

联合功率与信道的 WSN 生命期优化博弈算法

郝晓辰¹, 姚宁^{1,2}, 解力霞¹, 王姣姣¹, 王立元¹

(1. 燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 北京交通大学海滨学院, 河北 黄骅 061199)

摘 要: 针对能量与计算能力受限的无线传感器网络因干扰引发能耗增加、网络生命期降低的问题, 提出了联合功率控制与信道分配的生命期优化博弈算法——LOAPC。LOAPC 探索节点功率与剩余能量对节点干扰的影响, 构建干扰影响度量模型, 并引入期望传输次数, 建立新颖的节点生命期模型。最后, LOAPC 以降低干扰与延长生命期为优化目标, 以既保证网络连通又降低能耗功率作为可选功率集合, 达到延长网络生命期的效果。仿真结果表明, 所提算法具有低干扰、低能耗并有效延长生命期的特性。

关键词: 无线传感器网络; 生命期优化博弈算法; 功率控制; 信道分配

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2019097

Research on WSN lifetime optimization game algorithm combined power and channel

HAO Xiaochen¹, YAO Ning^{1,2}, XIE Lixia¹, WANG Jiaojiao¹, WANG Liyuan¹

1. School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China

2. Department of Haibin College, Beijing Jiaotong University, Huanghua 061199, China

Abstract: Due to the problem of shortening the network lifetime which was caused by the big energy consumption for wireless sensor network (WSN) whose energy and computing power was limit, a lifetime optimization game algorithm combined power control and channel allocation (LOAPC) was proposed. The influence of node power and residual energy on the node interference was explored to construct an interference affection measurement model. Then, expected transmission times was introduced to establish a novel node lifetime model. Finally, LOAPC aimed at reducing interference and prolonging lifetime, and the node power was limited by an optional power set which ensured the network connectivity and economized energy consumption, so as to prolong the network lifetime effectively. At the same time, the simulation results show that the algorithm has the characteristics of low interference, low energy consumption and effectively prolonging the lifetime of the network.

Key words: wireless sensor network, lifetime optimization game algorithm, power control, channel allocation

1 引言

在物联网环境下, 无线传感器网络 (WSN, wireless sensor network) 作为连接物理世界与信息

世界的重要技术, 已广泛应用于智慧交通等领域。WSN 节点通过感知、处理和传输数据给观察者, 实现相关智能应用^[1]。然而该过程具有较大能耗, 且电池作为主要的供电设备, 其有限的供电能力使

收稿日期: 2018-07-26; 修回日期: 2019-03-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61403336, No.61802333); 河北省自然科学基金资助项目 (No.F2015203342); 沧州市重点研发计划指导项目基金资助项目 (No.172103004); 燕山大学青年教师自主研究计划课题 B 类基金资助项目 (No.15LGB007)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61403336, No.61802333), The Natural Science Foundation of Hebei Province (No.F2015203342), The Cangzhou Plan Guide Project for Key Research (No.172103004), The Independent Research Project Topics B Category for Young Teacher of Yanshan University (No.15LGB007)

WSN 寿命有限，因此在设计网络时应优先考虑减少节点能耗。同时，如果缺乏对信道的合理分配，节点间干扰过高时将导致数据传输失败，降低 WSN 的通信质量，并且，由于干扰使节点数据重传，从而增大额外能耗、加速节点失效、降低网络正常工作时间。因此，对于能量受限的 WSN，如何有效地利用节点能量减少节点间通信干扰、延长网络生命周期，已成为亟待解决的关键问题。

降低节点能耗、减少节点间的通信干扰，是功率与信道资源分配的关键与目的。在 WSN 中，当节点失效时，网络的信息会重新分配，邻居节点会将其负载分配给邻近节点，这样会直接增加邻近节点的负载，造成其过早失效。因此，仅考虑节点的剩余能量并不能有效地延长网络生命周期，应充分考虑各节点及其邻居节点的剩余能量，同时考虑节点干扰对网络生命期的影响。

其次，功率与信道具有复杂的交互关系：一方面，信道分配受功率控制影响，拓扑中节点的功率不同，最优信道也不同；另一方面，功率控制与信道状态也密切相关，不同信道使网络节点的传输功率也不同。双方相互影响，相互制约，共同决定网络性能，这种特性和博弈较为相似^[2]。

综上分析，本文首先利用网络拓扑信息和物理干扰模型构建节点的干扰模型，从而充分考虑节点的剩余能量及节点干扰对网络生命期的影响规律，构建网络生命周期模型。进而引入势场博弈，通过分析 WSN 中节点能量与邻居节点剩余能量、节点发射功率与网络干扰、网络生命周期之间的关系，构建联合功率与信道的 WSN 生命周期优化博弈算法 (LOAPC, lifetime optimization game algorithm combined power and channel)，有效实现功率和信道联合优化网络生命期的效果。

本文的主要贡献如下。

1) 结合网络的拓扑信息，运用物理干扰模型，充分考虑节点剩余能量对节点干扰及节点生存时间的影响，构建节点的干扰影响度量模型。

2) 采用节点期望传输次数，探索节点干扰对能耗的影响，设计新颖的节点能耗模型，并基于此模型构建节点的生命期模型，反映节点生命期与干扰、剩余能量及期望传输次数间的相互影响关系。

