

一种无线传感器网络能耗均衡的自适应拓扑博弈算法

王慧娇, 邱 赞[†], 董荣胜, 蒋 华

(桂林电子科技大学 广西可信软件重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘 要: 针对无线传感器网络节点能量有限与能耗不均衡导致网络生命周期提前结束的问题, 运用势博弈理论将节点的平均寿命、节点最短寿命、网络的连通性以及覆盖性应用到效益函数的设计中, 建立一种基于序数势博弈的能耗均衡的拓扑控制模型, 以证明博弈模型是序数势博弈. 基于该势博弈模型, 提出一种能耗均衡的自适应拓扑博弈算法. 该算法根据节点平均寿命调整自身的功率, 帮助最短寿命节点降低功率, 延长整个网络的生存时间. 仿真实验及对比分析表明, 所提出的算法相比于其他基于博弈论的拓扑控制算法, 能够改善网络能量的均衡性, 提高网络能量效率, 保证网络拓扑的健壮性, 增强网络拓扑的自适应性.

关键词: 无线传感器网络; 势博弈; 自适应; 拓扑控制

中图分类号: TP393

文献标志码: A

Energy balanced and self adaptation topology control game algorithm for wireless sensor networks

WANG Hui-jiao, QIU Zan[†], DONG Rong-sheng, JIANG Hua

(Guangxi Key Laboratory of Trusted Software, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: In order to solve the problems in wireless sensor network that the energy of node is limited and the energy consumption is unbalanced which leads to the premature termination of the network lifetime, an energy-balanced topology control model based on the potential game is constructed in this paper. The average lifespan and the shortest lifespan of nodes, the connectivity and coverage of the networks are used in the design of the utilization function in the model. The game model is proved to be an ordinal potential game. An energy-balanced and self-adaptation topology control game (ATCG) algorithm in wireless sensor networks is proposed based on this topology control model. According to the average life of nodes, the nodes adjust their own power to help nodes with the shortest life to reduce transmitting power, which can prolong the entire network life. By simulation and comparative analysis, compared with other game-based topology control algorithms, the energy balance and energy efficiency of the network are improved, the robustness of the network topology is guaranteed and the adaptability of the network topology is enhanced in ATCG.

Keywords: wireless sensor networks; potential game; self-adaptation; topology control

0 引 言

无线传感器网络是物联网实现数据信息采集的一种末端网络, 因其具有代价低、功耗低、体积小、建设快和抗毁性强等优势而被广泛应用. 由于自身通信机制的特殊性和节点资源的限制性, 能量通常是由电池供电, 很难进行补充, 必须考虑节点的能量消耗, 通过提高能量的利用效率和改善能量的均衡消耗, 使其网络获得最大化生命周期^[1]. 拓扑控制技术是无线传感器网络中的核心技术之一, 主要作用于

网络中的链路层与网络层之间, 能够有效减小通信干扰, 降低网络延迟, 同时提高MAC协议的效率, 可促使无线传感器网络中的能量均衡消耗、延长无线传感器网络生命周期^[2].

目前, 国内外的无线传感器网络相关学者提出了大量的拓扑控制算法. 近年来拓扑控制的研究主要集中在节点功率控制、层次型拓扑控制及博弈模型拓扑控制^[3]. 文献[4]提出了通过每个节点动态地调整自身功率, 给定节点度的上限和下限, 以均衡网络

收稿日期: 2017-07-20; 修回日期: 2017-09-27.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61363070, 61762024); 赛尔网络下一代互联网技术创新项目(NGII20150602).

责任编辑: 王燕舞.

作者简介: 王慧娇(1976—), 女, 副教授, 从事无线传感器网络及嵌入式技术等研究; 邱赞(1992—), 男, 硕士生, 从事无线传感器网络的研究.

[†]通讯作者. E-mail: qiu_zan@foxmail.com.

中节点的能量,但忽视了拓扑结构的健壮性,未考虑链路的对端能量是否相对充沛;文献[5]提出了一种先选簇头后划分区域的拓扑控制算法,随机循环选择簇头,使节点能耗均衡,从而降低网络能量消耗,提升网络生命周期. 博弈论考虑博弈中的个体的预测行为和实际行为,并研究它们的优化策略^[6],能帮助指导博弈中的个体做出合理的行为选择,而被广泛应用于无线传感器网络的研究^[7-8]. 文献[9]提出了一种Ad-Hoc网络中基于博弈论的分布式最佳响应拓扑控制算法(MIA),之后又对此算法进行了改进,提出了基于博弈论分布式最佳响应算法(DIA),不仅能达到纳什均衡,而且能保证构建的拓扑具有唯一性;文献[10]提出了一种分布式的能耗均衡拓扑控制算法,通过选择剩余能量多的节点作为自身的邻居节点,提高节点能耗的均衡性;文献[11]利用马尔可夫博弈论研究了无线传感器网络中能耗不均问题,设计了能量均衡路由算法,该算法能有效促进节点合作,最大化无线传感器网络的生命周期;文献[12]构建了基于博弈论的自适应协作拓扑控制算法(CTCA),将提升反向链路集中节点最短寿命和自身寿命分别作为首要效用函数和次要效用函数;文献[13]给出了无线通信网络资源管理中基于演化博弈论的功率控制算法和垂直切换方案,有效提高了网络容量,增强了网络选择的准确性. 在实际中节点受电池容量、存储空间、处理能力的限制,在追求自身利益最大化时具有自私倾向,故在网络中可能存在自私节点,他们充分利用网络资源,却不愿意耗费自身资源为邻居服务^[14]. 上述算法实现了良好的网络拓扑控制,提高了网络性能,采用博弈理论均衡节点耗能,但不能完全保证网络全覆盖和所有传感器节点均连通,同时,节点平均寿命和节点发射功率也是不容忽视的重要因素.

针对以上问题,基于能量的高效性和能耗的均衡性,综合考虑节点平均寿命和最短寿命,设计了一个拓扑控制模型的优化效用函数,提出了一种无线传感器网络能耗均衡的自适应拓扑博弈算法ATCG(Energy-balanced and self-adaptation topology control game algorithm). 通过该算法构造的拓扑结构,不仅解决了网络的连通和覆盖,而且可有效地均衡网络的能耗,进一步延长网络的生命周期.

