

## 无线传感器网络基于容量和传输能耗的功率与信道联合博弈算法

郝晓辰\* 刘金硕 姚宁 解力霞 王立元  
(燕山大学电气工程学院 秦皇岛 066004)

**摘要:** 针对无线传感器网络(WSNs)日益增大的干扰导致网络容量下降的问题,同时考虑到网络能量有限性,该文综合网络容量和链路传输能耗,构建了高容量低传输能耗的功率控制与信道分配联合博弈模型,并通过理论分析证明该模型存在最优功率和最优信道。继而采用最佳响应策略,在该博弈模型基础上提出了一种功率控制与信道分配联合优化算法(PCOA),理论证明其能收敛到纳什均衡状态,且具有较小的信息复杂度。最后,仿真结果表明,PCOA算法能够达到降低网络干扰和链路能耗,增大网络容量的目的。

**关键词:** 无线传感器网络; 网络容量; 能耗; 功率控制; 信道分配

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)07-1715-08

DOI: 10.11999/JEIT170927

## Research of Network Capacity and Transmission Energy Consumption in WSNs Based on Game Theory

HAO Xiaochen LIU Jinshuo YAO Ning XIE Lixia WANG Liyuan  
(Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** To solve the problem that the network capacity decreases with the increasing interference in Wireless Sensor Networks (WSNs), a joint power control and channel allocation optimization game model is constructed, which considers the limitation of network energy. This game model contains the network capacity and the energy consumption of data transmission in the network. Theoretical analysis proves the existence of the optimal power and the optimal channel. Based on the model, a joint Power control and Channel allocation Optimization Algorithm for wireless sensor networks (PCOA) is proposed, which adopts the best response strategy. The theoretical analysis proves that this algorithm can converge to Nash Equilibrium. Besides, the information complexity of this algorithm is small. Simulation results show that PCOA algorithm can reduce the interference and the energy consumption, which increases the network capacity.

**Key words:** Wireless Sensor Networks (WSNs); Network capacity; Energy consumption; Power control; Channel allocation

### 1 引言

作为物联网支撑技术的无线传感器网络<sup>[1]</sup>通过传感器节点收集监测对象的相关数据,实现物理世界与信息世界的融合。目前其应用于军事侦察<sup>[2]</sup>、智能交通<sup>[3]</sup>、农业监测<sup>[4]</sup>和海洋探测<sup>[5]</sup>等诸多领域,是当前信息领域研究的热点之一<sup>[6]</sup>。然而,WSNs的快速发展使得网络中的干扰逐渐增大,导致节点容量

下降<sup>[7]</sup>。又由于网络能量的有限性,因此如何增大网络容量,有效降低数据传输能耗成为WSNs面临的一个重要挑战。

功率控制主要通过调整节点的发射功率以获得高性能的连通拓扑结构<sup>[8]</sup>,减少网络能耗。SPCA算法<sup>[9]</sup>在满足信噪比门限的条件下求取链路的最小功率,该算法虽然降低了能耗,但网络容量较小。Sboui等人<sup>[10]</sup>提出最大化能量效率和频谱利用率的功率控制算法,有效提高了网络容量,但忽略了节点能量问题。文献[11]通过中继选择和功率控制均衡网络节点的剩余能量,然而该方法的收敛速度较慢,能量开销较大。

单信道的功率控制在链路数据进行并行传输时,仍然存在较大的干扰,导致网络容量下降和数据传输失败,数据重传造成更多的能量消耗。因此,引入了多信道技术。分布式博弈信道分配算法

收稿日期: 2017-09-30; 改回日期: 2018-03-08; 网络出版: 2018-04-08

\*通信作者: 郝晓辰 haoxiaochen@ysu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61403336), 河北省自然科学基金(F2015203342), 燕山大学青年教师自主研究计划课题 B 类(15LGB007)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61403336), The Natural Science Foundation of Hebei Province (F2015203342), The Independent Research Project Topics B Category for Young Teacher of Yanshan University (15LGB007)

GBCA<sup>[12]</sup>充分利用网络拓扑和路由信息为链路分配信道。该算法均衡了网络干扰,但忽略了交叉链路的干扰,节点能耗仍较大。Zheng 等人<sup>[13]</sup>采用多信道多接口算法提高了数据传输的准确性,但是较大的传输延迟会导致传输效率降低。文献[14]以最大化网络的连通性作为优化目标为节点分配信道,该方法复杂性高,能耗大。

功率控制技术能降低网络能耗,但是不能解决信道冲突造成的数据重传问题;信道分配技术能优化频谱资源,减小干扰,却不能有效降低传输能耗。因此,联合这两种技术可以进一步提高网络性能。NETMA 算法先为网络分配信道,再进行功率调整<sup>[15]</sup>。该算法虽然增大了网络吞吐量,但是只是将两者进行了简单叠加。文献[16]根据路由信息对网络节点分配功率和信道,网络的可靠性和能耗得到了改善。FITC 算法在保证网络 k 连通的情况下通过功率和信道增大吞吐量<sup>[17]</sup>,但采用集中式方法,信息交换能耗较大。

基于以上分析,本文联合功率控制与信道分配,同时考虑能量的有限性和分布不均性,以提高网络容量、降低传输能耗为目标,建立了高容量低传输能耗的功率控制与信道分配联合博弈模型,进而在该模型基础上创建了功率控制与信道分配联合优化算法 PCOA,并通过理论和仿真证明该算法能提高网络性能。

## 2 高容量低传输能耗的功率控制与信道分配联合博弈模型

本节从问题分析的角度阐述功率和信道对网络容量和链路传输能耗的影响,构建容量模型和能耗模型。然后将构建的这两个模型转换成求解功率和信道的最优化问题。进而采用博弈论的方法对该问题进行求解。

