

大规模 MIMO-NOMA 下行系统可达吞吐量研究

朱翠涛 鲁经纬

(中南民族大学 电子信息工程学院,武汉 430074)

摘要 非正交多址系统的可达吞吐量与用户分簇策略、预编码方法、功率分配算法等有关.为了提高系统可达吞吐量,提出了一种改进的 k-means 用户分簇算法,该算法利用空间相关性对用户进行分簇,从而降低簇间干扰;然后利用块对角化预编码对发送给各簇的信息进行预处理,使得每簇的预编码向量与其它簇等效信道向量近似正交,进一步消除簇间干扰;同时构建最优功率分配优化问题,并利用 Karush-Kuhn-Tucker(KKT)条件求得簇内每个用户的最佳功率分配系数,降低簇内用户间的干扰.实验结果表明:所提出的方法能有效提高系统的可达吞吐量.

关键词 非正交多址;大规模 MIMO;吞吐量;用户分簇;预编码

中图分类号 TN911 文献标识码 A 文章编号 1672-4321(2019)01-0081-07

DOI 10.12130/znmzdk.20190115

引用格式 朱翠涛,鲁经纬.大规模 MIMO-NOMA 下行系统可达吞吐量研究[J].中南民族大学学报(自然科学版),2019,38(1):81-87.

ZHU Cuitao,LU Jingwen. Achievable throughput in massive MIMO-NOMA downlink system[J].Journal of South-Central University for Nationalities(Natural Science Edition),2019,38(1):81-87.

Achievable throughput in massive MIMO-NOMA downlink system

ZHU Cuitao, LU Jingwei

(College of Electronic and Information Engineering, South-Central University for Nationalities, Wuhan, 430074, China)

Abstract The achievable throughput in non-orthogonal multiple access system is mainly related to the user clustering strategy, precoding method and power allocation algorithm. In order to improve the achievable throughput, improved k-means algorithm for user clustering based on spatial correlation is proposed to mitigate the inter-cluster interference. Meanwhile, the block diagonal precoding is utilized to preprocess the user signals, which makes the precoding vector for each cluster approximately orthogonal to the equivalent channel vector of other clusters. As a result, the inter-cluster interference is eliminated. Moreover, power allocation is optimized to mitigate intra-cluster interference, and the optimal power allocation coefficient of every user is found by solving the optimal problem with Karush-Kuhn-Tucker. Numerical simulation shows that the proposed method can improve the system throughput.

Keywords NOMA; massive MIMO; throughput; user clustering; precoding

非正交多址接入(NOMA)技术相比于传统的正交多址接入(OMA)技术,能够显著提高系统的频谱效率,是第5代移动通信(5G)关键技术之一.然而,由于NOMA系统中多个用户可共享同一资源块,会产生更多的干扰因素而导致NOMA系统性能下降.为了提高NOMA系统的性能,人们做了大量研究工作.文献[1]证明了在用户随机分布的5G系统中,针对不同用户选取合适传输速率和功率分配因子,

NOMA可以获得比传统正交多址更大的系统容量;文献[2]提出了一种基于相关性的用户聚簇算法,分析了迫零预编码和随机预编码在NOMA中的性能,并结合簇内功率分配算法提高了系统和速率;文献[3]和[4]分析并比较了NOMA系统中固定功率分配算法和分数阶发射功率分配算法性能:固定功率分配算法按照固定的比例来分配功率,计算复杂度较低,分数阶发射功率分配考虑了用户信道条件

收稿日期 2018-02-07

作者简介 朱翠涛(1967-),男,教授,博士,研究方向:无线通信及最优化理论,E-mail: cuitaozhu@mail.scuec.edu.cn

基金项目 国家自然科学基金资助项目(61671483);湖北省自然科学基金项目(2016CFA089)

及用户的公平性具有较好的系统性能;文献[5]通过求解 NOMA 系统总吞吐量最大化问题,分别得出上行和下行的低复杂度用户分簇方案和簇内用户最优功率的闭式解,证明合理的用户分簇和功率分配方法能够提高系统吞吐量;文献[6]基于 FDD 的大规模 MIMO-NOMA 系统,先利用统计信道信息对用户分簇,再进行选择构成 NOMA 用户组,有效降低了簇间和簇内干扰;文献[7]提出一种新型的 MIMO-NOMA 系统模型,即簇间使用 OMA 方式,簇内采用 NOMA 方式,提出一种低复杂度用户分簇算法,然后利用每簇的等效信道增益提出一种新的迫零预编码以消除簇间干扰,并分两步进行功率分配;簇内各用户功率采用文献[5]下行最优功率的闭式解求得,提高了系统的频谱效率。

大规模 MIMO 与 NOMA 相结合能进一步提高系统的容量,但随着基站发射天线数的增加,会加剧簇间干扰,从而影响系统的性能。为此,本文针对大规模 MIMO-NOMA 下行系统的可达吞吐量开展相应研究工作。首先,利用空间相关性提出一种改进的 k-means 用户分簇算法,将空间相关性较大的用户分为一簇,降低簇间干扰。然后,采用块对角化预编码使各簇之间信道近似正交,进一步消除簇间干扰,并形成了功率约束下的系统可达吞吐量的优化问题模型,通过求解得到最优的用户功率分配系数,提高接收端连续干扰消除(SIC)的可靠性,达到降低簇内用户间干扰的目的。

