

DOI:10.20079/j.issn.1001-893x.220717001

引用格式:谭景戈,毛翔宇,郑建宏.基于簇级匈牙利与联盟博弈联合的 CF mMIMO 导频分配算法[J].电讯技术,2023,63(11):1817-1823.
[TAN J G, MAO X Y, ZHENG J H. Pilot allocation algorithm in CF mMIMO systems based on cluster-level Hungarian with coalition game[J].
Telecommunication Engineering, 2023, 63(11):1817-1823.]

基于簇级匈牙利与联盟博弈联合的 CF mMIMO 导频分配算法*

谭景戈,毛翔宇,郑建宏

(重庆邮电大学 通信与信息工程学院,重庆 400065)

摘要:针对无小区大规模 MIMO (Cell-Free Massive Multiple-Input Multiple-Output, CF mMIMO) 系统,提出了一种基于簇级匈牙利与联盟博弈联合的导频分配算法。首先,利用用户的地理位置信息将系统中的用户划分为多个用户簇并为相同簇内的用户分配相互正交的导频序列,从空间角度减轻用户复用导频造成的导频污染;然后,在此基础上利用改进收益矩阵的匈牙利算法优化导频分配方案;最后,利用联盟博弈的思想避免因为固定的导频使用次数而带来的性能上限。仿真结果表明,该导频分配算法性能优于多种典型导频分配算法。

关键词:无小区大规模 MIMO (CF mMIMO); 导频分配; 匈牙利算法; 联盟博弈

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



微信扫描二维码
听独家语音释文
与作者在线交流
享本刊专属服务

中图分类号:TN929.5 文献标志码:A 文章编号:1001-893X(2023)11-1817-07

Pilot Allocation Algorithm in CF mMIMO Systems Based on Cluster-level Hungarian with Coalition Game

TAN Jingge, MAO Xiangyu, ZHENG Jianhong

(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: A pilot allocation algorithm based on cluster-level Hungarian with Coalition Game is proposed for cell-free massive multiple-input multiple-output (CF mMIMO) systems. Firstly, users in the system are divided into multiple user clusters based on their geographic location information and mutually orthogonal pilot sequences are allocated to users in the same cluster, so as to reduce the pilot contamination caused by the reuse of pilots from the perspective of space. Then, the Hungarian algorithm with improved benefit matrix is used to optimize the pilot allocation scheme. Finally, the idea of Coalition Game is used to avoid the upper limit of performance due to the fixed number of pilot usages. The simulation results show that the performance of the proposed pilot allocation algorithm is better than those of many typical pilot allocation algorithms.

Key words: cell-free massive MIMO (CF mMIMO); pilot allocation; Hungarian algorithm; coalition game

* 收稿日期:2022-07-17;修回日期:2022-08-13
基金项目:国家科技重大专项(2018ZX03001026-002)
通信作者:谭景戈

0 引言

无小区大规模 MIMO (Cell-Free Massive Multiple-Input Multiple-Output, CF mMIMO) 是一种无线网络部署体系结构^[1], 被认为是 6G 和未来无线移动通信的核心技术之一, 受到了越来越多研究者的关注。CF mMIMO 系统中存在大量配备有单个或多个天线的接入点 (Access Point, AP) 分布在不同的地理位置, 并通过回程链路连接到中央处理器 (Central Processing Unit, CPU)。这些 AP 在相同的时频资源上向所有用户 (User Equipment, UE) 提供服务。该系统以“用户为中心”, 缩短了 AP 与用户之间的平均距离, 大幅降低了路径损耗, 使全区域信号均匀覆盖, 为无处不在的无线通信提供一致的服务质量。

