

下行链路 NOMA 用户分组和功率分配算法

甄少华 马文平 罗炼飞

(西安电子科技大学通信工程学院 陕西 西安 710071)

摘要 对下行链路中非正交多址接入(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)系统用户匹配和子带功率分配两个问题进行研究。提出优化分组方案,结合用户质量及子带吞吐量进行用户匹配,从而保证系统性能显著提升;提出基于比例公平的优化边缘用户质量因子的功率分配方案,在保证用户服务质量(Quality of Service, QoS)基础上优化边缘用户的传输性能,并利用 Karush-Kuhn-Tucker(KKT)条件进行求解。仿真结果表明,系统吞吐量比传统的正交多址接入(Orthogonal Multiple Access, OMA)系统有明显提升。

关键词 非正交多址接入 用户质量 功率分配 边缘用户 服务质量

中图分类号 TP3 TN91

文献标志码 A

DOI:10.3969/j.issn.1000-386x.2022.03.020

OPTIMIZATION ALGORITHM FOR USER MATCHING AND POWER ALLOCATION OF NOMA IN DOWN LINK

Zhen Shaohua Ma Wenping Luo Lianfei

(School of Telecommunication Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, Shaanxi, China)

Abstract The problems of user matching and sub-band power allocation for non-orthogonal multiple access (NOMA) systems in the downlink are studied. An optimized packetization scheme was proposed, and user matching was combined with user quality and subband throughput to ensure a significant improvement in system performance. A power allocation scheme for optimizing edge user quality factor based on a fair ratio was proposed to optimize the transmission of edge users while ensuring user QoS. The performance was solved by using Karush-Kuhn-Tucker condition. Simulation results show that the system throughput is significantly improved compared with the traditional orthogonal multiple access (OMA) system.

Keywords Non-orthogonal multiple access (NOMA) User quality Power allocation Edge user Quality of service (QoS)

0 引言

随着科技迅速发展,第六代移动通信技术研发也已经启动,移动通信系统的频谱资源越来越紧张是愈加不容忽视的问题。非正交多址接入(NOMA)技术可有效提高资源利用率。它的主要原理是采用叠加编码技术进行叠加用户发射,采用串行干扰消除技术进行正交解调进而接收,从而实现多个用户在同一子信道上叠加传输。如何优化下行链路 NOMA 系统中的分组方案及用户间的功率分配方案是提高系统性能的关键问题。

目前的 NOMA 系统算法中,用户分组策略已有重要成果。当前研究中,可实现用户分组的最优方案的穷举法^[1],主要原理是遍历所有可能的用户组合进行性能对比,进而选择出使系统性能最好的用户分组,该算法的限制性在于随着用户数目增多,其复杂度呈指数增加。根据信道质量指标(Channel Quality Indicator, CQI),文献[2]将信道中的用户分为了三类,即使信道质量最好的用户为高质量用户,其余为中、低等质量用户。进行用户分组后,组内用户的信道增益差异越大, NOMA 系统具有越大的吞吐量。基于信道增益差异,文献[3]提出了远近配对方案,即高、低质量用户相互匹配以获得性能的最大提升,而剩余中等质量

用户彼此配对后,信道增益差异较小将导致连续抗干扰性能下降,影响系统吞吐量的稳定提升。进一步考虑到,若子信道中全部为中等质量用户时,用户间较小的信道增益差将导致系统吞吐量无法稳定大幅度提升。在功率分配研究中,现有方案主要从用户服务质量(QoS)、用户的公平性准则两个角度进行约束,进行系统的数据速率和最大化研究,针对优化边缘用户性能的情况很少讨论到。例如文献[4]提出了基于QoS的功率分配算法,即对边缘用户进行最低速率要求的约束,同时在总功率约束下使系统和容量最大化建模,此方案只保证了边缘用户的QoS,但是没有考虑到优化边缘用户的功率分配比例。文献[5]基于比例公平性进行功率分配研究,分别考虑了系统和速率最大化与最小速率最大化两种条件下的分配策略,文献中将原非凸问题转化为凸函数进行求解的思路值得借鉴,然而这种功率分配模型没有考虑到边缘用户的QoS约束。随着科技发展,业务场景复杂多变,在系统整体性能稳定提升的同时,针对边缘用户性能优化的研究也是非常重要的问题。

针对以上存在的问题,本文采用分步优化思想对现有NOMA系统资源分配算法进行研究。先提出一种信道均衡匹配(Channel Equalization Matching, CEM)的用户分组算法,首先通过判断用户质量差异进行分组方案确定,当用户差异较大时选择远近匹配方案;当用户质量差异不大时,选择当前质量最好的用户加入指定子信道,然后选择剩余用户中可使当前子信道性能最好地加入分组,以保证系统性能。然后进行功率分配,提出一种基于比例公平的优化边缘用户质量因子(Edge User Optimization, EUO)的组内功率分配方案,以优化边缘用户质量因子为目标进行建模,同时以用户的QoS保障为约束条件,最终利用KKT条件进行求解。仿真结果表明,CEM分组算法及基于比例公平的EUO功率分配算法表现出了更低的算法复杂度及更高的系统性能。