3) 基于节点的干扰影响度量模型及生命期模型，结合最佳回应策略，设计联合功率与信道的 WSN 生命周期优化博弈算法。该算法运用信干噪比

对节点的功率集合进行限制，减小算法计算量，并理论证明了该算法可收敛到帕累托最优。

4) 仿真结果表明，LOAPC 具有较小的能耗与干扰，可以有效延长网络生命周期。

2 相关工作

随着物联网的快速发展，人们对 WSN 的各项应用，如智慧农业^[3]等的功能需求日益增多。此时 WSN 不仅面临着巨大的数据处理与传输带来的大量能耗，还面临着因通信干扰而日益加重的重传能耗，最终大大缩短网络生命周期，因此，如何降低能耗与干扰进而提高网络生命周期，始终是资源受限的 WSN 亟待解决的热点问题。

为有效降低网络能耗，文献[4-5]采用拓扑控制方法尽可能地减小节点的发射功率，从而降低网络的传输能耗。然而降低能耗无法有效延长网络生命周期，其忽略了节点剩余能量对生命期的影响，无法确保网络的正常工作时间。针对此问题，文献[6]提出了一种分布式的能耗均衡拓扑控制算法，该算法运用网络连通因子，利用剩余能量与初始能量的比值构建效益函数，在保证网络连通的前提下减小能耗，并使节点尽量选择剩余能量多的节点作为其邻居节点，最大化网络生命周期。文献[7]同样以保证网络连通为基础，引入代数连通度，结合博弈理论构建能量效率的拓扑控制算法，以有效延长网络生命周期。文献[8]以降低能耗与延长生命周期为目标提出 EETCA (energy efficient topology control algorithm)，该算法以链路总能耗为链路权重，通过删除网络中能耗较大的链路，实现优化目标。

然而上述算法均未考虑网络的干扰情况，节点的发射功率在影响拓扑结构与能耗的同时，也影响着网络遭受干扰的程度。发射功率越大，节点的干扰范围越大，且距离发射节点越近的节点受到的干扰越大。信道分配是降低网络干扰的有效手段，因此，Chen 等^[2]提出了经典的信道分配 (GBCA, game based channel allocation) 算法，该算法综合考虑网络拓扑结构，以最小化节点间所造成及遭受的干扰为优化目标，有效降低了网络干扰，从而降低了能耗。然而该算法仅从信道角度降低干扰，减小能耗，忽略了剩余能量对二者的影响，因此 CAGLO (channel allocation game algorithm for anti-interference and lifetime optimization)^[9]在 GBCA 算法的基础上，运用节点剩余能量，构建生命期模

型,以最大化网络生命期、最小化网络干扰为优化目标进行信道分配,从而最大化网络生存时间。但是该算法在固定的拓扑信息中构建模型,而实际上节点功率随着节点状态的改变而改变,从而使网络拓扑发生变化。为改善该问题,王东等^[10]提出了三维拓扑(OVFSS, optimization variable fault-tolerant spanning subgraph)算法,使优化目标可随应用环境的通信情况进行调整,达到降低干扰与能耗、提高网络容错的效果。然而三维拓扑模型多应用于水下 WSN,此时通信模型将随之改变。为解决功率拓扑变化的问题,文献[11-13]提出了动态信道分配算法,然而该类算法具有较大的数据处理与通信能耗,并不适用于能量与计算能力受限的 WSN。

为了有效地减小网络干扰与能耗,延长网络生存时间,研究者们采用多资源多目标协同优化的方法提升网络性能。例如,Liu 等^[14]提出了 MPCOSM (multi-performance cooperative optimization with self-maintaining) 算法,该算法以网络连通、传输功率、剩余能量均衡、节点度及网络干扰为优化目标,构建多目标优化的效益函数,实现网络多性能的协同优化。Hao 等^[15]运用功率与信道的协同优化,结合信道间隔与中继传输对网络干扰及能耗的影响,提出了 JACIRT (joint game algorithm of power control and channel allocation considering channel interval and relay transmission) 算法。但是上述算法均具有较高的算法复杂度。JCPGC (joint channel allocation and power control optimal game-theoretic algorithm for concurrent transmission) 算法^[16]充分考虑功率控制与信道分配的内在关联性,设计了支持并行传输的联合功率与信道分配算法,很好地提升了网络容量并延长了网络的生命期,但是该算法没有考虑网络能量的影响,这对能量有限的 WSN 是一个很大的挑战。

基于上述分析,本文建立了联合功率与信道的生命期优化博弈模型 (LOGMPC, lifetime optimization game model combined power and channel),在该模型的基础上设计了 LOAPC 优化算法。该算法不仅可以收敛到帕累托最优,且具有较小的算法复杂度,能有效减小网络能耗与干扰,延长网络生命期。

3 LOGMPC 构建与分析

为保障 WSN 正常工作,不仅要求网络具有较低的干扰,确保信息服务质量,还要求 WSN 具有较长的网络生命期,确保物联网相关应用正常运

行。在 WSN 中,网络生命期通常取决于节点的剩余能量和节点单位能量消耗。因此,本节首先考虑干扰、功率、能量等因素构建节点干扰模型,并在此基础上引入节点期望传输次数的概念,构建新颖的节点能耗模型。其次,结合节点剩余能量与能耗,设计节点生命期模型。最后,利用博弈论构建 LOGMPC,保障 WSN 的生存时间,并通过模型分析证明 LOGMPC 具有稳定解。

