



不完全 SIC 下 CR-NOMA 系统的功率分配算法

周 烁^{1,2}, 仇润鹤^{1,2}

(1. 东华大学 信息科学与技术学院, 上海 201620; 2. 数字化纺织服装技术教育部工程研究中心, 上海 201620)

摘 要: 在不完全连续干扰消除(SIC)条件下, 对认知无线电-非正交多址混合系统中的次用户总传输速率进行研究, 提出一种基于参数变换和 KKT 条件的功率分配算法。采用非正交多址方式使次用户接入授权信道, 在主用户服务质量、最大发射功率等约束条件下, 通过参数变换对原约束条件进行改写设计新的优化问题, 并利用 KKT 条件求解最优功率分配因子进而实现系统中次用户总传输速率的最大化。仿真结果表明, 与 CNPA 算法和等功率分配算法相比, 该算法可明显提高系统中次用户的总传输速率, 并且对于不完全 SIC 具有更强的承受能力。

关键词: 非正交多址接入; 认知无线电; 连续干扰消除; 功率分配; 服务质量

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



中文引用格式: 周烁, 仇润鹤. 不完全 SIC 下 CR-NOMA 系统的功率分配算法[J]. 计算机工程, 2021, 47(8): 195-200, 209.

英文引用格式: ZHOU S, QIU R H. Power allocation algorithm of CR-NOMA system under imperfect SIC[J]. Computer Engineering, 2021, 47(8): 195-200, 209.

Power Allocation Algorithm of CR-NOMA System Under Imperfect SIC

ZHOU Shuo^{1,2}, QIU Runhe^{1,2}

(1. College of Information Sciences and Technology, Donghua University, Shanghai 201620, China;

2. Engineering Research Center of Digitized Textile & Apparel Technology, Ministry of Education, Shanghai 201620, China)

[Abstract] This paper presents a study on the total transmission rate of secondary users in a Cognitive Radio(CR) Non-Orthogonal Multiple Access(NOMA) hybrid system under imperfect Successive Interference Cancellation(SIC). On this basis, a power allocation algorithm based on parameter transformation and KKT conditions is proposed. In this system, the secondary users use NOMA to access the authorized channel. Considering the constraints of the primary and secondary users' Quality of Service(QoS) and maximum transmission power, the original constraint conditions are rewritten by using the parameter transformation method to construct a new optimization problem. The optimal power allocation factor is solved by using KKT conditions in order to maximize the total transmission rate of secondary users in the system. Simulation results show that compared with the CNPA algorithm and the equal power allocation algorithm, this algorithm can significantly improve the total transmission rate of secondary users in the system, and has a better tolerance for imperfect SIC.

[Key words] Non-Orthogonal Multiple Access(NOMA); Cognitive Radio(CR); Successive Interference Cancellation(SIC); power allocation; Quality of Service(QoS)

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0059060

0 概述

非正交多址(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)作为一种很有前景的多址接入技术, 在移动通信网络中得到了广泛应用^[1]。在 NOMA 系统中, 通过在发送端应用叠加编码技术^[2]和在接收端应用连续干扰消除(Successive Interference Cancellation, SIC)技术^[3], 使得多个用户可在同一时间和同一频

段接入系统进行数据传输。当前 NOMA 应用最广泛的类型是功率域 NOMA 系统^[4], 发射机向所有接收机发送多用户叠加的信号, 系统根据用户的信道条件以不同的功率等级为其提供服务。认知无线电(Cognitive Radio, CR)是一种可以有效提升频谱效率的技术。在 CR 中, 允许次用户访问主用户的频谱资源来提高频谱利用率。迄今为止, CR 作为一种支持新兴应用的技术已经得到了广泛的讨论和研

基金项目: 国家自然科学基金(61671143)。

作者简介: 周 烁(1996—), 男, 硕士研究生, 主研方向为认知无线电、非正交多址接入; 仇润鹤, 教授、博士。

收稿日期: 2020-07-27 修回日期: 2020-09-07 E-mail: 1369269443@qq.com

究^[5],尤其是将NOMA集成到CR中被证实可以满足5G高吞吐量、低时延等需求^[6]。

鉴于将CR和NOMA相结合的诸多优势,已有学者对CR-NOMA网络进行了研究与分析。文献[7]研究部分中继选择方案对协作式CR-NOMA网络的影响,推导出次用户中断概率的封闭表达式,并通过仿真验证了中继节点数量和功率分配对系统性能的影响。文献[8-10]分析在不完善的信道状态信息下由辅助中继节点和NOMA辅助目标用户组成的协作底层CR网络的中断概率,导出广义的封闭表达式,并通过蒙特卡洛仿真验证了其有效性。文献[11-12]研究了CR-NOMA网络中的物理层安全性。为清除用户之间的干扰并保证主用户的服务质量(Quality of Service, QoS),设计一种新的安全NOMA传输策略,推导出连接中断概率、保密中断概率和有效保密吞吐量的闭式表达式,并通过仿真验证了分析结果的有效性。

