

基于随机行走机制的无标度网络拓扑演化模型

王景娴¹, 陈珍萍², 黄友锐¹, 张晓明¹

(1 安徽理工大学 电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001;

2 苏州科技大学 电子与信息工程学院, 江苏 苏州 215009)

摘 要: 针对 WSNs(wireless sensor networks)在实际应用中会遇到的能量耗尽及拓扑容侵效果不佳等难题, 构造拓扑模型时考虑节点剩余能量和节点间距离, 使剩余能量大的节点连接概率更高, 通过随机行走策略结合改进后的无标度网络“增长”和“择优连接”的方法, 提出了一种基于随机行走机制的无标度网络拓扑演化模型(Random-walk Scale-free Topology Model, RSTM). 仿真结果表明, 该模型形成的网络拓扑不仅具备无标度网络的幂律特性, 且具备良好的稳定性和容错性.

关键词: 无标度网络; 拓扑演化; 随机行走; 能耗

中图分类号: TP212.9; TN92

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2018)05-0079-05

The model of Scale-free Network Topology Evolution Based on the Random Walk Mechanism

WANG Jing-xian¹, CHEN Zhen-ping², HUANG You-rui¹, ZHANG Xiao-ming¹

(1 School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;

2 School of Electronic and Information Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

Abstract: Due to the difficulties that the dissipation of energy and the poor effect of intrusion tolerance of topology in the practical application of wireless sensor networks, the distance between nodes and the residual energy of nodes are considered when constructs the network topology, to make the residual energy of nodes connected probability is higher. By the methods of random walk strategy combined with the improved scale-free network "growth" and "preferential attachment", the random-walk scale-free topology model(RSTM) is proposed commensurately. The simulation results show that, the proposed topology not only has the power-law characteristic of scale-free network, but also posses a good stability and fault tolerance respectively.

Key words: scale-free network; topology evolution; random walk; energy consumption

1 引言

无线传感器网络(wireless sensor networks, WSNs)节点通常在人类难以到达的复杂环境下使用, 其电源的更换非常困难, 导致网络生命期缩短^[1]. 所以, 为确保网络的稳定性, 设计网络能耗低、生命周期长的拓扑结构是一项重要的任务^[2].

近年来, 网络和节点的节能算法变成一大讨论重点^[3]. 为了衡量簇内通信代价的标准, Younis 等

人提出了 HEED(A Hybrid, Energy-Efficient Distributed Clustering Approach)算法, 该算法根据剩余能量来对簇头进行选取, 同时该算法收敛也相对更快^[4].

本文使用 HEED 簇头生成算法结合随机行走机制, 根据节点剩余能量和节点间距离的关系, 提出了一种基于随机行走机制的无标度网络拓扑演化模型. 实验结果表明, 该模型形成的网络拓扑, 具备良好的稳定性和容错性^[5].

收稿日期: 2017-07-28; **修回日期:** 2017-09-03

基金项目: 国家自然科学基金(51404008, 51274011); 安徽省科技攻关计划(1501021027)

2 RSTM 演化过程

本文利用 HEED 协议中的簇头生成算法,使簇头节点均匀覆盖在 WSNs 中^[6].图 1 所示为 300 个节点在 100 m×100 m 区域中形成的分布图;图 2 为 HEED 协议簇头分布示意图.

