

Topology Evolution Based on Energy-Aware in Wireless Sensor Networks*

LUO Xiaojuan, YU Huiqun*

(Department of Computer Science and Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 20023, Chins)

Abstract: For energy efficiency in wireless sensor networks, complex networks theory is introduced in this paper. A dynamic topology evolving model based on energy-aware for WSNs is proposed. We not only consider the node connectivity and remaining energy of each sensor node, but also introduce the addition of new links and the reduction of some old links. Using the continuum theory, the expression of the scale-free degree distribution for WSNs is obtained. Scale-free network has good robustness against the random attack. Numerical calculations and simulation results show that our proposed topology model make the energy consumption in the whole network more balanced.

Key words: wireless sensor network; energy-aware; complex network; topology evolution

EEACC: 6150P

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2010.12.026

基于能量感知的无线传感器网络拓扑演化*

罗小娟, 虞慧群*

(华东理工大学信息学院, 上海 200237)

摘要: 针对无线传感器网络中能源效率的问题, 引入复杂网络理论的研究方法, 提出基于能量感知无线传感器网络拓扑动态演化模型。在建模过程中考虑到无线传感器网络拓扑变化与节点的度数和剩余能量密切相关, 而且网络中节点和链路是有增有减的动态行为, 利用连续场理论推导出此模型具有无标度的特征, 无标度网络对于节点的随机故障具有较高的鲁棒性。数值计算与实验仿真结果显示, 算法可以有效地改善整个网络的结点均衡能耗。

关键词: 无线传感器网络; 能量感知; 复杂网络; 拓扑演化

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2010)12-1798-05

无线传感器网络 (Wireless Sensor Networks, WSNs) 是由部署在检测区域内大量的传感器节点组成, 通过无线通信方式形成的一个多跳的自组织的网络系统, 并通过网络将监测数据传送到接收站进行处理。随着微电子技术、通信技术和计算机技术的飞速发展, WSNs 在军事和民用各个领域都得到广泛应用^[1-2]。无线传感器网络由于受到资源约束的限制, 系统的首要设计目标是能源的高效使用, 以最大化网络的生命周期^[3]。如何从系统的角度建立稳健、高效的网络拓扑一直是研究人员的难题。从 20 世纪末以来, 复杂网络已成为各学科领域重要的分析工具和研究手段, 复杂网络以系统学的观点来研究客观世界中存在的大规模网络, 如 Internet 网络、社会关系网络、科学家合作网络、软件工程系统等^[5-9]。Barabasi 和 Albert 从动态的、增长的观点提出了的复杂网络具有幂律度分布的形成机理, 称之为无标度 (Scale-free) 网络, 并建立了一个无标

度网络模型^[10], 无标度网络对于节点的随机故障具有较高的鲁棒性。复杂网络理论为建立稳健、高效的无线传感器网络的动态拓扑结构提供一种新的思路与方法。

目前, 各种基于能量感知和容错的拓扑控制算法已应用于无线传感器网络中, Younis 等提出了一种基于簇的构造 K-连通网络的方法来控制恶劣环境下传感器网络的拓扑结构^[11]。文献[12]通过节点冗余的思想提出一个构建容错的拓扑控制算法。文献[13]基于能量有效提出一个低延迟的可靠数据传输算法。Shaochun Li 等在启发机制思想的基础上结合层次型拓扑控制分簇思想设计了一种自适应的混合型拓扑控制算法^[14]。然而这些方法都没有从网络演化和度分布的角度来研究构建能量有效和容错的网络拓扑结构。文献[15-18]从网络演化角度来分析无线传感器网络的拓扑控制, 针对无线传感网络自身的特点, 在复杂网络增长特性的基

项目来源: 国家自然科学基金资助 (60773094); 上海市曙光计划资助 (07SG32)

收稿日期: 2010-06-28 修改日期: 2010-09-08

基础上,考虑了无线传感器网络的节点能耗的有效性,认为新增链路的择优选择概率不仅节点的度有关,还与节点的剩余能量有关,但文献的模型中并没有考虑到无线传感器网络中节点和链路有增有减的动态行为。

本文借助于对复杂网络理论的研究方法,将无线传感器网络拓扑动态变化的自身特征引入到复杂网络的动态演化机制中,在 Barabasi-Albert 无标度模型^[4]及文献[19]提出的具备节点增加、节点删除和链路补偿机制的优胜劣汰理论演化模型的基础上,深入分析无线传感器网络的拓扑结构演化,考虑到网络内部各种网络节点和链路有增有减的动态演化行为和节点的能量密切相关,提出了一种具有能量感知的无线传感器网络动态演化模型。结合无线传感器网络的实际,其中,增加新链路中选择的新节点应符合节点能量的择优概率,而删除链路中已选择的旧节点应符合节点能量的反择优概率,利用连续场理论推导出此模型为节点度服从幂律分布的无标度网络模型。此模型能使整个网络的结点均衡能耗,并对于节点的随机故障具有较高的容错能力。