由于CR-NOMA非正交传输,因此主用户和次用户之间的相互干扰可能会更加严重。虽然NOMA采用SIC技术来尽可能减少用户间的干扰,但是由于各种硬件的缺陷,SIC解码无法完美执行,产生的残余干扰可能会导致信道条件较差的用户信号解码错误^[13]。在上述研究中均假设SIC可以完全分离叠加的信号,克服用户间的干扰对CR-NOMA网络的负面影响,但完全的SIC在实际应用中几乎不存在。为了对实际系统进行更精确的分析,NOMA系统应考虑不完全的SIC条件^[14-15]。文献[16-17]在此基础上,研究基于底层NOMA的认知中继网络在不完全SIC下的系统性能,给出了不完全SIC下的中断概率和成对错误概率的封闭表达式。分析结果表明:由于NOMA固有的不完全SIC,导致了系统性能的下降。文献[18]分析具有能量收集的CR-NOMA模型在接收端对不完全SIC下感知时的中断行为和吞吐量性能,推导出每个NOMA目的节点中断概率的精确封闭形式。仿真结果验证了两个NOMA用户之间的性能差距可以通过传输功率、能量收集系数、不完全SIC水平等参数进行控制。文献[19]研究一种具有不完全SIC的认知NOMA系统的中断性能,主用户和次用户的中断概率由封闭表达式导出。为最大限度地提升系统吞吐量,提出CNPA算法,并通过参数固定和渐进分析推导出最优的功率分配系数。仿真实验验证了分析结果的正确性。文献[20]分析合作CR-NOMA在一个广义 α - μ 衰落信道模型下的物联网网络性能。考虑干扰温度约束、硬件损耗、不完全SIC等因素的影响,推导出次用户端到端中断概率的封闭解析表达式。通过蒙特卡罗仿真验证了所给出的封闭运算表达式的有效性。

根据上述分析可以看出,现有研究主要讨论并分析在不完全SIC条件下CR-NOMA系统中用户的中断概率,对于次用户总传输速率的研究较少,因此在CR-NOMA系统中对于多个次用户的总传输速率还有待进一步分析。本文在不完全SIC条件下的CR-NOMA系统中,提出一种功率分配算法。在主用户和次用户QoS的约束下,通过参数变换将优化问题中的约束条件全部转换为关于功率分配因子 α_i 的约束条件,得到一个新的关于参数 α_i 的优化问题,并采用KKT条件求解该优化问题,在算法迭代至收敛后得到次用户的最优功率分配因子,实现系统中次用户总传输速率的最大化。

1 系统模型和问题描述

1.1 系统模型

下行CR-NOMA系统模型如图1所示。小区内存在一个主用户、 N 个次用户以及为次用户提供服务的认知基站,次用户随机分布在小区内,所有用户均配备单天线。次用户采用NOMA技术通过功率域复用的叠加编码实现多用户接入,接入方式为Underlay模式,即次用户可以在不影响主用户QoS的前提下共享主用户的频谱资源。认知基站通过频谱感知技术来周期性地检测系统中主用户是否存在;当主用户未接入信道时,次用户可以使用认知基站最大发射功率进行数据传输;当主用户接入信道时,次用户必须降低自身功率来满足主用户的通信需求。

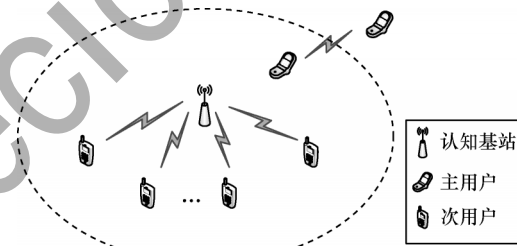


图1 下行CR-NOMA系统模型

Fig.1 Downlink CR-NOMA system model

认知基站在满足最大发射功率的约束下向所有次用户提供服务,各个用户的信道历经独立同分布的瑞利衰落和加性高斯白噪声。因此,主用户的接收信号的计算公式如下:

$$y_{PU} = h_{PU}^b \sqrt{P} c_i + h_{PU}^p \sqrt{P_p} x_{PU} + n_i \quad (1)$$

其中: c_i 表示认知基站对主用户发送的干扰信息; x_{PU} 为主发射机发送给主用户的信息; h_{PU}^b 表示主用户与认知基站之间的信道系数; h_{PU}^p 表示主用户与主发射机之间的信道系数; n_i 表示功率为 σ^2 的高斯白噪声; P 为认知基站发射功率; P_p 为主发射机功率。