### 2.1 容量模型

无线传感器网络容量取决于信噪比,并且一条链路的数据传输能否成功,在于该链路接收节点的信噪比 SINR 是否超过接收门限。假设网络中某条链路在进行通信时,其接收节点均能接收发射节点和其他链路发射节点的信号。由于网络中节点的能量是有限的,如果能量较少的节点采用较大的发射

功率,拓扑结构会因为其能量会过早耗尽而发生变化。因此,综合节点能量,链路  $i$  的信噪比 SINR 可表示为<sup>[18]</sup>

$$\text{SINR} = \frac{p_i g_i (E_0/E_r(i))}{\sum_{j \in I, j \neq i} p_j g_{ji} [E_0/E_r(j)] + n_0} \quad (1)$$

式中,  $n_0$  为高斯白噪声,并且假设其为定值。  $p_i$  和  $p_j$  分别为链路  $i$  和链路  $j$  的发射功率;  $g_i$  为  $i$  的路径增益。定义网络中节点初始能量为  $E_0$ ,某时刻  $i$  和  $j$  发射节点的剩余能量定义为  $E_r(i)$  和  $E_r(j)$ ,其中,  $i, j \in I$  ( $I$  为网络总链路)。链路  $j$  对  $i$  的干扰为  $p_j g_{ji}$ 。其中,  $g_{ji}$  是  $j$  的发射节点与  $i$  的接收节点之间的路径增益。

功率控制技术能够有效降低网络能耗,但是仅采用单信道的功率控制网络中仍存在较大的干扰。因此,联合功率和信道,信噪比  $\gamma_i$  可表示为

$$\gamma_i = \frac{p_i^{c_i} g_i (E_0/E_r(i))}{\sum_{j \in I, j \neq i} p_j^{c_j} g_{ji} [E_0/E_r(j)] \varepsilon(i, j) + n_0} \quad (2)$$

$p_i^{c_i}$  表示链路  $i$  的发射节点在所信道  $c_i$  中的功率为  $p_i$ ,同理,  $p_j^{c_j}$  表示链路  $j$  的发射节点在所信道  $c_j$  中的功率为  $p_j$ 。若网络中的任意链路  $i$  在某信道的  $\gamma_i$  高于信噪比门限,则该信道被称为链路  $i$  的可选信道。  $\varepsilon(i, j)$  表示连通因子,若  $c_i$  和  $c_j$  为同一信道,即  $c_i = c_j$ ,  $\varepsilon(i, j)$  的取值为 1,否则  $\varepsilon(i, j) = 0$ 。

链路  $i$  在所选为信道  $c_i$  功率为  $p_i$  的情况下,链路容量  $C$  表示为

$$C = \log_2 \left( 1 + \frac{p_i^{c_i} g_i (E_0/E_r(i))}{\sum_{j \in I, j \neq i} p_j^{c_j} g_{ji} [E_0/E_r(j)] \varepsilon(i, j) + n_0} \right) \quad (3)$$

从式(3)可以看出,增大链路  $i$  的发射功率以及减小所受干扰均能增大其信噪比,进而提高链路  $i$  的容量。因此,链路所选功率和信道会直接影响容量的大小,进而影响网络通信质量。

### 2.2 传输能耗模型

节点之间通过链路进行数据传输时,发送数据和接收数据都会消耗能量。本文采用的通信模型如图 1 所示。

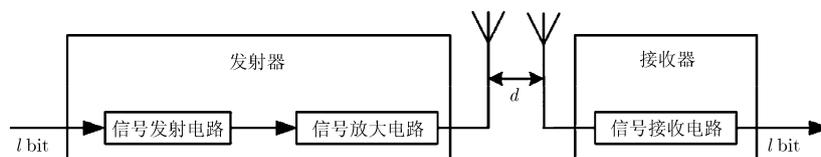


图 1 无线通信能耗模型

图1中, 假设发送节点向接收节点发送  $l$  bit 数据, 且两节点之间的距离为  $d$ 。则发送节点的能耗  $E_{Tx}$  为信号发射电路与信号放大电路的能耗之和, 表示为

$$E_{Tx} = E_{el} \cdot l + \varepsilon_a \cdot l \cdot d^2 \quad (4)$$

式中,  $\varepsilon_a$  为信号放大电路每单位数据的能耗量,  $\varepsilon_a \cdot l \cdot d^2$  表示信号放大电路的能耗,  $E_{el}$  为信号发射或接收电路模块发送或接收单位数据的能耗量, 所以, 信号接收电路的能耗  $E_{Rx}$  为

$$E_{Rx} = E_{el} \cdot l \quad (5)$$

综上, 定义两通信节点间发送节点与接收节点的能耗之和为链路能耗  $E_c$ , 即

$$E_c(i) = E_{Tx} + E_{Rx} = 2E_{el} \cdot l + \varepsilon_a \cdot l \cdot d^2 \quad (6)$$

采用自由空间衰减模型, 可得节点最小发射功率  $p_i$  与节点最小接收功率  $p_r$  之间的关系<sup>[19]</sup>为

$$p_i^{c_i} = p_r (4\pi d/\lambda)^2 \quad (7)$$

式中,  $\lambda$  为载波波长。为表示方便, 令  $h = p_r (4\pi/\lambda)^2$ , 则链路  $i$  发射节点的功率  $p_i^{c_i}$  与其通信距离  $d$  满足:

$$p_i^{c_i} = hd^2 \quad (8)$$

将式(8)代入式(7), 链路  $i$  的能耗可转换成式(9):

$$E_c(i) = 2E_{el}l + \varepsilon_a l \frac{p_i^{c_i}}{h} \quad (9)$$

链路进行数据传输时的能耗会随所选择发射功率的增大而增大。并且干扰较大的信道会导致数据传输失败, 数据重传产生更多的传输能耗。因此, 链路应尽可能减小发射功率并且选择干扰较小的信道。

