



基于元胞自动机的无线传感器网节能路由协议

于 秦^{1,2}, 肖志辉², 安 宁¹

(1. 电子科技大学 成都 611731; 2. 迈普通信技术股份有限公司 成都 610041)

摘 要: 节能是设计无线传感器网路由协议首先要解决的问题。针对无线传感器网拓扑演化过程所呈现的时空动力学特性, 基于源自生物学的元胞自动机理论, 提出无线传感器网节能路由协议(AODV-ECA)。仿真结果及分析表明, 该算法能有效减少传感节点能量消耗, 延长无线传感器网生存时间。

关键词: 无线传感器网; 传感节点; 节能路由; 元胞自动机

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2013.06.017

AODV-ECA: Energy-Efficient AODV Routing Protocol Using Cellular Automata in Wireless Sensor Network

Yu Qin^{1,2}, Xiao Zhihui², An Ning¹

(1. University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;

2. Maipu Communication Technology Co., Ltd., Chengdu 610041, China)

Abstract: Since the battery equipped wireless sensors have limited energy supply, conserving energy to extend the lifetime becomes the most important requirement in the wireless sensor network (WSN). An AODV routing protocol, AODV-ECA, was proposed, based on cellular automata (CA) mechanism, which was sourced from the thoughts of automatic breeding in biology. AODV-ECA could reduce and balance energy consumption to prolong the network lifetime by means of switching nodes' states between sleeping and working. Finally, AODV-ECA to other energy-efficient routing protocols by NS2 simulator was simulated and evaluated.

Key words: wireless sensor network, sensor node, energy-efficient routing, cellular automata

1 引言

无线传感器网(wireless sensor network, WSN)通常由部署在待检测区域内的大量无线传感节点组成, 节点间通过无线通信方式形成一个多跳自组织网络系统。无线传感器网的主要功能是收集待检测区域内的各类数据, 对这些数据进行处理后发送给观察者。由于具有低功耗、低成本、拓扑控制等特点, 无线传感器网已被广泛应用于环境监测、生物医疗、抢险救灾、国家安全、交通管理等领域。

在实际应用中, 传感节点通常部署在环境恶劣或人迹

罕至的地区, 人为维护的间隔周期较长, 这使得频繁更换传感节点电池变得不切实际。为保证信息传输的可靠性, 通常在部署传感节点时采取冗余配置方式。因此, 如何采用合理机制在保证传输可靠性的同时使传感节点轮流进入休眠状态, 降低其能量消耗, 从而延长整个网络的生存时间是国内外对无线传感器网节能研究的重点。

元胞自动机(cellular automaton, CA)的设计思想来源于生物学中生物细胞可以自我繁殖的思想。继在生物领域得到广泛应用之后, 元胞自动机又被推广应用到经济、军事和科学研究等多个领域。近年来, 元胞自动机技术开始



在无线网络研究中大量应用,尤其是在拓扑控制、休眠调度等机制中被广泛使用。作为一种时间、空间和状态都离散的动力学系统,元胞自动机与一般的系统不同,它不由精确定义的方程或数学算法确定,而只是一个方法框架。它的基本特点是:同一个 CA 系统模型中的每个元胞只取有限个状态,元胞们遵循同样的元胞规则进行独立运行。经过多年的研究验证,CA 作为状态离散系统,能够揭示复杂的全局特性,因而能够用于研究具有自组织特性的无线传感器网^[1,2]。

本文针对无线传感器网的节能问题进行了深入研究,将元胞自动机理论引入现无线传感器网的路由协议中。针对无线传感器网的特点和应用环境,设计了基于元胞自动机机制的节能路由机制,使得传感节点通过元胞自动机机制,独立决策其工作或休眠状态,从而达到减少节点能量消耗、提高整个网络生存时间的目的。