1 系统模型

假设小区内有一个基站,其中 M 个用户均匀地分布在基站附近,基站与用户间使用单天线配置。系统的总功率约束且总带宽 B_0 被等分为 K 个子信道,则每个子信道的带宽为 $B_{sc} = B_0/K$ 。

如图1所示,假设每个子信道上皆分配 $M(k)$ 个用户,子信道间干扰不计,则子信道 k 上发送端的叠加信号表示为:

$$x_k = \sum_{m=1}^{M(k)} \sqrt{p_{m,k}} s_{m,k} \quad (1)$$

式中: $p_{m,k}$ 表示第 k 个子信道上第 m 个用户的分配功率; $s_{m,k}$ 表示第 k 个子信道上用户 m 的调制信号。

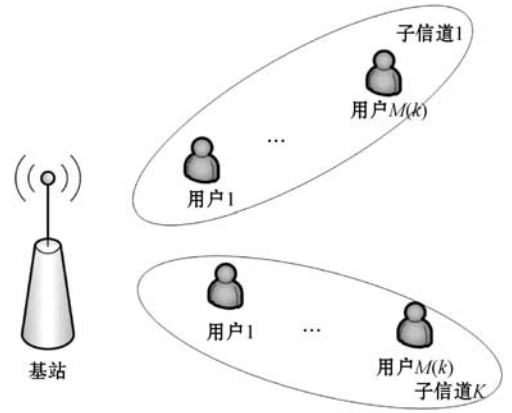


图1 系统模型

在接收端,用户将收到有用信号与干扰信号,则子信道 k 中用户 m 的接收信号可表示为:

$$y_{m,k} = h_{m,k} \sum_{i=1}^{M(k)} \sqrt{p_{i,k}} x_{i,k} + z_{m,k} = \sqrt{p_{m,k}} h_{m,k} x_{m,k} + \sum_{i=1, i \neq m}^{M(k)} \sqrt{p_{i,k}} h_{m,k} x_{i,k} + z_{m,k} \quad (2)$$

式中: $h_{m,k}$ 为信道增益; $z_{m,k}$ 是均值为0、方差为 σ^2 的加性高斯白噪声。

接收到信号后,采用串行干扰消除(SIC)技术进行解码,即子信道 k 的弱用户将强用户的信号滤除,直接解调自己的信号,接收信号减去解调出的弱用户信号就可得到强用户信号。

由香农定理得用户 m 在子信道 k 上的容量为:

$$R_{m,k} = B_{sc} \log_2 \left(1 + \frac{p_{m,k} |h_{m,k}|^2}{\sigma^2 + \sum_{i=1, i \neq m}^{M(k)} p_{i,m} |h_{m,k}|^2} \right) \quad (3)$$

则子信道 k 的总容量为:

$$R_k = \sum_{m=1}^{M(k)} R_{m,k} \quad (4)$$

系统总容量表达式为:

$$R = \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^{M(k)} R_{m,k} \quad (5)$$

由系统模型及容量表达式可知,系统吞吐量与用户分组策略及功率分配方案有密切关系。为提升系统性能,本文基于该系统模型,对NOMA下行链路系统中的用户分组方案和功率分配方案优化问题展开研究。

2 用户分组

子信道中用户间的信道差异决定了NOMA性能的上限^[6]。两个用户之间的信道增益差异越大,NOMA

系统相对于 OMA 系统的吞吐量提升就越明显^[7]。反之,当信道中的用户信道增益差较小时,用户吞吐量无法显著提升。

针对以上问题,提出一种信道均衡匹配(CEM)分组算法。在分组过程中,假设子信道间的功率为平均分配,因此不考虑子信道的分配顺序。

(1) 初始化设置。假设用户集合 $U = \{1, 2, \dots, M\}$, 用户 $m \in U$ 。令用户 m 平均数据速率 $T_m = 0$ 。子信道集合 $C = \{1, 2, \dots, M\}$, 子信道 $k \in C$, 且每个子信道上的叠加用户数大于 1。

用户 m 在子信道 k 上的容量为 $R_{m,k}$, 令质量因子 $l_m = R_{m,k}/T_m$ 。在这里, l_m 越大时, 用户信道质量越好。定义信道质量差异临界值为 θ , 若两用户质量因子之差小于临界值, 则说明两用户互相为中等质量用户。例如, $|l_{m_1} - l_{m_2}| \leq \theta$ 时, 两用户信道质量差异较小, 可互相看作中等质量用户, 此时两者相互匹配时性能无法显著提升。