CF mMIMO 系统采用时分双工 (Time Division Duplex, TDD) 工作模式, 因此, 在上行训练阶段通过导频序列进行信道估计获得的信道状态信息 (Channel State Information, CSI) 可用于下行链路, 从而显著节省无线资源。然而, 由于正交导频数量的限制, 用户间需要复用导频, 从而产生导频污染, 使系统性能受到严重影响。为了减轻导频污染带来的性能损失, 文献[1]提出了一种贪婪导频分配算法, 采用迭代的方法更新最低速率用户的导频; 文献[2]提出了一种改进的贪婪导频分配算法, 利用位置信息分配导频。然而与接近最优的结果相比, 这两种算法有很大的性能差距。主要原因是贪婪算法是一种局部搜索方法, 而这两种算法未充分利用 CF mMIMO 系统的特性。文献[3]提出了一种结构化的导频分配方案, 从空间角度减轻了用户复用导频造成的导频污染, 但是用户簇边缘的用户容易受到严重的导频污染^[4]。文献[5]提出了一种基于禁忌搜索的导频分配算法, 通过创建禁忌列表避免导频分配结果陷入局部最优。文献[6]提出了一种基于遗传算法的导频分配算法, 利用生物进化的思想不断优化导频分配方案。文献[7]利用经典的匈牙利算法来解决导频分配问题。该算法对用户吞吐量有较大提升, 优于多种竞争方案, 但由于该算法是在用户级的基础上迭代使用匈牙利算法, 因此计算复杂度相当大。同时该算法的收益矩阵只考虑了单个用户的吞吐量, 并没有从全局出发考虑所有使用相同导频用户的吞吐量。文献[8]提出了基于联盟博弈的导频分配方案, 将使用相同导频的用户划分为一个子联盟, 然后采用博弈的思想来改变用户使用的

导频, 以此优化导频分配方案。文献[9]提出了一种基于用户信道条件优劣的导频分配算法。该算法对 mMIMO 系统的性能有一定提升, 但需要先采用一定的判断策略得到每个用户的信道条件。

鉴于此, 本文提出一种基于簇级匈牙利与联盟博弈联合的导频分配算法, 从全局的角度对文献[7]中匈牙利算法的收益矩阵进行改进。在此基础上, 利用联盟博弈的思想避免因固定的导频使用次数而带来的性能上限。仿真结果表明, 该导频分配算法性能优于多种典型导频分配算法。

1 系统模型

本文考虑了一个 CF mMIMO 系统, 在其覆盖范围内随机分布 M 个配置单天线的 AP 和 K 个配置单天线的用户, 其中 $M \gg K$, 并假设所有 AP 都通过无损回程链路连接到 CPU, 如图 1 所示。

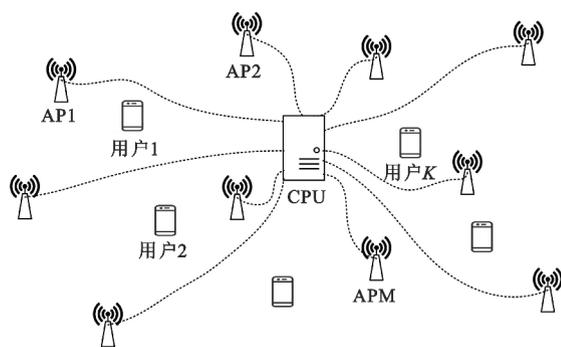


图 1 CF mMIMO 系统

M 个 AP 在相同的时频资源下为 K 个用户提供服务。受大小尺度衰落的影响, 信道可建模为

$$g_{m,k} = \sqrt{\beta_{mk}} h_{mk} \quad (1)$$

式中: $g_{m,k}$, β_{mk} , h_{mk} 分别表示第 m 个 AP 和第 k 个用户之间的信道、大尺度衰落系数和小尺度衰落系数。

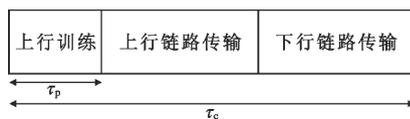


图 2 系统帧结构

CF mMIMO 系统帧结构为上行训练、上行链路传输、下行链路传输, 如图 2 所示。用 T_c , B_c 和 τ_c 分别表示信道的相干时间、相干带宽和相干间隔, 满足 $\tau_c = T_c \cdot B_c$ 。在上行训练阶段, AP 根据已知的每个用户发送的导频序列估计与每个用户间的 CSI。设 τ_p 为上行训练阶段的长度。当 $\tau_p > K$ 时, 可以将

长度为 τ_p 的 K 个相互正交的导频序列分配给 K 个用户。考虑到系统的频谱效率, τ_p 不能太大。因此,部分用户会复用导频序列。

1.1 上行训练阶段

假设给用户 k 分配的导频序列为 φ_k ($\|\varphi_k\|^2=1$) 且训练阶段导频均为全功率发送,则第 m 个 AP 接收到的信号可以表示为

$$y_{p,m} = \sqrt{\tau_p \rho_p} \sum_k g_{m,k} \varphi_k + \omega_{p,m} \quad (2)$$

