

## 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

郝晓辰\* 巩倩倩 侯爽 刘彬 孙超

(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中干扰日益增大引起网络容量下降、能耗增加的问题, 该文建立了信道分配与功率控制联合优化博弈模型。在该模型中链路将既能保持自身成功传输又不影响其它链路传输的信道作为可选信道, 以实现链路的并行传输。继而基于该模型设计了一种支持并行传输的信道分配与功率控制联合优化博弈算法(JCPGC)。该算法利用最佳响应策略对模型求解, 并通过超模博弈等理论证明了 JCPGC 能够收敛到纳什均衡。此外, 该算法充分考虑信道分配和功率控制之间独立又相互影响的关系提高了网络容量。仿真实验结果表明, JCPGC 具有大容量、低干扰和低能耗的特性。

**关键词:** 无线传感器网络; 信道分配; 功率控制; 纳什均衡; 并行传输

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)07-1720-08

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.01058

## Joint Channel and Power Optimal Game-theoretic Algorithm for Concurrent Transmission in Wireless Sensor Network

Hao Xiao-chen Gong Qian-qian Hou Shuang Liu Bin Sun Chao

(Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** To deal with the issue that the interference increasing will make network capacity decrease and energy consumption increase in Wireless Sensor Network (WSN), the joint channel allocation and power control optimal game-theoretic model is established. To realize the links concurrent transmission, in the model the channel in which any link can keep itself successfully transmitting and does not influence the other links transmitting is regarded as the optional channel. Then based on the model a Joint Channel allocation and Power control optimal Game-theoretic algorithm for Concurrent transmission (JCPGC) is designed, in which the best respond is used to calculate the solution of the model, and the supermodular game theory is used to prove that JCPGC can get Nash Equilibrium (NE). Furthermore, the algorithm considers the independent and mutual influence relations between the channel allocation and the power control, hence it improves the network capacity. Simulation results show that JCPGC has higher network capacity, lower interference and energy consumption.

**Key words:** Wireless Sensor Network (WSN); Channel assignment; Power control; Nash Equilibrium (NE); Concurrent transmission

### 1 引言

无线传感器网络 (WSN) 具有低成本、自组织、可扩展性强等特点, 在环境监测、军事及工业等领域得到了广泛应用<sup>[1,2]</sup>。然而, 随着无线传感器网络的快速发展, 其应用环境复杂化使节点通信干扰<sup>[3]</sup>问题日益严峻, 不仅造成网络容量<sup>[4]</sup>下降, 而且传感节点数据重传次数增加会浪费更多的能量。因此, 对于能量有限的无线传感器网络, 如何降低干扰来

提高网络容量、降低能耗已成为其亟待解决的问题。

功率控制<sup>[5]</sup>通过增加单一信道中并行传输的源、目的节点数, 提高了网络容量。文献[6]为了实现链路的并行传输, 提出一种随机接入与功率控制算法, 该算法提高了网络容量, 但是算法中链路接入概率小, 造成数据传输时延。文献[7]以最大化并行传输链路数为目标, 提出链路调度算法, 该算法虽然提高了网络容量, 但没有限制最大传输功率值, 并不适用能量受限的无线传感器网络。随着多跳无线网络的发展, 通信节点间日益增大的干扰恶化了时延、能耗等问题。为了降低干扰, 引入了多信道技术<sup>[8]</sup>, 文献[9]综合考虑网络的拓扑和路由信息来分配信道, 降低了网络干扰; 文献[10]采用协同博弈

2013-07-19 收到, 2014-02-04 改回

教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20111333120007), 河北省自然科学基金(F2011203100)和中国博士后科学基金(2012M520596)资助课题

\*通信作者: 郝晓辰 haoxiaochen@ysu.edu.cn

用于 Mesh 的路由与信道分配联合优化，降低了网络干扰；虽然两种算法可以有效地降低网络干扰，但均忽略了能耗问题。

功率控制可以降低能耗，但单一信道中网络干扰较大；信道分配可以降低干扰，但存在不必要的能耗。显然，两种技术在功能上互补，同时两种技术共同影响网络容量，所以应考虑信道分配与功率控制联合优化算法。文献[11]为了降低能耗，提高频谱利用率，提出一种联合优化算法，但两种技术是分开应用的，只是进行简单叠加；Song 等人<sup>[12]</sup>提出的联合优化算法一次性分配完信道，然后在固定信道中只进行功率调整。上述联合优化算法无法从全局上降低能耗，提高网络容量，这是因为信道分配和功率控制之间存在的复杂交互关系：发射功率不同可能导致选择不同的信道；在不同的信道上导致最优发射功率也不同。

基于上述分析，本文充分考虑信道分配与功率控制的交互关系以及无线传感器网络中节点电池能量的有限性，以降低干扰和能耗，提高网络容量为目标，建立了信道分配与功率控制的联合优化博弈模型，在该模型的基础上设计了一种支持并行传输的信道分配与功率控制联合优化博弈算法 JCPGC。

## 2 系统模型

### 2.1 博弈论基础

纳什均衡(Nash Equilibrium, NE)是博弈的一种均衡状态，均衡状态对于所有博弈参与者来说都是最优的。下面给出其定义：

**定义 1 纳什均衡<sup>[13]</sup>** 一个策略组合  $s^* = \{s_1^*, s_2^*, \dots, s_n^*\}$  是标准式博弈  $G = \{N, S, u\}$  的一个纳什均衡(NE)，如果对于任意参与者  $\forall i \in N$  和任意策略  $s_i \in S_i$ ，满足不等式：

$$u_i(s_i^*, s_{-i}^*) \geq u_i(s_i, s_{-i}^*) \quad (1)$$

其中， $N$  代表参与者集合， $S$  代表策略空间， $u$  代表收益函数。如果参与者  $i$  有  $k$  个可选策略，其策略集合记为  $S_i = \{s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{ik}\}$ ，所有参与者的所有可选策略组成博弈的策略空间，记为  $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ 。