假设最大叠加用户数为 $M_{\max} = 2$, M 为 2 的倍数, $K = M/M_{\max}$, $k = 1$ 。

(2) 对子信道 k 进行初步用户匹配。针对集合中的所有用户, 对 l 进行降序排列, $m_1 = \arg \max(l)$, $m_2 = \arg \min(l)$ 。

若 $|l_{m_1} - l_{m_2}| > \theta$, 说明两用户之间有较大的信道质量差异, 质量因子较大的 m_1 为高质量用户, m_2 为低质量用户。匹配用户 m_1 和用户 m_2 , 并将这两个用户在用户集合 U 中剔除, 更新 T_m 。跳转到步骤(4)。

反之, 说明两用户间有较小的信道质量差, 两者互相为中等质量用户。将用户 m_1 加入分组, 并在用户集合 U 中剔除, 更新 T_m 。跳转到步骤(3)。

(3) 选择子信道 k 的叠加用户。从用户集合 U 中任意选择用户 m , 根据式(4)计算加入用户 m 时子信道 k 的总吞吐量 R_k , $m_3 = \arg \max(R_k)$ 。此时, 用户 m_3 为子信道 k 的叠加用户, 将此用户在用户集合 U 中剔除, 更新 T_m 。跳转到步骤(4)。

(4) 子信道 k 的用户分组完成。令 $k = k + 1$, $U = \{1, 2, \dots, M\}$ 。若 $k \leq K$, 则跳回步骤(2), 否则迭代结束, 完成全部用户分组。

3 功率分配方案

3.1 组间功率分配

组间功率分配的整体思路是首先以系统和速率最优化为目标进行建模, 并构造拉格朗日函数得到 p_k 表达式, 然后假设子信道的信道增益升序排列, 根据用户

功率非负约束及最大发射功率的约束推导得到全部子信道功率。

系统和速率的优化问题表达为:

$$\begin{aligned} \max_{p_k} \quad & \sum_{k=1}^K B_{\text{sc}} \log_2 \left(1 + \frac{p_k |h_k|^2}{N_0 B_{\text{sc}}} \right) \\ \text{s. t.} \quad & \sum_{k=1}^K p_n \leq P_0 \end{aligned} \quad (6)$$

式中: 取子信道上信道增益最大的用户, h_k 为子信道 k 的等效信道增益; N_0 为噪声功率谱密度; P_0 为信道发射功率。

对上述优化问题进行求解, 即可得到令系统和速率最优的组间功率分配方案。求解过程如下。

令 λ 为拉格朗日因子, 对式(6)构造拉格朗日函数:

$$L = B_{\text{sc}} \sum_{k=1}^K \log_2 \left(1 + \frac{p_k |h_k|^2}{N_0} \right) + \lambda \left(P_0 - \sum_{k=1}^K p_k \right) \quad (7)$$

对 p_k 求偏导, 并令其结果为零, 可得:

$$\frac{\partial L}{\partial p_k} = \frac{B_{\text{sc}} h_k^2 / N_0}{\ln 2 (1 + p_k h_k^2 / N_0)} - \lambda = 0 \quad (8)$$

$$\text{解式(8)得 } p_k = \frac{B_{\text{sc}}}{\lambda \ln 2} - \frac{N_0}{h_k^2}.$$

整理得:

$$\frac{\lambda \ln 2}{B_{\text{sc}}} = \frac{h_k^2}{h_k^2 p_k + N_0} \quad (9)$$

由式(9)可知, 等式右边非负, 则:

$$\frac{h_m^2}{h_m^2 p_m + N_0} = \frac{h_k^2}{h_k^2 p_k + N_0} \quad (10)$$

整理得:

$$p_k = p_m + \frac{N_0}{h_m^2} - \frac{N_0}{h_k^2} \quad (11)$$

由式(11)可知, 求得某一子信道功率, 即可求得全部子信道功率。由系统最大发射功率约束得:

$$P_m \leq \frac{1}{K} \left(P_{\max} + \sum_{k=1}^K \frac{N_0}{h_k^2} - \frac{KN_0}{h_m^2} \right) \quad (12)$$

式中: P_{\max} 为最大发射功率。

已知子信道功率大于等于 0, 假设子信道的信道增益按照升序排列, 则各子信道功率 $p_1 < p_2 < \dots < p_N$, $l = 1$ 时, 有:

$$p_l = \frac{1}{K} \left(P_{\max} + \sum_{k=1}^K \frac{N_0}{h_k^2} - \frac{KN_0}{h_l^2} \right) \quad (13)$$

若 $p_l < 0$, 则将孩子信道移除, 令 $l = l + 1$, $l \in [1, K]$, 跳回式(13), 直到找到 $p_l > 0$, 由式(11)即可求得全部子信道功率, 完成子信道间的功率分配。

