



认知无线网络中的非正交多址资源分配算法

贾亦真¹ 姚枝秀² 周梦圆² 熊 炜³

(1.军事科学院 系统工程研究院 北京 100000; 2.重庆邮电大学 重庆市移动通信技术重点实验室 重庆 400065;

3.重庆市住房公积金管理中心 重庆 401121)

摘 要: 随着物联网的发展和移动终端的普及,用户对数据速率需求快速增长,移动通信系统依然面临着频谱资源紧缺问题。针对认知无线网络中的非正交多址接入(non-orthogonal multiple access, NOMA)技术,研究了认知无线网络中非正交多址信道和功率联合优化问题。以主用户干扰功率和次用户最小吞吐量以及子信道最大复用用户数为约束条件,综合考虑信道状态信息和功率资源,以提高系统能效为目标,建立了信道和功率资源分配优化模型。为了避免信道状态相近的用户复用在同一子信道上,提出了一种次优公平性可调的信道分配算法,并基于连续凸近似和Dinkelbach模型,得到子信道复用用户间的最优功率分配。仿真结果表明,所提算法可以在提高用户公平性的同时,有效提高系统能效。

关键词: 非正交多址; 认知无线电; 功率分配; 信道分配; 能效

中图分类号: TN92

文献标志码: A

文章编号: 1673-825X(2019)06-0775-10

Research on non-orthogonal multiple access resource allocation algorithms in cognitive radio networks

JIA Yizhen¹, YAO Zhixiu², ZHOU Mengyuan², XIONG Wei³

(1. System Engineering Research Institute, Academy of Military Sciences PLA China, Beijing 100000, P. R. China;

2. Chongqing Key Lab of Mobile Communications, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, P. R. China;

3. Chongqing Municipal Housing Provident Fund Administration Center, Chongqing 400065, P. R. China)

Abstract: With the development of the internet of things and the popularity of mobile terminals, users' demand for data rates has grown rapidly, and mobile communication systems are still facing a shortage of spectrum resources. Aiming at the non-orthogonal multiple access(NOMA) technology in cognitive radio networks, this paper studies the problem of joint optimization of non-orthogonal multiple access channels and power. First, considering the interference power of the primary user, the minimum throughput of the secondary user, and the maximum number of multiplexed users of the sub-channel, we study the allocation of channel and power resources and establish an optimization model of channel and power resource allocation to improve the energy efficiency of the system. Furthermore, in order to avoid users with similar channel state information multiplex on the same sub-channel, a suboptimal fairness adjustable channel allocation algorithm is proposed. In addition, the optimal power allocation among sub-channel multiplexed users is obtained based on continuous convex approxi-

收稿日期: 2019-10-22 修订日期: 2019-12-02 通讯作者: 贾亦真 jyzhen@sohu.com

基金项目: 国家自然科学基金(61671096); 重庆市“科技创新领军人才支持计划”(CSTCCXLJRC201710); 重庆市基础科学与前沿技术研究项目(cstc2017jcyjBX0005)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61671096); The Science and Technology Innovation Leadership Talent of Chongqing (CSTCCXLJRC201710); The Basic Science and Frontier Technology Research Program of Chongqing (cstc2017jcyjBX0005)

mation and Dinkelbach model. Simulation results show that the proposed algorithm can effectively improve system energy efficiency and user fairness.

Keywords: non-orthogonal multiple access; cognitive radio; power allocation; channel allocation; energy efficiency

0 引言

目前人们对数据速率需求呈指数型增长,迫切需要大量的频谱资源。然而,频谱资源是非常紧缺的,根据当前频谱政策,大部分可用频谱已经分配或许可给无线服务提供商,如蜂窝公司、电视、广播电台和卫星通信。据美国联邦通信委员会调查,大量许可频谱的平均使用率为15%至85%^[1]。为了解决频谱稀缺性问题,认知无线电技术成为解决该问题的关键,该技术通过允许未被授权用户,即次用户(secondary users, SUs)接入已授权用户,即主用户(primary users, PUs)未占用的频谱,同时保证主用户的服务质量,从而提升次用户的频谱效率^[2]。

在传统认知无线网络中多采用正交多址技术进行用户复用,而大量文献已经证明非正交多址接入技术频谱利用率优于正交接入技术,因此,目前如何将非正交多址接入(non-orthogonal multiple access, NOMA)技术和认知无线电结合,成为新的研究热点。NOMA与认知无线电技术的结合,更能体现出NOMA技术的优势^[3]。文献[4]提出了一种2用户信道分配算法,在该算法中,最佳子信道分配策略是子信道始终选择在该子信道上具有最强等效信道增益的用户进行匹配。文献[5]提出一种多用户信道分配算法,在该算法中,子信道倾向于选择使其能效最大的用户集合与该子信道进行匹配。文献[4-5]中,子信道均是以最大化子信道效益为准则挑选用户,因此,以上2种策略非常容易促使信道状态信息相近的用户复用到同一子信道上。而这种情况会影响接收端的正确解调性能,且会造成用户间公平性的降低^[6],这是由于系统是按照复用用户的信道增益情况进行功率分配,因此,每个复用用户所分配的功率差值较小,用户间的干扰增大。文献[7-8]考虑了基于比例公平调度的信道分配问题,其中,每个子信道上的多用户调度和功率分配结果,都可以通过最大化小区内所有用户的平均用户吞吐量乘积来获得。文献[9]研究了在认知无线电NOMA网络下行链路信道分配问题,提出了一种基于一对一匹配模型的信道分配算法,在该系统中,一个主用户和一个次用户以NOMA的方式进行复用。

文献[10-13]研究了基于稳定匹配理论的信道

分配问题。文献[10]分析了上行链路认知毫微微蜂窝网络的最大化吞吐量问题,并提出了一种基于匹配理论的分布式算法。文献[11]考虑了最大化主用户和次用户效用函数问题,并提出了一种基于匹配理论的分布式用户匹配算法。文献[12]提出了一种新的基于蚁群的信道分配算法以提高系统吞吐量和系统公平性。文献[13]提出了一种基于定价的信道分配算法。在该算法中,每个非合作的用户都是自私的,只根据自己的收入来选择供应商,供应商根据收入最大化的原则对频谱进行定价。

除了频谱效率,能效也是5G中的关键性能指标之一。在NOMA系统的能效优化方面,文献[14]研究了NOMA异构网络下行链路的子信道分配和功率分配问题以最大化系统能效。文献[15]利用李亚普诺夫优化模型方法,提出了在NOMA网络中同时考虑最小用户服务质量和最大发射功率限制的能效优化信道分配和功率分配策略。文献[16]研究了在每个子信道最多可复用2用户的情况下,讨论了NOMA系统能量效率最大化问题。

