

无线传感网络的非分簇拓扑控制方法研究

张文铸 刘佳 张林 袁坚 山秀明

(清华大学电子工程系 北京 100084)

摘要 无线传感网络通常由能量受限、通信半径较小的传感器节点构成,其中拓扑控制是重要的工程问题。提出了一种基于元胞自动机的非分簇的拓扑控制算法,与传统分簇方法的区别在于本方法试图通过牺牲小部分拓扑连通度和覆盖度来换取更长的系统生存时间。基于元胞自动机模型的研究表明,节点的状态转移规则对系统整体性能起决定作用,在一些规则下系统拓扑呈现稳定变化,符合对无线传感网络拓扑控制的要求。进一步探讨了该机制在工程上的具体实现问题,并与 LEACH 算法进行了对比,验证了以拓扑性能换取生存时间的设想。

关键词 无线传感网络,元胞自动机,拓扑控制,非分簇算法

中图分类号 TP393.04 **文献标识码** A

Non-cluster Based Topology Control Method in Wireless Sensor Networks

ZHANG Wen-zhu LIU Jia ZHANG Lin YUAN Jian SHAN Xiu-ming

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

Abstract Since sensors are constrained by limited energy and small communication diameters, topology control is a primary problem of wireless sensor network engineering. We proposed a cellular automata-based model for addressing the topology control problem. Different from the traditional cluster-based methods, our approach leads a special way to maintain longer system lifetime at the cost of a small proportion of coverage and connectivity rates. We found that nodal state transition rule plays key role in the system topological characteristics. The stable patterns under specific rules meet well the requirements of topology control in sensor networks. Further we discussed the feasibility of this mechanism into engineering design.

Keywords Wireless sensor network, Cellular automaton, Topology control, Non-cluster algorithm

无线传感网络是由大量的微型传感器节点组成的多跳自组织系统。相对于传统 Ad-hoc 网络而言,无线传感网络的一个显著区别在于其传感器节点采用能量有限的电池供电,并且计算能力和通信能力十分有限,因而要求设计能量高效的协议来延长网络生存时间,其中一个重要方向是网络拓扑控制。

1 无线传感网络的拓扑控制问题

传感器网络拓扑控制是通过空间调度的方式动态调整网络节点的工作状态,在保证网络拓扑性能要求的前提下延长网络生存时间,减少节点间通信干扰,形成数据转发的优化网络结构。目前关于拓扑控制的研究包含两方面问题:节点功率控制和节点功率管理。功率控制机制调节网络中的每个节点的发射功率,在满足网络连通度的情况下,均衡节点的单跳可达邻居数目;节点功率管理利用调度机制暂时关闭非骨干网节点的通信模块,使其进入休眠状态以节省能量。

实验证明传感器节点能量消耗主要在于无线通信模块,如果能够在保证一定系统性能要求的前提下令通信模块间歇

性地关闭,将能够在很大程度上延长传感器网络的生存时间^[1]。目前拓扑控制主要采用分簇的方法,如 LEACH^[2], GAF^[3], TopDisc^[4]等,这些机制在一定程度上实现了节省能量的目的,但同时也有一些共性的缺陷限制了进一步的发展,主要体现在以下两个方面:

(1)分簇方法需要保证任意相邻两个簇内的簇首节点都能够相互通信。为满足这个要求,需要保持非常大的通信范围。而无线传输能耗与通信距离的平方成正比比例增长,如此之大的通信范围必然导致在传输功率上骨干节点能量的快速消耗;此外,节点较大的通信半径将带来节点之间显著的通信干扰,造成数据重传,导致能量浪费。

(2)分簇方法在设计上默认实现了完全的覆盖性和连通性。基于文献调研我们发现,分簇方法都没有定义网络的覆盖性能和连通性能指标,这是因为分簇算法在设计之初默认实现了完全的覆盖性和连通性。分簇算法通过建立骨干网进行数据传递,保证网络的连通性;通过空间上连续的分簇来保证网络的覆盖性。而实际上存在很多流量比较稀疏,对网络连通和覆盖程度要求不高,而对系统生存时间要求很高的场

到稿日期:2009-03-05 返修日期:2009-05-25 本文受国家自然科学基金(批准号:60674048,60672142,60772053,60672107,60603068),973计划(批准号:2007CB307100)资助。