3.1 干扰影响度量模型的构建

WSN 干扰的大小通常由协议干扰模型和物理干扰模型来度量,其中,物理干扰模型采用节点功率与节点间距离来定量分析节点干扰,如式(1)所示,即节点 i 所遭受的干扰 R_i 为

$$R_i = \sum_{j \in N_i} \frac{p_j X(c_i, c_j)}{d(i, j)^2} \quad (1)$$

其中, N_i 为节点 i 通信范围内的节点集合; p_j 为节点 j 的功率; c_i 、 c_j 分别表示节点 i 、节点 j 此时所使用的信道; $X(c_i, c_j)$ 为节点 i 和节点 j 之间是否存在干扰的判断因子,且满足 $X(c_i, c_j) = \begin{cases} 1, c_i = c_j \\ 0, c_i \neq c_j \end{cases}; d(i, j)$

为节点 i 和节点 j 间的距离。

目前,由于电池作为 WSN 主要的供电设备,能量无法补充,且对于剩余能量较小的节点而言,若其能耗较大,将加速该节点的死亡,因此在信道分配时应优先考虑剩余能量较小的节点。同时,也要避免与剩余能量较小的节点分配同一信道,以免遭受较大的干扰,从而增加能耗,加速死亡。故本节将节点邻居剩余能量考虑到节点的干扰影响模型中,定义 WSN 中任意节点 i 所遭受干扰的影响值 Es_i 为

$$Es_i = \sum_{j \in N_i} \frac{p_j X(c_i, c_j)}{E_j d(i, j)^2} \quad (2)$$

其中, E_j 为节点 j 的剩余能量。

式(2)表明,当与节点 i 使用相同信道的邻居节点个数越多、功率越大且距离越短时,节点 i 遭受的干扰越大,重传能耗越多,从而越早失效,并且此时更应避免与剩余能量小的节点 j 使用同一信道(避免加重剩余能量小的节点的干扰)。因此,这种情况下节点 i 所遭受的干扰造成的影响 Es_i 越大。

同时,节点自身所产生的干扰带来的影响 Ec_i 也应考虑在内,因此得出节点 i 的干扰影响度量模型如式(3)所示。

$$I_{E_i} = \left[E_s i + E_c j \right] = \left[\sum_{j \in N_i} \frac{p_j X(c_i, c_j)}{E_j} + \sum_{i \in N_j} \frac{p_i X(c_i, c_j)}{E_i} \right] \quad (3)$$

由式(3)可得, 降低 I_{E_i} 的值, 即降低节点 i 的干扰影响程度, 不仅保护了剩余能量较小的节点自身, 也保护了其通信范围内剩余能量较小的节点。

3.2 生命周期模型的构建

1) 节点能耗模型

节点能耗的大小不仅取决于节点发送/接收数据量的大小, 还与节点传输该信息的次数有关, 所以节点由于干扰重传数据, 加剧了节点的能耗。而根据 IEEE 802.15.4 协议要求, 节点对之间每条路径的期望传输次数 ETN 不超过 $5^{[17]}$, 即 i 与 j 之间的期望传输次数 $ETN(i, j) = (1 - \frac{1}{2} e^{-SINR_j})^{-8f} \leq 5$, 其中,

$SINR_j$ 是节点 j 的信干噪比 ($SINR$, signal to interference plus noise ratio), f 表示数据分组长度, 且 $f > 0$ 。因此当 $ETN(i, j) > 5$ 时, 则认为节点 i 与节点 j 之间不能相互通信。

本节采用较为简单并通用的一阶无线电通信能耗模型计算节点能量损耗。假设节点 i 周围有 n_i 个邻居节点, 每轮数据收集每个节点产生 l bit 的消息, 则节点 i 接收到的信息量为 $RS_i^r = \sum_{j \in N_i} [l(n_j - 1)ETN(j, i)]$ bit, 节点 i 向节点 j 发送的信息量为 $RS_i^t = \sum_{i \in N_j} [l(n_j - 1)ETN(i, j)]$ bit。假设节点接收和发送 1 bit 信息所耗能量分别为 E_r 和 E_t , 则在每轮数据收集过程中, 节点 i 发送和接收 l bit 数据时的能耗为

$$E_{cost_i} = RS_i^r E_r + RS_i^t E_t \quad (4)$$

同时, 在信息传输过程中, 若节点干扰过大, 将导致节点重新发送该数据分组。此时, 设节点的干扰阈值为 R_{th} (由后续 $SINR_{th}$ 的值确定该参数的取值), 节点干扰超过 R_{th} 越多, 即 $\frac{R_i}{R_{th}}$ 越大, 则该

节点重传的概率就越大。与此同时, 当任一节点 j 的初始能量 $E_0(j)$ 较小, 而其能耗 E_{cost_j} 较大, 即

$\frac{E_{cost_j}}{E_0(j)}$ 越大时, 该节点提前死亡的概率就越大, 此

时失效的节点 j 就会将其负载分配给其邻居节点 N_j , 从而加重 N_j 的负载, 进一步加重 N_j 的能耗。

综上分析, 考虑节点干扰与负载重分配对节点能耗的影响, 式(4)可转换为

$$E_{cost_i} = \left(1 + \frac{R_i}{R_{th}} + \sum_{i \in N_j} \frac{RS_j^r E_r + RS_j^t E_t}{E_0(j)} \right) (RS_i^r E_r + RS_i^t E_t) \quad (5)$$