虽然上述研究工作对传统认知无线网络中的非正交多址信道分配和功率分配算法进行了充分研究,但依然未能解决信道状态信息相近的用户复用到同一子信道上的问题。本文针对认知无线网络中的非正交多址技术,综合考虑信道和功率资源,以最大化次用户网络能效。此外,为了降低算法复杂度和避免信道状况相近的用户复用在同一子信道,提出了一种次优公平性可调的信道分配算法。由于功率分配问题为非线性分式规划问题,本文采用连续凸近似、变量替换和Dinkelbach算法迭代求解最优能效值。仿真结果表明,所提算法可以显著提升系统能效。

1 系统模型与问题建模

1.1 系统模型

图1为认知无线网络中的NOMA下行链路模型。在该网络中次用户以频谱共享模式接入PUs授权的频谱。次用户基站以单天线的方式通过 M 个主用户已授权的子信道传输 N 个次用户信号。将 i 记作次用户 SU_i 的索引,定义 $n=\{1, 2, \dots, N\}$ 表示次用户的集合。将 m 记作主用户 PU_m 的索引,定

义 $m=\{1, 2, \cdots, M\}$ 表示主用户的集合。为了便于分析,主用户 PU_m 所授权的子信道也记作 m ,即子信道 m 。同时,假设 L 个次用户以 NOMA 的方式复用在于信道 m 上,其中 $L \leq L_{\max} \leq N$, L_{\max} 为子信道 m 允许的最大接入用户数,则子信道 m 上,次用户基站发送的信号为

$$x_m = \sum_{i=1}^L a_{m,i} \sqrt{p_{m,i}} x_i \quad (1)$$

(1) 式中: x_i 为次用户 SU_i 的信号; $a_{m,i}$ 是在子信道 m 上次用户基站分配给次用户 SU_i 的功率系数, $a_{m,i}=1$ 表示次用户 SU_i 被分配到子信道 m 上,反之, $a_{m,i}=0$; $p_{m,i}$ 为次用户基站分配给次用户 SU_i 的功率, $\sum_{i=1}^L p_{m,i} \leq P_m$, P_m 为次用户基站分配给子信道 m 的功率。

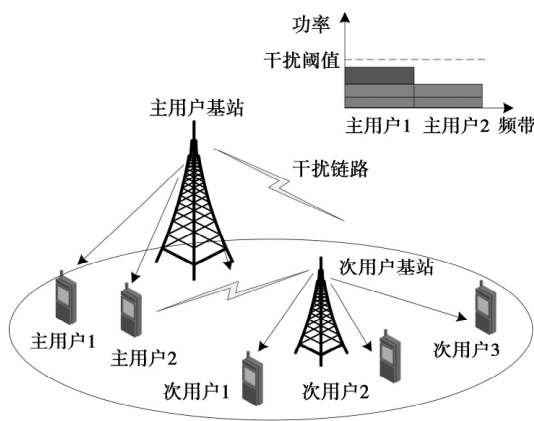


图1 下行链路系统模型

Fig.1 Downlink system model

因此,在理想信道条件下,次用户 SU_i 接收到的信号为

$$y_{m,i} = G_{m,i} a_{m,i} \sqrt{p_{m,i}} x_{m,i} + G_{m,i} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^L a_{m,j} \sqrt{p_{m,j}} x_{m,j} + h_i \sqrt{p_p} x^p + n_{m,i} \quad (2)$$

(2) 式中: $G_{m,i}$ 为子信道 m 上次用户基站到次用户 SU_i 的信道增益; h_i 为主用户基站到次用户 SU_i 的信道增益; p_p 为主用户基站发送主用户 PU_m 信号的功率; x^p 为主用户基站发送的 PU_m 信号; $n_{m,i}$ 为次用户 SU_i 在接收端均值为 0, 方差为 σ^2 的高斯白噪声。在本文中将接收端噪声与来自主用户 PU_m 的干扰功率定义为 $N_{m,i}$, 可以表示为 $N_{m,i} = \sigma^2 + |h_i|^2 \cdot p_p$, $\forall i \in L$ 。因此,在经过完美串行干扰消除 (successive interference cancellation, SIC) 之后,用户 SU_i 接收到的信号与干扰加噪声比 (signal to interfer-

ence plus noise ratio, SINR) 为

$$r_{m,i} = \frac{G_{m,i} p_{m,i}}{G_{m,i} \sum_{j=1}^{i-1} a_{m,j} p_{m,j} + N_{m,i}} = \frac{p_{m,i} H_{m,i}}{1 + H_{m,i} \sum_{j=1}^{i-1} a_{m,j} p_{m,j}} \quad (3)$$

(3) 式中: $H_{m,i} = G_{m,i}/N_{m,i}$ 表示用户 SU_i 在子信道 m 上的等效信道增益。根据香农公式,子信道 m 上所有复用用户的吞吐量为

$$R_m = \sum_{i=1}^L a_{m,i} R_{m,i} = B_m \sum_{i=1}^L a_{m,i} \log(1 + r_{m,i}) \quad (4)$$

(4) 式中: $R_{m,i}$ 表示是在子信道 m 上次用户 SU_i 的吞吐量; B_m 为子信道带宽。因此,系统总吞吐量可以表示为

$$R = \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^L a_{m,i} R_{m,i} \quad (5)$$

为了保证次用户的服务质量,每个次用户都需要满足一个最小速率,定义最小速率为 R_{\min} ,因此,次用户 SU_i 的速率约束为

$$R_{m,i} \geq R_{\min}, \forall m \in M \quad (6)$$

相对应的最小功率值为

$$p_{m,i} \geq A \left(\sum_{j=1}^{i-1} a_{m,j} p_{m,j} + \frac{1}{H_{m,i}} \right), \forall m \in M \quad (7)$$

(7) 式中: $A = 2^{\frac{R_{\min}}{B_m}} - 1$ 。

本文中,次用户在采取频谱共享接入模式占用主用户 PU_m 的频带时,也对 PU_m 的通信造成了一定的干扰,因此,需要保障 PU_m 的通信质量。故次用户基站分配给子信道 m 的功率应该限制为

$$g_m \sum_{i=1}^L a_{m,i} p_{m,i} \leq I_m, \forall m \in M \quad (8)$$

(8) 式中: g_m 为次用户基站到主用户 PU_m 的信道增益。

1.2 问题建模

在本小节中,建立认知无线网络中的 NOMA 能效优化资源分配问题。系统能效定义为系统总速率与总消耗功率之比。因此,系统能效表示为

$$EE = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^L a_{m,i} R_{m,i}}{p_t + p_c} \quad (9)$$

