

# 基于随机行走的无线传感器网络簇间拓扑演化

陈力军<sup>1),2)</sup> 刘 明<sup>3)</sup> 陈道蓄<sup>1),2)</sup> 谢 立<sup>1),2)</sup>

<sup>1)</sup>(南京大学计算机软件新技术国家重点实验室 南京 210093)

<sup>2)</sup>(南京大学-香港理工大学无线与移动传感器网络计算联合实验室 南京 210093)

<sup>3)</sup>(电子科技大学计算机科学与工程学院 成都 610054)

**摘 要** 无线传感器网络中的容错机制可防止节点出现因能量的耗尽而失效或链路因网络的入侵而失灵的现象. 目前无线传感器网络中的一些容错机制被相继提出, 这些方法的主要思想是采用冗余策略. 文中借助于复杂网络理论, 提出了一个基于随机行走的无线传感器网络簇间拓扑演化模型. 拓扑生长的动态特性分析表明: 由该模型演化成的网络拓扑具有无标度(scale-free)网络的性质. 许多研究工作已经表明, 容错能力不仅仅存在于有冗余的系统中, 而且同样也存在于无标度网络中.

**关键词** 复杂网络; 无线传感器网络; 随机行走; 拓扑演化

中图法分类号 TP393

DOI号: 10.3724/SP.J.1016.2009.00069

## Topology Evolution of Wireless Sensor Networks among Cluster Heads by Random Walkers

CHEN Li-Jun<sup>1),2)</sup> LIU Ming<sup>3)</sup> CHEN Dao-Xu<sup>1),2)</sup> XIE Li<sup>1),2)</sup>

<sup>1)</sup>(State Key Laboratory for Novel Software Technology, Nanjing University, Nanjing 210093)

<sup>2)</sup>(Cooperative Laboratory for Mobile and Wireless Sensor Networks of Nanjing University and

Hong Kong Polytechnic University, Nanjing 210093)

<sup>3)</sup>(School of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology, Chengdu 610054)

**Abstract** Fault-tolerance mechanisms are needed to protect wireless sensor networks from various faults such as node failure due to loss of power and link failure due to network intrusion. A number of fault-tolerance techniques have been developed specifically for wireless sensor networks. One of the major fault-tolerance techniques is the exploitation of redundancy. In this paper, an evolving network model based on the random walkers among the cluster heads is proposed. The analysis of growth dynamic demonstrates that such network exhibits a power-law distribution of node degree. Many research work has demonstrated that the fault tolerance is not only shared by all redundant systems, but also it is displayed in scale-free networks.

**Keywords** complex networks; wireless sensor networks; random walkers; topology evolution

## 1 引 言

无线传感器网络是由大量无处不在的、具有无

线通信与计算能力的微小传感器节点构成的自组织分布式网络系统. 通信技术的发展使人们不再满足于单个传感器独立的对环境进行感知, 而是希望通过传感器之间的相互协作与通信完成更为广泛与精

细的监测任务,并且把监测的数据以及部分处理的结果通过网络传送给相应的用户,完成更为复杂的计算、分析以及处理.由于无线传感器网络无需固定设备支撑,可以快速部署,同时具有易于组网、不受有线网络的约束等优点,将被广泛应用于灾难自救、医疗救护、环境检测、森林火险报警、火山监测和军事领域.

国际上,无线传感器网络引起了学术界、军界和工业界的极大关注,许多重要的计算机和无线通信的研发组织已深刻地认识到了这个问题,进行了无线传感器网络的基础理论和关键技术的研究.目前由微型传感器节点组成的无线传感器网络已经发展成为一个重要的计算平台<sup>[1-2]</sup>.

复杂网络是迅速发展的一门新兴学科,近年来大量复杂网络的研究成果发表在《Physical Review Letters》、《Physical Review E》、《Physica A》和《PANS》等物理类期刊以及《Nature》和《Science》等综合性期刊上<sup>[3-6]</sup>,从一个侧面反映出复杂网络已成为物理界的一个新的研究热点,其理论基础是统计物理学.我们将借助于对复杂网络理论的研究方法,利用网络的演化机制模型来研究无线传感器网络簇间拓扑的生长与形成,学科的交叉使我们对无线传感器网络拓扑的演化有了一个全新的认识,它不仅让我们认识到了无线传感器网络的结构增长,而且还能正确地反映出网络的许多几何性质.无线传感器网络簇间节点可以通过添加新的节点而主动向外连接,而在选择新簇间节点的下一个节点时,新节点连接到下一节点的概率应取决于节点能量的偏好依附性.这样演化成的网络拓扑具有很好的稳定性和可靠性,增强了网络簇间拓扑的容错和抗攻击能力.

