

一种优化的基于博弈论的无线传感器网络区域分簇算法

尹翔 常丽萍 戴维超 李春晓
(扬州大学信息工程学院 扬州 225127)

摘要 能量消耗是设计无线传感器网络时需要考虑的主要因素。已有的研究大都利用分簇的思想实现网络能耗的节省与均衡,但这些方法存在簇首个数不稳定及分布不均等缺点,从而影响了整个网络的生存时间。给出一种优化的基于博弈论的分簇路由协议。该算法根据最优簇头数来对区域进行划分,在每个区域内采用博弈的方式博弈出一个簇头。同时,为了均衡整个网络的能耗、延长网络生命期,还引入了概率归零机制和区域轮转机制。最后,通过仿真实验验证了算法的优越性。

关键词 无线传感器网络,分簇,能量,博弈论

中图分类号 TP393.04 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.03.027

Optimized Clustering Wireless Sensor Network Algorithm Based on Game Theory

YIN Xiang CHANG Li-ping DAI Wei-chao LI Chun-xiao
(College of Information Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

Abstract One main factor which should be considered in the design of wireless sensor network is the energy consumption. Most of existing researches achieve the decline and balance of network energy by clustering, and these approaches still have some drawbacks, such as the unstable number and uneven distributions of cluster heads, and then it affects the lifetime of the whole network. An optimized clustering routing protocol based on game theory was proposed in this paper. The protocol partitions the region according to the optimal number of cluster head, and a cluster head is generated through gaming within each sub-region. In order to balance the energy consumption of the entire network and extend the network lifetime, the algorithm also introduces zero probability mechanism and regional rotation mechanism. Finally, the superiority of the algorithm is verified by simulation experiments.

Keywords Wireless sensor network, Clustering, Energy, Game theory

1 引言

无线传感器网络^[1-3]是由微小的、电池驱动传感器节点通过无线通信方式构成的新型自组织网络系统。传感器节点具有有限的处理、存储和广播能力。在一个区域内布置无限个能量有限的传感器节点,节点感知并发送数据给基站。无线传感器网络综合了传感器技术、嵌入式技术、无线通信技术、等,被广泛应用于军事国防、环境监测、生物医疗、抢险救灾以及商业应用等。

给这样的网络设计的通信协议必须是能量感知的,因为网络中的节点能量资源和计算能力非常有限,同时,节点一旦被部署,更换电池将会变得很困难。因此减少节点的能耗、延长网络生命周期、提高通信的可靠性等成为了研究无线传感器网络的首要目标。随着研究的深入,大量路由协议被提出,其中分簇路由协议较为流行。LEACH^[4]协议是一种典型的

分簇路由协议,它是以循环的方式随机选择簇首节点,将整个网络的能量负荷较为均匀地分布在各个节点上,从而降低且均衡整个网络的能量消耗并延长网络的整体生存时间。LEACH算法虽然能够保证网络各节点能耗的基本均衡,但是簇首节点的数量和位置都会以较大的概率出现不稳定现象,即簇首个数过多或过少、簇首节点的位置偏差等,这些都会直接影响网络寿命和通信的可靠性。

博弈论^[5-6]是一种数学方法,它描述了一种兼具智慧与理性的决策者之间产生冲突与合作的现象。其在经济学和生物学领域已经得到大量应用并取得了丰硕的成果。同时,一些学者注意到博弈论也能应用于无线传感器网络中^[7-13]。典型应用之一就是CROSS^[11]协议,其基本思想是:每个节点被当作一个博弈者,根据博弈的节点数量,每个节点计算出一个平衡概率,这个概率决定该节点是否宣布自己成为簇头。然而,CROSS协议存在以下不足:首先,网络中所有节点同时进行

到稿日期:2016-02-16 返修日期:2016-07-18 本文受国家自然科学基金(61472344,61401387),江苏省自然科学基金(BK20150460),扬州市自然科学基金(YZ2014054),扬州大学科技创新培育基金资助。

尹翔(1980-),男,博士,主要研究方向为多agent系统、无线传感器网络,E-mail: yinxiang@yzu.edu.cn;常丽萍(1992-),女,硕士生,主要研究方向为无线传感器网络。