(9) 式中: p_t 是系统的总传输功率, $p_t = \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^L a_{m,i} p_{m,i}$; p_c 是电路固定消耗功率。能效优化问题可以写为

$$\begin{aligned}
& \arg \max_{a_{m,i}, p_{m,i}} EE \\
& \text{s.t.} \\
& C1: \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^L a_{m,i} p_{m,i} \leq P_{\text{tot}}, \forall m \in M \\
& C2: p_{m,i} \geq A \left(\sum_{j=1}^{i-1} a_{m,j} p_{m,j} + \frac{1}{H_{m,i}} \right), \forall m \in M \\
& C3: g_m \sum_{i=1}^L a_{m,i} p_{m,i} \leq I_m, \forall m \in M \\
& C4: a_{m,i} \in \{0, 1\}, \forall m \in M \\
& C5: \sum_{m=1}^M a_{m,i} \leq 1, \forall m \in M \\
& C6: \sum_{i=1}^L a_{m,i} \leq d_{\max}, \forall m \in M \quad (10)
\end{aligned}$$

(10) 式中: 约束条件 C1 表示基站总功率约束; 约束条件 C2 表示每个次用户 SU_i 达到的最小速率约束; 约束条件 C3 表示每个主用户 PU_m 可忍受的干扰功率约束; 约束条件 C5 表示一个次用户最多复用一个子信道; 约束条件 C6 表示一个子信道最多允许复用的用户个数。由于约束条件 C4 的存在, 所以问题(10) 是一个混合整数非线性分式规划问题, 因此, 很难在多项式时间内获得问题最优解。为了使该问题比较容易被解决, 所以将原始优化问题分解成 2 个问题, 信道分配问题和功率分配问题, 并进行逐一求解。

2 能效资源分配算法

2.1 次优化公平性可调的信道分配算法

考虑第 1 节中提到的情况, 在文献[4-5]的基础上, 本节提出了一种公平性可调的信道分配算法。该算法的主要思想是将用户分配到不同的子信道, 同时避免信道状态信息相近的用户复用到同一子信道内, 以提高用户的公平性和降低接收端的误码概率。由于问题(10) 的约束条件 C5 和 C6 的限制, 所以最多有 d_{\max} 个用户复用在相同子信道, 且一个用户最多只被允许接入一个子信道。在所提算法开始时, 假设基站在所有次用户之间进行均等功率分配, 即 $p_{m,i} = P_{\text{tot}}/N$, 其中, P_{tot} 为次用户基站总功率。所提算法具体描述如下。

步骤 1 基于用户的子信道信息, 构建等效信道增益矩阵 $H = |H_{m,n}|_{M \times N}$ 。

步骤 2 初始化 U_{un} 为尚未分配到任意一个子信道的用户集, $U_{\text{un}} = \{1, 2, \dots, N\}$; $H_{\text{match}}(m)$ 为记录复用到子信道 m 的用户集, $H_{\text{match}}(m)$ 为空集。

步骤 3 每一个 $n \in U_{\text{un}}$ 选择使其等效信道增益

最大的子信道 m^* 表示为

$$m^* = \arg \max_{m \in M} H_n \quad (11)$$

(11) 式中 H_n 表示矩阵 H 的第 n 列元素。

步骤 4 如果复用在子信道 m^* 上的用户数小于 d_{\max} , 则将用户 n 分配到该子信道, 并更新 U_{un} , 即将用户 n 从 U_{un} 中删除; 反之, 则进行步骤 5。

步骤 5 如果复用在子信道 m^* 上的用户数等于 d_{\max} , 则从用户集 $\{H_{\text{match}}(m^*), n\}$ 选择使子信道调度准则最大的用户集 U_{accept} , 并拒绝未被选中的用户 U_{reject} 。子信道调度准则为

$$SC_{m^*}^{\text{utility}} = \arg \max_{U \in \{H_{\text{match}}(m^*), n\}} \left(\frac{R_{m^*}}{P_{m^*} + P_c} - \varphi \frac{d_{\max} \sqrt{\prod_{i \in U} H_{m^*,i}}}{\sqrt{\prod_{i \in U} H_{m^*,i}}} \right) \quad (12)$$

(12) 式中: φ 是比例公平系数; $\frac{d_{\max} \sqrt{\prod_{i \in U} H_{m^*,i}}}{\sqrt{\prod_{i \in U} H_{m^*,i}}}$ 表示用户集 U 中所有用户的等效信道增益的几何平均值, $|U| = d_{\max}$ 。

步骤 6 更新列表 U_{un} 。从 U_{un} 中删除被接受的用户, 并添加被拒绝的用户。

步骤 7 更新矩阵 H , 将被拒绝的用户 U_{reject} 所在列的第 m^* 行置零。

步骤 8 检查 U_{un} 是否为空集, 若为空集, 则终止算法; 否则, 返回步骤 3。

算法 1 给出了本小节设计的次优公平性可调的信道分配详细求解过程。

算法 1 次优公平性可调的信道分配算法。

- 1: 构建等效信道增益矩阵 $H = |H_{m,n}|_{M \times N}$;
- 2: 初始化 U_{un} 为尚未分配到任意一个子信道的用户集, $U_{\text{un}} = \{1, 2, \dots, N\}$; $H_{\text{match}}(m)$ 为复用到子信道 m 的用户集, $H_{\text{match}}(m) = \emptyset$;
- 3: while $U_{\text{un}} \neq \emptyset$ do
- 4: 每一个 $n \in U_{\text{un}}$ 选择使其等效信道增益最大的子信道 m^* , $m^* = \arg \max_{m \in M} H_n$;
- 5: If $|H_{\text{match}}(m^*)| < d_{\max}$ do
- 6: 将用户 n 分配到该子信道 m^* 上;
- 7: 更新集合 $U_{\text{un}}, U_{\text{un}} \leftarrow U_{\text{un}} \setminus n$;
- 8: else
- 9: 从用户集 $\{H_{\text{match}}(m^*), n\}$ 选择使子信道的调度准则最大的用户集 U_{accept} , 且 $|U_{\text{accept}}| = d_{\max}$;
- 10: 子信道 m^* 拒绝未被选中的用户 U_{reject} ;
- 11: 更新集合 U_{un} 。将被接受的用户从 U_{un} 中删除, $U_{\text{un}} \leftarrow U_{\text{un}} \setminus U_{\text{accept}}$; 将被拒绝的用户加入列表, $U_{\text{un}} \leftarrow U_{\text{un}} \cup U_{\text{reject}}$;
- 12: 更新等效信道增益矩阵 H , 令第 m^* 行第 U_{reject} 列元素置零;
- 13: end if
- 14: end while