2 元胞自动机和不规则元胞自动机

元胞自动机最初由 Neumann V 和 Ulam 提出,是一种模拟生物学中自我复制机制的生物系统模型。该模型自提出以来在各领域应用广泛,其中影响最为深刻的是 Wolfram S 在 1983 年提出的基于 CA 模型的动力学系统。

CA 模型的主要特点是:由独立元胞构成,每一个元胞都被安置在规则的网格中(根据网格维数的不同分为一维和二维元胞自动机),元胞均具有有限个数的离散状态,各元胞按照相同的状态转换规则进行更新,仅和它邻近的元胞发生相互作用^[3,4]。

元胞自动机的核心元素包括:元胞空间、节点状态集、节点邻居集合和节点状态转换规则,即元胞自动机可以由四元组表示为 $A = \{C_d, Q, N, f\}$,各变量介绍如下。

- C 表示元胞空间,整数 d 表示元胞空间的维数(在本文中使用的二维元胞自动机模型,即 $d=2$),若节点的位置用 (i, j) 表示, C_{ij} 表示处于坐标 (i, j) 的节点或元胞,元胞空间记为:

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

- Q 为元胞的有限离散状态集,分别用 0 和 1 表示节点的休眠状态和工作状态,则有:

$$Q = \{Q_{ij} \in \{0, 1\} | (i, j) \in C\} \quad (2)$$

- N 为包括中心元胞在内的节点邻居集合,如果元胞自动机 A 中的 N 为摩尔型,每个节点存在的最大通信距离为 R_c ,则节点 C_{ij} 的邻居集合 N_{ij} 为:

$$N_{ij} = \{(k, l) \in C | \sqrt{(k-i)^2 + (l-j)^2} \leq R_c\} \quad (3)$$

- f 为状态转换规则函数,表示为:

$$Q_{ij}^{(t+1)} = f(N_{ij}^{(t)}) \quad (4)$$

虽然元胞自动机模型自提出以来在无线传感领域得到研究者的青睐,但由于其规定了网络空间是网格型的,因此限制了网络中的节点分布。鉴于此,本文将不规则元胞自动机(irregular CA, ICA)模型引入无线传感器网。与传统的 CA 模型相比,ICA 模型的主要特点是在确定元胞邻居集上,它使建立无线传感器网模型变得更加灵活。

不规则元胞自动机模型通常通过泰森多边形法划分空间并确定元胞邻居,通过平面上点与点连线的垂直平分线构造泰森多边形。如图 1 所示, p, a, b, c, d, e 是平面上离散的点,分别连接 p 和 a, b, c, d, e ,并作每一条线段的垂直平分线,垂直平分线相交形成的多边形 $a'b'c'd'e'f'$ 即泰森多边形。在 n 个点的点集 S 中,连接 $p p_i, p_i p_j, p_i \in S, i \neq j$,作 $p p_i$ 的垂直平分线,包含 p_i 的泰森多边形 $V(p_i)$ 由垂直平分线划分的 $n-1$ 个半平面的交集形成,可用式(5)表示:

$$V(p_i) = H(p p_1) \cap H(p p_2) \cap \cdots \cap H(p p_n) \quad (5)$$

其中, $H(p p_i)$ 表示半平面。

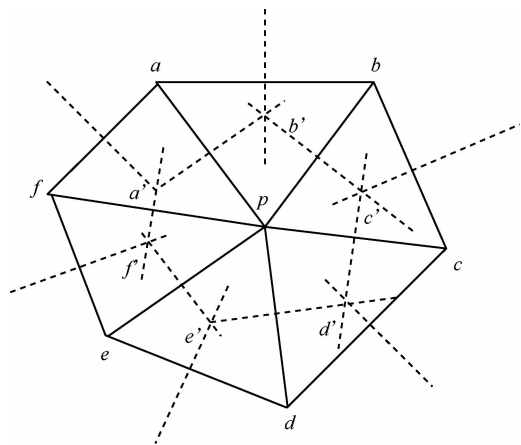


图 1 泰森多边形示意

泰森多边形具有如下特点:

- 每个泰森多边形只包含一个节点;
- 如果节点 $q(x, y) \notin S$ 和 p_i 在同一个泰森多边形中,则 p_i 和 q 的距离小于 p_j 和 q 的距离,此处的 p_j 是点集 S 中的其他任一点,即:

$$\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} < \sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2} \quad (6)$$

在 ICA 中,每个节点的邻居个数不尽相同,在每个节点的通信范围内,按照泰森多边形法可以确定其邻居节点。此外,像元胞自动机一样,不规则元胞自动机也需要制

定状态转换规则来规定元胞的状态转换方法。元胞在 t 时刻的状态由 $t-1$ 时刻自身的状态和其邻居的状态决定,每个元胞按照相同的转换规则周期地变换工作状态。

3 AODV-ECA 的建立

目前无线传感器网中广泛使用的路由协议是 AODV (Ad Hoc on-demand distance vector routing) 协议,它是一种源驱动的路由协议。当源节点需要向目的节点传送信息时,如果没有到达目的节点的路由,则以多播的形式发出路由请求(RREQ)报文(该报文中记录着源节点和目的节点的网络层地址)。邻近节点收到 RREQ 报文后进行判断,如果目的节点是自己,则向源节点发送路由回应报文(RREP);如果不是自己,则在路由表中查找是否有到达目的节点的路由,如果有,则向源节点单播 RREP 报文,否则继续转发 RREQ 进行路由查找^[5-7]。

AODV 协议通过定期广播 hello 报文维护路由,在进行路由选择时仅以最短路径作为度量标准,并未考虑节点能量的使用情况,这将带来路由建立后节点能量消耗不均衡的问题,即某些节点因能量耗尽而不能继续工作,而某些节点又长期处于空闲状态,从而降低了网络的生存时间。

因此,对 AODV 协议进行改进,提出 AODV-ECA (CA-based energy-efficient AODV routing protocol,无线传感器网节能路由协议),基本思想是在基于 CA 模型的 AODV 协议中加入能量高效机制。另外,为了更接近真实的无线传感器网络,还在提出的协议中加入了“不规则元胞自动机”的概念,通过动态休眠调度机制,均衡节点能量消耗,延长网络生存时间。

将 CA 机制加入 AODV 协议中,元胞的状态集为 $Q=\{Q_{i,j} \in \{0,1\} | (i,j) \in C\}$,其中,0 表示休眠状态,1 表示工作状态。

在改进的 AODV 协议 AODV-ECA 中,每个节点维护一个自己的邻居表。在邻居表中记录了邻居 ID 及其剩余能量。如图 2 所示的是邻居表的建立过程。邻居表的建立利用了 AODV 协议中的 hello 报文。当一个节点收到邻居节点 N 发来的 hello 报文时,先检查 N 是否已经在邻居表中,若不在,则将其 ID 和剩余能量记录在邻居表中。