由于本文中次用户采用 NOMA 技术接入主用户信道,接入信道的所有次用户信号在发射端进行叠加编码,因此对于主用户而言,考虑次用户对其造成的干扰时可以将所有次用户看作一个整体。主用户的信干噪比 $S_{\text{SINR}_{\text{PU}}}$ 的计算公式如下:

$$S_{\text{SINR}_{\text{PU}}} = \frac{|h_{\text{PU}}^{\text{p}}|^2 P_{\text{p}}}{|h_{\text{PU}}^{\text{B}}|^2 P + \sigma^2} \quad (2)$$

主用户的传输速率 R_{PU} 的计算公式如下:

$$R_{\text{PU}} = B \log(1 + S_{\text{SINR}_{\text{PU}}}) = B \log\left(1 + \frac{|h_{\text{PU}}^{\text{p}}|^2 P_{\text{p}}}{|h_{\text{PU}}^{\text{B}}|^2 P + \sigma^2}\right) \quad (3)$$

其中: B 表示系统带宽。为了确保主用户的正常通信,其传输速率必须满足以下条件:

$$R_{\text{PU}} \geq R_{\min} \quad (4)$$

其中: R_{\min} 表示确保主用户 QoS 的最小传输速率。

假设认知基站可以完美感知信道状态信息。在 CR-NOMA 系统中,次用户的信道可以按 $|h_1|^2 \geq |h_2|^2 \geq \dots \geq |h_i|^2 \geq \dots \geq |h_M|^2$ 顺序排列,其中 $h_i, \forall i=1, 2, \dots, N$ 表示次用户 i 的信道系数。本文考虑的解码方式为首先对主用户信号进行解码,随后从信号中直接消除主用户信号,从而确保在对次用户信号进行连续干扰消除时不存在主用户信号的干扰。

在 NOMA 技术中,连续干扰消除过程用于消除接收机的干扰,但是这在实际系统应用中可能存在缺陷,该缺陷导致的不完全连续干扰消除会产生残余干扰。因此,为使考虑的问题更符合实际情况,本文将不完全 SIC 产生的残余干扰考虑在内。次用户 i 的接收信号的计算公式如下:

$$y_i = h_i \sqrt{\alpha_i P} x_i + h_i \sum_{k=i+1}^N \sqrt{\alpha_k P} x_k + n_i \quad (5)$$

其中: α_i 表示次用户 i 的功率分配因子; x_i 表示认知基站发送给次用户 i 的信息。

经过 SIC 处理后,在用户 i 处具有残余干扰的接收信干噪比 S_{SINR_i} 的计算公式如下:

$$S_{\text{SINR}_i} = \frac{\alpha_i P |h_i|^2}{\sum_{k=1}^{i-1} \epsilon_{k,i} \alpha_k P |h_i|^2 + \sum_{k=i+1}^N \alpha_k P |h_i|^2 + \sigma^2} = \frac{\alpha_i}{\sum_{k=1}^{i-1} \epsilon_{k,i} \alpha_k + \sum_{k=i+1}^N \alpha_k + \frac{\sigma^2}{P |h_i|^2}}, \forall i=2, 3, \dots, N-1 \quad (6)$$

由于第 1 个次用户在解码时还没有出现残余干扰,此时只受到其余未解码次用户的影响,第 N 个用户在解码时直接用整体信号滤除前面已解码用户的信号,此时只会受到前面次用户的残余干扰的影响,因此当 $i=1$ 和 $i=N$ 时,分别得到:

$$S_{\text{SINR}_1} = \frac{\alpha_1}{\sum_{k=2}^N \alpha_k + \frac{\sigma^2}{P |h_1|^2}} \quad (7)$$

$$S_{\text{SINR}_N} = \frac{\alpha_N}{\sum_{k=1}^{N-1} \epsilon_{k,i} \alpha_k + \frac{\sigma^2}{P |h_N|^2}} \quad (8)$$

