

# 大规模MIMO系统中联合用户分组和联盟博弈的动态导频分配方案

智慧\* 王飞跃 黄子菊

(安徽大学计算智能与信号处理教育部重点实验室 合肥 230601)

**摘要:** 大量研究表明,大规模MIMO系统中的小区边缘用户比中心用户更易遭受导频污染的影响。因此,该文提出一种联合用户分组和联盟博弈(JUG-AG)的动态导频分配方案来减轻系统导频污染。根据用户信号强度将所有用户分为A, B两组,把接收基站信号强度弱的小区边缘用户记为A组,剩余用户则为B组。A组用户使用相互正交的导频, B组用户则借助联盟博弈来重复使用剩余的正交导频。在B组用户的联盟博弈中,用户被分成若干个互不相交的用户子联盟,属于不同子联盟的用户分配不同的相互正交导频序列,而属于同一子联盟中的用户使用相同的导频序列。与已有的导频分配方案相比,该文提出的JUG-AG方案更灵活,可以用于所有用户随机分布的场景。而且,该算法通过循环搜索可以获得整体最优解。仿真结果表明JUG-AG方案能够有效降低上行链路中用户信号检测的平均均方根误差(RMSE),而且可以提高用户的平均服务速率。

**关键词:** 大规模多输入多输出; 导频污染; 均方根误差; 服务速率; 联合用户分组和联盟博弈

中图分类号: TN911.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)07-1686-08

DOI: [10.11999/5EIT190445](https://doi.org/10.11999/5EIT190445)

## Dynamic Pilot Allocation Scheme for Joint User Grouping and Alliance Game in Massive MIMO Systems

ZHI Hui WANG Feiyue HUANG Ziju

(Ministry of Education Key Laboratory of Computing Intelligent and Signal Processing,  
Anhui University, Hefei 230601, China)

**Abstract:** Many researches demonstrate that cell-edge users are more susceptible to pilot contamination than the cell-center users in massive MIMO systems. Therefore, this paper proposes a dynamic pilot allocation scheme called Joint User Grouping and Alliance Game (JUG-AG) to mitigate pilot contamination. According to the user signal strength, the users are divided into two groups, namely A and B. Users with weak strength of received Base Stations (BSs) signals are recorded as group A, and the remaining users are group B. The users of group A use mutually orthogonal pilots, and the users of group B reuse the remaining orthogonal pilots by means of alliance game. In the alliance game for the users of group B, users are divided into several disjoint user sub-alliances, users belonging to different sub-alliances are allocated different orthogonal pilot sequences, and users in the same sub-alliance reuse the same pilot sequence. Compared with the existing pilot allocation schemes, the proposed JUG-AG scheme is more flexible and can be used for scenarios that all users are randomly distributed. Moreover, the algorithm can obtain the overall optimal solution through cyclic searching. The simulation results demonstrate that the JUG-AG scheme can effectively reduce the average Root Mean Square Error (RMSE) of user signal detection in the uplink and improve the average service rate of users.

**Key words:** Massive MIMO; Pilot contamination; Root Mean Square Error (RMSE); Service rate; Joint User Grouping and Alliance Game (JUG-AG)

收稿日期: 2019-06-18; 改回日期: 2019-09-28; 网络出版: 2020-01-20

\*通信作者: 智慧 zhihui\_0902@163.com

基金项目: 安徽省高校自然科学基金项目(KJ2016A042)

Foundation Item: The College Natural Science Research Project of Anhui Province (KJ2016A042)

## 1 引言

随着智能手机和多媒体设备的普及，移动通信对数据传输速率的要求越来越高。为了满足数据速率的迫切需要，人们提出了诸多新技术。其中大规模MIMO是移动通信中新技术之一。与传统的MIMO系统相比，大规模MIMO系统充分利用空间维度资源，能够有效提高频谱效率和能量效率<sup>[1]</sup>。而且，已有研究表明当基站端天线数足够大时，加性噪声和不相关干扰均可忽略。那么，最简单的线性预编码和线性检测器就可以带来良好的性能。在这种情况下，系统性能主要受限于用户复用相同导频时带来的“导频污染”<sup>[2,3]</sup>。因此，如何减轻导频污染已成为近年来的研究热点。