### 2.3 最优化模型建立

由容量和能耗模型可得, 链路功率和信道的选择会影响干扰和传输能耗, 并且干扰越大, 网络容量越小。因此, 为均衡网络容量与能耗, 综合容量与能耗模型构建功率控制和信道分配的最优化模型如式(10):

$$\begin{aligned} \max \quad & u_i = \log_2 \left[ 1 + \frac{p_i^{c_i} g_i \frac{E_0}{E_r(i)}}{\sum_{j \in I, j \neq i} p_j^{c_j} g_{ji} \frac{E_0}{E_r(j)} \varepsilon(i, j) + n_0} \right] \\ & - \log_2 (1 + \gamma_i^*) - \alpha \frac{E_c(i)}{E_r(i)} \\ \text{s.t.} \quad & \gamma_i > \gamma_i^*, 0 < p_i^{c_i} \leq p_{\max} \end{aligned} \quad (10)$$

式中,  $\gamma_i^*$  为信噪比门限且是常数;  $\alpha$  为非负的权重因子。最优化模型的函数式(10)的具体表述如下:

网络容量的大小直接决定着网络的通信效率。

在式(10)的容量公式中,  $\sum_{j \in I, j \neq i} p_j^{c_j} g_{ji}$  表示在相同信道下, 链路  $i$  的接收节点接收数据时, 链路  $j$  对链路  $i$  造成的干扰总和。式(10)表明网络中与链路  $i$  使用相同信道的链路数越多, 对其产生的干扰越大, 从而导致网络容量变小。同时, 链路  $i$  功率的增大也会提高其容量。当链路  $i$  的容量越大, 该函数式的值也越大, 所以式(10)能增大网络容量。

式(10)引入信噪比门限  $\gamma_i^*$  的目的是使链路的信噪比高于信噪比门限。如果链路的信噪比低于  $\gamma_i^*$ , 则函数式的值为负, 在此情况下, 链路不能再进行数据传输, 链路必须选择使其信噪比高于信噪比门限的功率和信道。所以  $\gamma_i^*$  的引入保证了链路之间进行正常的数据传输。

函数式中除了包含链路传输能耗, 还考虑了链路的剩余能量。考虑剩余能量的目的是使剩余能量少的节点消耗的能量也相对较少, 进而延长网络生命期。权重因子  $\alpha$  在函数式中起着均衡容量和链路传输能耗数量级的作用。 $\alpha$  的存在使得容量与传输能耗处于同一数量级, 并达到兼顾容量与传输能耗的目的。

约束条件  $\gamma_i > \gamma_i^*$  表示链路  $i$  的信噪比高于接收门限  $\gamma_i^*$ ,  $0 < p_i^{c_i} \leq p_{\max}$  表示链路  $i$  发射节点的功率  $p_i^{c_i}$  取值范围在  $(0, p_{\max}]$  之间,  $p_{\max}$  为最大发射功率。这两个约束条件是链路选择功率和信道时所必须满足的条件。

综上, 本节综合改进的信噪比模型与链路传输能耗模型, 并结合信噪比门限、权重因子以及链路能量构建了最优化模型, 解决了网络容量与传输能耗的同时优化问题。

### 2.4 博弈模型建立

高容量低传输能耗的功率控制与信道分配联合博弈模型可表示为  $G = \{I, p^k, u\}$ , 具体表述如下:

(1) 参与者集合  $I$ : 表示为  $I = \{1, 2, \dots, n\}$ , 其中,  $n$  为链路总条数。即参与者由网络中的所有链路构成。

(2) 策略空间  $p^k$ : 所有参与者策略组成的集合称作策略空间, 表示为  $p^k = (p_1^{k_1}, p_2^{k_2}, \dots, p_n^{k_n})$ 。假设网络中的正交信道数为  $C$ , 即信道集合为  $c = \{1, 2, \dots, C\}$ 。链路  $i$  在可选信道数为  $M (M \leq C)$  构成的集合  $k_i$  中, 功率集合可表示为  $p_i^{k_i} = \{p_i^{c_{i1}}, p_i^{c_{i2}}, \dots, p_i^{c_{iM}}\}$ , 其中,  $k_i = (c_{i1}, c_{i2}, \dots, c_{iM})$ 。同时, 链路  $i$  功率的取值范围为  $(0, p_{\max}]$ 。

(3) 收益函数  $u$ : 在非合作博弈中, 网络中的每条链路都是自私的, 都想通过增大发射功率以及改

变所选信道增大自身容量。但是随着链路功率的增大,链路进行数据传输的能耗也会随之增加。因此,综合网络容量和能耗两方面,设计收益函数如式(11)所示:

$$u_i = \log_2 \left( 1 + \frac{p_i^{c_i} g_i \frac{E_0}{E_r(i)}}{\sum_{j \in I, j \neq i} p_j^{c_j} g_{ji} \frac{E_0}{E_r(j)} \varepsilon(i, j) + n_0} \right) - \log_2 \left( 1 + \gamma_i^* \right) - \alpha \frac{E_c(i)}{E_r(i)} \quad (11)$$

式(11)表明,其他链路对链路*i*的干扰越小,其收益函数的值越大。此外,增大链路*i*的功率,虽然容量会随之增大,但能耗也会增加,因此,链路*i*要选取适当的功率和信道使自身的收益值达到最大。

理论分析表明,最优化模型能够实现高容量、低能耗的网络性能。进而通过最优化模型构建高容量低传输能耗的博弈模型,为了证明该模型的合理性及有效性,首先证明该模型最优解的存在性,证明如下:

**定理 1** 在该博弈模型中,网络中任意一条链路*i*均存在最优功率和最佳信道。

**证明**

(1)最优功率存在性证明:本文将链路的最小功率作为其最优功率。要想证明该博弈最优功率的存在,只需证明博弈中收益函数 $u_i$ 是凹函数,即 $\partial^2 u_i / \partial p_i^2 < 0$ 。同时令 $\partial u_i / \partial p_i = 0$ 可得链路*i*的最优功率 $p_i^*$ 。具体证明如下:

$$\frac{\partial u_i}{\partial p_i} = \frac{1}{\ln 2} \cdot \frac{g_i \frac{E_0}{E_r(i)}}{\sum_{j \in I, j \neq i} p_j^{c_j} g_{ji} \frac{E_0}{E_r(j)} \varepsilon(i, j) + n_0 + p_i^{c_i} g_i \frac{E_0}{E_r(i)}} - \alpha \frac{\varepsilon_a \cdot l}{h E_r(i)} \quad (12)$$

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial p_i^2} = - \frac{\left( g_i \frac{E_0}{E_r(i)} \right)^2}{\ln 2 \left( \sum_{j \in I, j \neq i} p_j^{c_j} g_{ji} \frac{E_0}{E_r(j)} \varepsilon(i, j) + n_0 + p_i^{c_i} g_i \frac{E_0}{E_r(i)} \right)^2} \quad (13)$$

由式(13)可知, $\partial^2 u_i / \partial p_i^2 < 0$ ,可知该博弈模型中的任意一条链路*i*存在最优功率。

令 $\partial u_i / \partial p_i = 0$ ,求得链路*i*最优功率 $p_i^*$ 的表达式如式(14)所示。

$$p_i^* = \frac{h E_r(i)}{\alpha \cdot \varepsilon_a \cdot l \cdot \ln 2} - \frac{\sum_{j \in I, j \neq i} p_j^{c_j} g_{ji} \frac{E_0}{E_r(j)} \varepsilon(i, j) + n_0}{g_i \frac{E_0}{E_r(i)}} \quad (14)$$

(2)最佳信道存在性证明:在该功率控制与信道分配的联合优化博弈模型中,由于网络中的可选信道是离散且有限的,任意一条链路*i*终能确定其最佳信道,故网络中的每条链路均存在最佳信道。

综上所述,网络中任意一条链路*i*均存在最优功率和最佳信道,定理 1 得证。

### 3 功率控制与信道分配联合优化算法

在无线传感器网络中,由于节点能量的有限性,设计一种能够快速收敛的算法尤为重要。算法的收敛速度快,意味着网络能够快速进入稳定状态,进而节省能量。本文采用最佳响应策略,同时基于以上博弈模型的建立和分析,提出了一种功率控制与信道分配联合优化算法 PCOA。进而通过对 PCOA 算法进行分析,证明该算法具有较小的信息复杂度,能够快速收敛。下面首先给出最佳响应策略的定义。

**定义 1** 最佳响应策略<sup>[20]</sup>:若某个参与者*i*在第*k*轮博弈中被允许更新它的策略,它将根据上一轮博弈即第*k*-1轮博弈中其他参与者的策略,选择使其效益最大的策略作为本轮所选策略。即

$$s_k^i = \arg \max_{s_i \in S_i} u_i(s_i, s_{-i}^{k-1}) \quad (15)$$

PCOA 算法的具体步骤表述如下:

**步骤 1** 为网络中所有链路分配功率和信道,链路*i*的初始状态为 $p_i^{c_i}$ 。将网络中各条链路的能量、功率、信道等信息发送给邻居链路,邻居链路将这些信息记录到自己的信息列表,然后接收链路将自身信息回复给发送链路;

**步骤 2** 令*i* = 1;

**步骤 3** 根据式(14)求得链路*i*的功率,然后判断链路*i*在各个信道中的信噪比是否高于信噪比门限,即可得出链路*i*的可选信道集合 $k_i$ 是否为空,若 $k_i = \emptyset$ ,返回步骤 1,重新为链路分配功率和信道;若 $k_i \neq \emptyset$ ,进入步骤 4;

**步骤 4** 通过式(11)可以计算出链路*i*在不同信道下的效益值,根据最佳响应策略在可选信道中选择使自身效益值最大的信道,记作 $c_i'$ ,在该最大效益值下求得最优功率 $p_i'$ ;

**步骤 5** 令*i* = *i* + 1,假如*i* ≤ *n*则返回步骤 3,否则进入步骤 6;

**步骤 6** 算法运行*k* (*k* ≥ 2)轮后,判断本轮中所有链路的效益值是否与*k*-1轮相等,若这两轮的效益值相等,说明网络中所有链路达到稳定状态,算法结束;否则进入步骤 2 开始下一轮循环。

在上述算法中,设计了一个策略矩阵 $s(k, p^i)$ ,其中,*k*为轮数, $p^i$ 为每条链路的策略选择。在步骤 4 完成之后,链路会将其所选策略记录在 $s(k, p^i)$

中。在算法进行博弈过程中, 各链路会依据  $s(k, p^i)$  选择当前轮的策略。随着算法的不断运行, 最终网络中的所有链路确定自身的功率和信道, 达到稳定状态。在其他链路不改变策略的情况下, 如果只有一条链路改变策略, 其收益值并不会增大, 我们称此状态为纳什均衡状态。下面给出纳什均衡的具体表述, 并证明 PCOA 算法能够达到纳什均衡状态。

**定义 2** 纳什均衡<sup>[21]</sup>: 在一个博弈中, 所有参与者的某个策略组成的策略集合  $s^* = \{s_i^*, s_{-i}^*\}$  满足式(16)不等式时, 则该策略组合为此博弈的纳什均衡。

$$u_i(s_i^*, s_{-i}^*) \geq u_i(s_i, s_{-i}^*) \quad (16)$$

其中,  $s_i^*$  为任意参与者  $i$  的所选策略,  $s_{-i}^*$  表示除  $i$  之外的其他参与者的策略组合,  $s_i$  为参与者  $i$  的其他可选策略。式(16)表明  $s_i^*$  是对  $s_{-i}^*$  做出的最佳对策。