## 2 研究背景

无线传感器网络的主要任务是将网络中传感器节点收集的数据传送给基站,一种实现该任务的最简单方法是直接传送,即网络中的每个节点把收集的数据直接传送给基站.然而,对于远离基站的无线传感器节点来说,这将使节点传送数据消耗的能量代价太高而使节点很快死亡.为解决这个问题,一些以节约能量为目的的算法相继被提出来,文献[7]提出了 LEACH 算法,它首先以自组织的方式随机选出部分传感器节点作为簇头,接着选出的簇头进行广播,普通节点根据接受信号的强弱来选择最近的

簇头加入,并同该簇头一起形成簇.然后簇中的成员节点把收集的数据传送给簇头,簇头将簇内所有成员节点收集的数据与本节点收集的数据进行聚合后发给基站.

文献[8]提出了 PEGASIS 协议.该协议把系统中所有无线传感器节点用贪婪算法构成一个链,在每一轮中,任意节点从位于链上的一相邻接点接收数据并把接收到的数据与本节点的数据聚合,接着把聚合后的数据发送到链上的另一相邻接点.这种发送和聚合是从链上的端节点开始,沿着链路直到指定节点,然后由指定节点把最后聚合的数据发送到基站.与 LEACH 协议相比,PEGASIS 协议与基站直接通信的节点更少而且数据聚合能力更强,从而减少了每一轮的能量损耗.但 PEGASIS 算法是将网络中的全部节点构造成一条链,如果链上的某一节点死亡则使得从链端到该节点的所有数据丢失,因此 PEGASIS 的容错性差(如图 1 所示,节点 4 死亡).

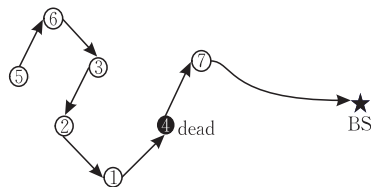


图 1 PEGASIS 协议示意图

文献[9]提出的 PEDAP 协议进一步发展了 PEGASIS 协议,其核心思想是把无线传感器网络的所有节点构造成一棵最小汇集树(Minimum Spanning Tree),每过一定的轮数后, PEDAP 协议需要基站重新计算路由信息用来排除死亡节点.然而对于 PEDAP 这种集中式的算法,如果节点因非能量耗尽而死亡时,则基站无法排除这类故障而仍然按照原来的信息计算最小汇集树(如图 2 所示,节点 4 死亡),从而影响了网络拓扑的可靠性.

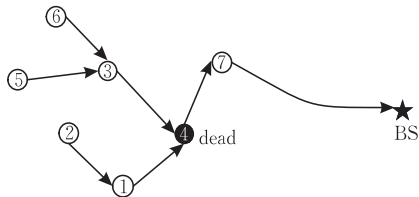


图 2 PEDAP 协议示意图

在实际应用中,无线传感器网络往往被部署在人们难以维护的地区,在恶劣环境因素的影响下,传感器节点一般具有较高的故障率,当网络中的一个或多个节点失效时,收集的数据将会丢失.因此人们

希望无线传感器网络拓扑具有良好的鲁棒性,在部分节点会受到能量和恶劣环境影响而失效时,局部失效不应该导致失去全局网络传输信息的能力。

但目前针对无线传感器网络结构容错性的研究涉及较少.在文献[10]中,作者研究了部署在恶劣环境下传感器网络的结构控制,提出了一种基于簇的构造  $k$ -连通( $k$ -connected)网络的方法,它借助于  $k$  个独立的簇头节点集合,利用簇头的冗余使形成的簇间通信结构成为  $k$  重覆盖网络,提高了网络结构的可靠性.然而更多的研究工作还是集中在无线自组织网络(wireless ad hoc networks)的容错上,如文献[11]研究了适用于大规模应用的无线自组织网络容错机制,分析了节点发射半径与所在区域节点密度间的关系,通过节点冗余的思想提出了一个构建容错网络拓扑的方法.文献[12]介绍了一个分布式的容错算法,其目的是为无线自组织网络构造一个容错的覆盖网络机制,并保证覆盖网络是  $k$ -连通( $k$ -connected)图.因此即使在部分节点失效的情况下, $k$  重覆盖网络依然能够保证网络的连通性,实现了网络通信的鲁棒性.文献[13]提出了一种在已存在的无线传感器网络中增加部分中继节点(relay nodes)的方法,目的是构成一个 2-连通(2-connected)的通信网络,使骨干(backbone)网络的结构具有容错的能力,以实现无线传感器网络更高层次的(high order)的连通性.文献[14]考虑了异构(heterogeneous)无线传感器网络的容错性,提出了一种改变节点的通信范围以实现不同容错等级的方法,但具体做法也是在无线传感器网络中增加中继节点,并假设这些中继节点具有不同的发射半径。