1 系统与信号模型

单基站多用户 FDD 下行系统中,设基站配置由 N 根天线组成的均匀线性阵列,服务 K 个单天线用户, $N > K$,将所有用户分为 G 簇,每簇中有 L 个用户分布在同一个单散射环内,且同簇用户的信道增益有较大差异,小区内采用基于功率域的非正交多址方式,系统模型如图 1 所示。

第 g ($g \in \{1, \dots, G\}$) 簇中用户 l ($l \in \{1, 2, \dots, L\}$) 表示为 $u_{g,l}$,其信道向量 $H_{g,l} \in \mathbb{C}^{1 \times N}$ 可分解为:

$$H_{g,l} = A_{g,l}^2 \bar{H}_{g,l} R_{g,l}^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

其中 $A_{g,l}$ 表示大尺度衰落矩阵,其主对角元素包含大尺度衰落系数 $\beta_{j,l} = cd_{j,l}^{-\gamma}$, $d_{g,l}$ 为用户 $u_{g,l}$ 到基站的距离,且用户到基站的距离各不相同: $d_{g,1} < d_{g,2} < \dots < d_{g,L}$, γ 为路径损耗指数, c 为参考距离下的路径损耗, $\bar{H}_{g,l}$ 为小尺度衰落矩阵,其各元素间满足独立

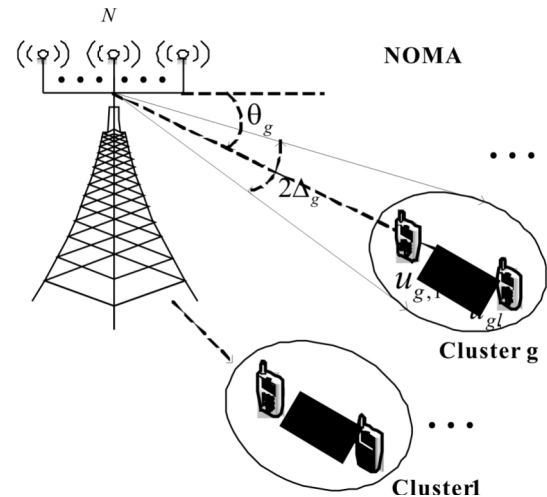


图 1 系统模型

Fig.1 System model

同分布,且服从均值为零,方差为 1 的复高斯分布。 $R_{g,l}$ 为 $u_{g,l}$ 用户在基站侧的信道协方差矩阵。假设基站配置大规模均匀线性阵列,并采用单环散射模型,用户 $u_{g,l}$ 的信道协方差矩阵 $R_{g,l}$,可由下式计算得到^[8]:

$$[R_{g,l}]_{a,b} = \frac{1}{2\Delta_g} \int_{\theta_g - \Delta_g}^{\theta_g + \Delta_g} e^{-j2\pi \frac{\Omega}{\lambda} (a-b) \sin \varphi} d\varphi, \quad (2)$$

式(2)中, $[R_{g,l}]_{a,b}$ 表示天线 a, b 间的相关性, g 簇方位角为 θ_g ,角度扩展为 Δ_g , Ω 为相邻天线间的距离, λ 是载波波长, φ 表示波束的到达角。同一簇内用户属于同一散射环,由于散射环境相同,故信道协方差矩阵大致相同,统一表示成 R_g ,可分解为 $R_g = U_g \Sigma_g U_g^H$, U_g 是 R_g 的非零特征值对应的特征向量矩阵, Σ_g 是 R_g 非零特征值组成的对角矩阵。

假设第 g 簇预编码向量为 v_g ,基站发射总的信号为 $X = \sum_{g=1}^G v_g x_g$, g 簇用户总的信号为: $x_g = \sum_{l=1}^L \sqrt{\alpha_{g,l} P_g s_{g,l}}$, $E[|s_{g,l}|^2] = 1$, $\alpha_{g,l}$, $s_{g,l}$ 分别表示用户 $u_{g,l}$ 的功率分配系数和传输信号, $\alpha_{g,l} \in [0, 1]$, P_g 为第 g 簇总功率,用户 $u_{g,l}$ 接收信号为:

$$y_{g,l} = H_{g,l} X + z_{g,l} = H_{g,l} v_g x_g + H_{g,l} \sum_{i=1, i \neq g}^G v_i x_i + z_{g,l} = H_{g,l} v_g \sqrt{\alpha_{g,l} P_g s_{g,l}} + H_{g,l} v_g \sum_{j=1}^{l-1} \sqrt{\alpha_{g,j} P_g s_{g,j}} + H_{g,l} \sum_{i=1, i \neq g}^G v_i x_i + z_{g,l}, \quad (3)$$