1 Barabasi-Albert 无标度模型

Barabasi 和 Albert 分析了万维网的实际形成机理具有如下两个重要的机制:增长和优先连接,并建立了著名的无标度网络演化模型,简称 B-A 模型^[10]。B-A 无标度网络模型的构造算法如下:

(1)初始 开始给定的 n_0 个节点的网络。

(2)增长 在每一个时间步重复增加一个新节点,并且连到 m ($m < n_0$) 个已存在的节点上。

(3)择优连接 在选择一个新加入节点与已存在节点 i 相连时,假设新节点与已存在节点 i 相连的概率 $\Pi(k_i)$ 取决于节点的度数 k_i ,并且此概率服从以下规则,

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

式中 $\sum_j k_j$ 是所有已存在节点的度的总和。在经过 t 时间步后,将产生一个具有 $N = n_0 + m$ 个节点, mt 条边的网络,网络中节点的度满足幂律分布,即 $p(k) \sim 2m^2 k^{-3}$ 。

2 能量感知的演化模型

无线传感器网络既是一种典型的复杂网络,又具有自身的显著特征。在无线传感器网络中,能量是一种非常宝贵的资源,因为传感器通常由电池供电,而

电池提供的能量有限,且传感器节点通常被部署在无人值守的环境下而不能持续充电,为了节省通信能量,通常采用多跳的通信模式,为了延长整个网络工作的生命周期,要考虑到节点的均衡能耗。同时,无线传感器网络的拓扑结构可能因为下列原因而变化:(1)新节点和新链路的加入。(2)结点能量耗尽或环境原因造成的节点失效;(3)恶劣环境下无线链路的失效等等。因此,本文在无标度 B-A 模型的基础上进行修正,演化模型中不仅有新节点和新链路的加入,同时也会有旧节点与旧链路被删除,表现出有增有减的动态演化过程。网络初始有 n_0 个节点,网络在每个时间步 t 按照如下规则进行演化:

(1)初始 开始给定的 n_0 个节点的网络。

(2)增长 在每一个时间步重复增加一个新节点,并且连到 m ($m \leq n_0$) 个已存在的节点上。

(3)择优连接 在选择一个新加入节点与已存在节点建立链路时,采用类似于文献[19]提出择优概率,假设新节点与已存在节点 i 建立链路的概率 $\Pi(k_i)$ 取决于节点的度数 k_i 和此节点的当前剩余能量 E ,在本文中,定义一个函数 $f(E)$ 表达节点剩余能量和被选中连接的关系,此节点能量越大,与新加入节点连接的可能性就越大,这种方式有助于整个网络中节点均衡能耗。因此, $f(E)$ 是个递增函数,形式如 E 、 $E^{\frac{1}{2}}$ 和 E^2 等,则新节点与已存在节点 i 相连的概率 $\Pi(k_i)$ 服从以下规则:

$$\Pi(k_i) = \frac{f(E)k_i}{\sum_j f(E_j)k_j} \quad (2)$$

4)删除链路:在每个时间步删除 c 条链路,首先在至少有一条链路的节点中采用类似于文献[19]提出反择优概率 $\Pi^*(k_i)$,即节点能量越小,被选择删除链路的的可能性就越大。

$$\Pi^*(k_i) = \frac{1}{N(t) - 1} (1 - \Pi(k_i)) \quad (3)$$

其中 $N(t)$ 为网络的规模, $(N(t) - 1)^{-1}$ 是归一化常数,则 $\sum_i \Pi^*(k_i) = 1$,其次在与节点 i 相连的节点中以反择优概率选择节点 j 。然后删除节点 i 和 j 的链路,重复这一步骤 c 次。当满足 $m > 0, c \geq 0, m > c$ 条件下,反择优删除在无线传感器网络中节点链路失效的动态变化是吻合的。本文规定度为 0 的孤立节点也将从网络中永远删除。在无线传感器网络种,择优连接与反择优删除的方式有助于整个网络中节点均衡能耗。

