

CR-RSMA 网络接入控制策略研究

谢蓓妍¹, 叶迎晖¹, 刘洪武², 卢光跃¹

(1. 西安邮电大学陕西省信息通信网络及安全重点实验室, 陕西 西安 710121;

2. 山东交通学院信息科学与电气工程学院, 山东 济南 250357)

摘要: 针对多个次用户的速率分割多址接入技术辅助的认知无线电 (CR-RSMA, cognitive radio-inspired rate splitting multiple access) 网络设计了一种接入控制策略, 在主用户实现与正交多址接入 (OMA, orthogonal multiple access) 相同的中断性能并满足次用户通信服务质量 (QoS, quality of service) 需求的前提下, 让更多的次用户接入主用户频段, 并在此基础上最大化次用户吞吐量之和。该策略考虑次用户 QoS 约束, 联合优化次用户发射功率分配因子和接入次用户集合, 推导出最优功率分配因子的闭合表达式, 进而求得次用户最大通信速率和最小通信时间, 在此基础上利用贪婪搜索算法确定最终接入的次用户, 最后通过优化时间资源实现所有接入次用户吞吐量之和的最大化。仿真结果表明, 该策略相比于非正交多址接入技术辅助的认知无线电 (CR-NOMA, cognitive radio-inspired non-orthogonal multiple access) 网络在接入用户数和吞吐量方面均表现出更优越的性能。

关键词: 认知无线电; 速率分割多址接入; 接入控制策略; 资源分配

中图分类号: TN92

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2024.00402

Research on access control strategy for a CR-RSMA network

XIE Beiyuan¹, YE Yinghui¹, LIU Hongwu², LU Guangyue¹

1. Shaanxi Key Laboratory of Information Communication Network and Security, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China

2. School of Information Science and Electrical Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China

Abstract: An access control strategy was designed for the cognitive radio-inspired rate splitting multiple access (CR-RSMA) network with multiple secondary users. This strategy aimed to enable more secondary users to access the primary user's frequency band while ensuring that the primary user achieved the same outage performance as orthogonal multiple access (OMA) and satisfying the quality of service (QoS) requirements for communications of secondary users. The sum throughput of secondary users were maximized on this basis. Considering the QoS constraints of secondary users, the strategy jointly optimized the secondary users' transmit power allocation factor and the set of accessible secondary users, and derived the closed-form expression of the optimal power allocation factor. Then, the maximum communication rate and minimum communication time of secondary users were obtained. Building upon this, the greedy search algorithm was employed to determine the final set of accessed secondary users. Finally, the strategy optimized time resources to maximize the sum throughput of all admitted secondary users. Simulation results demonstrate that the proposed strategy outperforms the cognitive radio-inspired non-orthogonal multiple access (CR-NOMA) network in terms of the number of accessible users and throughput.

Key words: cognitive radio, rate splitting multiple access, access control strategy, resource allocation

收稿日期: 2024-03-08; 修回日期: 2024-06-26

通信作者: 叶迎晖, connectyyh@126.com

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 62201451); 陕西省创新能力支撑计划项目 (No. 2024ZC-KJXX-016)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No. 62201451), The Innovation Capability Support Program of Shaanxi (No. 2024ZC-KJXX-016)

0 引言

随着大规模物联网的部署与发展, 千亿级终端设备对频谱资源的迫切需求与可用频谱资源匮乏之间的矛盾愈发突出^[1-5]。近年来, 认知无线电 (CR, cognitive radio) 技术^[6-9]因其卓越的频谱效率而备受关注, 其核心思想是允许次用户 (如物联网节点) 与主用户 (如蜂窝用户) 共享频谱资源从而提高频谱利用率^[10-11]。为提高次用户的接入效率, 已有相关研究将非正交多址接入 (NOMA, non-orthogonal multiple access) 技术引入 CR 中, 形成非正交多址接入技术辅助的认知无线电 (CR-NOMA, cognitive radio-inspired non-orthogonal multiple access) 网络^[12-14]。相较于传统的正交多址接入 (OMA, orthogonal multiple access) 技术, NOMA 虽然在吞吐量、频谱效率和公平性等方面均有提升^[15-18], 但也存在一定的局限性。接收端采用串行干扰消除 (SIC, successive interference cancellation) 技术^[19]的情况下, NOMA 只能实现多址信道容量区域有限数量的速率边界点^[20]接入。然而速率分割多址接入 (RSMA, rate splitting multiple access) 技术在支持多用户共享频谱的同时, 能够动态地分割用户信息, 从而更加灵活地管理干扰并获得完整的速率边界^[21]。基于此, 学者们将 CR 与 RSMA 相结合, 提出了速率分割多址接入技术辅助的认知无线电 (CR-RSMA, cognitive radio-inspired rate splitting multiple access) 网络。该网络中, 次用户通过执行速率分割 (RS, rate splitting), 动态调控功率分配因子来控制其接入对主用户造成的干扰, 实现在保证主用户传输性能的同时提升次用户传输性能的目标。

针对 CR-NOMA 网络, 文献[22]提出了一种自适应速率分割方法, 在保证该网络主用户实现与 OMA 系统相同中断性能的前提下, 对次用户的信息进行分割从而最大化次用户的可实现速率, 仿真结果表明, 相较于传统的 CR-NOMA, Liu 等^[22]将 RS 应用于 CR-NOMA, 提升了次用户的中断性能。文献[23]将文献[22]的工作拓展到了多个次用户场景下, 并分析了 CR-RSMA 网络中最优信道的次用户中断性能, 联合优化次用户的发射功率、目标速率和解码顺序, 从而最大化了次用户的可实现速率, 仿真结果表明 CR-RSMA 相比 CR-NOMA 实现

了更优的性能。文献[24]在分析最优解码顺序的基础上, 推导了上行 CR-NOMA 和 CR-RSMA 网络中次用户的遍历和速率, 仿真验证了 CR-RSMA 网络中次用户的遍历和速率优于 CR-NOMA。鉴于 CR-RSMA 优越的传输性能, 文献[25]将该网络应用于卫星通信, 通过优化近地轨道 (LEO, low earth orbit) 卫星通信的功率分配系数和子载波波束分配来最大化 LEO 卫星通信系统的和速率。文献[26]将 CR-RSMA 与移动边缘计算 (MEC, mobile edge computing) 结合, 在保证该网络主用户实现与 OMA 系统相同卸载性能的前提下, 通过联合优化次用户的功率分配系数、速率分割因子和解码顺序, 得到了次用户最大可实现速率。文献[27]将 CR-RSMA 与智能反射表面 (IRS, intelligent reflection surface) 结合, 在满足主用户通信服务质量 (QoS, quality of service) 需求的前提下, 考虑部署 IRS 辅助认知型次用户与基站通信, 通过对传输速率分配方案和解码顺序进行联合优化, 以达到次用户最大的可实现速率, 仿真结果表明该方案能够有效地提升次用户的中断性能。