超模博弈至少存在一个 NE。当所有参与者的策略空间都是实区间时，有如下超模博弈判定定理：

**定理 1<sup>[14]</sup>** 如果一个博弈中所有参与者的策略空间是实区间而且其效益函数都是连续二次可导的，则该博弈在满足如下条件的情况下即为超模博弈。

$$\frac{\partial^2 u_i(s)}{\partial s_i \partial s_j} \geq 0, \forall j \neq i \in N \quad (2)$$

**定理 2<sup>[15]</sup>** 任何一个所有参与者的策略空间有

限的超模博弈在采用最佳或者较佳响应策略时必将收敛到一个纯纳什均衡点。

### 2.2 可选信道集合的定义

为了支持链路并行传输来提高网络容量，任意一条链路  $i$  选择信道  $c_i$  时功率都满足一定的要求：(1) 不小于链路  $i$  在信道  $c_i$  中成功传输时所需的最小功率  $p_{i\min}^{c_i}$ 。(2) 不大于信道  $c_i$  中除链路  $i$  以外的其它链路成功传输时所能忍受的最大功率  $p_{i\max}^{c_i}$ 。因此，下面给出链路  $i$  的可选信道集合定义：

**定义 2 可选信道集合** 所有满足  $p_{i\min}^{c_i} \leq p_{i\max}^{c_i}$  的信道组成的集合就称为链路  $i$  的可选信道集合  $\psi_i$ 。

(1) 链路  $i$  在信道  $c_i$  中的最小功率  $p_{i\min}^{c_i}$  计算方法：链路  $i$  在信道  $c_i$  中正常传输时，其接收节点信干噪比(Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR)可表示为

$$\gamma_i = \frac{p_i^{c_i} g_{ii} G}{\sum_{k \in I, k \neq i} p_k^{c_k} g_{ki} \chi(i, k) + N_i} \quad (3)$$

$$\chi(i, k) = \begin{cases} 1, & c_i = c_k \\ 0, & c_i \neq c_k \end{cases} \quad (4)$$

式(3)中  $p_i^{c_i}$  为链路  $i$  发射节点在信道  $c_i$  中的发射功率； $g_{ii}$  为链路  $i$  的自身增益； $G$  为扩频增益； $I$  为所有链路的集合， $\sum_{k \in I, k \neq i} p_k^{c_k} g_{ki} \chi(i, k)$  为链路  $k$  传输对链路  $i$  的总干扰； $N_i$  为链路  $i$  在信道  $c_i$  中受到的环境噪声干扰。式(4)表示若信道  $c_k$  和  $c_i$  为同一信道， $\chi(i, k)$  取值为 1；否则为 0。

信干噪比门限  $\gamma_{th}$  是保证链路成功传输的 SINR 最低要求。为保证链路  $i$  在信道  $c_i$  中成功传输，它的接收节点 SINR 应满足  $\gamma_{th}$  的要求表示为

$$\gamma_i = \frac{p_i^{c_i} g_{ii} G}{\sum_{k \in I, k \neq i} p_k^{c_k} g_{ki} \chi(i, k) + N_i} \geq \gamma_{th} \quad (5)$$

解得

$$p_{i\min}^{c_i} = \frac{\gamma_{th} \left( \sum_{k \in I, k \neq i} p_k^{c_k} g_{ki} \chi(i, k) + N_i \right)}{g_{ii} G} \quad (6)$$

(2) 链路  $i$  在信道  $c_i$  中的最大功率  $p_{i\max}^{c_i}$  计算方法：链路  $i$  在信道  $c_i$  中，保证不影响信道中除链路  $i$  以外的其余任意链路  $m(m \neq i)$  的传输，链路  $m$  接收 SINR 也应不小于  $\gamma_{th}$ ，可以表示为

$$\gamma_m = \frac{p_m^{c_m} g_{mm} G}{\sum_{k \in I, k \neq i, k \neq m} p_k^{c_k} g_{km} \chi(i, k) + p_i^{c_i} g_{im} + N_i} \geq \gamma_{th} \quad (7)$$

式中， $p_m^{c_m}$  为链路  $m$  发射节点在信道  $c_i$  中的发射功率； $g_{mm}$  为链路  $m$  的自身增益； $\sum_{k \in I, k \neq i, k \neq m} p_k^{c_k} g_{km} \chi(i, k)$

为链路  $m$  受到除链路  $i$  以外其它链路  $k$  的总干扰;  
 $p_i^{c_i} g_{im}$  为链路  $i$  对链路  $m$  的干扰。解得  $p_i^{c_i}$  最大值  
 $p_{i \max}^{c_{im}}$  为

$$p_{i \max}^{c_{im}} = \left( \frac{p_m^{c_i} g_{mm} G}{\gamma_{th}} - \sum_{k \in I, k \neq i, k \neq m} p_k^{c_k} g_{km} \chi(i, k) - N_i \right) / g_{im} \quad (8)$$

考虑节点最大发射功率  $p_{\max}$  的限制, 链路  $i$  的最大发射功率表示为

$$p_{i \max}^{c_i} = \arg \min \{ p_{i \max}^{c_{im}}, p_{\max} \} \quad (9)$$

### 2.3 信道分配与功率控制的联合优化博弈模型

信道分配与功率控制的联合优化博弈模型表示为  $G = \{I, p^\psi, u\}$ , 具体描述如下:

(1)参与者集合  $I$ : 参与者为网络中的所有链路, 参与者集合  $I = \{1, 2, \dots, n\}$ , 其中  $n$  代表链路条数。

(2)策略空间  $p^\psi$ : 所有参与者的策略空间表示为  $p^\psi = (p_1^\psi, p_2^\psi, \dots, p_n^\psi)$ 。假设网络中有  $C$  个正交信道, 信道集合为  $c = \{1, 2, \dots, C\}$ 。如果链路  $i (i \in I)$  的可选信道有  $H (H \leq C)$  个, 那么链路  $i$  可选信道集合可表示为  $\psi_i = \{c'_{i1}, c'_{i2}, \dots, c'_{iH}\}, \psi_i \subset c$ 。链路  $i$  在可选信道集合  $\psi_i$  中的功率集合为  $p_i^{\psi_i} = \{p_i^{c'_{i1}}, p_i^{c'_{i2}}, \dots, p_i^{c'_{iH}}, \dots, p_i^{c'_{iH}}\}$ , 其中  $p_i^{c'_{ih}}$  的取值区间为  $[p_{i \min}^{c'_{ih}}, p_{i \max}^{c'_{ih}}]$ 。 $p_{-i}^{c'_{ih}}$  代表在可选信道  $c'_{ih}$  中除了链路  $i$  以外其它所有链路的功率矢量。

(3)效用函数  $u$ : 针对单一信道中网络干扰较大的问题, 且信道分配与功率控制存在相互影响的关系, 所以我们应考虑信道与功率联合优化模型。此外, 网络干扰大, 网络容量低, 同时造成能量浪费, 即网络容量与干扰、网络容量与能耗之间存在矛盾关系, 博弈论能很好地处理这种矛盾问题而得到最优解, 均衡各方利益, 提高整体的网络性能。因此, 建立的信道与功率联合优化博弈模型要兼顾网络容量、干扰、能耗等方面来优化网络性能。设计效益函数为

$$u_i = [B \log_2(1 + \gamma_i) - a \cdot \gamma_i] - I_i^{c'_{ih}}(\mathbf{p}_{-i}^{c'_{ih}}) \quad (10)$$

式中,  $B$  为带宽;  $a$  为权重因子;  $B \log_2(1 + \gamma_i)$  为香农容量;  $I_i^{c'_{ih}}(\mathbf{p}_{-i}^{c'_{ih}})$  为链路  $i$  在信道  $c'_{ih}$  中受到的干扰。加权的信干噪比为了限制网络容量过高而对应的功率过大, 造成网络能量浪费,  $I_i^{c'_{ih}}(\mathbf{p}_{-i}^{c'_{ih}})$  为了防止功率过大而网络干扰较大。 $I_i^{c'_{ih}}(\mathbf{p}_{-i}^{c'_{ih}})$  的具体表达式为

$$I_i^{c'_{ih}}(\mathbf{p}_{-i}^{c'_{ih}}) = \sum_{k \in I, k \neq i} p_k^{c'_{kh}} g_{ki} \chi(i, k) + N_i \quad (11)$$

将式(11)代入式(10)中效益函数表示为

$$u_i = \left[ B \log_2 \left( 1 + \frac{p_i^{c'_{ih}} g_{ii} G}{\sum_{k \in I, k \neq i} p_k^{c'_{kh}} g_{ki} \chi(i, k) + N_i} \right) - a \frac{p_i^{c'_{ih}} g_{ii} G}{\sum_{k \in I, k \neq i} p_k^{c'_{kh}} g_{ki} \chi(i, k) + N_i} \right] - \left( \sum_{k \in I, k \neq i} p_k^{c'_{kh}} g_{ki} \chi(i, k) + N_i \right) \quad (12)$$

### 3 信道分配与功率控制的联合优化博弈算法(JCPGC)

信道分配与功率控制的联合优化博弈算法 JCPGC 具体步骤如下:

步骤 1 为所有链路初始化信道和功率: 任意一条链路  $i$  随机初始化一个信道  $c_i \in c$ , 一个功率  $p_i \leq p_{\max}$ 。

步骤 2 令  $i = 1$ 。

步骤 3 链路  $i$  在每个信道中判断  $p_i^{c_i} \leq p_{i \max}^{c_i}$  是否成立, 从而得知可选信道集合  $\psi_i$  是否为空, 如果为空则返回步骤 1, 否则进入步骤 4。

步骤 4 链路  $i$  根据式(11)计算在各个可选信道中受到的干扰, 然后根据  $c_i^* = \arg \min_{c_i \in \psi_i} I_i^{c'_{ih}}(\mathbf{p}_{-i}^{c'_{ih}})$  通过最佳响应策略选择最优信道  $c_i^*$ 。

步骤 5 在链路  $i$  最优信道  $c_i^*$  中, 根据  $p_i^* = \arg \max_{p_i \in p_i^{\psi_i}} u_i(p_i^*, \mathbf{p}_{-i}^*)$  通过最佳响应策略选择最优功率  $p_i^*$ 。

步骤 6 判断当前轮( $t$ 轮)链路  $i$  的效益  $u_{it}(c_i^*) \geq u_{i(t-1)}(c_i^*)$  是否成立, 其中  $t (t \geq 2)$  为轮数, 如果不成立, 链路  $i$  的信道和功率值置为  $t-1$  轮的信道和功率值, 进入步骤 7; 如果成立, 直接进入步骤 7。

步骤 7  $i = i + 1$ , 如果  $i \leq n$  则返回步骤 3, 否则进入步骤 8。

步骤 8 判断当前轮( $t$ 轮)所有链路的效益, 任意链路  $i$  是否满足  $u_{it}(c_i^*) = u_{i(t-1)}(c_i^*)$  成立, 其中  $t (t \geq 2)$  为轮数, 如果成立, 所有链路趋于稳定, 算法结束; 否则返回步骤 2 进入下一轮循环。

JCPGC 在步骤 3 进行了初始化限制, 如果链路  $i$  可选信道集合为空, 只能跳出第 1 轮循环重新初始化, 当算法第 1 次进行到步骤 8, 第 1 轮博弈完成。第 1 轮博弈中任意链路  $i$  的选择最优功率  $p_i^*$ , 保证了所有链路的 SINR 都不小于  $\gamma_{th}$ , 所以在剩余轮数的博弈过程中可选信道集合不再为空。可见步骤 3