式(3)中 $z_{g,l}$ 为高斯噪声,均值为 0,方差为 σ_g^2 。由(3)式可知用户接收的信号中除有用信号外,还包

括簇间干扰, 簇内用户间干扰及高斯噪声. 用户 $u_{g,l}$ 的信干噪比 $SINR_{g,l}$ 为:

$$SINR_{g,l} = \frac{|H_{g,l}v_g|^2\alpha_{g,l}}{\sum_{j=1}^{l-1}|H_{g,l}v_g|^2\alpha_{g,j} + \sum_{i=1, i \neq g}^G |H_{g,l}v_i|^2\alpha_i + \frac{1}{P_g}\sigma_g^2}, \quad (4)$$

用 $W_{g,l}$ 表示归一化的信道增益, 且:

$$W_{g,l} = \frac{|H_{g,l}v_g|^2}{B(\sum_{i=1, i \neq g}^G |H_{g,l}v_i|^2 + \frac{\sigma_g^2}{P_g})}, \quad (5)$$

式(5)中 B 表示每个发送波束的带宽, 则(4)式可简化为:

$$SINR_{g,l} = \frac{W_{g,l}\alpha_{g,l}}{W_{g,l}\sum_{j=1}^{l-1}\alpha_{g,j} + 1}, \quad (6)$$

用户 $u_{g,l}$ 可达吞吐量为:

$$C_{g,l} = B \log_2 \left(1 + \frac{W_{g,l}\alpha_{g,l}}{W_{g,l}\sum_{j=1}^{l-1}\alpha_{g,j} + 1} \right), \quad (7)$$

则系统可达吞吐量表示为:

$$C_{\Sigma} = \sum_{g=1}^G \sum_{l=1}^L C_{g,l} = \sum_{g=1}^G \sum_{l=1}^L B \log_2 \left(1 + \frac{W_{g,l}\alpha_{g,l}}{W_{g,l}\sum_{j=1}^{l-1}\alpha_{g,j} + 1} \right), \quad (8)$$

由(8)式可知, 系统可达吞吐量主要与最优用户分簇方法、预编码以及功率分配方法有关, 本文将分别从这三个方面进行研究.

2 联合空间相关性的用户分簇

根据(6)-(8)式可知在一定范围内系统的吞吐量随 $SINR$ 的增大而增大, 合理的用户分簇方法能有效降低簇间干扰, 提高用户的 $SINR$. 本文提出了一种改进的 k -means 分簇算法, 利用空间相关性对用户分簇. 算法的改进包括初始簇中心的选取和迭代分簇两个部分. 基本思想为: 先采用最大距离法从 K 个用户中找出 G 个用户作为初始中心点, 然后再采用加权似然准则进行迭代分簇, 直到算法达到终止条件. 根据用户的空间相关性来划分用户, 度量用户之间信道特性相似程度的准则如下:

准则 1 欧氏距离, 欧氏距离函数表达式如下^[8]:

$$D(U_{g,l}, V_g) = \|U_{g,l}U_{g,l}^H - V_gV_g^H\|_F^2, \quad (9)$$

式(9)中 $U_{g,l}$ 是用户 $u_{g,l}$ 的特征矩阵, V_g 为第 g 个用户簇中心点对应的特征矩阵, $D(U_{g,l}, V_g) \geq 0$, 仅当 $U_{g,l} = V_g$ 时 $D(U_{g,l}, V_g) = 0$. 此时, 用户 $u_{g,l}$ 为第 g 簇的中心点, $\|\cdot\|_F$ 表示 Frobenius 范数. 簇用户的中心特征子空间为:

$$V_g = eig \left\{ \frac{1}{|K_g|} \sum_{l \in K_g} U_{g,l}U_{g,l}^H \right\}, \quad (10)$$

式(10)中 $eig\{\cdot\}$ 表示求解矩阵的主要特征矢量的运算, 每簇传输的数据流数目为 K_g .

准则 2 加权似然函数^[9]

加权似然函数利用各用户的特征向量在各簇中心点的特征向量空间中的投影, 将用户划分到不同簇, 加权似然值表示为:

$$\Gamma(R_{g,l}, V_g) = \|U_{g,l}(\sum_{g,l}^{1/2})^H V_g\|_F^2, \quad (11)$$

由(11)式可知, 如果用户 $u_{g,l}$ 离簇的中心比较近, 则 $U_{g,l} \approx V_g$. 根据酉矩阵的性质, $U_{g,l}^H V_g$ 的值较大; 如果用户 $u_{g,l}$ 离簇中心比较远, 由于酉矩阵的正交性, $U_{g,l}^H V_g$ 的值比较小. 簇中心点计算公式为:

$$V_g = eig \left\{ \frac{1}{|K_g|} \sum_{l \in K_g} R_{g,l} \right\}, \quad (12)$$

总的似然值计算式为:

$$\Gamma_{tot} = \sum_{g=1}^G \sum_{l \in K_g} \Gamma(R_{g,l}, V_g).$$

改进的 k -means 算法具体步骤如下:

第一步: 找出 K 个用户中距离最远的两个用户, 作为初始用户的中心点: V_1^0, V_2^0 , 此时用户簇个数 $g = 2$;

第二步: 以 V_1^0, V_2^0 为初始中心点, 将所有用户分为 $g = 2$ 个簇;

第三步: 从已分好的每个簇中分别找出与各自中心点相似性最弱的一个用户(即距离最大的点), 然后依次计算这些用户中每个用户与各簇中心点 $V_{\xi}^0 (\xi \in \{1, 2, \dots, g\})$ 距离之和, 将距离之和最大的用户确定为第 $g + 1$ 个簇的初始中心点. 接着, 将所有用户重新划分成 $g + 1$ 个簇.