综上所述, CR-RSMA 网络相较 CR-NOMA 网络可以大幅度提升次用户的性能。然而, 已有研究^[22-27]大多针对单个次用户接入的 CR-RSMA 网络, 无法满足多个次用户接入的需求。尽管文献[23]考虑了多个次用户存在的场景, 但其仅选择信道最优的次用户接入主用户频段。随着无线通信的发展, 要求每平方千米支持的连接用户数不断增加, 大规模连接的需求变得越来越迫切^[28-31], 因此, 多个次用户场景下的 CR-RSMA 网络的研究尤为重要。本文针对多个次用户的 CR-RSMA 网络, 设计了一种接入控制策略, 该策略在保证主用户实现与 OMA 相同的中断性能并满足次用户 QoS 需求的前提下, 尽可能使更多的次用户接入主用户频段, 从而满足目前的通信需求, 并在此基础上最大化次用户吞吐量之和。为实现上述目标, 必须要解决如下问题:

- 1) 在给定的次用户中尽可能多的选出符合要求的次用户, 即在次用户接入时, 保证主用户中断性能与 OMA 一致, 且满足次用户的 QoS 需求;

- 2) 选出满足接入条件的次用户后, 进行合理的资源分配, 从而最大化次用户吞吐量之和。

为了解决上述问题, 首先通过优化接入次用户构成的集合, 构建一个接入次用户数最大化优化问

题,并根据主用户的中断性能是否与OMA一致,将原优化问题分解为两个子优化问题。对于每个子问题,考虑次用户是否满足其自身的QoS约束。在此基础上,联合优化次用户发射功率分配因子和满足自身QoS约束的次用户构成的集合,旨在最大化能够成功接入主用户频段的次用户数量。通过优化理论推导出最优发射功率分配因子的闭合表达式,并将其代入速率公式得到次用户的最大通信速率。在此基础上,结合QoS约束获得每个次用户所需最小通信时间的闭合表达式,并使用贪婪搜索算法确定最终接入主用户频段的次用户。需要指出的是,由于本文推导了每个次用户所需最小通信时间的闭合表达式,所以当次用户数目增加时,使用贪婪搜索算法依旧可以很快地确定最终接入主用户频段的次用户。最后,通过优化时间资源最大化接入次用户的吞吐量之和。

1 系统模型

系统模型如图1所示,本文考虑了一个由基站(BS, base station)、主用户 U_0 、 K 个次用户 U_k ($1 \leq k \leq K$)组成的上行CR-RSMA网络,其中,每个用户配备一根单天线,次用户集 $\mathcal{K} \triangleq \{1, 2, \dots, k, \dots, K\}$ 。假设网络中所有信道为准静态瑞利衰落信道,即信道增益在一个传输时隙内保持不变。 h_0 和 h_k ($1 \leq k \leq K$)分别表示主用户 U_0 和第 k 个次用户 U_k 到BS的信道系数, $h_j \sim \mathcal{CN}(0, d_j^{\nu_j})$ 。令 $\lambda_j = d_j^{\nu_j}$, $j \in \{0, k\}$,其中, ν_j 表示路径损耗因子, d_j 表示各节点间距离。

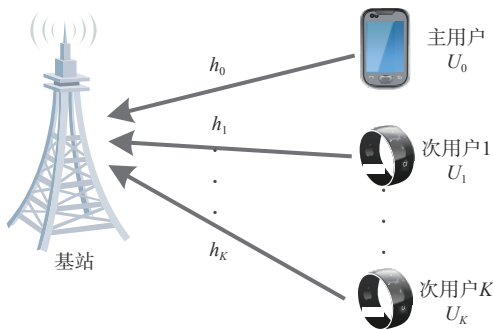


图1 系统模型

为了避免次用户间的干扰,次用户采用时分多址接入的方式通信。假设整个传输时隙为 T ,且可将其分为若干个子时隙 $\{t_1, t_2, \dots, t_k, \dots, t_K\}$ 。在每个

子时隙 t_k 内,主用户 U_0 与次用户 U_k 采用RSMA的方式同时向基站发送消息。将次用户 U_k 的信号 x_k 分割为 $x_{k,1}$ 和 $x_{k,2}$ 两部分,分别代表次用户分割之后的发射信号。此时,BS的接收信号表示为

$$y_k = \sqrt{P_0} h_0 x_0 + \sqrt{\alpha_k P_s} h_k x_{k,1} + \sqrt{(1 - \alpha_k) P_s} h_k x_{k,2} + w, \forall k \in \mathcal{K} \quad (1)$$

其中, P_0 和 P_s 分别代表主用户 U_0 和次用户 U_k 的发射功率, x_0 为主用户 U_0 的发射信号。 α_k 为第 k 个次用户 U_k 的发射功率分配因子, w 为加性高斯白噪声(AWGN, additive white Gaussian noise),且服从均值为0、方差为 σ^2 的高斯分布。

在基站处,采用SIC技术对主用户和次用户的信号进行解码,其解码顺序为^[20]: $x_{k,1} \rightarrow x_0 \rightarrow x_{k,2}$ 。因此, $x_{k,1}$ 、 x_0 和 $x_{k,2}$ 的解码信噪比分别表示为

$$\gamma_{k,1} = \frac{\alpha_k P_s |h_k|^2}{(1 - \alpha_k) P_s |h_k|^2 + P_0 |h_0|^2 + \sigma^2} \quad (2)$$

$$\gamma_{0,k} = \frac{P_0 |h_0|^2}{(1 - \alpha_k) P_s |h_k|^2 + \sigma^2} \quad (3)$$

$$\gamma_{k,2} = \frac{(1 - \alpha_k) P_s |h_k|^2}{\sigma^2} \quad (4)$$

根据式(2)~式(4)可知,每个时隙中主用户 U_0 和次用户 U_k 的通信速率分别为 $R_{0,k} = \text{lb}(1 + \gamma_{0,k})$ 和 $R_k = R_{k,1} + R_{k,2}$,其中, $R_{k,1} = \text{lb}(1 + \gamma_{k,1})$, $R_{k,2} = \text{lb}(1 + \gamma_{k,2})$ 。

2 问题求解

本文针对上行CR-RSMA网络,设计了一种接入控制策略,旨在实现更多次用户接入主用户频段并最大化接入次用户的吞吐量之和。接入主用户频段的次用户必须满足以下两个条件:1)主用户的中断性能与OMA一致;2)次用户的QoS需求。