以上研究工作都是集中在构造  $k$  重覆盖网络或增加工作节点来进行的,这些冗余机制尽管满足了容错性的要求,但由于增加了参与通信的节点个数,因而降低了系统的性能、影响了网络的寿命.复杂网络理论的研究结果表明,复杂系统的容错能力不仅仅存在于这些具有冗余组件的系统,而且也同样存在于具有无标度特征的网络之中.本文借助于复杂网络理论,提出了一种全新的无线传感器网络结构的容错机制。

首先在我们已有工作 DEEG 协议<sup>[15]</sup>的基础上,利用该协议中簇头的生成算法,在大规模部署的无线传感器网络中形成分布均匀的簇头节点,然后采用随机行走的簇间演化机制,使簇头之间在通信时形成的网络拓扑具有容错性很强的无标度(scale-free)网

络的特征,从而提高了数据收集和传输的可靠性。

下面介绍两个与本文研究有关的产生无标度网络的机制——Barabási-Albert 无标度模型和随机行走方法。

#### (1) Barabási-Albert 无标度(scale-free)模型

在复杂网络的研究中,人们发现自然界中许多网络节点度的分布  $p(k)$  符合幂率分布,人们常常把这类网络称为无标度网络(scale-free networks).无标度网络的形成目前认为偏好依附(preferential attachment)是一个很好的形成机制,即 Barabási-Albert 无标度模型<sup>[16]</sup>,定义为以下两个步骤:

① 生长(growth).以少量的  $m_0$  个节点开始,在每一个时间步骤,往存在的网络中加入一个新的节点,同时加上从此节点出发的  $m(\leq m_0)$  条边,形成新的网络;

② 偏好依附(preferential attachment).在选择一个新加入节点与存在节点相连时,假设新节点与节点  $i$  相连的概率  $\Pi(k_i)$  取决于节点  $i$  的度  $k_i$ ,并且此概率服从如下规则:

$$\Pi(k_i) = \frac{k_i}{\sum_j k_j} \quad (1)$$

式中  $\sum_j k_j$  是所有已存在节点的度的总和.在经过  $t$  时间步骤后,此模型将形成一个具有  $N = t + m_0$  个节点,  $mt$  条边的随机网络,网络中节点的度满足幂率分布,即  $p(k) \sim 2m^2/k^3$ .

#### (2) 随机行走产生的无标度网络

文献[17]提出了一种有别于 Barabási-Albert 模型产生无标度网络的方法,即随机行走的机制,网络的演化是通过一系列的随机行走来选择新加入节点的父亲节点的过程,很显然它是一种局部范围(local-world)的演化方法.研究结果表明这种机制能产生无标度网络,它的度的分布与著名的 Barabási-Albert 模型具有完全相同的形式,即  $p(k) \propto k^{-3}$ .其算法如下:

1. 初始化阶段,网络共有  $m_0$  个节点,并彼此相连;
2. 随机选择一个节点作为随机行走的起始点;
3. 每一步行走,行走者行走至一个被随机选择的邻居节点,在随机行走长度为  $l$  步后,行走到达的节点被标记,行走过程被重复直到  $m \leq m_0$  个不同的节点被标记;
4. 一个新的节点加入网络并通过不同的边连接到  $m$  个被标记的节点.从步 2 开始,整个过程不断被重复直到网络生长至  $N$  个节点。

### 3 基于随机行走的簇间网络拓扑演化

我们借助于随机行走的机制<sup>[17]</sup>来实现无线传感器网络簇间拓扑的演化,考虑到节点的当前能量值,在选择新加入簇头节点的父节点时,此时的偏好依附性取决于节点的当前能量值而不再是节点的度.动态特性分析表明,这样的网络具有无标度网络的特征.

由于 LEACH 协议产生的簇头分布较差,如图 3 所示.因此我们采用 DEEG 协议<sup>[15]</sup>中的簇生成算法,可以使簇头节点在无线传感器网络中完全覆盖整个区域,如图 4 所示.我们分别在  $100\text{m} \times 100\text{m}$  和  $200\text{m} \times 200\text{m}$  两个场景中随机地对簇头的数量和分布进行了 200 次抽样,实验结果说明,运行 DEEG 协议后,每轮生成的簇头数量与监测区域的面积  $A$  和簇半径  $R_c$  有关,并且在生成的簇头区域  $A$  中分布均匀.图 5 是场景为  $A = 100\text{m} \times 100\text{m}$ , 节点数量  $N = 300$  的节点部署图,图 6 是在第 420 轮时的簇头分布示意图,可以看到,任意簇头之间的距离大于簇半径  $R_c$ ,生成的簇头完全覆盖了整个网络中的所有节点.