博弈会耗费较多的能量并导致大量的冲突;其次,节点是根据距离各簇首的远近来确定所归属的簇,由此生成的簇很难保证规模一致,可能会造成某些簇首过载,能量消耗过大而过早死亡;最后,均衡概率 p 是一个关于节点数量 N 的指数衰减函数,当 N 较大时,会造成一个节点成为簇首的概率变得很小。GAEC^[12]也采用博弈理论对节点进行分簇,其基本思想是:采用博弈的方式选择簇首,为防止簇首与基站失去联络,在二次价格未知的拍卖状态下,设置一个候选簇首来复制原始簇头的数据。该方法在分簇的过程中还引入了分区思想,但是区域数量是随机设置的。该方法在整个分簇过程中并没有采用循环方式更换簇首,一旦簇首无法正常工作,则重新设置候选簇首,这会使得簇首能量消耗过快而容易死亡。

基于此,本文设计了一种改进的基于博弈论的无线传感器网络区域分簇算法 CAGT (regional Clustering Algorithm based on Game Theory),其通过以下方法延长了无线传感器网络的生命期延长。

1)改进了簇首选择概率。相比于 CROSS 协议,CAGT 协议采用分区的方式对各个子区域内节点选为簇头的概率进行计算,而且将节点剩余能量引入到簇首选择概率中。这样使得能量消耗更加均衡。

2)CAGT 按照最优簇头数对整个区域进行划分,并引入潜在簇首的概念使得每个子区域内都有且仅有一个真正的簇头。这使得簇头分布更加均匀。

3)设计分区轮转机制,避免网络因某个簇内节点负荷过大而过早耗尽能量,从而延长网络生命期。

2 分簇博弈

分簇博弈是网络中的节点参与的博弈,定义博弈为 $GC = \{M, S, U\}$, M 为参与博弈的传感器节点的集合, S 是可用策略的集合, $U = \{U_i\}$ 是节点的效用函数集合。参与者是网络中的 N 个传感器节点。在纯策略博弈中,策略空间对应两个选择:1)传感器节点声明自己成为簇首,此策略为 D ;2)不声明成为簇首,此策略为 ND 。因此策略空间为 $S = \{D, ND\}$ 。关于收益,如果一个参与者选择不成为一个簇首,同时没有其他节点成为簇首,则它的收益为 0,因为此时参与者无法将数据发送给基站。如果至少一个其他节点声明为簇首,则它的收益为 v ,即成功传输数据到基站所获得的获益。如果节点声明自己为簇首,它成功传输数据的收益 v 要减去成为簇首的成本 c ,所以这种情况下最终的收益为 $v - c$ 。在两个参与者的情况下,其收益如表 1 所列^[11]。很明显,这里的策略集 (D, ND) 是一个纳什均衡。同样地, (ND, D) 也是一个纳什均衡。

表 1 两个节点分簇博弈的收益

	D	ND
D	$(v-c, v-c)$	$(v-c, v)$
ND	$(v, v-c)$	$(0, 0)$

将博弈扩展为 N 个节点参与的博弈,令 $s = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}$ 为各节点所选策略的集合。如果没有节点声明为簇首节

点,那么所有节点的收益为 0。如果有 k 个节点选择策略 D ,那么除这 $k(k \neq 0)$ 个节点之外的所有节点收益均为 v ,而这 k 个节点的收益为 $v - c$ 。因此任意节点 i 的效用函数有如下形式^[11]:

$$U(s_i) = \begin{cases} 0, & \text{if } s_j = ND, \forall j \in N \\ v - c, & \text{if } s_i = D \\ v, & \text{if } s_i = ND \text{ and } \exists j \in N \text{ s. t. } s_j = D \end{cases} \quad (1)$$

很显然,对于对称分簇博弈,没有对称的纯策略纳什均衡存在。为了准许该博弈有对称纳什均衡,允许节点采取混合策略,即节点根据概率随机选择策略。令节点选择策略 D 的概率为 p ,则选择 ND 的概率为 $q = 1 - p$ 。

