

# 基于适应度和局域世界的无线传感器网络拓扑演化模型

马士强<sup>1</sup>, 齐小刚<sup>1</sup>, 刘立芳<sup>2</sup>, 郑耿忠<sup>2</sup>

(1. 西安电子科技大学 理学院, 陕西 西安 710071; 2. 西安电子科技大学 计算机学院, 陕西 西安 710071)

**摘要:** 针对无线传感器网络(WSN)节点通信范围有限和网络节点易失效的问题, 利用复杂网络理论提出了一种基于适应度和局域世界的无线传感器网络拓扑演化模型(EBFL, topology evolution of wireless sensor networks based on fitness and local world), 该模型比随机行走(ERW, evolution by random walk)模型更适合无线传感器网络拓扑演化的实际特点。动态特性分析和仿真结果表明, 该模型具有无标度网络的特征, 且网络拓扑具有较好的容错性, 在能耗均衡方面也优于ERW。

**关键词:** 无线传感器网络; 无标度网络; 适应度; 局域世界; 容错性

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2011)9A-0270-06

## Topology evolution of wireless sensor networks based on fitness and local world

M A Shi-qiang<sup>1</sup>, Q I X iao-gang<sup>1</sup>, L I U L i-fang<sup>2</sup>, Z H E N G G eng-zhong<sup>2</sup>

(1. Department of Applied Mathematics, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. School of Computer Science & Technology, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** WSN (wireless sensor networks) has the characteristics of limited communication radius and easy invalidation. Aimed at these characteristics and based on scale-free theory, a topology evolution EBFL (topology evolution of wireless sensor networks based on fitness and local world), which is more suitable for WSNs than ERW (topology evolution by random walker) is proposed. The dynamic analysis demonstrates that EBFL can generate a topology of WSN fitting scale-free networks characteristics. Simulation shows that networks generated by EBFL has good fault-tolerance and performs better than ERW in energy balance.

**Key words:** WSN; scale-free networks; fitness; local world; fault-tolerance

## 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。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<sup>[1-3]</sup>。

无线传感器网络具有工作环境比较恶劣和能量有限的特点,经常有节点失效的情况发生,网络拓扑结构变化很快,而网络一旦形成,人很少干预

收稿日期: 2011-07-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60703118, 60874085, 60974082); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(JY 10000970013, JY 10000970012)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (60703118, 60874085, 60974082); Central University Basic Research Funds(JY 10000970013, JY 10000970012)

其运行, 因此一种容错性较好的拓扑和路由演化机制对于提高无线传感器网络的性能及其生命周期有很大的意义。

目前, 对无线传感器网络容错的研究多是在冗余机制的基础上开展的<sup>[4,5]</sup>。文献[4]利用簇头的冗余, 通过构建簇间的  $K$ -重覆盖网络来实现网络的容错, 文献[5]采用的是在无线传感器网络中增加部分中继节点, 构造一个 2-连通的通信网络, 使得骨干网络具有容错能力。以上 2 种方案都是通过增加通信节点的方法来实现容错功能的。这些方法虽然能够增加网络的容错性, 但采用冗余节点增加了不必要的通信链路, 反而会降低网络的性能, 增加网络的负荷, 减少网络的工作寿命。

近年来, 关于复杂网络的研究正方兴未艾。1999 年, Barabasi 和 Albert 在 Science 上发表文章指出, 许多实际的复杂网络的连接度分布具有幂律形式。由于幂律分布没有明显的特征长度, 该类网络又被称为无标度 (Scale-Free) 网络<sup>[6]</sup>。无标度网络对于随机故障具有较好的顽健性, 因此在文献[7]作者提出的一种基于随机行走的无线传感器网络簇间拓扑演化方案 (ERW) 构建的无线传感器网络的拓扑结构具有无标度网络 (scale-free) 的性质, 具有无标度网络的容错能力。但 ERW 机制没有考虑到无线传感器本身的通信特点, 因此该机制在无线传感器网络中的实际应用中还存在一定的局限性。