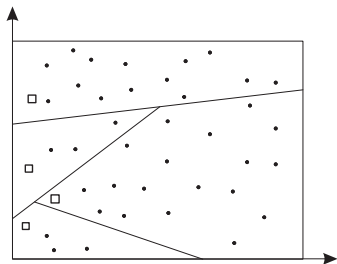


图 3 LEACH 簇分布示意图

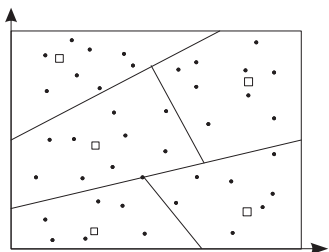


图 4 DEEG 簇分布示意图

那么簇间拓扑的演化机制如下:

1. 初始化:以基站和它的邻居簇头节点组成的  $m_0$  个节点作为初始点,并使基站与它们两两相连;
2. 随机选择一个簇头节点作为随机行走的起始点;
3. 每一步行走,行走者行走至当前簇头节点  $j$  的邻居节点  $i$  的概率  $\Pi(i)$  取决于它当前的能量值  $E_i$

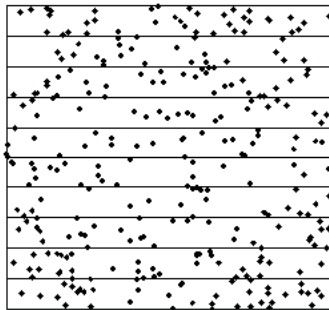


图 5 节点分布图,  $A = 100\text{m} \times 100\text{m}$ ,  $N = 300$

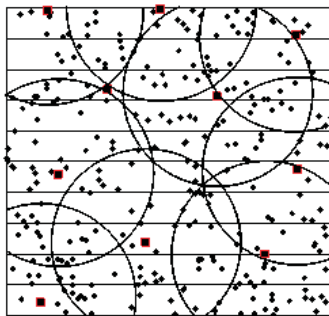


图 6 第 420 轮中簇头分布示意图

$$\Pi(i) = \frac{E_i}{\sum_{k_j \in \text{Neighbors}} E_{k_j}} \quad (2)$$

式中  $k_j$  为簇头节点  $j$  的度,随后节点  $i$  被标记,行走过程被重复直到  $m \leq m_0$  个不同簇头节点被标记;

4. 如果随机行走者到达了一个已经被标记过的簇头节点,则新的行走从该簇头节点开始;

5. 一个新的簇头节点加入并连接到  $m$  个被标记的簇头节点,整个过程从步 2 开始被重复直到无线传感器网络中的所有簇头节点都被互连.

由于无线传感器网络能量的有效性始终是研究者应该关注的关键问题之一,因此本文提出的簇间拓扑的演化机制在选择簇头互连时,以簇头节点的当前能量值作为在建立连接时的判断依据,根据簇间拓扑的演化机制,对于具有较高能量值的节点,被选择互连的可能性大大增加.由于簇头节点的选取是动态变化的,因此该方法可以维持整个网络中节点能量的均衡,可有效避免部分节点因能量的耗尽而过早消亡的现象.

### 4 簇间网络拓扑演化的动态特性分析

设无线传感器网络簇头节点共有  $N$  个,那么簇头节点  $j$  被选取为起始节点的概率为  $p(j) = 1/N$ ,从该簇头节点行走至它的邻居簇头节点  $i$  的概率  $p(i)$  可有 Bayes 公式求得