对初始化进行了一定程度的智能控制，并且可选信道集合降低了算法复杂度。

#### 4 理论分析

任意一条链路最大化效益选择的信道和功率，都是在其它链路传输功率和信道都固定的条件下。

**命题 1** 在其它链路的信道和功率固定的条件下，对于任意链路  $i$  来说，当且仅当  $c_i^* = \arg \min_{c_{ih} \in \psi_i} I_i^{c_{ih}}(\mathbf{p}_{-i}^*)$ ，并且  $p_i = p_i^*$  满足  $p_i^* = \arg \max_{p_i^* \in \psi_i} u_i(p_i^*, \mathbf{p}_{-i}^*)$ ，那么  $p_i^* = (p_i^*)^{c_i^*}$  使效益  $u(p_i^*, \mathbf{p}_{-i}^*)$  最大。

**证明** 首先，对式(10)中的效益函数关于  $\gamma_i$  求导等于零，解得最优信干噪比为

$$\gamma_i^* = \frac{B}{a \ln 2} - 1 \quad (13)$$

式中， $B$ ， $a$  都是定值，所以  $\gamma_i^*$  是个定值。

其次，因为最优信道是按  $c_i^* = \arg \min_{c_{ih} \in \psi_i} I_i^{c_{ih}}(\mathbf{p}_{-i}^*)$

选择的，为了确定链路  $i$  在最优信道  $c_i^*$  中的最优传输功率，对式(12)的效益函数表达式关于  $p_i^*$  求导等于零，解得

$$\begin{aligned} p_i^* &= p_i^{c_i^*} = \left( \frac{B}{a \ln 2} - 1 \right) \frac{\sum_{k \in I, k \neq i} p_k^{c_{ih}} g_{ki} \chi(i, k) + N_i}{g_{ii} G} \\ &= \gamma_i^* \frac{I_i^{c_{ih}}(\mathbf{p}_{-i}^*)}{g_{ii} G} \end{aligned} \quad (14)$$

式中， $g_{ii}$ ， $G$ ， $\gamma_i^*$  都是定值，等式最右边是关于  $I_i^{c_{ih}}(\mathbf{p}_{-i}^*)$  的一元函数， $p_i^*$  随  $I_i^{c_{ih}}(\mathbf{p}_{-i}^*)$  单调变化。

在任意两个信道  $c_{im}^*$ ， $c_{in}^*$  中，如果  $I_i^{c_{im}^*}(\mathbf{p}_{-i}^*) < I_i^{c_{in}^*}(\mathbf{p}_{-i}^*)$ ，根据式(14)可能会得到不同功率，然后再将功率代入信干噪比公式(3)对应地得到不同的信干噪比：

情况 1 若  $p_i^{c_{im}^*} < p_i^{c_{in}^*} < p_{\max}$ ，则  $\gamma_i^{c_{im}^*} = \gamma_i^{c_{in}^*} = \gamma_i^*$ 。

情况 2 若  $p_i^{c_{im}^*} < p_i^{c_{in}^*} = p_{\max}$ ，则  $\gamma_i^{c_{im}^*} = \gamma_i^*$ ， $\gamma_i^{c_{in}^*} \leq \gamma_i^*$ 。

情况 3 若  $p_i^{c_{im}^*} = p_i^{c_{in}^*} = p_{\max}$ ，则  $\gamma_i^* \geq \gamma_i^{c_{im}^*} > \gamma_i^{c_{in}^*}$ 。

从效用函数角度出发，3 种情况最终都得到了  $u_i^{c_{im}^*}(p_i^{c_{im}^*}, \mathbf{p}_{-i}^*) > u_i^{c_{in}^*}(p_i^{c_{in}^*}, \mathbf{p}_{-i}^*)$ 。综上所述，为了最大化效益，链路  $i$  将选择干扰最小的信道。

**定理 3** 信道分配与功率控制联合优化博弈算法 JCPGC 能够收敛到 NE。

**证明** 命题 1 证明了先进行信道分配博弈再进行功率控制博弈也能最大化效益。 $(p^*)^c$  是信道分配与功率控制联合优化博弈的 NE，它由信道分配博弈

的 NE( $c^*$ )和功率控制博弈的 NE( $p^*$ )两部分组成。如果信道分配博弈存在  $c^*$ ，并且在稳定信道中进行功率控制存在  $p^*$ ，那么信道分配与功率控制的联合优化博弈就存在  $(p^*)^c$ 。要想证明 JCPGC 算法收敛，只须分别证明信道分配博弈和稳定信道中的功率控制博弈收敛。

(1)信道分配博弈的收敛性：在信道分配与功率控制的联合优化博弈中，信道和功率不断更新，在命题 1 中已证明，JCPGC 算法中每次信道和功率的更新都是增大效益的，又由于信道策略是离散的，功率策略是有限的，并且由步骤 6 可知，效益一直在不断增大，即效益函数是非减的，最终达到最大效益，因此，信道分配博弈能够收敛于 NE，用  $c^*$  来表示。

(2)稳定信道中的功率控制博弈收敛性：要想证明稳定信道中的功率控制博弈收敛，只须证明稳定信道中的功率控制博弈是超模博弈，便至少存在一个 NE。链路  $i$  的策略空间为  $[p_{i \min}^{c_{ih}}, p_{i \max}^{c_{ih}}]$ ，是个连续的实区间，对式(12)中的效益函数关于功率求二阶偏导得

$$\frac{\partial u_i}{\partial p_i^{c_{ih}} \partial p_k^{c_{ih}}} = \frac{g_{ii} G \sum_{k \in I, k \neq i} g_{ki}}{\left( p_i^{c_{ih}} g_{ii} G + \sum_{k \in I, k \neq i} p_k^{c_{ih}} g_{ki} + N_i \right)^2 \ln 2} \cdot [-B + a(1 + \gamma_i)^2 \ln 2] \quad (15)$$