张文铸(1982-),男,博士生,主要研究方向为无线传感器网络与复杂系统,E-mail:zhangwz04@mails.thu.edu.cn;刘佳,女,博士生;张林,男,副教授;袁坚,男,副教授;山秀明,男,教授,博士生导师。

合。此时分簇算法由于默认实现完全的覆盖性和连通性,缺乏整体性能上的调整和变通。

打破分簇的限制,意味着在全网范围内让每个传感器节点自适应周围环境的变化,并希望得到较好的整体性能。我们发现二维元胞自动机可以较好地刻画无线传感网络的这种自组织过程^[5]。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 4 类:平稳型(homogeneous)、周期型(periodic)、混沌型(chaos)和复杂型(edge of chaos)^[6]。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^[7]。通过建立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,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^[5]。

本文在此基础上,提出解决传感器网络拓扑控制问题的具体方法。根据节点无线模块的“开启 / 关闭”定义其“工作 / 睡眠”状态,其次假设节点仅具有最小通信半径,即仅与周围最邻近节点进行信息交互,各节点通过周围最邻近节点的状态信息,根据一定的规则确定自身下一时刻的状态,利用传感器网络节点之间的局部作用实现系统整体覆盖度、连通性和生存时间的要求。相对于其他机制,本方法的不同之处在于:(1)仅有周边节点的状态信息交互;(2)以一定的覆盖度和连通度指标为代价换取更好的节能表现。仿真结果验证了这种方法的可行性。

2 基于元胞自动机的拓扑控制模型

考虑一个平面分布的无线传感器网络,如图 1(a)所示,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规则划分的网格点上,通常为方格划分,如图 1(b)所示。该元胞自动机 A 可以由四元组: $A = (S, d, N, f)$ 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)。

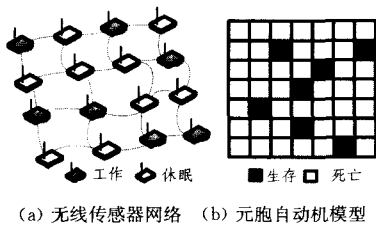


图 1

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 \mathbb{F} 为:

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

其中,坐标 (i, j) 唯一对应空间 \mathbb{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:

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

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:

$$s_{i,j}^{(t+1)} = f(n_{i,j}^{(t)}) \quad (3)$$

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 $s_{i,j}^{(t+1)} = \begin{cases} 1, & n_{i,j}^{(t)} = 2, 3 \\ 0, & n_{i,j}^{(t)} \neq 2, 3 \end{cases} \quad (4)$
- 2) Birth 规则:若 $s_{i,j}^{(t)} = 0$,则 $s_{i,j}^{(t+1)} = \begin{cases} 1, & n_{i,j}^{(t)} = 3 \\ 0, & n_{i,j}^{(t)} \neq 3 \end{cases}$

为刻画系统整体行为,定义了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 时刻系统连通度为:

$$Con(t) = \frac{\sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} (s_{i,j}^{(t)} | n_{i,j}^{(t)} \neq 0)}{\sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} (s_{i,j}^{(t)})} \quad (5)$$

(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 时刻系统覆盖度为:

$$Cov(t) = \frac{\sum_{i=1}^{L-2} \sum_{j=1}^{L-2} (b_{i,j}^{(t)})}{(L-2)^2} \quad (6)$$

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 $(L-2)^2$ 。

初步研究表明,在一些规则下,该系统可以保持稳定的连通度和覆盖度指标(如图 2 所示),同时可以发现系统拓扑性能和生存时间的折中关系。

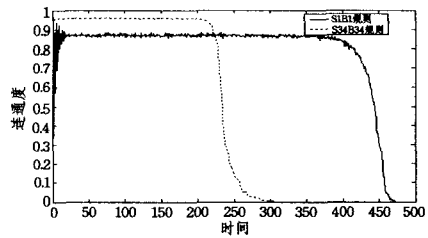


图 2 两种规则下的连通、覆盖性能比较

3 非分簇的拓扑控制方法

3.1 基本假设

基于上述研究,提出一种无线传感器网络拓扑控制的新方法。首先作 3 点假设:

- (1) 假设传感器网络为同质网络,即所有传感器节点均具有相同的结构和功能;
- (2) 假设初始状态时,传感器节点规则部署或均匀播撒,各节点的初始能量相同;

