

基于元胞自动机的无线传感网络整体行为研究^{*}

张文铸[†] 袁 坚 俞 哲 徐赞新 山秀明

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

(2008 年 1 月 2 日收到, 2008 年 5 月 12 日收到修改稿)

探讨自组织通信网络中局部行为与系统整体行为的关联, 对于相关系统的设计和控制具有重要应用价值. 利用二维元胞自动机模型对无线传感网络的拓扑控制过程进行模拟, 可以分析节点间局部交互作用规则对网络整体行为的影响. 研究表明, 在不同的局部演化规则作用下, 该系统呈现出复杂的时空演化现象, 发现系统整体行为空间中存在振荡、衰减、稳定等基本模式, 并且该模型可以反映系统内不同全局目标之间的折中关系, 为进一步研究无线传感网络整体行为的控制问题提供一种新的途径.

关键词: 自组织, 元胞自动机, 通信网络, 无线传感网络

PACC: 0547, 0565

1. 引 言

互联网与无线对等通信网络的出现和广泛应用, 表明分布式自组织结构已经成为通信系统的一个重要发展方向. 分布式的自组织网络具有一些突出的特点: 系统对动态环境的自适应性、对单点故障的鲁棒性, 以及包容大量节点的可扩展性等等, 这是近年来自组织通信网络快速发展的主要原因^[1].

然而, 在自组织通信网络技术应用的同时, 对于相应的设计和控制问题的理解还存在不足. 一般而言, 自组织是系统为形成和维护自身空间上、时间上或功能上的结构, 在没有外部或集中控制的条件下, 节点层次所进行的动态自适应过程. 随着系统规模增长, 自组织通信网络的复杂程度越来越高, 一些关键问题逐渐凸显. 例如, 在互联网路由更新过程中出现的同步现象^[2], BGP 路由协议出现的全局路由不稳定性^[3], 以及在无线 Ad-Hoc 网络节点的数量和位置引起的相变现象^[4]等等. 一方面, 人们希望通过控制节点层次相对简单的局部行为, 实现宏观层次的整体特性, 如拓扑连通性、系统生存性等. 另一方面, 由于资源限制、反馈环路、时间延迟等因素产生的非线性, 自组织网络系统所

表现出的突现行为实际上又是难以预测的. 因此研究自组织通信系统的内在复杂性, 对于解决大规模通信网络系统的设计分析、操作控制、安全监测等问题有着重要的应用价值.

本文着重研究无线传感网络的拓扑控制问题. 无线传感网络是一种典型的自组织通信网络, 它由大量分布式的微小节点(传感器)构成, 每个节点只能够与周围临近的节点进行通信, 并依靠局部信息做出行为决策. 拓扑控制问题突出体现了无线传感网络的这种自组织特征: 各个网络节点根据其邻居节点的工作/休眠状态来控制自身状态的转换, 在尽量减少系统能量消耗的前提下, 保证整个网络拓扑的连通性和覆盖性.

本文用二维元胞自动机模型对无线传感网络的拓扑控制过程进行模拟. 元胞自动机作为状态离散系统, 能够以简单的规则揭示复杂的全局特性, 因而成为研究自组织系统时空演化规律的重要工具. Wolfram 等人详细分析研究了一维元胞自动机的演化行为, 并在大量计算机仿真的基础上, 将一维元胞自动机的演化行为归纳为四类: 平稳型(homogeneous), 周期型(periodic), 混沌型(chaos)和复杂型(edge of chaos)^[5]. 对于二维及更高维度的元胞自动机, 规则更多, 演化行为更为复杂^[6]. 近年

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 60674048, 60672142, 60772053, 60672107, 60603068), 国家重点基础研究发展计划(973)项目(批准号: 2007CB307100)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: zhangwz04@mails.thu.edu.cn