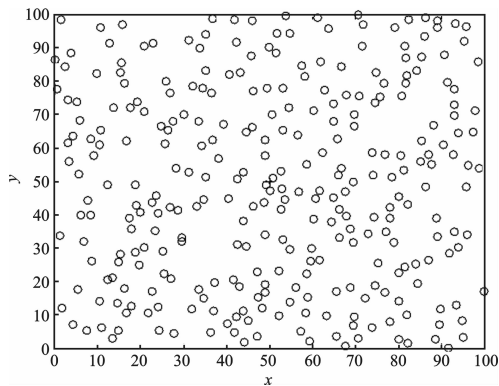


图 1 HEED 协议节点分布图

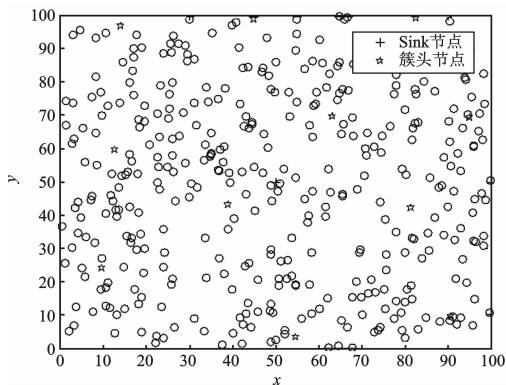


图 2 HEED 协议簇头分布示意图

本文主要考虑分层结构下 WSNs 簇间拓扑的演化过程.该网络模型生成过程如下.

(1)簇分布:通过 HEED 算法,使节点在 WSNs 中分簇,并得到簇头的分布情况;

(2)初始网络:由基站及邻居 m_0 个初始节点、 e_0 条边构成,基站与初始节点两两相连,节点在分布区域内均匀分布;

(3)在随机行走过程中,起始点在簇头中随机产生;

(4)节点增长:对于每段时间步长,都向网络中新增一个簇头^[7],并且与 m 个现有的节点连接,其中 $m \leq m_0$;

(5)优先连接:每一次行走,簇头节点 j 的邻居节点 i 和随机行走节点相连概率取决于它此时的剩余能量 E_i 和两节点间的距离 d_i ,连接后节点 i 被标

记,此步骤被重复直到 $m \leq m_0$ 个不一样的节点被标记;

$$\prod(i) = \prod(E, d) = \frac{E_i}{\sum_{k_j} E_{k_j}} + \frac{d_i}{\sum_{k_j} d_{k_j}}$$

(6)要是行走节点重复和某个被标记过的簇头连接,那么新一轮的行走便从这个簇头开始^[8];

(7)新增的簇头和 m 个标记过的簇头相连,步骤 2 开始重复,一直到 WSNs 中的所有节点都相互连接.

3 度分布属性

设 WSNs 中已存在 N 个簇头,则将簇头 j 作为起始点的概率可用 $P(j) = 1/N$ 表示^[9],这个簇头行走至其邻居簇头 i 的概率可用 $P(i)$ 表示:

$$P(i) = P(E, d) = \frac{p(i/j)p(j)}{p(j/i)} \quad (1)$$

式中, $p(i/j)$ 是簇头 j 选作为起始点之后,随机行走者和其邻居簇头 i 相连的概率.

$$P_E(i/j) = \prod(E) = \frac{E_i}{\sum_{k_j} E_{k_j}} \quad (2)$$

$$P_d(i/j) = \prod(d) = \frac{d_i}{\sum_{k_j} d_{k_j}} \quad (3)$$

式(2)中, E_i 表示节点 i 当前剩余能量值.

式(3)中, d_i 表示节点 i 和 j 间的距离; k_j 表示簇头 j 具有的邻居数,其中,

$$\sum_{k_j} E_{k_j} = k_j < E_{k_j} >, \sum_{k_j} d_{k_j} = k_j < d_{k_j} >$$

式中, $< E_{k_j} >$ 是节点 j 所有相邻节点具有的剩余能量均值; $< d_{k_j} >$ 是节点 j 和相邻节点间的距离均值.同理 $p(j/i)$ 可用下式表示:

$$P_E(j/i) = \frac{E_j}{\sum_{k_i} E_{k_i}}, P_d(j/i) = \frac{d_j}{\sum_{k_i} d_{k_i}}$$