2) 节点生命周期模型

由文献[9]可知, 通常情况下, 网络中任一节点 i 的生命期 $T_{node}(i)$ 与 E_i 和 E_{cost_i} 有关。然而, 若其邻居节点因剩余能量较小而提前死亡时, 一方面网络的连通性、覆盖率等将受到影响; 另一方面将引发负载重分配从而增加节点 i 的能耗, 降低网络生命周期。因此节点 i 的生命期 $T_{node}(i)$ 不仅与 E_i 和 E_{cost_i} 有关, 还与其邻居节点 j 的 E_j 相关, 故构建 WSN 中任意节点 i 的生命期模型 $T_{node}(i)$ 为

$$T_{node}(i) = \frac{E_i E_j}{E_{cost_i}} \quad (6)$$

3.3 LOGMPC 的构建

博弈模型主要由参与者、策略空间和效益函数三要素构成, 在此, 本文分别从该三要素对降低干扰和节点能耗的 LOGMPC 进行具体描述。

1) 参与者 I

参与者为 WSN 中参与构建拓扑结构的节点, 记 $I = \{1, 2, \dots, N\}$, 其中, N 为网络中所有节点的个数。

2) 策略空间 S

参与者所有策略组成的集合 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_i\}$ 为策略空间, 其中, $s_i = (p_i, c_i)$ 为节点 i 的功率和信道选择策略, $c_i \in \{1, 2, \dots, n\}$, n 为网络中的可用信道数。为进一步降低计算量, 减少能耗, 本文采用结合剩余能量的信干噪比来对功率 p_i 的选择进行约束。

接收节点 j 的信干噪比^[16] $SINR_j$ 为

$$SINR_j = \frac{G p_i^{c_i} g(i, j) \frac{1}{E_i}}{\sum_{k \in N_j, k \neq i, j} p_k^{c_k} g(k, j) X(k, j) \frac{1}{E_k} + N_0} \quad (7)$$

其中, G 为发射节点放大器的处理增益, $p_i^{c_i}$ 为点 i 在信道为 c_i 的发射功率, $g(i, j)$ 为节点 i 和节点 j 之间的路径增益, N_0 为噪声干扰。当接收节点 j 的

信干噪比高于信干噪比阈值 $SINR_{th}$ (即 $SINR_j \geq SINR_{th}$) 时, 节点才可以成功接收信息。将式(7)代入 $SINR_j \geq SINR_{th}$, 解得节点 i 的最小发射功率为

$$p_{i-min}^{c_i} = \frac{SINR_{th} \left(\sum_{k \in N, k \neq i, j} p_k^{c_k} g(k, j) X(k, j) \frac{1}{E_k} + N_0 \right)}{Gg(i, j) \frac{1}{E_i}} \quad (8)$$

而节点 i 在信道 c_i 中会存在很多邻居节点与其共用同一信道, 因此 i 应尽可能地调节自身的功率大小以保证不影响信道中除节点 i 以外的其余任意节点 $m(m \neq i)$ 的数据传输。对于网络中任意节点 m 来说, 同样需要节点 m 的信干噪比高于 $SINR_{th}$ 时, 才能成功地接收信息, 将节点 m 的信干噪比公式代入不等式 $SINR_m \geq SINR_{th}$, 有

$$\frac{Gp_m^{c_m} g(m, i) \frac{1}{E_m}}{\sum_{k \in N_m, k \neq i, m} p_k^{c_k} g(k, m) X(k, m) \frac{1}{E_k} + p_i^{c_i} g(i, m) \frac{1}{E_i} + N_0} \geq SINR_{th} \quad (9)$$

由式(9)解得此时节点 i 功率的最大值 $p_{i-max}^{c_{im}}$ 为

$$p_{i-max}^{c_{im}} = \left(\frac{Gp_m^{c_m} g(m, i) \frac{1}{E_m}}{SINR_{th}} - \sum_{k \in N_m, k \neq i, m} p_k^{c_k} g(k, m) X(k, m) \frac{1}{E_k} - N_0 \right) \frac{Er(i)}{g(i, m)} \quad (10)$$

由于节点有最大功率 p_{max} 的限制, 经以上分析, 取节点的 $p_{i-max}^{c_i}$ 为

$$p_{i-max}^{c_i} = \min(p_{i-max}^{c_{im}}, p_{max}) \quad (11)$$

结合上述计算可得节点 i 的可选功率集合为 $p_i \in (p_{i-min}^{c_i}, p_{i-max}^{c_i})$ 。

3) 效益函数 u

参与者 I 在策略组合 (s_i, s_{-i}) 下所得到的效益用 $u_i(s_i, s_{-i})$ 表示, 所有参与者的效益集合为 $u = \{u_1, u_2, \dots, u_N\}$ 。

综上所述, 考虑节点的干扰影响度量模型和生命期模型, 定义生命期优化博弈模型的效益函数 u_i 为

$$u_i = \alpha T_{node}(i) - \beta I_{E_i} \quad (12)$$

其中, α 和 β 为非负的网络生命期模型和节点干扰影响度量模型的数量级均衡因子, 因此, 本文设定 $\alpha = 1 \times 10^{-7}$, $\beta = 1 \times 10^{-3}$ 。

