一定程度上可以满足恶劣环境和军事应用对无线传感器网络鲁棒性的要求。此外,从图中可以看出,当簇头节点剩余能量均值比较大时节点度的分布比较大,即簇头节点在剩余能量较大时其拓扑演化能量更强,度分布效果相对更好,这一现象与我们在设计演化模型I时引入的簇头节点剩余能量的参数有关,也符合无线传感器网络拓扑演化的实际特点。

图3表示的是演化模型I在新加入的簇头节点与网络中已有簇头节点之间不同距离情况下节点度分布曲线图。从图中可以看出,当新加入的簇头节点与网络内已有簇头节点间的距离比较大时簇头节点的度分布比较低,这在一定程度上反映了当簇头节点间距离较大时,簇头节点间需要通过提高各自的发射功率来进行节点间的互连,因此节点的能量

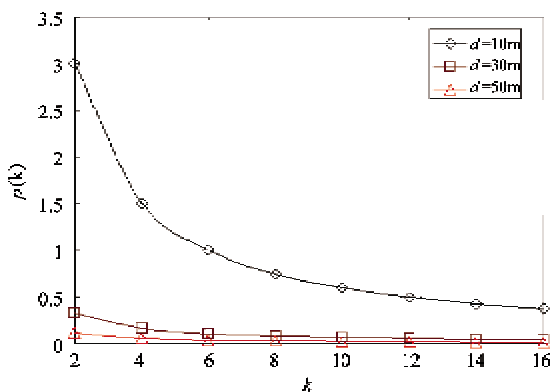
消耗相对较快,从而导致整个网络的度分布情况较差,这一现象与我们在设计演化模型I时引入的簇头节点的最大通信半径有关,同样也符合无线传感器网络拓扑演化的实际特点。

图4表示的是演化模型II的簇头节点在不同剩余能量均值情况下度分布的曲线图。从图中可以看出,模型II的度分布不服从严格的幂率分布,但由于在演化模型II的设计中引入了节点饱和度参数,所以从图中可以看到节点度分布的变化比较平缓,度分布更加均匀,即在模型中通过控制度的饱和值可以控制网络中节点度已经比较大的簇头节点的增长速度,并且达到度分布更加均匀的效果,这在一定程度上避免了簇头节点因为过度连接而导致能量空洞的出现,延长了网络的生命周期。由于模型II的度分布相对比较均匀,加上网络中存在数量较多的大度数簇头节点,因此由演化模型II演化的网络拓扑在面对随机故障和蓄意攻击时具有更好的抗毁性。与演化模型I类似,当网络中簇头节点剩余能量的均值比较大时节点度分布的效果相对更好些。



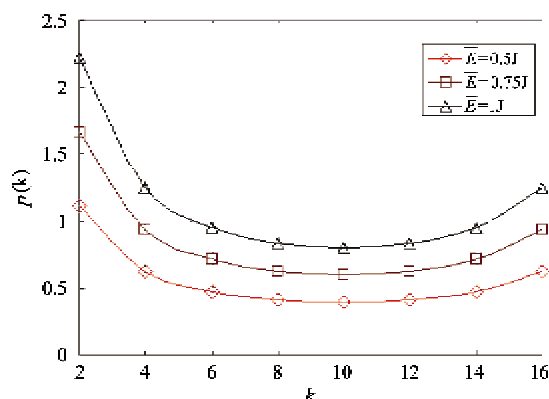
($m = m_0 = 3, E_i = 0.5J, L = 20, d = 10m, t = 2000s$)

图2 簇头节点在不同剩余能量均值的情况下节点度的分布



($m = m_0 = 3, E_i = 0.5J, \bar{E} = 0.5J, L = 20, t = 2000s$)

图3 簇头节点间不同距离情况下节点度的分布



($m = m_0 = 3, E_i = 0.5J, L = 20, d = 10m, t = 2000s, k_{imax} = 20$)