根据连续场理论, $k_i(t)$ 满足如下的动力学方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial k_i}{\partial t} &= m\Pi(k_i) - c[\Pi^*(k_i) + \sum_{j \neq i} \Pi^*(k_j)\Pi^*(k_i)] \approx \\ & m\Pi(k_i) - c[\frac{2(1-\Pi(k_i))}{t} - \frac{(1-\Pi(k_i))^2}{t^2}] \approx \\ & m\Pi(k_i) - \frac{2c}{t} \approx \frac{mf(E)k_i}{2(m-c)\bar{E}t} - \frac{2c}{t} \quad t \rightarrow \infty \quad (4) \end{aligned}$$

因为 $k_i(t) \propto t^\beta, \beta < 1$ 。

由 $N(t) - 1 = n_0 + t \approx t$,

$$\langle k \rangle = \frac{2(m-c)t + e_0}{n_0 + t} \approx 2(m-c),$$

则得到

$$\sum f(E_j)k_j = \bar{E} \langle k \rangle t = 2(m-c)\bar{E}t \quad (5)$$

所以

$$\frac{\partial k_i}{\partial t} = \frac{mf(E)k_i}{2(m-c)\bar{E}t} - \frac{2c}{t} \quad (6)$$

解上述一阶线性偏微分方程, 根据初始条件 $k_i(t_i) = m$, 因此得到方程(6)的解为

$$k_i(t) = B(\frac{t}{t_i})^\beta - B + m \quad t \rightarrow \infty \quad (7)$$

其中动力学指数为

$$\beta = \beta(m, c) = \frac{mf(E)}{2(m-c)\bar{E}} \quad (8)$$

系数

$$B = B(m, c) = m - \frac{4c(m-c)\bar{E}}{mf(E)} \quad (9)$$

利用式(7)可以得到 $k_i(t)$ 小于 k 的概率为:

$$P(k_i(t) < k) = P(t_i > (\frac{B}{B-m+k})^{1/\beta} t) \quad (10)$$

其中 $0 < c(k) = (\frac{B}{B-m+k})^{1/\beta} < 1, k > m$

本文考虑工程中最常见的一类添加节点方式: 等时间间隔方式, 因此 t_i 具有等概率密度 $P(t_i) =$

$\frac{1}{n_0 + t}$, 代入式(10)得到

$$P(k_i(t) < k) = 1 - (\frac{B}{B-m+k})^{1/\beta} \frac{t}{n_0 + t} \quad (11)$$

于是得到度分布为

$$\begin{aligned} P(k) &= \frac{\partial P(k_i(t) < k)}{\partial k} = \\ & \frac{t}{n_0 + t} \frac{1}{\beta} B^{1/\beta} (k + B - m)^{-(1+1/\beta)} \quad (12) \end{aligned}$$

其中度分布指数为

$$\gamma = 1 + \frac{1}{\beta} = 1 + \frac{2(m-c)\bar{E}}{mf(E)} \quad (13)$$

3 数值分析

情形 A: 由于 $f(E)$ 必须是个随节点能量 E 而递

增函数, 所以在实际工程中 $\frac{f(E)}{E} \geq 1$ 。在某些无线传感器网络工程应用中, 布置在良好的环境如平坦空旷平面上, 干扰小, 低耗能状态。网络中各节点剩余能量均衡, 此时 $\frac{f(E)}{E} = 1$, 则由式(13)可得 $\gamma =$

$$1 + \frac{2(m-c)}{m}。$$

由式(13)可知, 当 $c = 0$ 时, 即不考虑节点失效的情况, 得到 $\gamma = 1 + \frac{2m}{m} = 3$, 图 1 为双对数坐标表示的 $c = 0, m = 3, 5$ 时 $P(k)$ 的分布情况。显然, 这时无线传感器网络的拓扑与 Barabasi - Albert 无标度模型相同, 同时 m 的大小与网络拓扑的稀疏性密切相关, m 越大形成网络链路越密集。当 $c \neq 0$ 时, 得到 $1 < \gamma = 1 + \frac{2(m-c)}{m} < 3$, 即度分布指数 γ 在 1 和 3 之间, 如图 2 所示, 采用双对数坐标表示的 $m = 3, c = 1$ 和 $m = 5, c = 2$ 时 $P(k)$ 的分布情况, 在 $m = 5, c = 2$ 情况中, 在度数小的范围里出现峰值, 但从两种情况的网络总体度分布看, 网络具有无标度特性, 且两种情况下网络链路密集程度相似。图 3 表明 t_i 的结点加入网络的时间对网络演化的影响。数据表明, t_i 越小, 结点越早进入网络。因为越早进入网络的节点越有可能被选上与新的节点建立链路, 它的度 $k_i(t)$ 随着时间增长越快。