ERW 机制是一种基于随机行走的拓扑演化机制, 新加入的节点通过随机行走的方式在整个传感器网络中选择与其建立边的节点。仿真和动态特性分析表明, 由 ERW 方案演化而成的网络拓扑具有无标度网络的特性。但是将此方案应用到无线传感器网络的实际应用中仍然存在一些问题, 这是由无线传感器网络本身固有的一些特性所决定的。

由于无线传感器节点的通信半径是有限的, ERW 方案中  $m$  个被标记的簇头节点是在当前网络的全局范围内选择的, 所以被标记的簇头节点不一定都在新加入簇头节点的通信半径内。

如图 1 所示, 节点 A 加入网络时, 经过若干步随机行走所选择的节点 B、C 并不在节点 A 的通信范围内, 所以节点 A 事实上并不能和节点 B、C 间建立连接。

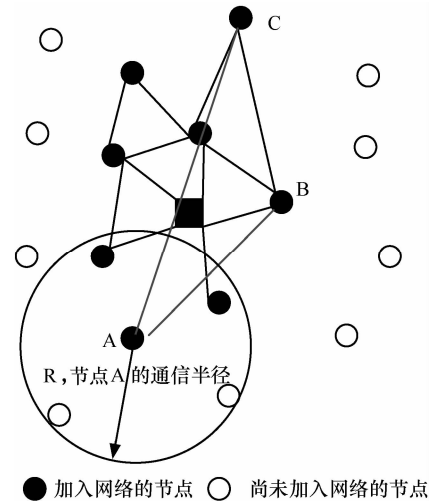


图 1 随机行走的局限性

文献[6]作者提出的无线传感器网络中局域世界演化模型虽然可以解决 ERW 所存在的问题, 但是应用该模型的传感器网络是一种同构的网络。

无标度网络是一种异构的网络<sup>[8-11]</sup>, 而大多数无线传感网络除了 SINK 节点外, 其他网络节点均是同构的。因此, 本文根据节点的能量状况提出具有适应度机制的演化策略, 使得节点虽然在结构和功能上是同构的, 但是在适应度上存在着差异, 这种策略符合了无标度网络节点异构性的特点。

基于此, 在综合考虑无线传感器网络本身通信特点和无标度网络异构性的基础上, 本文提出一种基于适应度和局域世界的无线传感器网络拓扑演化机制 EBFL (topology evolution of wireless sensor networks based on fitness and local world)。

## 2 EBFL 演化机制及动态性分析

### 2.1 网络模型

本文对网络模型作如下假设。

- 1) 节点功率可调。根据当前的能量状态确定通信半径, 节点的通信半径可以在  $R_1 < R_2 < \dots < R_n$  之间切换。
- 2) 节点在整个圆形区域内近似均匀分布。
- 3) SINK 节点处于网络的中心区域。
- 4) 网络中的节点以  $p$  概率失效, 在网络的成长过程中, 因部分节点失效而引起边损失的节点仅可以从新加入的节点获得补充。
- 5)  $decision = E_{r_e} / E_{ave_e}$ ,  $decision > 1$ , 节点在  $R_{n/2}, \dots, R_n$  随机选择一个功率, 否则在前半部分选

择一个功率，其中  $E_{r_e}$  是节点的剩余能量， $E_{ave_e}$  是网络中节点的平均剩余能量。

网络的每一轮成长过程应该是不可逆的过程，假设 4) 可以保证这一点；由假设 5) 可知，每个节点剩余能量的差异会导致节点通信半径的差异。

### 2.2 EBFL 演化机制

与经典 BA 无标度网络模型类似，EBFL 演化机制分为增长和连接 2 个部分。

1) 增长：初始网络由 SINK 一跳范围内的  $m_0$  个节点和  $e_0$  条边构成，每次新加入一个节点 new 和  $m$  条边，节点依据与 SINK 的距离由近及远加入网络。