第四步: 判断当前簇的个数 $g + 1$ 是否大于等于 G , 满足则执行第五步, 否则重复执行第三步;

第五步: 按照公式(11)计算每个用户到各簇中心点 V_{ξ}^n 的加权似然相似度系数 $\Gamma(R_{g,l}, V_{\xi}^n)$, 将每个用户分配到相似度系数最大的簇中, n 为迭代次数;

第六步: 按照公式(12)更新 V_{ξ}^n ;

第七步: 若 $D_{\Gamma_{tot}} = |\Gamma_{tot}^n - \Gamma_{tot}^{n-1}| < \varepsilon \Gamma_{tot}^{n-1}$ (ε 值是控制分簇算法收敛的阈值)成立, 分簇完成, 执行第

八步;否则令 $n = n + 1$ 返回第五步继续执行;

第八步:得到分簇结果.

3 簇间预编码

为了进一步消除簇间干扰本文采用块对角化预编码,通过 SVD 分解,获得每簇相对于其它簇干扰为零的正交基.第 g 簇总的信道矩阵为 $H_g = [H_{g,1}, H_{g,2}, \dots, H_{g,L}]$ 预编码向量 v_g 需要满足:

$$H_\mu v_g = 0 \quad \mu \in \{1, 2, \dots, G\} \text{ 且 } \mu \neq g, \quad (13)$$

要实现(13)式的条件 v_g 应该在其它所有簇的联合信道矩阵 H'_g 的零空间内,即:

$$H'_g = [H_1^T, H_2^T, \dots, H_{g-1}^T, H_{g+1}^T, \dots, H_G^T]^T, \quad (14)$$

$$v_g \in \text{span}^\perp(H'_g), \quad (15)$$

为求矩阵 H'_g 的零空间,要对其进行 SVD 分解:

$$H'_g = \bar{U}_g \bar{\Lambda}_g [\bar{E}_g^{(1)} \bar{E}_g^{(0)}]^H, \quad (16)$$

式(16)中 $\bar{E}_g^{(1)}$ 是 H'_g 的前 $\text{rank}(\bar{H}_g)$ 个右奇异向量矩阵 $\bar{E}_g^{(0)}$ 为剩余右奇异向量构成的矩阵 $\bar{E}_g^{(0)}$ 构成了 H'_g 零空间的一个标准正交基,因此:

$$H'_g \bar{E}_g^{(0)} = [H_1^T, H_2^T, \dots, H_{g-1}^T, H_{g+1}^T, \dots, H_G^T]^T \bar{E}_g^{(0)} = 0, \quad (17)$$

即

$$H_\mu \bar{E}_g^{(0)} = 0, \quad \forall \mu \neq g. \quad (18)$$

通过信道矩阵 H_g 在 H'_g 零空间的投影得到投影后的信道矩阵,在投影后的协方差矩阵 \hat{R}_g 的主特征值方向上进行波束成型.对 g 簇的投影信道 $H_g \bar{E}_g^{(0)}$ 及 \hat{R}_g 进行 SVD 分解, $\hat{\Sigma}_g$ 为 \hat{R}_g 的 $\text{rank}(\hat{R}_g)$ 个主特征向量;最终得到的预编码矩阵为:

$$v_g = \bar{E}_g^{(0)} \hat{\Sigma}_g. \quad (19)$$

4 最优簇内功率分配

本系统模型涉及簇间和簇内两层功率分配.由于各簇用户数目相等,为方便计算,簇间采用等功率分配,若基站发射总功率为 P_t ,则每簇的总功率为 P_t/G .为了保证 SIC 的性能,降低簇内用户间干扰,最优的簇内功率分配是必要的.

第 g 簇总功率 $P_g = P_t/G$,簇内各用户离基站的距离满足 $d_{g,1} < d_{g,2} < \dots < d_{g,L}$,由(1)和(5)式可知离基站近的用户信道条件优于离基站远的用户,归一化信道增益满足: $W_{g,1} > W_{g,2} > \dots > W_{g,L}$.根据 NOMA 功率分配原则,信道条件好的用户应分配较低的功率,信道条件差的分配较高的功率,因此簇

内各用户的功率分配系数需要满足 $\alpha_{g,1} < \alpha_{g,2} < \dots < \alpha_{g,L}$.此外,各用户功率之间还需满足保证接收端 SIC 性能的约束条件^[5]:

$$P_g \alpha_{g,l} W_{g,l-1} - P_g W_{g,l-1} \sum_{j=1}^{l-1} \alpha_{g,j} \geq P_{tol}, \quad (20)$$