以节点 2 为例,如图 3 所示是不规则元胞自动机模型中泰森多边形的建立过程,按照泰森多边形法建立元胞空间,可以得出节点 1、3、4、5 是节点 2 的邻居。

每个节点会周期地向周围节点发送 hello 报文,当一个节点收到 hello 报文时,它将更新自己的邻居表,并且根

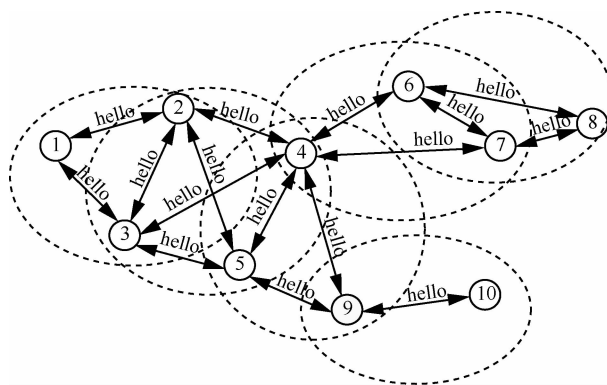


图 2 邻居表的建立过程

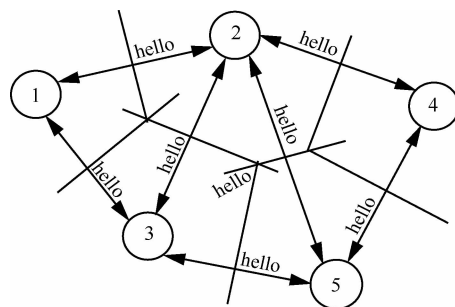


图 3 以节点 2 为例的泰森多边形的建立过程

据状态转换规则决定下一个时刻自己的工作状态。

在基于 CA 的无线传感器网络中经常使用“生命游戏”作为状态转换规则,但根据邻居节点工作/休眠状态的节点数决定自身下一时刻的状态,没有考虑节点本身以及邻居节点的剩余能量等级状况,这可能会导致节点间剩余能量的不均衡。因此在制定状态转换规则时将剩余能量也考虑其中,规定状态转换规则定义如下。

(1) 生存规则

如果 $Q_{ij}^0=1$,则有:

$$Q_{ij}^{(t+1)} = \begin{cases} 1, & \text{energy} \geq \text{avr_energy} \\ 0, & \text{energy} < \text{avr_energy} \end{cases} \quad (7)$$

如果节点当前状态为 1(工作状态),判断该节点自身的剩余能量(energy)是否大于该节点及其邻居节点剩余能量总和的平均剩余能量(avr_energy),如果是,则该节点下一时刻的状态保持为工作状态“1”,否则节点进入休眠状态“0”。

定义 sleepflag 为节点状态标志(休眠或工作状态),以休眠计时器记录节点休眠的时间。当节点进入休眠状态时,将 sleepflag 置为 0,开启休眠计时器;当休眠计时器达到规定的计时时间时,sleepflag 重新置为 1。

(2) 唤醒规则

如果 $Q_{ij}^0=0$,则有:



$$Q_{ij}^{(t+1)} = \begin{cases} 1, & \text{sleepflag}=1 \\ 0, & \text{sleepflag}=0 \end{cases} \quad (8)$$

如果节点当前状态为0(休眠状态),若 sleepflag 为1,则该节点在下一时刻的状态转换为工作状态“1”,否则节点仍保持为休眠状态“0”。

在状态转换规则中,变量 energy 代表剩余能量, avr_energy 代表本节点及邻居节点的平均剩余能量。 avr_energy 定义为:

$$\text{avr_energy} = \frac{E + \sum_{n \in N} E_n}{N+1} \quad (9)$$

其中, E 表示本节点的剩余能量, E_n 表示本节点邻居节点的剩余能量。

在 AODV-ECA 中,一个节点在发送 hello 报文时需包含自身的剩余能量,以便让邻居节点记录其剩余能量。在每个周期内,节点执行一次状态转换规则来决定下一时刻进入休眠状态还是继续保持工作状态。如果其剩余能量小于平均能量水平,将在下一时刻进入休眠状态以节省能量,并将 sleepflag 置0,当发现 sleepflag 为0时,休眠计时器将开启;否则,将继续工作。当休眠计时器计时结束,节点被唤醒,并根据当前自身和邻居的状态,按照状态转换规则决定下一时刻自己的状态。AODV-ECA 的工作流程如图4所示。

4 仿真和分析

在 AODV-ECA 的基础上,用网络仿真 NS2 对无线传感器网性能进行了仿真。仿真将 AODV-ECA 与 EBRP 和基于“生命游

戏”的 AODV-CA 进行了对比,并从网络生存时间、节点剩余能量和传感节点能量均衡性的角度对仿真结果进行了分析。

仿真分别模拟了10个和20个传感节点的场景,节点随机分布在 $1000\text{m} \times 1000\text{m}$ 的区域内。相关的仿真参数设置见表1。

