

# 基于 MABC 的中继系统资源分配策略\*

王珍妮, 董增寿<sup>†</sup>, 李丽君, 王 豪  
(太原科技大学 电子信息工程学院, 太原 030024)

**摘要:** 针对 MABC 的中继系统, 对资源配置策略的优化问题进行研究, 并将功率分配问题和中继选择问题相结合。基于此, 提出了一种存在干扰情况 MABC 模型的多中继系统资源分配策略 (IS-MABC-OPOR)。考虑双向中继系统干扰信号对其传输性能的影响, 以通信链路信道容量最大化为优化目标, 利用拉格朗日方法, 对通信链路上的各节点进行了最优功率分配和最佳中继选择, 给出了通信链路信道容量最大意义下的资源分配数学表达式。仿真结果表明, 该链路的信道容量受中继节点位置以及链路总功率的制约, 相比于等功率分配方案 (EPA)、随机功率分配方案 (RPA) 和在所提方案的基础上加大干扰信号的信道增益, IS-MABC-OPOR 方案有效提高了系统的信道容量, 从而实现资源能够满足更高速率的业务传输需求。

**关键词:** 网络编码; 双向中继; 功率分配; 中继选择; 信道容量

**中图分类号:** TN92      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-3695(2020)08-054-2496-04  
**doi:**10.19734/j.issn.1001-3695.2019.03.0082

## Resource allocation strategy of relay system based on MABC

Wang Zhenni, Dong Zengshou<sup>†</sup>, Li Lijun, Wang Hao

(School of Electronic Information Engineering, Taiyuan University of Science & Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** Aiming at the relay system of MABC, this paper studied the optimization of resource allocation strategy, and combined the power allocation problem with relay selection problem. Based on this, the paper proposed a multi-relay system resource allocation strategy (IS-MABC-OPOR) with interference MABC model. Considering the influence of interference signals on the transmission performance of two-way relay system, and aiming at maximizing the channel capacity of communication links, optimal power allocation and optimal relay selection for each node on the communication link used the Lagrangian method, and gave the mathematical expression of resource allocation under the maximum channel capacity of the communication link. The simulation results show that the channel capacity of the link is constrained by the relay node location and the total power of the link. Compared with the equal power allocation scheme (EPA), the random power allocation scheme (RPA) and the channel gain of the interference signal on the basis of the proposed scheme, the IS-MABC-OPOR scheme effectively increases the channel capacity, thereby realizing resources to meet higher-speed service transmission requirements.

**Key words:** network coding; two-way relay; power allocation; relay selection; channel capacity

## 0 引言

无线中继作为未来宽带移动通信的重要组成部分, 它可以进一步提升空间利用率, 扩大网络覆盖范围, 增强数据抗干扰性, 从而使通信系统更加稳定并提升整体的吞吐率。利用中继选择策略, 能够有效地降低衰落信道对系统性能的影响<sup>[1]</sup>。中继信道最早于 20 世纪 70 年代受到学术界 Cover 等人<sup>[2]</sup>的关注。中继信道的定义为: 在无线通信系统中, 发送端给接收端传输信息时, 与两端点相邻的中间用户可以监听到发送端的无线信号, 若中间用户将此信息通过某种机制有选择地转发目的端 (接收端), 那么目的端将获得更多目标数据的信息, 从而成功解码目标数据的可能性越大。在这种无线传输结构中, 中间用户称为中继节点, 而由发送端、接收端和中继节点组成的信道环境叫中继信道环境。Shannon 于 20 世纪 60 年代提出了双向中继通信的概念, 但直到 2007 年此技术才开始被学术界所关注。大量研究表明, 网络编码技术可以应用于双向中继系统中, 一方面, 可以缩减两个信源彼此传输数据的时隙, 另一方面, 可以提升系统的频谱效率, 提高系统的网络可靠性和鲁棒

性<sup>[3,4]</sup>。文献[5]对网络编码理论进行了深入的研究与探讨。将网络编码技术应用于双向中继系统中, 各学者先后提出了三时隙的时分广播模型 (TDBC) 和两时隙的多址接入广播模型 (MABC)<sup>[6]</sup>。两时隙的 MABC 模型与三时隙的 TDBC 模型和四时隙传统双向中继系统相比, 在系统信道容量性能方面有显著的提高, 所以本文主要研究的是 MABC 模型。

Alabed<sup>[7]</sup>研究了基于网络编码的双向中继系统以及 DF (译码转发) 中继协议下的中继选择方案。冀保峰等人<sup>[8]</sup>在 Nakagami 信道模式下, 从双向通信的角度出发, 理论分析了在两种场景 (有/无中继选择的网络编码) 系统的中断概率和平均误码率。郭漪和 Jiang 等人<sup>[9,10]</sup>分析了基于网络编码的双向中继系统, 在链路发射总功率一定条件下, 以 D2D 链路的信道容量最大为目标, 进行功率分配, 并以 D2D 链路上的信道容量最大的中继节点作为最佳中继。裴玉芳等人<sup>[11]</sup>在单向多中继系统条件下, 采用简单的近似高的 SNR (信噪比) 公式, 以能效最大化为准则推导出中继选择和功率分配的闭合数学表达式。Kim 等人<sup>[12]</sup>分析了在瑞利衰落信道中采用卷积码技术的 PNC 多址相位的误码率表达式, 并在此基础上, 提出了一种功率分配