由式(12)可得, 当最大化 u_i 时, 将最大化节点的生命期与最小化节点的干扰影响, 从而达到减小干扰、延长网络生命期的效果。

3.4 LOGMPC 特性分析

对于博弈论而言, 纳什均衡是博弈模型的稳定解。同时, 对于势场博弈而言, 使势场函数达到最大值时的策略组合即为该博弈的纳什均衡解。故本节将基于势场博弈相关理论, 证明 LOGMPC 存在稳定纳什均衡解。

性质 1 LOGMPC 是势场博弈

证明 要证明 LOGMPC 博弈模型是势场博弈, 只需证明其存在势场函数 V , 满足势场函数的变化值 ΔV 和节点选择不同策略时效益函数的差值 Δu_i 保持同号即可。由效益函数公式可以构造势场函数 $V(p, c)$ 为

$$V(p, c) = \sum_{i \in N} u_i \quad (13)$$

当节点 i 的功率和信道由 (p_i, c_i) 改变为 (p_i', c_i') 时, i 的效益改变量为

$$\Delta u_i = u_i(p_i', c_i') - u_i(p_i, c_i) \quad (14)$$

式(13)的势场函数的变化值 ΔV 为

$$\Delta V = V(p_i', c_i') - V(p_i, c_i) = \sum_{i \in N} (u_i(p_i', c_i') - u_i(p_i, c_i)) \quad (15)$$

式(15)的势场函数的改变值 ΔV 可以分为 2 个部分: 1) 对于网络中任意节点 ($j \neq i, j \in N$) 的效益函数改变量之和; 2) 节点 i 的效益改变量。因此可以得到

$$\Delta V = \sum_{j \neq i, j \in N} (u_j(p_i', c_i') - u_j(p_i, c_i)) + [u_i(p_i', c_i') - u_i(p_i, c_i)] = \Delta U_j + \Delta u_i \quad (16)$$

令 $\Delta U_j = \sum_{j \neq i, j \in N} (u_j(p_i', c_i') - u_j(p_i, c_i))$, 并结合式(12)可得

$$\Delta U_j = \sum_{j \neq i, j \in N} (u_j(p_i', c_i') - u_j(p_i, c_i)) = \sum_{j \neq i, j \in N} \left[\alpha \frac{E_j E_k}{E_{\text{cost}_j}(j)} - \right]$$

$$\beta \left[\sum_{k \in N_j} \frac{p_k X(c_j, c_k)}{d(j, k)^2 E_k} + \sum_{j \in N_k} \frac{p_j X(c_j, c_k)}{d(j, k)^2 E_j} \right] - \alpha \frac{E_j E_k}{E_{\text{cost}_t}(j)} + \beta \left[\sum_{k \in N_j} \frac{p_k X(c_j, c_k)}{d(j, k)^2 E_k} + \sum_{j \in N_k} \frac{p_j X(c_j, c_k)}{d(j, k)^2 E_j} \right] = 0 \quad (17)$$

将式(17)代入式(16)可得

$$\Delta V = \Delta u_i \quad (18)$$

因此, LOGMPC 存在势场函数使 ΔV 与 Δu_i 同号, 故 LOGMPC 博弈模型是一个势场博弈。

性质 2 LOGMPC 存在至少一个纳什均衡解。

证明 在性质 1 的证明过程中, 已经证得如式(13)所示的函数 $V(p, c)$ 是 LOGMPC 博弈模型的势场函数。而网络中任意节点的功率和信道都是有限的, 所以在 LOGMPC 的策略空间中, 必然存在一个策略组合使其相应的势场函数 $V(p, c)$ 达到最大值。而最大化 $V(p, c)$ 的策略组合即为 LOGMPC 博弈模型的纳什均衡解, 因此 LOGMPC 博弈模型存在至少一个纳什均衡解。

4 LOAPC 设计与分析

在本节中, 基于 3.3 节所构建的生命期优化博弈模型 LOGMPC, 运用最佳回应策略设计 LOAPC 博弈算法, 并理论证明 LOAPC 能够收敛到全局最优的帕累托状态。

4.1 生命期优化博弈算法设计

LOAPC 首先使节点广播信息, 从而完成节点的信息收集, 构建自己的邻居列表。

构建完邻居列表后, 节点基于最佳回应策略进行博弈, 计算不同信道与功率下节点的效益值, 从而选择效益值最大的信道与功率作为自己本轮的策略。当网络中所有节点的策略与上一轮中所选择的策略相同时, 即达到纳什均衡状态, 博弈结束。

在算法的博弈阶段, 优先给剩余能量较低的节点分配信道和功率, 避免后期与其他节点分配到同一信道。在第 t 轮博弈时, 若节点允许更新策略时, 首先降低节点的一个功率, 并判断此时

网络是否连通。若网络不连通, 则节点功率重置为 $t-1$ 轮的功率值; 若网络连通, 则在此功率下根据效益函数式(12)计算节点在不同信道下的效益函数, 并基于最佳响应策略选择最大效益值对应的节点发射功率等级以及信道。依次更新其他节点的功率和信道策略, 当网络中所有节点都更新完, 判断此时算法是否达到纳什均衡, 如果达到纳什均衡状态, 则算法结束, 否则, 继续参与下一轮循环。