由定理 1 可知，式(15)须满足  $\partial u_i / (\partial p_i^{c_{ih}} \partial p_k^{c_{ih}}) \geq 0$ ，解得

$$\gamma_i \geq \sqrt{\frac{B}{a \ln 2}} - 1 \quad (16)$$

在 JCPGC 中设置信干噪比门限为  $\gamma_{th} = \sqrt{B/(a \ln 2)} - 1$ 。因为可选信道中的链路都满足  $\gamma_{th}$  要求，并且在联合优化博弈过程中每条链路的可选信道集合不为空，所以证得当  $\gamma_{th} = \sqrt{B/(a \ln 2)} - 1$  时，稳定信道中的功率控制博弈满足超模博弈的性质，至少存在一个 NE。JCPGC 进行功率控制时采用了最佳响应策略，由定理 2 可知，稳定信道中的功率控制博弈最终收敛到一个纳什均衡点，用  $p^*$  来表示。

总的来说，信道分配博弈存在  $c^*$ ，并且稳定信道中的功率控制博弈中存在  $p^*$ ，那么 JCPGC 就能得到  $(p^*)^c$ ，从而 JCPGC 能够收敛到 NE。由于步骤 6 中每条链路  $i$  选择使自身效益增大的信道和功率，显然  $u_{it}(c_i^*) \geq u_{i(t-1)}(c_i^*) \Rightarrow \sum_{j \in N, j \neq i} u_{jt}(c_j^*) \geq \sum_{j \in N, j \neq i} u_{j(t-1)}(c_j^*)$ ， $t \geq 2$ ，即链路  $i$  效益增大导致网络中其它链路效益也增大，因此，效益函数不断增大，具有单调性，且信道和功率策略是有限的，JCPGC 一定能够收敛到 NE。

### 5 仿真实验

本节通过 MATLAB 仿真实验对 JCPGC 的性能进行评价。实验在  $40 \times 40 \text{ m}^2$  的矩形监测区域内的固定拓扑结构下进行, 具体的仿真实验参数如表 1 所示。

表 1 实验参数取值表

参数	取值	参数	取值
总信道数 $C$	5	最大发射功率 $p_{\max}$ (W)	0.1
带宽 $B$ (Hz)	$10^4$	扩频增益 $G$	1
路径损耗 $g$	$1/(1+d)^4$	干扰噪声强度 $N_i$ (W)	$10^{-7}$

当表中链路  $i$  的干扰噪声强度  $N_i$  取值为  $10^{-7}$ , 与链路  $i$  受到其它链路  $k$  的干扰  $\sum_{k \in I, k \neq i} p_k^c g_{ki} \chi(i, k)$  数量级相同, 信干噪比的大小由  $N_i$  和  $\sum_{k \in I, k \neq i} p_k^c g_{ki} \chi(i, k)$  共同决定。扩频增益  $G$  取值为 1, 表示信号扩展频谱后的带宽与原信号带宽相等, 且信干噪比并没有降低, 因此, 无需增加带宽改善信干噪比。

#### 5.1 权重因子 $a$ 对网络性能的影响

JCPGC 分别取权重因子  $a$  为 2000, 2200, 2400, 2600, 2800 进行仿真实验。在图 1(a)中, 随着权重因子  $a$  增大, 每个信道中的平均干扰先降低后略增大, 在权重因子  $a = 2400$  干扰最低; 在图 1(b)中,

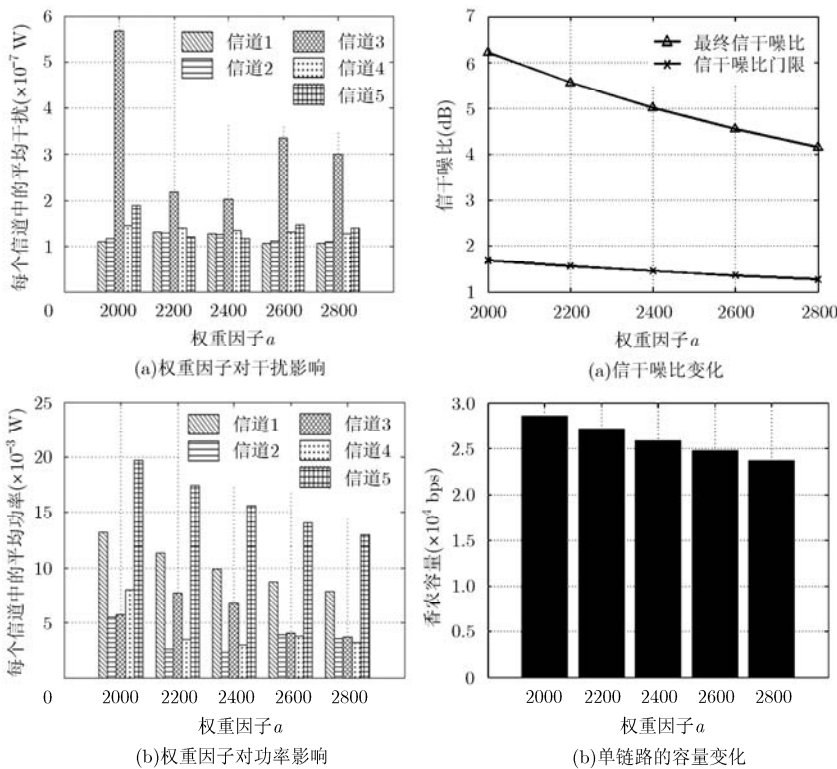


图 1 权重因子对 JCPGC 信道分配和功率控制结果的影响

图 2 权重因子对 JCPGC 信干噪比及容量影响

随着权重因子  $a$  增大, 每个信道的平均功率逐渐降低; 在图 2(a)中, 随着权重因子  $a$  增大, 最优信干噪比  $\gamma^*$  和信干噪比门限  $\gamma_{\text{th}}$  也逐渐降低, 并且  $\gamma^*$  一直高于  $\gamma_{\text{th}}$ ; 在图 2(b)中, 随着权重因子  $a$  增大, 链路容量也逐渐降低。实验表明, 高信干噪比意味着较高的网络容量, 但是太高的信干噪比则会对其它传输任务造成干扰, 同时也会浪费网络能量, 因此, 提供一个适当的信干噪比对于无线传感器网络来说十分必要。考虑链路容量和干扰、能耗之间的矛盾关系, 我们取最优信干噪比  $\gamma^* = 5 \text{ dB}$  对应的权重因子  $a = 2400$  进行仿真实验。