文献[11]详细给出了均衡概率的推导过程,结果如下:

$$p = 1 - \left(\frac{c}{v}\right)^{\frac{1}{(N-1)}} \quad (2)$$

令 $\omega = \frac{c}{v} < 1$,则

$$p = 1 - \omega^{\frac{1}{(N-1)}} \quad (3)$$

3 一种改进的基于博弈论的分簇算法

本节给出一种改进的基于博弈论的区域分簇算法 CAGT。CAGT 算法分为初始化、簇建立过程以及稳定状态。初始化时基站唤醒测量场地内的节点,统计各区域内节点的情况。簇建立过程分为簇首选择和簇形成过程。簇首选择的目标是在整个传感器场地中挑选出若干个分布较为合理的传感器节点作为簇首。簇形成过程使得所有的节点都有相应的簇,簇首协调簇内通信,发布时分复用(TDMA)调度表。稳定状态时,簇内节点按照 TDMA 调度表规定的时隙向簇首发送采集到的数据,簇首融合这些数据后发送至基站。与 LEACH 协议一样,CAGT 也是按轮进行的。整个过程如图 1 所示。

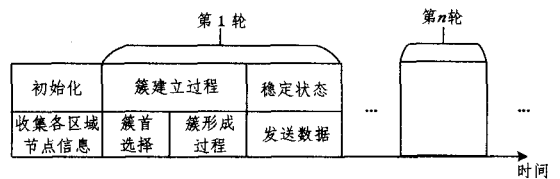


图 1 CAGT 算法过程

为了保证算法有更好的效果,CAGT 还引入了概率归零机制和区域轮转机制。

3.1 初始化状态

假设有一个 $A = M * M(m^2)$ 的区域, n 个节点均匀分布在该区域,基站位于区域的中心,任意节点到基站的距离都小于 d_0 。这里采用与 LEACH 算法相似的初始化机制,具体方法如下:

1)基站首先向测量场地内发送脉冲,激活所有节点,所有节点返回包含其 ID 的数据包,基站统计之后得到场地内的节点总数,之后基站将测量场地分为 k_{opt} 个大小近似相等的区域。 k_{opt} 的计算如下^[14]:

$$k_{opt} = \sqrt{\frac{n}{2\pi} \frac{M}{d_{noBS}}} \quad (4)$$

其中, d_{noBS} 为节点到基站的距离。

2) 基站发送查询某一区域节点的脉冲, 该区域内的节点收到脉冲后, 返回包含节点 ID 的数据包, 基站统计接收到的数据包个数后即可了解该区域内包含节点的情况。

3) 基站可以计算出子区域 l 内节点声明为簇首的概率 $p_l(i)$, 并以数据包的形式广播, 节点接收到之后存储在存储器内。

3.2 簇建立过程

3.2.1 簇首选择算法

初始化状态结束后, 传感器场地内每个节点 i 都已经存储了对应于各自分区 l 的簇首选择概率 $p_l(i)$ 。因为式(3)并没有考虑节点的剩余能量, 因此本文将其改进为:

$$p_l(i) = \frac{E_{res}(i)}{E_{ini}(i)} (1 - \omega^{N_l - 1}) \quad (5)$$

其中, $E_{res}(i)$ 为节点的剩余能量, $E_{ini}(i)$ 为节点的初始能量, N_l 为区域 l 内的节点总数。不同于 CROSS 中节点成为簇头的概率, 这里考虑了节点的剩余能量, 这样使得能量高的节点有更大的概率成为簇首。节点拥有 3 个状态: 普通节点、潜在簇首节点和簇首节点。节点 i 以概率 $p_l(i)$ 成为潜在簇首。根据前文的分析, 整个场地被分为 k_{opt} 个区域, 而每个区域理论上博弈出一个簇首, 这样就应该形成 k_{opt} 个簇。假设簇是一个圆形区域, 且每个簇大小相等, 那么每个簇的半径应为:

$$R = \frac{M}{\sqrt{\pi k_{opt}}} \quad (6)$$

如果两个潜在簇首之间的距离小于 R , 其中一个必须放弃成为簇首, 转为普通节点。CAGT 的簇首选择算法设计了一种使剩余能量更多、距离基站更近的节点更有优势成为簇首的机制。当潜在簇首 i 发现在距离自己 R 的范围内还有另一个潜在簇首 j 时, 两个节点计算 $g(i)$ 和 $g(j)$, 其中:

$$g(i) = \frac{E_{res}}{E_{ini}} \cdot \frac{1}{d(i)_{noBS}^2} \quad (7)$$

函数 g 用来衡量子区域内哪个潜在簇首更有优势成为真正的簇头, 综合考虑了潜在簇首的剩余能量及到基站的距离。如果 $g(i) < g(j)$, 潜在簇首 i 成为普通节点, j 成为簇首; 如果 $g(i) > g(j)$, 则相反; 如果 $g(i) = g(j)$, 则拥有较小 ID 的潜在簇首成为簇首。簇建立过程的步骤如下:

Step1 每个节点 i 计算 $p_l(i)$ 并将其作为成为潜在簇首的概率。

Step2 判断与潜在簇首 i 距离为 R 的范围内是否还存在其他潜在簇首 j , 如果不存在, 则潜在簇首 i 宣布自己成为簇首; 如果存在其他潜在簇首 j , 则计算 $g(i)$ 和 $g(j)$ 的值。

Step3 比较 $g(i)$ 和 $g(j)$ 的大小, 如果 $g(i) > g(j)$, 则 i 宣布自己成为簇首; 如果 $g(i) < g(j)$, 则 j 宣布自己成为簇首; 如果 $g(i) = g(j)$, 则比较潜在簇首的 ID, ID 较小的潜在簇首成为簇首。

整个流程如图 2 所示。

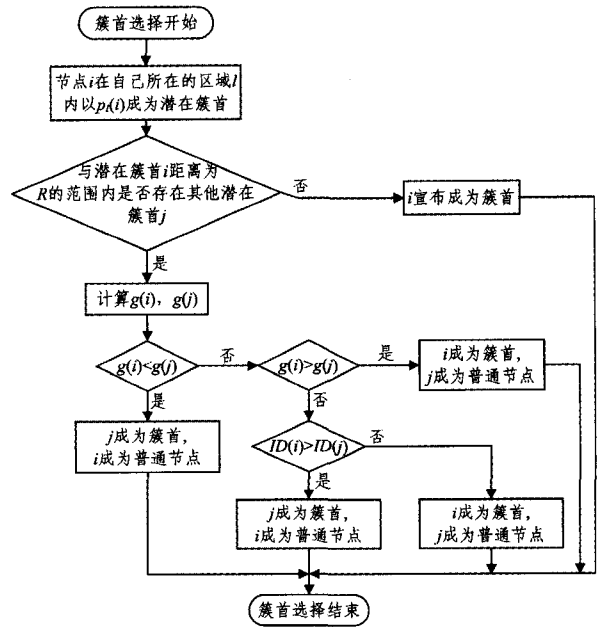


图 2 簇首选择算法

簇首选择算法理论上可以使得簇首较为均匀、合理地分布在整个传感器场地中, 而不会出现簇首密集地堆积在某一区域的情况。

3.2.2 簇形成算法

簇首选择算法结束后, 簇首向周围节点发送消息。这个消息包含节点的 ID 和区别声明消息的消息头。每个非簇首节点基于接收到消息的强度选择需要最小通信能量的簇头, 从而选定该轮属于哪个簇。

每个节点决定它归属的簇后, 返回一个包含该节点 ID 和簇首 ID 的短消息, 以申明成为该簇的成员。簇首作为本地控制中心, 协调簇内的数据传输。簇首建立 TDMA 的调度表并将它发送给簇成员节点, 以保证在传输数据时不会有冲突, 也能允许每个非簇首节点的无线电模块在除它们自身发送时间之外处于关闭状态, 从而减少每个节点的能量消耗。

3.3 稳定状态

稳定状态的操作被分为帧, 节点在它们分配的时隙发送数据到簇首, 且每帧最多发送一次。一个节点传输数据的时隙是常数, 所以发送一帧数据的时间依赖于簇内的节点数。这个过程与 LEACH 协议中的 Steady-State Phase 是类似的。