式中: ρ_p 表示导频信号的归一化信噪比; $\omega_{p,m} \sim CN(0,1)$ 是信道中的加性高斯白噪声。

第 m 个 AP 根据接收导频信号 $y_{p,m}$ 估计与每个用户之间的信道系数 $g_{m,k}$, $k=1,2,\dots,K$ 。设 $y_{p,m}$ 在 φ_k 上的投影为

$$\hat{y}_{p,mk} = \varphi_k^H y_{p,m} = \sqrt{\tau_p \rho_p} g_{m,k} + \sqrt{\tau_p \rho_p} \sum_{k' \neq k} g_{m,k'} \varphi_k^H \varphi_{k'} + \varphi_k^H \omega_{p,m} \quad (3)$$

利用 $\hat{y}_{p,mk}$ 进行 MMSE 估计出的信道系数 $g_{m,k}$ 可以表示为^[1]

$$\hat{g}_{mk} = \frac{\mathbb{E}\{\hat{y}_{p,mk} g_{mk}^*\}}{\mathbb{E}\{|\hat{y}_{p,mk}|^2\}} \hat{y}_{p,mk} = c_{mk} \hat{y}_{p,mk} \quad (4)$$

$$\text{式中: } c_{mk} \triangleq \frac{\sqrt{\tau_p \rho_p} \beta_{mk}}{\tau_p \rho_p \sum_{k'=1}^K \beta_{mk'} |\varphi_k^H \varphi_{k'}|^2 + 1}$$

信道估计系数 $\hat{g}_{m,k}$ 的均方表示为

$$\gamma_{mk} \triangleq \mathbb{E}\{|\hat{g}_{m,k}|^2\} = \frac{\tau_p \rho_p \beta_{mk}^2}{\tau_p \rho_p \sum_{k'=1}^K \beta_{mk'} |\varphi_k^H \varphi_{k'}|^2 + 1} \quad (5)$$

1.2 上行链路传输阶段

在上行链路中,所有 K 个用户同时向 M 个 AP 发送数据。假设用户 k 发送的符号为 q_k ($\mathbb{E}\{|q_k|^2\}=1$),其功率控制系数为 η_k^u ($0 \leq \eta_k^u \leq 1$),那么第 M 个 AP 接收到的信号可表示为

$$y_{u,m} = \sqrt{\rho_u} \sum_{k=1}^K g_{m,k} \sqrt{\eta_k^u} q_k + \omega_{u,m} \quad (6)$$

式中: ρ_u 表示归一化上行链路信噪比。

为了检测第 k 个用户发送的符号 q_k ,第 m 个 AP 将接收到的信号 $y_{u,m}$ 与信道估计系数 \hat{g}_{mk} 的共轭 \hat{g}_{mk}^* 的乘积,通过回程链路发送给 CPU。在 CPU 处接收到的信号为^[1]

$$r_{u,k} = \sum_{m=1}^M \hat{g}_{mk}^* y_{u,m} = \sum_{k'=1}^K \sum_{m=1}^M \sqrt{\rho_u \eta_{k'}^u} \hat{g}_{mk}^* g_{m,k'} q_{k'} + \sum_{m=1}^M \hat{g}_{mk}^* \omega_{u,m}$$

$$DS_k \cdot q_k + BU_k \cdot q_k + \sum_{k' \neq k}^K UI_{kk'} \cdot q_{k'} + N \quad (7)$$

式中: $DS_k \triangleq \sqrt{\rho_u \eta_k^u} \mathbb{E}\{\sum_{m=1}^M \hat{g}_{mk}^* g_{mk}\}$ 表示期望信号;

$BU_k \triangleq \sqrt{\rho_u \eta_k^u} \sum_{m=1}^M \hat{g}_{mk}^* g_{mk} - DS_k$ 表示波束成形增益不确定性;

$UI_{kk'} \triangleq \sqrt{\rho_u \eta_{k'}^u} \sum_{m=1}^M \hat{g}_{mk}^* g_{mk'}$ 表示第 k' 个用户造成的干扰;

$N \triangleq \sum_{m=1}^M \hat{g}_{mk}^* \omega_{u,m}$ 表示在信道中受到的噪声。

第 k 个用户上行链路吞吐量为

$$R_k^{UL}(I) = B \cdot \frac{1 - \frac{\tau_p}{\tau_c}}{2} \cdot \lg \left(1 + \frac{|DS_k|^2}{\mathbb{E}\{|BU_k|^2\} + \sum_{k' \neq k}^K \mathbb{E}\{|UI_{kk'}|^2\} + \mathbb{E}\{|N|^2\}} \right) = B \cdot \frac{1 - \frac{\tau_p}{\tau_c}}{2} \cdot \lg \left(1 + \frac{\rho_u \eta_k^u (\sum_{m=1}^M \gamma_{mk})^2}{\rho_u \sum_{k' \neq k}^K \eta_{k'}^u |\varphi_k^H \varphi_{k'}|^2 \left(\sum_{m=1}^M \frac{\beta_{mk'}}{\beta_{mk}} \right)^2 + \rho_u \sum_{k'=1}^K \eta_{k'}^u \sum_{m=1}^M \gamma_{mk} \beta_{mk'} + \sum_{m=1}^M \gamma_{mk}} \right) \quad (8)$$