**定理 2** PCOA 算法能收敛到纳什均衡状态。

**证明** 据以上算法的描述可知, 任意链路  $i$  在每一轮的算法中会根据其他链路的选择更新自己的功率和信道, 使自身效益值最大, 则每轮中可能出现以下 3 种状态:

- (1)  $p_i^{\text{new}} \neq p_i^{\text{old}}; c_i^{\text{new}} = c_i^{\text{old}};$
- (2)  $p_i^{\text{new}} \neq p_i^{\text{old}}; c_i^{\text{new}} \neq c_i^{\text{old}};$
- (3)  $p_i^{\text{new}} = p_i^{\text{old}}; c_i^{\text{new}} \neq c_i^{\text{old}}.$

在以上 3 种状态下, 均有  $u_i(\text{new}) \geq u_i(\text{old}) \Rightarrow \sum_{j \in N, j \neq i} u_j(\text{new}) \geq \sum_{j \in N, j \neq i} u_j(\text{old})$  恒成立。并且, 在算法运行过程中, 所有链路的效益值是单调非减的, 网络达到稳定状态时一定是在其他链路策略不变的情况下链路  $i$  选择的使其收益值最大的功率和信道。因此, 该算法必然能收敛达到纳什均衡。定理 2 得证。

**定理 3** PCOA 算法的信息复杂度为  $O(n)$ 。

**证明** 在 PCOA 算法的步骤 1 中, 每条链路只需进行两次信息交换。网络中存在  $n$  条链路, 则链路进行信息交换的信息量为  $2n$ 。在 PCOA 算法的功率和信道分配阶段, 每条链路依据策略矩阵  $s(k, p^i)$  进行博弈, 因此在此过程并没有信息交换。

显然, PCOA 算法整个过程交换的信息量为  $2n$ 。由此可得, PCOA 算法的信息复杂度为  $O(n)$ 。证毕

## 4 实验仿真与性能分析

本节通过 MATLAB 软件对 PCOA 算法进行实验仿真与性能分析。设定仿真区域的范围为  $40 \text{ m} \times 40 \text{ m}$ , 且该实验是在固定拓扑结构下进行的, 具体仿真实验参数如表 1 所示。

### 4.1 权重因子对网络性能的影响分析

算法目标函数中的权重因子  $\alpha$  分别取 160, 180, 200, 220, 240 时, 仿真结果如图 2 所示。通过分析不同  $\alpha$  值对网络性能的影响, 进而确定  $\alpha$  的值。

表 1 仿真参数表

参数	取值
最大发射功率 $p_{\max}$ (W)	0.1
路径增益 $g$	$1/(1+d)^4$
信噪比阈值 $\gamma_i^*$ (dB)	2
发射/接收电路损耗 $E_d$ (J/bit)	$50 \times 10^{-4}$
最小接收功率 $p_r$ (W)	$1 \times 10^{-8}$
干扰噪声强度 $n_0$ (W)	$10^{-7}$
最大节点能量 $E_0$ (J)	50
放大电路损耗 $\epsilon_a$ (J/(bit · m <sup>2</sup> ))	$100 \times 10^{-7}$
数据包长 $l$ (bit)	4
载波波长 $\lambda$ (cm)	12.5

图 2(a)与图 2(b)分别表示链路条数为 12~20 时不同拓扑情况下的网络平均功率和平均干扰。图 2(c)为网络链路数为 20, 信道数为 5 时不同试验次数的平均功率方差。从图 2(a)可知,  $\alpha = 160$  时网络的平均功率最大,  $\alpha = 200$  和  $\alpha = 240$  时平均功率相对较小。图 2(b)中,  $\alpha = 160$  时平均干扰最大,  $\alpha = 180$  和  $\alpha = 200$  平均干扰较小。从图 2(c)中可以看出,  $\alpha = 180$  时平均功率方差最大,  $\alpha = 160$  与  $\alpha = 200$  时平均功率方差较小。当网络的平均功率较小, 而方差较大时, 表明网络中存在较多功率较大的链路, 发射功率较大的链路会因较大的能耗过早失效, 导致网络分区。综合以上分析, 确定  $\alpha$  的取值为 200。

### 4.2 性能分析

本节选取 NETMA 算法、GBCA 与 SPCA 的结合算法(GBSPCA)作为 PCOA 算法的对比算法。通过仿真对 3 种算法的不同性能进行比较, 验证 PCOA 算法的有效性。

**4.2.1 信道分配结果比较** 设定网络中的固定链路为 20 条, 信道数为 5, 3 种算法的初始条件均相同。信道分配结果如图 3 所示。图中链路旁边的数字代表链路数, 根据图例可以看出每条链路所选择的信道。从图 3 可知, 3 种算法没有相邻链路使用相同信道的情况, 并且 3 种算法在 5 个信道中分配的链路数比较均匀。

