

# 无线传感器网络的自组织机制研究

陈 志<sup>1</sup>, 王汝传<sup>1,2</sup>, 孙力娟<sup>1</sup>

(1. 南京邮电大学计算机学院, 江苏南京 210003; 2. 南京大学计算机软件新技术国家重点实验室, 江苏南京 210093)

**摘要:** 无线传感器网络的自组织包含不依赖于固定通信基础设施的有规则联系和运动, 本文在特定应用中研究这一过程. 在定性分析无线传感器网络的自组织特性之后, 提出自组织度和自组织单位能耗的自组织评价方法, 在典型应用中以此量化分析无线传感器网络的自组织演化机制. 仿真表明, 在特定应用中的无线传感器网络表现出孕育、发育、成熟、衰退和死亡的自组织过程, 自组织能耗依赖于特定的部署方式和无线模型.

**关键词:** 无线传感器网络; 自组织; 能耗

**中图分类号:** TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 05-0854-04

## Study on Self-Organization Mechanism of Wireless Sensor Networks

CHEN Zhi<sup>1</sup>, WANG Ru-chuan<sup>1,2</sup>, SUN Li-juan<sup>1</sup>

(1. College of Computer, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210003 China;

2. State Key Laboratory for Novel Software Technology, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China)

**Abstract:** Self-organization of Wireless Sensor Networks (WSN) involves well-regulated linkages and movements independent of fixed communication infrastructures, which is studied in a specific application. After qualitatively analyzing the self-organization characteristics of WSN, we propose self-organization estimate methods including self-organization degree and energy consumption per unit of self-organization degree, through which the self-organization evolving mechanism is quantitatively analyzed in a typical application. Simulations show that WSN in the specific application has a self-organization process of gestation, growing, maturing, withering and death, and the self-organization energy-consuming relies on specific deployment patterns and radio models.

**Key words:** wireless sensor networks; self-organization; energy consuming

## 1 引言

无线传感器网络<sup>[1]</sup>是由微型传感器节点通过自组织机制形成的网络, 这些节点通常具有感知、处理和无线通信能力, 不依赖于固定的通信基础设施而通过分布式网络协议和算法协调各自行为实现网络的自主构建和组织. 在具体应用中, 经过良好设计的无线传感器网络节点通过多跳中继方式将监测数据传到汇聚节点, 最终借助长距离或临时建立的链路与监控中心通信, 而整个网络通常没有严格的控制中心<sup>[2,3]</sup>.

无线传感器网络与具有固定基础设施的通信网络相比, 其自组织机制增强了系统的抗毁性和灵活性; 与无线自组网相比, 其自组织机制实施对象能力有限而规模更加庞大, 并且实施环境通常为客观物理世界. 文献[4]认为无线传感器网络的自组织是指网络组成节点相

互协同以更加高效地完成既定目标. 文献[5]采用分簇方法将无线传感器网络构建为一个分布式环境认知系统. 文献[6]针对无线传感器网络自组织过程中的通信效率、分簇大小和时机等问题提出一种通信高效、固定分簇数的分布式分簇方法以及相应的时机控制机制, 以实现快速高效的网络自组织. 文献[7]提出一种能量高效的无线传感器网络自组织协议, 以使网络节点具有适应动态环境和网络配置的自组织能力. 文献[8]基于无线传感器网络节点部署的冗余, 利用一个启发式的方法将整个网络划分为相互独立而覆盖全监测区域的子集, 每次只有一个子集处于活动状态完成既定任务, 从而有效地减少了网络能耗. 文献[9]提出一种面向任务的无线传感器网络自组织算法来完成依赖于位置信息的既定任务. 解决网络节点具有多模态感知能力时的内在异构性. 文献[10]提出一种无线传感器网络单一地址分配

收稿日期: 2006-02-06; 修回日期: 2006-07-16

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 60573141, No. 70271050); 江苏省自然科学基金 (No. BK2005146); 江苏省高新技术研究计划 (No. BG2004004, No. BG2005038, No. BG2006001); 国家 863 高科技项目 (No. 2005AA775050); 南京市高科技项目 (No. 2006 软资 105); 江苏省计算机信息处理技术重点实验室基金 (No. kjs050001, No. kjs06); 江苏省高校自然科学研究计划 (No. 04 KJB520095)

机制推动网络的自组织.文献[11]使用无线传感器网络节点的通信和感知特性,提出了一种基于角色的分层自组织算法.可见,当前在无线传感器网络自组织方面的研究主要从拓扑控制、能耗和协议的角度保证网络组织的稳定和高效,但缺乏对自组织本身定量的度量和分析.本文将从系统和应用的角度,针对无线传感器网络所要求或表现出的自组织性,以定量的方法来研究其评价方法和特定应用的运行机制.