1 基于序数势博弈的拓扑控制模型

1.1 相关研究

在无线传感器网络中,拓扑控制是节约能源和延长网络生存时间的较好方法之一. 拓扑控制算法通

过节点调节能量消耗,调整拓扑生成,保证网络的连通和覆盖.

考虑如图1所示的一个拓扑控制调节能量消耗的示例,节点A、B、C部署在彼此的传输范围内,为方便描述,每个节点用小圆圈表示,并分配一个整数剩余寿命值,圆圈内数字表示该节点的剩余寿命.

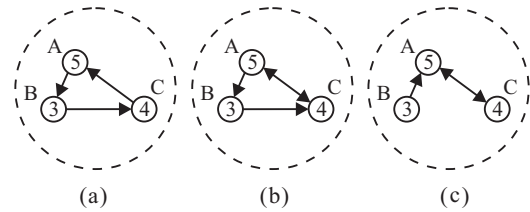


图1 拓扑控制调节能量消耗示例

图1(a)为某时刻节点的拓扑生成图,假设当前的平均寿命为4,节点A、B、C的剩余寿命分别为5、3、4,节点A可到达节点B,其发射功率最小,能量消耗最少,节点B可到达节点C,其发射功率最大,能量消耗最多. 若按图1(a)继续运行,则节点B必然因能量消耗过快而死亡. 图1(b)中,节点A剩余寿命为5,比平均寿命长,考虑增大发射功率,帮助周围节点减小能量消耗,故节点A通信半径由原到达最近节点B,增大至到达平均寿命节点C. 图1(c)中,节点B比平均寿命短,考虑保证网络连通情况下,通过减小发射功率,降低能量消耗,以延长自身寿命,故节点B通信半径由原到达较远节点C,减小至最近节点B. 节点C剩余寿命与平均寿命持平,故其发射功率维持不变. 节点发射功率调节完毕后,网络依然保持连通.

1.2 符号和假设

为了表述清晰简洁,引入如表1所示的符号集.

表1 符号集

符号	含义
N	网络中所有节点的集合
H	网络拓扑结构图
V	节点间通信链路集
P	所有节点发射功率集
R_c	节点通信半径
$d(i, j)$	任意两个节点 i, j 之间的距离
R_i	节点邻居集
$E_{\max}$	节点最大初始能量
$E_r(i)$	节点剩余能量
$p_{\max}$	节点最大发射功率
p_i	节点当前发射功率
p_{-i}	余下节点发射功率集
$L_i(p_i)$	节点当前寿命
$L_{-i}(p_{-i})$	余下节点当前寿命集
S_i	博弈参与者 i 可选策略集
u_i	博弈参与者 i 的收益

定义1 连通性. 对于任意两个节点 i, j ,若节点

i 属于 j 的邻居节点,节点 j 也属于 i 的邻居节点,则网络是全连通的.

定义2 覆盖性. 对于任意节点 i ,若存在节点 j 使得 $d(i, j) < R_c(i)$ 成立,则称网络是全覆盖的.

定义3 邻居集. 定义节点 i 以当前的发射功率能够到达的进行通信的节点集,称之为节点 i 的邻居集 R_i .

定义4 节点当前寿命. 假设节点 i 的当前剩余能量为 $E_r(i)$,当前发射功率为 p_i ,定义节点 i 的当前寿命为 $L_i(p_i) = \frac{E_r(i)}{p_i}$.

定义5 纳什均衡^[15]. 纳什均衡是博弈论中一个很重要的概念. 当每个参与者都选择自身最优反应策略时,在其他的参与者策略不变的情况下,没有任何一个参与者会主动地背离自身目前的策略选择,那么此时每一个参与者的策略组合被称为纳什均衡.

一个博弈可能有不止一个均衡,或者根本不存在. 在一些类型的博弈中至少存在一个纳什均衡. 为了保证纳什均衡的存在性,相关学者提出了一类特殊的策略式博弈——势博弈,证明了其至少存在一个纳什均衡^[16].

1.3 网络模型

无线传感器网络的传感器节点随机撒布在监测区域,在通过拓扑控制算法保证连通性和覆盖性的情况下,形成无线传感器网络拓扑结构. 本文研究传感器节点之间的拓扑构造,假设网络中都是同类型的传感器节点,即具有相同的性能,例如无线传输特性、最大发射功率 $p_{\max}$ 、最大初始能量 $E_{\max}$ 等.

无线传感器网络就拓扑控制的角度而言,可以用有向图表示为 $H = \langle N, V, P \rangle$. 其中: $N = \{1, 2, \dots, n\}$ 代表网络中所有传感器节点的集合;设 n 个传感器节点随机部署在平面监测区域,其链路集 V 代表传感器节点集 N 中两节点之间的通信链路的集合,每个节点可与其相邻的可达节点进行通信,具有不相同的发射功率; P 代表 n 个节点的发射功率的集合. 链路集 V 是一个 $n \times n$ 矩阵,其中元素的取值表示两个节点之间的连通性,连通表示为“1”,不连通则表示为“0”.

1.4 博弈模型

节点策略博弈 $T = \langle N, S, U(S) \rangle$,各个要素的含义如下:1)参与者 $N = \{1, 2, \dots, n\}$,其中 n 是博弈参与者的数量,即代表网络中的节点个数;2)策略空间 $S = \prod_{i=1}^n S_i$,其中 S_i 代表参与者 i 可选择策略的集

合,若 i 存在 k 个可选择策略,则有 $S_i = \{s_i[1], s_i[2], \dots, s_i[k]\}$;3)收益函数 $U(S) = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$,定义 s_i 代表参与者 i 的选择策略, s_{-i} 代表其余参与者的选择策略组合,则 $u_i(s_i, s_{-i})$ 代表参与者 i 在该策略组合中获得的收益.