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

其中条件概率  $p(i/j)$  表示随机行走者在簇头节点  $j$  被选取为起始节点后,随机行走至它的邻居簇节点  $i$  的概率,可表示为

$$p(i/j) = \Pi(i) = \frac{E_i}{\sum_{k_j} E_{k_j}} \quad (4)$$

式中,  $E_i$  为簇头节点  $j$  的邻居簇头节点  $i$  当前具有的能量值,  $k_j$  表示起始簇头节点  $j$  具有的邻居数,而  $\sum_{k_j} E_{k_j}$  可进一步表示为

$$\sum_{k_j} E_{k_j} = k_j \langle E_{k_j} \rangle \quad (5)$$

其中,  $\langle E_{k_j} \rangle$  为簇头节点  $j$  的邻居节点具有的能量均值,同样条件概率  $p(j/i)$  可表示为

$$p(j/i) = \frac{E_j}{\sum_{k_i} E_{k_i}} \quad (6)$$

式中,  $E_j$  为簇头节点  $j$  当前具有的能量值,  $k_i$  表示簇头节点  $i$  具有的邻居数,那么  $\sum_{k_i} E_{k_i}$  可表示为

$$\sum_{k_i} E_{k_i} = k_i \langle E_{k_i} \rangle \quad (7)$$

将上述相关结果代入式(3)可得

$$p(i) = \frac{\frac{E_i}{\sum_{k_j} E_{k_j}} \times \frac{1}{N}}{\frac{E_j}{\sum_{k_i} E_{k_i}}} = \frac{\frac{E_i}{k_j \langle E_{k_j} \rangle} \times \frac{1}{N}}{\frac{E_j}{k_i \langle E_{k_i} \rangle}} = \frac{E_i k_i \langle E_{k_i} \rangle}{k_j \langle E_{k_j} \rangle E_j} \times \frac{1}{N} \quad (8)$$

进一步简化可得

$$p(i) = \frac{E_i \langle E_{k_i} \rangle}{E_j \langle E_{k_j} \rangle} \times \frac{k_i}{N k_j} \quad (9)$$

式中  $N k_j = N \langle k_i \rangle = \sum_j k_j$ , 并设

$$f(E) = \frac{E_i \langle E_{k_i} \rangle}{E_j \langle E_{k_j} \rangle} \quad (10)$$

所以式(9)可表示为

$$p(i) = f(E) \times \frac{k_i}{\sum_j k_j} \quad (11)$$

下面,就  $f(E)$  的不同取值分别讨论之.

**情形 A:  $f(E) = 1$ .**

在条件  $f(E) = 1$  约束下,无线传感器网络簇间拓扑的演化模型与 Barabási-Albert 无标度模型相同.簇头节点  $i$  的度(已连接的邻居节点的个数)随时间演化的过程如下:

$$\frac{\partial k_i}{\partial t} = \frac{k_i}{2t} \quad (12)$$

如图 7 所示,簇头节点度的分布  $p(k)$  满足

$$p(k) = \frac{2m^2 t}{m_0 + t} \times \frac{1}{k^3} \approx \frac{2m^2}{k^3} \quad (13)$$

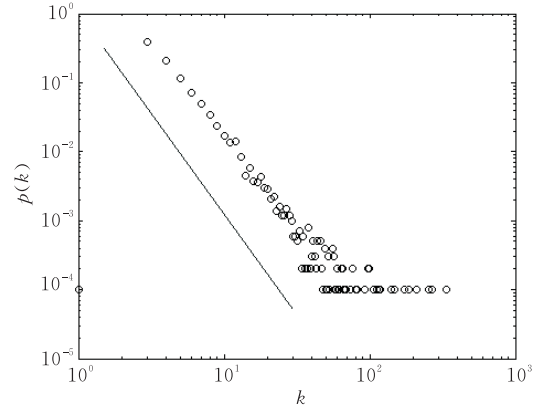


图 7 Barabási-Albert 无标度模型度的分布  
(其中  $N=10000$ ,  $m=m_0=3$ , 直线由式(13)给出)

**情形 B:  $f(E) \neq 1$ .**

借助于 Mean-Field 理论<sup>[16]</sup>,我们将分析簇头节点度的分布规律.假设随机变量  $k_i$  是连续变化的,那么概率  $p(i)$  可表示为  $k_i$  连续变化的速率,即

$$\frac{\partial k_i}{\partial t} = m p(i) = m f(E) \times \frac{k_i}{\sum_j k_j} \quad (14)$$

式中  $\sum_j k_j = 2mt$ ,  $t$  是网络簇间拓扑的演化时间,那么

$$\frac{\partial k_i}{\partial t} = f(E) \times \frac{k_i}{2t} \quad (15)$$

解微分方程,有

$$\frac{dk_i}{k_i} = f(E) \times \frac{dt}{2t} \quad (16)$$

可解得

$$k_i = C t^{\frac{1}{2} f(E)} \quad (17)$$

有初始条件  $k_i(t) = m$ , 可得

$$k_i(t) = m \left( \frac{t}{t_i} \right)^{\frac{1}{2} f(E)} \quad (18)$$

那么一个簇头节点的度小于  $k$  的概率  $p(k_i(t) < k)$  可由下式求得

$$p(k_i(t) < k) = p\left(t_i > \frac{m^{\frac{2}{f(E)}} t}{k^{\frac{2}{f(E)}}}\right) \quad (19)$$