## 2 无线传感器网络的自组织特性分析

现有一般自组织理论<sup>[12]</sup>的研究对象是自然界中自发形成的宏观有序现象,有序是指系统内部组成部分之间有规则的联系和运动,其形成依赖于能量的运动和作用.自组织是多个子系统之间作用产生的整体现象和效应,是通过系统的自发、自主的走向组织的一种结果和过程.从系统组成来看,无线传感器网络是合作求解的自治体(Agent)集合,具有分布自治的组织方式,这里的组织是指 Agent 对合作求解任务的承诺,其形成是根据问题求解的要求预先设计的,或者是由于交互而形成的合作关系,但共同点是 Agent 要在无线传感器网络组织中承担一定的角色,完成角色所规定的职责.

无线传感器网络在具体应用中可能规模庞大、部署密集,所在环境可能多样而动态变化,整个系统控制渐趋复杂,需要进行动态的调整.另外,不同的应用对无线传感器网络的设计要求不同,标准化的、规格划一的网络系统难以解决网络结构、运行与调度的复杂程度.按照自组织原则构建和运行的无线传感器网络系统,其行为模式可由大量相互作用的 Agent 来实现,各 Agent 可自主决策而不依赖于外部控制中心,因而具有更强的控制复杂性的能力,对于环境的随机变化具有更为灵活的响应特性.无线传感器网络运行和演化是基于大量 Agent 各自的微观决策,而少量 Agent 的失效或决策失误,将不会终止系统既定目标的完成,因而自组织的无线传感器网络具有更强的鲁棒性和更强的适应环境变化的能力.良好设计的无线传感器网络自组织系统还具有更强的自行趋优的能力,能够不断地完善和优化其组织结构和运行模式.

一个良好设计的无线传感器网络自组织系统的宏观演化是在反复迭代中不断趋于优化的,每一个 Agent 都遵循能够保证网络协调统一和稳定的系统规范和行为准则,并在此约束下决定其对策与后续行动;各个 Agent 的决策与行动是并行的,其通信的距离一般远小于系统的宏观特征尺度,而其信息往往是不完整的;每个 Agent 在决定其对策和行为时,除了根据它自身的状态以外,一般还需了解邻近 Agent 的状态;整个网络中所有 Agent 各自的行为的总和,决定整个系统的宏观行

为.

## 3 无线传感器网络自组织的评价方法

**定义 1** 将特定应用的某一时间  $t(t > 0)$  时的无线传感器网络所有节点的集合称为一个自组织空间,记为  $S(t)$ ,  $S(t) = \{x_i | i > 0, i \in N\}$ .

**定义 2** 称  $X(t)$  为无线传感器网络自组织变元,定义域为无线传感器网络自组织空间  $S(t)$ .称  $C\{X(t) = x_i\} = c_i(t)$ ,  $i = 1, 2, \dots$  为  $X(t)$  的自组织贡献分布,其中  $c_i(t)$  为  $x_i$  在时间  $t(t > 0)$  所被赋予的一个实数,称为节点  $x_i$  的自组织贡献率.满足以下条件:(1)  $c_i(t)$ ,  $i = 1, 2, \dots$ ; (2)  $\sum_{i=1}^{n(t)} c_i(t) = 1$ ,  $n(t)$  为无线传感器网络所含节点数.在一个固定规模的无线传感器网络中,节点常因能量不足或故障等原因退出网络,  $n(t)$  随着时间的增长而逐步减少.

无线传感器网络的自组织依赖于多个子系统之间的相互作用,每一个子系统交互合作而表现为一定的角色,完成既定的任务.无线传感器网络及其应用环境的动态变化使每一个子系统的角色常常不断变化,自组织贡献率用于量化衡量这些具有特定角色的子系统(节点或节点集)对整个系统的重要程度.对于特定的无线传感器网络,在一定的时间区域,少数节点或节点集的贡献率越高意味着其重要程度越高,网络自组织演化对其依赖性越大,从而降低了网络的抗毁性和灵活性.无线传感器网络每个节点自组织贡献率的较小差异意味着网络对少数节点或节点集的依赖性较小,因而网络自组织演化具有更多的路径选择.