2) 局域适应优先连接：在节点 new 的一跳范围内的所有节点，记为  $M_{new}$  ( $M_{new} \geq m$ ) 个，作为节点 new 的局域世界  $LW_{new}$ 。新加入的节点与  $LW_{new}$  内的节点按照如下的优先连接概率建立连接：

$$local(k_i) = \binom{M_{new}}{N(t)} \left( \frac{h_i k_i}{\sum_j h_j k_j} \right) \quad (2)$$

其中，节点  $i, j$  属于  $LW_{new}$ ， $h_i$  是  $R_i$  的连续函数，即  $h_i = r(R_i)$ ， $N(t)$  为  $t$  时刻网络节点数为  $(1-p)(m_0+t)$ 。

文献[12]给出了适应度函数分布对网络最终拓扑结构影响的分析，当适应度函数的分布  $h_i = r(R_i)$  具有有限支撑(finite support)时，那么网络节点的度分布和 BA 网络一样具有幂律分布的特点，若该分布具有无限支撑(infinite support)，那么适应度最高的节点就会获得占整个网络总边数一定比例的边数，即“赢者通吃(winner takes all)”的现象。由于无线传感器网络的节点通信范围和能量都是有限的，显然节点的适应度分布也应该是有限支撑的。

### 2.3 网络拓扑演化的动态性分析

假设在  $t$  时刻，节点 new 加入网络。 $R_0$  是初始网络的半径，与 SINK 距离小于  $R_0$  的节点均视为初始网络中的节点，节点数量为  $m_0$ 。 $R_0+t$  是网络成长到  $t$  时刻的网络半径， $R_{new}$  是节点 new 的通信半径，如图 2 所示。

节点 new 与一跳范围内的节点  $i$  建立连接的概率由式(2)决定。

在  $t$  时刻整个网络共有  $(1-p)mt$  条边，由节点在整个圆形区域内是近似均匀分布的假设，因此，局域世界  $LW_{new}$  的节点数为

$$M_{new} = N(t) R_{new}^2 / 2(R_0+t)^2$$

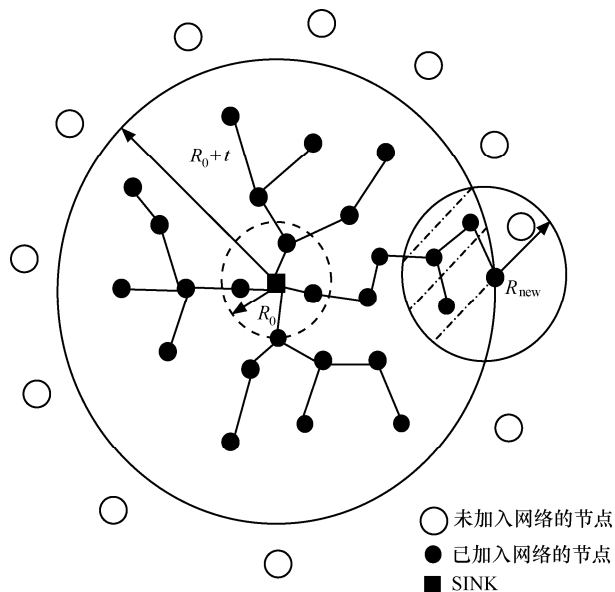


图 2 网络的成长过程

可以得到：

$$local(k_i) = \left( \frac{1}{2} \frac{R_{new}^2}{(R_0+t)^2} \right) \left( \frac{r(R_i) k_i}{\sum_j r(R_j) k_j} \right) \quad (3)$$

由于  $h_i = r(R_i)$  为连续函数，由最值定理可得：

$$m \min r(R) \sum_j k_j \leq \sum_j r(R_j) k_j \leq m \max r(R) \sum_j k_j$$

由介值定理可知， $\exists R_x \in [R_{min}, R_{max}]$ ，使得：

$$\sum_j r(R_j) k_j = r(R_x) \sum_j k_j \quad (4)$$

由节点近似均匀分布的假设得：

$$\sum_j k_j = \frac{1}{2} \left( \frac{R_{new}^2}{(R_0+t)^2} \right) N(t) < k_t > \quad (5)$$