(3)假设通信模块的发射半径等于接收半径。

此外,基于文献[2]采用了一阶无线模型(First order radio model)(如图3所示),其中,通信模块电路单元收发1比特所需能量相等,即 $E_{Tx\text{-elec}} = E_{Rx\text{-elec}} = E_{elec}$ 。 ϵ_{amp} 为发送端的发送放大器参数。因此传输 k 比特信息至 d 距离,通信模块所需的能量为:

$$E_{Tx}(k, d) = E_{Tx\text{-elec}}(k) + E_{Tx\text{-amp}}(k, d) = E_{elec} \times k + \epsilon_{amp} \times k \times d^2$$

要接收这些信息,通信模块所需能量为:

$$E_{Rx}(k) = E_{Rx\text{-elec}}(k) = E_{elec} \times k$$

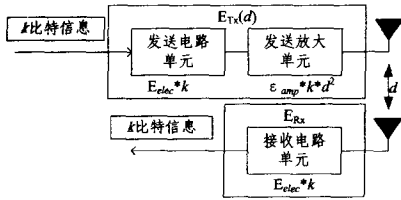


图3 一阶无线模型

根据文献[1]的实测结果,无线传感器节点在发射、接收和空闲状态下,通信模块的功耗分别为:14.88mW,12.50mW,12.36mW。按照传感器节点通信能力为50kbps计算,每传输1bit信息至10m的距离,发送、接收和空闲状态下通信模块所需的能量分别为: $E_{Tx} = 0.298\mu\text{J}$, $E_{Rx} = 0.250\mu\text{J}$, $E_{idle} = 0.247\mu\text{J}$,即 $E_{Tx} \approx E_{Rx} \approx E_{idle}$ 。因而从能耗的角度,将无线传感器节点的工作状态归结为两种状态(通信模块开启、通信模块关闭)是合理的。

3.2 功率控制方法

为了保证每个节点只和周围邻近节点通信,采用了一种基于节点度的功率控制方法^[8]。实际传感器节点的功率往往不是连续调整的,而是分为若干个功率等级,如清华大学 FLOWS 传感器网络平台^[9]中,传感器节点的功率调整等级分为: -6dBm, -2dBm, 6dBm, 10dBm。

在网络初始化时,利用基于节点度的功率控制方法,传感器节点通过动态调整传输功率来保证最大可达邻居数目在一定的范围之内(在元胞自动机算法中,这个值可以是6到10),从而实现较小的通信范围。

3.3 时序定义

非分簇算法要求在每个时步(time step)相邻的节点都能够交互状态信息,从具体实现的角度,需要设计节点状态监听和广播的时序。此外,处于睡眠状态(即通信模块关闭)的节点必须定时唤醒以便了解周围环境的情况,因而需要设计良好的时序关系,同时保证节点互通信和系统整体节能效果。针对上述两方面的问题,对传感器节点的工作时序定义如下。

如图4所示,网络中的每个传感器节点采用周期监听模式收集邻居信息。图4(a)中,节点在每一个工作时步内可以分为两个时段: T_{listen} 为节点监听周期,在此周期内节点间完成局域的时间同步和邻域状态信息的交互,在 T_{listen} 的结束时刻,节点完成状态转换; T_{state} 为节点状态周期,在此周期内节点根据所处状态(工作或休眠),选择开启或关闭无线通信模块,若处于工作状态,则参与数据转发任务,若处于休眠状态,只有在下一个监听周期结束时才可能转为工作状态。

图4(b)为监听周期的具体时间段划分:

T1:时间同步。各个节点发送时间同步信号 SYNC,该

信号包含自身时钟信息,以令各相邻节点时间轴校准;

T2:确认邻域。各个节点将包含自身编号的请求发送信息(RTS)在邻域内广播,能正确接受信息的节点返回确认发送信息(CTS),T2结束后,每个节点已经知道自己有哪些邻居;

T3:状态广播。各个节点将自身状态信息在邻域内广播,仅有 T2 时段内确认是邻居的节点才能接收该信息,返回上层控制程序。所有邻居的状态汇集后,节点根据状态转移规则 f 确定自身下一时段内的状态,并在 T_{listen} 结束时完成状态转换。