目前，已存在诸多减轻导频污染的方法如基于用户分组的导频分配策略<sup>[4,5]</sup>、基于贪婪算法(Greedy Algorithm, GA)的导频分配策略<sup>[6,7]</sup>、导频序列的设计<sup>[8,9]</sup>、时移导频分配<sup>[10]</sup>、功率控制<sup>[11]</sup>等。文献[4]给出一种软导频复用方法，即根据某一用户分组阈值将每个小区中的用户分为中心用户和边缘用户，中心用户受到轻微的导频污染，而边缘用户则遭受严重的导频污染。于是采用软导频复用来提高边缘用户的上下行速率，从而改善边缘用户的服务质量。文献[5]则将目标小区中用户信号强度的方差设置为用户分组阈值，而且中心用户采用最大信噪比算法分配导频，边缘用户则采用GA分配导频。该策略可以提高边缘用户信干噪比(SINR)，同时在一定程度上改善系统的信道容量。受文献[4,5]的启发，本文也利用用户分组的思想。但是在对用户进行分组时，并未设置阈值，而是从系统全局对所有用户进行分组。因为当用户随机分布时，每个小区中的用户数也是随机的，寻找最优的用户分组阈值是非常困难的，所以本文通过遍历系统中所有用户并计算用户接收基站信号强度的值，优选值较小的用户为A组，剩余用户则为B组。文献[6]则考虑大规模MIMO信道衰落的特性，并引入GA来提高上行链路的SINR。同样地，文献[7]也利用GA来抑制导频污染，且复杂度较低。尽管文献[6,7]中用于分配导频的GA在一定程度上可以提高系统的性能，但是这些算法的解仅仅是局部最优解，而本文给出的JUG-AG方案将通过循环搜索来获得整体最优解。文献[8,9]分别设计导频序列来减轻导频污染，然而这些策略仅仅适用于每个小区中用户数固定且相等的情形，缺乏灵活性。类似地，文献[10]中给出一种联合上行链路数据和不等功率分配的时移导频方法，该方法也仅适用于每个小区用户数相等的情形。文献[11]利用功率控制来抑制干扰，同样假

设每个小区中的用户数固定。文献[12-14]引入博弈论的方法来减轻导频污染，然而这些方法仅仅考虑了小区间博弈，且设定每个小区的用户数固定。所以，这些方法<sup>[12-14]</sup>是不灵活的，不适用于所有小区用户随机分布的场景。

回顾文献[4-14]，我们发现根据某一阈值的用户分组方法<sup>[4,5]</sup>缺乏灵活性；文献[6,7]中的GA不能获得整体最优解；文献[8-14]中的方法同样不灵活，不适用于用户的随机分布。为了寻求不仅灵活性好(能适用于用户随机分布)而且能够通过搜索获得整体最优解的导频分配方法，本文给出一种JUG-AG的动态导频分配方案，旨在通过最小化上行链路中信号检测的平均RMSE，或者最大化用户的平均服务速率来减轻导频污染。

本文的主要贡献如下：(1)JUG-AG方案适用于所有用户随机分布的场景；(2)给出的用户分组方法不设置阈值，不受限于用户的分布情况；(3)基于JUG-AG方案的导频分配算法可通过循环搜索获得整体最优解，本文方案中的博弈是基于用户间的博弈；(4)仿真结果表明JUG-AG方案可以有效地降低上行链路中信号检测的平均RMSE，而且能够提高用户的平均服务速率，从而在很大程度上减轻导频污染。

## 2 系统模型

系统模型如图1(a)所示，即区域I中由 $L$ 个正六边形小区构成的多用户TDD(Time Division Duplexing)大规模MIMO系统。每小区基站配备 $M$ 根天线，每个移动用户配备单天线。假设区域I中基站位置固定，用户服从随机分布，每个用户根据接收基站信号的强度来选择距离自己最近的基站接入。设基站 $i$ 在 $i$  ( $i \in \{1, 2, \dots, L\}$ )小区中，且基站 $i$ 服务 $K_i$ 个用户，那么区域I中共有 $N$ 个用户，即 $\sum_{i=1}^L K_i = N$ 。此外，将 $i$ 小区中的第 $k$ 个用户记为用户 $(i, k)$ 。

假设所有无线信道均为相互独立的瑞利信道，且均服从圆对称复高斯分布。我们把用户 $(i, k)$ 与基站 $l$ 的第 $m$ 根天线间的信道定义为 $c_{lmik}$ ，且 $c_{lmik} \sim \mathcal{CN}(0, \beta_{lmik})$ 。这里， $m \in \{1, 2, \dots, M\}$ ， $k \in \{1, 2, \dots, K_i\}$ ， $l, i \in \{1, 2, \dots, L\}$ ， $\beta_{lmik} = 1/(d_{lmik})^v$ ，其中 $d_{lmik}$ 表示用户 $(i, k)$ 与基站 $l$ 的第 $m$ 根天线间的距离， $v$ 表示路径衰落因子。所以基站 $i$ 和用户 $(i, k)$ 间的信道为 $\mathbf{c}_{iik} = [c_{i1ik}, c_{i2ik}, \dots, c_{iMik}]^T \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ ，其元素均服从 $\mathcal{CN}(0, \beta_{iik})$ ，且 $\beta_{iik} = 1/(d_{iik})^v$ ，其中 $d_{iik}$ 为用户 $(i, k)$ 与基站 $i$ 间的距离。