#### 5.2 具体网络性能分析

下面的仿真实验选取 GBCA<sup>[9]</sup>和 FS<sup>[16]</sup>(步长为 0.1 dB)的结合算法(GBCAFS)作为 JCPGC 算法的对比算法, 初始化相同的信道、功率、背景噪声。

(1)信道分配的性能分析 在同一监测区域同一拓扑结构上, 分别运行 JCPGC 和 GBCAFS 算法得到的信道分配结果如图 3 所示(图中的数字代表链路号)。在图 3(a)中, JCPGC 算法信道 1~5 中的链路数依次为 2 条, 3 条, 2 条, 2 条, 3 条; 在图 3(b)中, GBCAFS 算法信道 1~5 中的链路数依次为 3 条, 3 条, 2 条, 2 条, 2 条; 两种算法各个信道之间的链路数差值都小于等于 1, 因此, 信道分配结果比较均匀。

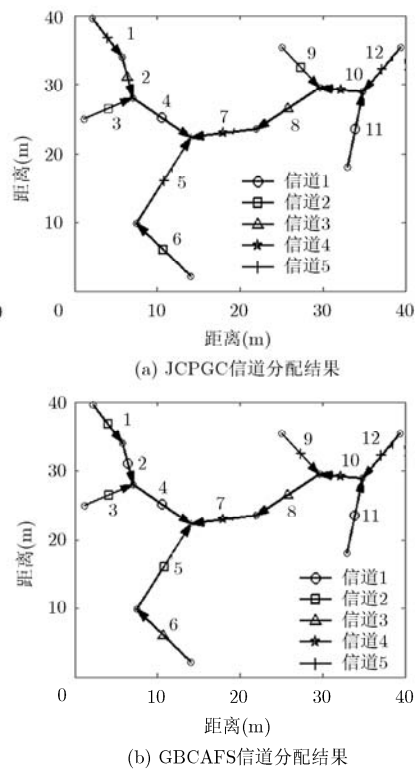


图 3 两种算法的信道分配结果对比

在图 4(a)中, GBCAFS 信道 1 中平均干扰非常大; 在图 4(b)中, GBCAFS 链路 2 干扰非常大, 这是由于链路 4 为其相邻链路且分配在同一信道导致的结果; 在图 4(c)中, 将链路 2 干扰置为 0, 可以更清晰地分析图 4(b)中除链路 2 以外各链路干扰大小, JCPGC 除链路 2 以外的各链路干扰远远低于 GBCAFS 各条链路干扰; 在图 4(d)中, 随着信道数增多, 图 4(d2)中的 JCPGC 所有链路平均干扰逐渐降低, 而图 4(d1)中的 GBCAFS 所有链路平均干扰远远高于 JCPGC 的平均干扰。由此可知, JCPGC 信道分配结果比较均匀, 网络干扰非常小。

(2) 功率控制的性能分析 由图 5(a)可知, GBCAFS 有些链路的功率非常大, 甚至达到最大发射功率, 这样能耗非常大, 很容易导致节点快速死亡, 而 JCPGC 的功率远远小于 GBCAFS 的功率。图 5(b), 5(c)取两种对比算法的第 9, 10, 11, 12 条链路进行功率收敛性分析, JCPGC 比 GBCAFS 算法收敛速度快、收敛到最优功率值小。在图 5(d)中, 随着信道数的增多, JCPGC 所有链路的平均干扰逐渐降低, 并且远远低于 GBCAFS 所有链路的平均功率值。因此, JCPGC 得到的功率小, 能耗低, 收敛速度快并且延长了网络生命期。

(3) 网络容量的性能分析 在图 6(a)中, JCPGC

的信噪比都大于信噪比门限, 且等于最优信噪比, 每个信道中各条链路都可以并行传输, 从而提高网络容量; GBCAFS 算法链路 2 的信噪比远远低于信噪比门限, 不能正常传输, 链路 5 刚刚超过信噪比门限, 这都导致整体网络容量降低。在图 6(b)中, GBCAFS 各链路容量有的略小于, 有的甚至远远小于 JCPGC 链路容量。在图 6(c)中, JCPGC 每个信道中所有链路的容量之和基本上大于 GBCAFS 的每个信道中所有链路容量之和, 即 JCPGC 总的网络容量较高。在图 6(d)中, 随着信道数增多, JCPGC 所有链路一直保持为最优的网络容量, 即网络容量均值保持不变, 而 GBCAFS 无法保证所有链路达到最优网络容量, 并且网络容量均值远远低于 JCPGC 的网络容量均值。由此可知, JCPGC 实现了各个信道中链路的并行传输, 得到较高的网络容量, 从而提高了网络通信效率。

### 6 结论

本文针对无线传感器网络中干扰严重导致网络容量降低、能耗增加的问题, 建立了信道分配与功率控制的联合优化博弈模型, 在该模型中将链路自身成功传输同时不影响其它链路传输的信道集合定