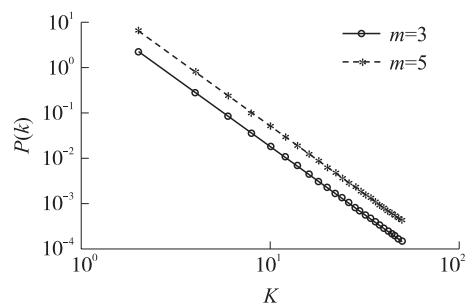


图 1 当 $\frac{f(E)}{E} = 1$, 且 $c = 0$ 时的度分布

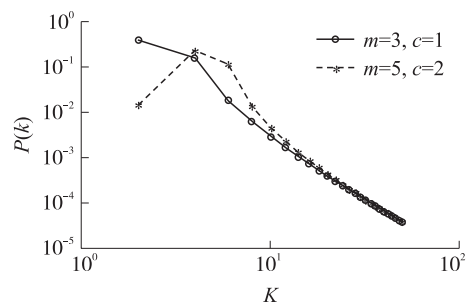


图 2 当 $\frac{f(E)}{E} = 1$, 且 $c \neq 0$ 时的度分布

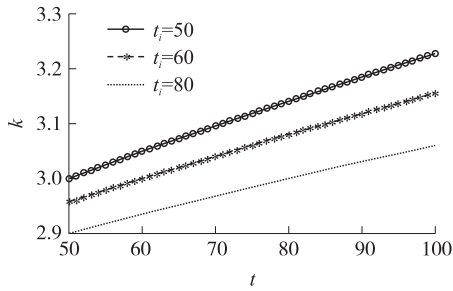


图 3 当 $\frac{f(E)}{\bar{E}} = 1$, 不同 t_i 下 $k_i(t)$ 随着时间 t 的变化

情形 B 无线传感器网络在实际工程应用中常常部署在地形复杂、超低温、电磁干扰大及传输距离远等恶劣环境中, 节点剩余能量不均衡, 此时 $\frac{f(E)}{\bar{E}} > 1$ 。

图 4 为 $\frac{f(E)}{\bar{E}} = 1, 2, 4$, $m = 3, c = 1$ 时, $k_i(t)$ 随着时间 t 的变化, 数据表明, 节点剩余能量越大, 节点越有可能增加链路。节点剩余能量越小, 节点的链路越有可能被删除。因此模型能使网络中节点的能耗均衡消耗, 以提高无线传感器网络的系统生命周期。

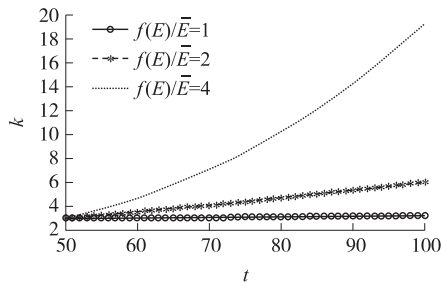


图 4 当 $m = 3, c = 1, \frac{f(E)}{\bar{E}} = 1, 2, 4, k_i(t)$ 随着时间 t 的变化演化

图 5 为 $\frac{f(E)}{\bar{E}} = 1, 2, 4, m = 3, c = 1$ 时 $P(k)$ 的分布情况。

网络的稳态度分布 $P(k)$ 随着择优概率与节点能量的关系不同而不同, 但网络拓扑都具有无标度的特性, 节点能量的不均衡性使无线传感器网络中节点度 $P(k)$ 增加, 这将影响到网络拓扑的稀疏性。无标度网络对随机节点故障具有极高的鲁棒性^[20-21], 满足恶劣环境下无线传感器网络的应用中鲁棒性的要求。

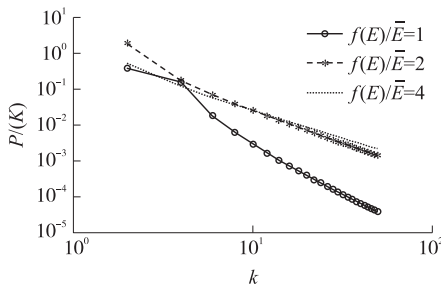


图 5 当 $m = 3, c = 1, \frac{f(E)}{\bar{E}} = 1, 2, 4$, 度分布 $p(k)$ 随着时间 t 的变化

4 结论

本文基于复杂网络理论, 针对无线传感器网络能量有效的动态拓扑变化, 提出了一种能量感知的无线传感器网络演化模型, 理论分析表明该网络模型的度分布符合幂律分布的无标度网络模型, 通过数值仿真验证了该模型的有效性。该模型考虑无线传感器网络中节点有增有减而引起网络拓扑的动态变化, 并且在增加链路和删除链路概率与节点的能量相关, 这一假设符合无线传感器网络的实际, 能兼顾网络中各节点的均衡能耗, 具有无标度网络的容错能力, 对于节点的随机故障及失效具有较高的鲁棒性。