来一些研究利用二维元胞自动机对自组织通信网络在系统动力学层次加以抽象,如文献 [7,8] 揭示了互联网流量的时空相关性、相变行为和自组织临界现象. 另外,一些研究试图从不同角度探讨元胞自动机模型在无线传感网络的应用. 文献 [9] 利用该模型对网络协议进行评估,而这种用抽象模型表达细节问题的方法并未能充分发掘元胞自动机内在的自组织性质和复杂动力学特征. 文献 [10] 试图通过对二维元胞自动机施加局部外界扰动,以此作为分布式控制手段影响系统行为. 然而,正如文献 [11,12] 中指出,自组织网络性质的决定性因素在于系统节点之间的内在交互作用,而不是外界干扰或边界条件的影响.

本文探讨自组织网络中节点之间的内在相互作用对系统整体行为的影响,通过无线传感网络的二维元胞自动机模型,分析节点状态更新规则与网络拓扑覆盖性和连通性的关系. 研究发现,在不同节点状态更新规则下,传感器网络的整体拓扑特性可以初步归纳为振荡、衰减、稳定等基本模式. 在此基础上,本文进一步讨论了在稳定行为集内系统拓扑特性和实现代价(体现为系统能量消耗)之间的折中关系,指出节点状态转移规则是进行折中选择的主要因素. 这一工作的进一步深入,将有利于对自组织通信网络内在机理的理解以及相关应用技术的发展.

2. 无线传感器网络的元胞自动机模拟

考虑一个平面分布的无线传感器网络,如图 1 (a),由于传感器节点的空间分布和局部交互特征,采用二维元胞自动机模型对其加以刻画. 此时元胞分布在二维欧几里德平面上规则划分的网格点上,通常为方格划分,如图 1(b). 该元胞自动机 A 可以由如下四元组 $A=(S, d, N, f)$ 表示. 其中, S 为 k 个符号的有限集,记 Z 为全体整数集, S^{Z^2} 是从 Z^2 映射到 S 的映射全体,即二维元胞自动机的构型空间(Shift Space). 本系统中仅考虑节点的工作、休眠两种状态,因而可以定义 $k=2, S=\{0,1\}$,其中 0 状态表示节点休眠,1 状态表示节点工作. 自动机维数 $d=2$,定义二维元胞空间 F :

$$F = \{(i, j) \mid i, j \in Z, 0 \leq i < L, 0 \leq j < L\}, \quad (1)$$

其中坐标 (i, j) 唯一对应空间 F 中的一个元胞,该空间包含 $L \times L$ 个格子. 定义节点邻域 N 为 Moore

型结构,元胞 (i, j) 的邻居集合表示为

$$N_{i,j} = \{(k, l) \in F \mid |k-i| \leq 1, |l-j| \leq 1\}. \quad (2)$$

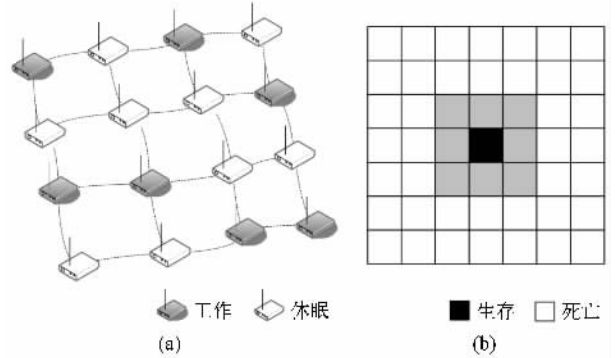


图 1 (a) 无线传感器网络;(b) 元胞自动机模型

设 t 时刻元胞 (i, j) 的状态为 $s_{i,j}^{(t)}$,其邻居状态之和 $n_{i,j}^{(t)}$ 定义为

$$n_{i,j}^{(t)} = \sum_{(k,l) \in N_{i,j}} s_{k,l}^{(t)}. \quad (3)$$

对于任意元胞 $(i, j) \in F$,局部状态转移规则 f :

$$s_{i,j}^{(t+1)} = f(n_{i,j}^{(t)}). \quad (4)$$

即 $t+1$ 时刻的节点状态是由 t 时刻该节点邻域状态按照一定规则 f 确定的. 在二维空间中,规则 f 一般可用 Survive/Birth 表示法,例如用“S23/B3”表示著名的“生命游戏”(game of life) 规则,其等价于如下描述:

1) Survive 规则:若 $s_{i,j}^{(t)} = 1$ 则

$$s_{i,j}^{(t+1)} = \begin{cases} 1, & n_{i,j}^{(t)} = 2, 3, \\ 0, & n_{i,j}^{(t)} \neq 2, 3, \end{cases}$$

2) Birth 规则:若 $s_{i,j}^{(t)} = 0$ 则

$$s_{i,j}^{(t+1)} = \begin{cases} 1, & n_{i,j}^{(t)} = 3, \\ 0, & n_{i,j}^{(t)} \neq 3. \end{cases} \quad (5)$$

为刻画系统整体行为,定义二维格子网络的拓扑特性:

1) 连通度

传感器网络作为信息收集系统,需要实现多跳的信息传递功能,在元胞自动机模型中表现为活着的元胞拥有活着的邻居. 定义 t 时刻系统连通度

$$Cor(t) = \frac{\sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} (s_{i,j}^{(t)} \mid n_{i,j}^{(t)} > 1)}{\sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} (s_{i,j}^{(t)})}. \quad (6)$$

2) 覆盖度

覆盖度反映传感器网络对观测区域的覆盖能

力,在二维元胞自动机中表现为任意 3×3 格子内含有至少一个活着的元胞. 定义 t 时刻系统覆盖度

$$\text{Cov}(t) = \frac{\sum_{i=1}^{L-2} \sum_{j=1}^{L-2} (b_{i,j}^{(t)})}{(L-2)^2}, \quad (7)$$

其中 $b_{i,j}^{(t)}$ 表示 t 时刻系统中一个 3×3 格子的状态, 当且仅当 $n_{i,j}^{(t)} \geq 1$ 时 $b_{i,j}^{(t)} = 1$, 否则 $b_{i,j}^{(t)} = 0$, 这样的 3×3 格子总数为 $(L-2)^2$.

另外,为评价获得相应拓扑性能的代价,定义 t 时刻系统能耗指数

$$\text{eff}(t) = \frac{\sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} (s_{i,j}^{(t)})}{L^2}. \quad (8)$$

$\text{eff}(t)$ 越大,说明系统能量消耗越高.