**收稿日期:** 2019-03-31; **修回日期:** 2019-05-20      **基金项目:** 太原科技大学博士基金资助项目 (20152023); 山西省青年科技研究基金资助项目 (201601D021065); 国家青年科学基金资助项目 (6170329); 山西省重点学科建设经费资助项目

**作者简介:** 王珍妮 (1994-), 女, 山西大同人, 硕士研究生, 主要研究方向为无线通信网络; 董增寿 (1970-), 男 (通信作者), 山西寿阳人, 硕导, 主要研究方向为智能信息处理 (646241663@qq.com); 李丽君 (1980-), 女, 山西太原人, 副教授, 博士, 主要研究方向为无线通信技术与资源分配; 王豪 (1993-), 男, 山西运城人, 硕士研究生, 主要研究方向为协作通信网络。

策略,以最小化中继节点上的误码率为目标,通过仿真验证在误码率性能方面,提出的功率资源配置策略明显优于传统的方案。

通过对上述文献的分析,本文以系统容量最大为准则充分考虑了干扰信号对传输性能的影响,提出了一种最优功率资源配置以及最佳中继选择策略(IS-MABC-OPOR),该方案能更好地描述通信链路实际的传输情况,与 EPA 和 RPA 方案相比,本文方案可以最大化系统的信道容量。

### 1 系统模型

存在干扰的 MABC 中继系统如图 1 所示,包含两个用户节点 A 和 B,一个干扰节点 C,若干个中继节点  $R_i (i = 1, 2, \dots, L)$ ,中继节点以 AF 策略进行协助传输。在进行远距离传输时,直传链路  $A \rightarrow B$  信道质量较差,因此必须通过中继节点  $R_i$  进行数据的辅助传输。MABC 模型要求在两个阶段内完成用户节点 A 和 B 的信息交换。第一阶段,中继节点  $R_i$  收到两个用户节点 A 和 B、干扰节点 C 发送来的信号为  $x_1, x_2$  和  $x_n$ ;第二阶段,中继节点  $R_i$  将  $x_1, x_2$  和  $x_n$  进行放大后转发,两个用户节点 A 和 B 接收到处理后的信号分别为  $y'_1, y'_2$ 。 $h_{1i}, h_{2i}$  表示  $A \rightarrow R_i$  和  $B \rightarrow R_i$  链路之间的信道衰落系数, $h_{3j} (j = 1, 2, \dots, i)$  表示  $C \rightarrow A, C \rightarrow B$  以及  $C \rightarrow R_i$  干扰链路之间的信道衰落系数。假设该系统各个链路相互独立互不干扰,并且链路环境为瑞利衰落信道,信道系数  $h_{1i}, h_{2i}$  与  $h_{3j} (j = 1, 2, \dots, i)$  服从零均值,方差为  $D_a, D_b, D_c$  的高斯分布。两个用户节点 A 和 B 的发射功率分别为  $p_a, p_b$ ,中继节点  $R_i$  的发射功率为  $p_k$ ,干扰节点 C 的发射功率为  $p_c$ ,系统总的发射功率为  $p_t$ ,这时有  $p_t = p_a + p_b + p_k$ ,若系统各个节点的噪声  $n_0$  服从零均值,单位方差的加性高斯白噪声(AWGN),噪声功率为  $N_0$ 。

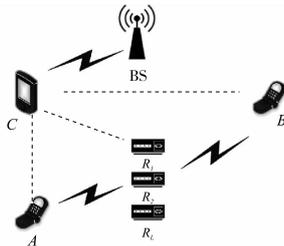


图1 系统模型  
Fig.1 System model

第  $k$  个中继节点  $R_k$  在第一阶段接收到的来自两个用户节

$$C_{\max} = \log_2(1 + r_A) = \log_2 \left[ 1 + \frac{p_k |h_{1k}|^2 |h_{2k}|^2 p_b}{p_k |h_{1k}|^2 (|h_3|^2 p_c + N_0) + (|h_{1k}|^2 p_a + |h_{2k}|^2 p_b + |h_3|^2 p_c + N_0) (|h_3|^2 p_c + N_0)} \right] \quad (12)$$

$$\text{s. t. } p_a + p_b + p_k = p_t \quad (13)$$

$$p_k |h_{kk}|^2 \leq I_0 \quad (14)$$

式(12)保证了通信链路的信道容量最大;式(13)表示两用户节点及中继节点的发射总功率为  $p_t$ ;式(14)表示基站接收到的干扰信号小于基站最大容忍的干扰门限值,从而保证基站给通信链路分配功率。