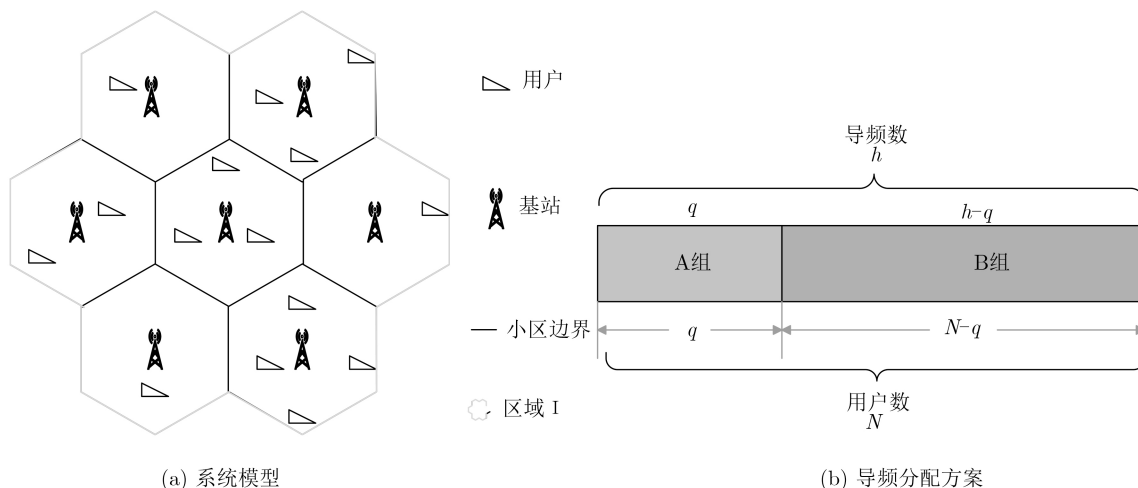


图1 系统模型与用户导频分配方案

**定义1** (用户接收信号强度)对于用户 $(i, k)$ 来说, 接收到基站 $i$ 的平均信号强度为

$$\eta_{iik} = E \left\{ p_u |c_{iik}|^2 \right\} = p_u \beta_{iik} \quad (1)$$

其中 $p_u$ 是每个用户的数据发射功率,  $E\{\cdot\}$ 表示数学期望。

### 3 JUG-AG导频分配方案

JUG-AG导频分配方案包括两个步骤: 用户分组和B组用户之间的联盟博弈。

#### 3.1 用户分组

众所周知, 在实际的蜂窝网络中用户分布是随机的。比如当小区边缘用户很多时, 小区中用户分布相对分散。相反, 当小区边缘用户数很少时, 小区中用户分布相对集中。已有的用户分组方法多数是基于某一阈值来划分用户, 缺乏灵活性, 如文献[4,5]。如果从系统全局来考虑用户分组, 就可以不受限于用户的实际分布。因为小区边缘用户临近其他小区中的用户且信道质量较差, 所以易遭受导频污染。基于此, 本文将小区边缘用户记为A组, 把剩余用户记为B组。同时, A组用户分配正交导频来减轻导频污染, B组用户利用联盟博弈来复用剩余导频。比如设区域I中随机分布 $N$ 个用户, 正交导频数为 $h$  ( $h < N$ )。首先, 遍历所有用户, 根据定义1中的表达式(1)计算用户接收信号强度的值, 并从小到大排序。然后, 优选前 $q$  ( $q < (h-1)$ )个值较小的用户记为A组, 并分配与之对应的 $q$ 个正交导频, 剩余 $N-q$ 个值较大的用户记为B组, 且被划分为 $h-q$ 个用户子联盟, 剩余的 $h-q$ 个正交导频依次分配给相应的 $h-q$ 个子联盟。这种用户导频分配方案如图1(b)所示。为了便于下面的描述, 本文将B组用户记为集合 $\Phi$ , 并定义 $q$ 为用户分组基数。鉴于 $q$ 的表达式较为复杂, 不能通过理论