定义6 序数势函数. 一个策略博弈 $T = \langle N, S, U(S) \rangle$ 是序数势博弈,如果存在某个函数 Y ,则对于任意节点 i 、任意 S_{-i} 以及任意的 $p_i, q_i \in s_i$,有

$$\begin{aligned} Y(p_i, s_{-i}) - Y(q_i, s_{-i}) &> 0 \iff \\ U(p_i, s_{-i}) - U(q_i, s_{-i}) &> 0. \end{aligned} \quad (1)$$

即函数 Y 若满足与节点效用函数取值同号的条件,则函数 Y 称为该策略博弈 T 的序数势函数.

1.5 效用函数

无线传感器网络的节点部署环境复杂,对节点收益不易量化,因此,设计符合需要的博弈模型比较困难. 在拓扑控制博弈模型的建立中,最重要的是确定效用函数,为了能够真实确切地反应网络的情况,本文通过以下几个方面考虑传感器节点的效用函数.

1) 节点连通性.

良好的网络拓扑结构必须保证网络的连通和覆盖,在节点通过发射功率调节增加网络收益时,需保证网络经过多次博弈后仍然是连通的. 设连通函数为 $C(p_i, p_j)$,若其值为1,则表示网络连通;若其值为0,则表示网络不连通.

2) 节点覆盖性.

在保证网络的连通性的同时,也要考虑网络的覆盖性. 设覆盖函数为 $F(p_i, p_j)$,若其值为1,则表示网络全覆盖;若其值为0,则表示网络不是全覆盖.

3) 节点平均寿命.

网络中节点的能量消耗不均衡,一些节点的能量可能会迅速耗尽,从而导致整个网络生存时间提前终止. 节点平均寿命是衡量网络当前生存状况的重要指标,能够反映网络整体的能量消耗情况,进而调整节点发射功率,优化网络拓扑结构,避免了节点为提高自身剩余能量,均将剩余能量少的节点作为其邻居节点,导致其寿命快速下降死亡.

将节点的当前寿命与平均寿命进行比对,节点的当前寿命低于平均寿命时,节点就倾向于在保证全网网络连通的情况下,适当降低其发射功率,延长节点寿命. 而节点当前寿命高于平均寿命时,节点就要求提高其发射功率,可与更远的节点直接通信,减少数据转发的跳数,提升网络的能量效率. 因此将节点平均

寿命作为首要效用函数,节点平均寿命定义为

$$\overline{L_i(p_i)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_i(p_i). \quad (2)$$

4) 节点最短寿命.

在无线传感器网络中通常将第一个节点死亡时间定义为网络的生存时间,最短寿命的节点极有可能成为第一个死亡节点,在保证网络连通的情况下,通过节点之间的相互合作,相邻节点帮助该节点适当减小其发射功率,延长节点最短寿命,即为延长网络的生存时间.因此,将节点最短寿命作为次要效用函数,节点最短寿命定义为

$$\min\{L_i(p_i), L_{-i}(p_{-i})\}, (i \in n). \quad (3)$$

其中: p_i 为节点 i 的发射功率, $L_i(p_i)$ 为节点 i 的当前寿命, p_{-i} 为其余节点发射功率集, $L_{-i}(p_{-i})$ 为其余节点当前寿命的集合.

基于以上各方面的分析,结合主要、次要效用函数,定义传感器节点博弈模型的综合效用函数如下:

$$U(p_i, p_j) = \alpha C(p_i, p_j) F(p_i, p_j) \overline{L_i(p_i)} + \beta C(p_i, p_j) F(p_i, p_j) \min\{L_i(p_i), L_{-i}(p_{-i})\}. \quad (4)$$

其中: $C(p_i, p_j)$, $F(p_i, p_j)$ 均为二进制函数,取值为1或0,代表网络的连通性和覆盖性; α, β 为权重因子且都设为正数,以保证网络连通覆盖时,节点的发射功率的收益大于网络不连通或者不覆盖时的收益; $p_j \in p_{-i}$, 即 p_j 是网络中除节点 i 外的发射功率集中的任意一个节点的发射功率.

1.6 模型证明

定理1 该拓扑控制博弈模型 $T = \langle N, S, U(S) \rangle$ 为序数势博弈. 定义其序数势函数为

$$Y(p_i, p_j) = C(p_i, p_j) F(p_i, p_j) \min\{L_i(p_i), L_{-i}(p_{-i})\}. \quad (5)$$

证明 假设当前时刻 t 节点 i 的发射功率为 p_i , 在下一时刻 $t+1$ 节点 i 的发射功率为 p'_i , 则根据节点发射功率变化, 节点综合效用函数及势函数变化情况分别为

$$\begin{aligned} \Delta U &= U(p_i, p_j) - U(p'_i, p_j) = \\ &\alpha C(p_i, p_j) F(p_i, p_j) \overline{L_i(p_i)} + \\ &\beta C(p_i, p_j) F(p_i, p_j) \min\{L_i(p_i), L_{-i}(p_{-i})\} - \\ &\alpha C(p'_i, p_j) F(p'_i, p_j) \overline{L_i(p'_i)} - \\ &\beta C(p'_i, p_j) F(p'_i, p_j) \min\{L_i(p'_i), L_{-i}(p_{-i})\}. \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Delta Y &= Y(p_i, p_j) - Y(p'_i, p_j) = \\ &C(p_i, p_j) F(p_i, p_j) \min\{L_i(p_i), L_{-i}(p_{-i})\} - \\ &C(p'_i, p_j) F(p'_i, p_j) \min\{L_i(p'_i), L_{-i}(p_{-i})\}. \end{aligned} \quad (7)$$

根据当前时刻 t 和下一时刻 $t+1$ 节点 i 的发射功率变化, 其对应的网络连通性和覆盖性情况可分为4类情况:

1) 当 $C(p_i, p_j) = C(p'_i, p_j) = 0$, $F(p_i, p_j) = F(p'_i, p_j) = 0$ 时, $\Delta U = \Delta Y = 0$, 故 $\Delta U, \Delta Y$ 同号.

2) 当 $C(p_i, p_j) = C(p'_i, p_j) = F(p_i, p_j) = F(p'_i, p_j) = 1$ 时, $\Delta U = \Delta Y$, 故 $\Delta U, \Delta Y$ 两者同号.