3.4 概率归零机制

为了使得能量在所有节点中较为均衡地被消耗, 延长整个无线传感器网络的生命期, CAGT 设置了概率归零机制。简单地说, 概率归零机制使得已经作过簇首的节点再次成为簇首的概率为 0, 直到该节点所在子区域内所有节点都已经作过簇首, 才将概率恢复为由式(5)所计算的概率。当然, 各区域内参与博弈的总节点数应为该区域内总节点数减去已经做过簇首的节点数。

3.5 区域轮转机制

虽然节点均匀分布在传感器场地中, 初始化操作也将传感器场地近似均匀分区, 但这并不能保证所有分区内的节点

数相同,有可能会出现的区域节点数较多而有的区域节点数较少的情况。在节点越少的区域中节点成为簇头的概率越大,从而更容易死亡。为了尽量减小由区域内节点数不均匀带来的影响,CAGT引入区域轮转机制。该机制的主要思想是当网络运行一段时间后,按照一定规则改变每个簇所包含的物理范围即每个簇所含节点,这样可以使得某些簇中能量消耗过快的节点轮转到其他簇中,降低这些节点成为簇头的概率,从而延长这些节点的生命。

以 $k_{opt}=8$ 个区域为例,对传感器场地进行区域划分,如图 3(a)所示,以基站为极点,建立极坐标系,则每一个区域的极角范围为 $\frac{\pi}{4}$ 。当某一区域出现每一个节点都作过簇首的情况时,该轮簇首向基站发送融合后的数据及反映该情况的消息。基站接到这一消息,在完成本轮的结束任务后立即着手区域的重新划分,即将每个区域的极角增加 $\frac{\pi}{8}$,如图 3(b)所示。

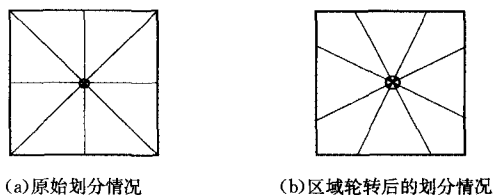


图3 区域轮转机制

4 仿真与评估

本节通过仿真实验验证不同算法的性能,衡量的性能指标包含 4 个:网络生命周期、网络生存时间、存活节点数和网络总能量消耗。其中,网络生命期^[10]定义为网络开始工作到第一个节点耗尽能量的时间长度(轮)。如果能量在所有节点中被越均衡地消耗,那么第一个节点死亡的时间就越是延后。网络生存时间定义为网络开始工作到场地中最后一个节点耗尽能量的时间长度(轮)。通过对 CAGT 和 LEACH, CROSS, GAEC 算法的比较和分析,可以从实验方面验证 CAGT 优于其余 3 种算法。

4.1 仿真参数

以下仿真实验在 MATLAB R2013a 上进行,参数设置如表 2 所列。

表 2 仿真参数

参数	值
场地边长 M	100m
基站坐标	(0m,0m)
E_{dec}	50nJ/bit
E_{DA}	5nJ/bit
ϵ_{fs}	10pJ/bit/m ²
ϵ_{mp}	0.0013pJ/bit/m ⁴
节点初始能量 E_0	0.5J
数据包比特长度 len	2000bit
节点数目 num	100/200/300/400/500

本文实验都是在以下场景进行的,基站位于中心,节点均匀分布在四周,如图 4 所示。

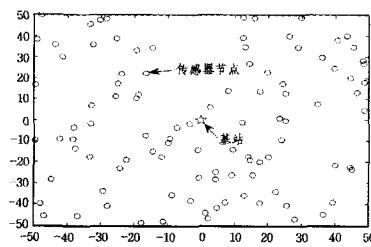


图 4 基站及传感器节点分布图

4.2 结果与分析

实验 1 对于 CAGT 算法,参数 w 的选取非常重要,直接决定了节点成为簇首的概率。因此,实验 1 探讨 w 对 CAGT 性能的影响。如图 5、图 6 所示,在 w 取值为 0.1~0.6 之间时,网络的生存时间相差不大,但在 $w=0.5$ 时表现最好。在 w 取值为 0.7~0.9 时,网络的生存时间快速上升,尤其是在 $w=0.9$ 时,上升幅度更大。这是因为 w 越大,其成为簇头的成本越高,而收益相对较少,因此节点都不愿意成为簇头。在这种情况下,很少有节点成为簇首,能量消耗很少,因此网络生存时间大幅增加。然而,此时由于簇首过少,整个网络是无法进行数据的正常传输的。换句话说,这样的网络是不可用的。综合各个因素,选取 $w=0.5$ 较好。因此,下面的实验都是在参数 $w=0.5$ 的情况下进行的。