为实现上述目标,首先,判断次用户集 \mathcal{K} 中用户是否满足条件1),将所有满足该条件的用户组成的新集合记为 \mathcal{A} ;其次,在集合 \mathcal{A} 中进一步筛选出满足条件2)的用户,将所有满足该条件的用户组成的新集合记为 \mathcal{B} 。接着通过贪婪搜索算法选择最终接入主用户频段的次用户,其所构成的集合为 \mathcal{B}^* ;最后,通过对集合 \mathcal{B}^* 中元素的时间资源优化来实现接入次用户吞吐量之和最大。

具体地,通过以下3个步骤展开研究。

2.1 步骤1

通过条件1), 初步筛选出有机会接入主用户频段的次用户。相关优化问题建立为

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_0: \max_{\mathcal{A}} \text{card}(\mathcal{A}) \quad (5) \\ \text{s.t. } \Pr(R_{0,i} \geq \hat{R}_0) = \\ \Pr\left(\text{lb}\left(1 + \frac{P_0|h_0|^2}{\sigma^2}\right) \geq \hat{R}_0\right), i \in \mathcal{A} \quad (5a) \\ 0 \leq \alpha_i \leq 1, i \in \mathcal{A} \quad (5b) \\ \mathcal{A} \in \mathcal{K} \quad (5c) \end{aligned}$$

其中, 集合 \mathcal{A} 为所有满足条件1)的次用户构成的集合, $\text{card}(\mathcal{A})$ 表示集合 \mathcal{A} 的基数, 即集合 \mathcal{A} 中元素的个数。 \hat{R}_0 表示主用户的目标传输速率。式(5a)表示该网络中主用户的中断性能与OMA一致。式(5b)为次用户发射功率分配因子约束。

优化问题 \mathcal{P}_0 的约束式(5a)表示该网络中主用户成功解码的概率 $\Pr(R_{0,i} \geq \hat{R}_0)$ 与 OMA 主用户成功解码的概率 $\Pr\left(\text{lb}\left(1 + P_0|h_0|^2/\sigma^2\right) \geq \hat{R}_0\right)$ 相同。然而, 主用户不一定总是能够成功解码, 因此, 对于优化问题 \mathcal{P}_0 , 需要考虑主用户中断与非中断两种情况。在 OMA 中, 当主用户的信噪比大于或等于给定干扰门限时, 即 $P_0|h_0|^2/\sigma^2 \geq 2^{\hat{R}_0} - 1$, 转化得 $|h_0|^2 \geq \varepsilon\sigma^2/P_0$, 其中, $\varepsilon = 2^{\hat{R}_0} - 1$ 为给定的干扰门限, 主用户的通信不发生中断; 反之, 当主用户的信噪比低于给定干扰门限时, $P_0|h_0|^2/\sigma^2 < 2^{\hat{R}_0} - 1$, 转化得 $|h_0|^2 < \varepsilon\sigma^2/P_0$, 主用户的通信将发生中断。因此, 根据主用户中断与否, 优化问题 \mathcal{P}_0 可通过如下两种情况获得最优集合 \mathcal{A} 。

情况1 当 $|h_0|^2 \geq \varepsilon\sigma^2/P_0$ 时, CR-RSMA 网络中主用户能够成功解码, 即 $R_{0,i} \geq \hat{R}_0$, 通过转化约束式(5a)可以得到 $\alpha_i \geq 1 + (\varepsilon\sigma^2 - P_0|h_0|^2)/(\varepsilon P_s|h_i|^2)$, 优化问题 \mathcal{P}_0 可被转化为

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_1: \max_{\mathcal{A}} \text{card}(\mathcal{A}) \quad (6) \\ \text{s.t. } \alpha_i \geq 1 + \frac{\varepsilon\sigma^2 - P_0|h_0|^2}{\varepsilon P_s|h_i|^2}, i \in \mathcal{A} \quad (6a) \\ 0 \leq \alpha_i \leq 1, i \in \mathcal{A} \quad (6b) \\ \mathcal{A} \in \mathcal{K} \quad (6c) \\ |h_0|^2 \geq \frac{\varepsilon\sigma^2}{P_0} \quad (6d) \end{aligned}$$

在优化问题 \mathcal{P}_1 中, 由约束条件式(6d)可得 $\varepsilon\sigma^2 - P_0|h_0|^2 \leq 0$, 因此式(6a)中 α_i 的下界是小于1的数。基于此, 可将约束式(6a)和式(6b)的交集表示为 $\max\left\{0, 1 + (\varepsilon\sigma^2 - P_0|h_0|^2)/(\varepsilon P_s|h_i|^2)\right\} \leq \alpha_i \leq 1, i \in \mathcal{A}$ 因此, 满足上述条件时, $\mathcal{A}^* = \mathcal{K}$, 其中, 右上角标“*”表示最优值。

情况2 当 $|h_0|^2 < \varepsilon\sigma^2/P_0$ 时, 无论次用户接入与否, CR-RSMA 网络中主用户都将发生通信中断, 此时优化问题 \mathcal{P}_0 可被转化为

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_2: \max_{\mathcal{A}} \text{card}(\mathcal{A}) \quad (7) \\ \text{s.t. } 0 \leq \alpha_i \leq 1, i \in \mathcal{A} \quad (7a) \\ \mathcal{A} \in \mathcal{K} \quad (7b) \\ |h_0|^2 < \frac{\varepsilon\sigma^2}{P_0} \quad (7c) \end{aligned}$$

由于次用户的接入与否均不影响主用户的中断性能, 因此优化问题 \mathcal{P}_2 的最优解 $\mathcal{A}^* = \mathcal{K}$ 。

综上, 在保证该网络主用户实现与 OMA 系统相同中断性能的前提下, 能够接入主用户频段的次用户构成的最优集合表示为

$$\mathcal{A}^* = \begin{cases} \mathcal{K}, |h_0|^2 \geq \frac{\varepsilon\sigma^2}{P_0} \\ \text{且} \max\left\{0, 1 + \frac{\varepsilon\sigma^2 - P_0|h_0|^2}{\varepsilon P_s|h_i|^2}\right\} \leq \alpha_i \leq 1, i \in \mathcal{A} \\ \mathcal{K}, |h_0|^2 < \frac{\varepsilon\sigma^2}{P_0} \text{ 且 } 0 \leq \alpha_i \leq 1, i \in \mathcal{A} \end{cases} \quad (8)$$