其中: $\epsilon_{k,i}$ 表示次用户 k 对次用户 i 产生的干扰中无法消除的部分, $\epsilon_{k,i} \in [0, 1]$ 。因此,根据香农公式,将次用户 i 的传输速率表述如下:

$$R_{\text{SU}_i} = B \log(1 + S_{\text{SINR}_i}) = B \log\left(1 + \frac{\alpha_i}{\sum_{k=1}^{i-1} \epsilon_{k,i} \alpha_k + \sum_{k=i+1}^N \alpha_k + \frac{\sigma^2}{P |h_i|^2}}\right) \quad (9)$$

为了满足次用户的 QoS,传输速率必须满足以下条件:

$$R_{\text{SU}_i} \geq R_{\min}^{\text{SU}} \quad (10)$$

其中: R_{\min}^{SU} 表示确保次用户 QoS 的最小传输速率。

因此,CR-NOMA 系统中次用户的总传输速率的计算公式如下:

$$R_{\text{total}} = \sum_{i=1}^N R_{\text{SU}_i} \quad (11)$$

1.2 问题描述

在不完全 SIC 下的 CR-NOMA 系统中,残余干扰会导致系统性能的下降。本文在残余干扰存在的情况下,考虑认知基站最大发射功率以及主用户和次用户的 QoS,目的是最大化系统中次用户的总传输速率。因此,可将不完全 SIC 下 CR-NOMA 系统中的次用户总传输速率优化功率分配问题表述如下:

$$\begin{aligned} \max_{\alpha_i, \forall i} R_{\text{total}} &= \sum_{i=1}^N R_{\text{SU}_i} \\ \text{s.t. C1: } &\alpha_i \geq 0 \\ \text{C2: } &\sum_{i=1}^N \alpha_i \leq 1 \\ \text{C3: } &R_{\text{PU}} \geq R_{\min} \\ \text{C4: } &R_{\text{SU}_i} \geq R_{\min}^{\text{SU}} \end{aligned} \quad (12)$$

其中: C1 表示确保分配给每个次用户的功率为非负; C2 表示认知基站的传输功率约束; C3 和 C4 分别表示主用户和次用户的 QoS 约束。

2 参数变换与迭代功率分配

2.1 参数变换

对于式 (12) 中的约束 C3,进行如下变换:

$$\begin{aligned} B \log\left(1 + \frac{|h_{\text{PU}}^{\text{p}}|^2 P_{\text{p}}}{|h_{\text{PU}}^{\text{B}}|^2 P + \sigma^2}\right) &\geq R_{\min} \Rightarrow \\ P &\leq \frac{|h_{\text{PU}}^{\text{p}}|^2 P_{\text{p}}}{\left(2^{\frac{R_{\min}}{B}} - 1\right) |h_{\text{PU}}^{\text{B}}|^2} - \frac{\sigma^2}{|h_{\text{PU}}^{\text{B}}|^2} \end{aligned} \quad (13)$$

认知基站的发射功率可以由式 (14) 得到:

$$P = \begin{cases} \min \left\{ \frac{|h_{PU}^P|^2 P_P}{\left(2^{\frac{R_{\min}}{B}} - 1\right) |h_{PU}^B|^2} - \frac{\sigma^2}{|h_{PU}^B|^2}, P_{\max} \right\}, H_1 \\ P_{\max}, H_0 \end{cases} \quad (14)$$

其中: P_{\max} 表示认知基站预设的最大发射功率; H_1 和 H_0 分别表示信道中存在主用户和信道中不存在主用户, 满足主用户接入概率 $\Pr(H_1) = \mu_1$ 和主用户缺席概率 $\Pr(H_0) = \mu_0$, 并且 $\mu_1 + \mu_0 = 1$ 。因此, 得到认知基站的发射功率, 即次用户的最大可用功率。由于考虑主用户的 QoS, 因此确保了次用户接入授权信道不会影响其正常通信。

对于式(12)中的约束 C4, 可以等价于式(15):

$$B \ln \left(1 + \frac{\alpha_i}{\sum_{k=1}^{i-1} \epsilon_{k,i} \alpha_k + \sum_{k=i+1}^N \alpha_k + \frac{\sigma^2}{P|h_i|^2}} \right) \geq R_{\min}^{\text{SU}} \Rightarrow \alpha_i \geq \left(2^{\frac{R_{\min}^{\text{SU}}}{B}} - 1 \right) \left(\sum_{k=1}^{i-1} \epsilon_{k,i} \alpha_k + \sum_{k=i+1}^N \alpha_k + \frac{\sigma^2}{P|h_i|^2} \right) \quad (15)$$