对(20)式整理得: $(\alpha_{g,l} - \sum_{j=1}^{l-1} \alpha_{g,j}) W_{g,l-1} \geq P_{tol}/P_g$, P_{tol} 为用户功率间需满足的最小差值,为保证服务质量,用户的最小传输速率为 r_0 ,令 $\tau = P_{tol}/P_g$, τ 为常数.根据系统模型构建簇内功率分配系数的优化问题模型如下:

$$\begin{cases} \max_{\alpha_{g,j}} \sum_{l=1}^L \text{Blog}_2 \left(1 + \frac{W_{g,l} \alpha_{g,l}}{W_{g,l} \sum_{j=1}^{l-1} \alpha_{g,j} + 1} \right) \\ \text{s.t.} \quad \sum_{l=1}^L \alpha_{g,l} \leq 1, \alpha_{g,l} \in [0, 1] \\ \text{Blog}_2 \left(1 + \frac{W_{g,l} \alpha_{g,l}}{W_{g,l} \sum_{j=1}^{l-1} \alpha_{g,j} + 1} \right) \geq r_0 \\ (\alpha_{g,l} - \sum_{j=1}^{l-1} \alpha_{g,j}) W_{g,l-1} \geq \tau \end{cases}, \quad (21)$$

式(21)中,第一个约束条件是指簇内功率分配系数之和不大于 1,第二个约束条件表示每个用户的传输速率必须大于最低速率 r_0 ,此外,簇内各用户功率之间要存在一定的差值,即要满足第三个约束条件.分析上述优化问题可知,该优化问题为非凸问题,本文利用 KKT 条件进行求解.由拉格朗日函数可得:

$$\begin{aligned} l(\alpha_{g,l}, \delta, \bar{\omega}, \zeta) = & \sum_{l=1}^L \text{Blog}_2 \left(1 + \frac{W_{g,l} \alpha_{g,l}}{W_{g,l} \sum_{j=1}^{l-1} \alpha_{g,j} + 1} \right) + \\ & \sum_{l=1}^L \bar{\omega}_l (W_{g,l} \alpha_{g,l}) - \\ & \sum_{l=1}^L \bar{\omega}_l (2^\rho - 1) (W_{g,l} \sum_{j=1}^{l-1} \alpha_{g,j} + 1) + \\ & \delta (1 - \sum_{l=1}^L \alpha_{g,l}) + \\ & \sum_{l=2}^L \zeta_l ((\alpha_{g,l} - \sum_{j=1}^{l-1} \alpha_{g,j}) W_{g,l-1} - \tau), \quad (22) \end{aligned}$$

式(22)中 $\delta, \bar{\omega}_l, \zeta_l$ 为拉格朗日乘子 $\rho = r_0/B$ 为常量.根据 KKT 条件可得:

$$\begin{aligned} \frac{\partial l}{\partial \alpha_{g,l}^*} = & \frac{B W_{g,l}}{W_{g,l} \sum_{j=1}^l \alpha_{g,j} + 1} - \delta + \bar{\omega}_l W_{g,l} - \\ & \sum_{j=l+1}^L \frac{B \alpha_{g,j} W_{g,j}^2}{\left(\sum_{t=1}^j \alpha_{g,t} W_{g,t} + 1 \right) \left(\sum_{t=1}^{j-1} \alpha_{g,t} W_{g,t} + 1 \right)} - \\ & \sum_{j=l+1}^L (2^\rho - 1) \bar{\omega}_j W_{g,j} + \zeta_l W_{g,l-1} - \sum_{j=l+1}^L \zeta_j W_{g,j} \leq 0 \\ 0 \leq & \alpha_{g,l}^* \leq 1, \quad (23) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial l}{\partial \delta^*} = 1 - \sum_{l=1}^L \alpha_{g,l} \geq 0, \quad \delta^* \geq 0, \quad (24)$$

$$\frac{\partial l}{\partial \omega_l^*} = W_{g,l} \alpha_{g,l} - (2^p - 1) (1 + W_{g,l} \sum_j^{l-1} \alpha_{g,j}) \geq 0, \quad \bar{\omega}_l^* \geq 0, \quad (25)$$

$$\frac{\partial l}{\partial \zeta_l^*} = (\alpha_{g,l} - \sum_{j=1}^{l-1} \alpha_{g,j}) W_{g,l-1} - \tau \geq 0, \quad \zeta_l^* \geq 0, \quad (26)$$