其中， $N(t)$  是  $t$  时刻网络的节点数目， $< k_t >$  为  $t$  时刻节点的平均度。

$$< k_t > = \frac{2(1-p)mt}{N(t)} \quad (6)$$

将式(4)~式(6)代入式(3)得：

$$local(k_i) = f(R_i, R_x) \frac{k_i}{2(1-p)mt}$$

其中， $f(R_i, R_x) = \frac{r(R_i)}{r(R_x)}$ 。

假设  $k_i$  是连续变化的，所以：

$$\frac{k_i}{t} = m local(k_i) \quad (7)$$

$$\frac{k_i}{t} = f(R_i, R_x) \frac{k_i}{2(1-p)t} \quad (8)$$

解式(8)对应的齐次微分方程有：

$$k_i(t) = C t^{\frac{1}{2(1-p)} f(R_i, R_x)} \quad (9)$$

由于  $t_i$  时刻节点  $i$  加入，故有初始条件为

$$k_i(t_i) = m \quad (10)$$

将式(10)代入式(9)得：

$$k_i(t) = m \left( \frac{t}{t_i} \right)^{\frac{1}{2(1-p)} f(R_i, R_x)} \quad (11)$$

所以节点  $i$  的度小于  $k$  的概率为

$$p(k_i(t) < k) = p\left(t_i > \frac{m}{k} \frac{2(1-p)}{f(R_i, R_x)}\right) \quad (12)$$

由于任何一个节点是以相同的时间间隔加入的网络中的，所以  $t_i$  的分布服从

$$p(t_i) = \frac{1}{(1-p)(m_0 + t)} \quad (13)$$

将式(13)代入式(12)得到：

$$\begin{aligned} p\left(t_i > \frac{m}{k} \frac{2(1-p)}{f(R_i, R_x)}\right) &= 1 - p\left(t_i \leq \frac{m}{k} \frac{2(1-p)}{f(R_i, R_x)}\right) \\ &= 1 - \frac{m \frac{2(1-p)}{f(R_i, R_x)} t}{k \frac{2(1-p)}{f(R_i, R_x)} (1-p)(m_0 + t)} \end{aligned} \quad (14)$$

对式(14)求得：

$$\frac{p(k_i(t) < k)}{k} = \frac{2(1-p)}{f(R_i, R_x)} \frac{m \frac{2(1-p)}{f(R_i, R_x)} t}{(1-p)(m_0 + t)} \frac{1}{k^{1 + \frac{2(1-p)}{f(R_i, R_x)}}} \quad (15)$$

$$\lim_t \frac{p(k_i(t) < k)}{k} = \frac{1}{f(R_i, R_x)} \frac{2m \frac{2(1-p)}{f(R_i, R_x)}}{k^{1 + \frac{2(1-p)}{f(R_i, R_x)}}} \quad (16)$$