当用户节点 A 和 B 的期望数据速率分别为  $R_1$  和  $R_2$  时,该通信链路的系统中断概率可以表示为

$$P_{\text{outage}} = \Pr(r_A < R_1 \text{ or } r_B < R_2) = \Pr \left[ \min \left( \frac{r_B}{r_{th1}}, \frac{r_A}{r_{th2}} \right) < 1 \right] \quad (15)$$

$$\text{其中: } r_{th1} = 2^{2R_1} - 1, r_{th2} = 2^{2R_2} - 1 \quad (16)$$

MABC 中继系统模型的最优功率分配问题可以利用中断概率表示为

$$(p_a, p_b) = \arg \min_{p_a, p_b} P_{\text{outage}} \quad (17)$$

$$C_{\max} \equiv \max(r_A) = \frac{p_k |h_{1k}|^2 |h_{2k}|^2 p_b}{p_k |h_{1k}|^2 (|h_3|^2 p_c + N_0) + [(|h_{1k}|^2 p_a + |h_{2k}|^2 p_b + |h_3|^2 p_c + N_0) (|h_3|^2 p_c + N_0)]} \quad (21)$$

式(21)转换为

$$\max(r_A) = \min \left( \frac{1}{r_A} \right) \quad (22)$$

点 A 和 B 的叠加信号为

$$y_k = h_{1k} x_1 + h_{2k} x_2 + h_{ck} x_n + n_0 \quad (1)$$

在第二阶段,中继节点  $R_k$  将接收到的信号放大转发,用户节点 A 和 B 接收到的信号表示为

$$y'_1 = \beta h_{1k} y_k + h_{cA} x_n + n_0 \quad (2)$$

$$y'_2 = \beta h_{2k} y_k + h_{cB} x_n + n_0 \quad (3)$$

中继节点的放大增益  $\beta$  表达式为

$$\beta = \sqrt{\frac{p_k}{|h_{1k}|^2 p_a + |h_{2k}|^2 p_b + |h_{ck}|^2 p_c + N_0}} \quad (4)$$

假设两个用户节点 A 和 B 存留已发送的信息,在接收端处采用自干扰消除技术去除信号中存留的信号得到的实际信号表达式为

$$y_1 = \beta |h_{1k}| |h_{2k}| x_2 + \beta |h_{1k}| |h_{ck}| x_n + \beta |h_{1k}| n_0 + |h_{cA}| x_n + n_0 \quad (5)$$

$$y_2 = \beta |h_{1k}| |h_{2k}| x_1 + \beta |h_{2k}| |h_{ck}| x_n + \beta |h_{2k}| n_0 + |h_{cB}| x_n + n_0 \quad (6)$$

则两个用户节点 A 和 B 接收到的信干噪比(SINR)表示为

$$r_A = \frac{\beta^2 |h_{1k}|^2 |h_{2k}|^2 p_b}{\beta^2 |h_{1k}|^2 |h_{ck}|^2 p_c + \beta^2 |h_{1k}|^2 N_0 + |h_{cA}|^2 p_c + N_0} \quad (7)$$

$$r_B = \frac{\beta^2 |h_{1k}|^2 |h_{2k}|^2 p_a}{\beta^2 |h_{2k}|^2 |h_{ck}|^2 p_c + \beta^2 |h_{2k}|^2 N_0 + |h_{cB}|^2 p_c + N_0} \quad (8)$$

基于 MABC 的双向中继网络,该系统通信链路的系统容量,即链路的可达速率可以表示为

$$R_{\text{sum}} = C = \frac{1}{2} \log_2(1 + r_A) + \frac{1}{2} \log_2(1 + r_B) \quad (9)$$

假设该系统的干扰信号 C 对用户 A、B 以及中继节点  $R_i$  的干扰信道增益是相同的,即

$$|h_{cA}| = |h_{cB}| = |h_{ck}| = |h_3| \quad (10)$$

当  $r_A = r_B$  时,式(9)可以简化表示为

$$C = \log_2(1 + r_A) \quad (11)$$

### 2 IS-MABC-OPOR 优化算法

#### 2.1 问题描述

基站(BS)在已知完全信道状态信息的情况下,对用户节点 A、B 及中继节点  $R_k$  进行功率分配,本文的目标是在满足通信链路发射总功率一定的条件下,使通信链路的信道容量最大。本文针对最优功率分配和最佳中继选择问题提出了 IS-MABC-OPOR 算法,该算法用以下非线性优化问题来表示:

$$(p_a, p_b) = \arg \max_{p_a, p_b} \min \left( \frac{r_B}{r_{th1}}, \frac{r_A}{r_{th2}} \right) \quad (18)$$

式(17)的优化问题等价于:

$$(p_a, p_b) = \arg \max_{p_a, p_b} \min \left( \frac{r_B}{r_{th1}}, \frac{r_A}{r_{th2}} \right) \quad (18)$$

根据文献[1]可知,式(18)的优化问题在  $r_B/r_{th1} = r_A/r_{th2}$  时有解,此时有

$$p_b(1 + \beta^2 |h_{2k}|^2) = p_a(1 + \beta^2 |h_{1k}|^2) \quad (19)$$

根据式(4)和(19)可得约束表达式为

$$2p_a p_b (|h_{1k}|^2 - |h_{2k}|^2) = p_a (1 + p_t |h_{1k}|^2 + p_c |h_3|^2) - p_b (1 + p_t |h_{2k}|^2 + p_c |h_3|^2) \quad (20)$$

#### 2.2 最优功率分配算法

由于该通信链路的信道容量是关于  $r_A$  的单调递增函数,所以可以将目标函数式(12)转换为求解  $r_A$  的最大值,即

$$C_{\max} \equiv \max(r_A) = \frac{p_k |h_{1k}|^2 |h_{2k}|^2 p_b}{p_k |h_{1k}|^2 (|h_3|^2 p_c + N_0) + [(|h_{1k}|^2 p_a + |h_{2k}|^2 p_b + |h_3|^2 p_c + N_0) (|h_3|^2 p_c + N_0)]} \quad (21)$$