若拉格朗日乘子的集合依次表示成: $O = \{\delta\}$, $\Omega = \{\bar{\omega}_1, \bar{\omega}_2, \dots, \bar{\omega}_L\}$, $\Theta = \{\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_L\}$, 且每簇用户数不少于 2 个, 则拉格朗日函数的解 Ψ 是由这三个集合中的元素所构成的集合, 例如每簇 2 个用户时, 满足 KKT 条件的解有 2 种, 为: $\Psi_1 = \{\delta, \bar{\omega}_2\}$, $\Psi_2 = \{\delta, \zeta_2\}$; 每簇 3 个用户时, 有 4 种: $\Psi_1 = \{\delta, \bar{\omega}_2, \bar{\omega}_3\}$, $\Psi_2 = \{\delta, \bar{\omega}_2, \zeta_3\}$, $\Psi_3 = \{\delta, \zeta_2, \bar{\omega}_3\}$, $\Psi_4 = \{\delta, \zeta_2, \zeta_3\}$, 以此类推. 假设簇内用户均满足最小速率条件, 当每簇 L 个用户时, 设满足条件的一种解为 $\Psi = \{\delta, \zeta_2, \zeta_3, \dots, \zeta_L\}$, $\zeta_1 = \bar{\omega}_1 = \bar{\omega}_2 = \dots = \bar{\omega}_L = 0$, 则:

$$\sum_{l=1}^L \alpha_{g,l} - 1 = 0, \quad (27)$$

$$W_{g,l} \alpha_{g,l} - (2^p - 1) (1 + W_{g,l} \sum_j^{l-1} \alpha_{g,j}) = 0, \quad (28)$$

$$(\alpha_{g,l} - \sum_{l=1}^{l-1} \alpha_{g,l}) W_{g,l-1} - \tau > 0, \quad (29)$$

$$W_{g,l} \alpha_{g,l} - (2^p - 1) (1 + W_{g,l} \sum_j^{l-1} \alpha_{g,j}) > 0, \quad (30)$$

根据 (27) - (28) 式解得当每簇用户数目分别为 2, 3, 4 时簇内用户的功率分配系数, 如表 1 所示, 得到的功率分配系数需要满足式 (29) - (30).

表 1 每簇用户数为 2, 3, 4 时对应的最优功率分配系数

Tab.1 Optimal transmission power allocation coefficient for 2-3-, and 4-users in each cluster

每簇用户数目	最优功率分配系数
$L = 2$	$\alpha_{g,1} = \frac{1}{2} - \frac{\tau}{2W_{g,1}}$
	$\alpha_{g,2} = \frac{1}{2} + \frac{\tau}{2W_{g,2}}$
$L = 3$	$\alpha_{g,1} = \frac{1}{4} - \left(\frac{\tau}{2W_{g,1}} + \frac{\tau}{4W_{g,2}} \right)$
	$\alpha_{g,2} = \frac{1}{4} + \frac{\tau}{2W_{g,1}} - \frac{\tau}{4W_{g,2}}$
	$\alpha_{g,3} = \frac{1}{2} + \frac{\tau}{2W_{g,1}}$
$L = 4$	$\alpha_{g,1} = \frac{1}{8} - \frac{\tau}{2W_{g,1}} - \frac{\tau}{4W_{g,2}} - \frac{\tau}{8W_{g,3}}$
	$\alpha_{g,2} = \frac{1}{8} + \frac{\tau}{2W_{g,1}} - \frac{\tau}{4W_{g,2}} - \frac{\tau}{8W_{g,3}}$
	$\alpha_{g,3} = \frac{1}{4} + \frac{\tau}{2W_{g,2}} - \frac{\tau}{4W_{g,3}}$
	$\alpha_{g,4} = \frac{1}{2} + \frac{\tau}{2W_{g,3}}$

当簇内有 L 个用户时, 由数学归纳法得到各用户的功率分配系数为:

$$\alpha_{g,1} = \frac{1}{2^{L-1}} - \sum_{j=2}^L \frac{\tau}{2^{j-1} W_{g,j-1}},$$

$$\alpha_{g,l} = \frac{1}{2^{L-l+1}} - \sum_{j=l}^L \frac{\tau}{2^{j-l+1} W_{g,j-1}} + \frac{\tau}{W_{g,j-1}}, \quad 2 \leq l \leq L.$$

求解得到的最优解必须满足 KKT 条件, 以每簇 4 个用户的情况为例, 验证解集为 $\Psi = \{\delta, \zeta_2, \zeta_3, \zeta_4\}$, $\zeta_1 = \bar{\omega}_1 = \bar{\omega}_2 = \dots = \bar{\omega}_4 = 0$ 时, 是否满足条件, 令 (23) 式等于 0, 经整理得:

$$\frac{BW_{g,4}}{W_{g,4} \sum_{j=1}^4 \alpha_{g,j} + 1} - \sum_{j=1}^3 \frac{B\alpha_{g,j} W_{g,j}^2}{\left(\sum_{l=1}^j \alpha_{g,l} W_{g,l} + 1 \right) \left(\sum_{l'=1}^{j-1} \alpha_{g,l'} W_{g,l'} + 1 \right)} = \delta - \zeta_4 W_{g,3} + \sum_{j=1}^2 \zeta_j W_{g,j}, \quad (31)$$