设在相同的时间间隔,我们增加新的簇头节点到被连接的网络中,那么  $t_i$  的概率分布具有常数概率密度:

$$p(t_i) = \frac{1}{m_0 + t} \quad (20)$$

将此式代入式(19)可得

$$p\left(t_i > \frac{m^{\frac{2}{f(E)}} t}{k^{\frac{2}{f(E)}}}\right) = 1 - p\left(t_i \leq \frac{m^{\frac{2}{f(E)}} t}{k^{\frac{2}{f(E)}}}\right) = 1 - \frac{m^{\frac{2}{f(E)}} t}{k^{\frac{2}{f(E)}} (t + m_0)} \quad (21)$$

这样,节点度的分布  $p(k)$  可由下式获得

$$\begin{aligned} p(k) &= \frac{\partial p(k_i(t) < k)}{\partial k} = \frac{2}{f(E)} \frac{m^{\frac{2}{f(E)}} t}{m_0 + t} \times \frac{1}{k^{1+\frac{2}{f(E)}}} \\ &= \frac{2}{f(E)} \frac{m^{\frac{2}{f(E)}} t}{m_0 + t} \times \frac{1}{k^\gamma} \end{aligned} \quad (22)$$

式中  $\gamma = 1 + \frac{2}{f(E)}$ .

下面利用本文提出的簇间拓扑演化机制进行仿真分析,我们以 50 个簇头节点为例研究节点度的分布规律,仿真结果如图 8 所示,结果表明该机制演化成的网络拓扑具有无标度网络的性质,图中直线由式(22)给出.

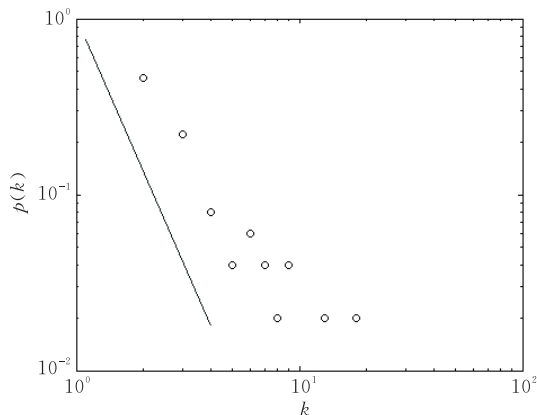


图 8 当  $f(E)=1$  时,簇间拓扑节点度分布仿真结果  
(其中  $m_0=3, m=2$ )

## 5 分析与结论

由式(22)可知,当  $f(E)=1, \gamma=1+2/f(E)=3$ ,显然 Barabási-Albert 无标度模型是情形 B 的一个特例. 为了进一步分析簇间拓扑节点度的分布情况,我们首先考虑当  $f(E)<2$  时,有  $\gamma=1+2/f(E)>2$ ,如图 9 所示,其中  $f(E)=1, 1/2, m=1$ . 与 Barabási-Albert 无标度模型( $f(E)=1$ )比较,无线传感器网络簇间拓扑稀疏性将随着  $f(E)$  的减少而有所改善. 其次当  $f(E)=2$  时,有  $\gamma=1+2/f(E)=2$ ,那么

$$p(k) = \frac{mt}{m_0 + t} \times \frac{1}{k^2} \approx m \frac{1}{k^2} \propto \frac{1}{k^2} \quad (23)$$

$p(k)$  的分布情况如图 10 所示,图中  $f(E)=1, 2, m=1$ . 最后当  $f(E)>2$  时,有  $\gamma=1+2/f(E)<2$ . 图 11 所示为  $f(E)=1, 2, 4, m=1$  时  $p(k)$  的分布情

况,将 Barabási-Albert 无标度模型( $f(E)=1$ )和  $f(E)=2$  相比较可知, $f(E)$  的增加使无线传感器网络簇间节点度的分布  $p(k)$  增加,这将影响到网络拓扑的稀疏性,同时值  $m$  的选取与网络拓扑的稀疏性有着十分密切的关系,因此在簇间拓扑演化保证结构鲁棒性的同时,为了确保网络拓扑的简单性,应该取  $m=1$ . 由于  $f(E)$  与网络拓扑的稀疏性有关,今后我们的工作将研究  $f(E)$  对网络拓扑演化的影响,探讨  $f(E)$  与拓扑简单性之间的关系.