2.2 步骤2

当 \mathcal{A}^* 中的次用户接入主用户频段时, 主用户中断性能依旧能够与 OMA 保持一致, 但并不能保证所有次用户都满足自身的 QoS 约束。因此, 步骤2的重点在于从集合 \mathcal{A}^* 中找出满足条件2)的次用户。为便于阐述, 构建一个新集合 \mathcal{B} , \mathcal{B} 中元素即为满足自身 QoS 约束的次用户。根据式(8)可知, 虽然 α_i 在给定的取值范围内不影响主用户的中断性能, 但根据式(2)~式(4)可知, α_i 的具体取值会影响次用户的通信速率。另外, 由于次用户的吞吐量由其通信速率与时间 t_i 确定, 因此 α_i 和 t_i 均影响次用户是否满足条件2)。因此, 为了从 \mathcal{A}^* 中找出 \mathcal{B} , 就必须联合优化 α_i 和 t_i 。结合式(8), 构建优化问题 \mathcal{P}_{1-1} 和 \mathcal{P}_{2-1} 来确定最优的 \mathcal{B} , 即

$$\mathcal{P}_{1-1}: \max_{\mathcal{B}, \alpha_i, t_i} \text{card}(\mathcal{B}) \quad (9)$$

$$\text{s.t. max} \left\{ 0, 1 + \frac{\varepsilon\sigma^2 - P_0|h_0|^2}{\varepsilon P_s|h_i|^2} \right\} \leq \alpha_i \leq 1, i \in \mathcal{B} \quad (9a)$$

$$\mathcal{B} \in \mathcal{A}^* \quad (9b)$$

$$|h_0|^2 \geq \frac{\varepsilon\sigma^2}{P_0} \quad (9c)$$

$$t_i R_i \geq C_{\text{th}}^i, i \in \mathcal{B} \quad (9d)$$

$$\sum_{i=1}^{\text{card}(\mathcal{B})} t_i \leq T, i \in \mathcal{B} \quad (9e)$$

$$\mathcal{P}_{2-1}: \max_{\mathcal{B}, \alpha_i, t_i} \text{card}(\mathcal{B}) \quad (10)$$

$$\text{s.t. } 0 \leq \alpha_i \leq 1, i \in \mathcal{B} \quad (10a)$$

$$\mathcal{B} \in \mathcal{A}^* \quad (10b)$$

$$|h_0|^2 < \frac{\varepsilon\sigma^2}{P_0} \quad (10c)$$

$$t_i R_i \geq C_{\text{th}}^i, i \in \mathcal{B} \quad (10d)$$

$$\sum_{i=1}^{\text{card}(\mathcal{B})} t_i \leq T, i \in \mathcal{B} \quad (10e)$$

其中, 优化问题 \mathcal{P}_{1-1} 是在 $|h_0|^2 \geq \varepsilon\sigma^2/P_0$ 时找出最优 \mathcal{B} , 优化问题 \mathcal{P}_{2-1} 是在 $|h_0|^2 < \varepsilon\sigma^2/P_0$ 时找出最优 \mathcal{B} . 在优化问题 \mathcal{P}_{1-1} 和 \mathcal{P}_{2-1} 中, C_{th}^i 代表第 i 个次用户的最小吞吐量门限, 本文考虑每个次用户之间的差异性, 并为每个次用户设定不同的最小吞吐量门限值, 以满足其个体需求. 约束式(9d) (或式(10d), 以下均称为式(9d)) 为保证 \mathcal{B} 中次用户满足 QoS 需求, 式(9e) (或式(10e), 以下均称为式(9e)) 是为了确保 \mathcal{B} 中用户所需的总通信时间小于或等于 T .

观察上述两个优化问题可知, 若最大化 $\text{card}(\mathcal{B})$, 就必须使次用户在满足式(9d)的条件下尽可能最小化 t_i . 然而, 最小化 t_i 需要考虑两个因素, 一是使次用户的通信速率达到最大, 二是使次用户的吞吐量满足最小需求 C_{th}^i , 即约束式(9d)的等号成立. 因此, 将优化问题 \mathcal{P}_{1-1} 和 \mathcal{P}_{2-1} 中的式(9e)更换成 $\sum_{i=1}^{\text{card}(\mathcal{B})} (C_{\text{th}}^i/R_{i,\max}) \leq T (i \in \mathcal{B})$ 并不会影响其目标函数的最大值, 故将优化问题 \mathcal{P}_{1-1} 和 \mathcal{P}_{2-1} 转化为如下两个优化问题时目标函数的最优值不变, 即

$$\mathcal{P}_{1-2}: \max_{\mathcal{B}, \alpha_i, t_i} \text{card}(\mathcal{B}) \quad (11)$$

$$\text{s.t. 式(9a)~(9d)} \quad (11a)$$

$$\sum_{i=1}^{\text{card}(\mathcal{B})} \frac{C_{\text{th}}^i}{R_{i,\max}} \leq T, i \in \mathcal{B} \quad (11b)$$

$$\mathcal{P}_{2-2}: \max_{\mathcal{B}, \alpha_i, t_i} \text{card}(\mathcal{B}) \quad (12)$$

$$\text{s.t. 式(10a)~(10d)} \quad (12a)$$

$$\sum_{i=1}^{\text{card}(\mathcal{B})} \frac{C_{\text{th}}^i}{R_{i,\max}} \leq T, i \in \mathcal{B} \quad (12b)$$

根据上述分析, 若最大化 $\text{card}(\mathcal{B})$, 需使次用户的通信速率达到最大, 为此给出如下定理.

定理1 第 i 个次用户的最大通信速率 $R_{i,\max}$ 表示为

$$R_{i,\max} = \begin{cases} \text{lb} \left(1 + \frac{P_s|h_i|^2}{\sigma^2} \right), |h_0|^2 \geq \frac{\varepsilon\sigma^2 + \varepsilon P_s|h_i|^2}{P_0} \\ \text{lb} \left(1 + \frac{\varepsilon(P_s|h_i|^2 + \sigma^2) - P_0|h_0|^2}{(\varepsilon + 1)P_0|h_0|^2} \right) + \\ \text{lb} \left(\frac{P_0|h_0|^2}{\varepsilon\sigma^2} \right), \\ \frac{\varepsilon\sigma^2}{P_0} \leq |h_0|^2 < \frac{\varepsilon\sigma^2 + \varepsilon P_s|h_i|^2}{P_0} \\ \text{lb} \left(1 + \frac{P_s|h_i|^2}{P_0|h_0|^2 + \sigma^2} \right), |h_0|^2 < \frac{\varepsilon\sigma^2}{P_0} \end{cases} \quad (13)$$

证明详见附录A.

确定了每个接入次用户的最大通信速率 $R_{i,\max}$ 后, 最小通信时间 $t_{i,\min}$ 也就确定了. 下面通过贪婪搜索算法确定最终接入的次用户. 具体地, 首先判断集合 \mathcal{B} 中所有次用户的 $t_{i,\min}$ 之和是否小于或等于 T , 若不满足, 则需要将集合 \mathcal{B} 中通信时间最大的用户剔除, 这样可以最大限度地节省时间资源. 重复操作, 直到集合 \mathcal{B} 中所有次用户的 $t_{i,\min}$ 之和小于或等于 T , 此时所有次用户构成的集合即为最优的集合 \mathcal{B}^* . 贪婪搜索算法如算法1所示.