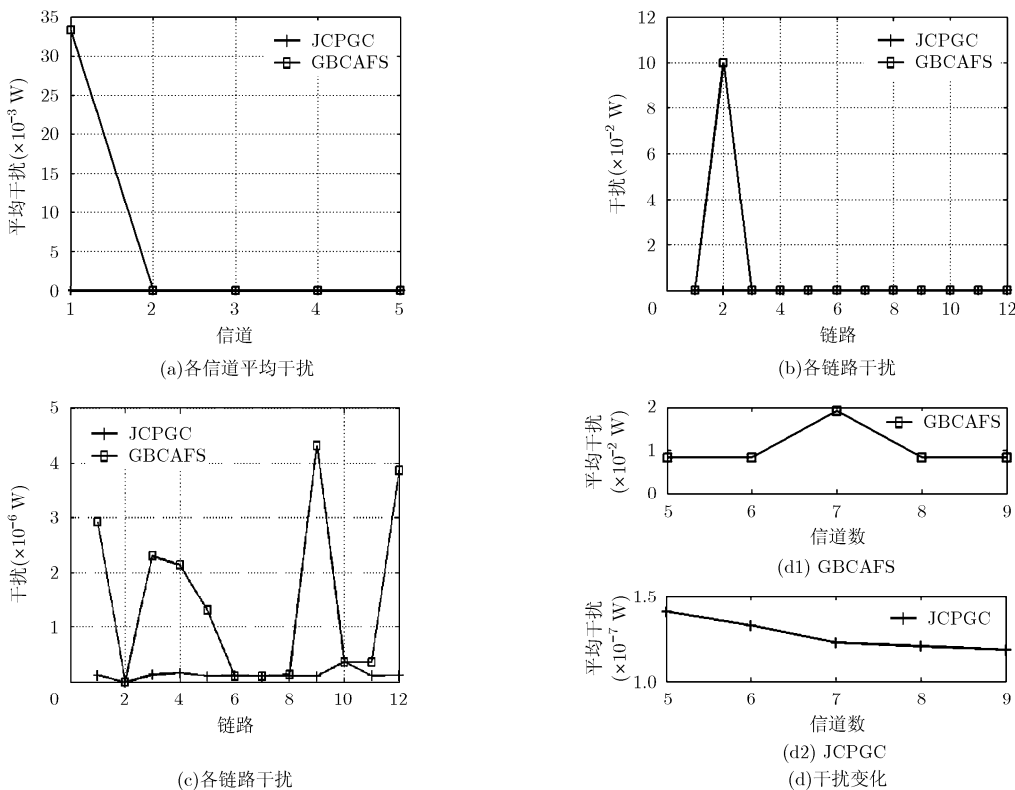


图 4 干扰大小比较

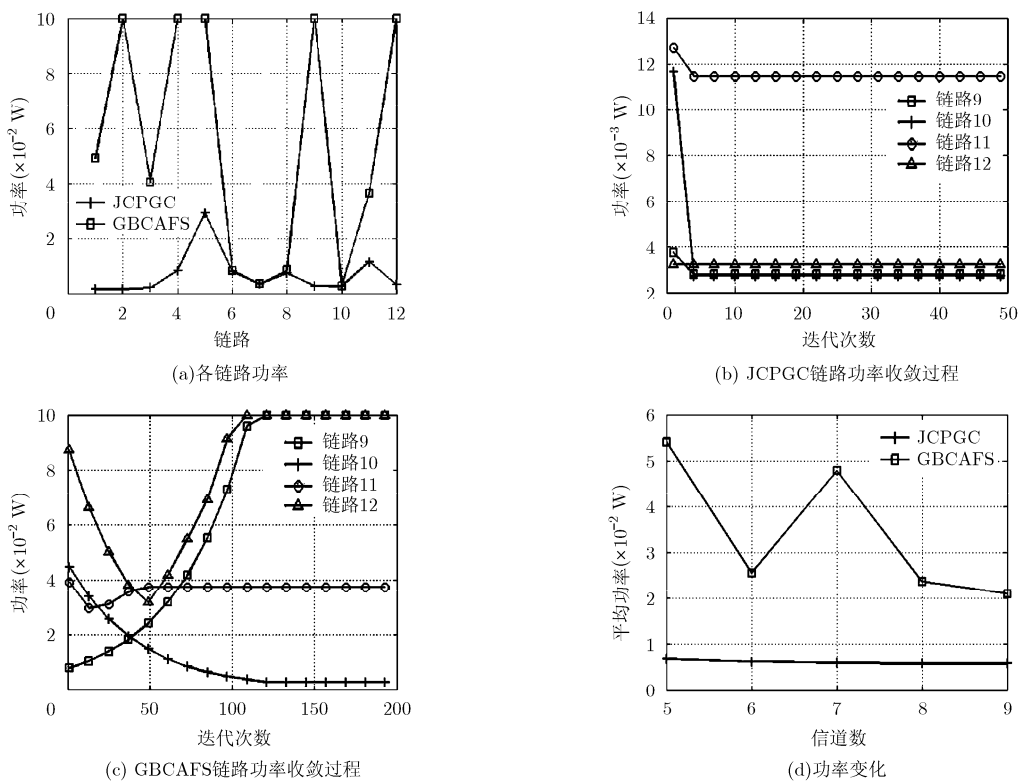


图 5 两种算法的功率控制结果对比

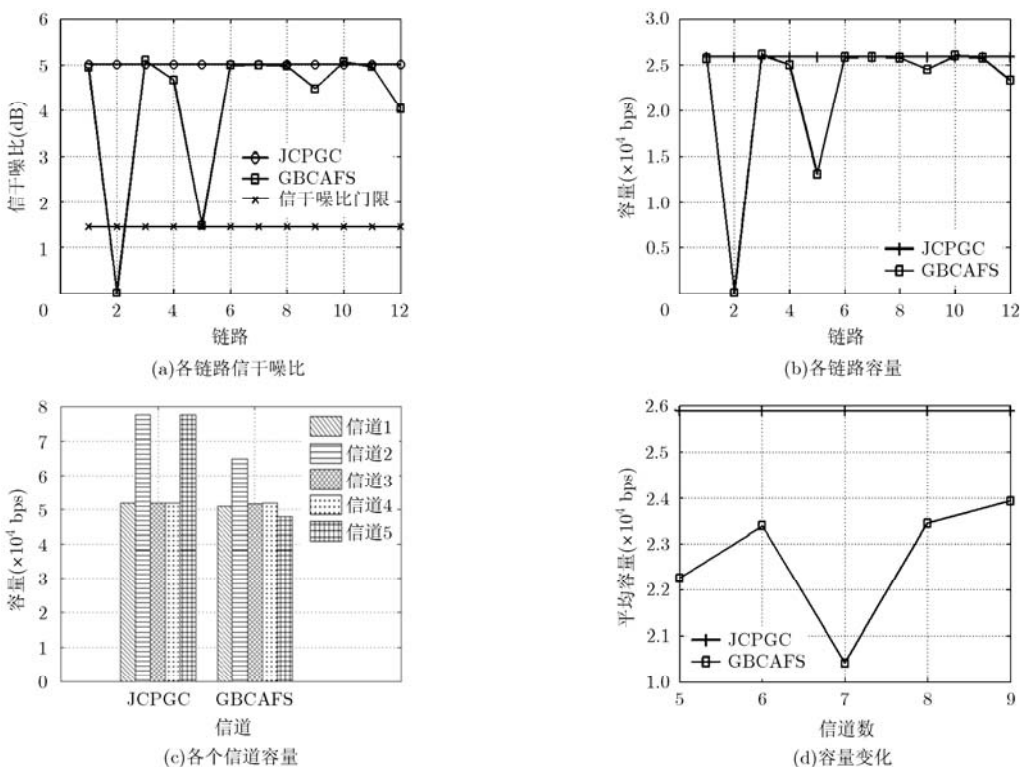


图 6 容量大小比较

义为可选信道集合，实现了链路并行传输。然后，基于该模型设计了一种支持并行传输的信道分配与

功率控制联合优化博弈算法 JCPGC。该算法充分考虑信道分配和功率控制之间的交互关系，并通过最

佳响应策略提高了网络容量, 最后利用超模博弈等理论证明了 JCPGC 算法能够收敛到 NE。实验结果表明, JCPGC 算法网络容量高, 各链路功率小, 信道分配较公平, 平均干扰小。

### 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.  
Qian Zhi-hong and Wang Yi-jun. Internet of things-oriented wireless sensor networks review[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(1): 215-227.
  - [2] Gajjar S, Pradhan S N, and Dasgupta K. Performance analysis of cross layer protocols for wireless sensor networks[C]. Proceedings of the 2012 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics, Chennai, India, 2012: 348-354.
  - [3] Panda B S and Shetty D P. Strong minimum interference topology for wireless sensor networks[C]. Proceedings of the International Conference on Advanced Computing, Networking and Security(ADCONS), Surathkal, India, 2011: 366-374.
  - [4] Liu Wang, Lu Ke-jie, Wang Jian-ping, *et al.* On the throughput capacity of wireless sensor networks with mobile relays[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2012, 61(4): 1801-1809.
  - [5] Singh J and Pesch D. Fuzzy inference based delay and channel aware communication in low-power sensor networks[C]. Proceedings of 8th IEEE International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems(DCOSS), Hangzhou, 2012: 384-391.
  - [6] Long Cheng-nian, Chi Qun, Guan Xin-ping, *et al.* Joint random access and power control game in ad hoc networks with non-cooperative users[J]. *Ad Hoc Networks*, 2011, 9(2): 142-151.
  - [7] Wan Peng-jun, Frieder O, Jia Xiao-hua, *et al.* Wireless link scheduling under physical interference model[C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Communications(INFOCOM), Shanghai, 2011: 838-845.
  - [8] Yu Xu-tao, Shi Xiao-xiang, and Hua Jing-yu. A distributed channel allocation algorithm for multi-channel wireless network[J]. *Information Technology Journal*, 2013, 12(1): 209-213.