3.2 组内功率分配

大多数组内功率分配以优化系统和速率为目

标^[8-9],本文选择优化边缘用户性能为目标,提出了基于比例公平的 EUO 功率分配方案。整体思路是以用户 QoS 为约束,以优化边缘用户的质量因子为目标进行建模,然后将原非凸问题转化为凸函数并利用 KKT 条件进行求解。

根据比例公平表达式,定义 $l_m = R_{m,k}/T_m$ 为质量因子。NOMA 系统中,比例公平表达式为:

$$T_m(t+1) = \left(1 + \frac{1}{t_c}\right)T_m(t) + \frac{\sum_{k=1}^K R_{m,k}(t)}{t_c K}$$

$$k=1,2,\dots,K, m=1,2,\dots,M \quad (14)$$

式中: t_c 为平均时间间隔,当第 t 帧时间,若用户 m 在子信道 k 上调度,则 $R_{m,k}(t)$ 不等于 0。

由文献[10],假设子信道内两用户 ω, ν , 用户 ω 的功率分配因子为 $\alpha_\omega, \alpha_\nu > \alpha_\omega, \alpha_\nu + \alpha_\omega = 1$, 传输信噪比为 ρ 。

$$R_\nu = \log_2 \left(1 + \frac{\alpha_\nu |h_\nu|^2}{\rho^{-1} + \alpha_\omega |h_\nu|^2}\right) = \log_2 \left(\frac{1 + \rho h_\nu^2}{1 + \alpha_\omega \rho |h_\nu|^2}\right) \quad (15)$$

$$R_\omega = \log_2(1 + \alpha_\omega \rho h_\omega^2) \quad (16)$$

为保证用户 QoS,功率分配因子 α_ω 应满足同等条件下的 OMA 的数据速率约束,即:

$$\begin{cases} \frac{1}{\sqrt{1+\rho|h_\omega|^2}+1} \leq \alpha_\omega \leq \frac{1}{\sqrt{1+\rho|h_\nu|^2}+1} \\ \frac{1}{\sqrt{1+\rho|h_\nu|^2}+1} < \frac{1}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{1+\rho|h_\omega|^2}+1} < \frac{1}{\sqrt{1+\rho|h_\nu|^2}+1} \end{cases} \quad (17)$$

根据式(17)的 QoS 约束,以优化最差用户的质量因子为目标进行功率分配算法设计。因此,优化问题描述如下:

$$\arg \max_{\alpha_\omega} \min \{l_\omega, l_\nu\} \quad (18)$$

对式(18)进行求解。已知,当正数 B 足够大时,

$$B^{-\min\{n_1, n_2, \dots, n_n\}} \approx \sum_{i=1}^n B^{-n_i}, \text{ 且 } B^{-n_i} \text{ 随 } n_i \text{ 增大而减小。故}$$

式(18)可等价于:

$$\arg \min_{\alpha_\omega} B^{-l_\omega} + B^{-l_\nu} \quad (19)$$

$$\text{s. t } \frac{1}{\sqrt{1+\rho|h_\omega|^2}+1} \leq \alpha \leq \frac{1}{\sqrt{1+\rho|h_\nu|^2}+1}$$

设目标函数:

$$f(\alpha_\omega) = B^{-l_\omega} + B^{-l_\nu} \quad (20)$$

此时,式(18)的优化问题可转化为目标函数凸函数求解问题。构造拉格朗日表达式为:

$$L(\alpha_\omega, \mu, \varphi) = f(\alpha_\omega) + \mu \left(\frac{1}{\sqrt{1+\beta_\omega}+1} - \alpha_\omega \right) + \varphi \left(\alpha_\omega - \frac{1}{\sqrt{1+\beta_\nu}+1} \right) \quad (21)$$

式中: φ, μ 为拉格朗日乘子; $\beta_\omega = \rho |h_\omega|^2$; $\beta_\nu = \rho |h_\nu|^2$ 。

由式(15)和式(16)可得:

$$f(\alpha_\omega) = B^{-\frac{\log_2(1+\alpha_\omega\beta_\omega)}{T_\omega}} + B^{-\frac{\log_2\left(\frac{1+\beta_\nu}{1+\alpha_\omega\beta_\nu}\right)}{T_\nu}} \quad (22)$$

$$B^{-\frac{\log_2(1+\alpha_\omega\beta_\omega)}{T_\omega}} = \left(B^{-\frac{1}{T_\omega}}\right)^{\log_2(1+\alpha_\omega\beta_\omega) \times \log_2 B} = \left(B^{\log_2(1+\alpha_\omega\beta_\omega)}\right)^{-\frac{\log_2 B}{T_\omega}} = (1+\alpha_\omega\beta_\omega)^{-\frac{\log_2 B}{T_\omega}} \quad (23)$$