算法1 贪婪搜索算法

输入集合 \mathcal{B} 中所有用户的 $t_{i,\min}$;

判断不等式 $\sum_{i=1}^{\text{card}(\mathcal{B})} t_{i,\min} \leq T$ 是否成立;

若步骤2)中不等式不成立, 则剔除集合 \mathcal{B} 中通信时间最大的用户, 返回步骤2); 若步骤2)中不等式成立, 到步骤4);

得到 \mathcal{B}^* .

由于每个次用户的最小通信时间的闭合表达式已知, 所以当次用户数量增加时, 依旧可以很快地确定 \mathcal{B}^* .

贪婪搜索算法流程如图2所示.

假设 $\text{card}(\mathcal{B})$ 初始值为 M ($M \leq K$), 则在最坏的情况下, 可能需要迭代 M 次, 即集合 \mathcal{B} 中每个次用户的最小通信时间都大于总的传输时间 T , 此时所有的次用户都无法接入主用户频段传输. 这种情

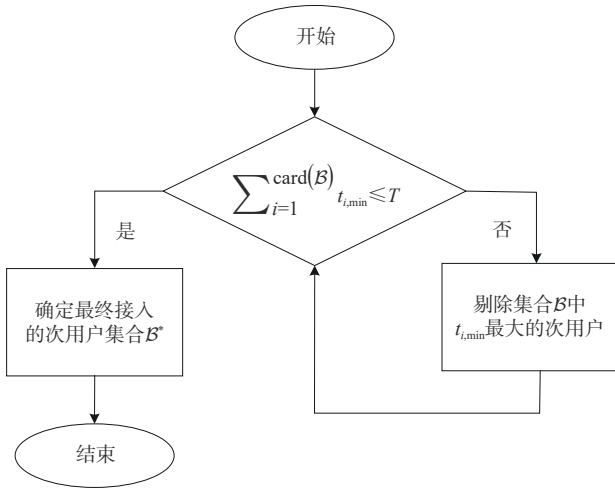


图2 贪婪搜索算法流程

况下，由于每次迭代都需要遍历剩余的次用户来找出最大通信时间需求者，其基本操作的执行次数为 $M + (M - 1) + \dots + 2 + 1$ ，等于 $M(M + 1)/2$ 。故该算法的时间复杂度为 $\mathcal{O}(M^2/2)$ 。

2.3 步骤3

确定了最终接入的次用户后，接下来通过分配时间资源来实现接入次用户吞吐量 C_i 之和最大化。第 i 个次用户吞吐量的闭合表达式为

$$C_i = t_i R_i, i \in \mathcal{B}^* \quad (14)$$

其中，第 i 个次用户的通信速率 R_i 的表达式见附录A。

求解最优吞吐量之和的优化问题建立为

$$\mathcal{P}_3: \max_{t_i} \sum_{i=1}^{\text{card}(\mathcal{B}^*)} C_i \quad (15)$$

$$\text{s.t. } C_i \geq C_{\text{th}}^i, i \in \mathcal{B}^* \quad (15a)$$

$$t_i \geq t_{i,\text{min}}, i \in \mathcal{B}^* \quad (15b)$$

$$\sum_{i=1}^{\text{card}(\mathcal{B}^*)} t_i \leq T, i \in \mathcal{B}^* \quad (15c)$$

优化问题 \mathcal{P}_3 为一个线性规划问题，通过求解该线性规划问题，可得该优化问题最优的时间资源分配为：为实现所有次用户吞吐量之和最大，在其他用户的通信时间刚好等于其最小通信时间 $t_{i,\text{min}}$ 的基础上，将剩余的所有时间资源全部分配给通信速率最大的用户，即 $t_j^* = T - \sum_{i=1, i \neq j}^{\text{card}(\mathcal{B}^*)} (C_{\text{th}}^i / R_{i,\text{max}})$ ，其中， j 为通信速率最大的用户。优化问题 \mathcal{P}_3 的目标函数最优闭合表达式为

$$C_{\text{sum}}^* = t_j^* R_{j,\text{max}} + \sum_{i=1, i \neq j}^{\text{card}(\mathcal{B}^*)} C_{\text{th}}^i \quad (16)$$

3 仿真结果与分析

本文利用 MATLAB 仿真软件作为模拟工具来验证上述理论推导的正确性，并探究所设计的接入控制策略对系统的影响。另外，与 CR-NOMA 网络性能比较，仿真结果表明 CR-RSMA 网络具有更优越的性能。若本节如无特殊说明，仿真参数设置见表1。

表1 仿真参数设置

参数名称	参数符号	数值
次用户数	K	3
U_0 到BS的距离/m	d_0	25
U_1 到BS的距离/m	d_1	75
U_2 到BS的距离/m	d_2	70
U_3 到BS的距离/m	d_3	65
整个传输时隙/s	T	1

平均接入用户数随给定次用户数的变化趋势如图3所示。从图3可以观察到，随着给定次用户数的增加，最终平均接入的用户数呈上升趋势。然而，当给定用户数达到一定数量时，平均接入用户数趋于稳定。另外，从图3还可以观察到，当主用户的目标速率值增大时，平均接入用户数呈下降趋势。产生这一现象的主要原因是，随着主用户目标速率值的提升，其干扰门限值也随之增大，从而导致次用户接入的机会减少。

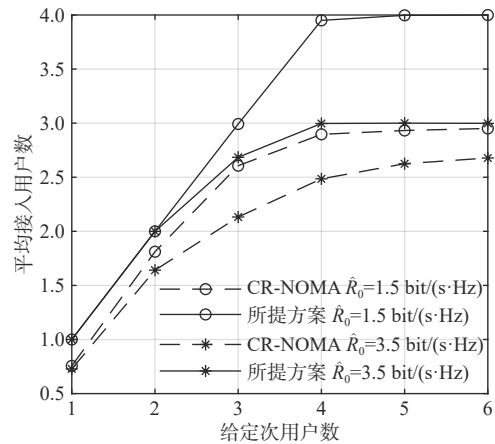


图3 平均接入用户数随给定次用户数的变化趋势

次用户吞吐量之和随次用户发射功率 P_s 变化如图4所示。从图4可以观察到，随着次用户发射功率值的增加，其吞吐量之和呈上升趋势。同时，在

相同的发射功率条件下,相比于CR-NOMA,CR-RSMA 总能实现更优的性能。另外,从图4还可以观察到,在发射功率值恒定时,随着主用户的目标速率值增大,对应的吞吐量之和呈下降趋势。这是由于主用户目标速率的提升会导致其干扰门限值变大,从而减少了次用户接入主用户频段的机会,导致次用户的吞吐量之和下降。