**4.2.2 功率控制结果比较** 图 4 为 3 种算法在信道数为 5, 网络链路数为 12~20 的平均发射功率。从

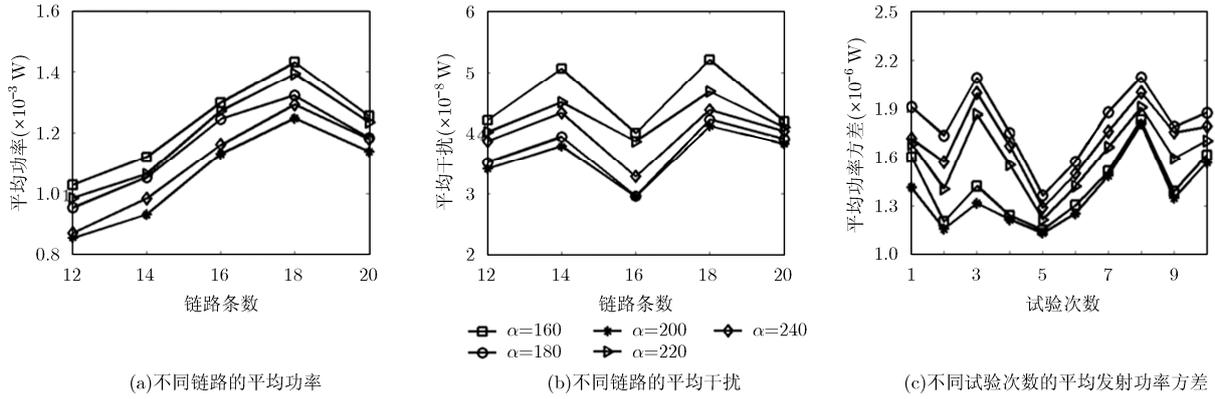


图2 权重因子  $\alpha$  的选取对网络性能的影响

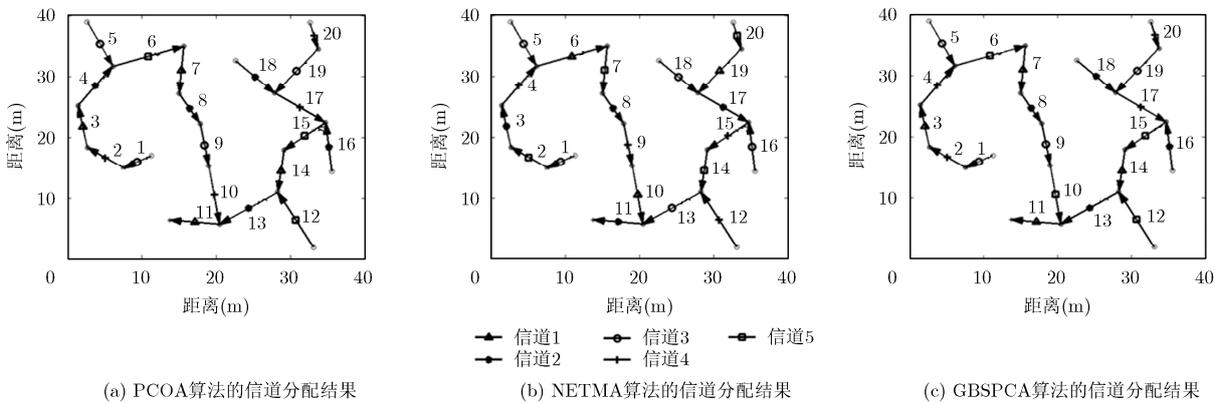


图3 3种算法的信道分配结果

图4中可以看出, GBSPCA算法的平均功率最大, PCOA算法的平均功率最小。图5为3种算法在网络链路数为20, 信道数为5~9的平均功率。从图5中可以看出, PCOA算法的平均功率远远小于NETMA算法与GBSPCA算法的平均功率。在无线传感器网络中, 链路之间进行数据传输是产生网络能耗的主要原因, 即链路平均发射功率越小, 能耗越小。因此, PCOA算法在进行数据传输时的能耗最小。

**4.2.3 抗干扰性比较** 图6为3种算法在信道数为5, 网络链路数为12~20的平均干扰。图7为3种算法在网络链路数为20, 信道数为5~9的平均干扰。随着信道数的增加, 3种算法的平均干扰呈下降趋势, 这是由于链路的可选信道增多, 其会选择干扰更小的信道。从图6和图7可知, PCOA算法的网络平均干扰均最小。网络中链路如果受到较大的干扰, 会影响数据之间的传输, 造成数据重传, 导致能耗增加, 加快链路失效的速度。因此, PCOA算法有效减少了网络能量的浪费。

**4.2.4 收敛性比较** 算法的收敛速度越快, 代表算法的复杂性越低, 同时能耗越小。3种算法的收敛性如图8和图9所示。图8表示网络链路数为20时,

收敛链路数随算法运行轮数的变化情况。从图8可知, PCOA算法的20条链路最先收敛到稳定状态。图9表示3种算法在链路数为20时, 收敛轮数在不同信道数下的比较。在图9中, 3种算法的收敛轮数随着信道数的增加呈下降趋势。这是因为更多的可选信道可以使链路尽快找到使自身效益值最大的信道。从图9中也不难看出, PCOA算法的博弈收敛轮数始终低于NETMA算法和GBSPCA算法。因此, 表明PCOA算法的收敛速度快, 能够快速达到稳定状态, 能耗较小。

**4.2.5 能耗比较** 图10表示网络链路条数为20, 信道数为5时, 3种算法分别运行50轮后每条链路的能耗。由图10可以看出, PCOA算法的链路能耗最低。这是由于PCOA算法在设计收益函数时考虑了链路进行数据传输的能耗, 并且采用最佳回应策略, 体现出了该算法能量的高效性, 进而可有效延长网络的生命期。