同理可得:

$$B^{-\frac{\log_2\left(\frac{1+\beta_\nu}{1+\alpha_\omega\beta_\nu}\right)}{T_\nu}} = \left(\frac{1+\beta_\nu}{1+\alpha_\omega\beta_\nu}\right)^{-\frac{\log_2 B}{T_\nu}} = (1+\alpha_\omega\beta_\nu)^{-\frac{\log_2 B}{T_\nu}} \times (1+\beta_\nu)^{-\frac{\log_2 B}{T_\nu}} \quad (24)$$

代入式(20),整理得:

$$f(\alpha_\omega) = B^{-l_\omega} + B^{-l_\nu} = (1+\alpha_\omega\beta_\omega)^{-\frac{\log_2 B}{T_\omega}} + (1+\alpha_\omega\beta_\nu)^{-\frac{\log_2 B}{T_\nu}} \times (1+\beta_\nu)^{-\frac{\log_2 B}{T_\nu}} = (1+\alpha_\omega\beta_\omega)^{-i_\omega} + z(1+\alpha_\omega\beta_\nu)^{i_\nu} \quad (25)$$

式中: $z = (1+\rho h_\nu^2)^{-\frac{\log_2 B}{T_\nu}}$ 。

式(25)的 KKT 条件如下:

$$(1) \frac{\partial L}{\partial \alpha_\omega} = -i_\omega \beta_\omega (1+\alpha_\omega\beta_\omega)^{-i_\omega-1} + z i_\nu (1+\alpha_\omega\beta_\nu)^{i_\nu-1} - \mu + \varphi = 0$$

$$(2) \alpha_\omega \leq \frac{1}{\sqrt{1+\beta_\omega}+1}$$

$$(3) \alpha_\omega \geq \frac{1}{\sqrt{1+\beta_\omega}+1}$$

$$(4) \mu \left(\frac{1}{\sqrt{1+\beta_\omega}+1} - \alpha_\omega \right) = 0$$

$$(5) \varphi \left(\alpha_\omega - \frac{1}{\sqrt{1+\beta_\nu}+1} \right) = 0$$

$$(6) \mu \geq 0, \varphi \geq 0, \beta_\omega \geq 0, \beta_\nu \geq 0$$

$$(7) \frac{1}{\sqrt{1+\beta_\omega}+1} < \frac{1}{\sqrt{1+\beta_\nu}+1}$$

根据条件(7)得, $\left(\frac{1}{\sqrt{1+\beta_\omega}+1} - \alpha_\omega\right)$ 与 $\left(\alpha_\omega - \frac{1}{\sqrt{1+\beta_\nu}+1}\right)$

不同时为 0,故条件(4)和条件(5)皆成立时, μ, φ 至少有一个为 0。由于 $f''(\alpha_\omega) > 0$ 恒成立,即 $f'(\alpha_\omega)$ 在定义域内单调递增,若 $\varphi > 0, \mu = 0$,由条件(1)和条件(5)得 $f'(\alpha_\omega) < 0$ 时互相矛盾。故 $\varphi = 0$,可分以下两种情况:

情况 1:当 $\mu > 0$ 时,由条件(1)可得 $-i_\omega \beta_\omega (1+\alpha_\omega\beta_\omega)^{-i_\omega-1} + z i_\nu (1+\alpha_\omega\beta_\nu)^{i_\nu-1} - \mu + \varphi = 0$

$\beta_\omega)^{-i_\omega-1} + z_{i_\nu}(1 + \alpha_\omega\beta_\omega)^{i_\nu-1} > 0$ 即 $f'(\alpha_\omega) > 0, f(\alpha_\omega)$

在定义域内单调递增,故 $\alpha_\omega = \frac{1}{\sqrt{1+\beta_\omega}+1}$ 时取得最小值,满足上述条件。

情况 2:当 $\mu=0$ 时,由条件(1)求解方程 $f'(\alpha_\omega) = 0$ 。根据定义域的取值范围 $(\frac{1}{\sqrt{1+\beta_\omega}+1}, \frac{1}{\sqrt{1+\beta_\nu}+1})$ 即可得到最优解。若根大于左边界,则最优解为方程的根,否则,最优解为 $\frac{1}{\sqrt{1+\beta_\omega}+1}$ 。后面仿真验证时,只验证最优解为 $\frac{1}{\sqrt{1+\beta_\omega}+1}$ 的情形。

至此,我们得到了在 NOMA 系统下行链路的一个子信道复用两个用户时,既保证用户的 QoS 要求,又优化边缘用户功率分配性能的求解。

功率分配的整体算法步骤如下:

- (1) 假设子信道增益按升序排列,则功率值同样按照升序排列 $p_1 < p_2 < \dots < p_N$ 。
- (2) 令 $l=1$,利用式(12)和式(13)得到功率值 p_l ,若 $p_l \leq 0$,则移除此子信道,并令 $l=l+1$,跳回式(13);若 $p_l > 0$,循环结束。
- (3) 利用式(11)求得剩余所有子信道的功率。
- (4) 根据式(18)的求解,得到用户 ω 功率分配因子 α_ω ,与式(11)所得子信道功率 p_k 相乘即可得到用户 ω 在子信道 k 上的功率 $p_{k,\omega}$ 。计算各个子信道上叠加用户的功率,完成功率分配。

4 仿真结果分析

4.1 CEM 用户分组策略分析

为便于讨论,本节针对单个子信道从分组运算复杂度和系统性能两个维度对不同分组方案进行仿真对比,以验证本文 CEM 分组策略的优越性。

假设用户 m 为某小区用户且用户总数为 $M, m_1 = \arg \max(l), m_2 = \arg \min(l), |l_{m_1} - l_{m_2}| \leq \theta, M$ 为子信道最大叠加用户数 M_{\max} 的整数倍, $K = M/M_{\max}$ 。

(1) 算法复杂度分析。针对上述模拟通信进行用户分组,CEM 方案完成单个子信道分组共需运算 $C_m^1 + C_{M-1}^1 + \dots + C_{M-M_{\max}+1}^1$ 次,文献[11]分组算法针对单个子信道分组则需要运算 $C_M^{M_{\max}}$ 次,同步完成所有子信道分组需运算 $\frac{(2K)!}{2^K}$ 次。如图 2 所示,小区用户进行分组时,随着用户数增多,CEM 分组算法运算量皆小于文献[11]的分组算法,且差距逐渐增大。

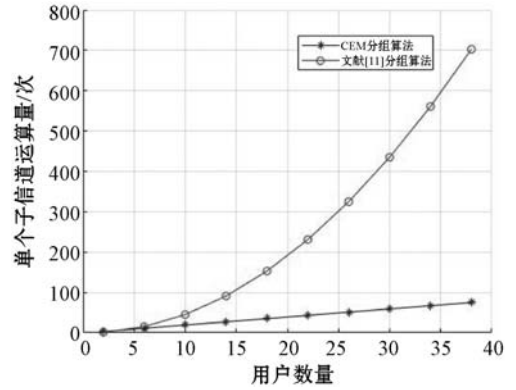


图 2 CEM 分组与文献[11]分组运算量对比

例如,当用户数为 6 且最大叠加用户数为 2 时,CEM 分组算法只需运算 11 次,而文献[11]搜索算法需要运算 15 次。因此,CEM 算法的复杂度远远低于穷举搜索算法。

(2) 系统性能分析。对 CEM 分组算法与文献[11]分组算法进行系统性能对比,功率分配时采用子信道间均匀分配功率的 EQ-FTPA。

由图 3 可知,小区吞吐量随着用户数量的增多而增大,同时 CEM 分组算法性能明显优于文献[11]的分组算法。文献[11]通过跨子信道筛选,得到质量最好的两用户进行子信道匹配,然而当匹配到子信道的两用户间有较小的信道增益差异时,将对系统性能提升造成干扰。CEM 分组算法充分考虑了信道增益对用户匹配性能的影响,因此将用户匹配在子信道后的系统吞吐量作为分组参照指标,保证了小区吞吐量的稳定提高。

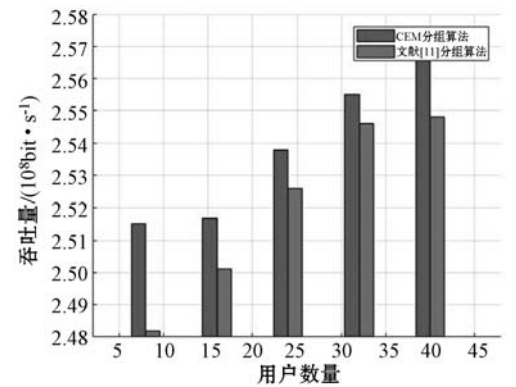


图 3 CEM 分组与文献[11]分组性能对比

4.2 功率分配算法分析

本节通过仿真来验证所提功率分配方案的优越性,证明对子带中的用户进行功率分配后,各用户的服务质量有所保证,并且边缘用户的功率分配具有一定优越性。

模拟实际通信,假设在一个 NOMA 系统的某一子信道中存在 2 个用户, $B_{sc} = 12$ Mbit/s。信道条件为瑞利衰落信道, $N_0 = -174$ dBm。假设用户 1 为中心用

户,用户 2 为边缘用户。

(1) 性能仿真验证。本文首先对传统正交多址接入(OMA)技术使用相同的功率分配算法。在不同发射速率下,对比验证系统吞吐量变化。结果证明随着发射功率提高,NOMA 系统始终比 OMA 系统的吞吐量更大,说明 NOMA 系统的性能更好。