分析获得, 我们将在第4节中给出仿真结果, 表明其与用户总数 $N$ 及用户在多小区大规模MIMO系统位置分布的关系。

#### 3.2 B组用户之间的联盟博弈

由于A组用户分配的导频完全正交, 不存在导频污染; B组中同一子联盟的用户使用相同的导频, 存在导频污染。所以, 本文考虑如何减轻同一子联盟用户之间的导频污染问题。为了使后续的描述不失一般性, 本文专注于用户随机分布场景, 且采用用户之间的博弈。

##### 3.2.1 联盟结构和效用函数

本文采用联盟博弈中分裂形式<sup>[15]</sup>的思想。为了降低用户间的干扰(即导频污染), 下面给出联盟结构和每个用户(即参与者)效用函数的定义。

**定义2** (联盟结构)集合 $\Phi$ 被随机分为 $h-q$ 个互不相交的子联盟 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{h-q}$ , 且满足 $\cup_{j=1}^{h-q} \lambda_j = \Phi$ ,  $\cap_{j=1}^{h-q} \lambda_j = \emptyset$ 。这里, 联盟结构 $\lambda$ 是集合 $\Phi$ 的分裂形式, 即 $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{h-q}\}$ 。

为了定量分析导频污染的影响, 本文采用两种效用函数来进行描述, 即将每个用户的效用函数(即收益函数)分别定义为上行链路中信号检测的RMSE和用户的速率。下面, 先分析RMSE和服务速率的表达式。

对于任意用户 $(i, k)$ , 导频 $\phi_{ik} \in \mathbb{C}^{\tau \times 1}$ 且满足 $E\{\phi_{ik}^H \phi_{ik}\} = 1$ 。设 $\Gamma(i, k)$ 是联盟结构 $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{h-q}\}$ 的一个子联盟, 且用户 $(i, k)$ 属于这一子联盟, 当 $(l, n) \in \Gamma(i, k)$ 时,  $E\{\phi_{ln}^H \phi_{ik}\} = 1$ 。反之, 当 $(l, n) \notin \Gamma(i, k)$ 时,  $E\{\phi_{ln}^H \phi_{ik}\} = 0$ 。那么在上行链路中, 基站 $i$ 接收的导频信号为

$$\mathbf{y}_i^p = \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^{K_l} \sqrt{p_s} c_{iln} \phi_{ln}^H + \mathbf{w}_i^p \quad (2)$$

其中 $p_s$ 为每个用户导频发射功率， $\mathbf{w}_i^p$ 为 $M \times \tau$ 的加性高斯白噪声(Additive White Gaussian Noise, AWGN)，其元素均服从 $\mathcal{CN}(0, \sigma_1^2)$ 。由式(2)可以得到基站 $i$ 处信道 $\mathbf{c}_{iik}$ 的MMSE估计为

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{c}}_{iik} &= \frac{\beta_{iik}}{\sum_{(l,n) \in \Gamma(i,k)} \beta_{iln} + \frac{\sigma_1^2}{p_s}} \times \frac{\mathbf{y}_i^p}{\sqrt{p_s}} \phi_{ik} \\ &= \frac{\beta_{iik}}{\sum_{(l,n) \in \Gamma(i,k)} \beta_{iln} + \frac{\sigma_1^2}{p_s}} \\ &\quad \cdot \left( \mathbf{c}_{iik} + \sum_{\substack{(l,n) \in \Gamma(i,k) \\ (l,n) \neq (i,k)}} \mathbf{c}_{iln} + \frac{1}{\sqrt{p_s}} \mathbf{w}_i^p \phi_{ik} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

其中  $\hat{\mathbf{c}}_{iik} \sim \mathcal{CN}(0, \mu_{iik} \mathbf{I}_M)$ ，且  $\mu_{iik} = \frac{\beta_{iik}^2}{\sum_{(l,n) \in \Gamma(i,k)} \beta_{iln} + \frac{\sigma_1^2}{p_s}}$ 。因此用户 $(i, k)$ 信道估计误差为 $\tilde{\mathbf{c}}_{iik} = \mathbf{c}_{iik} - \hat{\mathbf{c}}_{iik}$ ，服从 $\mathcal{CN}(0, (\beta_{iik} - \mu_{iik}) \mathbf{I}_M)$ 。这里， $\mathbf{I}_M$ 为 $M \times M$ 的单位阵。同理，基站 $i$ 接收到的数据为 $\mathbf{y}_i^d = \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^{K_l} \sqrt{p_u} \mathbf{c}_{iln} \mathbf{x}_{ln} + \mathbf{w}_i^d$ ，其中 $\mathbf{x}_{ln} \in \mathbb{C}^{1 \times 1}$ 表示用户 $(l, n)$ 发送的数据，且 $\mathbb{E}\{\mathbf{x}_{ln}^H \mathbf{x}_{ln}\} = 1$ 。 $\mathbf{w}_i^d$ 为 $M \times 1$ 的AWGN，其元素均服从 $\mathcal{CN}(0, \sigma_2^2)$ 。