**定义 3** 称  $Ave(t)$  为无线传感器网络自组织平均贡献率,  $Ave(t) = \frac{1}{n(t)} \sum_{i=1}^{n(t)} c_i(t)$ ,  $n(t)$  为无线传感器网络所含节点数.根据定义 2,  $Ave(t) = 1/n(t)$ .

**定义 4** 将特定应用的某一时间  $t(t > 0)$  时的无线传感器网络所有节点能量的集合称为无线传感器网络自组织能量空间,记为  $Energy(t; S(t))$ ,  $Energy(t; S(t)) = \{e_i(t) | i > 0, i \in N\}$ , 其中  $e_i(t)$  为节点  $x_i$  在时间  $t$  时的能量,随着时间的增长而逐步减少.

对于特定应用、布局、能量空间,在某一时间  $t(t > 0)$  时,无线传感器网络的自组织度定义为  $SOD(t; S(t)) = 1 - \sum_{i=1}^{n(t)} (c_i(t) - Ave(t))^2$ ; 在时间区域  $(t_1, t_2]$  ( $t = t_2 - t_1 > 0$ ), 无线传感器网络的自组织度定义为

$$SOD((t_1, t_2]; S(t)) = \frac{t_2}{t_1 t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} (1 - \sum_{i=1}^{n(t)} (c_i(t) - Ave(t))^2) dt$$

对于特定应用、布局、能量空间,在时间区域  $(t_1, t_2]$  ( $t = t_2 - t_1 > 0$ ), 当  $SOD(t_1; S(t_1)) > 0$ ,  $SOD(t_2; S(t_2)) > 0$

(t<sub>2</sub>) > 0 时,无线传感器网络的自组织单位能耗定义为

$$E(t_2, t_1) = \frac{\text{Energy}(t_1; S(t_1)) - \text{Energy}(t_2; S(t_2))}{\text{SOD}((t_1, t_2]; S(t))}$$

根据定义 3 和定义 4,

$$E(t_1, t_2) = \frac{(t_2 - t_1) \left[ \sum_{i=1}^{n(t_1)} i(t_1) - \sum_{i=1}^{n(t_2)} i(t_2) \right]}{t_2 \left[ 1 - \sum_{i=1}^{n(t)} \left[ c_i(t) - \frac{1}{n(t)} \right]^2 \right] dt}$$

无线传感器网络的自组织度衡量所有节点自组织贡献率的差异大小,自组织度越大,所有节点自组织贡献率的差异越小,网络自组织的演化对少数节点或节点集的依赖性相对越小,因而网络更具有抗毁性和灵活性.无线传感器网络的自组织通过多个子系统各自决策进行运行和演化,整个系统的协调统一和稳定发展程度可通过自组织度来衡量.在实际自组织演化中,无线传感器网络自组织度的具体评估一方面依赖于网络运行中的具体协议与算法所给出的系统规范和行为准则,另一方面依赖于自组织贡献率的具体评价方法.对于无线传感器网络的自组织,低能耗的组织结构和运行模式是网络具体协议与算法设计的重要目标,无线传感器网络的自组织单位能耗从自组织过程的角度来衡量无线传感器网络的能耗变化,以此可分析无线传感器网络的自组织能耗性能及其影响因素.

#### 4 无线传感器网络自组织演化机制的仿真分析

无线传感器网络的自组织是在不依赖于外部指令而按照某种统一规则、各尽其责而又协调地自动地形成有序的结构.下面以一种典型的采用多跳路由<sup>[13]</sup>、具有较好性能的典型应用 Surge. Reliable<sup>[14]</sup> 在 PowerTOSSIM<sup>[15,16]</sup> 上的仿真实验,从自组织度和自组织单位能耗来研究分析面向具有应用的无线传感器网络自组织演化过程和特性.在仿真实验中, Surge. Reliable 采用具有单一目标(汇聚节点)和主动双向链接估计的最短路径算法,所有节点以一定周期采集数据传送至汇聚节点.网络节点的 CPU 时钟为 7.37MHz,无线通信采用实验模型<sup>[17]</sup>.第一个仿真实验,分别将具有 16、32、64 个节点(包括汇聚节点)的无线传感器网络随机部署在同一个区域,假设汇聚节点能量充裕,一般节点总能量为 10000 毫焦(mJ),当节点剩余能量低于总能量 1% 时,停止运行;以某一时间所转发的数据包数在整个网络(不包括汇聚节点)的转发数据包总数的比率作为该节点在该时间的自组织贡献率.仿真结果如图 1 所示,三个不同规模的无线传感器网络自组织演化具有很大的相似性,包含发展的五个阶段: 孕育期、发育期、成熟期、衰退期、死亡期.处于自组织孕育期的无线传感器网络主要完成节点的启动、初始化和对邻居