在情况 1 时得到 NOMA 和 OMA 系统吞吐量在不同基站发射功率下的吞吐量的比较。由图 4 可以看出,NOMA 中距离基站较近的用户 1 的吞吐量与同等条件下 OMA 的用户 1 几乎相等;而 NOMA 中距离基站较远的用户 2 吞吐量明显优于 OMA 中用户 2 的吞吐量。证明此算法可以不但可以实现系统性能的整体提升,还可以充分保证边缘用户的服务质量得到极大改善。

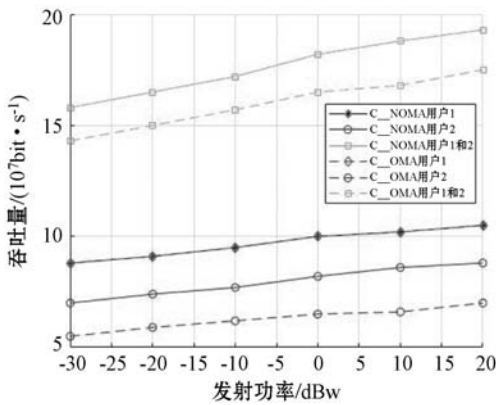


图 4 情况 1 时不同发射功率下速率对比

在情况 2 时得到 NOMA 和 OMA 系统吞吐量在不同基站发射功率下的吞吐量的比较。由图 5 可以看出,NOMA 中距离基站较近的用户 1 吞吐量增速缓慢,但是仍比同等条件下 OMA 的用户 1 性能更好,随着发射功率增大,两者差距逐渐减小;而 NOMA 中距离基站较远的用户 2 吞吐量增速较明显,并与同等条件下 OMA 中用户 2 的吞吐量差距逐渐增大。证明此算法不但很好地满足小区所有用户的服务质量保证,同时能够实现边缘用户的功率分配比例优化。

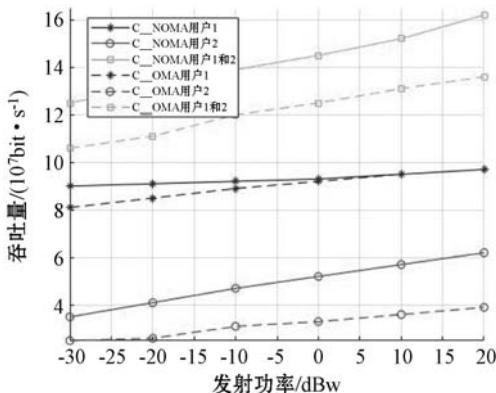


图 5 情况 2 时不同发射功率下速率对比

(2) 与其他算法对比。文献[8]所提的比例公平算法,在保证用户最低传输速率的同时,最大化系统的和速率,以实现系统速率最大化。但是没有考虑到两用户距离越来越远,边缘用户的功率占比公平性。

令用户 1 为中心用户且位置不变,用户 2 为边缘用户。将文献[8]中的数值设为与本文一致。如图 6 所示,用户 1 作为位置不变的中心用户,吞吐量不变,故图 6 仿真结果显示用户 1 的三条线段重合。随着两用户间距变大即边缘用户离基站越来越远,OMA 系统吞吐量降低效果最为明显,NOMA 系统性能明显优于 OMA 系统。同时可以看出随着边缘用户距基站越来越远,本文算法中用户 2 吞吐量始终大于文献[8],因此本文算法在边缘用户的服务质量与公平性上更优于文献[8]的分配算法。

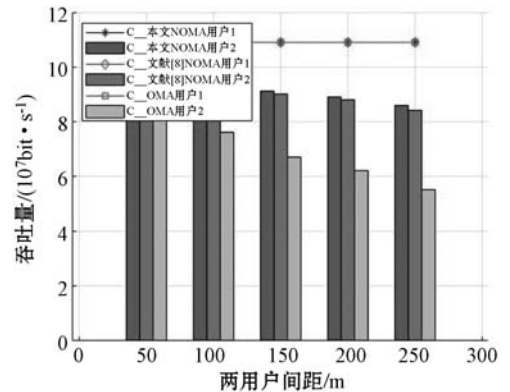


图 6 吞吐量随用户 2 距离基站距离的变化

5 结 语

本文针对下行链路 NOMA 系统中的资源分配问题展开研究,采用分步优化的思想首先提出了 CEM 用户分组方案使中等质量用户相互匹配时性能仍可保证显著提升,然后基于比例公平,以用户 QoS 为约束提出了 EUO 组内分配策略,满足了边缘用户性能优化的业务需求。仿真结果表明,本文方案在保证算法复杂度降低的同时,系统性能明显优于传统的资源分配方案。

参 考 文 献

- [1] 毕奇,梁林,杨珊,等. 面向 5G 的非正交多址接入技术[J]. 电信科学,2015,31(5):14-21.
- [2] Li J L, Zhou Z G, Guo H Y, et al. Optimized CQI quantization based PARC scheme for multi-stream MIMO systems [C]//International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing,2007:318-321.