为了便于分析推导，设 $p_s = p_u = p$ ， $\sigma_1^2 =$

$\sigma_2^2 = \sigma^2$ ，并采用简单的线性检测(即匹配滤波器)来接收数据。那么，用户 $(i, k)$ 处经过检测的信号为

$$\begin{aligned} \hat{x}_{ik} &= \frac{\sum_{(l,n) \in \Gamma(i,k)} \beta_{iln} + \frac{\sigma_1^2}{p_s}}{\beta_{iik}} \times \frac{1}{M \beta_{iik} \sqrt{p}} \times \hat{\mathbf{c}}_{iik}^H \mathbf{y}_i^d \\ &= x_{ik} + \frac{1}{\beta_{iik}} \sum_{\substack{(l,n) \in \Gamma(i,k) \\ (l,n) \neq (i,k)}} \beta_{iln} \mathbf{x}_{ln} \\ &\quad + \Delta_{ik} + \mathbf{A}_{ik} \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $\Delta_{ik} = \frac{1}{M \beta_{iik} \sqrt{p}} \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^{K_l} (\mathbf{w}_i^p \phi_{ik})^H \mathbf{c}_{iln} \mathbf{x}_{ln}$ ，且 $\mathbf{A}_{ik} = \frac{1}{M \beta_{iik} \sqrt{p}} \left[ \mathbf{c}_{iik}^H + \sum_{\substack{(l,n) \in \Gamma(i,k) \\ (l,n) \neq (i,k)}} \mathbf{c}_{iln}^H + \frac{1}{\sqrt{p}} (\mathbf{w}_i^p \phi_{ik})^H \right] \mathbf{w}_i^d$ ，

两者均为互不相关的噪声。当基站端天线数趋于无穷大时，它们可以忽略不计。

将信号检测 $\hat{x}_{ik}$ 的均方差MSE表示为 $\text{MSE}_{ik} = \mathbb{E}\{\|\hat{x}_{ik} - x_{ik}\|^2\}$ ，那么用户 $(i, k)$ 信号检测的均方根差RMSE则为 $\text{RMSE}_{ik} = \sqrt{\text{MSE}_{ik}}$ ，因此可以得到定理1。

**定理1** 对于给定的联盟结构 $\lambda$ ，上行链路中信号检测 $\hat{x}_{ik}$ 的RMSE为

$$\text{RMSE}_{ik} = \sqrt{\frac{1}{\beta_{iik}^2} \left( \sum_{\substack{(l,n) \in \Gamma(i,k) \\ (l,n) \neq (i,k)}} \beta_{iln} \right)^2 + \frac{\sigma^2}{pM\beta_{iik}^2} \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^{K_l} \beta_{iln} + \frac{\sigma^2}{pM^2\beta_{iik}^2} \left( \sum_{(l,n) \in \Gamma(i,k)} \beta_{iln} + \frac{\sigma^2}{p} \right)} \quad (5)$$

**证明：**由RMSE的表达式可得

$$\begin{aligned} \text{MSE}_{ik} &= \mathbb{E}\{\|\hat{x}_{ik} - x_{ik}\|^2\} = \mathbb{E}\left\{ \left\| \frac{1}{\beta_{iik}} \sum_{\substack{(l,n) \in \Gamma(i,k) \\ (l,n) \neq (i,k)}} \beta_{iln} \mathbf{x}_{ln} + \Delta_{ik} + \mathbf{A}_{ik} \right\|^2 \right\} \\ &= \mathbb{E}\left\{ \left[ \frac{1}{\beta_{iik}} \sum_{\substack{(l,n) \in \Gamma(i,k) \\ (l,n) \neq (i,k)}} \beta_{iln} \mathbf{x}_{ln} + \Delta_{ik} + \mathbf{A}_{ik} \right]^H \left[ \frac{1}{\beta_{iik}} \sum_{\substack{(l,n) \in \Gamma(i,k) \\ (l,n) \neq (i,k)}} \beta_{iln} \mathbf{x}_{ln} + \Delta_{ik} + \mathbf{A}_{ik} \right] \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