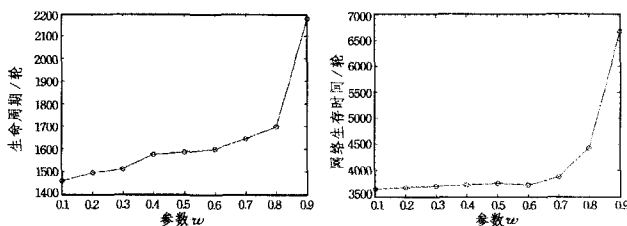


图 5 CAGT 在不同 w 下的网络生存时间 图 6 CAGT 在不同 w 下的生命期

实验 2 在这组实验中,对不同网络规模下 LEACH, CROSS, CAGT, GAEC 的网络生存时间进行对比,结果如图 7 所示。网络中传感器节点数分别为 100, 200, 300, 400 和 500。从图中可以看出,在不同的网络规模下,CAGT 算法都要优于 LEACH, CROSS, GAEC 算法。这是因为 LEACH 协议在簇头选择的过程中,每个节点随机生成一个 0~1 之间的数,并与事先设置好的阈值进行比较,如果生成的随机数小于阈值,则该节点就宣布自己成为簇头,这种全局的方式使得簇首节点的数量和位置都会以较大的概率出现不稳定现象,且某个簇头因为负载过大而提前死亡。CROSS 协议类似于 LEACH 协议,同样采用全局的方式,使得簇首节点的数量和位置容易不稳定。GAEC 虽然加入了分区的思想,但是区域数量是随机设置的,而不是根据最优簇头数来分区,同时,GAEC 在完成分区后,区域将不会改变,这会导致如果某个区域内簇成员个数偏多,那么簇首负载过大,或者簇首过少,而造成簇首提前死亡。而 CAGT 算法将网络进行了分区,再采用博弈的方式进行簇头选择,并引入了区域轮转机制和潜在簇首转化机制,使得网络内的簇头负载较为均衡,从而延长了整个网络的生命周期。

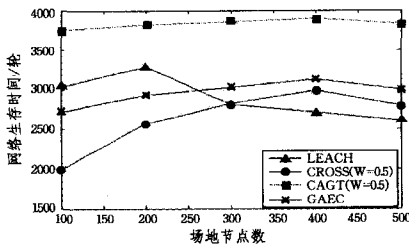


图7 不同网络规模下 LEACH, CROSS, CAGT, GAEC 网络生存时间的对比

另一方面,网络规模对 CAGT 算法的影响并不大,这是因为 CAGT 算法在簇头选择时加入了潜在簇首转化机制,并且根据最优簇头数进行了合理的分区,同时还加入了区域轮换机制,使得各个区域内簇成员个数合理化,簇首负载较为均衡,从而延长了网络生存时间,使得网络较为稳定。

实验3 在这组实验中,考察了不同算法下存活节点数以及网络能量消耗的情况,结果如图8和图9所示。可以看出,对于 LEACH 和 CROSS 协议,在大约 1500 轮时存活节点数急剧下降,GAEC 协议大约在 1600 轮之后存活节点数呈直线下降,而 CAGT 协议下降得相对较为缓慢。从图9中可以看出,两种协议的网络初始能量都为 0.5J,节点个数设置为 100,整个网络的能量为 50J,在 CAGT 协议下,网络剩余能量下降得更更为缓慢,能支撑的轮数也最多。综上可以发现,CAGT 在存活节点数和剩余能量方面均要优于另外3种算法。