基于以上分析,MABC 模型的中继系统信道容量最大的最优功率分配问题可以表示为

$$(p_a, p_b, p_k) = \arg \max_{p_a, p_b, p_k} (r_A) = \arg \min_{p_a, p_b, p_k} \left( \frac{1}{r_A} \right) \quad (23)$$

拉格朗日函数法是解决非线性约束问题的最佳方法之一, 本文对拉格朗日函数的建立如下:

$$F(p_a, p_b, p_k) = \frac{p_k |h_{1k}|^2 (|h_3|^2 p_c + N_0)}{p_k |h_{1k}|^2 |h_{2k}|^2 p_b} + \frac{(|h_{1k}|^2 p_a + |h_{2k}|^2 p_b + |h_3|^2 p_c + N_0) (|h_3|^2 p_c + N_0)}{p_k p_b |h_{1k}|^2 |h_{2k}|^2} \quad (24)$$

$$G(p_a, p_b, p_k) = p_a + p_b + p_k - p_t \quad (25)$$

$$Q(p_a, p_b) = 2p_a p_b (|h_{1k}|^2 - |h_{2k}|^2) - p_a (1 + p_t |h_{1k}|^2 + p_c |h_3|^2) + p_b (1 + p_t |h_{2k}|^2 + p_c |h_3|^2) \quad (26)$$

可以得到

$$L(p_a, p_b, p_k, \lambda_1, \lambda_2) = F(p_a, p_b, p_k) + \lambda_1 G(p_a, p_b, p_k) + \lambda_2 Q(p_a, p_b) \quad (27)$$

分别对  $p_a, p_b, p_k, \lambda_1, \lambda_2$  求偏导, 并使导函数等于零, 可以得到

$$\frac{\partial L}{\partial p_a} = \frac{|h_{1k}|^2 |h_3|^2 p_c + |h_{1k}|^2}{p_k |h_{1k}|^2 |h_{2k}|^2 p_b} + \lambda_1 + \lambda_2 p_b (|h_{1k}|^2 - |h_{2k}|^2) - \lambda_2 (1 + p_t |h_{1k}|^2 + p_c |h_3|^2) = 0 \quad (28)$$

$$\frac{\partial L}{\partial p_b} = \frac{|h_{2k}|^2 (|h_3|^2 p_c + N_0) (p_k |h_{1k}|^2 |h_{2k}|^2 p_b) - p_k |h_{1k}|^2 |h_{2k}|^2 m}{(p_k |h_{1k}|^2 |h_{2k}|^2 p_b)^2} + \lambda_1 + 2p_a \lambda_2 (|h_{1k}|^2 - |h_{2k}|^2) + \lambda_2 (1 + p_t |h_{2k}|^2 + p_c |h_3|^2) = 0 \quad (29)$$

$$\frac{\partial L}{\partial p_k} = \frac{|h_{1k}|^2 (|h_3|^2 p_c + N_0) (p_k |h_{1k}|^2 |h_{2k}|^2 p_b)}{(p_k |h_{1k}|^2 |h_{2k}|^2 p_b)^2} - \frac{|h_{1k}|^2 |h_{2k}|^2 p_b m}{(p_k |h_{1k}|^2 |h_{2k}|^2 p_b)^2} + \lambda_1 = 0 \quad (30)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_1} = p_a + p_b + p_k - p_t = 0 \quad (31)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_2} = 2p_a p_b - p_a (1 + p_t |h_{1k}|^2 + p_c |h_3|^2) + p_b (1 + p_t |h_{2k}|^2 + p_c |h_3|^2) = 0 \quad (32)$$

而上式中:

$$m = p_k |h_{1k}|^2 (|h_3|^2 p_c + N_0) + [ (|h_{1k}|^2 p_a + |h_{2k}|^2 p_b + |h_3|^2 p_c + N_0) (|h_3|^2 p_c + N_0) ] \quad (33)$$

令该系统的噪声功率  $N_0 = 1$ 。

通过上式分析化简可得

$$p_k = \frac{2p_a p_b N Q + P_b^2 Q^2 + p_a^2 N^2}{2p_b (p_a N - p_b Q) + 3N Q p_b - p_a N^2} \quad (34)$$

$$p_a = \frac{p_b Q}{N - 2p_b (|h_{1k}|^2 - |h_{2k}|^2)} \quad (35)$$

$$\text{其中: } N = 1 + p_t |h_{1k}|^2 + p_c |h_3|^2 \quad (36)$$

$$Q = 1 + p_t |h_{2k}|^2 + p_c |h_3|^2 \quad (37)$$

### 2.3 最佳中继选择算法

存在干扰的 MABC 多中继系统, 假设通信网络中有三个候选中继节点, 而中继节点所在链路的信道增益是随机产生的, 将每个候选中继进行最优功率资源配置之后, 选用信道容量最大链路上的中继作为最佳中继节点。