3. 实验结果

(1) 式定义元胞自动机的规模为 L , 这样系统

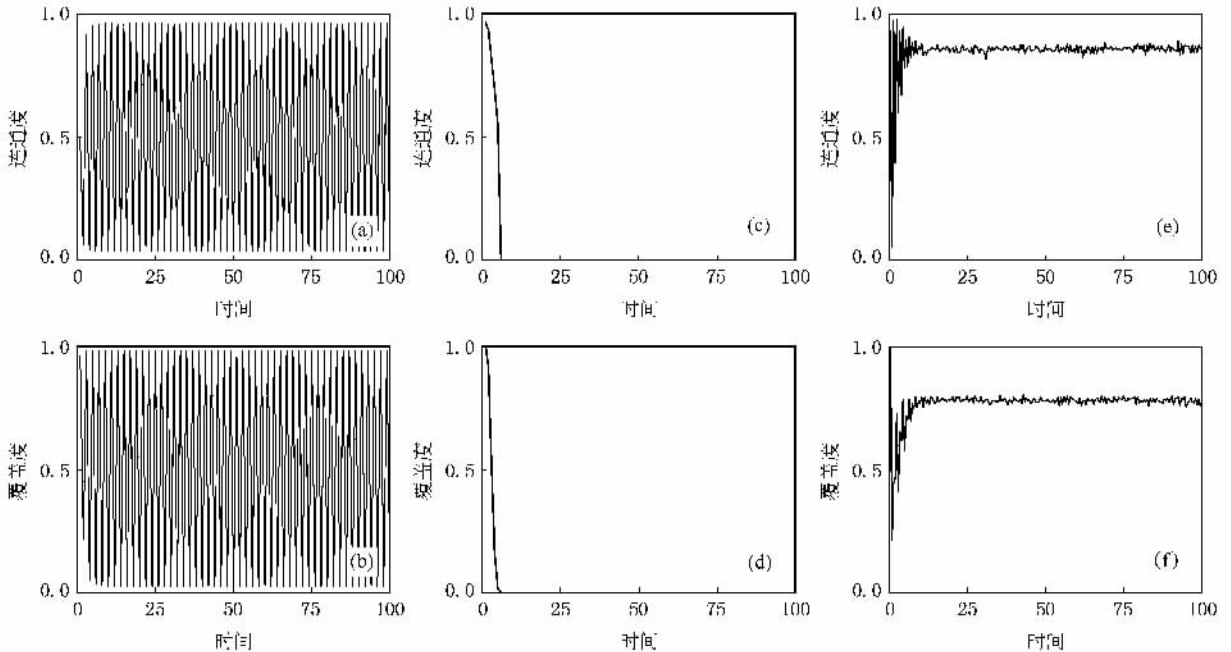


图2 系统整体行为模式分类 (a)规则 S01/B01 下系统连通度;(b)规则 S01/B01 下系统覆盖度;(c)规则 S4/B4 下系统连通度;(d)规则 S01/B01 下系统覆盖度;(e)规则 S1/B1 下系统连通度;(f)规则 S01/B01 下系统覆盖度

3.1.2. 衰减模式

在 S3/B3, S4/B4, S5/B5 等规则作用下,系统的连通度和覆盖度在有限时间内衰减为 0. 图 2(b), (e) 表明在 S4/B4 规则作用下,系统经过不到 10 步的演化即衰减为 0 状态. 事实上,衰减模式可以看作是同步的一种特例,此时系统进入单吸引子

节点总数为 L^2 个(实验中取 $L = 128$). 根据实际网络特点,采用定值边界条件,即令边界外节点均为 0 状态. 网络初始化所有节点以 1/2 概率取 0 状态或 1 状态. 研究在不同的局部更新规则 f 下,系统连通度 $\text{Cor}(t)$, 覆盖度 $\text{Cov}(t)$ 及能耗指数 $\text{eff}(t)$ 的时间演化特征.

3.1. 网络整体行为模式分析

在不同规则 f 作用下,系统呈现复杂的时空演化特性,但是一些规则下的时空演化特征存在相似性,可以初步归结为以下几种典型模式.

3.1.1. 振荡模式

在一些规则(如 S0/B0, S01/B0, S01/B01)下,系统的连通度和覆盖度呈现 0—1 周期振荡行为,图 2(a)(b) 展示了采用 S01/B01 局部规则进行更新时,元胞行为呈现出同步振荡现象. 此时系统状态进入循环吸引子,即在全 0 状态和全 1 状态间的循环往复.

状态.

3.1.3. 稳定模式

在 S0/B1, S1/B1, S01/B1, S34/B34, S1357/B1357 等规则作用下,系统的连通度和覆盖度经过有限步振荡之后趋于一个稳定的非零值. 图 2(c), (f) 表示在规则 S1/B1 下,系统分别经过一定时间

的调整后保持了稳定的拓扑性能. 关于复杂网络同步的稳定性和网络实现同步的条件等问题已有大量研究^[13-15]进行讨论, 对于实际应用系统而言, 节点耦合同步导致的吸引子现象往往会造成系统死锁乃至崩溃, 应尽量避免这类模式的发生, 这种控制上的努力主要反映在节点状态更新机理的设计上.