节点认知以及组织的有序化准备工作;发育期与衰退期在无线传感器网络整个自组织演化期表现出短暂性,急剧上升或下降;无线传感器网络自组织成熟期除初期的相对曲折外表现为长期的稳定平滑,而且处于不断优化之中,自组织度在不断提高;当网络因能量不足或出现故障等原因难以支撑其运行时,自组织将进入死亡期.可见,一个良好设计的无线传感器网络自组织过程是从混乱的无序状态到有序状态的演化,是由组织程度低到组织程度高的层次跃升的过程演化,通过消耗能量和传输信息不断提高其自组织度,整个网络形成组织化的连续统一体.

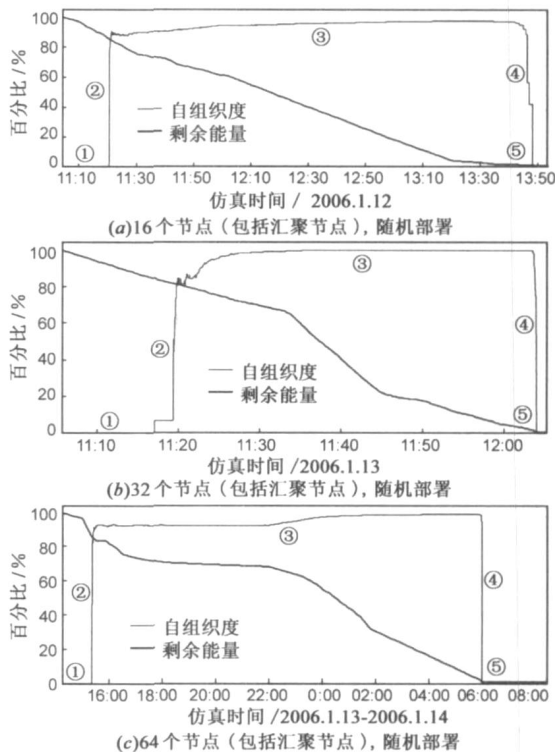


图 1 无线传感器网络自组织过程

第二个仿真实验,研究具有 16 个节点(包括汇聚节点)的无线传感器网络在同一个区域的 10 个场景下的孕育期节点平均能耗和孕育期后(死亡期前)的自组织单位能耗,一个场景对应于不同部署方式和无线模型(不同信号强度和丢包率)等网络物理结构参数.仿真结果如图 2 所示,不同场景下的孕育期节点平均能耗和孕育期后的自组织单位能耗均存在差异和不确定性.可见,在特定应用中的无线传感器网络自组织过程,自组织能耗依赖于部署方式和无线模型等网络物理结构参数.