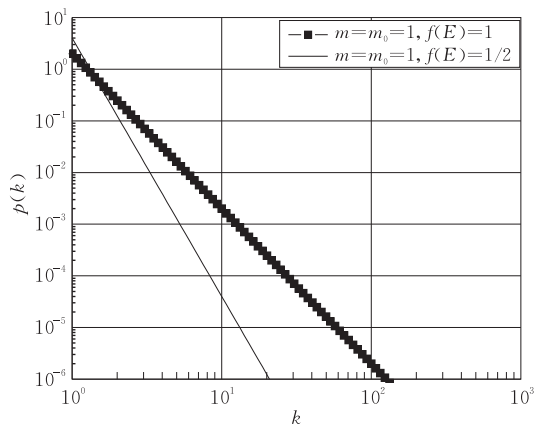


图 9 根据式(22),当  $f(E)=1, 1/2$  时,簇间拓扑节点度分布

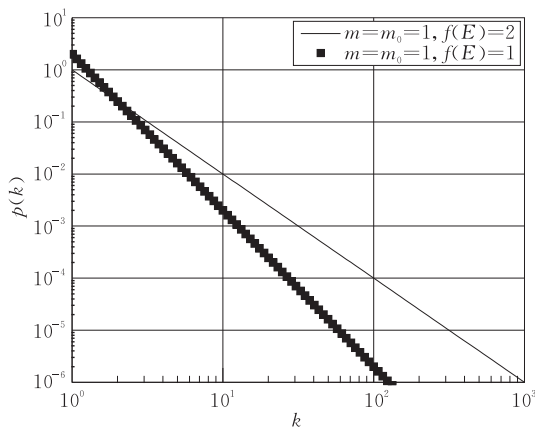


图 10 根据式(22),当  $f(E)=1, 2$  时,簇间拓扑节点度分布

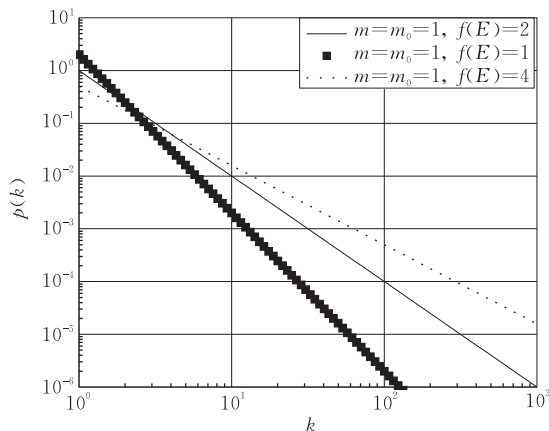


图 11 根据式(22),当  $f(E)=1, 2, 4$  时,簇间拓扑节点度分布



基于随机行走的无线传感器网络簇间拓扑演化所产生的网络结构具有无标度(scale-free)网络的特征,因此簇间拓扑具有无标度网络的容错能力<sup>[4,18-19]</sup>,尽管本文是基于 DEEG 协议工作的基础上展开的,但是该网络生长机制可广泛适用于各种大规模部署的以多跳方式通信的无线传感器网络,它可保持演化后的网络拓扑具有无标度的特征,可满足恶劣环境和军事应用等对无线传感器网络拓扑鲁棒性的要求,具有广阔的应用前景。

**致 谢** 审阅该论文的各位专家给出了深入细致和大量中肯的见解、评论和建议,使论文在这些方面有机会补充、修改和完善,在此向审稿人表达诚挚的敬意和衷心的感谢!

### 参 考 文 献

- [1] Estrin D, Girod L, Pottie G, Srivastava M. Instrumenting the world with wireless sensor networks//Proceedings of the International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP2001). Salt Lake City, Utah, 2001
- [2] Pottie G J, Kaiser W J. Wireless integrated network sensors. Communications of the ACM, 2000, 43(5): 51-58
- [3] Barabási A-L, Albert R. Emergence of scaling in random networks. Science, 1999, 286: 509-512
- [4] Albert R, Jeong H, Barabási A-L. Error and attack tolerance of complex networks. Nature, 2000, 406: 378-382
- [5] Pacheco Jorge M, Traulsen Arne, Nowak Martin A. Co-evolution of strategy and structure in complex networks with dynamical linking. Physical Review Letters, 2006, 97: 025103
- [6] González Marta C, Barabási Albert-László. Complex networks: From data to models. Nature Physics, 2007, 3: 224-225
- [7] Heinzelman W R, Kulik J, Balakrishnan H. Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks//Proceedings of the 5th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. Seattle, WA, 2001: 174-185
- [8] Lindsey S, Raghavendra C S. Pegasus: Power-efficient gathering in sensor information systems//Proceedings of the IEEE Aerospace Conference. 2002, 3: 1125-1130
- [9] Tan Huseyin Ozgur et al. Power efficient data gathering and