3) 当 $C(p_i, p_j) = C(p'_i, p_j) = 1$, $F(p_i, p_j) = 1$, $F(p'_i, p_j) = 0$ 或 $F(p_i, p_j) = F(p'_i, p_j) = 1$, $C(p_i, p_j) = 1$, $C(p'_i, p_j) = 0$ 时, $\Delta U > 0$, $\Delta Y > 0$, 故 $\Delta U, \Delta Y$ 两者符号相同.

4) 当 $C(p_i, p_j) = C(p'_i, p_j) = 1$, $F(p_i, p_j) = 0$, $F(p'_i, p_j) = 1$ 或 $F(p_i, p_j) = F(p'_i, p_j) = 1$, $C(p_i, p_j) = 0$, $C(p'_i, p_j) = 1$ 时, $\Delta U < 0$, $\Delta Y < 0$, 故 $\Delta U, \Delta Y$ 两者符号也相同.

综上所述, 可知势函数变化值 ΔY 与节点效用函数变化值 ΔU 具有相同的符号变化, 且始终同号, 故该拓扑控制博弈模型 $T = \langle N, S, U(S) \rangle$ 为序数势博弈, 而 $Y(p_i, p_j)$ 是博弈模型的一个序数势函数. $\square$

定理2 若策略博弈 $T = \langle N, S, U(S) \rangle$ 是序数势博弈, 并且函数 Y 是它的序数势函数, 则能够使 Y 最大化的策略组合 s^* 为该策略博弈 T 的一个纳什均衡解.

证明 由于网络中的节点 i 是不可移动的, 节点间的相对距离也不会变化, 同时每个节点可通信的邻居节点也是有限的, 故其可选发射功率集 $p_i[k]$ 也是可数的, 而较优反应策略一定会在有限步内收敛至纳什均衡, 所以必然存在使最短寿命节点的收益达到最大值的策略组合, 也就是此策略博弈模型的一个纳什均衡, 此时的纳什均衡点就是优化问题的最优解. $\square$

2 能耗均衡的自适应拓扑博弈算法

基于序数势博弈的拓扑控制模型, 设计了一种能耗均衡的自适应拓扑博弈算法 ATCG, 算法流程主要分为3个部分: 信息获取阶段、功率博弈阶段、拓扑维护阶段: 1) 信息获取阶段, 节点以自身最大功率运行, 获得邻居节点的相关信息; 2) 功率博弈阶段, 根据节点平均寿命情况和最短寿命节点的生存信息进行策略博弈, 选择适合的发射功率策略; 3) 拓扑维护阶段, 调整节点发射功率, 然后按照周期性重新执行拓扑控制算法.

2.1 信息获取阶段

1) 节点 i 以最大发射功率 $p_{\max}$ 初始化自身的发射功率,并广播自身信息,任意节点可接收到来自节点 i 的广播信息,都发送响应信息,响应信息包括两节点间实现通信的最小发射功率、节点当前功率、节点当前寿命。

2) 节点 i 接收到可达节点的响应信息后,确定自身的邻居集 R_i ,统计邻居个数 k ,将其加入到自己的邻居列表,按照通信的最小功率依次增大排序 $p_i[1], p_i[2], \dots, p_i[k]$,形成节点 i 的发射功率策略集 s_i 。

3) 节点 i 通过DLSS算法^[17]确定当前发射功率 p_i ,并用发射功率策略集中最大功率广播自己的策略集 s_i 以及当前发射功率 p_i 和节点当前寿命 $L_i(p_i)$ 。

2.2 功率博弈阶段

网络中的节点通过按照节点序号或者唯一键值来轮流执行博弈确定其发射功率,每一轮博弈只有一个节点调整自己的发射功率,其他的节点保持其功率不变,当一个节点执行博弈后,广播信息通知其他节

点,更新自己的邻居表。

在博弈执行过程中,首先计算网络中邻居节点平均寿命,并确定邻居集中最短寿命节点:若能保证节点 i 当前寿命高于平均寿命,发射功率不是可选最小功率,同时,调整发射功率后能增加最短寿命节点的生存时间,且调整后节点寿命大于节点最短寿命,则节点 i 主动提高自己的发射功率;若节点 i 当前寿命低于平均寿命,且不是最短寿命节点,则节点 i 维持当前功率不变;若节点 i 即为最短寿命节点,判断自身能否减小发射功率,首先找到当前功率所能到达的最远节点 j ,寻找其中是否存在距离更近且可达节点 j 的邻居节点,若存在,则减小发射功率。博弈执行过程的伪代码见表2。

2.3 拓扑维护阶段

当节点接收到邻居调整功率的信息后,某个节点自身的发射功率改变了,就需要重新计算其邻居节点集,每个节点更新自己的邻居表以及功率策略集,并用发射功率策略集中最大功率广播自己的策略集以及当前发射功率。

功率选择阶段结束后,各个节点进入工作状态,因为每个节点的转发数据量不同,所以节点的能量消耗不同,故节点以当前发射功率计算的寿命也不同,这样会导致部分节点能量消耗过快。为使网络的生存时间更长,使节点间的能量消耗在运行的过程中保持均衡,网络拓扑应动态地进行调整以均衡节点间的能量开销,设定一个时间周期或者一个阈值(如低于这个阈值),重新执行拓扑生成算法,调整节点的负载,维持均衡的网络能量,以延长网络的生存时间。

3 算法特性分析

为了验证能耗均衡的自适应拓扑博弈算法的可行性,下面从博弈模型纳什均衡解的存在性、算法的收敛性、算法所构建拓扑的连通性以及算法的复杂度方面进行分析和证明。

性质1 基于序数势博弈的拓扑控制模型一定存在纳什均衡解。

证明 由于该博弈模型是序数势博弈,最大化其序数势函数的策略组合就是该模型的纳什均衡解。在定理1的证明过程中,已经证得函数 Y 正是基于序数势博弈的拓扑控制模型的序数势函数,而任意节点 i 的发射功率 $p_i \in (0, p_{\max}]$,故一定存在使序数势函数 Y 达到最大值的策略组合。由定理2可知,该模型一定存在纳什均衡解。□