2 问题描述

从式(3)、(4)和(8)中可以看出,导频分配在用户的上行链路传输中起着重要作用,它决定了用户的信道估计性能,从而决定了用户的上行链路吞吐量。在本文中,我们的目标是找到最佳的导频分配方案,以便最大化用户的吞吐量。与文献[5]类似,该组合优化问题可以表示为

$$\max_I \sum_{k=1}^K R_k(I) \quad (9)$$

式中: $I = [I_1, I_2, \dots, I_K]$, $I_k \in \varphi$, $\forall k$ 。

3 现有匈牙利导频分配算法

文献[7]中提出了一种基于匈牙利算法的导频分配方案。该算法在每一步都涉及到一个适当的二部图定义,以便匈牙利算法可以用于执行匹配。

现有匈牙利导频分配算法(算法1)实现步骤如下:

输入: K, M, τ_p, φ , 最大迭代次数 MIT_{hung1}

输出: 导频分配结果 I

1 从 φ 中随机选取导频分配给每个用户。

2 for $i=1; MIT_{\text{hung1}}$

3 for $k=1; K$

4 以用户 k 为中心找出距离其最近的 $\tau_p - 1$ 个用户组成集合 S_k , 剩余用户组成集合 T_k 。

5 利用匈牙利算法重新为 S_k 中的用户分配导频。

6 end

7 if 算法收敛

8 break;

9 end

10 end

3.1 运行匈牙利算法

一旦确定了集合 S_k 和 T_k , 就将 φ 中的 τ_p 个正交导频序列按照匈牙利算法的规则分配给 S_k 中的用户。用 $a_{l,q}^{(k)}$ 表示将第 q 个导频序列分配给第 $l(l \in S_k)$ 个用户的收益, 用 $x_{l,q}^{(k)} (x_{l,q}^{(k)} \in \{0, 1\})$ 表示是否将第 q 个导频序列分配给第 l 个用户, 然后导频分配问题可以转化为如下优化问题:

$$\max_{x_{l,q}^{(k)} \in \{0, 1\}} \sum_{l=1}^{\tau_p} \sum_{q=1}^{\tau_p} x_{l,q}^{(k)} a_{l,q}^{(k)}. \quad (10)$$

式中: $\sum_{l=1}^{\tau_p} x_{l,q}^{(k)} = 1 \quad \forall q; \sum_{q=1}^{\tau_p} x_{l,q}^{(k)} = 1 \quad \forall l$ 。

问题(10)利用匈牙利算法通过由 $a_{l,q}^{(k)}$ 组成的收益矩阵 \mathbf{A} 得到最佳的 $x_{l,q}^{(k)}$, 即在当前迭代中 S_k 中用户导频分配的最佳方案。

3.2 收益矩阵元素的定义

根据文献[7], 定义的 $a_{l,q}^{(k)}$ 如下:

$$a_{l,q}^{(k)} = R_l^{\text{UL}}(\{x_{l,q} = 1\}) R_l^{\text{DL}}(\{x_{l,q} = 1\}). \quad (11)$$

式中: $R_l^{\text{UL}}(\{x_{l,q} = 1\})$ 表示第 q 个导频序列分配给第 l 个用户时该用户的上行链路吞吐量; $R_l^{\text{DL}}(\{x_{l,q} = 1\})$ 表示第 q 个导频序列分配给第 l 个用户时该用户的下行链路吞吐量。

如果只考虑上行, 那么 $a_{l,q}^{(k)}$ 可以由下式表示:

$$a_{l,q}^{(k)} = R_l^{\text{UL}}(\{x_{l,q} = 1\}). \quad (12)$$

4 基于簇级匈牙利与联盟博弈联合的导频分配算法

4.1 簇级匈牙利算法

对匈牙利导频分配算法的改进, 主要在对待重分配导频的用户集 S_k 的重定义和收益矩阵 \mathbf{A} 的重定义, 从而降低复杂度并提高系统性能。与现有匈牙利导频分配算法不同, 我们先用 K-mean 聚类的方法对用户进行分簇, 然后依次在每个簇内利用匈牙利算法分配导频。在定义收益矩阵元素时, 不再只考虑被重分配导频用户的吞吐量, 而是考虑所有使用此导频用户的吞吐量之和。