- aggregation in wireless sensor networks. SIGMOD Record, 2003, 32(4): 66-71
- [10] Younis O, Fahmy S, Santi P. Robust communications for sensor networks in hostile environments//Proceedings of the 12th IEEE International Workshop on Quality of Service (IWQOS 2004). 2004: 10-19
- [11] Li X-Y, Wan P-J, Wang Y, Yi C-W. Fault tolerant deployment and topology control in wireless networks//Proceedings of the 4th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing (MobiHoc 2003). Annapolis, Maryland, USA, 2003: 117-128
- [12] Thallner Bernd, Moser Heinrich. Topology control for fault-tolerant communication in highly dynamic wireless networks//Proceedings of the 3rd International Workshop on Intelligent Solutions in Embedded Systems (WISES 2005). 2005
- [13] Kashyap A, Khuller S, Shayman M. Relay placement for higher order connectivity in wireless sensor networks//Proceedings of the 25th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM'06). Spain, 2006: 1-12
- [14] Han Xiao-Feng, Cao Xiang, Lloyd Errol, Shen Chien-Chung. Fault-tolerant relay node placement in heterogeneous wireless sensor networks//Proceedings of the 26th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM'07). Anchorage, AK, 2007: 1667-1675
- [15] Liu Ming, Gong Hai-Gang, Mao Ying-Chi, Chen Li-Jun, Xie Li. A distributed energy-efficient data gathering and aggregation protocol for wireless sensor networks. Journal of Software, 2005, 16(12): 2106-2116(in Chinese)  
(刘明, 龚海刚, 毛莺池, 陈力军, 谢立. 高效节能的传感器网络数据收集和聚合协议. 软件学报, 2005, 16(12): 2106-2116)
- [16] Barabási A-L, Albert R, Jeong H. Mean-field theory for scale-free random networks. Physica A, 1999, 272: 173-187
- [17] Saramaki Jari, Kaski Kimmo. Scale-free networks generated by random walkers. Physica A, 2004, 341: 80-86
- [18] Callaway D S, Newman M E J, Strogatz S H, Watts D J. Network robustness and fragility: Percolation on random graphs. Physical Review Letters, 2000, 85: 5468-5471
- [19] Holme P, Kim B J, Yoon C N, Han S K. Attack vulnerability of complex networks. Physical Review E, 2002, 65: 056109
- [20] Newman M E J, Strogatz S H, Watts D J. Random graphs with arbitrary degree distributions and their applications. Physical Review E, 2001, 64: 026118



**LIU Ming**, born in 1972, Ph. D., associate professor.

**CHEN Li-Jun**, born in 1961, Ph.D., professor. His research interests include distributed computing and wireless sensor networks.

His research interests include distributed computing and wireless sensor networks.

**CHEN Dao-Xu**, born in 1947, professor, Ph. D. supervisor. His research interests include distributed computing and pervasive computing.

**XIE Li**, born in 1942, professor, Ph. D. supervisor. His research interests include distributed computing and network security.

## Background

Fault-tolerance mechanisms are needed to protect wireless sensor networks from various faults such as battery running out, etc and node failure due to loss of power, compromise, etc and link failure due to network intrusion, etc. A wireless sensor network that is not prepared to deal with such situations may suffer a reduction in overall lifetime, or lead to dangerous consequences in critical application contexts. A number of fault-tolerance techniques have been developed specifically for wireless sensor networks. One of the major fault-tolerance techniques is the exploitation of redundancy, which is often a default condition in wireless sensor networks.

Many properties of complex networks have currently been reported in the literatures. A significant discovery is the observation that many large-scale complex networks are scale-free. People found that scale-free networks display an

unexpected degree of robustness, the ability of their nodes to communicate being unaffected by even unrealistically high failure rates. The robustness of scale-free networks is rooted in their redundancy, which for networks represents the existence of many alternative paths that can preserve communication between nodes even if some nodes are absent.

With the help of the theory of complex networks, we propose an evolving network model of wireless sensor networks among the cluster heads by random walkers. The analysis of growth dynamic demonstrates that the network topology of evolving has power-law distribution of the connectivities, and Barabási-Albert scale-free model is only one of its special cases. This work has been supported in part by the National Natural Science Foundation of China under Grant No. 60573132, "Topology control based on the theory of complex networks in wireless sensor networks".