由于 NOMA 准则是给信道条件较差的用户分配更多的功率, 因此次用户的功率分配因子的取值可由下式得出:

$$\alpha_i^{\text{threshold}} \leq \alpha_i \leq \alpha_{i-1}, \forall i = 2, 3, \dots, N \quad (16)$$

$$\alpha_i^{\text{threshold}} = \left(2^{\frac{R_{\min}^{\text{SU}}}{B}} - 1 \right) \left(\sum_{k=1}^{i-1} \epsilon_{k,i} \alpha_k + \sum_{k=i+1}^N \alpha_k + \frac{\sigma^2}{P|h_i|^2} \right), \quad \forall i = 2, 3, \dots, N-1 \quad (17)$$

当 $i=1$ 和 $i=N$ 时, 分别得到:

$$\alpha_1^{\text{threshold}} = \left(2^{\frac{R_{\min}^{\text{SU}}}{B}} - 1 \right) \left(\sum_{k=1}^N \alpha_k + \frac{\sigma^2}{P|h_1|^2} \right) \quad (18)$$

$$\alpha_N^{\text{threshold}} = \left(2^{\frac{R_{\min}^{\text{SU}}}{B}} - 1 \right) \sum_{k=1}^{N-1} \epsilon_{k,N} \alpha_k \quad (19)$$

其中: $\alpha_i^{\text{threshold}}$ 表示次用户 i 的最小功率分配因子门限, 将不能满足最小功率分配因子约束的次用户视作无法接入信道进行数据传输。至此, 已将优化问题中的约束条件全部转化为关于参数 α_i 的约束条件。

2.2 迭代功率分配

结合上述分析可以将优化问题重新表述如下:

$$\begin{aligned} \max_{\alpha_i, \forall i} R_{\text{total}} &= \sum_{i=1}^N R_{\text{SU}_i} \\ \text{s.t. C1: } \alpha_i^{\text{threshold}} &\leq \alpha_i \leq \alpha_{i-1} \\ \text{C2: } \sum_{i=1}^N \alpha_i &\leq 1, \forall i = 2, 3, \dots, N \end{aligned} \quad (20)$$

该优化问题可以使用 KKT 条件来求解, 拉格朗日函数表述如下:

$$L(\alpha_i) = \sum_{i=1}^N B \ln \left(1 + \frac{\alpha_i}{\sum_{k=1}^{i-1} \epsilon_{k,i} \alpha_k + \sum_{k=i+1}^N \alpha_k + \frac{\sigma^2}{P|h_i|^2}} \right) + \lambda \left(1 - \sum_{i=1}^N \alpha_i \right) \quad (21)$$

其中: $\lambda > 0$ 表示拉格朗日乘子。 $\alpha_i, \forall i = 1, 2, \dots, N$ 由 $\frac{\partial L(\alpha_i)}{\partial \alpha_i} = 0$ 计算得到:

$$\frac{\partial L(\alpha_i)}{\partial \alpha_i} = \frac{B}{\ln 2} \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sum_{k=1}^{i-1} \epsilon_{k,i} \alpha_k + \sum_{k=i+1}^N \alpha_k + \frac{\sigma^2}{P|h_i|^2}} - \lambda \sum_{i=1}^N 1 = 0 \quad (22)$$

$$\alpha_i = \left[\frac{B}{\lambda \ln 2} - \sum_{k=1}^{i-1} \epsilon_{k,i} \alpha_k - \sum_{k=i+1}^N \alpha_k - \frac{\sigma^2}{P|h_i|^2} \right]^+ \quad (23)$$

考虑到必须满足式(20)的约束, 次用户 i 的最优功率分配因子 α_i^* 可由下式得到:

$$\alpha_i^* = \min \left[\frac{B}{\lambda \ln 2} - \sum_{k=1}^{i-1} \epsilon_{k,i} \alpha_k - \sum_{k=i+1}^N \alpha_k - \frac{\sigma^2}{P|h_i|^2}, \alpha_{i-1} \right]^+ \quad (24)$$

拉格朗日乘子 λ 可按式更新直到 λ 收敛:

$$\lambda^{(t+1)} = \lambda^{(t)} + \eta^{(t)} \left[1 - \sum_{i=1}^N \alpha_i \right]^+ \quad (25)$$