其中,

$$\sum_{k_i} E_{k_i} = k_i < E_{k_i} >, \sum_{k_i} d_{k_i} = k_i < d_{k_i} >$$

结合上述结果可得:

$$P(E) = \frac{P_E(i/j)P(j)}{P_E(j/i)} = \frac{\frac{E_i}{\sum_{k_j} E_{k_j}} \times \frac{1}{N}}{\frac{E_j}{\sum_{k_i} E_{k_i}}} =$$

$$\frac{\frac{E_i}{k_j < E_{k_j} >} \times \frac{1}{N}}{\frac{E_j}{k_i < E_{k_i} >}} = \frac{E_i k_i < E_{k_i} >}{E_j k_j < E_{k_j} >} \times \frac{1}{N} =$$

$$\frac{E_i < E_{k_i} >}{E_j < E_{k_j} >} \times \frac{k_i}{Nk_j} \quad (4)$$

$$P(d) = \frac{P_d(i/j)P(j)}{P_d(j/i)} = \frac{\sum_{k_j} \frac{d_i}{d_j} \times \frac{1}{N}}{\sum_{k_i} \frac{d_j}{d_i}} =$$

$$\frac{\frac{d_i}{d_j} \times \frac{1}{N}}{\frac{d_j}{d_i} \times \frac{1}{N}} = \frac{d_i k_i < d_{k_i} >}{d_j k_j < d_{k_j} >} \times \frac{1}{N} =$$

$$\frac{d_i < d_{k_i} >}{d_j < d_{k_j} >} \times \frac{k_i}{Nk_j} \quad (5)$$

式中, $Nk_j = N < k_i > = \sum_{j \in \Delta} k_j$, 并设 $f(E) = \frac{E_i < E_{k_i} >}{E_j < E_{k_j} >}$, $f(d) = \frac{d_i < d_{k_i} >}{d_j < d_{k_j} >}$, $f(E, d) = f(E) + f(d)$, $P(E, d) = P(E) + P(d)$

所以,

$$P(i) = P(E, d) = f(E, d) \times \frac{k_i}{\sum_{j \in \Delta} k_j} \quad (6)$$

由连续场理论可知, 如果节点 k_i 不间断地改变, 由上述择优增长的结果可得, k_i 改变的速率是:

$$\frac{\partial k_i}{\partial t} = mP(i) = mf(E, d) \times \frac{k_i}{\sum_{j \in \Delta} k_j} \quad (7)$$

假设新增的节点 n 是在 t 时刻进入 WSNs 中的, R_n 为新加入节点 n 的通信半径; R_0 和 R_t 分别是最初和 t 时刻网络通信半径. 图 3 所示为改进的择优增长过程:

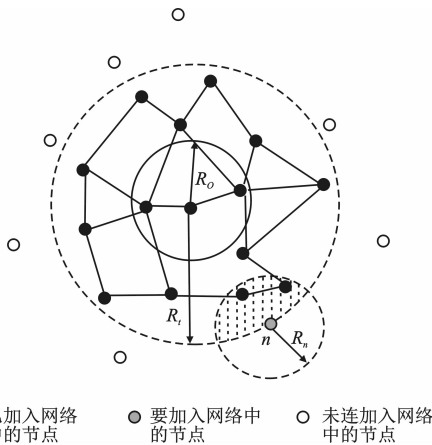


图3 新节点加入

由于节点均匀分布在检测区域范围中, 新加入节点 n 邻节点集的概率可根据该节点所覆盖的面积与此时整个网络的面积之比 $(R_n)^2/2 (R_t)^2$ 近似,

求得:

$$P(i) = f(E, d) \times \frac{k_i}{\sum_{j \in \Delta} k_j}$$

$$= f(E, d) \times \frac{R_n^2}{2R_t^2} \times \frac{k_i}{N_t \frac{R_n^2}{2R_t^2} < k >_t} \quad (8)$$

式中, N_t 是 t 时刻 WSNs 中节点数量; $\frac{R_n^2}{2R_t^2}$ 是 t 时刻新增的节点 n 的邻节点集 Δ 的大小; $< k >_t$ 是 t 时刻整个网络中节点平均度.