由等式 (31) 两边同类项系数对应相等可得:

$$\delta = \frac{BW_{g,4}}{W_{g,4} \sum_{j=1}^4 \alpha_{g,j} + 1} + \zeta_4 W_{g,4},$$

$$\zeta_1 = \bar{\omega}_1 = 0, \quad l = 1, 2, 3, 4,$$

$$\zeta_2 = \frac{Ba_{g,2}(W_{g,1} - W_{g,2})}{W_{g,1}(\alpha_{g,1} W_{g,1} + 1)(\alpha_{g,1} W_{g,2} + 1)},$$

$$\zeta_l = \frac{Ba_{g,l}(W_{g,l-1} - W_{g,l})}{W_{g,l} \left(\sum_{l=1}^{j-1} \alpha_{g,l} W_{g,l-1} + 1 \right) \left(\sum_{l'=1}^{j-1} \alpha_{g,l'} W_{g,l'-1} + 1 \right)} + \zeta_{l-1} W_{g,l-2}, \quad l = 3, 4,$$

而 $W_{g,l-1} > W_{g,l}$, 所以 $\delta, \bar{\omega}_l, \zeta_l$ 都大于零, 因此解 $\Psi = \{\delta, \zeta_2, \zeta_3, \zeta_4\}$ 满足 KKT 条件, 其它解可同理进行验证.

分析优化问题的约束方程及求解过程可知, 每簇有 L 个用户时, 求解时有 $2L$ 个拉格朗日乘子, 满足 KKT 条件的组合方式有 2^{2L} 种, 但是本文的优化变量为用户的功率分配系数满足 $\alpha_{g,l} \in [0, 1]$, $l \in \{1, 2, \dots, L\}$, 当有 L 个优化变量时, 只需 L 个方程来求解, 所以 2^{2L} 种组合方式不必全部验证, 通过对每簇 2, 3, 4 个用户的情况求解可知, KKT 条件个数依次为 2, 4, 8 个, 由数学归纳法可得簇内 L 个用户的组合方式为 2^{L-1} 种.

5 实验与分析

本系统模型中基站配置均匀线性天线阵列, 天线间距为 d , 用户天线数为 1, 用户均匀分布在的扇区

内,单环散射模型的角度扩展为,其它参数设置如下表 2:

表 2 仿真参数配置
Tab.2 Simulation parameters

参数	取值
基站最大发射功率	46dBm
簇内用户之间功率差	10dBm
系统带宽	8MHz
每簇带宽 B	180kHz
基站天线数 N	128
高斯白噪声功率	0.1W

比较改进 k -means 算法与传统 k -means 的收敛性能, 阈值 $\epsilon=0.01$, $K=15$, $G=3$, 中心角依次为 $\theta_1 = -45^\circ$, $\theta_2 = 0^\circ$, $\theta_3 = 45^\circ$, 角度扩展 $\Delta = 10^\circ$, 假设簇与簇之间不重叠, 当前后两次迭代总的似然值之差 $D_{I_{tot}}$ 小于阈值时, 算法收敛. 两种分簇算法的收敛性能如图 2 所示, 横坐标为迭代次数, 纵坐标为 $D_{I_{tot}}$ 的值, 两种算法都能快速达到收敛, 但改进 k -means 算法收敛更快, 只需 6 次迭代就达到收敛, 传统 k -means 需要 16 次才能收敛. 另外, 改进的 k -means 算法选取的各簇中心点之间距离较远, 使得用户簇之间相关性更弱, 更有利于降低簇间干扰.

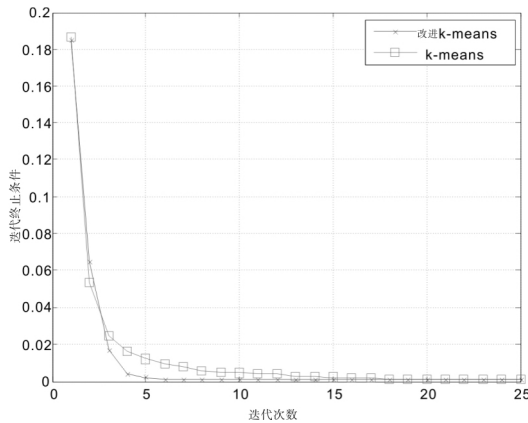


图 2 收敛性能比较

Fig.2 Comparison of convergence performance

对本文分簇算法与随机分簇、按用户信道状态排序分簇算法^[5]进行性能仿真和比较. 当总用户数为 15, 使用不同算法将用户分为 3 个簇, 簇间使用块对角化预编码, 接收端采用 SIC 接收信号.

系统可达吞吐量随信噪比变化规律如图 3 所示. 所提算法减弱了簇间的相关性, 降低了簇间干扰, 从图 3 中可以看出, 系统可达吞吐量性能最优, 而且低信噪比时吞吐量性能较好, 其次是按用户信道状态排序分簇算法, 分簇时利用了用户间信道条件的差异, 但未充分考虑簇间的相关性. 随机分簇系统性能最差, 主要原因是随机分簇没有考虑用户自

身的信道条件, 具有随机性, 系统的吞吐量得不到保证.