$$\lim_t \frac{p(k_i(t) < k)}{k} = \frac{2gm}{k^{1+2g(1-p)}} \quad (17)$$

其中， $g = \frac{1}{f(R_i, R_x)}$ 。

### 3 仿真与性能分析

传感器节点的通信半径可以在 30m、35m、40m 之间切换，节点部署在 (100m, 100m) 的范围内，网络的规模为 400 个节点。

#### 3.1 网络演化拓扑结构

图 3 是在网络演化 100 轮后的网络拓扑结构图，图中的数字为节点对应的 ID 号，距离 SINK 近的节点具有较小的 ID 号。

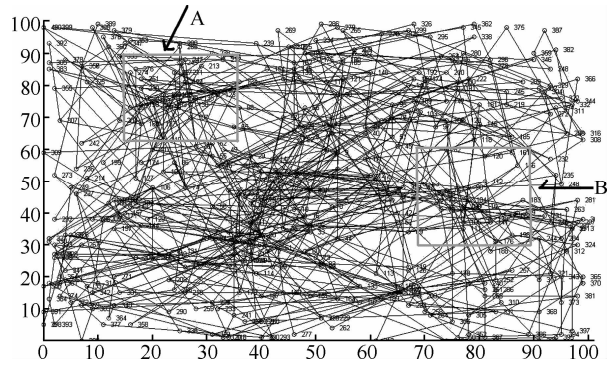


图 3 网络演化 100 轮时的拓扑结构

从图 3 的网络拓扑中可以清晰地看到，网络在一些位置的聚集程度较高，A、B 处局部拓扑中也可以看到，具有较高的聚集程度的节点的 ID 较大，这说明节点加入网络的时间先后顺序不再是影响网络中节点的度的唯一因素，式(2)中的节点的适应度起到了显著的作用。这有利于适应度高的节点在短时间内获得较大的度，有效地平衡了节点的能耗和负载。

#### 3.2 度分布

从式(12)可知，当  $g = 1$  时，网络节点的度分布符合幂指数为 3 的幂律分布。

图 4 中给出了网络规模为 400 个节点时，网络节点度分布的理论结果和实际情况的对比。从图 4 中可以看出，节点的度大致服从幂指数为 3 的幂律分布，节点的失效概率  $p$  越大，网络的度分布越均匀，这是由于网络中部分节点的失效引起了边的损失，网络节点度的幂律分布也会受到影响。这说明根据 EBFL 演化机制所生成的网络拓扑具有无标度的特性。

#### 3.3 节点度和能量的关系

图 5 给出了 ERW 和 EBFL 在第 50 轮数据传输开始所对应的度为  $k$  的节点的能量情况。其中  $E_{min}(EBFL(k))$  表示 EBFL 中度为  $k$  的节点的最小

能量,  $E_{min}(ERW(k))$  表示 ERW 中度为  $k$  的节点最小能量,  $E_{ave}(EBFL(k))$  表示 EBFL 中度为  $k$  的节点平均能量,  $E_{ave}(ERW(k))$  表示 ERW 中度为  $k$  的节点平均能量。

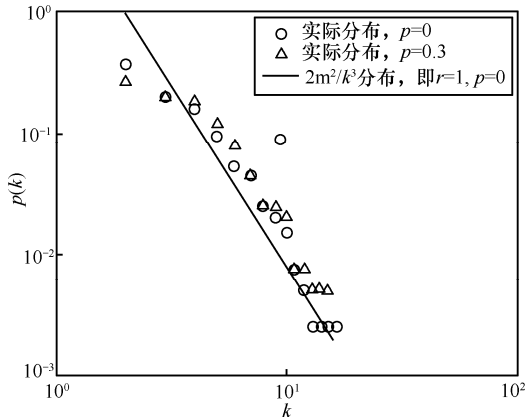


图 4  $N(t)=400, m=2$  时网络的度分布

从图 5 中可以看到, 在数据开始传输前, 无论是 EBFL 还是 ERW 都具有能量越高节点的度越大的特点, 这符合 WSN 能量均衡的特点, 也说明 EBFL 和 ERW 的演化策略均具有一定的合理性。但是 EBFL 无论在最小能量方面还是在平均能量方面均优于 ERW, 这是由于 EBFL 节点的通信半径选择策略和适应度发挥了作用。在 EBFL 中, 能量高的节点不仅具有较大的通信半径而且具有较高的适应度, 因此根据连接概率式(2), 此类节点会有较高的链接概率。综合上述分析, EBFL 比 ERW 更适合 WSN 拓扑结构实际的演化特点。