性质2 能耗均衡的自适应拓扑博弈算法能够

表2 拓扑控制算法伪代码

Algorithm Pseudo Code	
初始化	
01:	节点 i 以 $p_{\max}$ 广播自身信息
02:	if ($p(i, j) \leq p_{\max}$) $H_i \leftarrow j$ //确定邻居集
03:	$k \leftarrow \text{number of } H_i$
04:	Sort $p_i[1] < p_i[2] < \dots < p_i[k]$ //节点 i 可选功率从小到大排序
05:	节点 i 以 $p_i[k]$ 广播可选功率集
06:	Run DLSS //确定当前功率 p_i 、当前邻居集 R_i
07:	$S_i \leftarrow p_i \& R_i$ //确定节点 i 的功率策略集
功率调整	
08:	while $L_i(p_i) > 0$
09:	计算当前节点平均寿命 $\overline{L_i(p_i)}$
10:	if ($L_i(p_i) > \overline{L_i(p_i)}$)
11:	if (p_i 非可选功率集中最低功率)
12:	if (i 调整功率能帮助提升最短寿命节点的生存时间)
13:	if (i 提高功率后其寿命高于最短寿命节点)
14:	$p_i = p'_i$
15:	update $L_i(p_i)$ 以及 R_i , 广播并接收更新信息
16:	return p_i, S_i
17:	else if ($L_i(p_i) > \overline{L_i(p_i)}$, 但 $L_i(p_i)$ 大于最短寿命节点的生存时间)
18:	return p_i, S_i
19:	else if (i 就是最短寿命节点)
20:	$r \leftarrow p_i$ 可通信最远节点, $j \in R_i$
21:	if (节点 j 可与 r 通信)
22:	if (i 降低功率后仍可与 j 通信)
23:	$p_i = p'_i$
24:	update $L_i(p_i)$ 以及 R_i , 广播并接收更新信息
25:	return p_i, S_i
26:	执行等待时延 T
27:	end

保证各节点均能达到纳什均衡。

证明 由于已证明该博弈模型是序数势博弈且一定存在纳什均衡解,并且其对应的序数势函数为 $Y(p_i, p_j)$,其中 $p_j \in p_{-i}$ 。在算法ATCG的节点功率调整阶段,任意节点最终选择的都是最大化自身收益的传输功率。根据纳什均衡的定义,任何节点不能再减小其传输功率,否则其他节点收益将减小,或者拓扑结构将被分割,显然这将会违背网络连通性的原则。所以各节点传输功率的策略组合就是拓扑控制博弈的纳什均衡解。□

性质3 如果各节点以最大传输功率 $p_{\max}$ 构建的网络拓扑 $G_{\max}$ 能连通,则由算法ATCG构建网络拓扑 G_{ATCG} 也能保证连通。

证明 性质2已经证明算法ATCG能保证各节点均达到纳什均衡,假设节点 i 达到纳什均衡的传输功率为 p'_i ,则有 $p'_i < p_{\max}$,根据纳什均衡的定义有

$$U_i(p'_i, p_j) - U_i(p_{\max}, p_j) \geq 0. \quad (8)$$

由于节点以最大传输功率 $p_{\max}$ 构建的网络拓扑 $G_{\max}$ 能连通,节点效用函数为

$$\begin{aligned} U_i(p_{\max}, p_j) = & \alpha C(p_{\max}, p_j) F(p_{\max}, p_j) \overline{L_i(p_{\max})} + \\ & \beta C(p_{\max}, p_j) F(p_{\max}, p_j) \min\{L_i(p_{\max}), L_{-i}(p_{-i})\}. \end{aligned} \quad (9)$$

采用反证法,假设节点 i 以传输功率 p'_i 构建的网络拓扑不连通,那么 $C(p'_i, p_j) = 0$,则节点效用函数为

$$\begin{aligned} U_i(p'_i, p_j) = & \alpha C(p'_i, p_j) F(p'_i, p_j) \overline{L_i(p'_i)} + \\ & \beta C(p'_i, p_j) F(p'_i, p_j) \min\{L_i(p'_i), L_{-i}(p_{-i})\} \Rightarrow \\ U_i(p'_i, p_j) = & 0. \end{aligned} \quad (10)$$

此时,将式(9)和(10)整理后代入(8)可得

$$\begin{aligned} 0 - [\alpha C(p_{\max}, p_j) F(p_{\max}, p_j) \overline{L_i(p_{\max})} + \\ \beta C(p_{\max}, p_j) F(p_{\max}, p_j) \min\{L_i(p_{\max}), \\ L_{-i}(p_{-i})\}] \geq 0. \end{aligned} \quad (11)$$

由于网络拓扑 $G_{\max}$ 能连通, $C(p_{\max}, p_j) = 1$,网络全连通,保证了网络覆盖,则 $F(p_{\max}, p_j) = 1$.网络的节点平均寿命 $\overline{L_i(p_{\max})} \geq 0$,同时,节点最短寿命 $\min\{L_i(p_{\max}), L_{-i}(p_{-i})\} \geq 0$,故一定有

$$\begin{aligned} -\alpha C(p_{\max}, p_j) F(p_{\max}, p_j) \overline{L_i(p_{\max})} - \\ \beta C(p_{\max}, p_j) F(p_{\max}, p_j) \min\{L_i(p_{\max}), \\ L_{-i}(p_{-i})\} \leq 0. \end{aligned} \quad (12)$$

综上所述,式(11)与(12)相互矛盾,因此假设不成立,节点 i 以传输功率 p'_i 构建的网络拓扑 G_{ATCG} 也能够保证网络全连通,即所有节点达到纳什均衡状态下,均能保证网络的连通性。□