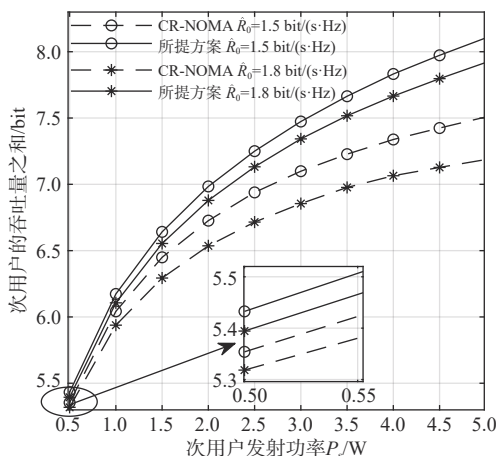


图4 次用户吞吐量之和随次用户发射功率 P_s 变化

本文方案与选择最好的次用户接入方案对比如图5所示。从图5可以观察到,与仅选择信道条件最优的次用户接入主用户频段的策略相比,本文设计的多用户接入策略虽然实现的吞吐量之和较低,但允许更多的次用户接入主用户频段。这表明该接入控制策略在以轻微的容量损失为代价的同时实现了更多次用户接入主用户频段这一目的,进一步提升了网络的整体性能。

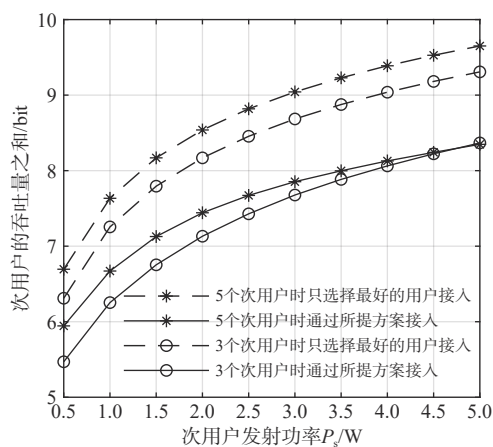


图5 本文方案与选择最好的次用户接入方案对比

次用户吞吐量之和随主用户目标数据速率的变化如图6所示。从图6可以观察到,随着主用户目

标速率的逐渐增加,次用户吞吐量之和呈下降趋势,这是由于主用户的目标速率与干扰门限值成正比,当主用户的目标速率值增加时,干扰门限值也随之增加,导致次用户接入主用户频段的机会减少,进而导致其吞吐量之和下降。另外,从图6还可以观察到,当主用户的目标速率值较大时,可通过增加次用户的发射功率来提高吞吐量。

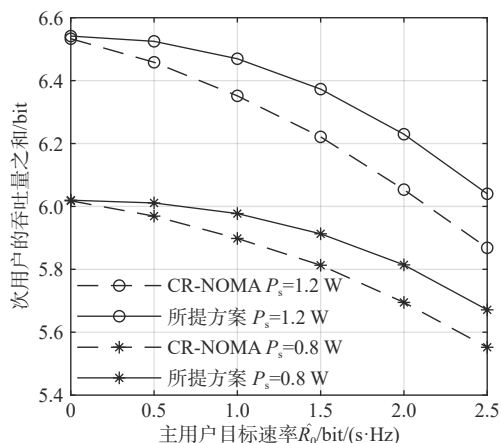


图6 次用户吞吐量之和随主用户目标数据速率的变化

程序运行时间随次用户个数的变化如图7所示,其中,纵轴表示执行一次程序所需要的时间。可以看出,每次执行程序所需的运行时间基本都维持在微秒级别,这证明了算法的低复杂度特性。值得注意的是,随着次用户数量的增加,本文方案需要的程序运行时间相较于CR-NOMA方案所需的程序运行时间的差距逐渐增加,即便如此,其差距也保持在微秒级别。导致这一现象的原因为本文方案需要额外决定如何分割信号来进行资源分配,然而在CR-NOMA方案中没有这一过程。

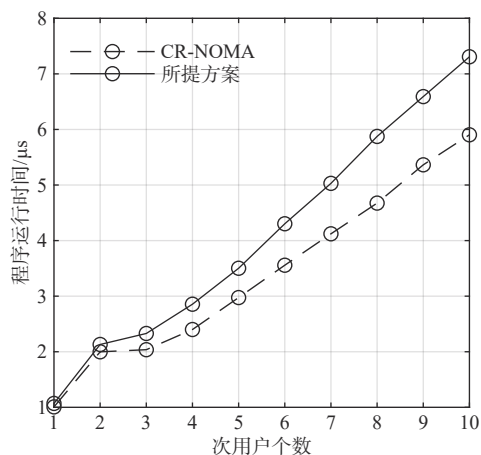


图7 程序运行时间随次用户个数的变化

4 结束语

本文针对CR-RSMA网络中的次用户设计了一种接入控制策略,旨在允许更多的次用户接入主用户频段,同时优化时间资源以最大化接入次用户的吞吐量之和。通过仿真验证了与仅有一个用户接入的情况相比,本文设计的接入控制策略能够在牺牲少量容量的前提下显著提升接入次用户数量,另外,相比于CR-NOMA,在接入用户数和吞吐量方面均表现出了更优越的性能。总之,本文所提策略在网络性能方面表现优越,为CR-RSMA网络的实际应用提供了理论基础和参考。

附录A 定理1的证明

证明:已知第*i*个次用户的通信速率表达式为 $R_i = R_{i,1} + R_{i,2}$,其中

$$R_{i,1} = \text{lb} \left(\frac{1 + \alpha_i P_s |h_i|^2}{(1 - \alpha_i) P_s |h_i|^2 + P_0 |h_0|^2 + \sigma^2} \right) \quad (\text{A.1})$$

$$R_{i,2} = \text{lb} \left(\frac{1 + (1 - \alpha_i) P_s |h_i|^2}{\sigma^2} \right) \quad (\text{A.2})$$

由于

$$\frac{\partial R_{i,1}}{\partial \alpha_i} = \frac{1}{\ln 2} \frac{P_s |h_i|^2}{(1 - \alpha_i) P_s |h_i|^2 + P_0 |h_0|^2 + \sigma^2} > 0 \quad (\text{A.3})$$

$$\frac{\partial R_{i,2}}{\partial \alpha_i} = \frac{1}{\ln 2} \frac{-P_s |h_i|^2}{(1 - \alpha_i) P_s |h_i|^2 + \sigma^2} < 0 \quad (\text{A.4})$$