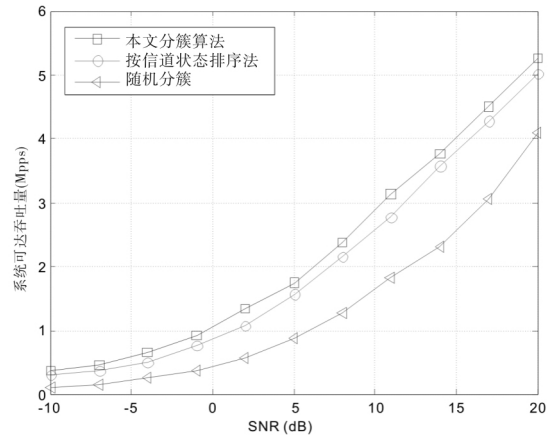


图 3 不同分簇算法下系统可达吞吐量比较

Fig.3 Comparison of achievable throughput by different clustering algorithm versus SNR

为研究簇内功率分配对系统可达吞吐量的影响, 将本文最优功率分配算法与固定功率分配、分数阶发射功率分配进行仿真和比较. 先用改进 k -means 算法分簇, 并用块对角化对发送信息做预处理, 接收端采用 SIC.

设固定功率分配因子为 0.1, 分数阶发射功率分配因子为 0.7, 仿真结果如图 4 所示.

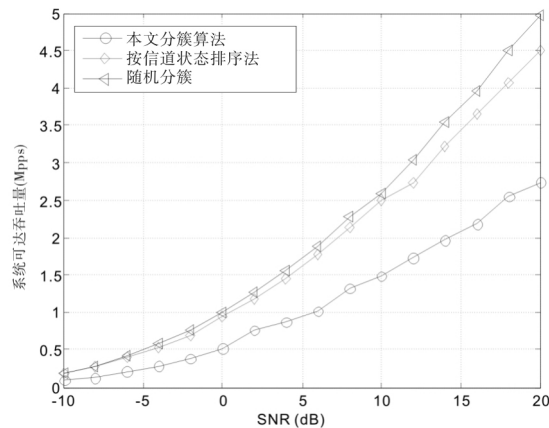


图 4 不同功率分配方法对系统可达吞吐量的性能比较

Fig.4 Comparison of achievable throughput by different power allocation algorithm versus SNR

低信噪比时本文算法吞吐量性能与分数阶发射功率分配很接近, 前者略高, 随着信噪比的增大, 本文算法优于分数阶发射功率分配算法, 而固定功率分配系统可达吞吐量较低. 由此看出, 固定功率分配算法虽实现复杂度低, 但系统吞吐量性能较差, 分数阶发射功率分配相比于固定功率分配吞吐量性能更好, 本文的功率分配算法满足最小传输速率和 SIC 性能约束条件, 能有效保证每个用户的服务质量, 并

且降低用户间干扰, 提高信噪比用户的信号质量, 从而提高系统的吞吐量, 在三种方法中性能最优.

6 结语

为了提高大规模 MIMO-NOMA 下行系统的可达吞吐量, 本文依据空间相关性提出改进的 k-means 算法对用户分簇以降低簇间干扰, 然后采用块对角化预编码对各簇信息进行预处理, 进而消除簇间干扰, 并利用 KKT 条件求解簇内最优功率分配问题, 得到簇内各用户最优功率分配系数, 提高了接收端 SIC 性能, 降低簇内用户间干扰, 仿真结果表明本文的方法提高了系统的可达吞吐量. 但是, 随着用户数的增加, k-means 分簇算法的复杂度也会随之增大, 下一步研究将对分簇算法进一步优化.

参 考 文 献

- [1] DING Z, YANG Z, FFAN P, 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.
- [2] KIM B, LIM S, KIM H, et al. Non-orthogonal multiple access in a downlink multiuser beamforming system [C]// *IEEE Military Communications Conference*. San Diego: IEEE, 2014: 1278-1283.
- [3] BENJEBBOUR A, LI A, SAITO Y, et al. System-level performance of downlink NOMA for future LTE enhancements [C]// *IEEE GLOBECOM Workshops*. Atlanta: IEEE, 2014: 66-70.
- [4] SAITO Y, BENJEBBOUR A, KISHIYAMA Y, et al. System-level performance evaluation of downlink non-orthogonal multiple access (NOMA) [C]// *IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications*. London: IEEE, 2013: 611-615.
- [5] ALI M S, TABASSUM H, HOSSAIN E. Dynamic user clustering and power allocation for uplink and downlink non-orthogonal multiple access (NOMA) systems [J]. *IEEE Access*, 2017, 4: 6325-6343.
- [6] YONG I C, LEE J W, RIM M, et al. On the performance of beam division non-orthogonal multiple access for FDD-based large-scale multi-user MIMO systems [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(8): 5077-5789.
- [7] ALI M S, HOSSAIN E, DONG I K. Non-orthogonal multiple access (NOMA) for downlink multiuser MIMO systems: user clustering, beamforming, and power allocation [J]. *IEEE Access*, 2016, 5: 565-577.
- [8] ADHIKARY A, CAIRE G. Joint spatial division and multiplexing: opportunistic beamforming and user grouping [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2013, 59(10): 6441-6463.
- [9] XU Y, YUE G, PRASAD N, et al. User grouping and scheduling for large scale MIMO systems with two-stage precoding [C]// *IEEE International Conference on Communications*. Sydney: IEEE, 2014: 5197-5202.

(责任编辑 雷建云)