#### 5 结束语

无线传感器网络自组织关注的是无线传感器网络从无到有、从小到大、从粗到精和从劣到优的系统演化过程或行为.基于网络节点在自组织过程的贡献大小

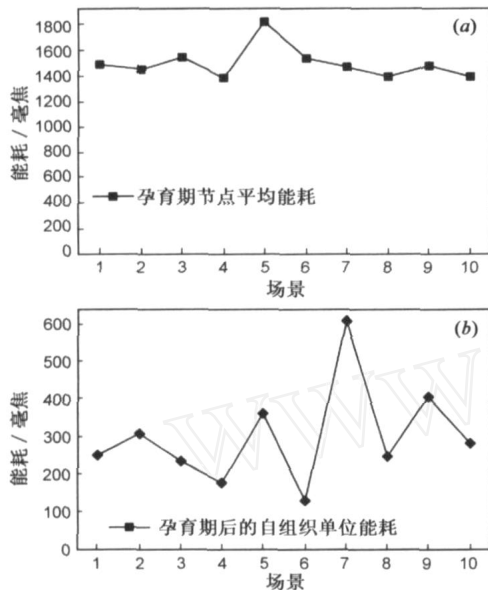


图 2 无线传感器网络自组织过程的能耗变化

提出自组织度和自组织单位能耗的自组织评价方法,并以此研究典型应用的自组织机制。仿真表明,一个面向特定应用的无线传感器网络自组织过程可以划分为孕育、发育、成熟、衰退和死亡等五个阶段;在无线传感器网络具体运行中,部署方式的差异、信号强度和丢包率等无线模型参数不同影响整个网络自组织能耗性能。

#### 参考文献:

- [1] Ilyas M, Mahgoub I. Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Sensing Systems [M]. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2005.
- [2] 任丰原,等. 无线传感器网络[J]. 软件学报, 2003, 14(7): 1282 - 1291.
- [3] Akkaya K, Younis M. A survey on routing protocols for wireless sensor networks[J]. Ad Hoc Networks, 2005, 3(3): 325 - 349.
- [4] Travis C Collier, Charles Taylor. Self-organization in sensor networks[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2004, 64(7): 866 - 873.
- [5] Catterall E, et al. Self-organization in ad hoc sensor networks: An empirical study[A]. 2002 eighth international conference on Artificial life Proceedings [C]. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 2002. 260 - 263.
- [6] Krishnan R. Efficient self-organization of large wireless sensor networks[D]. Boston: Boston University, 2004.
- [7] Olariu S, et al. An energy-efficient self-organization protocol for wireless sensor networks[A]. 2004 International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing Proceedings [C]. Washington: IEEE Computer Society, 2004. 55 - 60.
- [8] Slijepcevic S, Potkonjak M. Power efficient organization of

wireless sensor networks[A]. 2001 IEEE International Conference on Communications Proceedings (vol. 2) [C]. Washington: IEEE Communication Society, 2001. 472 - 476.

- [9] Premaratne K, et al. Location information-aided task-oriented self-organization of ad-hoc sensor systems[J]. IEEE Sensors Journal, 2004, 4(1): 85 - 95.
- [10] Jobin J, et al. A scheme for the assignment of unique addresses to support self-organization in wireless sensor networks[A]. 2004 IEEE 60th Vehicular Technology Conference Proceedings (vol. 2) [C]. Washington: IEEE Vehicular Technology Society, 2004. 26 - 29.
- [11] Kochhal M, et al. Role-based hierarchical self organization for wireless ad hoc sensor networks[A]. 2003 2nd ACM International Conference on Wireless Sensor Networks and Applications Proceedings [C]. New York: ACM Press, 2003. 98 - 107.
- [12] 吴彤. 自组织方法论研究[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [13] Woo A. A Holistic Approach to Multihop Routing in Sensor Networks[D]. Berkeley: University of California Berkeley, 2004.
- [14] Crossbow Technology Inc. Wireless sensor networks: Getting Started Guide (Rev. A) [DB/OL]. [http://www.xbow.com/Support/Support.pdf.files/Getting\\_Started\\_Guide.pdf](http://www.xbow.com/Support/Support.pdf.files/Getting_Started_Guide.pdf), 2005.
- [15] Levis P, et al. TOSSIM: Accurate and scalable simulation of entire tinyOS applications[A]. 2003 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems Proceedings [C]. New York: ACM Press, 2003. 126 - 137.
- [16] Shnayder V, et al. Simulating the power consumption of large-scale sensor network applications[A]. 2004 2st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems Proceedings [C]. New York: ACM Press, 2004. 188 - 200.
- [17] Ganesan D, et al. Complex Behavior at Scale: An Experimental Study of Low-Power Wireless Sensor Networks[R]. Los Angeles: UCLA Computer Science Department, 2002.

#### 作者简介:



陈 志 男, 1978 年生于江苏淮安, 南京邮电大学博士生, 目前主要研究方向为无线传感器网络、Agent 和多 Agent 系统、普适计算等。

王汝传 男, 1943 年生于安徽合肥, 南京邮电大学教授、博士生导师, 目前主要研究方向为计算机软件、计算机网络、信息安全、无线传感器网络、移动代理和虚拟现实技术等。

E-mail: wangrc@njupt.edu.cn