性质4 ATCG算法的复杂度为 $O(N)$,其中 N 为网络中的节点数。

证明 假设网络的节点数为 n ,节点的邻居个数为 k (k 是一个远小于 n 的常数)。在算法的信息获取阶段, n 个节点需以初始化最大功率 $p_{\max}$ 发送广播自身信息的数据包Broadcast_msg,任意节点接收到广播信息后,都发送响应信息的数据包Ack_msg,每个节点接收到可达节点的响应信息后,确定自身的邻居列表并得到发射功率策略集,广播自身策略信息的数据包Strategy_msg,所以在这一阶段信息收集的信息量是 $3n$,显然,信息交换的总数是 $3n$ 的函数。在功率博弈阶段,每个节点有 k 个发射功率进行轮流博弈,在每个节点确定自身的发射功率后,发送调整功率信息的数据包Adjust_msg通知其他节点更新邻居列表,所以在这一阶段的复杂度为 $kn + n$ 。那么每一轮博弈的复杂度为 $3n + kn + n = (k + 4)n$ 。因此ATCG算法的复杂度为 $O(N)$ 。□

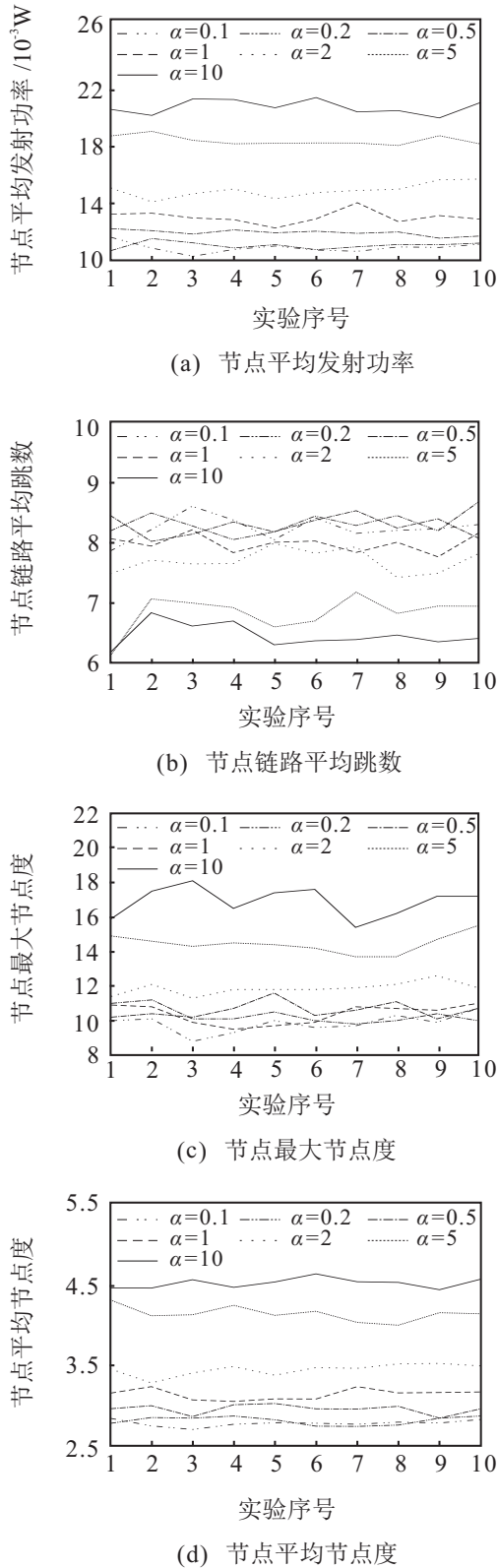
4 仿真结果分析

本文采用Matlab平台对提出的能耗均衡的自适应拓扑博弈算法ATCG进行仿真分析。选取基于博弈论分布式最佳响应算法(DIA)^[9]、虚拟博弈能量均衡算法(VGEB)^[16]和基于博弈论的自适应协作拓扑控制算法(CTCA)^[18],在节点度、节点发射功率、节点链路跳数、节点剩余能量等方面进行比较。所有仿真实验节点随机布设且不可移动,仿真实验参数见表3。

表3 仿真实验参数

参数	数值
监测区域/m ²	300 × 300
通信半径/m	100
节点数量	100
初始能量/J	50
节点间最小发射功率	$p_i(4\pi)^2 d_{ij} L / G_t G_r \lambda^2$
波长λ/m	0.1224
发射天线增益 G_t /w	7×10^{-10}
接收天线增益 G_r	1
系统损耗 L	1

首先确定算法ATCG中的权重因子 α 和 β 的值,将60个节点随机分布在目标区域内,令 $\beta = 1$,分析对网络拓扑性能的影响,分别从节点平均发射功率、节点链路平均跳数、节点最大节点度、节点平均节点度等方面确定 α 的取值,如图2所示。

图2 α 对网络性能的影响($\beta = 1$)

从图2(a)中可以看出,节点平均发射功率随着 α 的增加而升高;图2(b)表明节点链路平均跳数大致随着 α 的增大而降低;在图2(c)中,节点最大节点度随着 α 的增加而升高;图2(d)中节点平均节点度随着 α 的增加而升高,在 $\alpha = 1$ 左右变化基本不大。根据无线传感器网络的特点,如果网络具有较低的平均发射功

率、适中的节点链路平均跳数、适中的节点度等特点,则暗含着该网络具有较好的拓扑结构。从图2中可以看出,设置 $\alpha = 1$ 时网络的拓扑结构将会更好,因此在本文后面的仿真实验中设置参数 $\alpha = 1, \beta = 1$ 。

为了将DIA、VGEB、ATCG和CTCA四种算法形成的拓扑结构进行直观地比较,将100个节点随机分布在 300×300 的目标区域内,4种算法所构建的网络拓扑结构如图3所示。