4.1.1 用户集 S_k 的重定义

由于用户和 AP 在空间上随机分布在 CF

mMIMO 系统中, 因此距离用户通信范围内的多个相邻 AP 具有不可忽略的信道增益^[10]。基于此, 先利用 K-mean 算法将距离较近的用户归为一个簇并给簇内用户分配相互正交的导频序列。

K-mean 聚类算法(算法 2)实现步骤如下:

输入: $K, \tau_p, \text{MIT}_{\text{K-mean}}$, 用户位置矢量 \mathbf{U} , 收敛判决参数 ε

输出: 用户分簇情况 \mathcal{C} , 初始化导频分配结果 \mathbf{I}

1 在覆盖范围内随机生成 $V(V=K/\tau_p)$ 个用户簇质心 $\mathbf{C} = [\mathbf{C}_1, \mathbf{C}_2, \dots, \mathbf{C}_V]$ 。

2 for $i = 1; \text{MIT}_{\text{K-mean}}$

3 计算每个用户与所有质心间距离矢量 \mathbf{d}_k 。

4 根据 \mathbf{d}_k 以就近原则让用户选择用户簇 \mathcal{C}_v 并采用竞争机制使每个簇中用户不会超过 τ_p 个。

5 每个质心更新其位置矢量 $\mathbf{C}'_v = \frac{1}{|\mathcal{C}_v|} \sum_{k \in \mathcal{C}_v} \mathbf{U}_k$ 。

6 if $\max_{1 \leq v \leq [K/\tau_p]} \|\mathbf{C}' - \mathbf{C}\|_2^2 < \varepsilon$

7 break;

8 end

9 end

10 所有用户簇复用同一套导频序列, 同一簇中用户使用相互正交的导频序列。

在用户分簇结束之后, 就可将第 v 个用户簇 \mathcal{C}_v 中的用户设为用户集 S_v , 而其余 $K/\tau_p - 1$ 个用户簇中的用户设为 T_v , 然后利用匈牙利算法为 S_v 中的用户分配相互正交的导频序列, 这样在每次的迭代中可以减少 τ_p 倍匈牙利算法的使用。

4.1.2 收益矩阵元素的重定义

文献[7]中的匈牙利导频分配算法对收益矩阵元素的定义仅考虑了 S_k 中单个用户的吞吐量。事实上, 当 S_k 中使用第 q 个导频序列的用户不同时, 对 T_k 中使用此导频的 $K/\tau_p - 1$ 个用户的吞吐量会有不同程度的影响, 所以将整个系统中所有使用第 q 个导频用户的吞吐量之和作为收益矩阵元素会更有利于目标函数最大化。因此, 重定义收益矩阵元素如下:

$$a_{l,q}^{(k)} = \text{sum}_{j \in T_v(q) \cup \{l\}} R_j^{\text{UL}}(\{x_{l,q} = 1\}). \quad (13)$$

根据重定义收益矩阵, 利用匈牙利算法迭代地为每个用户簇中的用户分配导频直到系统总吞吐量收敛。

4.2 联盟博弈

由于用户聚类时每个簇的用户个数是均分的, 且簇级匈牙利算法并不会改变使用某个导频的用户数, 固定的导频使用次数会带来一定的性能上限, 所以本文采用联盟博弈的思想优化经过簇级匈牙利算法之后的导频分配。它类似于穷举搜索, 然而如果

已经有了一个较好的导频分配方案,那么联盟博弈算法将具有更低的复杂度。简单来说,如果已经有一个最优方案,那么联盟博弈算法将迭代一次后结束。

4.2.1 联盟结构和效用函数的定义

将 K 个用户划分入 τ_p 个不相交的子联盟,联盟结构 $N = \{N_1, N_2, \dots, N_{\tau_p}\}$ 表示联盟的划分形式。整个联盟结构的划分需要满足如下要求:使用相同导频序列的用户划分入同一子联盟,且同一子联盟中的所有用户使用的导频序列相同。