  - [9] Yu Qing, Chen Ji-ming, Fan Yan-fei, *et al.* Multi-channel assignment in wireless sensor networks: a game theoretic approach[C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Communications(INFOCOM), San Diego, CA, 2010: 1-9.
  - [10] 龙飞, 汪春霆, 杨治安. 一种基于博弈论的无线网状网络路由与信道分配联合优化算法[J]. 国防科技大学学报, 2012, 34(2): 94-101.  
Long Fei, Wang Chun-ting, and Yang Zhi-an. CRAG: game-based joint channel and routing assignment for wireless mesh networks[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2012, 34(2): 94-101.
  - [11] Thomas R W, Komali R S, MacKenzie A B, *et al.* Joint power and channel minimization in topology control: a cognitive network approach[C]. Proceedings of IEEE International Conference on Communications(ICC), Glasgow, 2007: 6538-6543.
  - [12] Song Yang, Zhang Chi, and Fang Yu-guang. 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.
  - [13] Buzzi S, Colavolpe G, Saturnino D, *et al.* Potential games for energy-efficient power control and subcarrier allocation in uplink multicell OFDMA systems[J]. *IEEE Journal on Selected Topics in Signal Processing*, 2012, 6(2): 89-103.
  - [14] Cheng Hui-li, Yang Qing-hai, Fu Feng-lin, *et al.* Spectrum sharing with smooth supermodular game in cognitive radio networks[C]. Proceedings of 11th International Symposium on Communications and Information Technologies(ISCIT), Hangzhou, 2011: 543-547.
  - [15] Benaïm M and Faure M. Stochastic approximation, cooperative dynamics and supermodular games[J]. *The Annals of Applied Probability*, 2012, 22(5): 2133-2164.
  - [16] Kim D. On the convergence of the fixed-step power control algorithms with binary feedback for mobile communication systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2001, 49(2): 249-252.
- 郝晓辰: 男, 1980年生, 副教授, 硕士生导师, 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。
- 巩倩倩: 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。
- 侯爽: 女, 1989年生, 硕士生, 研究方向为无线传感器网络信道分配联合优化。
- 刘彬: 男, 1953年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为无线传感器网络跨层拓扑控制。
- 孙超: 男, 1983年生, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为无线传感器网络跨层拓扑控制。