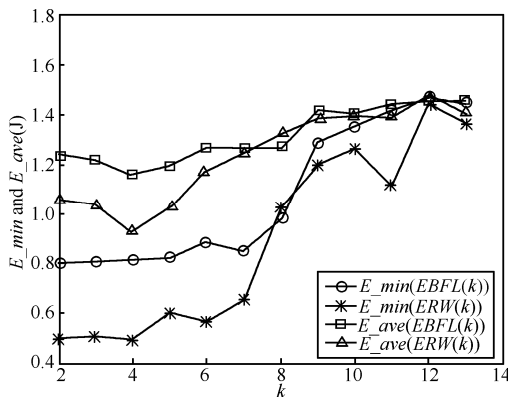


图 5 度和能量关系示意图

### 3.4 节点度和能量关系的演化

图 6 给出了在第 50、80、100 轮开始时网络拓扑的  $E_{min}(EBFL(k))$  分布情况。从图 6 中可以看到, 随着轮  $column$  的增加,  $E_{min}(EBFL(k))$  的差异越来越

越显著。这是由于随着 WSN 工作时间的增加和网络拓扑的变化, 节点之间的能耗差异越来越明显, 即节点之间的差异越来越显著。在图 6 中,  $E_{min}(EBFL(14))$  和  $E_{min}(EBFL(2))$  的差距随着  $column$  的增加越来越大, 这说明 EBFL 可以使得能量较高的节点具有较大度, 即节点的能量越大节点的负载越大, 这有利于平衡 WSN 的能耗, 提高 WSN 的网络性能, 延长网络的寿命。

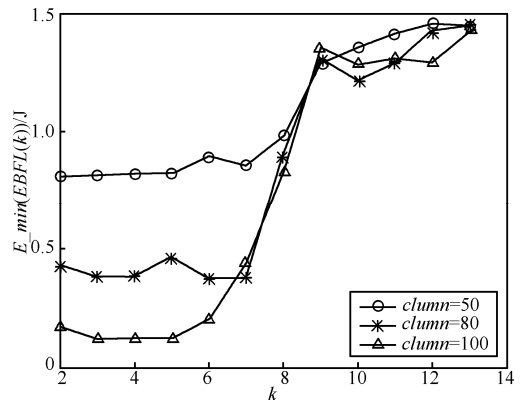


图 6  $E_{min}(EBFL(k))$  和  $k$  关系的演化

### 3.5 网络的顽健性

节点由于能量耗尽或者故障导致失效的情况称之为随机故障 (fail), 外界根据某种策略破坏节点使之失效称之为蓄意攻击 (attack), 在这里 fail 即网络中的节点随机发生故障, attack 为按照节点度的降序顺序使之失效的攻击策略。p 为失效的节点占整个网络节点的比例。

从图 7 中可以看出, EBFL、ERW 策略对于随机失效均表现出较强的抗毁性, 而对蓄意攻击于均表现出较差的抗毁性, p 较小的时候网络的连通性就有了很显著的降低。这是由于 EBFL 与 ERW 策略构造的网络拓扑符合无标度网络的特点, 即度很大的节点占了很少的比例, 而度很小的节点占了很大的比例。随机失效的节点是度很小的节点的概率极大, 这对网络的连通性够不成很大影响, 而蓄意攻击策略删除的节点是度很大的节点, 这对于网络的拓扑结构会造成很大的破坏, 因此会很大程度上影响网络的连通性。这也符合了无标度网络具有较高的容错性和较弱的抗毁性的特点。EBFL 策略较 ERW 策略对于随机失效的情况具有较高的容错性, 这是因为 WSN 中节点的随机失效很大程度上是由能量的耗尽引起的, 而 EBFL 策略将能量因素作为节点的适用度考虑在内, 这可以均衡节点的能量负载。