2.2 功率分配算法

在信道分配算法完成之后,为了进一步提升系统能效,基站需要为子信道内的复用用户分配合适的功率值。在满足问题(10)的功率约束条件下,基站需要确定同一子信道内不同次用户之间的最佳功率值。为了计算简单,假设认知无线电基站在子信道之间进行均等功率分配。对于给定的用户分配算法结果,根据问题(10),子信道内功率分配问题可以写为

$$\begin{aligned} & \arg \max_{p_{m,i}} EE \\ & \text{s.t.} \\ & C1: \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^L p_{m,i} \leq P_{\text{tot}} \\ & C2: p_{m,i} \geq A \left(\sum_{j=1}^{i-1} p_{m,j} + \frac{1}{H_{m,i}} \right), \forall m \in M \\ & C3: g_m \sum_{i=1}^L p_{m,i} \leq I_m, \forall m \in M \end{aligned} \quad (13)$$

通过约束条件 C1 和 C3 可知,次用户基站的最大可用发射功率为 P_{tot}^{\max} , 表示为 $P_{\text{tot}}^{\max} = \min \left(P_{\text{tot}}, \sum_{m=1}^M \frac{I_m}{g_m} \right)$ 。由于问题(13)是一个非线性分式规划问题,为了便于获得用户的最优功率分配表达式,本文使用对数函数(吞吐量公式为对数形式)下界迭代获得最优子信道功率分配值 $p_{m,i}^*$, 对数下界函数表示为

$$R_{m,i} = B_m \ln(1 + r_{m,i}) \geq B_m b_{m,i} \ln(r_{m,i}) + c_{m,i} = \widetilde{R}_{m,i} \quad (14)$$

(14) 式中: $b_{m,i} = \widetilde{r}_{m,i} / (1 + \widetilde{r}_{m,i})$; $c_{m,i} = \ln(1 + \widetilde{r}_{m,i}) - \widetilde{r}_{m,i} \ln(\widetilde{r}_{m,i}) / (1 + \widetilde{r}_{m,i})$ 。当 $R_{m,i}$ 和 $\widetilde{R}_{m,i}$ 的一阶偏导数在 $r_{m,i} = \widetilde{r}_{m,i}$ 处相等时,下界函数是紧的。同时,本文定义 $\widetilde{r}_{m,i}$ 为用户 SU_i 最后一次迭代的信干噪比。最后,进行变量替换,令 $p_{m,i} = 2^{q_{m,i}}$, 则子信道 m 上 SU_i 的吞吐量公式可以等效写为

$$\widetilde{R}_{m,i} = B_m b_{m,i} \ln \left(\sum_{j=1}^{i-1} 2^{q_{m,j}} + \frac{1}{H_{m,i}} \right) + c_{m,i} \quad (15)$$

因此,问题(13)的目标函数下界可以写为

$$EE \geq \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^L \widetilde{R}_{m,i}}{\sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^L 2^{q_{m,i}} + p_c} =$$

$$\frac{\sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^L B_m b_{m,i} \left[q_{m,i} - \ln \left(\sum_{j=1}^{i-1} 2^{q_{m,j}} + \frac{1}{H_{m,i}} \right) \right] + c_{m,i}}{\sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^L 2^{q_{m,i}} + p_c} \quad (16)$$

同理,约束条件 C2 可以写为

$$2^{q_{m,i}} \geq A \left(\sum_{j=1}^{i-1} 2^{q_{m,j}} + \frac{1}{H_{m,i}} \right), \forall m \in M \quad (17)$$

在(17)式不等式两边进行对数操作后,此时可以看作是一个凸集

$$q_{m,i} \geq \ln(A) + \ln \left(\sum_{j=1}^{i-1} 2^{q_{m,j}} + \frac{1}{H_{m,i}} \right), \forall m \in M \quad (18)$$

因此,能效优化功率分配问题可以进一步表示为

$$\arg \max_{q_{m,i}} \frac{f(q_{m,i})}{g(q_{m,i})}$$

s.t.

$$C1: \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^L 2^{q_{m,i}} \leq P_{\text{tot}}$$

$$C2: q_{m,i} \geq \ln(A) + \ln \left(\sum_{j=1}^{i-1} 2^{q_{m,j}} + \frac{1}{H_{m,i}} \right), \forall m \in M$$

$$C3: g_m \sum_{i=1}^L 2^{q_{m,i}} \leq I_m, \forall m \in M \quad (19)$$

(19) 式中,令 $f(q_{m,i}) = \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^L B_m b_{m,i} \left[q_{m,i} - \ln \left(\sum_{j=1}^{i-1} 2^{q_{m,j}} + \frac{1}{H_{m,i}} \right) \right] + c_{m,i}$

$g(q_{m,i}) = \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^L 2^{q_{m,i}} + p_c$ 。根据文献[17]可知,问题(19)是一个分子为凹函数,分母为凸函数,约束条件为凸集的分式规划问题。定理1证明了问题(19)目标函数的凹凸性。因此,可以采用 Dinkelbach 算法进行求解此问题。

定理1 问题(19)的目标函数分子部分为凹函数,分母部分为凸函数。

证明 问题(19)的目标函数可以写为

$$\frac{f(q_{m,i})}{g(q_{m,i})} = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^L B_m b_{m,i} \left[q_{m,i} - \ln \left(\sum_{j=1}^{i-1} 2^{q_{m,j}} + \frac{1}{H_{m,i}} \right) \right] + c_{m,i}}{\sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^L 2^{q_{m,i}} + p_c} \quad (20)$$

由于 $g(q_{m,i})$ 关于 $q_{m,i}$ 的二阶偏导数大于零,即 $\nabla^2 g(q_{m,i}) = (\ln 2)^2 2^{q_{m,i}} > 0$, 所以 $g(q_{m,i})$ 是关于 $q_{m,i}$

的凸函数。而 $f(q_{m,i})$ 可以写为

$$f(q_{m,i}) = \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^L \left[B_m b_{m,i} q_{m,i} - B_m b_{m,i} \text{lb} \left(\sum_{j=1}^{i-1} 2^{q_{m,j}} + \frac{1}{H_{m,i}} \right) + c_{m,i} \right] \quad (21)$$