其中: t 表示迭代次数, $\eta > 0$ 表示步长。假设 α_i 的收敛精度为 Δ , 则本文算法求解最优功率分配因子的迭代复杂度为 $O\left(\frac{1}{\Delta^n}\right)$, n 为实际接入授权信道的次用户数量。

算法 1 功率分配算法

- 1) 初始化 $t=0, \lambda^{(t)} > 0$ 和 $\eta^{(t)} > 0$ 。
- 2) 通过给出的 $\lambda^{(t)}$ 按式(24)计算 α_i^* 。
- 3) 得到 α_i^* 后按式(25)更新 $\lambda^{(t+1)}$ 。
- 4) $t = t + 1$ 。
- 5) 重复步骤 2~步骤 4 直到 λ 收敛。
- 6) 得到最优功率分配因子。

3 仿真与结果分析

在本文仿真过程中, 设置归一化系统带宽 $B=1\text{Hz}$, 高斯白噪声功率 $\sigma^2=0.01\text{W}$, 主发射机归一化

发射功率 $P_p = 1.0 \text{ W}$, 认知基站最大发射功率 $P_{\max} = 1.0 \text{ W}$, 主次用户最小传输速率门限分别为 $R_{\min} = 0.5 \text{ bit/s}$ 和 $R_{\min}^{\text{SU}} = 0.3 \text{ bit/s}$, 所有信道历经瑞利衰落, 用户的信道增益与其到基站的距离成反比。将本文算法与等功率分配算法和 CNPA 算法^[19] 进行比较。

图 2 给出了本文算法与等功率分配算法和 CNPA 算法在次用户总传输速率上的性能表现。设置接入系统的次用户数量为 4, 残余干扰部分 $\epsilon = 0.01$ 。可以看出, 随着最大发射功率的不断增大, 所有算法的性能均呈现先上升而后趋于平缓的趋势。这是由于主用户 QoS 的限制, 因此次用户可使用的最大功率必须在满足主用户正常通信不被影响的条件下实现。但是在相同条件下, 本文算法的性能要优于等功率分配算法和 CNPA 算法, 并且由于等功率分配算法未进行功率优化分配, 而 CNPA 算法则采用参数固定和渐进分析的方法来优化功率分配, 因此等功率分配算法性能表现与其余两种算法有较大的差距。此外, 图 2 中还比较了本文算法在完全 SIC ($\epsilon = 0.00$) 和不完全 SIC ($\epsilon = 0.01$) 下的性能表现, 随着功率的不断增大, 两种情况下的次用户总传输速率的差距逐渐增加, 可见不完全 SIC 对系统性能有较大的影响。

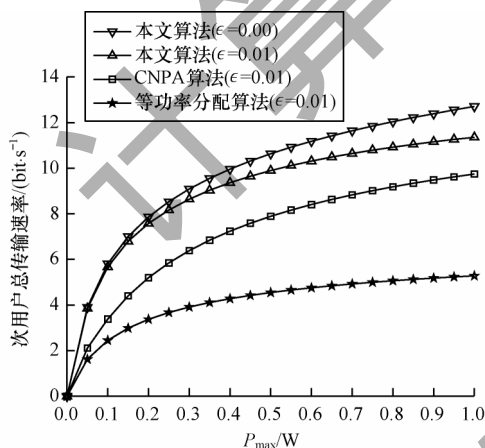


图2 次用户总传输速率比较

Fig.2 Comparison of total transmission rate of secondary users

图 3 给出了 3 种算法在不同程度的残余干扰下系统次用户总传输速率的比较结果。可以看出, 在系统进行 SIC 后, 随着残余干扰部分 ϵ 从 0.05 上升到 0.10, 3 种算法的性能均呈现出明显的下降趋势, 并且由于残余干扰功率的存在, 次用户的功率利用率急剧下降。本文算法在同等条件下依旧比其余两种算法有更好的性能, 在 $\epsilon = 0.10$ 的条件下略优于 CNPA 算法在 $\epsilon = 0.05$ 时的表现, 并且明显优于等功率分配算法。可见, 本文算法随着残余干扰程度的增加, 仍可以保持较好的性能。