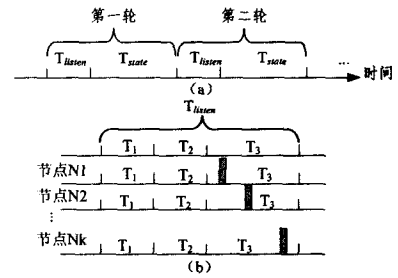


图4 节点的周期监听模式

由于利用了节点局部同步,以上 T1-T3 时段内的交互基于 TDMA 非竞争 MAC 协议。

4 实验与分析

通过仿真对本方法的性能进行了分析,并与 LEACH 算法进行了比对。假设节点的初始能量为 0.1J,每传输 1 比特数据所需能量 $E_{Tx} = E_{Rx} = 0.25\mu\text{J}$,且 $E_{Tx} = E_{Rx} = E_{idle}$,各节点在每个时步内传输 2000 比特的信息(或耗用等效的时间)。网络中共有均匀分布的 100 个节点,通信半径为 10m,非分簇算法采用 S2B03 规则。网络生存时间如图 5 所示,LEACH 算法下,在 100 步左右仅有不到 10% 的节点存活,而非分簇算法下系统生存时间可以延长至接近 LEACH 的 7 倍。作为代价,非分簇算法的拓扑连通度和覆盖度有 15% 左右的牺牲,如图 6 和图 7 所示。

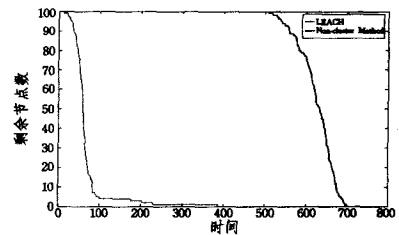


图5 LEACH 和非分簇算法的性能对比

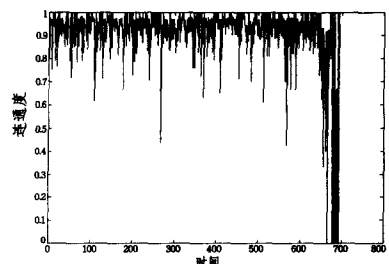


图6 非分簇算法(S2B03 规则)系统连通度

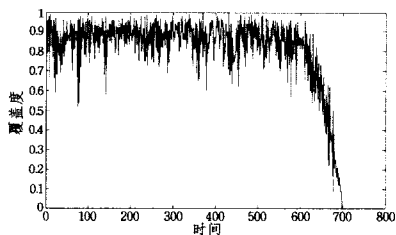


图7 非分簇算法(S2B03 规则)系统覆盖度

结束语 通过建立无线传感器网络的元胞自动机模型,对拓扑控制过程的本质特征进行了刻画。研究证明,与非分簇的拓扑控制方式相比,以 LEACH 及其改进协议的传统拓扑控制方法的主要优势在于放宽对拓扑连通性和覆盖程度的限制,从而在原理上可能获得更高的节能增益。通过具体的机制设计,实现了这种非分簇拓扑控制方法,进而证明了该设想的可行性。在具体应用中,本方法作为对现有分簇方法的补充,更适合在对覆盖性能要求不高,而对生存时间或布置成本要求较高的场合,对大规模的生态环境监测系统、森林防火、城市信息采集相关的无线传感网络建设有重要意义。

参考文献

[1] Schurgers C, Tsiatsis V, Ganeriwal S, et al. Topology management for sensor networks; Exploiting latency and density[C]//

Proc 3rd ACM Int'l Symp on Mobile Ad Hoc Networking & Computing, Lausanne, Switzerland. June 2002; 135-145

[2] Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670

[3] Xu Y, Heidemann J, Estrin D. Geography-informed energy conservation for ad hoc routing[C]//Proc 7th Annual Int'l Conf on Mobile Computing and Networking (MobiCOM). Rome, Italy, July 2001; 70-84

[4] Deb B, Bhatnagar S, Nath B. A topology discovery algorithm for sensor networks with applications to network management[R]. DCS-TR-441. Rutgers University, May 2001

[5] 张文铸, 袁坚, 俞哲, 等. 基于元胞自动机的无线传感网络整体行为研究[J]. 物理学报, 2008(11)

[6] Wolfram S. Statistical-mechanics of cellular automata[J]. Reviews of modern physics, 1983, 55(3): 601-644