当用户 $(l, n) \neq (i, k)$ ， $\mathbf{c}_{iln}$ 间相互独立， $\mathbf{c}_{iln}$ 与 $\mathbf{w}_i^p$ 也相互独立，所以有

$$\begin{aligned}
\text{MSE}_{ik} &= \mathbb{E} \left\{ \left[ \frac{1}{\beta_{iik}} \sum_{\substack{(l,n) \in \Gamma(i,k) \\ (l,n) \neq (i,k)}} \beta_{iln} \mathbf{x}_{ln} \right]^H \left[ \frac{1}{\beta_{iik}} \sum_{\substack{(l,n) \in \Gamma(i,k) \\ (l,n) \neq (i,k)}} \beta_{iln} \mathbf{x}_{ln} \right] \right\} + \mathbb{E} \{ \mathbf{\Delta}_{ik}^H \mathbf{\Delta}_{ik} \} + \mathbb{E} \{ \mathbf{A}_{ik}^H \mathbf{A}_{ik} \} \\
&= \frac{1}{\beta_{iik}^2} \left( \sum_{\substack{(l,n) \in \Gamma(i,k) \\ (l,n) \neq (i,k)}} \beta_{iln} \right)^2 \mathbb{E} \{ \mathbf{x}_{ln}^H \mathbf{x}_{ln} \} + \frac{1}{pM^2 \beta_{iik}^2} \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^{K_l} \mathbb{E} \{ [(\mathbf{w}_i^p \phi_{ik})^H \mathbf{c}_{iln} \mathbf{x}_{ln}]^H [(\mathbf{w}_i^p \phi_{ik})^H \mathbf{c}_{iln} \mathbf{x}_{ln}] \} \\
&\quad + \frac{1}{pM^2 \beta_{iik}^2} \mathbb{E} \{ (\mathbf{w}_i^d)^H (\mathbf{w}_i^d) \} \left\{ \mathbb{E} \{ \mathbf{c}_{iik} \mathbf{c}_{iik}^H \} + \sum_{\substack{(l,n) \in \Gamma(i,k) \\ (l,n) \neq (i,k)}} \mathbb{E} \{ \mathbf{c}_{iik} \mathbf{c}_{iik}^H \} + \frac{1}{P} \mathbb{E} \{ (\mathbf{w}_i^p \phi_{ik}) (\mathbf{w}_i^p \phi_{ik})^H \} \right\} \quad (7)
\end{aligned}$$

其中  $\mathbb{E} \{ \mathbf{x}_{ln}^H \mathbf{x}_{ln} \} = 1$ ,  $\mathbb{E} \{ \mathbf{c}_{iik} \mathbf{c}_{iik}^H \} = \beta_{iik} \mathbf{I}_M$ ,  $\mathbb{E} \{ (\mathbf{w}_i^d)^H (\mathbf{w}_i^d) \} = \mathbb{E} \{ (\mathbf{w}_i^p)^H (\mathbf{w}_i^p) \} = \sigma^2$ ,  $\mathbb{E} \{ \mathbf{c}_{iik}^H \mathbf{c}_{iik} \} = M \beta_{iik}$ 。那么, 式(7)可简化为式(5), 即定理1得证。

根据定理1, 上行链路中所有用户信号检测的平均RMSE为

$$\text{RMSE}_{\text{avg}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^L \sum_{k=1}^{K_i} \text{RMSE}_{ik} \quad (8)$$

由式(4)可知, 上行链路中用户  $(i, k)$  的SINR为

$$\text{SINR}_{ik} = \frac{1}{\frac{1}{\beta_{iik}^2} \left( \sum_{\substack{(l,n) \in \Gamma(i,k) \\ (l,n) \neq (i,k)}} \beta_{iln} \right)^2 + \frac{\sigma^2}{pM \beta_{iik}^2} \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^{K_l} \beta_{iln} + \frac{\sigma^2}{pM^2 \beta_{iik}^2} \left( \sum_{(l,n) \in \Gamma(i,k)} \beta_{iln} + \frac{\sigma^2}{p} \right)} \quad (9)$$

那么, 上行链路中用户  $(i, k)$  的服务速率为  $S_{ik} = \log_2(1 + \text{SINR}_{ik})$ 。

所以, 所有用户的(系统上行链路)平均服务速率为

$$S_{\text{avg}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^L \sum_{k=1}^{K_i} S_{ik} \quad (10)$$