4.2 生命期优化博弈算法性能分析

性质 3 LOAPC 能够收敛到纳什均衡。

证明 由势场博弈相关理论可知, 使 V 最大化时的信道与功率状态即为该博弈的纳什均衡解。而

$$V(p, c) = \sum_{i \in N} u_i$$

当 LOAPC 基于最佳回应策略使各节点选择使效益值最大化的信道和功率时, WSN 中各节点效益总和必然也是最大的, 因此 LOAPC 能够收敛到纳什均衡。

虽然 LOAPC 可以收敛到纳什均衡状态, 然而该纳什均衡可能是局部最优解。为证明所构建的 LOAPC 最终可收敛到全局最优, 只需证明其收敛到的纳什均衡是帕累托最优即可, 因此引入帕累托最优概念。

定义 1 帕累托最优^[18]。对于任意 $i \in N$, 若不存在策略 $s \in S$, 使 $u_i(s^*) \leq u_i(s)$ 和 $u_j(s^*) < u_j(s)$ 成立, 则 s^* 即为该博弈模型的帕累托最优。

性质 4 LOAPC 能够收敛到帕累托最优状态。

证明 根据纳什均衡定义, 在 WSN 中不存在节点通过降低自身的发射功率和信道选择来得到更高的效益, 如果每个节点功率持续改变, 则可能会影响整个网络的连通性。其次, 在保证 WSN 连通的前提下, 不存在 $k(k \geq 2)$ 个节点同时通过降低功率来实现自身效益的增加。每个网络中的节点如果通过相对应的方法降低了自身的功率, 则会导致网络不连通, 那么与之相邻的节点就会同时增加功率去保证网络的连通性, 如此一来网络中其他节点的效益就会降低, 更何况 k 个邻居节点同时增大自身收益。故可得 LOAPC 博弈算法最终可达到帕累托最优状态。

5 仿真实验

LOAPC 与 CAGLO^[9]的应用场景均为平面型 WSN, 且 LOAPC 相较于 CAGLO 同样考虑了干扰、

能耗及生命期对网络性能的影响并进行了改进。此外, CAGLO 在构建相应的干扰、能耗、生命期指标及博弈模型效益函数时, 忽略了节点功率对网络各性能的影响。因此, 为验证 LOAPC 的有效性, 本文选取优化目标相同的 CAGLO 作为对比算法, 从多个性能方面进行仿真, 证明 LOAPC 在降低干扰与延长生命期等方面的功效。在该仿真中, 使 100 个节点随机分布在 500 m×500 m 的监测区域内, 具体仿真参数如表 1 所示。

参数	取值
最大发射功率 p_{\max}/W	0.1
路径增益 $g(i, j)$	$\frac{1}{(1+d(i, j))^4}$
信干噪比阈值 $SINR_{th}/dB$	2
数据分组长度 l/dB	4
噪声干扰 N_0/W	10^{-7}
最大节点能量 E_0/J	50

1) 网络节点平均干扰

设置网络信道数为 5, 改变节点数为 60~110, 步长为 10, 计算节点平均干扰, 即网络中所有节点干扰的平均值, 如图 1 所示。

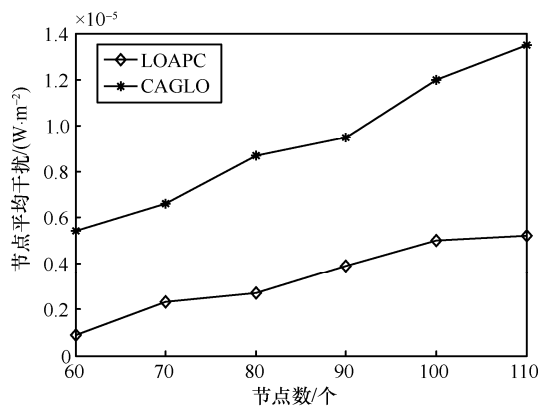


图 1 网络节点平均干扰对比

由图 1 可知, 随着节点数的增加, LOAPC 与 CAGLO 下的节点平均干扰逐渐增大, 但 LOAPC 下的干扰始终小于 CAGLO, 且增加缓慢。这是因为随着节点数的增加, 节点间的距离减小, 同时使用相同信道的节点增加, 因此干扰呈增长趋势。并且 LOAPC 考虑功率影响因素, 适当调整功率, 因此相较于 CAGLO 而言, 能有效降低网络节点的平均干扰。