最佳中继选择的目标函数表示为

$$\max C_{|h_{1k}|^2 |h_{2k}|^2} = \arg \max_{p_a, p_b, p_k} (r_A) = \arg \min_{p_a, p_b, p_k} \left( \frac{1}{r_A} \right) \quad (38)$$

其中: 所对应的即  $k^* (1 \leq k^* \leq L)$  为选择的最佳中继节点, 即  $h_{1k^*}, h_{2k^*}$  为对应最佳中继节点的信道增益。

### 2.4 IS-MABC-OPOR 流程

图 2 表示优化问题的解决流程, 即本文所提出的 IS-MABC-OPOR 优化算法的具体步骤如下:

a) 获取通信系统的链路信息, 初始化  $k = 1$ , 并设置系统的发射总功率为  $P_t$ ;

b) 由式(7)(8)得出第  $K$  个中继节点所在链路的信干噪比

以及系统信道容量;

c) 利用拉格朗日方法以信道容量最大为目标, 进行各节点的最优功率资源配置;

d) 当每个候选中继进行最优功率分配后, 计算每个候选中继节点所在链路的系统信道容量;

e) 当进行到  $K = L$  个中继节点时, 比较所有链路信道容量, 得出  $C_{\max}$ , 则所对应的  $K^*$  即为最佳中继节点。

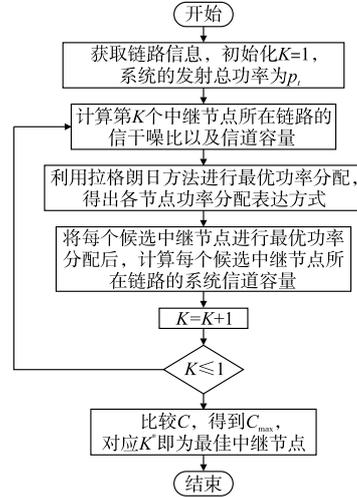


图2 IS-MABC-OPOR算法流程  
Fig.2 Flow chart of IS-MABC-OPOR algorithm

### 3 仿真结果及分析

在本章中, 通过 MATLAB 软件进行仿真, 以验证存在干扰的 MABC 多中继系统的性能。若两用户节点和中继节点不在一条直线上, 两用户节点  $A$  和  $B$  之间的距离为 1, 则用户节点  $A$  和  $B$  与中继节点  $R_k$  的距离之和  $d_{ARB} \geq 1$ , 取  $d_{ARB}$  归一化后, 相应的用户节点  $A$  到中继节点  $R_k$  的归一化距离为  $d_0$ 。  $d_{AR}$  表示用户节点  $A$  与中继  $R_k$  的实际距离,  $d_{RB}$  表示用户节点  $B$  与中继节点  $R_k$  的实际距离, 即  $d_{AR} = d_0 d_{ARB}, d_{RB} = (1 - d_0) d_{ARB}$ 。根据城市无线传输模型, 路径损耗因子为  $-4$ , 则相应的信道衰落系数表示为:  $|h_{1k}|^2 = (d_0 d_{ARB})^{-4}, |h_{2k}|^2 = [(1 - d_0) d_{ARB}]^{-4}$ 。等功率分配方案为  $p_a = p_b = p_k = p_t/3$ 。仿真参数设置如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Tab.1 Simulation parameters

参数	数值	参数	数值
$p_c$	30 dB	$ h_3 $	$0.6^{-1} 0.8^{-1}$
$d_{ARB}$	1.1	$p_t$	30 dB, 50 dB

图 3 给出的是存在干扰信号的 MABC 模型中继系统的通信链路信道容量与发射总功率关系的变化曲线。当  $d_0 = 0.5$ , 带宽归一化为  $B = 1$  时, 通过仿真比较可以得到: 从三种功率资源配置方案以及在本文所提方案上加大干扰信号 ( $|h_3| = (0.6)^{-3}$ ) 的对比图可以看出, 四条曲线的变化趋势是一致的, 通信链路的信道容量与发射总功率呈正相关变化。当发射总功率的值为 15 dB 时, IS-MABC-OPOR 方案的系统信道容量比 EPA 方案高 6.1%, 比 RPA 方案高 26.7%, RPA 方案系统信道容量低于最优功率资源配置方案以及 EPA 方案的, 而 IS-MABC-OPOR 方案的系统信道容量是加大干扰信号的 3 倍左右。从仿真图可以看出本文所提出的最佳功率资源配置方案在系统信道容量性能方面优于 RPA 以及 EPA 方案, 这是因为增大系统发射总功率各个节点分配的功率也随之增大, 通过式 (7)(8) 可得链路的信干噪比增大, 从而提升了系统性能。

图 4 是关于选取最佳中继节点的仿真图。存在干扰的 MABC 多中继系统。由仿真图可知, 该系统三个候选中继节点

的信道增益系数所对应的信道容量随着发射总功率的增大呈正相关的变化。原因是当系统发射总功率越大时,无论通信链路的信道增益系数干扰强弱,则总会以一定的临界功率进行传输,从而使通信链路所对应的信道容量的值增大。当系统发射总功率的值为 $[0:3]$ 时,第二个和第三个候选中继节点所对应的系统系统信道容量都能达到链路所需的阈值,这时可以选取这两个候选中继节点中的任意一个中继节点作为最佳中继节点进行数据的传输。而当发射总功率的值为 $[3:30]$ 时,则选择第三个候选中继节点进行数据的传输。