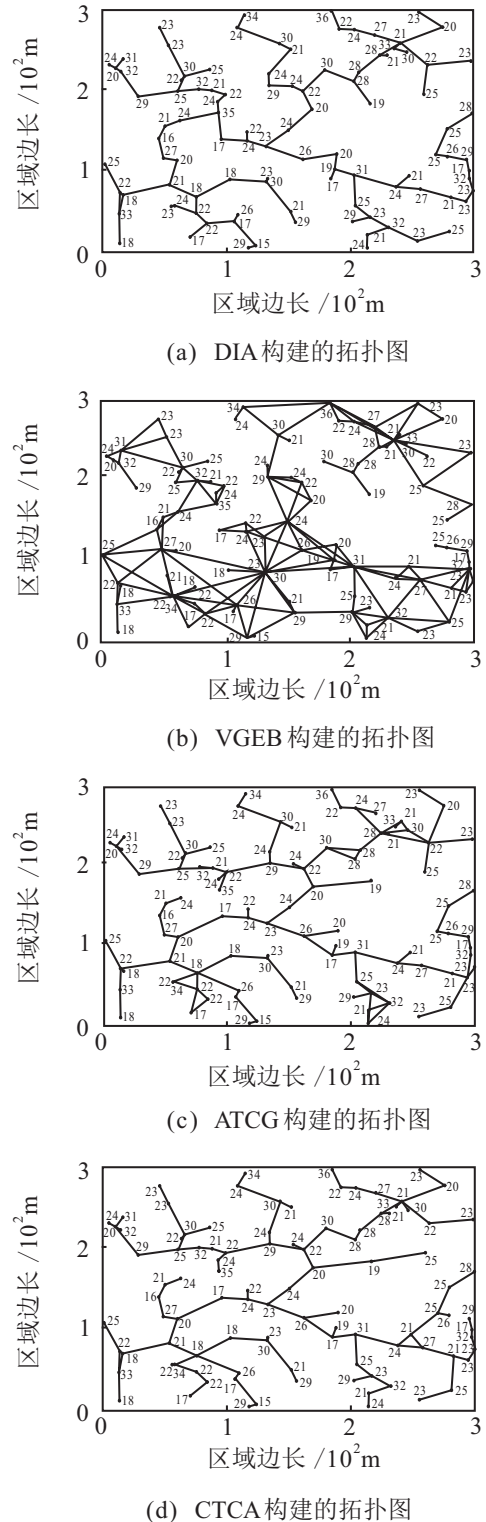


图3 网络不同拓扑结构的比较

从图3中可看出:DIA算法构建的拓扑图生成了具有较多的剩余能量少,但网络负载较重的节点;VGEB算法构建的拓扑图中,节点的节点度较高,将导致能量消耗较快;CTCA和ATCG算法构建的拓扑图的节点度相比均较低,但ATCG算法相比于CTCA拥有更好的健壮性和连通性,有效地均衡了网络中节点的负载。

图4为节点平均发射功率的对比,节点平均发射功率均随节点密度的增大而呈减小趋势。ATCG算法在平均发射功率上相比于DIA、VGEB较低,而略高于CTCA算法。ATCG算法保证全网连通和覆盖,以较低的功率构建拓扑结构,最短寿命节点减小其功率至最低,以减小总能耗,获得更长的网络生存时间。CTCA算法强调拓扑的自适应协作,以降低自身节点和反向链路集中最短寿命节点的发射功率为目标,通过节点间的协作获得更低的发射功率,故其平均发射功率略低。

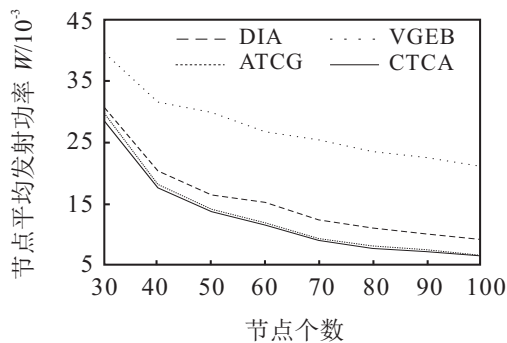


图4 节点平均发射功率变化

图5为节点链路平均跳数的对比。ATCG算法在节点链路平均跳数上高于VGEB,而低于DIA、CTCA算法。VGEB算法的节点平均发射功率较高,其节点的通信半径也会比较大,在相同距离的条件下,到达目的节点所经过转发的节点数肯定相对较少,故该算法的节点链路平均跳数比较小。由于ATCG算法以较低功率运行,其通信半径较小,故从源节点到目的节点必然适当增加其链路跳数。

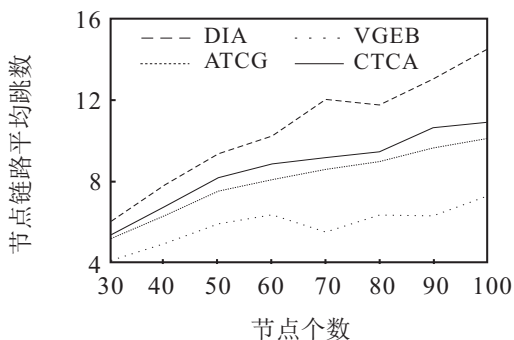


图5 节点链路平均跳数变化

图6为节点平均节点度的对比。ATCG算法的平均节点度略高于CTCA和DIA算法而远低于VGEB算法,由于ATCG算法中节点会提升自身发射功率帮助最短寿命节点降低功率,其平均节点度比CTCA和DIA算法高,保证了拓扑的健壮性。而ATCG、DIA、CTCA算法平均节点度维持较低水平且比较稳定,是由于其节点均以较低功率运行,ATCG算法相对略高的平均节点度,既不会过多消耗节点能量,又保证了网络的覆盖和连通。

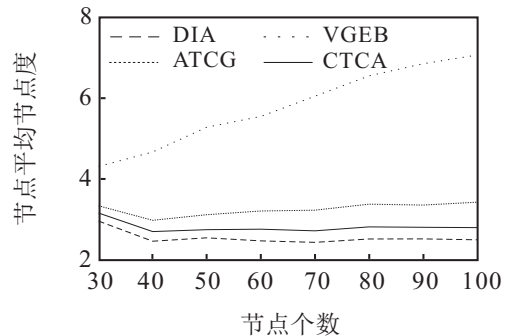


图6 节点平均节点度变化

图7为节点剩余能量标准差变化的对比。ATCG算法的剩余能量标准差相比DIA、VGEB、CTCA算法都低,且上升速度较缓慢。VGEB算法关注了能量均衡却忽视了能量效率,客观地增大了部分节点发射功率,但也增加了链路总能耗,故节点剩余能量标准差上升较快。DIA算法未考虑节点剩余能量,使得网络中节点负载不均衡程度比较大,加速了部分节点能量的消耗。CTCA算法过多强调降低部分节点的发射功率,而使得网络能量消耗不均衡。反观ATCG算法不仅考虑了节点平均寿命,还考虑了减小最短寿命节点功率,提升网络中能量效率的同时使网络中节点寿命的均衡度更高。