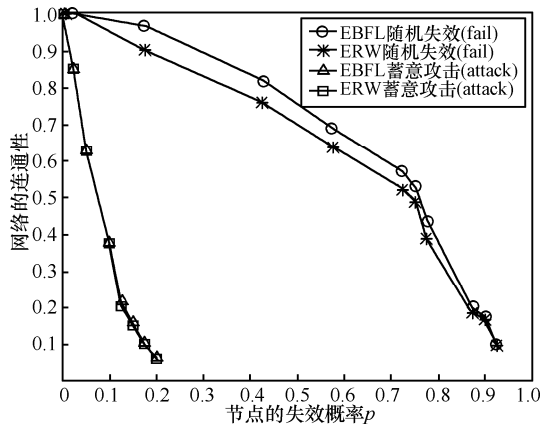


图7 网络的容错性和抗毁性

#### 4 结束语

EBFL 由于考虑了 WSN 通信范围有限和能量有限的特点, 所以更加适合于 WSN 的实际应用。局域世界的引入保证了节点之间连接的有效性, 适应度的引入使得能量高的节点具有较高的度, 即较高的负载, 这有利于 WSN 网络能耗的均衡。采用 EBFL 机制构造的 WSN 的拓扑结构具有无标度网络的特征, 而且更加适合 WSN 拓扑演化的实际特点, 所生成的网络具有较高的容错性。

#### 参考文献:

[1] 孙利民, 李建中, 陈渝等. 无线传感器网络[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.  
SUN L M, LI J Z, CHEN Y, et al. Wireless Sensors Networks [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.

[2] AKYILDIZ I F, SANKARASWAMY S, SUBRAMANIAM Y, et al. Wireless sensor networks: a survey[J]. Computer Networks, 2002, 38(4):393-422.

[3] 任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络[J]. 软件学报, 2003, 10(7):163-174.  
REN F Y, HUANG H N, LIN C. Wireless sensors networks[J]. Software, 2003, 10(7):163-174.

[4] YOUNIS O, FAHMYS, SANTIP. Robust communications for sensor networks in hostile environments[A]. Proceedings of the 12th IEEE International Workshop on Quality of Service(IWQoS 2004)[C]. 2004. 10-19.

[5] KASHYAP A, KHULLER S, SHAYMAN M. Relay placement for higher order connectivity in wireless sensor networks[A]. Proceedings of the 25th IEEE International Conference on Computer Commu-

nications(INFOCOM 06)[C]. Spain, 2006.1-12.

[6] 姜楠, 周日贵, 郑洪源. 无线传感器网络中局域世界演化模型[J]. 南京航空航天大学学报, 2008, 40(2):230-233.  
JIANG N, ZHOU Q G, ZHENG H Y. Local-world evolving model of WSN[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2008, 40(2):230-233.

[7] CHEN L J, LIU M, CHEN D X, et al. Topology evolution of wireless sensor networks among cluster heads by random walkers[J]. Chinese Journal of Computers, 2009, 32(1):69-76.

[8] 汪小凡, 李翔, 陈关荣. 复杂网络理论及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.  
WANG X F, LI X, CHEN G R. Complex Network Theory and Application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.

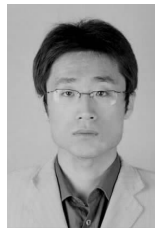
[9] HELM Y A. Small worlds in wireless networks[J]. IEEE Communications Letters, 2003, 7(10):490-492.

[10] CHITRADURGARR, HELM Y A. Analysis of wired shortcutting in wireless sensor networks[A]. The IEEE/ACM International Conference on Pervasive Services[C]. 2004. 167-176.

[11] SHARMA G, MAZUMDAR R. Hybrid sensor networks: a small-world[A]. MobiHoc05[C]. Chicago, Illinois, USA, 2005. 366-377.

[12] BIANCONI G, BARABASI A L. Bose-Einstein condensation in complex networks[J]. Phys Rev Lett, 2001, 86:5632-5635.

#### 作者简介:



马士强 (1987-), 男, 山东临沂人, 西安电子科技大学硕士生, 主要研究方向为网络寿命的优化与研究。



齐小刚 (1973-), 男, 陕西宝鸡人, 博士, 西安电子科技大学教授, 主要研究方向为网络优化与算法设计、系统建模与数据处理。

刘立芳 (1972-), 女, 河北人, 博士, 西安电子科技大学副教授, 主要研究方向为信息处理与智能算法。

郑耿忠 (1975-), 男, 广东潮州人, 西安电子科技大学博士生、副教授, 主要研究方向为无线传感器网络。