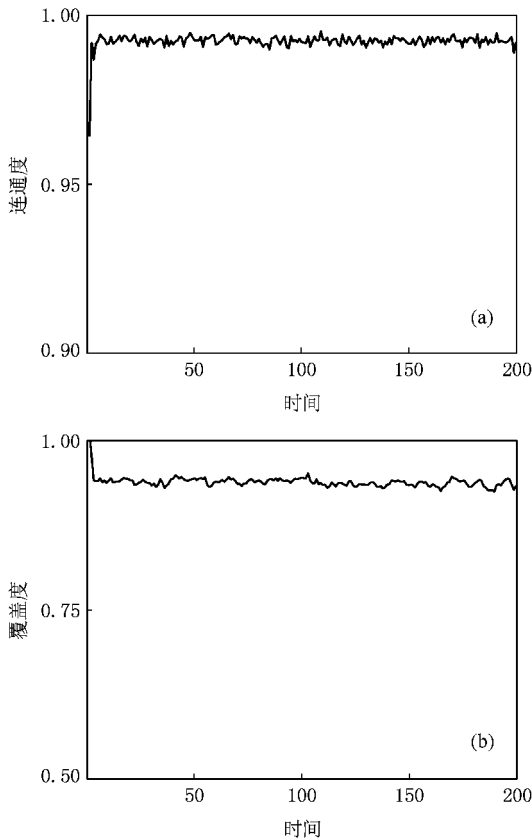


图3 (a)规则 S34/B34 下系统连通度 ;(b)规则 S34/B34 下系统覆盖度

3.2. 拓扑性能与能耗代价的折中关系

既然多个规则都能可对应到同一类模式, 那么有必要研究在同一行为模式集合中规则之间的区别. 为与 S1/B1 规则比较, 选择另一种稳定规则 S34/B34, 其连通度、覆盖度特征如图 3 所示. 图 4 表示在这两种规则下系统能耗的情况. 我们看到在 S1/B1 规则下, 系统稳定时连通度约为 0.93, 覆盖度约为 0.8, 此时系统能耗指数约为 0.22, 在另一规则 S34/B34 下, 系统稳定时连通度约为 0.99, 覆盖度约为 0.94, 相比 S1/B1 规则而言有更好的拓扑性能, 但是其代价是更高的能耗, 此时能耗指数约为 0.41. 可见在稳定模式集合内, 节点根据不同局

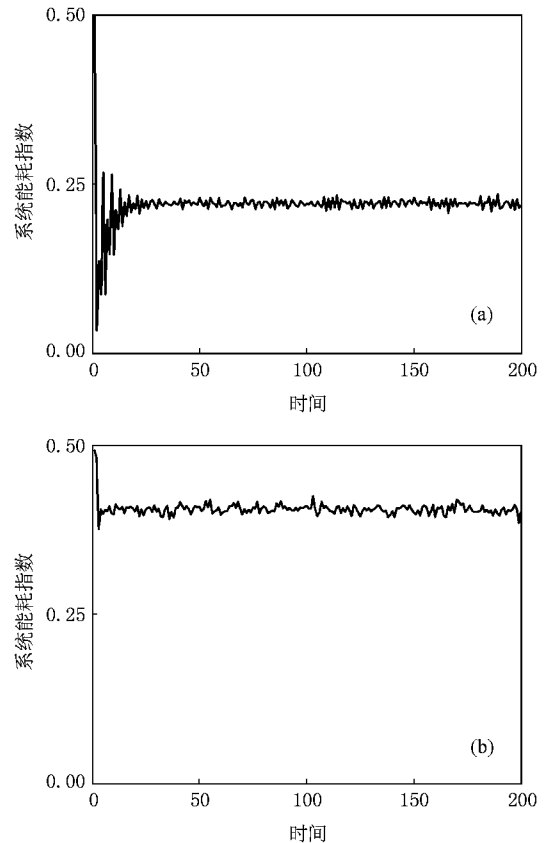


图4 系统能耗指数 (a) S1/B1 规则 ;(b) S34/B34 规则

部更新规则交互作用, 其效果表现为不同全局特性之间的折中关系.