可以将系统中用户的总吞吐量看作当前联盟结构的效用函数,这样联盟博弈可提升总吞吐量。

4.2.2 联盟博弈调整规则

本文借鉴文献[11]在联盟博弈论中的调整规则,即每个参与者的行为遵循增加所有用户的效用函数之和。为了让每个用户受益,联盟结构需要不断调整直到最终稳定。

假设用户 k 离开其自身所在的子联盟 N_n 并加入进其他的子联盟 $N_i, N_i \in \{\{N_1, N_2, \dots, N_{\tau_p}\} \setminus N_n\}$,也就意味着整个联盟结构已经从原来的 N 变为新的结构 N' 。用 $N \xrightarrow{k} N'$ 来描述联盟结构的调整,并在定义 1 中给出了调整规则。

定义 1: 如果联盟结构的调整 $N \xrightarrow{k} N'$ 被允许,那么它必须满足如下条件:

$$\frac{1}{N} \sum_{k=1}^K R_k(N') \geq \frac{1}{N} \sum_{k=1}^K R_k(N) \quad (14)$$

从定义 1 可以看出,任何想要加入另一个子联盟的用户都不会损害所有用户的平均利益。

定义 2: (联盟博弈稳定定义) 如果没有能被允许执行的调整 $N \xrightarrow{k} N' (k \in K)$, 那么就可以认为联盟结构 N 已稳定。

根据上述讨论,本文所提的基于簇级匈牙利与联盟博弈联合的导频分配算法(算法 3)实现步骤如下:

输入: $K, M, \tau_p, U, \text{MIT}_{k\text{-mean}}, \text{MIT}_{\text{hung2}}, \text{MIT}_{\text{coal2}}, \varepsilon$

输出: 联盟结构 N

1 根据算法 2 对用户进行分簇并初始化导频分配。

2 for $i = 1; \text{MIT}_{\text{hung2}}$

3 for $i = 1; K/\tau_p$

4 利用匈牙利算法对第 i 个用户簇中的用户分配导频。

5 end

6 if 算法收敛

7 break;

8 end

9 end

10 形成联盟结构 $N = \{N_1, N_2, \dots, N_{\tau_p}\}$ 。

11 for $i = 1; \text{MIT}_{\text{coal2}}$

12 for $k = 1; K$

13 if $N \xrightarrow{k} N'$ 被允许

14 break;

15 end

16 end

17 if 联盟结构稳定

18 break;

19 end

20 end

5 仿真结果与分析

本文考虑的场景为在 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 的正方形面积上随机分布着 M 个单天线 AP 和 K 个单天线用户。为了避免边界效应,本文将上述通信区域与 8 个相同分布区域相邻,以这种环绕技术来模拟具有无限区域的网络,并采用相关对数阴影衰落和三段路径损耗对大尺度衰落系数进行信道建模^[1]。本文对上行链路数据的传输采用文献[12]中分数功率控制的方法以达到均衡用户吞吐量的目的。具体仿真参数设置如表 1 所示。

表 1 仿真参数设置

参数名	值
AP 数量 M	[100, 200]
用户数量 K	[32, 40, 48, 56, 64]
正交导频数量 τ_p	[5, 8, 10, 20]
覆盖区域边长 D/km	1
AP 高度/m	15
用户高度/m	1.65
L/dB	140.7
d_0/m	10
d_1/m	50
系统带宽 B/MHz	20
阴影衰落标准方差 $\sigma_{\text{sh}}/\text{dB}$	8
噪声功率/dB	9
导频传输功率 p_p/mW	100
最大上行链路传输功率 p_u/mW	100
收敛判决参数 ε	0.001
遗传算法种群大小 Z	8

首先,将本文所提出的导频分配算法(K-

ImpHungarian-Coal) 的性能与随机 (Rand)^[1]、贪婪 (Greedy)^[1]、聚类 (K-mean)^[3]、遗传 (GA)^[6]、匈牙利 (Hungarian)^[7] 以及本文提出的簇级匈牙利 (K-ImpHungarian) 算法进行比较, 其中 ImpHungarian 表示只改进了匈牙利算法中的收益矩阵。由于本文仅讨论上行链路吞吐量, 所以匈牙利算法中收益矩阵元素只考虑用户的上行链路吞吐量。图 3 给出了上述几种算法上行链路吞吐量之和的累积分布函数, 可以看出本文提出的导频分配算法性能优于其他典型导频分配算法。相较于 Rand^[1]、Greedy^[1]、K-mean^[3]、GA^[6] 算法, 匈牙利类算法在系统总吞吐量上有较大提升。相较于现有匈牙利导频分配算法, 改进了收益矩阵的匈牙利算法能够得到更高的吞吐量, 而其后联盟博弈算法也使得吞吐量得到了进一步的提升。从图 4 可以看出, 当同时采用改进收益矩阵的匈牙利算法时, 基于簇级的匈牙利导频分配算法性能也要略好于基于用户级的方案。从图 4 还能看出, 将经过 K-ImpHungarian 算法得到的导频分配方案作为联盟博弈 (Coal)^[8] 算法的初始状态有助于 Coal 算法跳出局部最优。