- [5] Wang Y, Yang A, Li Z, et al. Blind drift calibration of sensor networks using sparse Bayesian learning[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(16):6249–6260.
- [6] Wang Y, Yang A, Li Z, et al. Blind drift calibration of sensor networks using signal space projection and Kalman filter [C]//*IEEE Tenth International Conference on Intelligent Sensors*. IEEE, 2015:1–6.
- [7] Wang Y, Yang A, Chen X, et al. A deep learning approach for blind drift calibration of sensor networks[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(13):4158–4171.
- [8] Miluzzo E, Lane N D, Campbell A T, et al. CaliBree: A self-calibration system for mobile sensor network[C]//*IEEE International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems*. Springer, 2008:314–331.
- [9] Takruri M, Rajasegarar S, Challa S, et al. Online drift correction in wireless sensor networks using spatio-temporal modeling[C]//*Proceedings of 2008 11th International Conference on Information Fusion*. IEEE, 2008.
- [10] Kumar D, Rajasegarar S, Palaniswami M. Automatic sensor drift detection and correction using spatial Kriging and Kalman filtering [C]//*Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems*. IEEE, 2013:183–190.
- [11] 武加文,李光辉. 基于 GABP-KF 的 WSN 数据漂移盲校准算法[J]. *智能系统学报*, 2019, 14(2):254–262.
- [12] Hochreiter S, Schmidhuber J. Long short-term memory[J]. *Neural Computation*, 1997, 9(8):1735–1780.
- [13] 王鑫,吴际,刘超,等. 基于 LSTM 循环神经网络的故障时间序列预测[J]. *北京航空航天大学学报*, 2018, 44(4):772–784.
- [14] Kumar S D, Subha D. Prediction of depression from EEG signal using long short term memory(LSTM) [C]//*2019 3rd International Conference on Trends in Electronics and Informatics(ICOEI)*. IEEE, 2019:1248–1253.
- [15] Ni K, Ramanathan N, Chehade M N H, et al. Sensor network data fault types[J]. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 2009, 5(3):1–29.
- [16] Shi T, Shi X, Fang X. A virtual backbone construction algorithm based on connected dominating set in wireless sensor networks[C]//*2014 International Conference on Computer, Communications and Information Technology (CCIT 2014)*. Atlantis Press, 2014.
- [17] Mohanty J P, Mandal C, Reade C. Distributed construction of minimum connected dominating set in wireless sensor network using two-hop information [J]. *Computer Networks*, 2017, 123:137–152.
- [18] 杨丹. 卡尔曼滤波器设计及其应用研究[D]. 湖南:湘潭大学, 2014.
- [19] 权义萍,金鑫,张蕾,等. 基于 Mean-Shift 的卡尔曼粒子滤波车辆跟踪算法研究[J]. *计算机应用与软件*, 2014, 31(9):236–239.
- [20] Wu J, Li H L. A dominating-set-based routing scheme in ad hoc wireless networks [J]. *Telecommunication Systems*, 2001, 18(1/3):13–36.
- [21] 孙瑞奇. 基于 LSTM 神经网络的美股股指价格趋势预测模型的研究[D]. 北京:首都经济贸易大学, 2016.
- [22] Cryer J D, Chan K S. *Time series analysis: With applications in R*[M]. 2nd ed. Berlin:Springer, 2010.
- ~~~~~
- (上接第 126 页)
- [3] Shahab M B, Irfan M, Kader M F, et al. User pairing schemes for capacity maximization in non-orthogonal multiple access systems [J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2016, 16(17):2884–2894.
- [4] Sun Q, Han S, Chin L I, et al. On the ergodic capacity of MIMO NOMA systems[J]. *IEEE Wireless Communications Letter*, 2015, 4(4):405–408.
- [5] 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.
- [6] Celik A, Radaideh R M, Al-Qahtani F S, et al. Resource allocation and cluster formation for imperfect NOMA in DL/UL decoupled HetNets [C]//*IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, 2017:1–6.
- [7] Ding Z G, Fan P Z, Poor H V. Impact of user pairing on 5G non-orthogonal multiple-access downlink transmissions[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(8):6010–6023.
- [8] Wang C L, Chen J Y. Power allocation for a downlink non-orthogonal multiple access system [J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2016, 5(5):532–535.
- [9] Liu F, Onen P M, Petrova M. Proportional fairness-based power allocation and user set selection for downlink NOMA systems [C]//*IEEE ICC 2016-Mobile and Wireless Networking Symposium*, 2016:1–6.
- [10] Yang Z, Ding A G, Fan P Z. 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.
- [11] Fang F, Zhang H J, Cheng J L, et al. Energy-efficient resource allocation for downlink non-orthogonal multiple access network [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2016, 64(9):3722–3732.