图4 簇头节点在不同剩余能量均值情况下节点度的分布

为进一步评价演化模型I和演化模型II的抗毁性,本文采用文献[11]提出的抗毁性测度对这两个模型和BA无标度网络模型进行比较。文献[11]定义的抗毁性测度为

$$C(T) = \frac{\sum_{i=1}^n k_i(T)}{N(N-1)}, T \geq 1 \quad (16)$$

该测度是通过打击后网络中能有效连接的单元比例来衡量网络的抗毁性,其中 $C(T)$ 为网络的覆盖率, T 为进行信息融合所允许的节点间的最大跳数, N 为初始网络节点数, $n(n \leq N)$ 为打击后网络最大

簇节点数, $k_i(T)$ 为与节点 i 距离 $l \leq T$ 的节点数。取与文献[11]一样的仿真参数, 网络大小为 $N = 500$, 簇头节点平均度 $\langle k \rangle = 4.6$, 仿真重复 20 次。

图 5 比较了随机攻击情况下三种模型的抗毁性。从图中可以看出, 对随机攻击, 模型 II 的网络覆盖率最高, 模型 I 次之, BA 模型最差, 但三者相差不是很大, 主要原因是因为模型 I 和模型 II 考虑了节点剩余能量的问题, 随着时间的推移, 网络中存活节点的数量比 BA 模型相对较多, 因此二者的网络覆盖率比 BA 模型高。另外, 由于模型 II 考虑了节点饱和度的问题, 网络中存在数量较多的大度数的节点, 对随机攻击具有较好的抗毁性, 因此模型 II 的覆盖率比模型 I 的覆盖率高。

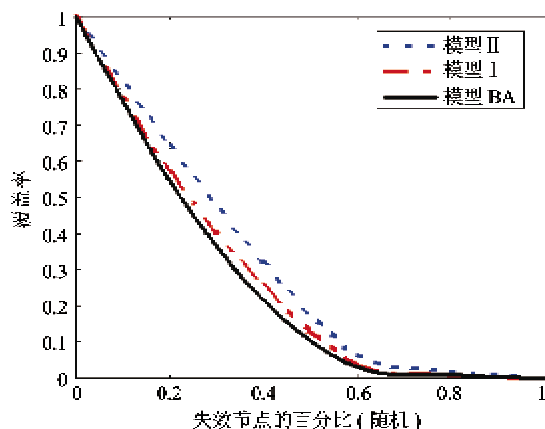


图 5 随机攻击情况下模型 I、模型 II、BA 模型抗毁性比较

图 6 比较了蓄意攻击情况下三种模型的抗毁性。从图中可以看出, 对蓄意攻击, 模型 II 的网络覆盖率最高, 模型 I 次之, BA 模型最差, 主要原因是由于两种模型在设计时都考虑了节点剩余能量的问

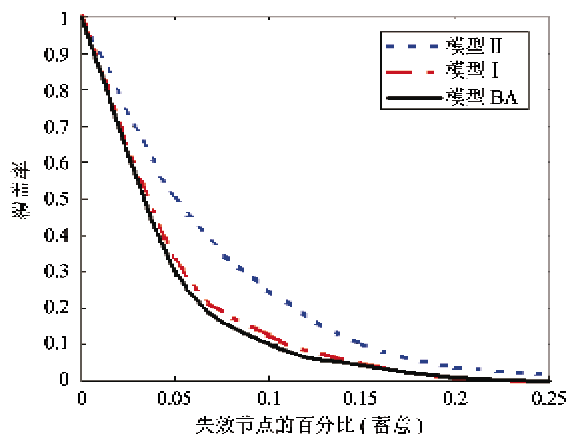


图 6 蓄意攻击情况下模型 I、模型 II、BA 模型抗毁性比较

题, 因此网络中存在着数量较多的节点。另外, 模型 II 因为考虑了节点饱和度问题, 使得节点度的分布比较均匀, 对蓄意攻击具有较好的抗毁性, 因此模型 II 的网络覆盖率最高。