**4.2.6 容量比较** 图11为链路数为12~20时3种算法的平均网络容量。从图11可知, PCOA算法的平均网络容量均高于NETMA算法和GBSPCA算法。图12为链路数为12~20时3种算法的网络容量方

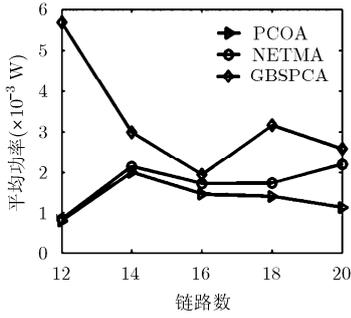


图 4 链路数不同的平均功率

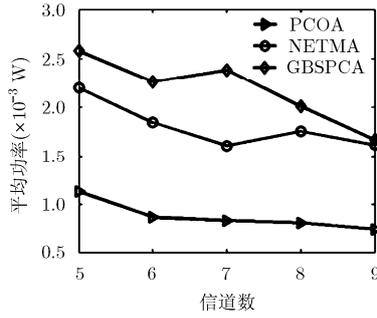


图 5 信道数不同的平均功率

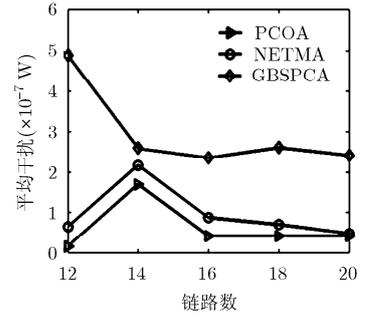


图 6 链路数不同的平均干扰

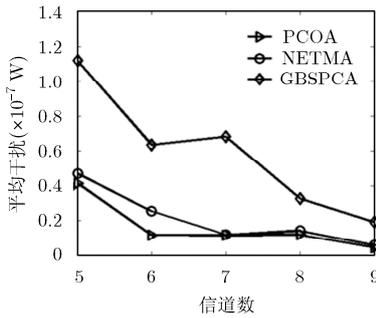


图 7 信道数不同的平均干扰

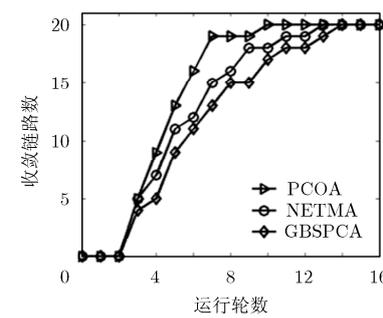


图 8 20 条链路的收敛过程

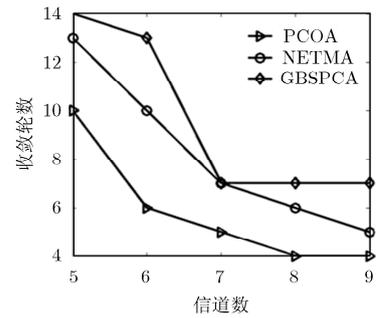


图 9 信道数不同收敛轮数

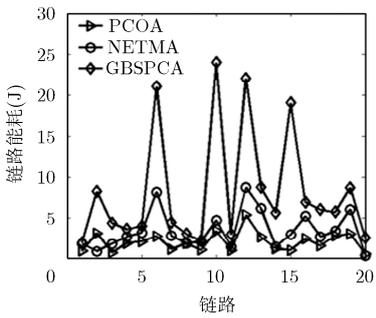


图 10 3 种算法的链路能耗

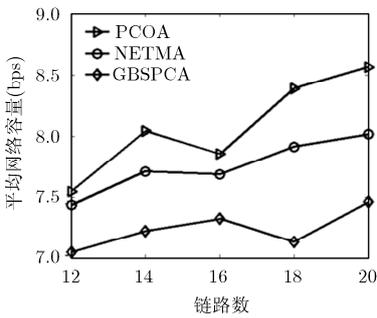


图 11 不同链路数平均网络容量

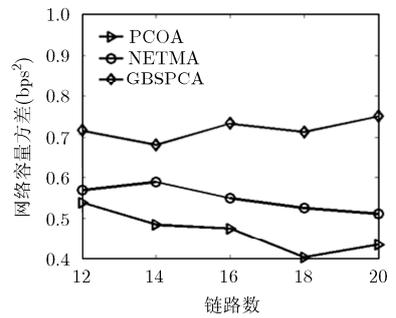


图 12 不同链路数网络容量方差

差，其中 PCOA 算法的容量方差最小。图 11 和图 12 说明 PCOA 算法有较高网络容量的同时，各条链路的容量也比较均匀，有效保证了网络的通信质量，使链路进行更准确的数据传输。

### 5 结论

本文通过分析功率和信道对网络容量和链路传输能耗的影响，引入了容量模型和能耗模型。综合这两个模型构建了高容量低传输能耗的功率控制与信道分配联合博弈模型。随后，通过理论分析证明该模型存在最优功率和最优信道。进而基于该模型设计了一种功率控制与信道分配联合优化算法 PCOA，该算法采用最佳响应策略，使得网络中的所有链路能快速收敛到稳定状态。理论分析证明该算法最终能够收敛到纳什均衡。最后，将 PCOA 算法与 NETMA 算法和 GBSPCA 算法进行性能比较。

仿真结果表明，PCOA 算法能够有效降低网络功率和干扰，提高收敛速度，增大网络容量，达到延长网络生命期的目的。

### 参考文献

[1] 钱志鸿, 王义君. 面向物联网的无线传感器网络综述[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(1): 215-227. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.00876.  
 QIAN Zhihong and WANG Yijun. Internet of things-oriented wireless sensor networks review[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(1): 215-227. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.00876.  
 [2] ELETREBY R and YAGAN O. Secure and reliable connectivity in heterogeneous wireless sensor networks[C]. IEEE International Symposium on Information Theory, Aachen, Germany, 2017: 2880-2884. doi: 10.1109/ISIT.