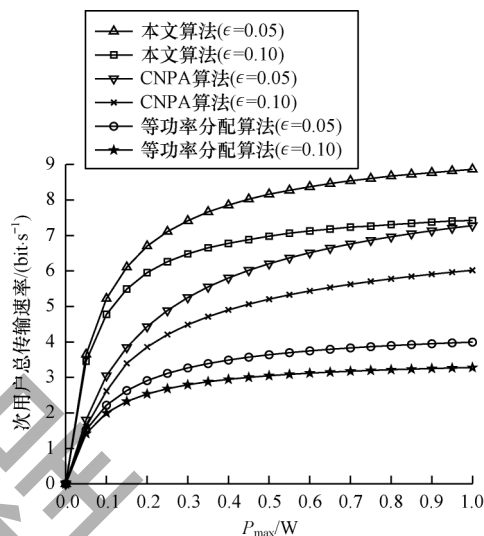


图3 不同程度的残余干扰下次用户总传输速率比较

Fig.3 Comparison of total transmission rate of secondary users under different degrees of residual interference

图 4 给出了 3 种算法在 $\epsilon = 0.01$ 时次用户总传输速率随着主用户使用功率的变化情况。可以看出, 从完全 SIC 到不完全 SIC 的过程, 次用户总传输速率明显下降, 并且随着主用户所使用的功率不断增加, 次用户必须降低自身功率来满足主用户的通信需求, 功率的降低必然带来总传输速率的下降。当主用户占用系统全部可用功率 (1.0 W) 时, 系统中已无剩余功率来满足次用户的 QoS, 因此次用户无法接入系统进行数据传输, 此时次用户总传输速率变为 0。

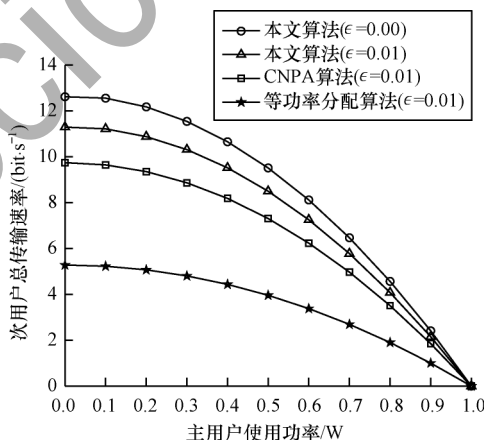


图4 次用户总传输速率随主用户使用功率的变化

Fig.4 Total transmission rate of secondary users varies with the power used by the primary users

图 5 给出了随着总功率的增加 3 种算法接入系统的次用户数量变化情况。可以看出, 随着 P_{\max} 的不断增大, 3 种算法接入系统的次用户数量均呈现上升趋势, 这是由于系统有足够的功率在满足主用户 QoS 的前提下满足次用户的接入请求。在完全 SIC

条件下的接入次用户数量要明显多于不完全 SIC 条件下的接入次用户数量,可见残余功率的存在对系统性能有极大的影响。本文算法不论是在完全 SIC 还是不完全 SIC 条件下系统中接入的次用户数量均多于其他两种算法。

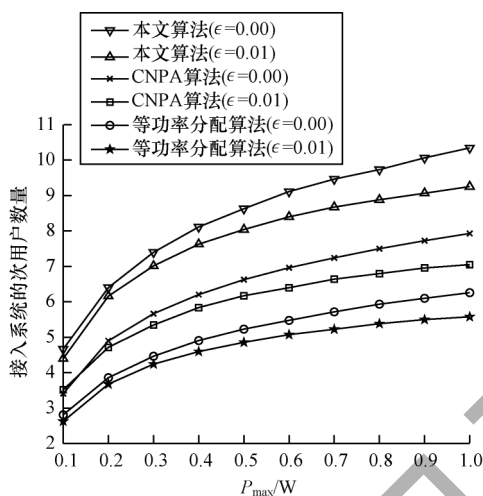


图5 接入系统的次用户数量比较

Fig.5 Comparison of the number of secondary users accessed the system

通过对次用户总传输速率和接入系统的次用户数量的仿真分析本文算法的性能。仿真结果显示,在不完全 SIC 下的 CR-NOMA 系统中,本文算法在次用户总传输速率相同的条件下接入系统的次用户数量上要优于 CNPA 算法和等功率分配算法。