依据改进后的择优增长原理, 每隔 t 时间段就生成一个 $m_0 + t$ 个节点、 mt 条边的网络拓扑^[10], 所以 $N_t = m_0 + t$, $< k >_t = \frac{2mt}{m_0 + t}$, 上式可简化为:

$$P(i) = f(E, d) \times \frac{k_i}{N_t < k >_t} = f(E, d) \times \frac{k_i}{2mt} \quad (9)$$

将式(9)代入式(7), 可得:

$$\frac{\partial k_i}{\partial t} = f(E, d) \times \frac{k_i}{2t} \quad (10)$$

$$k_i = C t^{\frac{1}{2} f(E, d)} \quad (11)$$

式中 C 是任意常数, 设 t_i 为节点 i 加入网络的时刻, 结合初始条件 $k_i(t_i) = m$ 求上述微分方程, 可得:

$$k_i(t) = m \left(\frac{t}{t_i} \right)^{\frac{1}{2} f(E, d)} \quad (12)$$

所以, $p(k_i(t) < k)$ 可用下式表示:

$$p(k_i(t) < k) = p \left(\frac{m^{\frac{2}{f(E, d)}} t}{k^{\frac{2}{f(E, d)}}} < t_i \right) \quad (13)$$

在改进的择优增长过程中, 每隔一个相同的时隙就新增一个簇头节点到网络中, 即每个新簇头节点加入网络的时间是不确定的完全随机的, 因此 t_i 在 $(0, t)$ 内均匀分布, 概率密度函数用 $p(t_i)$ 表示:

$$p(t_i) = \frac{1}{m_0 + t} \quad (14)$$

结合式(13)和(14)可得:

$$p(k_i(t) < k) = 1 - p \left(t_i < \frac{m^{\frac{2}{f(E, d)}} t}{k^{\frac{2}{f(E, d)}}} \right)$$

$$= 1 - \frac{t}{m_0 + t} \left(\frac{m}{k} \right)^{\frac{2}{f(E, d)}} \quad (15)$$

则 RSTM 度分布为:

$$p(k) = \frac{\partial p(k_i(t) < k)}{\partial k} = \frac{t}{m_0 + t} \times \frac{2}{f(E, d)} \times \frac{m^{\frac{2}{f(E, d)}}}{k^{1 + \frac{2}{f(E, d)}}} \quad (16)$$

当 $t \rightarrow \infty$ 时, 式(16)可简化为:

$$p(k) = \frac{\partial p(k_i(t) < k)}{\partial k}$$
$$= \frac{2}{f(E,d)} \frac{m^{\frac{2}{f(E,d)}}}{k^{1+\frac{2}{f(E,d)}}} \propto k^{-(1+\frac{2}{f(E,d)})} \quad (17)$$

从式 (17) 可以看出,RSTM 模型指数 $1 + \frac{2}{f(E,d)}$,拓扑度分布遵循幂律特性,所以该拓扑模型是一个无标度网络.

4 实验结果及分析

度分布作为网络拓扑的关键特性,直接关系到网络的安全与稳定,第三节利用连续场理论分析了 RSTM 模型形成拓扑度分布的形式.

当 $f(E,d) = 1$ 时,该模型与 BA 模型度分布相同,图 4 中直线是度分布理论值,散点是实际值,由图可知,服从幂指数为 3 的幂律特性.可以看出,节点的度越大,其概率则越小,满足无标度网络的特性,所以在节点发生随机失效时,该模型拥有较好的容错性.