表1 仿真参数

仿真参数	参数设置
节点个数	10/20 个
仿真时间	100 s
传输距离	250 m
MAC 层协议	IEEE 802.11
路由层协议	EBRP/AODV-CA(基于生存周期)/AODV-ECA
信道类型	双向通道
分组长度	512 byte
节点初始能量	1 J
接收功率	0.2 W
发送功率	0.2 W

图5和图6分别是拥有10个和20个节点的仿真场景中各节点的剩余能量。从图中可以看出,与 EBRP 和 AODV-CA 相比,AODV-ECA 中节点剩余能量更多。在使用 AODV-CA 的仿真场景中,节点的剩余能量比使用 EBRP 更多,这是因为其采用了 CA 机制,使得节点在休眠和工作状态之间切换,更节省能量。然而,AODV-CA 没有考虑节点的能量等级。在 AODV-CA 中,可能出现选择的下一跳节点的剩余能量很少,继续工作可能会将能量耗光而死亡,而与此同时,剩余能量较多的节点未被高效利用。在初始能量相同的条件下,使用 AODV-ECA 可以提高能量的均衡性。

从图5可以看出,剩余能量最多的节点和剩余能量最少的节点之间的差值为节点剩余能量,使用 AODV-ECA 协议,节点剩余能量为0.194 J,而在使用 EBRP 和 AODV-CA 的场景中分别是0.202 J和0.224 J。

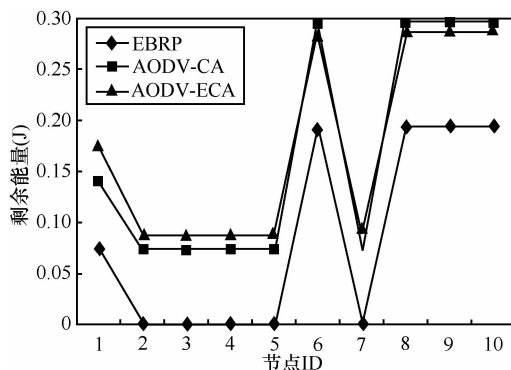


图5 节点剩余能量(10个节点)