4 结 论

如何提高网络的抗毁性是无线传感器网络面临的重要课题, 无标度网络为研究无线传感器网络的抗毁性提供了一种参考模型。本文将复杂网络理论引入无线传感器网络的拓扑演化, 根据无线传感器网络的实际特点, 引入节点剩余能量、节点饱和度、节点通信范围等参数, 通过修改节点优先连接概率, 在 BA 无标度网络模型的基础上, 提出了两个基于无标度网络的拓扑演化模型, 并利用平均场理论对演化模型的动态特性进行了分析。仿真结果表明, 演化模型 I 的度分布服从幂率分布, 具有较好的无标度网络特性, 对随机攻击具有较好的抗毁性; 演化模型 II 的度分布不服从严格的幂率分布, 但由于网络的度分布比较均匀, 且存在数量较多的度数较大的节点, 因此和模型 I 相比, 无论在随机攻击还是在蓄意攻击的情况下, 由模型 II 演化的网络拓扑均具有较好的抗毁性, 具有更广泛的实际应用价值。本文将复杂网络的思想引入无线传感器网络的抗毁性研究中, 为复杂网络理论在无线传感器网络中的应用提供了一种新的研究思路。

参考文献

- [1] Akyildiz I F, Su W. Wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks*, 2002, 38(4):393-422
- [2] Alireza M, Amirhossein J. Survivability modeling of wireless sensor networks. In: *Proceedings of the 2008 IEEE International Symposium on Wireless Communication Systems*, 2008. 593-597
- [3] Satyajayant M, Don H S. Constrained relay node placement in wireless sensor networks to meet connectivity and survivability requirements. In: *Proceedings of the 27th IEEE Communications Society Conference on Computer Communications*, Phoenix, USA, 2008. 879-887
- [4] Han X F, Cao X. Fault-tolerant relay node placement in heterogeneous wireless sensor networks. In: *Proceedings of the 26th IEEE International Conference on Computer Communications*, Anchorage, USA, 2007. 1667-1675
- [5] Bernd T, Heinrich M. Topology control for fault-tolerant communication in highly dynamic wireless networks. In: *Proceedings of the 3rd International Workshop on Intelli-*

- gent Solutions in Embedded Systems, Hamburg, Germany, 2005. 89-100
- [6] Kim D S, Mohammad S K. A framework of survivability model for wireless sensor network. In: Proceedings of the 1st International Conference on Availability, Reliability and Security, Vienna, Austria, 2006. 515-522
- [7] Albert R, Barabasi A L. Statistical mechanics of complex networks. *Review of Modern Physics*, 2002, 74(1):47-91
- [8] Albert R, Barabasi A L. Emergence of scaling in random networks. *Science*, 1999, 286(5439): 509-512
- [9] 郑巍,刘三阳等. 基于模块度的无线传感器网络分簇算法. 系统仿真学报,2009,21(1):65-68
- [10] Albert R, Barabasi A L. Mean-field theory for scale-free random networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 1999,272(1-2):173-187
- [11] 张明科,于长军,杨强等. 基于网络动力学特征信息融合系统抗毁性研究. 系统工程与电子技术,2008,30(12): 2421-2424

Study on the topology evolution modeling of wireless sensor networks based on scale-free network

Zheng Gengzhong^{* **}, Liu Sanyang^{***}, Qi Xiaogang^{***}, Zheng Wei^{*}

(^{*} School of Computer Science and Technology, Xidian University, Xi'an 710071)

(^{**} Department of Mathematic and Information Technology, HanShan Normal University, Chaozhou 521041)

(^{***} School of Science, Xidian University, Xi'an 710071)

Abstract

In view of the survivability of wireless sensor networks (WSNs), two topology evolution models for WSNs based on a scale-free network are proposed from the angle of complex networks. The models firstly use a clustering algorithm to achieve the cluster heads, uniform distribution, and then make the topology evolution among cluster heads according to a certain connection strategy. The corresponding topology evolution algorithms are given according to the proposed models, and the dynamic characteristics of the models are analyzed. The simulation results show that the network topologies formed by the new models are more fit for the practical applications of WSNs and have a good survivability, a further improved robustness due to the consideration of the node residual energy and the node saturation when designing the models.

Key words: scale-free networks, wireless sensor networks (WSNs), topology evolution, dynamic characteristic, survivability