显然, (21) 式的第 1 项 $B_m b_{m,i} q_{m,i}$ 是关于 $q_{m,i}$ 的仿射函数, 可以看作是凸函数, 也可以看作是凹函数, 第 3 项 $c_{m,i}$ 与 $q_{m,i}$ 无关。因此, 只需要证明第 2 项 $-B_m b_{m,i} \text{lb} \left(\sum_{j=1}^{i-1} 2^{q_{m,j}} + \frac{1}{H_{m,i}} \right)$ 是关于 $q_{m,i}$ 的凹函数即可。因此, 定义函数为

$$h_1(q_{m,i}) = B_m b_{m,i} \text{lb} \left(\sum_{j=1}^{i-1} 2^{q_{m,j}} + \frac{1}{H_{m,i}} \right) \quad (22)$$

由于 $h_1(q_{m,i})$ 为指数和对数函数, 而指数和对数函数为凸函数, 因此 $h_1(q_{m,i})$ 为凸函数。根据凸优化理论可知, $-h_1(q_{m,i})$ 为凹函数。因此, (21) 式的第 2 项为凹函数。故 $f(q_{m,i})$ 为凹函数。到此得证, 问题 (19) 的目标函数分子部分为凹函数, 分母部分为凸函数。

Dinkelbach 算法的核心思想是将分式形式等效转化为含参数 t 的减法形式。因此, 问题 (19) 可以等效写为

$$\begin{aligned} \arg \max_{q_{m,i}} F(t) &= f(q_{m,i}) - tg(q_{m,i}) \\ \text{s.t. } &C1, C2, C3 \end{aligned} \quad (23)$$

(23) 式中, t 表示为小区总能效值, $t = f(q_{m,i}) / g(q_{m,i})$, $t \geq 0$ 。通过观察可以得知, 对于给定的 $q_{m,i}$ 值, 由于 $f(q_{m,i})$ 和 $g(q_{m,i})$ 非负, 因此 $F(t)$ 是关于 t 的一条斜率为负值, 纵截距大于等于零的直线。因此, 当 t 值一定时, 如果有 $q_{m,i}$ 值使得 $F(t)$ 大于零, 可以得出 $f(q_{m,i}) - tg(q_{m,i}) > 0$, 从而有 $f(q_{m,i}) / g(q_{m,i}) > t$ 。这表明此时的 $q_{m,i}$ 值可以使系统获得一个比当前 t 值更大的能效值。故将 t 值更新为 t_{new} , $t_{\text{new}} = f(q_{m,i}) / g(q_{m,i})$ 。因此, 一定存在一个 $q_{m,i}^*$ 值使得 $F(t) = 0$, 其他值使得 $F(t) < 0$ 。当 $q_{m,i} = q_{m,i}^*$ 时, 此时对应的 t 值就是最优系统能效值 t^* , 从而有 $F(t^*) = f(q_{m,i}^*) - t^* g(q_{m,i}^*) = 0$ 。在本小节中, 采用对偶算法求解最优的 $q_{m,i}^*$ 。对于给定的 t , 问题 (23) 的拉格朗日函数为

$$L(q, t, \lambda, \mu, \nu) = \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^L [B_m b_{m,i} q_{m,i} + c_{m,i}] - t \left(\sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^L 2^{q_{m,i}} + p_c \right) -$$

$$\begin{aligned} &\sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^L B_m b_{m,i} \text{lb} \left(\sum_{j=1}^{i-1} 2^{q_{m,j}} + \frac{1}{H_{m,i}} \right) + \\ &\lambda (P_{\text{tot}} - \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^L 2^{q_{m,i}}) + \\ &\sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^L \mu_{m,i} \left(q_{m,i} - \text{lb} \left(\sum_{j=1}^{i-1} 2^{q_{m,j}} + \frac{1}{H_{m,i}} \right) - \text{lb}(A) \right) + \\ &\sum_{m=1}^M \nu_m (I_m - g_m \sum_{i=1}^L 2^{q_{m,i}}) \end{aligned} \quad (24)$$

(24) 式中 λ , μ 和 ν 分别为拉格朗日乘子。则对于给定的 t , (24) 式可以重新写为

$$\begin{aligned} L(q, t, \lambda, \mu, \nu) &= \sum_{m=1}^M L_m(q, t, \lambda, \mu, \nu) + \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^L c_{m,i} - tp_c + \\ &\lambda P_{\text{tot}} + \sum_{m=1}^M \nu_m I_m - \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^L \mu_{m,i} \text{lb}(A) \end{aligned} \quad (25)$$

(25) 式中,

$$\begin{aligned} L_m(q, t, \lambda, \mu, \nu) &= \sum_{i=1}^L B_m b_{m,i} \left[q_{m,i} - \text{lb} \left(\sum_{j=1}^{i-1} 2^{q_{m,j}} + \frac{1}{H_{m,i}} \right) \right] - \\ &t \sum_{i=1}^L 2^{q_{m,i}} + \sum_{i=1}^L \mu_{m,i} \left(q_{m,i} - \text{lb} \left(\sum_{j=1}^{i-1} 2^{q_{m,j}} + \frac{1}{H_{m,i}} \right) \right) - \\ &\lambda \sum_{i=1}^L 2^{q_{m,i}} - \nu_m g_m \sum_{i=1}^L 2^{q_{m,i}} \end{aligned} \quad (26)$$

因此, 对于给定的 t , 问题 (23) 的对偶问题可以写为

$$\begin{aligned} \min_{\lambda, \mu, \nu} \max_q L(q, t, \lambda, \mu, \nu) \\ \text{s.t. } \lambda \geq 0, \mu \geq 0, \nu \geq 0, q \geq 0 \end{aligned} \quad (27)$$

对偶问题 (27) 可以由 2 层算法迭代进行求解。即内层对于给定的能效值 t , 使用次梯度算法求解出子信道最优功率值 $p^* = 2^{q^*}$, 而外层则采用 Dinkelbach 方法求解系统最优能效值 t^* 。则根据 KKT 条件, 最优值 $q_{m,i}^*$ 的结果为

$$q_{m,i}^* = \text{lb} \left(\frac{B_m b_{m,i} + \mu_{m,i}}{\sum_{j=1}^L (B_m b_{m,j} + \mu_{m,j}) \left(\frac{r_{m,j}}{2^{q_{m,j}}} \right) + (t - \lambda + \nu_m g_m) \ln 2} \right) \quad (28)$$

算法 2 给出了问题 (27) 的详细求解过程。在算法 2 的迭代过程中, 拉格朗日乘子将按照下列公式进行更新。

$$\lambda^{(k+1)} = [\lambda^{(k)} - s_1(k) (P_{\text{tot}} - \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^L 2^{q_{m,i}})]^+ \quad (29)$$

$$\boldsymbol{\nu}_m^{(k+1)} = [\boldsymbol{\nu}_m^{(k)} - s_2(k) (I_m - g_m \sum_{i=1}^L 2^{q_{m,i}})]^+ \quad (30)$$

$$\boldsymbol{\mu}_{m,i}^{(k+1)} = \left[\boldsymbol{\mu}_{m,i}^{(k)} - s_3(k) \left(q_{m,i} - \ln \left(\sum_{j=1}^{i-1} 2^{q_{m,j}} + \frac{1}{H_{m,i}} \right) - \ln(A) \right) \right]^+ \quad (31)$$