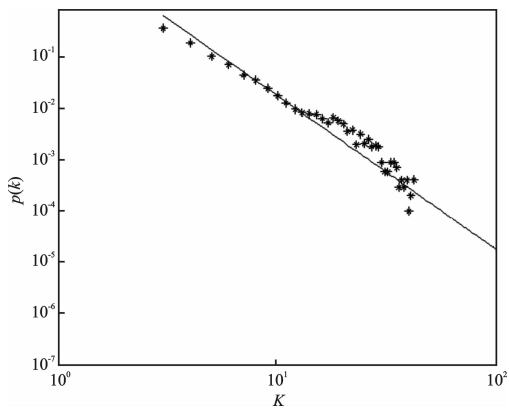


图 4 $f(E,d) = 1$ 度分布

由理论分析可知,当 $f(E,d) < 1$ 时,WSNs 簇间度分布为指数是 $1 + 2/f(E,d) > 3$ 的幂律分布,图 5 为 RSTM 模型为 $f(E,d) = 0.5$ 和 $f(E,d) = 1$ 时的簇间拓扑度分布,相比可知,WSMs 拓扑稀疏性将跟随 $f(E,d)$ 的变小而得到改善.

由图 6 可知,WSNs 拓扑度分布 $p(k)$ 受 $f(E,d)$ 的影响, $p(k)$ 随着 $f(E,d)$ 的增大而增大,这影响着 WSNs 拓扑的稀疏性. $f(E,d)$ 越大拓扑中度大的节点占有的概率就越大,拓扑将更加不规则,需要经过改变 $f(E,d)$ 的值来实现调节度分布的目的,以达到网络特征要求.

5 结束语

本文针对无标度网络在 WSNs 中的应用进行

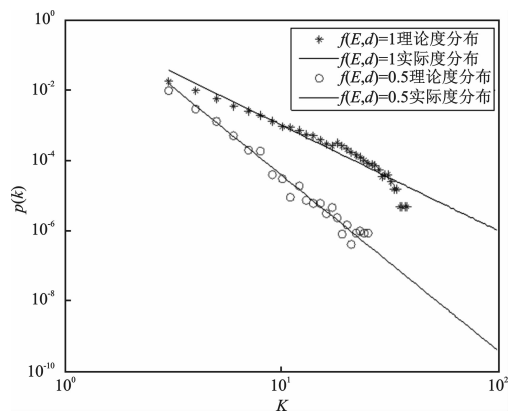


图 5 $f(E,d) = 1$ 和 $f(E,d) = 0.5$ 度分布

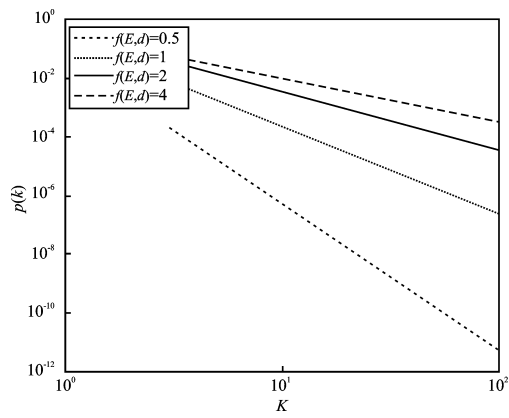


图 6 理论度分布

了研究,根据节点剩余能量和节点间距离,使节点避免因能量耗尽而暂停工作,最终实现均衡网络能耗的目的.仿真结果显示,RSTM 模型符合无标度网络的基本特征,与 BA 模型相比对节点的随机失效具有较强的容忍能力.

参考文献:

[1] 李丽,降爱莲. 基于蚁群优化的无线传感器网络数据融合算法[J]. 微电子学与计算机,2016,33(6):68-72.

[2] 杜永文,冯珂,练云翔. 无线传感器节点能量自主预测算法研究[J]. 微电子学与计算机,2016,33(12):113-116.

[3] Zheng G, Liu Q. Scale-free topology evolution for wireless sensor networks[J]. Computers & Electrical Engineering, 2013, 39(6): 1779-1788.

[4] 胡向东,徐慧芬,张力. 物联网感知层局域按需簇维护模型与算法[J]. 软件学报,2015, 26 (8) :2020-2040.