4 结束语

针对不完全 SIC 条件下 CR-NOMA 系统中次用户的总传输速率优化问题,本文提出一种基于参数变换和 KKT 条件的功率分配算法。将原优化问题中的约束条件通过参数变换法改写为关于参数 α_i 的约束条件,设计一个新的关于参数 α_i 的优化问题,随后采用 KKT 条件求解优化问题并得到次用户最优的功率分配因子,最终实现系统中次用户总传输速率的最大化。仿真结果表明,与 CNPA 算法和等功率分配算法相比,该算法在不完全 SIC 条件下能更好地提升 CR-NOMA 系统中次用户的总传输速率,对于不同程度的残余干扰,承受能力比 CNPA 算法和等功率分配算法更强,且系统中可容纳的次用户数量更多。下一步将研究不完全信道状态信息下 CR-NOMA 系统的功率分配问题。

参考文献

[1] DAI L, WANG B, YUAN Y, et al. Non-orthogonal multiple access for 5G: solutions, challenges, opportunities, and future research trends[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(9): 74-81.

[2] WANG H, HUANG Y, YANG L, et al. A cooperative transmission design combining network coding and superposition coding[C]//Proceedings of 2010 International Conference on Wireless Communications & Signal Processing. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2010: 25-48.

[3] CHANG Y, FUKAWA K. Non-orthogonal multiple access with phase rotation employing joint MUD and SIC[C]//Proceedings of the 87th Vehicular Technology Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2018: 2465-2478.

[4] YANG Z, DING Z, FAN P, et al. A general power allocation scheme to guarantee quality of service in downlink and uplink NOMA systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(11): 7244-7257.

[5] ZHANG L, XIAO M, WU G, et al. A survey of advanced techniques for spectrum sharing in 5G networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2017, 24(5): 44-51.

[6] LU, CHEN J, NI Q, et al. Cognitive non-orthogonal multiple access with cooperative relaying: a new wireless frontier for 5G spectrum sharing[J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(4): 188-195.

[7] LI C, GUO D, GUO K, et al. Energy performance of partial relay selection in underlay CR-NOMA networks[C]//Proceedings of the 28th Wireless and Optical Communications Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2019: 1-5.

[8] ARZYKULOV S, NAURYZBAYEV G, TSIFTIS T A, et al. Outage performance of underlay CR-NOMA networks[C]//Proceedings of the 10th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2018: 25-42.

[9] ARZYKULOV S, TSIFTIS T A, NAURYZBAYEV G, et al. Outage performance of cooperative underlay CR-NOMA with imperfect CSI[J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(1): 176-179.

[10] ZHAO W, SHE R, BAO H. Energy efficiency maximization for two-way relay assisted CR-NOMA system based on SWIPT[J]. IEEE Access, 2019, 7: 72062-72071.

[11] XIANG Z, YANG W, PAN G, et al. Physical layer security in cognitive radio inspired NOMA network[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2019, 13(3): 700-714.

[12] BUDHIRAJA I, KUMAR N, TYAGI S, et al. URJA: usage jammer as a resource allocation for secure transmission in a CR-NOMA-based 5G femtocell system[J]. IEEE Systems Journal, 2021, 15(2): 1776-1785.

[13] ISLAM S R, AVAZOV N, DOBRE O A, et al. Power-domain Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) in 5G systems: potentials and challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 19(2): 721-742.

[14] CHEN X, JIA R, NG D W K. On the design of massive non-orthogonal multiple access with imperfect successive interference cancellation[J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 67(3): 2539-2551.

[15] LI X, LIU M, DENG C, et al. Full-duplex cooperative NOMA relaying systems with I/Q imbalance and imperfect SIC[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019, 9(1): 17-20.

(上接第 200 页)

- [16] IM G, LEE J H. Outage probability for cooperative NOMA systems with imperfect SIC in cognitive radio networks[J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(4): 692-695.
- [17] BARIAH L, MUHAIDAT S, AL-DWEIK A. Error performance of NOMA-based cognitive radio networks with partial relay selection and interference power constraints[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(2): 765-777.
- [18] DO D T, LE A T, LEE B M. NOMA in cooperative underlay cognitive radio networks under imperfect SIC[J]. IEEE Access, 2020, 8: 86180-86195.
- [19] LUO L, LI Q, CHENG J. Performance analysis of overlay cognitive NOMA systems with imperfect successive interference cancellation [J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(8): 4709-4722.
- [20] ARZYKULOV S, NAURYZBAYEV G, HASHMI M S, et al. Hardware-and interference-limited cognitive IoT relaying NOMA networks with imperfect SIC over generalized non-homogeneous fading channels[J]. IEEE Access, 2020, 8: 72942-72956.

编辑 陆燕菲