[7] Packard, et al. Two-dimensional cellular automata[J]. Journal of statistical physics, 1985, 38(5/6): 901-946

[8] Kubisch M, et al. Distributed algorithms for transmission power control in wireless sensor networks[C]// IEEE WCNC 2003. New Orleans, Louisiana, March 2003

[9] <http://cesl.ee.tsinghua.edu.cn/flows/home.html>

(上接第 37 页)

[28] Gruber I, Schollmeier R, Kellerer W. Performance evaluation of the mobile peer-to-peer service[C]// Proc. of the IEEE Int'l Symp. on Cluster Computing and the Grid (CCGRID 2004). 2004; 363-371

[29] Tang B, Zhou Z H, Kashyap A, et al. An integrated approach for P2P file sharing on multi-hop wireless networks[C]//Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WIMOB 2005). 2005; 3: 268-274

[30] Pucha H, Das S M, Hu Y C. Ekta: an efficient DHT substrate for distributed applications in mobile ad hoc networks[C]// Proc. of the 6th IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Application (WMCSA 2004). 2004; 163-173

[31] Pucha H, Das S M, Hu Y C. Imposed route reuse in ad hoc network routing protocols using structured peer-to-peer overlay routing[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2006, 17(12): 1452-1467

[32] Zahn T, Schiller J H. Designing structured peer-to-peer overlays as a platform for distributed network applications in mobile ad hoc networks[J]. Computer Communications, 2008, 31(3): 643-654

[33] Winter R, Zahn T, Schiller J. Random landmarking in mobile, topology-aware peer-to-peer networks[C]//Proc. of the 10th International Workshop on Future Trends in Distributed Computing Systems (FTDCS 2004). 2004; 319-324

[34] Delmastro F. From pastry to CrossROAD: CROSS-layer ring overlay for ad hoc networks[C]// Proc. of the 3rd IEEE Int'l Conf. on Pervasive Computing and Communications Workshop (PerCom 2005). 2005; 60-64

[35] Borgia E, Conti M, Delmastro F. MobileMAN: Design, Integration, and Experimentation of cross-layer mobile multihop ad hoc networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2006, 44(7): 2-7

[36] Meng Q, Ji H. MA-Chord: A new approach for mobile ad hoc network with DHT based unicast scheme[C]// Proc. of the

Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (Wicom 2007). 2007; 1533-1536

[37] Caesar M, Castro M, Nightingale E B, et al. Virtual ring routing: network routing inspired by DHTs[C]//Proc. of the 2006 Conf. on Applications, Technologies, Architectures and Protocols for Computer Communications (SIGCOMM 2006). 2006; 351-362

[38] Lee S J, Gerla M, Toh C K. A simulation study of table-driven and on-demand routing protocols for mobile ad hoc networks[J]. IEEE Network, 1999, 13(4): 48-54

[39] Conti M, Maselli G, Turi G, et al. Cross layering in mobile ad hoc network design[J]. IEEE Computer, 2004, 37(2): 48-51

[40] The VINT Project. The VINT Network Simulator version 2 [EB/OL]. <http://mash.cs.berkeley.edu/ns>

[41] Broch J, Maltz D A, Johnson D B, et al. A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols[C]// Proc. of the 4th annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (ACM MobiCom'98). 1998; 85-97

[42] Yatin C, Sylvia R, Lee B, et al. Making gnutella-like p2p systems scalable[C]// Proc. of the 2003 Conference on Applications, Technologies, Architectures and Protocols for Computer Communications (SIGCOMM 2003). 2003; 407-418

[43] Mohapatra P, Li J, Gui C. QoS in mobile ad hoc networks[J]. IEEE Wireless Communications Magazine, 2003; 1-16

[44] 黄宇, 金蓓弘, 万淑超. P2P 系统服务质量研究[J]. 计算机科学, 2005, 32(5): 45-48

[45] 欧中洪, 宋美娜, 战晓苏, 等. 移动对等网络关键技术[J]. 软件学报, 2008, 19(2): 404-418

[46] Naicken S, Livingston B, Basu A, et al. The state of peer-to-peer simulators and simulations[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2007, 37(2): 95-98

[47] Kurkowski S, Camp T, Colagrosso M. Manet simulation studies: the incredibles[J]. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2005, 9(4): 50-61