从式(8)、式(10)可以看出, 需要找到最优的频段分配来最小化所有用户信号检测的平均RMSE, 或者最大化用户的服务速率。毫无疑问, 穷举搜索可以解决这一优化问题, 但其复杂度非常高, 缺乏实用性。文献[7]提供一种相对简便的GA, 但其解是局部最优解。因此本文需要寻求复杂度低于穷举搜索的整体最优解方案。

### 3.2.2 联盟调整规则和联盟稳定条件

根据联盟博弈的定义<sup>[16]</sup>, 需要知道以下要素: 联盟调整规则和联盟稳定条件。

首先, 约定每次联盟调整都是一个用户离开自己的子联盟加入另一个子联盟。假设用户  $(i, k)$  离开子联盟  $\Gamma(i, k)$ , 加入另一个子联盟  $\lambda_j \in \{\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{h-q}\} \setminus \Gamma(i, k)\}$  后, 联盟结构从  $\lambda$  变为  $\lambda^0$ , 记为  $\lambda \xrightarrow{(i,k)} \lambda^0$ 。

**定义3** (联盟调整规则1) 效用函数为RMSE时, 若  $\text{RMSE}_{ik}(\lambda) > \text{RMSE}_{ik}(\lambda^0)$  且同时满足  $\frac{1}{N} \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^{K_l} \text{RMSE}_{ln}(\lambda) \geq \frac{1}{N} \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^{K_l} \text{RMSE}_{ln}(\lambda^0)$ , 则有  $\lambda \xrightarrow{(i,k)} \lambda^0$ 。

(联盟调整规则2) 效用函数为服务速率时, 若  $S_{ik}(\lambda^0) > S_{ik}(\lambda)$  且同时满足  $\frac{1}{N} \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^{K_l} S_{ln}(\lambda^0) \geq \frac{1}{N} \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^{K_l} S_{ln}(\lambda)$ , 则有  $\lambda \xrightarrow{(i,k)} \lambda^0$ 。

根据联盟博弈中最终稳定性理论<sup>[16]</sup>, 给出联盟稳定条件的定义。

**定义4** (联盟稳定条件)对于所有用户 $(i, k) \in \Phi$ 和所有子联盟 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{h-q}$ , 如果 $\lambda \xrightarrow{(i,k)} \lambda^0$ 的联盟调整条件都不成立, 则该联盟形成一个稳定结构。

根据联盟调整的规则, 联盟结构会不断调整, 直到满足联盟稳定条件时才结束。因此通过这种循环搜索可以获得整体最优解。很显然, 最终的联盟结构也就对应着最终的导频分配。

### 3.3 导频分配算法

根据3.1节中用户分组和3.2节中B组用户间的联盟博弈, 本文的导频分配算法如下。

在算法1中,  $\varpi$ 是最大搜索次数限制, 用于防止导频分配算法进入无限循环。值得注意的是, 这里给出的算法强调群体合理性, 也就是说联盟中所

算法1 导频分配算法

---

步骤 1 (用户分组): 计算所有用户的 $\eta_{ik}$ 值, 从小到大排序。  
根据排序, 优选前 $q$ 个值较小的用户为A组, 剩余 $(N - q)$ 个用户为B组。

步骤 2 (联盟博弈):  
初始化: 对于B组用户, 给定初始联盟结构  
 $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{h-q}\}$ , 并设当前搜索次数 $\zeta = 0$ 。  
循环:  
(1) 对于所有用户 $(i, k) \in \Phi$ (即B用户), 进行循环搜索;  
(2) 对于所有 $\lambda_j \in \{\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{h-q}\} \setminus \Gamma(i, k)\}, (j = 1, 2, \dots, h - q)$ , 进行查找:  
效用函数为RMSE时, 若联盟调整规则1中两个条件都满足, 则有 $\lambda = \lambda^0$ 。同理, 效用函数为服务速率时, 若联盟调整规则2中两个条件都满足, 则有 $\lambda = \lambda^0$ 。  
否则, 联盟结构保持不变( $\lambda = \lambda$ )。  
结束(对应循环2)  
搜索次数增加, 即 $\zeta = \zeta + 1$ ,  
结束(对应循环1)  
直到 $\lambda \xrightarrow{(i,k)} \lambda^0$ 的所有条件不成立或 $\zeta > \varpi$ , 循环结束。

步骤 3 (导频分配): A组用户分配 $q$ 个正交导频, B组中 $(N - q)$ 个用户根据第2步用户子联盟分配的结果将剩余 $h - q$ 个正交导频依次分配给这 $h - q$ 个用户子联盟。