4. 结 论

为理解自组织通信网络的整体行为特征, 本文研究无线传感网络的拓扑控制问题, 提出一种基于二维元胞自动机的抽象模型刻画节点状态更新引起的系统动力学特征. 与以前工作的不同之处在于, 本文从自组织行为的微观机理出发, 探讨节点状态更新规则对系统整体行为的影响. 针对拓扑控制这一类无线传感网络的典型问题, 探讨了网络拓扑的连通性和覆盖性与内在组织机理之间的关系. 研究发现节点采用不同的状态更新规则时, 系统整体拓扑特性呈现复杂的时空演化现象. 初步发现三类典型的系统行为, 概括为振荡、衰减、稳定模式. 这一发现的意义在于实际应用中, 设计者往往力图避免振荡和衰减模式的发生, 而希望达到稳定的情况. 本研究说明了局部更新规则是决定系统整体行为的主要因素, 因而可以通过设计通信节点的自适应机

理达到理想的整体特性. 进一步, 本文探讨了在同一模式空间中不同规则对整体特性的影响, 发现规

则的选取实际上反应了不同指标要求之间的折中关系, 这为自组织网络多目标优化提供了新的思路.

-
- [1] Prehofer C , Bettstetter C 2005 *IEEE Communication Magazine* **43** 78
- [2] Floyd S , Jacobson V 1995 *IEEE/ACM Trans* **3** 365
- [3] Labovitz C , Malan G R , Jahanian F 1998 *IEEE/ACM Trans* **6** 515
- [4] Krishnamachari B , Wicker S B , Bejar R 2001 *GLOBECOM* **5** 2921
- [5] Wolfram S 1983 *Rev. Mod. Phys.* **55** 601
- [6] Packard N , Wolfram S 1985 *J. Statist. Phys.* **38** 901
- [7] Yuan J , Ren Y , Shan X 2000 *Phys. Rev. E* **61** 1067
- [8] Yuan J , Ren Y , Shan X M 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 398 (in Chinese) [袁 坚、任 勇、山秀明 2000 *物理学报* **49** 398]
- [9] Cunha R O , Silva A P , Loreiro A A F , Ruiz L B 2005 *Simulation Symposium Proceedings* **4-6** 323
- [10] Mamei M , Roli A , Zambonelli F 2005 *IEEE Trans on Systems , Man , and Cybernetics* **35** 337
- [11] Tubbs S L 2003 *A Systems Approach to Small Group Interaction* (New York : McGraw-Hill)
- [12] Arrow H , McGrath J E , Berdahl J L 2000 *Small groups as complex system* (CA : Sage)
- [13] Pecora L M , Carroll T L 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 2109
- [14] Chen Y , Rangarajan G , Ding M 2003 *Phys. Rev. E* **67** 026209
- [15] Wang X F , Chen G 2002 *Int. J. Bifurcation and Chaos* **12** 1872192

Study of the global behavior of wireless sensor networks based on cellular automata^{*}

Zhang Wen-Zhu[†] Yuan Jian Yu Zhe Xu Zan-Xin Shan Xiu-Ming

(Department of Electronic Engineering , Tsinghua University , Beijing 100084 , China)

(Received 2 January 2008 ; revised manuscript received 12 May 2008)

Abstract

Study of the association between local and global behaviors is essential for self-organizing communication system design and system control. A cellular automaton-based model is proposed for addressing the topology control problem of wireless sensor networks which well captures the essential features of system behaviors. It is shown that the system behaviors vary with different local rules , and may have oscillating , decreasing or stable patterns. Moreover , this model can also reflect the tradeoff between different system requirements , which maybe inspiring for further study.

Keywords : self-organization , cellular automata , communication systems , wireless sensor networks

PACC : 0547 , 0565

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grants Nos. 60674048 , 60672142 , 60772053 , 60672107 , 60603068) , and the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2007CB307100).

[†] Corresponding author. E-mail : zhangwz04@mails.thu.edu.cn