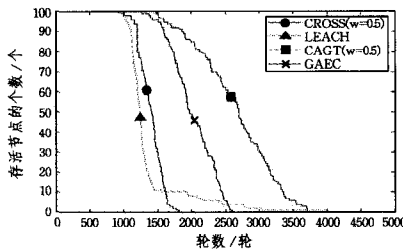


图8 CAGT 和 LEACH, CROSS, GAEC 在存活节点数方面的对比

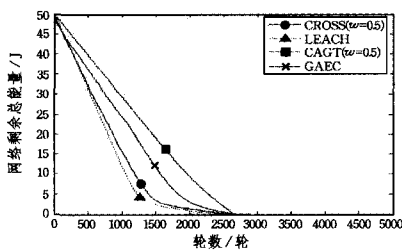


图9 CAGT 和 LEACH, CROSS, GAEC 的网络总能量消耗方面的对比

结束语 无线传感器网络是由大量传感器节点通过自组织方式构成的网络。传感器节点能量资源有限,且难以补充,因此很多学者开始研究分簇路由协议,但目前的方法还存在簇首分布不均匀、位置不稳定等缺陷。为了解决这些问题,本文设计了一种优化的基于博弈论的无线传感器网络分簇算法 CAGT,它能更加均匀地在整个探测区域内挑选簇首,更加均衡地在所有节点中分布能量消耗,有利于延长网络生命期。通过仿真实验证明了所提算法的优越性。下一步工作的重点

是讨论 CAGT 对数据传输的影响,并将其应用在实际环境中。

参考文献

- [1] AKYILDIZ I F, SU W, SANKARASUBRAMANIAM Y, et al. A survey on sensor networks[J]. IEEE Communication Magazine, 2002, 40(8): 102-114.
- [2] YICK J, MUKHERJEE B, GHOSAL D. Wireless sensor network survey[J]. Computer Networks, 2008, 52(12): 2292-2330.
- [3] CHEN Z S, SHEN H. Energy-efficient multi-hop routing protocol for wireless sensor networks[J]. Computer Science, 2015, 42(8): 90-94. (in Chinese)
陈战胜, 沈鸿. 能量高效的无线传感器网络路由协议[J]. 计算机科学, 2015, 42(8): 90-94.
- [4] HEINZELMAN W B, HANDRAKASAN A P, BALAKRISHNAN H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670.
- [5] FUDENBERG D, TIROLE J. Game Theory[M]. MIT Press, 1991.
- [6] ALTMAN E, BOULOGNE T, AZOUZI R E, et al. A survey on networking games in telecommunications [J]. Computers and Operations Research, 2006, 33(2): 286-311.
- [7] DUAN J, GAO D, YANG D, et al. An energy-aware trust derivation scheme with game theoretic approach in wireless sensor networks for IoT applications[J]. Internet of Things Journal, IEEE, 2014, 1(1): 58-69.
- [8] YANG Y, LAI C, WANG L, et al. An energy-aware clustering algorithm via game theory for wireless sensor networks[C]// IEEE International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS). 2012: 261-266.
- [9] WU T, YUE K, LIU W, et al. An energy-efficient data transfer model of wireless sensor networks based on the coalitional game theory[C]// IEEE International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD). 2011: 1354-1358.
- [10] ZHANG X D, KANG G X, et al. Game theoretic clustering algorithm for large scale WSN[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014, 33(10): 2516-2520. (in Chinese)
张玺栋, 康桂霞, 等. 基于博弈的大规模无线传感器网络分簇算法[J]. 电子与信息学报, 2014, 33(10): 2516-2520.
- [11] KOLTSIDAS G, PAVLIDOU F. A game theoretical approach to clustering of ad-hoc and sensor networks[J]. Telecommunication Systems, 2011, 47(1/2): 81-93.
- [12] XU Z Y, YUE Y, et al. A Game-theoretic approach for efficient clustering in wireless sensor networks[J]. International Journal of Hybrid Information Technology, 2014, 7(1): 67-80.
- [13] HU J, SHEN L F. Clustering routing protocol of wireless sensor networks based on game theory[J]. Journal of Southeast University, 2010, 40(3): 441-445. (in Chinese)
胡静, 沈连丰. 基于博弈论的无线传感器网络分簇路由协议[J]. 东南大学学报, 2010, 40(3): 441-445.
- [14] SEEMA B, EDWARD J C. Minimizing communication costs in hierarchically-clustered networks of wireless sensors[J]. Computer Networks, 2004, 44(1): 1-16.