(29) — (31) 式中: $[x]^+ = \max\{0, x\}$; k 是迭代索引; $s_1(k)$ 、 $s_2(k)$ 和 $s_3(k)$ 是每次迭代中的步长。算法 2 的详细步骤如下。

算法 2 可迭代功率分配算法。

```

1: 初始化外层迭代索引  $n$ , 外层最大迭代次数  $N_{\max}$ , 外层容忍误差  $\varepsilon$ ;
2: while  $F(t_n) \geq \varepsilon$  or  $n \leq N_{\max}$  do
3: 初始化内层迭代索引  $k$ , 内层最大迭代次数  $K_{\max}$ , 内层容忍误差  $\zeta$ ;
4: while  $|\lambda(k+1) - \lambda(k)| + |\boldsymbol{\mu}(k+1) - \boldsymbol{\mu}(k)| + |\boldsymbol{\nu}(k+1) - \boldsymbol{\nu}(k)| \geq \zeta$  or  $k \leq K_{\max}$  do
5:   for  $m = 1: M$  do
6:     for  $i = 1: L$  do
7:       对于给定的  $t$ , 计算  $\widetilde{r}_{m,i}(k)$ ,  $b_{m,i}(k)$  和  $c_{m,i}(k)$ ;
8:       根据式 (28) 计算  $q_{m,i}(k)$ ;
9:       计算  $p(k) = 2^{q(k)}$ ;
10:      根据 (29) — (31) 式更新拉格朗日乘子  $\lambda$ ,  $\boldsymbol{\mu}$  和  $\boldsymbol{\nu}$ ;
11:    end for
12:  end for
13: end while
14: 计算  $F(t_n) = f(\boldsymbol{q}_n^*) - t_n g(\boldsymbol{q}_n^*)$ ;
15: 更新  $t_{n+1} = f(\boldsymbol{q}_n^*) / g(\boldsymbol{q}_n^*)$ ;
16:  $n = n + 1$ ;
17: end while

```

3 仿真与分析

3.1 算法复杂度分析

在算法 1 中, 所提算法的复杂度主要依赖于在等效信道增益矩阵 \boldsymbol{H} 中查找最大值元素的重复操作, 因此, 所提算法的复杂度为 $O(\ln N)$ 。在算法 2 中, 假设外层算法和内层算法的最大迭代次数分别为 N_{\max} 和 K_{\max} 。在内层算法的每次迭代中, 由于采用次梯度算法, 所以最多需要计算信干噪比 $\widetilde{r}_{m,i} ML$ 次、计算 $b_{m,i} ML$ 次、计算 $c_{m,i} ML$ 次、计算最优 q 值 ML 次, 以及更新拉格朗日乘子 λ , $\boldsymbol{\mu}$ 和 $\boldsymbol{\nu}$ 分别需要计算 1, M 和 ML 次。因此, 内层算法的复杂度为

$O(K_{\max} ML)$ 。而外层算法的复杂度为 N_{\max} , 因此, 算法 2 的整体复杂度为 $O(N_{\max} K_{\max} ML)$ 。文献 [4] 的子信道分配算法复杂度同样依赖于等效信道增益矩阵 \boldsymbol{H} 中查找最大值元素的重复操作, 因此, 其复杂度为 $O(\ln N)$ 。由于文献 [5] 所提算法中子信道分配问题是非凸的, 因此, 通过穷举搜索得到最优的子信道分配, 其算法复杂度为 $O(N! 2^m)$ 。

3.2 仿真结果

在下行链路仿真过程中, 仿真参数具体设置如下: 接收端的总噪声功率为 -75 dBm; 电路固定消耗为 30 dBm。每个主用户的干扰功率值为 -45 dBm; 信道增益模型为 $G_{m,i} = g_{m,i} d_i^{-\alpha/2}$, $g_{m,i}$ 为高斯随机变量; d_i 为次用户到次用户基站的距离, 链路衰减因子 $\alpha = 3$; 忽略用户距离的因素, 将用户到基站的距离均设置为 80 m; 每个主用户授权的子信道带宽为 1 Hz; 每个次用户最小吞吐量取值为 $1 \sim 6$ bit/s/Hz。图 2 描述了在不同基站发射功率情况下, 所提算法的迭代收敛过程, 其中, 每个子信道最多复用 3 个用户。从图 2 中可以看出, 在不超过 8 次迭代的情况下, 所提算法可以获得稳定的系统能效值。此外, 还可以观察到, 基站功率越大, 系统能效就越大。这是因为随着基站功率的增大, 基站可分配给用户的功率越多, 系统吞吐量的增长幅度大于所消耗功率的增加幅度, 所以系统能效就越大。

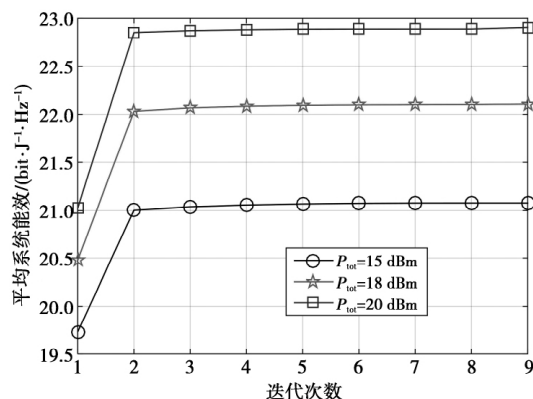


图 2 不同基站发射功率下算法的迭代收敛过程

Fig.2 Iterative convergence process of algorithm under different base station transmit power

图 3 描述了不同信道分配算法情况下, 平均系统能效与次用户基站总功率的关系。在仿真过程中, 采用随机配对算法^[18]、等效信道增益间隔信道分配算法^[19]以及文献 [4-5] 所提算法与本文所提信道分配算法进行对比。从图 3 中可以看出, 本文所提信道分配算法能效略低于文献 [4-5] 所提算法性能,