- 2017.S007056.
- [3] CHOUIKHI S, KORBI I E, GHAMRI-DOUDANE Y, *et al.* Routing-based multi-channel allocation with fault recovery for wireless sensor networks[C]. IEEE International Conference on Communications, London, UK, 2015: 6424-6430. doi: 10.1109/ICC.2015.7249348.
- [4] SRBINOVSKA M, GAVROVSKI C, DIMCEV V, *et al.* Environmental parameters monitoring in precision agriculture using wireless sensor networks[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 88(1): 297-307. doi: 10.1016/j.jclepro.2014.04.036.
- [5] 刘浩然, 孙雅静, 刘彬, 等. 能耗均衡的无线传感器网络无标度容错拓扑模型[J]. *计算机学报*, 2017, 40(8): 1843-1855. doi: 10.11897/SP.J.1016.2017.01843.
- LIU Haoran, SUN Yajing, LIU Bin, *et al.* Energy consumption balanced scale-free fault-tolerant topology model for wireless sensor networks[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2017, 40(8): 1843-1855. doi: 10.11897/SP.J.1016.2017.01843.
- [6] WEI Kaibin. Energy saving based target coverage algorithm in wireless sensor network[C]. International Conference on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City, Changsha, China, 2016: 324-327. doi: 10.1109/ICITBS.2016.84.
- [7] JAN M, NANDA P, HE X, *et al.* Enhancing lifetime and quality of data in cluster-based hierarchical routing protocol for wireless sensor network[C]. IEEE International Conference, Zhangjiajie, China, 2013: 1400-1407. doi: 10.1109/HPCC.and.EUC.2013.198.
- [8] MEERA G S, GUPTA V, SEKHAR S P, *et al.* An efficient mobile sink routing in wireless sensor network using dynamic steiner tree[C]. IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems, Bangalore, India, 2016: 1-6. doi: 10.1109/ANTS.2016.7947869.
- [9] ELBATT T and EPHREMIDES A. Joint scheduling and power control for wireless Ad hoc networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2004, 3(1): 74-85. doi: 10.1109/TWC.2003.819032.
- [10] SBOUI L, REZKI Z, and ALOUINI M S. On energy efficient power allocation for power-constrained systems[C]. IEEE Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communication, Saudi Arabia, 2014: 1954-1958. doi: 10.1109/PIMRC.2014.7136491.
- [11] ZHANG Deyu, CHEN Zhigang, ZHOU Haibo, *et al.* Energy-balanced cooperative transmission based on relay selection and power control in energy harvesting wireless sensor network[J]. *Computer Networks*, 2016, 104(20): 189-197. doi: 10.1016/j.comnet.2016.05.013.
- [12] CHEN Jiming, YU Qing, CHENG Peng, *et al.* Game theoretical approach for channel allocation in wireless sensor and actuator networks[J]. *Automatic Control*, 2011, 56(10): 2332-2344. doi: 10.1109/TAC.2011.2164014.
- [13] ZHENG Jianchao, ZHANG Honggang, Cai Yueming, *et al.* Game-theoretic multi-channel multi-access in energy harvesting wireless sensor networks[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(11): 4587-4594. doi: 10.1109/JSEN.2016.2539346.
- [14] JIANG Dingde, WANG Yuaning, HAN Yang, *et al.* Maximum connectivity-based channel allocation algorithm in cognitive wireless networks for medical applications[J]. *Neurocomputing*, 2017, 220(12): 41-51. doi: 10.1016/j.neucom.2016.05.102.
- [15] SONG Yang, ZHANG Chi, and FANG Yuguang. Joint channel and power allocation in wireless mesh networks: A game theoretical perspective[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2008, 26(7): 1149-1159. doi: 10.1109/JSAC.2008.080912.
- [16] BARCELÓ M, CORREA A, VICARIO J, *et al.* Joint routing, channel allocation and power control for real-life wireless sensor networks[J]. *Emerging Telecommunications Technologies*, 2015, 26(5): 945-956. doi: 10.1002/ett.2783.
- [17] MALEKI E and MIRJALILY G. Fault-tolerant interference-aware topology control in multi-radio multi-channel wireless mesh networks[J]. *Computer Networks*, 2016, 110(9): 206-222. doi: 10.1016/j.comnet.2016.08.026.
- [18] 郑耿忠. 无线传感器网络拓扑控制与优化研究[D]. [博士学位论文], 西安电子科技大学, 2012: 23-37.
- ZHENG Gengzhong. Research on topology control and optimization in wireless sensor networks[D]. [Ph.D. dissertation], Xidian University, 2012: 23-37.
- [19] 尹荣荣, 刘彬, 李雅倩, 等. 能量异构无线传感器网络容错拓扑研究[J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(9): 2180-2186. doi: 10.3724/SP.J.1146.2011.01421.
- YIN Rongrong, LIU Bin, LI Yaqian, *et al.* Research on the fault-tolerant topology in energy heterogeneous wireless sensor networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(9): 2180-2186. doi: 10.3724/SP.J.1146.2011.01421.
- [20] HAO Xiaochen, WANG Meiqi, HOU Shuang, *et al.* Distributed topology control and channel allocation algorithm for energy efficiency in wireless sensor network: From a game perspective[J]. *Wireless Personal Communications*, 2015, 80(4): 1557-1577. doi: 10.1007/s11277-014-2100-9.
- [21] 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): 028401. doi: 10.7498/aps.65.028401.
- LI Xiaolong, FENG Donglei, and PENG Pengcheng. A potential game based topology control algorithm for wireless sensor networks[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(2): 028401. doi: 10.7498/aps.65.028401.
- 郝晓辰: 男, 1980年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为无线传感器网络拓扑控制与信道分配联合优化.
- 刘金硕: 女, 1992年生, 硕士生, 研究方向为无线传感器网络拓扑控制与信道分配联合优化.
- 姚宁: 女, 1989年生, 博士生, 研究方向为无线传感器网络信道分配.
- 解力霞: 女, 1988年生, 硕士生, 研究方向为无线传感器网络拓扑控制与信道分配联合优化.
- 王立元: 女, 1993年生, 硕士生, 研究方向为无线传感器网络跨层拓扑控制.