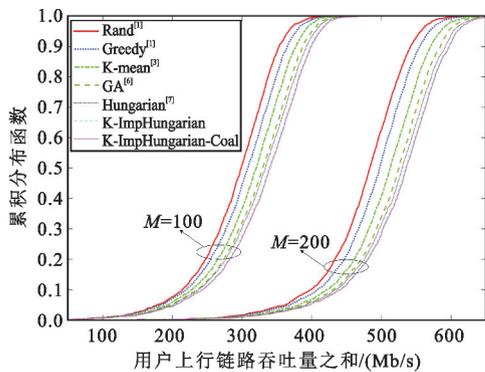


图 3 上行链路总吞吐量的累积分布函数 ($K=40, \tau_p=8$)

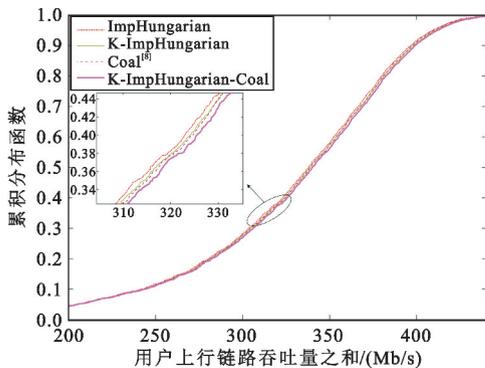


图 4 上行链路总吞吐量的累积分布函数 ($M=100, K=40, \tau_p=8$)

频数量下和不同用户数量下 95% 用户可达吞吐量, 可以看出本文所提算法性能优于其他典型算法, 相较于 Rand^[1]、Greedy^[1]、K-mean^[3]、GA^[6] 和 Hungarian^[7] 算法, 性能提升大约为 85%, 32%, 28%, 12%, 11%。

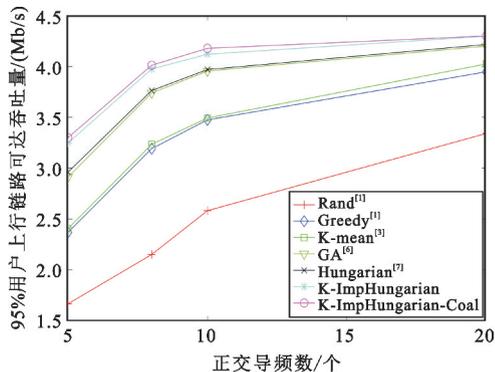


图 5 不同正交导频数量下的 95% 用户可达吞吐量 ($M=100, K=40$)

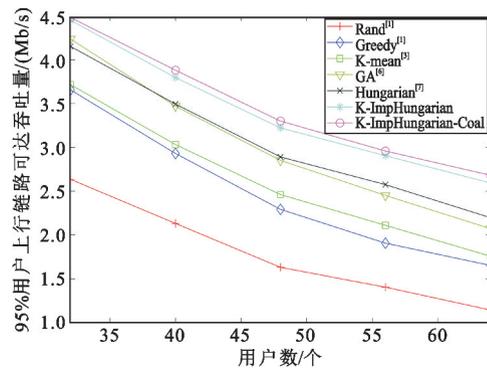


图 6 不同用户数量下的 95% 用户可达吞吐量 ($M=100, \tau_p=40$)

因为 Rand 算法相当于直接分配导频, 其计算复杂度可以忽略不计, 所以表 2 只给出了其他各类算法的计算复杂度, 其中, O_1 表示计算一次系统上行总吞吐量的线性复杂度, O_2 表示计算两用户间距离的线性复杂度, O_3 表示运行一次匈牙利算法的线性复杂度。表 3 给出了各算法达到收敛所需的迭代次数 IT。由于 GA 算法后期主要是靠基因随机变异来获得性能提升, 要达到最终收敛需要非常大的迭代次数。考虑到计算复杂度, 本文给定了 GA 算法一个固定迭代次数 50。从表 2 和表 3 中可以看出, 相较于文献[7]中算法, 本文所提算法不仅没有增加使用匈牙利算法部分的迭代次数, 且在每次迭代中将匈牙利算法的使用次数减少了 τ_p 倍。从表 3 还能看出, 将经过 K-ImpHungarian 算法得到的导频分配方案作为 Coal 算法的初始状态可以大大降低