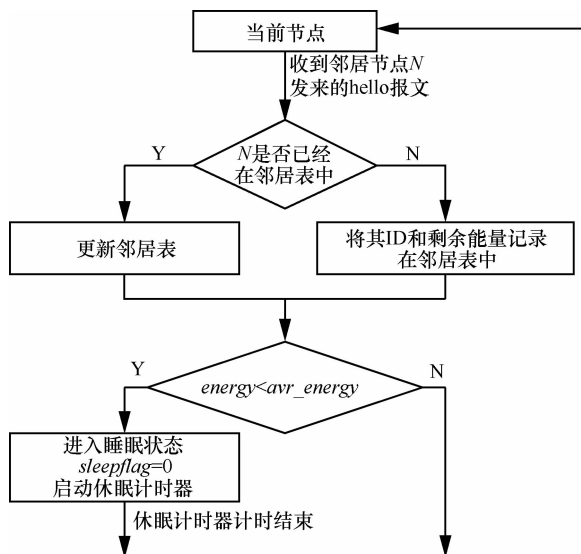


图4 AODV-ECA 的工作流程

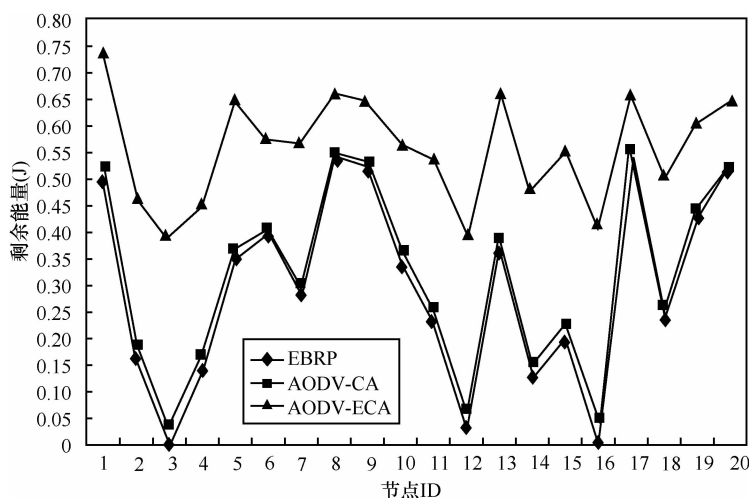


图6 节点剩余能量(20个节点)

在图6中,使用AODV-ECA,节点剩余能量为0.344 J,而在使用EBRP和AODV-CA的场景中分别是0.545 J和0.525 J。因此,使用AODV-ECA可以提高传感节点能量的均衡性。

高能量高效性和能量均衡性使得使用AODV-ECA的网络生存时间变长。图7是使用3种不同协议的场景网络生存时间情况。这里,网络生存时间定义为出现第一个死亡节点的仿真时间。从图7可以看出,AODV-ECA拥有最长的网络生存时间。

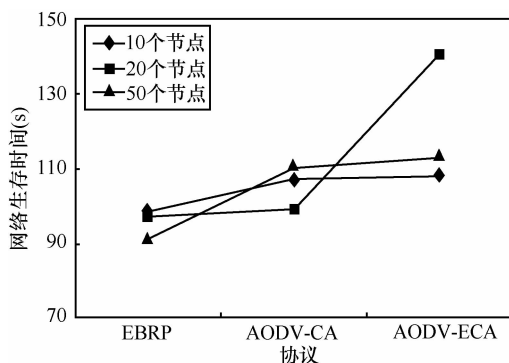


图7 网络生存时间对比

AODV-ECA在能量高效性和能量均衡性方面显示出明显优势,延长了网络生存时间,与此同时,由于其使用了不规则元胞自动机模型,在建立网络模型时也更具有灵活性。

5 结束语

本文将元胞自动机的设计思想融入无线传感器网络路由协议设计中,针对无线传感器网的时空动力学特征和传感节点能量有限的特点,引入元胞自动机机制。网络

节点可以收集通信过程中捎带的元胞自动机信息,根据自身节点的元胞自动机状态转换机制进行动态的休眠/工作状态切换。其核心特点在于自组织,无需外力作用,没有额外的传输开销。元胞自动机机制与网络协议相互配合,协同工作,使网络节点能够在各种工作状态间切换,达到节约能量、延长网络生存期、提高数据传输能量利用率的目的。

参考文献

- 1 Wolfram S. Snakes: statistical mechanics of cellular automata. *Reviews of Modern Physics*, 1983, 55(3): 601~644
- 2 Wolfram S. *Theory and Applications of Cellular Automata*. Singapore: World Scientific Publishing Company, 1986
- 3 Shi J, Chen Z, Zhang Y, *et al.* Cellular automata based topology control method for wireless sensor networks. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2011, 24(12): 1734~1738
- 4 Ran P, Sun M H, Zou Y M. ZigBee routing selection strategy based on data services and energy-balanced ZigBee Routing. *Proceedings of IEEE Asia-Pacific Conference on Services Computing*, Guangzhou, China, 2006: 400~404
- 5 Fan T H, Xiao X J, Yin L L, *et al.* Cellular automata self-organization algorithm for wireless sensor network. *Computer Engineering*, 2009, 35(21): 26~28
- 6 Zhang W Z, Yuan J, Yu Z, *et al.* Study of the global behavior of wireless sensor networks based on cellular automata. *Chin Phys Soc*, 2008, 57(1): 6897~6900
- 7 Yuan J, Ren Y, Shan M. Investigation of a cellular automaton model for computer network. *Chin Phys Soc*, 2000, 49(3): 399~402

(收稿日期:2013-04-12)