[5] 姜志宏,王晖,高超. 一种基于随机行走和策略连接的网络演化模型[J]. 物理学报,2011, 60 (5) :818-826.

[6] 耿鹏,柳艳. 基于复杂网络理论的无线传感器网络的连通性[J]. 探测与控制学报,2016,38 (5) :123-127.

- [7] 胡耀光,王圣军,金涛,等. 度关联无标度网络上的有倾向随机行走[J]. 物理学报,2015,83(2):419-425.
- [8] 符修文,李文锋. 基于局域世界的无线传感器网络分簇演化模型[J]. 通信学报,2015(9):204-214.
- [9] 刘浩然,孙雅静,刘彬,等. 能耗均衡的无线传感器网络无标度容错拓扑模型[J]. 计算机学报,2016,36(9):204-214.
- [10] 陈力军,刘明,陈道蓄,等. 基于随机行走的无线传感器网络簇间拓扑演化[J]. 计算机学报,2009,32(1):69-76.

(上接第 78 页)

- [2] Baronti P, Pilla P, Chook V W C, et al. Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15.4 and zigbee standards[J]. Comput Commun, 2007(30):1655-1695.
- [3] 张品,王佳佳,占梦. 能量高效的无线传感器网络非均匀分簇路由算法[J]. 传感技术学报,2016,29(12):1919-1923.
- [4] Heinzelman W. Energy-efficient communication protocols for wireless microsensor networks[C]//Proceedings of the Hawaii International Conference on Systems Sciences, Hawaii, 2000:3005-3014.
- [5] Mhatre V, Rosenberg C. Design guidelines for wireless sensor networks: Communication, clustering and aggregation[J]. Ad Hoc Networks, 2004, 2(1):45-63.
- [6] 李芳芳,王靖. 一种基于 LEACH 协议的无线传感器网络路由算法[J]. 传感技术学报,2012,25(10):1445-1451.
- [7] 陈晓娟,王卓,吴洁. 一种基于 LEACH 的改进 WSN 路由算法[J]. 传感技术学报,2013,26(1):116-121.
- [8] 陈炳才,么华卓,杨明川,等. 一种基于 LEACH 协议改进的簇间多跳路由协议[J]. 传感技术学报,2014,27(3):373-377.
- [9] Li Chengfa, Ye Mao, Chen Guiha. An energy-efficient

作者简介:

王景娴 女,(1993-),硕士研究生.研究方向为无线传感器网络拓扑结构. E-mail:382332867@qq.com.

陈珍萍 女,(1981-),博士,副教授.研究方向为物联网技术和时间同步.

黄友锐 男,(1971-),博士,教授,博士生导师.研究方向为智能控制、矿山物联网、复杂网络、无线传感器网络等.

张晓明 男,(1992-),硕士研究生.研究方向为物联网、移动通信.

unequal clustering mechanism for wireless sensor networks [C]// IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems Conference, Washington, DC, USA, 2005:597-604.

- [10] 蒋畅江,石为人,唐贤伦. 能量均衡的无线传感器网络非均匀分簇路由协议[J]. 软件学报,2012,23(5):1222-1232.
- [11] Sival Ranjani S, Radha Krishnan S, Thangaraj C, et al. Achieving energy conservation by cluster based data aggregation in wireless sensor networks[J]. Wireless Personal Communications, 2013, 73(3):731-751.
- [12] 戴志强,严承,武正江. 一种新的无线传感器网络非均匀分簇双簇头算法[J]. 传感技术学报,2016,29(12):1912-1918.
- [13] 刘帅,李正炜,吴元昊,等. 基于能耗梯度的无线传感器网络路由算法[J]. 传感技术学报,2016,29(8):1247-1252.

作者简介:

李东林 男,(1992-),硕士研究生.研究方向为无线传感器网络. E-mail:540412133@qq.com.

韦素媛 女,(1971-),副教授,硕士生导师.研究方向为计算机网络.