Coal 算法的迭代次数。

表 2 各算法的计算复杂度

算法	复杂度
Greedy ^[1]	$IT_{greed} \cdot O_1(1)$
K-mean ^[3]	$IT_{k-mean} \cdot O_2\left(\frac{K^2}{\tau_p}\right)$
GA ^[6]	$IT_{ga} \cdot O_1(ZK)$
Hungarian ^[7]	$O_2(K^2) + IT_{hung1} \cdot O_3(K\tau_p^3)$
Coal ^[8]	$IT_{coal1} \cdot O_1(K\tau_p)$
K-ImpHungarian-Coal	$IT_{k-mean} \cdot O_2\left(\frac{K^2}{\tau_p}\right) +$ $IT_{hung2} \cdot O_3(K\tau_p^2) +$ $IT_{coal2} \cdot O_1(K\tau_p)$

表 3 各算法迭代部分达到收敛所需平均迭代次数

算法	平均迭代次数	
	$k=40$	$k=64$
Greedy ^[1]	9.0	13.0
K-mean ^[3]	4.8	5.1
GA ^[6]	50.0	50.0
Hung 1	3.2	3.3
Hung 2	3.1	3.3
Coal 1	69.3	125.5
Coal 2	8.6	15.4

6 结论

本文在 CF mMIMO 的场景下提出了一种基于簇级匈牙利与联盟博弈联合的导频分配算法。先利用对用户聚类的方式减少直接使用匈牙利算法进行导频分配的复杂度,再从全局的角度改进了匈牙利算法中的收益矩阵,最后用联盟博弈算法避免了因为固定的导频使用次数而带来的性能上限。仿真结果表明,本文提出的导频分配算法性能优于多种典型导频分配算法。

参考文献:

- [1] NGO H Q, ASHIKHMIN A, YANG H, et al. Cell-free massive MIMO versus small cells [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(3) : 1834-1850.
- [2] ZHANG Y, CAO H, ZHONG P, et al. Location-based greedy pilot assignment for cell-free massive MIMO systems [C] // Proceedings of 2018 IEEE 4th International Conference on Computer and

- Communications. Chengdu: IEEE, 2018: 392-396.
- [3] ATTARIFAR M, ABBASFAR A, LOZANO A. Random vs. structured pilot assignment in cell-free massive MIMO wireless networks [C] // Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Communications Workshops. Kansas City: IEEE, 2018: 1-6.
- [4] CHEN S, ZHANG J, BJORNSON E, et al. Structured massive access for scalable cell-free massive MIMO systems [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2020, 39(4) : 1086-1100.
- [5] LIU H, ZHANG J, ZHANG X, et al. Tabu-search-based pilot assignment for cell-free massive MIMO systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 69(2) : 2286-2290.
- [6] DANG X T, TRINH L T, NGUYEN A T, et al. A genetic algorithm based pilot assignment strategy for cell-free massive MIMO system [C] // Proceedings of 2020 IEEE Eighth International Conference on Communications and Electronics. Phu Quoc Island: IEEE, 2021: 93-98.
- [7] BUZZI S, DANDREA C, FRESIA M, et al. Pilot assignment in cell-free massive MIMO based on the Hungarian algorithm [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 10(1) : 34-37.
- [8] ZHI H, HUANG Z, WANG F. A novel pilot allocation scheme for TDD massive MIMO systems [C] // Proceedings of 2018 10th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing. Hangzhou: IEEE, 2018: 1-6.
- [9] 闫冰冰,龙慧,刘志红,等.基于预编码与导频分配的大规模 MIMO 导频污染抑制 [J]. 电讯技术, 2017, 57(8) : 938-943.
- [10] CHEN Z, BJORNSON E. Channel hardening and favorable propagation in cell-free massive MIMO with stochastic geometry [J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 66(11) : 5205-5219.
- [11] OSBORNE M J, RUBINSTEIN A. A course in game theory [M]. Cambridge: MIT Press, 1994.
- [12] NIKBAKHT R, MOSAYEBI R, LOZANO A. Uplink fractional power control and downlink power allocation for cell-free networks [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(6) : 774-777.

作者简介:

谭景戈 男,1998 年生于重庆,硕士研究生,主要研究方向为移动通信。

毛翔宇 男,1978 年生于重庆,硕士,中级工程师,主要研究方向为射频理论与技术。

郑建宏 男,1961 年生于重庆,教授、博士生导师,主要研究方向为通信核心芯片、协议与系统应用技术。