2) 网络节点平均功率

设置可用信道个数为 5~10, 步长为 1, 分别利用 LOAPC 和 CAGLO 计算不同可用信道数时网络中所有节点发射功率的平均值, 如图 2 所示。

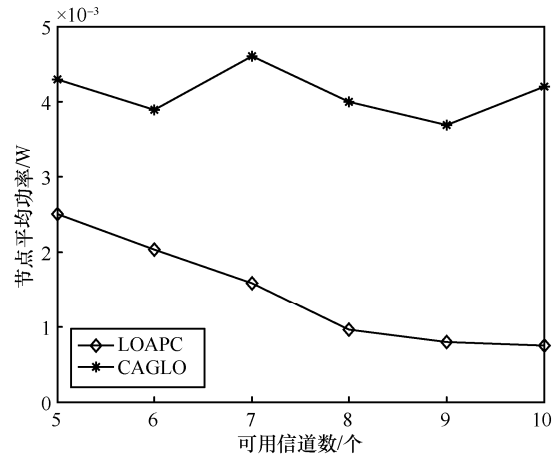


图 2 网络节点平均功率对比

由图 2 可知, LOAPC 下的节点平均功率随着信道个数的增加而逐渐降低, 且小于 CAGLO, 有效节约了节点能量。这是因为 LOAPC 在信道分配的同时合理地调节节点的功率大小, 在保证网络连通的情况下最小化节点的功率, 有效地减少了网络的能耗。而 CAGLO 并未考虑节点功率, 因此其平均功率为网络初始化功率, 较为稳定, 在一定范围内波动。

3) 网络生命期

网络生命期对比如图 3 所示。由图 3 可知, LOAPC 的生命期始终大于 CAGLO, 可以有效延长网络生命期。这是因为 LOAPC 将节点剩余能量及功率对生命期的影响均考虑在内。同时, 由图 2 可以看出, CAGLO 下的节点的功率均大于 LOAPC, 故 CAGLO 下的各节点的邻居节点数普遍大于 LOAPC。由式(4)及式(6)可得, CAGLO 下的生命期低于 LOAPC。在图 3 中, 虽然 LOAPC 下的网络生命期随节点数目的增多大体呈减少趋势, 但在节点数为 70~90 时, 网络生命期出现波动。这是因为当网络中的节点数增多时, 在保证网络连通及降低能耗的原则下, 节点功率降低, 各节点间距离减小。因此, 由式(7)可知, 随着网络中节点数的增多, 各节点的信干噪比可能增大也可能减小, 所以随着节点数的增多, 网络的生命期可以增大也可以减小, 造成节点数在 70~90 时, 生命期出现上下波动的情况。而当节点数为

100 和 110 时, 由于信道数的有限性, 使网络中使用相同信道的节点对增多, 从而降低网络生命周期, 因此其呈下降趋势。

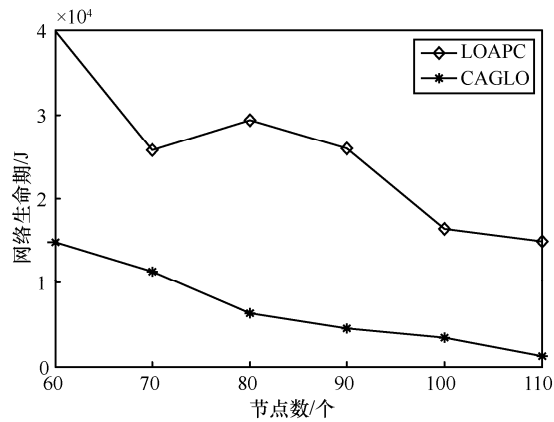


图3 网络生命周期对比

4) 网络收敛性

用算法的收敛速度来度量算法的复杂度, 即算法的收敛速度越快, 算法本身的复杂度越低。收敛轮数对比如图4所示。

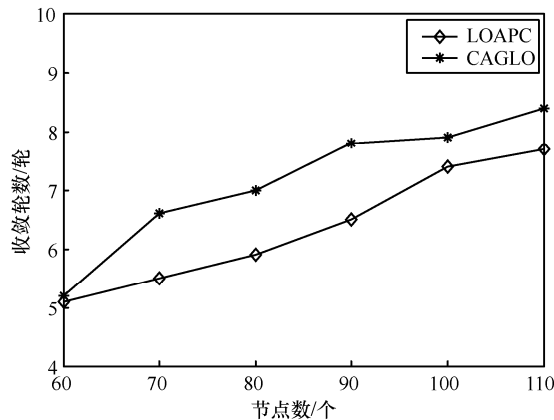


图4 收敛轮数对比

由图4可知, LOAPC 的收敛轮数低于 CAGLO。这是因为 LOAPC 不仅在博弈阶段考虑节点的剩余能量, 优先为能量小的节点分配功率与信道, 加快博弈收敛速度, 还通过约束节点功率, 降低了算法的计算量。因此, LOAPC 收敛速度更快, 算法复杂度更低。

6 结束语

为了优化网络资源, 本文从降低网络能耗与干扰入手, 构建了新颖的干扰影响度量模型、能耗模型及生命周期模型, 量化了网络能耗及干扰对网络带

来的影响, 并在此基础上充分考虑上述三者间的交互作用, 构建了 LOGMPC 博弈模型。其次, 基于 LOGMPC, 本文以优化网络生命周期为目标, 设计了联合功率与信道分配的 WSN 生命周期优化博弈算法 LOAPC。理论分析表明, LOAPC 可以实现帕累托纳什均衡。最后, 通过算法对比仿真实验, 得出本文所构建的 LOAPC 在节约节点能量、降低节点干扰等方面显示出较大的优势, 且具有较快的收敛速度, 在降低网络能耗的同时延长了网络的生命期。

参考文献:

- [1] 付帅, 姜奇, 马建峰. 一种无线传感器网络隐私保护数据聚合方案[J]. 计算机研究与发展, 2016, 53(9): 2030-2038.
FU S, JIANG Q, MA J F. A privacy-preserving data aggregation scheme in wireless sensor networks[J]. Journal of Computer Research and Development, 2016, 53(9): 2030-2038.
- [2] CHEN J M, YU Q, CHENG P, et al. Game theoretical approach for channel allocation in wireless sensor and actuator networks[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2012, 56(10): 2332-2344.
- [3] KUMAR S A, ILANGO P. The impact of wireless sensor network in the field of precision agriculture: a review[J]. Wireless Personal Communications, 2018, 98(1): 685-698.
- [4] GUO S, ZHAO H, WANG X, et al. Energy-efficient topology control algorithm for maximizing network lifetime in wireless sensor networks with mobile sink[J]. Applied Soft Computing, 2015, 34(C): 539-550.
- [5] QI N, XIAO M, TSIFTISIS T A. Energy-efficient cooperative network coding with joint scheduling and power allocation[J]. IEEE Transactions on Communications, 2016, 64(11): 4506-4519.
- [6] 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): 342-351.
LI X L, FENG D L, PENG P C. A potential game based topology control algorithm for wireless sensor networks[J]. ACTA Physica Sinica, 2016, 65(2): 342-351.
- [7] XU M, YANG Q, KWAK K S. Algebraic connectivity aided energy-efficient topology control in selfish ad hoc networks[J]. Wireless Networks, 2016, 23: 1-11.
- [8] WAQAS A, MAHMOOD H. A game theoretical approach for topology control in wireless Ad Hoc networks with selfish nodes[J]. Wireless Personal Communications, 2017, 96(1): 249-263.
- [9] 郝晓辰, 姚宁, 汝小月, 等. 基于生命周期模型的无线传感器网络信道分配博弈算法[J]. 物理学报, 2015, 64(14): 1-11.
HAO X C, YAO N, RU X Y, et al. Channel allocation game algorithm based on lifetime model in wireless sensor network[J]. ACTA Physica Sinica, 2015, 64(14): 1-11.
- [10] 王东, 邓好. 优化目标可变的容错三维拓扑控制算法[J]. 计算机工程与科学, 2014, 36(5): 842-848.

WANG D, DENG H. Optimization-variable fault-tolerant three-dimensional topology[J]. Computer Engineering and Science, 2014, 36(5): 842-848.

- [11] HU H Y, JIA Z H, QIN X Z, et al. A dynamic channel allocation algorithm in TD-SCDMA system[J]. International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering, 2015, 10(11): 213-224.
- [12] KO J G, MISHRA A. DynaChannAl: dynamic channel allocation with minimal end-to-end delay for two-tier wireless sensor networks[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2013, 13(16): 1482-1497.
- [13] GOEL A, SHEEZAN M, AHMED M. Distributed dynamic channel allocation scheme in interference-limited sectored cellular network[C]//The 8th International Conference on Computing for Sustainable Global Development. 2014: 856-860.
- [14] LIU H R, XIN M J, LIU W J, et al. Topology control game algorithm of multi-performance cooperative optimization with self-maintaining for WSN[J]. Wireless Personal Communications, 2017, 94(3): 1237-1262.
- [15] HAO X C, RU X Y, LI X D, et al. Joint game algorithm of power control and channel allocation considering channel interval and relay transmission obstacle for WSN[J]. Wireless Personal Communications, 2016, 86(2): 521-548.
- [16] 郝晓辰, 巩倩倩, 侯爽, 等. 无线传感器网络中支持并行传输的信道与功率联合优化博弈算法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(7): 1720-1727.
- HAO X C, GONG Q Q, HOU S, et al. Joint channel and power optimal game-theoretic algorithm for concurrent transmission in wireless sensor network[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2014, 36(7): 1720-1727.
- [17] 裔传俊, 刘亮. 链路质量感知的无线传感器网络生命最大化算法[J]. 计算机应用研究, 2016, 33(11): 3411-3416.
- YI C J, LIU L. Link quality-aware algorithms for maximizing lifetime in wireless sensor networks[J]. Application Research of Computers, 2016, 33(11): 3411-3416.
- [18] 刘韬. 无线传感器网络中基于效用模型的分布式功率控制机制[J]. 电子学报, 2016, 44(2): 301-307.
- LIU T. A utility model-based distributed power control scheme in wireless sensor networks[J]. ACTA Electronica Sinica, 2016, 44(2): 301-307.

[作者简介]



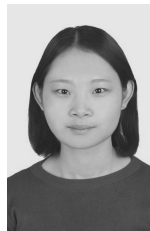
郝晓辰(1980-), 男, 河北衡水人, 博士, 燕山大学教授, 主要研究方向为无线传感器网络拓扑控制、无线传感器网络的资源分配。



姚宁(1989-), 女, 河北邢台人, 燕山大学博士生, 主要研究方向为无线传感器网络的资源分配算法。



解力霞(1988-), 女, 山东菏泽人, 燕山大学硕士生, 主要研究方向为无线传感器网络的拓扑控制、无线传感器网络的功率与信道联合优化算法。



王姣姣(1993-), 女, 河北邢台人, 燕山大学硕士生, 主要研究方向为无线传感器网络的拓扑控制、无线传感器网络的分布式资源分配优化算法。



王立元(1993-), 女, 河北衡水人, 燕山大学硕士生, 主要研究方向为无线传感器网络的资源分配算法。