故 $R_{i,1}$ 是关于 α_i 的单调递增函数, $R_{i,2}$ 是关于 α_i 的单调递减函数。又 $|\partial R_{i,1}/\partial \alpha_i| < |\partial R_{i,2}/\partial \alpha_i|$,所以 $R_i = R_{i,1} + R_{i,2}$ 是关于 α_i 的单调递减函数。

1) 当主用户不中断时,即 $|h_0|^2 \geq \varepsilon \sigma^2 / P_0$,由于 $\max \left\{ 0, 1 + \left(\varepsilon \sigma^2 - P_0 |h_0|^2 \right) / \left(\varepsilon P_s |h_i|^2 \right) \right\} \leq \alpha_i \leq 1$,所以分为以下两种情况:

① 当 $1 + \left(\varepsilon \sigma^2 - P_0 |h_0|^2 \right) / \left(\varepsilon P_s |h_i|^2 \right) \leq 0$,即 $|h_0|^2 \geq \left(\varepsilon \sigma^2 + \varepsilon P_s |h_i|^2 \right) / P_0$ 时,发射功率分配因子的范围为 $0 \leq \alpha_i \leq 1$,由于 R_i 是关于 α_i 的单调递减函数,故次用户的通信速率最大时对应的发射功率分配因子为0,即 $\alpha_i^* = 0$,此时SIC解码顺序由 $x_{i,1} \rightarrow x_0 \rightarrow x_{i,2}$ 退化为 $x_0 \rightarrow x_{i,2}$,由于仅传输了 $x_{i,2}$,故速率表达式为

$$R_i = R_{i,2} = \text{lb} \left(1 + \gamma_{i,2} \right) = \text{lb} \left(1 + \frac{(1 - \alpha_i) P_s |h_i|^2}{\sigma^2} \right) \quad (\text{A.5})$$

将 $\alpha_i^* = 0$ 代入式(A.5)得到最大的通信速率表达式为

$$R_{i,\max} = \text{lb} \left(1 + \frac{P_s |h_i|^2}{\sigma^2} \right) \quad (\text{A.6})$$

② 当 $0 < 1 + \left(\varepsilon \sigma^2 - P_0 |h_0|^2 \right) / \left(\varepsilon P_s |h_i|^2 \right) \leq 1$,即 $\varepsilon \sigma^2 / P_0 \leq |h_0|^2 \leq \left(\varepsilon \sigma^2 + \varepsilon P_s |h_i|^2 \right) / P_0$,发射功率分配因子的范围为 $1 + \left(\varepsilon \sigma^2 - P_0 |h_0|^2 \right) / \left(\varepsilon P_s |h_i|^2 \right) \leq \alpha_i \leq 1$,即 α_i 为0到1之间的一个值,故要对次用户的消息进行分割,此时次用户的速率表达式为

$$R_i = \text{lb} \left(1 + \frac{\alpha_i P_s |h_i|^2}{(1 - \alpha_i) P_s |h_i|^2 + P_0 |h_0|^2 + \sigma^2} \right) + \text{lb} \left(1 + \frac{(1 - \alpha_i) P_s |h_i|^2}{\sigma^2} \right) \quad (\text{A.7})$$

由于 R_i 是关于 α_i 的单调递减函数,故次用户的通信速率最大时对应的发射功率分配因子为 $1 + \left(\varepsilon \sigma^2 - P_0 |h_0|^2 \right) / \left(\varepsilon P_s |h_i|^2 \right)$,即 $\alpha_i^* = 1 + \left(\varepsilon \sigma^2 - P_0 |h_0|^2 \right) / \left(\varepsilon P_s |h_i|^2 \right)$,将 $\alpha_i^* = 1 + \left(\varepsilon \sigma^2 - P_0 |h_0|^2 \right) / \left(\varepsilon P_s |h_i|^2 \right)$ 代入式(A.6)得到最大的通信速率表达式为

$$R_{i,\max} = \text{lb} \left(1 + \frac{\varepsilon \left(P_s |h_i|^2 + \sigma^2 \right) - P_0 |h_0|^2}{(\varepsilon + 1) P_0 |h_0|^2} \right) + \text{lb} \left(\frac{P_0 |h_0|^2}{\varepsilon \sigma^2} \right) \quad (\text{A.8})$$

2) 当主用户中断时,即 $|h_0|^2 < \varepsilon \sigma^2 / P_0$, $1 + \left(\varepsilon \sigma^2 - P_0 |h_0|^2 \right) / \left(\varepsilon P_s |h_i|^2 \right) > 1$,发射功率分配因子的范围为 $0 \leq \alpha_i \leq 1$,主用户自身会发生通信中断,故应先解码次用户的消息再解码主用户的消息,SIC解码顺序由 $x_{i,1} \rightarrow x_0 \rightarrow x_{i,2}$ 退化为 $x_{i,1} \rightarrow x_0$,由于仅传输了 $x_{i,1}$,故 $\alpha_i^* = 1$,速率表达式为

$$R_i = R_{i,1} = \text{lb} \left(1 + \gamma_{i,1} \right) = \text{lb} \left(1 + \frac{\alpha_i P_s |h_i|^2}{(1 - \alpha_i) P_s |h_i|^2 + P_0 |h_0|^2 + \sigma^2} \right) \quad (\text{A.9})$$

将 $\alpha_i^* = 1$ 代入式(A.8)得到最大的通信速率速率

表达式为

$$R_{i,\max} = \text{lb} \left(1 + \frac{P_s |h_i|^2}{P_0 |h_0|^2 + \sigma^2} \right) \quad (\text{A.10})$$

根据上述3种情况的分析, 可以得出第*i*个次用户最大的通信速率表达式。

参考文献:

- [1] NGUYEN D C, DING M, PATHIRANA P N, et al. 6G Internet of things: a comprehensive survey[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(1): 359-383.
- [2] AL-FUQAHA A, GUIZANI M, MOHAMMADI M, et al. Internet of things: a survey on enabling technologies, protocols, and applications[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, 17(4): 2347-2376.
- [3] CHETTRI L, BERA R. A comprehensive survey on Internet of things (IoT) toward 5G wireless systems[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(1): 16-32.
- [4] 董洁, 李恒志, 陈岩, 等. 频谱资源经济价值评估和定价机制研究及展望[J]. *电信科学*, 2021, 37(7): 107-114.
DONG J, LI H Z, CHEN Y, et al. Research and prospect on economic value evaluation and pricing mechanism of spectrum resources[J]. *Telecommunications Science*, 2021, 37(7): 107-114.
- [5] JI Z, RAY LIU K J. Cognitive radios for dynamic spectrum access - dynamic spectrum sharing: a game theoretical overview[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2007, 45(5): 88-94.
- [6] 温陈驰, 左加阔, 鲍楠, 等. 基于 STARS 的安全认知无线电联合波束成形优化算法[J]. *物联网学报*, 2024, 8(1): 136-146.
WEN C C, ZUO J K, BAO N, et al. Joint beamforming optimization algorithm for secure cognitive radio based on STARS[J]. *Chinese Journal on Internet of Things*, 2024, 8(1): 136-146.
- [7] ZHANG W S, WANG C X, GE X H, et al. Enhanced 5G cognitive radio networks based on spectrum sharing and spectrum aggregation[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2018, 66(12): 6304-6316.
- [8] 葛海江, 贾宁, 池凯凯, 等. 非线性能量收集认知无线网络的次用户吞吐量最大化方案[J]. *电信科学*, 2023, 39(2): 103-117.
GE H J, JIA N, CHI K K, et al. Secondary throughput maximization scheme for non-linear energy harvesting cognitive radio networks[J]. *Telecommunications Science*, 2023, 39(2): 103-117.
- [9] AKYILDIZ I F, LEE W Y, VURAN M C, et al. A survey on spectrum management in cognitive radio networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2008, 46(4): 40-48.
- [10] TSIROPOULOS G I, DOBRE O A, AHMED M H, et al. Radio resource allocation techniques for efficient spectrum access in cognitive radio networks[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, 18(1): 824-847.
- [11] TRAGOS E Z, ZEADALLY S, FRAGKIADAKIS A G, et al. Spectrum assignment in cognitive radio networks: a comprehensive survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2013, 15(3): 1108-1135.
- [12] ZHOU F H, BEAULIEU N C, LI Z, et al. Energy-efficient optimal power allocation for fading cognitive radio channels: ergodic capacity, outage capacity, and minimum-rate capacity[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(4): 2741-2755.
- [13] 陆音, 陈继荣, 卞皓伟, 等. 新型机会式NOMA协作多播方案[J]. *通信学报*, 2020, 41(11): 141-150.
LU Y, CHEN J R, BIAN H W, et al. Novel opportunistic cooperative multicast scheme for NOMA[J]. *Journal on Communications*, 2020, 41(11): 141-150.
- [14] 时安谊, 杨震. 针对NOMA和CR网络的功率分配方法[J]. *信号处理*, 2019, 35(7): 1224-1234.
SHI A Y, YANG Z. Power allocation method for non-orthogonal multiple access and cognitive radio network[J]. *Journal of Signal Processing*, 2019, 35(7): 1224-1234.
- [15] RIAZUL ISLAM S M, 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*, 2017, 19(2): 721-742.
- [16] SAITO Y, KISHIYAMA Y, BENJEBBOUR A, et al. Non-orthogonal multiple access (NOMA) for cellular future radio access[C]//*Proceedings of the 2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. Piscataway: IEEE Press, 2013: 1-5.
- [17] DING Z G, YANG Z, FAN P Z, et al. On the performance of non-orthogonal multiple access in 5G systems with randomly deployed users[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2014, 21(12): 1501-1505.
- [18] BENJEBBOUR A, SAITO Y, KISHIYAMA Y, et al. Concept and practical considerations of non-orthogonal multiple access (NOMA) for future radio access[C]//*Proceedings of the 2013 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems*. Piscataway: IEEE Press, 2013: 770-774.
- [19] DING Z G, LIU Y W, CHOI J, et al. Application of non-orthogonal multiple access in LTE and 5G networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55(2): 185-191.
- [20] LIU H W, TSIFTSIS T A, KIM K J, et al. Rate splitting for uplink NOMA with enhanced fairness and outage performance[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(7): 4657-4670.
- [21] RIMOLDI B, URBANKE R. A rate-splitting approach to the Gaussian multiple-access channel[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1996, 42(2): 364-375.
- [22] LIU H W, BAI Z Q, LEI H J, et al. A new rate splitting strategy for uplink CR-NOMA systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, 71(7): 7947-7951.
- [23] XIAO F C, LI X W, YANG L, et al. Outage performance analysis of RSMA-aided semi-grant-free transmission systems[J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2023, 4: 253-268.
- [24] XIAO Y, TEGOS S A, DIAMANTOULAKIS P D, et al. On the er-

godic rate of cognitive radio inspired uplink multiple access[J]. IEEE Communications Letters, 2023, 27(1): 95-99.

- [25] KHAN W U, ALI Z, LAGUNAS E, et al. Rate splitting multiple access for cognitive radio GEO-LEO co-existing satellite networks [C]//Proceedings of the GLOBECOM 2022 - 2022 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2022: 5165-5170.
- [26] CHEN P X, LIU H W, YE Y H, et al. Rate-splitting multiple access aided mobile edge computing with randomly deployed users[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2023, 41(5): 1549-1565.
- [27] LIU P X, SUN Q, LIU H W. An intelligent reflecting surface-assisted uplink C-RSMA system[C]//Proceedings of the 2022 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC Workshops). Piscataway: IEEE Press, 2022: 170-175.
- [28] 邬贺铨. 物联网技术与应用的新进展[J]. 物联网学报, 2017, 1(1): 1-6.
- WU H Q. Technology and application progress on Internet of Things[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2017, 1(1): 1-6.
- [29] WOODS T, FURMAN S, MARACCHION C, et al. All-domain spectrum command and control via hierarchical dynamic spectrum sharing with implemented dynamic spectrum access toolchain[C]//Proceedings of the MILCOM 2021-2021 IEEE Military Communications Conference (MILCOM). Piscataway: IEEE Press, 2021: 354-359.
- [30] KHISA S, ALMEKHLAFI M, ELHATTAB M, et al. Full duplex cooperative rate splitting multiple access for a MISO broadcast channel with two users[J]. IEEE Communications Letters, 2022, 26(8): 1913-1917.
- [31] 叶迎晖, 徐瑞, 田雨佳, 等. 反向散射通信技术的研究与发展[J]. 电信科学, 2024, 40(1): 1-23.
- YE Y H, XU R, TIAN Y J, et al. Research and development of backscatter communications technology[J]. Telecommunications Science, 2024, 40(1): 1-23.

[作者简介]



谢蓓妍 (1999-), 女, 西安邮电大学陕西省信息通信网络及安全重点实验室硕士生, 主要研究方向为多址接入。



叶迎晖 (1991-), 男, 博士, 西安邮电大学陕西省信息通信网络及安全重点实验室副教授, 主要研究方向为多址接入、边缘计算。



刘洪武 (1975-), 男, 博士, 山东交通大学信息科学与电气工程学院副教授, 主要研究方向为新一代无线多址接入、认知无线电技术。



卢光跃 (1971-), 男, 博士, 西安邮电大学陕西省信息通信网络及安全重点实验室教授, 主要研究方向为宽带无线通信。