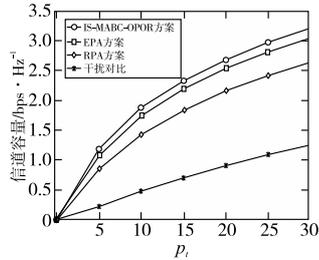


图3 不同方案下信道容量随总功率的变化曲线  
Fig.3 Variation of channel capacity with total power under different schemes

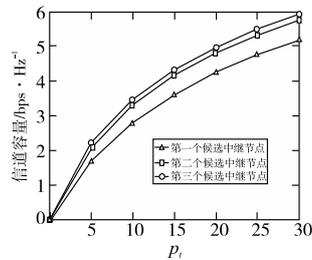


图4 不同候选中继节点的信道容量随系统发射总功率的变化曲线  
Fig.4 Variation of channel capacity of different candidate relay nodes with total transmit power of the system

图 5 给出了通信链路的信道容量随功率分配系数  $m = p_c/p_t$  的变化曲线。首先系统信道容量会随着功率分配因子成负相关变化。由图可以得到,发射总功率越大,则所对应的通信链路的信道容量越大。当  $m = [0.1:1]$  时,发射总功率为  $p_t = 30$  dB 和  $p_t = 50$  dB,两者的信道容量相差很小。这说明当干扰信号对系统性能影响足够大时,增加系统发射总功率对该系统的信道容量提升较小。当  $p_t = 30$  dB,  $m = 0.3$  时,本文所提出的功率资源配置方案的系统信道容量比 EPA 高 7%,比 RPA 方案高 23.1%。RPA 方案系统信道容量低于最优功率资源配置方案以及 EPA 方案,本文提出的最优功率资源配置方案在系统信道容量性能上优于 EPA 以及 RPA 方案。

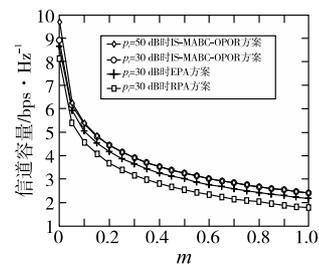


图5 不同方案下信道容量随功率分配因子的变化曲线  
Fig.5 Variation of channel capacity with power allocation factor under different schemes

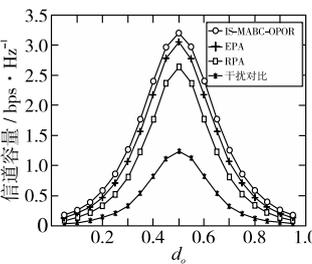


图6  $p_t=30$  dB不同方案下信道容量随 $d_0$ 的变化曲线  
Fig.6 Variation curve of channel capacity with  $d_0$  under different schemes of  $p_t=30$  dB

图 6、7 给出了系统信道容量与  $d_0$  之间变化关系的仿真曲线图。横坐标表示的是用户节点 A 与中继节点的距离,纵坐标表示的是系统信道容量。图 6 的仿真参数为 MABC 模型通信链路的发射总功率  $p_t = 30$  dB 以及带宽归一化,而图 7 的仿真参数为 MABC 模型通信链路的发射总功率  $p_t = 50$  dB 以及带宽归一化,可以得出如下结论:

a) 当中继节点的位置到两用户节点的距离相等时,IS-MABC-OPOR、EPA、RPA 三种方案均在  $d_0 = 0.5$  处双向通信链路的信道容量取得最大值。系统发射总功率的值是  $p_t = 30$  dB 时,本文所提出的功率资源配置方案的系统信道容量比 EPA 方案高  $0.15 \text{ bps} \cdot \text{Hz}^{-1}$ ,比 RPA 方案高  $0.5582 \text{ bps} \cdot \text{Hz}^{-1}$ ,比干扰对比情况高  $1.95 \text{ bps} \cdot \text{Hz}^{-1}$ ,系统发射总功率为  $p_t = 50$  dB 时,IS-MABC-OPOR 方案的系统信道容量比 EPA 高  $0.1578 \text{ bps} \cdot \text{Hz}^{-1}$ ,比 EPA 方案高  $0.5898 \text{ bps} \cdot \text{Hz}^{-1}$ ,比干扰对比情

况高  $2.1305 \text{ bps} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 。RPA 方案系统信道容量低于 IS-MABC-OPOR 以及 EPA 方案。随着中继节点位置的变化,通过式(36)(37)可求得相应的  $N、Q$ ,进而得到各节点所应分配的功率资源。本节方案结合传输信道增益给各个节点分配了合理的功率资源,从而达到了更好的效果,因此本文所提出的最优功率分配方案的性能是优于 EPA 以及 RPA 方案的。

b) 当  $d_0 = 0.5$  时,从图中的仿真曲线可以看出,总功率为  $p_t = 50$  dB 比  $p_t = 30$  dB 的 IS-MABC-OPOR 方案系统容量增大了  $0.6808 \text{ bps} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 。这是因为提高系统的总发射功率各节点所分配的功率相应增加,所以系统性能更佳。