参考文献:

- [1] I F Akyildiz, W Su, Y Sankarasubramaniam, et al. A Survey on Sensor Networks [J]. IEEE Communications Magazine, August, 2002, 40(8): 102 - 114.
- [2] Jennifer Yick, Biswanath Mukherjee, Dipak Ghosal. Wireless Sensor Network Survey [J]. Computer Networks, 2008, 52(12 - 22): 2292 - 2330.
- [3] Giuseppe Anastasi, Marco Conti, Mario Di Francesco. Energy Conservation in Wireless Sensor Networks: A Survey. Ad Hoc Networks [J]. 2009, 7(3): 537 - 568.
- [4] Barabasi A L, Albert R. Emergence of Scaling in Random Networks [J]. Science, 1999(286): 509 - 512.
- [5] Albert R, Jeong H, Barabasi A. Diameter of the World-Wide Web [J]. Nature, 1999, 401: 130 - 138.
- [6] Girvan M, Newman M. Community Structure in Social and Biological Networks [J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2002, 99: 8271 - 6.
- [7] Newman M. Who is the Best Connected Scientist? A Study of Scientific Co-Authorship Networks [J]. Phys Rev Lett, 2001, 64: 16131 - 2.
- [8] Chen Duanbing, Fu Yan, Shang Mingsheng. A Fast and Efficient Heuristic Algorithm for Detecting Community Structures in Complex Networks [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2009, 388(13 - 1): 2741 - 2749.
- [9] Li Yixiao, Jin Xiaogang, Kong Fansheng, et al. The Emergence of Community Structure in Scale-Free Network [C] // Web Society, 2009. SWS 09. 1st IEEE Symposium. Year: 2009, Page(s): 124 - 128.
- [10] Lian Wen, Dromey R G, Kirk D. Software Engineering and Scale-Free Networks [J]. IEEE Transactions, 2009, (39): 845 - 854.
- [11] Younis O, Fahmy S, Santi P. Robust Communications for Sensor Networks in Hostile Environments [C] // 12th IEEE International Workshop, 2004. 10 - 9.
- [12] Li X Y, Wan V J, Wang Y. Fault Tolerant Deployment and Topology Control in Wireless Networks [C] // The 4th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing, 2003: 117 - 128.

- [13] Luo H, Zhang Z J, Liu Y H. Reliable Forwarding of Correlated Data in Sensor Networks with Low Latency [C]//Proceeding of ACM IWCMC, USA; 2007: 278 - 83.
- [14] 李少春,程良伦. 一种自适应的混合型无线传感器网络拓扑控制算法[J]. 传感技术学报,2010,23(3):428 - 433.
- [15] 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.
- [16] Zhang Xuyuan. Model Design of Wireless Sensor Network Based on Scale-Free Network Theory[J]. 5th International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing, 2009, Page(s): 1 - 4.
- [17] Payne J L, Eppstein M J. Evolutionary Dynamics on Scale-Free Interaction Networks Evolutionary Computation[J]. IEEE Transactions, Volume, 2009, 13, Page(s): 895 - 912.
- [18] Zhu Hailin, Luo Hong, Peng Haipeng, et al. Complex Networks-Based Energy-Efficient Evolution Model for Wireless Sensor Networks[J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2009, 41(4 - 30): 1828 - 1835.
- [19] Chen Qinghua, Shi Dinghua. The Modeling of Scale-Free Networks[J]. Physica A, 2004(335): 240 - 248.
- [20] Albert R, Jeong H, Barabasi A L. Attack and Error Tolerance in Complex Network[J]. Nature, 2000, 406: 387 - 482.
- [21] Gao Jingju, Meng Yongwei. Research on Degree Control Resistance to Frangibility of Scale Free Networks[C]//Second International Conference on Communication Software and Networks, 2010, Page(s): 42 - 45.



罗小娟(1974 -),女,博士研究生,讲师,主要研究方向为无线传感器网络,网络安全,复杂网络,luoxj@ecust.edu.cn;



虞慧群(1967 -),男,博士,教授,博士生导师,IEEE高级会员,CCF高级会员,主要研究方向为软件工程,信息安全,形式化方法。