而优于等信道增益间隔信道分配算法和随机配对算法。

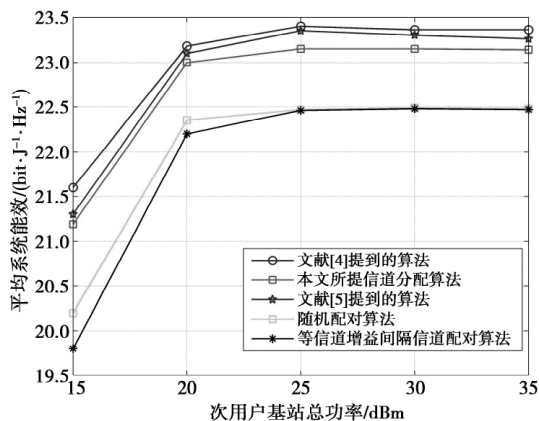


图 3 平均系统能效与次用户基站总功率的关系

Fig.3 Relationship between the average system energy efficiency and the total power of the secondary user base station

图 4 描述了不同信道分配算法情况下,用户公平性指数和次用户基站总功率的关系。为了描述用户的公平性,采用 Jain 公平指数进行衡量,Jain 公平指数可以表示为 $(\sum_{i=1}^N R_i) / (N \sum_{i=1}^N R_i^2)$,其中 R_i 表示次用户 SU_i 的吞吐量, N 表示小区总次用户数。Jain 公平指数为 0~1。Jain 公平指数越大,说明用户间的公平性越好。

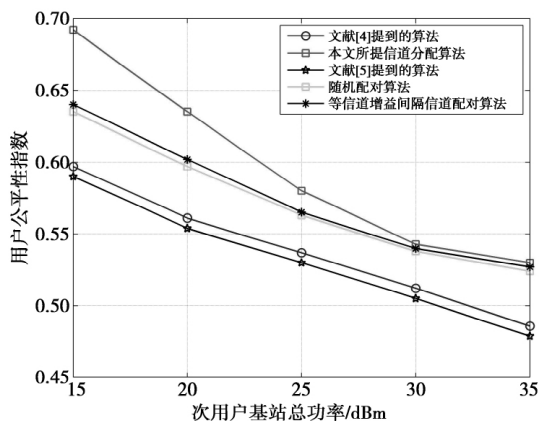


图 4 用户公平性指数与次用户基站总功率的关系

Fig.4 Relationship between user fairness index and total power of secondary user base stations

同时从图 4 中可以看出,Jain 公平指数随着基站总功率值的增加而减少。此外,与其他 4 种信道分配算法相比,所提算法可以获得更好的公平指数,这表明所提算法具有良好的公平性。

图 5 描述了不同功率分配算法情况下,平均系

统能效与次用户基站总功率的关系,其中,每个子信道最多复用 3 个用户。从图 5 中可以看出,次用户基站总功率存在一个满足最优系统能效的功率点,称该点为绿色通信点。当基站总功率小于该绿色通信点时,所提算法能够实现最大化系统能效,当基站总功率大于该点时,所提算法依然能够保持最优能效,而分数功率分配算法和固定功率分配算法以及 OFDMA 系统的能效却逐渐下降。当基站总功率为 20 dBm 时,所提算法性能分别优于分数功率分配算法 0.13%、固定功率分配算法 4.43%、OFDMA 系统 18.56%。当基站总功率为 30 dBm 时,所提算法性能相较于分数功率分配算法、固定功率分配算法和 OFDMA 系统,分别增长了 44.7%、46.18% 和 58.6%。

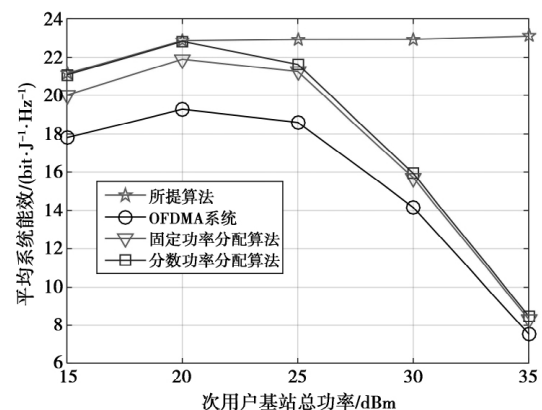


图 5 平均系统能效与次用户基站总功率的关系

Fig.5 Relationship between the average system energy efficiency and the total power of the secondary user base station

图 6 描述了不同功率分配算法情况下,平均系统能效与最小吞吐量的关系,其中,基站总功率为 30 dBm。最小吞吐量越大,表示对系统所需的最低消耗功率就越大。从图 6 中可以看出,当最小吞吐量值小于 4 时,系统平均能效首先略微上升然后略微下降,当最小吞吐量值大于 4 时,系统平均能效明显开始减小。此外,所提算法的平均系统能效始终优于其他 3 种算法,这表明了所提算法的有效性。

图 7 描述了不同功率分配算法情况下,平均系统能效与主用户干扰功率的关系,其中,基站总功率为 30 dBm,用户最小吞吐量为 1 bit/s/Hz。从图 7 中可以看出,当主用户干扰功率取值为 -90 ~ -80 dBm 时,系统能效为 0。这是因为主用户干扰功率取值较小限制了基站的总发射功率,从而导致基站可用功率较小,而此时基站可用功率无法满足所有用户的最小吞吐量要求,所以基站停止提供服务,系

统能效为0。当主用户干扰功率取值超过 -80 dBm后,系统能效逐渐增加,直至收敛到固定值。这表明当基站总功率一定时,存在一个主用户干扰功率最小值点。当主用户干扰功率取值小于该点时,基站发射功率受主用户干扰功率限制,当超过该点时,基站始终能够以最大功率服务用户。

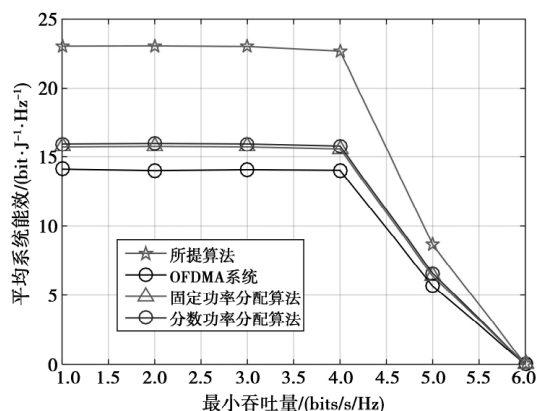


图6 平均系统能效与最小吞吐量的关系

Fig.6 Average system energy efficiency versus minimum throughput

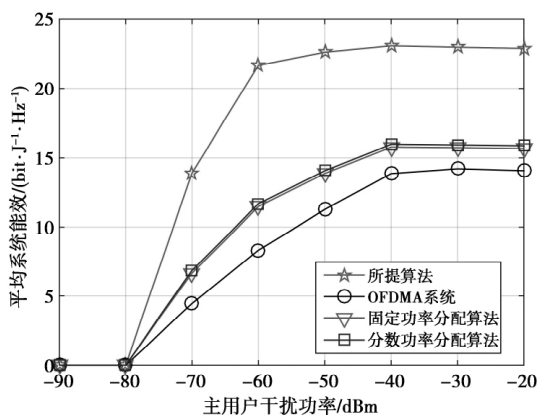


图7 平均系统能效与主用户干扰功率的关系

Fig.7 Relationship between average system energy efficiency and main user interference power