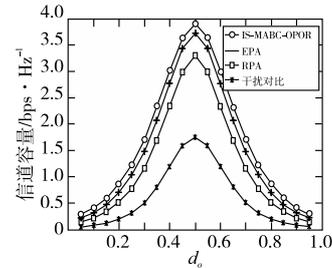


图7  $p_t=50$  dB不同方案下信道容量随 $d_0$ 的变化曲线  
Fig.7 Variation curve of channel capacity with  $d_0$  under different schemes of  $p_t=50$  dB

#### 4 结束语

由基站集中控制的单蜂窝双向中继系统的场景,当该通信链路发射总功率一定的条件下,本文以最大化通信链路的信道容量为目标,提出一种存在干扰 MABC 多中继系统下的最优功率资源配置和最佳中继节点选择算法 IS-MABC-OPOR。通过仿真结果及分析可以看出,与 EPA 和 RPA 方案相比,本文提出的方案可以明显提高通信链路的信道容量。

#### 参考文献:

- [1] 钟新毅,徐友云,孙新建,等.双向中继信道的模拟网络编码最优功率分配[J].信息处理,2014,30(8):867-873. (Zhong Xinyi, Xu Youyun, Sun Xinjian, et al. Optimal power allocation of analog network coding for two-way relay channel[J]. Information Processing, 2014,30(8):867-873.)
- [2] Cover T M, Gamal E A. Capacity theorems for the relay channel[J]. IEEE Trans on Information Theory,1979,25(5):572-584.
- [3] 林萧,吴怡,徐哲鑫.基于概率和网络编码的蜂窝中继选择机制[J].现代计算机,2017(1):3-6. (Lin Xiao, Wu Yi, Xu Zhexin. Cellular relay selection mechanism based on probability and network coding[J]. Modern Computer,2017(1):3-6.)
- [4] Hashem K H, Mahrokh G. Power allocation and relay selection for network-coded D2D underlay heterogeneous cellular networks [J]. Telecommunication Systems,2017,67(4):699-715.
- [5] 国强,秦月.改进的基于网络编码中继转发方案[J].计算机应用,2016,36(1):61-65. (Guo Qiang, Qin Yue. Improved relay and forwarding scheme based on network coding[J]. Journal of Computer Applications,2016,36(1):61-65.)
- [6] 丁长文,杨霖,李高祥.基于能量收集双向中继网络的高能效联合中继选择和功率分配算法[J].电子学报,2017,45(5):1124-1129. (Ding Changwen, Yang Lin, Li Gaoxiang. Energy efficient joint relay selection and power allocation algorithms based on energy collection two-way relay network[J]. Journal of Electronics,2017,45(5):1124-1129.)
- [7] Alabed S. Performance analysis of two-way DF relay selection techniques[J]. ICT Express,2016,2(3):91-95.
- [8] 冀保峰,宋康,王毅,等.联合网络编码的中继选择的协作传输方案及其性能分析[J].通信学报,2015,36(3):1-11. (Ji Baofeng, Song Kang, Wang Yi, et al. Cooperative transmission scheme and performance analysis of relay selection for joint network coding[J]. Journal of Communications,2015,36(3):1-11.) (下转第 页)

随着迭代的进行,本文算法(MQ-JPCA)、JOA 和 SLA 算法的系统容量都随着迭代逐渐增加。在大约 100 次迭代之后, MQ-JPCA 算法获得近似最优解。在几乎相同的迭代次数下, MQ-JPCA 和 JOA、SLA 算法相比获得了更高的系统容量。由于随机选择算法是固定的等概率信道选择,所以系统容量几乎是直的。尽管本文算法的前 100 次迭代没有收敛到最佳性能并且表现不佳,但与长期优化相比,短期差的性能可以忽略不计。

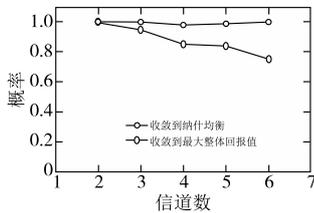


图3 收敛到纳什均衡和最大回报值的概率

Fig.3 Probability of convergence to Nash equilibrium and maximum reward

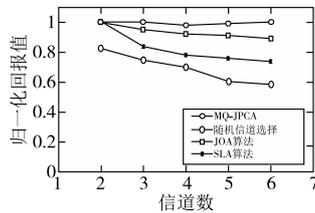


图4 归一化整体回报值比较

Fig.4 Comparison of normalized overall return values reward

图 6 表述了系统容量随用户数的变化趋势。可以看到,系统容量随着用户数的增加而上升。而本文采用的 MQ-JPCA 算法与其他三种算法相比,获得了更高的系统容量。

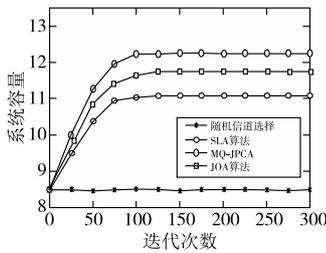


图5 系统容量与迭代次数的关系

Fig.5 Relationship between system capacity and iteration

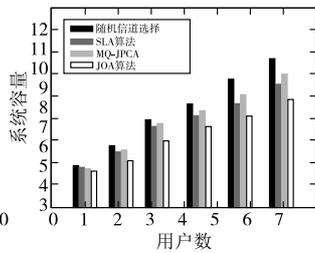


图6 四种算法系统容量比较

Fig.6 System capacity of the four algorithms

表 1 比较了各算法的计算复杂度。通过分析本文算法的实现步骤,得到本文算法迭代方案的计算复杂度为  $O(N \times M \times \text{size} \times t)$ 。对比本文比较的三种算法的复杂度,本文的复杂度要优于 JOA 算法,而随机信道选择算法是固定概率选择信道,算法复杂度几乎为 0。相比于 SLA 算法,虽然本文算法在复杂度上要大于其复杂度,但是由于本文算法的信道数较少,算法的计算量均不大。