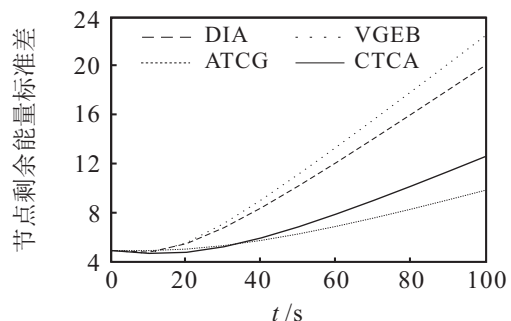


图7 节点剩余能量标准差变化

5 结论

无线传感器网络中节点能量受限且节点间能量消耗不均衡,易导致部分节点提前死亡。本文构造了一种基于序数势博弈的拓扑控制模型,通过设计综合

考虑节点平均寿命和最短寿命,并兼顾网络连通性及覆盖性的效用函数,提出了一种能耗均衡的自适应拓扑博弈算法.仿真分析表明,该算法相比较其他算法,能更有效地平衡节点负载,均衡网络能耗的同时,提升了全网络的能效,保证了网络拓扑的健壮性,增强了网络拓扑的自适应性.本文主要研究在网络拓扑健壮性的基础上改善能耗均衡,未考虑现实的无线通信状态的影响以及有效性验证,下一步工作准备针对无线通信状态的变化展开进一步的研究,考虑较为实际情况下的网络能耗均衡与拓扑控制优化.

参考文献(References)

- [1] Farruh Ishmanov, Malik A S, Kim S W. Energy consumption balancing(ECB) issues and mechanisms in wireless sensor networks(WSNs): A comprehensive overview[J]. *European Trans on Telecommunications*, 2011, 22(4): 151-167.
- [2] 张学,陆桑璐,陈贵海,等.无线传感器网络的拓扑控制[J]. *软件学报*, 2007, 18(4): 943-954.
(Zhang X, Lu S L, Chen G H, et al. Topology control for wireless sensor networks[J]. *J of Software*, 2007, 18(4): 943-954.)
- [3] 李晓鸿,王文艳,王东.一种最大化Ad-Hoc网络生存期的拓扑控制算法[J]. *计算机研究与发展*, 2013, 50(3): 461-471.
(Li X H, Wang W Y, Wang D. Extending the network lifetime using topology control in Ad Hoc networks[J]. *J of Computer Research and Development*, 2013, 50(3): 461-471.)
- [4] Kubisch M, Karl H, Wolisz A, et al. Distributed algorithms for transmission power control in wireless sensor networks[C]. *Proc of the IEEE Wireless Communications and Networking Conf*. New York: IEEE Press, 2003: 558-563.
- [5] Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. An application specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2002, 1(4): 660-670.
- [6] 沈士根,马绚,蒋华,等.基于演化博弈论的WSNs信任决策模型与动力学分析[J]. *控制与决策*, 2012, 27(8): 1133-1138.
(Shen S G, Ma X, Jiang H, et al. Evolutionary game theory based trust strategy model and dynamics analysis in wireless sensor networks[J]. *Control and Decision*, 2012, 27(8): 1133-1138.)
- [7] Lin D, Wang Q. A game theory based energy efficient clustering routing protocol for WSNs[J]. *Wireless Networks*, 2016, 23(4): 1101-1111.
- [8] Yang L, Lu Y Z, Zhong Y C, et al. A hybrid, game theory based, and distributed clustering protocol for wireless sensor networks[J]. *Wireless Networks*, 2016, 22(3): 1007-1021.
- [9] Komali R S, Mackenzie A B, Gilles R P. Effect of selfish node behavior on efficient topology design[J]. *IEEE Trans on Mobile Computing*, 2008, 7(9): 1057-1070.
- [10] 李小龙,冯东磊,彭鹏程.一种基于势博弈的无线传感器网络拓扑控制算法[J]. *物理学报*, 2016, 65(2): 346-355.
(Li X L, Feng D L, Peng P C. A topology control algorithm based on potential game for wireless sensor networks[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(2): 346-355.)
- [11] 董荣胜,马争先,郭云川,等.一种基于马尔可夫博弈的能量均衡路由算法[J]. *计算机学报*, 2013, 36(7): 1500-1508.
(Dong R S, Ma Z X, Guo Y C, et al. A markov game theory based energy balance routing algorithm[J]. *Chinese J of Computers*, 2013, 36(7): 1500-1508.)
- [12] Chu X, Sethu H. Cooperative topology control with adaptation for improved lifetime in wireless ad hoc networks[C]. *IEEE INFOCOM*. Orlando: Proc IEEE, 2012: 262-270.
- [13] 董荣胜,孙栋栋,郭云川,等.基于演化博弈论的功率控制和垂直切换研究[J]. *计算机研究与发展*, 2014, 51(6): 1185-1198.
(Dong R S, Sun D D, Guo Y C, et al. Power control and vertical handoff based on evolutionary game theory[J]. *J of Computer Research and Development*, 2014, 51(6): 1185-1198.)
- [14] Charilas D E, Panagopoulos A D. A survey on game theory applications in wireless networks[J]. *Computer Networks*, 2010, 54(18): 3421-3430.
- [15] Rasmusen E. Games and information: An introduction to game theory[M]. 4th ed. Oxford: Blackwell Publishing, 2006: 26-33.
- [16] Hao X C, Zhang Y X, Jia N, et al. Virtual game based energy balanced topology control algorithm for wireless sensor networks[J]. *Wireless Personal Communications*, 2013, 69(4): 1289-1308.
- [17] Chen X M, Cai Y M, Yu Z, et al. Topology control algorithm based on game theory in wireless sensor networks[J]. *J of PLA University of Science and Technology*, 2011, 12(5): 414-418.
- [18] Chu X, Sethu H. Cooperative topology control with adaptation for improved lifetime in wireless sensor networks[J]. *Ad Hoc Networks*, 2015, 30(C): 99-114.

(责任编辑: 闫妍)