4 结 论

本文针对认知无线网络中的非正交多址下行链路,研究了联合优化信道分配和功率分配算法以最大化系统能效。考虑基站总功率限制,次用户最小吞吐量限制和主用户干扰功率限制以及子信道最大可接入用户数限制,构建能效优化资源分配问题。为了解决该问题,将原始问题分解为信道分配问题和功率分配问题。针对信道分配问题,首先阐述了现有低复杂度信道分配算法的原理,然后针对此类算法的不足,通过引入比例公平系数,构建了新的子

信道调度准则,进而提出了一种次优公平性可调的信道分配算法,并详细描述了所提信道分配算法的原理。针对功率分配问题,基于所提信道分配算法的结果,由于该问题是非线性分式规划问题,所以采用连续凸近似、变量替换等操作将非线性问题等效转化为凸问题,然后采用Dinkelbach算法进行求解,最后仿真验证所提算法的有效性。

虽然本文对认知无线网络中的非正交多址子信道内的功率分配和信道分配算法做了大量的研究,力争在研究中做到深入且全面,然而本文所涉及到的内容尚不够完善,还需要进一步研究,如应更加考虑子信道间的功率分配问题。在本文的研究中,为了方便计算,假设子信道之间进行均等功率分配算法,然而均等功率分配算法并没有考虑子信道的信道增益问题,因此,其更适合信道之间相互独立的场景,故不能很好地提升时变场景下的系统性能。因此,在未来的研究中,子信道之间的功率分配问题可以作为一个研究重点。

参考文献:

- [1] HASSAN M R, KARMAKAR G C, KAMRUZZAMAN J, et al. Exclusive use spectrum access trading models in cognitive radio networks: a survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(4): 2192-2231.
- [2] AHMED E, GANI A, ABOLFAZLI S, et al. Channel assignment algorithms in cognitive radio networks: taxonomy, open issues, and challenges [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(1): 795-823.
- [3] ISLAM S M R, AVAZOV N, DOBREO A, et al. Power-domain non-orthogonal multiple access (NOMA) in 5G systems: potentials and challenges [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(2): 721-742.
- [4] LIU Q, GAO H, TAN F, et al. Energy efficient resource allocation in multi-user downlink non-orthogonal multiple access systems [C]//2017 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Singapore: IEEE, 2017: 1-6.
- [5] FANG F, ZHANG H, CHENG J, et al. Joint user scheduling and power allocation optimization for energy-efficient NOMA systems with imperfect CSI [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(12): 2874-2885.
- [6] CHOI J. Power allocation for max-sum rate and max-min rate proportional fairness in NOMA [J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(10): 2055-2058.
- [7] HIGUCHI K, BENJEBBOUR A. Non-orthogonal Multiple

- Access (NOMA) with Successive Interference Cancellation for Future Radio Access [J]. IEICE Transactions on Communications, 2015, 98(3): 403-414.
- [8] UMEHARA J, KISHIYAMA Y, HIGUCHI K. Enhancing user fairness in non-orthogonal access with successive interference cancellation for cellular downlink [C]//2012 IEEE International Conference on Communication Systems (ICCS). Singapore: IEEE, 2012: 324-328.
- [9] LIANG W, DING Z, LI Y, et al. User pairing for downlink non-orthogonal multiple access networks using matching algorithm [J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(12): 5319-5332.
- [10] LEANH T, TRAN N H, SAAD W, et al. Matching theory for distributed user association and resource allocation in cognitive femtocell network [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(9): 8413-8428.
- [11] ZHANG Y, GU Y, MIAO P, et al. Distributed matching based spectrum allocation in cognitive radio networks [C]//2014 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Austin, TX: IEEE, 2014: 864-869.
- [12] SATRIA M B, MUSTIKA I W, WIDYAWAN W. Resource allocation in cognitive radio networks based on modified ant colony optimization [C]//2018 4th International Conference on Science and Technology (ICST). Yogyakarta: IEEE, 2018: 1-5.
- [13] WANG W, LI B. Market-driven bandwidth allocation in selfish overlay networks [C]// Proceedings IEEE 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Miami, FL: IEEE, 2005: 2578-2589.
- [14] ZHANG H, FANG F, CHENG J, et al. Energy-efficient resource allocation in NOMA heterogeneous networks [J]. IEEE Wireless Communications, 2018, 25(2): 48-53.
- [15] ZHANG H, WANG B, JIANG C, et al. Energy efficient dynamic resource optimization in NOMA system [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(9): 5671-5683.
- [16] LIU Q, GAO H, TAN F, et al. Energy efficient resource allocation in multi-user downlink non-orthogonal multiple access systems [C]//2017 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Singapore: IEEE, 2017: 1-6.
- [17] ZAPPONE A, JORSWIECK E. Energy efficiency in wireless networks via fractional programming theory [J]. Communications and Information Theory, 2015, 11(3-4): 185-396.
- [18] TABASSUM H, ALI M S, HOSSAIN E, et al. Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) in Cellular Uplink and Downlink: Challenges and Enabling Techniques [J]. 2016, 6(1): 321-342.
- [19] ZHANG H, ZHANG D, MENG W, et al. User pairing algorithm with SIC in non-orthogonal multiple access system [C]//2016 IEEE International Conference on Communications (ICC). Kuala Lumpur: IEEE, 2016: 1-6.

作者简介:



贾亦真(1983—),男,河北邢台人,博士,主要研究方向为空间信息网络、5G、卫星通信等。E-mail: jyzhen@sohu.com。



姚枝秀(1994—),女,贵州兴义人,硕士研究生,主要研究方向为移动边缘计算。E-mail: zhixiuyao@163.com。



周梦圆(1992—),女,河北邢台人,硕士研究生,主要研究方向为移动边缘计算。E-mail: 1576448340@qq.com。



熊 炜(1978—),女,重庆人,工学硕士,现为重庆市住房公积金管理中心信息处高级工程师,主要研究方向为信息安全、大数据等。E-mail: swaol2009@163.com。

(编辑:王敏琦)