表 1 算法的复杂度分析  
Tab.1 Algorithm complexity analysis

算法	复杂度	算法	复杂度
MQ-JPCA	$N \times M \times \text{size} \times t$	JOA 算法	$N^3 \sqrt{N}$
SLA 算法	$N \times M$	随机信道选择	0

## 6 结束语

针对认知无线网络中的资源短缺问题采用无信息交互的自学习方法对信道进行分配。本文运用非合作博弈框架对多用户动态信道选择进行建模,提出了一种基于多用户 Q 学习的联合信道选择和功率控制算法。仿真结果表明,提出的 MQ-

JPCA 算法可以高概率地收敛到纳什均衡,用户信道选择得到的整体回报非常接近最大整体回报值,并获得较高的系统容量。然而,本文所研究的场景较为简单且算法复杂度相比其他几种较高,下一步将考虑在更复杂的场景模型中对本文设计的联合算法进行研究,并尽量降低算法的复杂度。

### 参考文献:

[1] 伍春. 认知无线电中智能学习技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2014. (Wu Chun. Research on Intelligent Learning technology in Cognitive radio[D]. Xi'an: Xidian University, 2014.)

[2] Sharma S, Bohara V A, Peer M. Opportunistic and cooperative hybrid spectrum access protocol for cognitive radio network[C]//Proc of IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2017:1-6.

[3] Hossain M A, Sarkar N I. A distributed multichannel MAC protocol for rendezvous establishment in cognitive radio Ad hoc networks[J]. Ad hoc Networks, 2018, 70(1):44-60.

[4] Tan L T, Ying Lei, Bliss D W. Power control and relay selection in full-duplex cognitive relay networks: coherent versus non-coherent scenarios[C]//Proc of the 51st Annual Conference on Information Sciences and Systems. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2017:1-6.

[5] 汪志勇,张沪寅,徐宁. 认知无线电网络中基于随机学习博弈的信道分配与功率控制[J]. 电子学报, 2018, 46(12):2870-2877. (Wang Zhiyong, Zhang Huyin, Xu Ning. Channel assignment and power control based on stochastic learning game in cognitive radio networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(12):2870-2877.)

[6] Kazemi S, Rasti M. Joint power control and sub-channel allocation for co-channel OFDMA femtocells[C]//Proc of IEEE Symposium on Computers and Communication. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2016: 1171-1176.

[7] Xu Ding, Li Qun. Joint power control and time allocation for wireless powered underlay cognitive radio networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2017, 6(3):294-297.

[8] He Xiaoli, Hong Jiang, Yu Song, et al. Joint optimization of channel allocation and power control for cognitive radio networks with multiple constraints[J]. Wireless Networks, 2020, 26(1):101-120.

[9] Zhao Nan, Yu F R, Sun Hongjian, et al. Adaptive power allocation schemes for spectrum sharing in interference-alignment-based cognitive radio networks[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2016, 65(5):3700-3714.

[10] Zhou Pan, Chang Yusun, Copeland J A. Learning through reinforcement for repeated power control game in cognitive radio networks[C]//Proc of IEEE Global Telecommunications Conference GLOBECOM. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2011:54-69.

[11] Yao Kailing, Xiang Yannan, Du Zhiyong, et al. Directed graphical game based joint channel selection and power control in cognitive radio networks[C]//Proc of the 6th International Conference on Electronics Information and Emergency Communication. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2016:211-215.

[12] Sastry P S, Phansalkar V V, Thathachar M A L. Decentralized learning of Nash equilibria in multi-person stochastic games with incomplete information[J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, 1994, 24(5):769-777.

(上接第 7 页)

[9] 郭涛,吕显莹,刘刚. D2D 通信中最优功率分配和最佳中继选择[J]. 西安电子科技大学学报, 2017, 44(4):7-12. (Guo Yi, Lyu Yuxuan, Liu Gang. Optimal power allocation and relay selection in D2D communication[J]. Journal of Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2017, 44(4):7-12.)

[10] Jiang Yunxiang, Lau F C M, Sattar Z. Paried-relay-selection schemes for two-way relaying with network coding[J]. IET Communication, 2015, 9(6):888-896.

[11] 裴玉芳,孙文胜. 一种基于能效的中继选择和功率分配方案[J]. 南阳理工学院学报, 2016, 8(4):8-12. (Pei Yufang, Sun Wensheng. A relay selection and power allocation scheme based on energy efficiency[J]. Journal of Nanyang Institute of Technology, 2016, 8(4):8-12.)

[12] Kim S H, Jung B C, Sung D K. Transmit power optimization for two-way relay channels with physical-layer network coding[J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(2):151-154.