---

有成员做出决策来实现共同目标(即最小化平均RMSE, 或者最大化用户的服务速率), 而且本文算法可以通过循环搜索获得整体最优解, 相应的解也就是最终的导频分配。

## 4 仿真结果

本节将仿真3种方案, 即随机导频分配(Random Pilot Allocation, RPA), GA<sup>[7]</sup>和本文的JUG-AG。根据仿真结果, 讨论它们的优缺点。仿真参数如表1所示。

图2(a)和图2(b)显示无论是功率 $p$ 或天线数 $M$ 增加, 3种方案(RPA, GA和JUG-AG)的平均RMSE均递减。由于受到导频污染的影响, 其下降幅度逐渐减小, 可以看到JUG-AG优于GA, 而GA优于RPA。图2(c)表明随着AWGN方差 $\sigma^2$ 的增加, 3种方案(RPA, GA和JUG-AG)的平均RMSE均递增, 显然JUG-AG优于GA和RPA。

图3给出 $M = 500, \sigma^2 = 1$ 时的仿真结果。其中, 图3(a)给出JUG-AG方案下, 当功率 $p$ 为0 dB或6 dB时, 平均RMSE在 $q = 2$ 时取最小值; 当功率 $p$ 为8 dB, 10 dB或20 dB时, 平均RMSE在 $q = 1$ 时取最小值。这表明存在最佳的用户分组基数 $q$ 使得所有用户信号检测的平均RMSE最小。图3(b)显示JUG-AG方案下,  $p = 10$  dB时, 不论用户服从正态分布还是均匀分布, 在用户总数 $N$ 较小时, 用户分组基数 $q$ 较大, 随着 $N$ 变大,  $q$ 值缓慢变小。这充分

表 1 仿真参数设置

参数	数值	参数	数值
基站坐标(km)	(4.0,4.0), (5.7,4.0),	最大搜索次数 $\varpi$	800
	(2.3,4.0), (4.9,5.5),		
	(3.1,5.5), (4.9,2.5),		
	(3.1,2.5)		
小区数 $L$	7	路径衰落因子 $\nu$	3
用户数 $N$	20	导频数 $h$	8

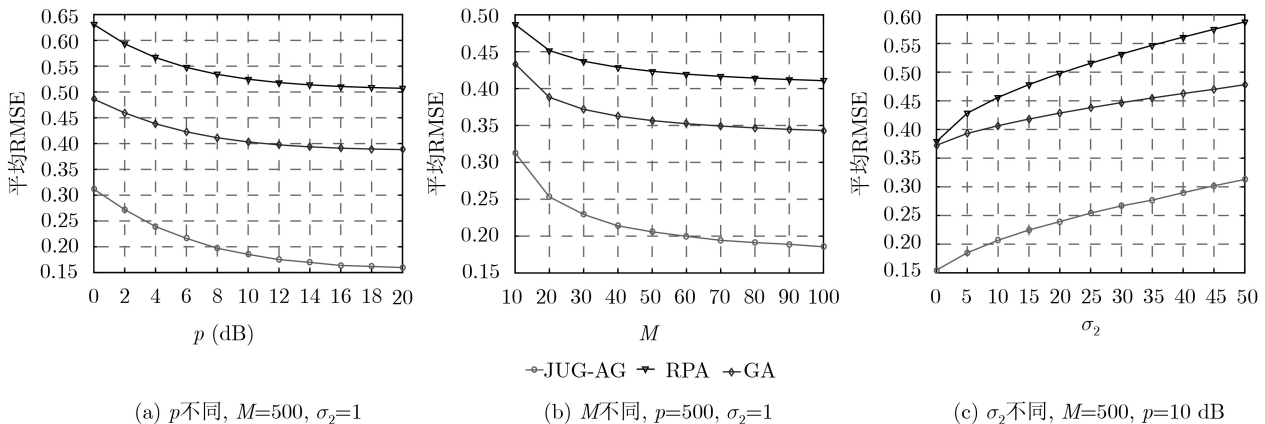


图 2 平均RMSE与 $p, M, \sigma^2$ 间的关系

体现导频分配算法的优越性。此外,  $q$ 值的选取对于正态分布、均匀分布的用户表现出良好的适应性。图3(c)表明在 $p = 10$  dB,  $q$ 取最佳值时, 随着 $N$ 增大, 两种分布的平均RMSE均递增。然而, 正态分布明显高于随机分布时的平均RMSE, 而且随着 $N$ 的增大, 这种差距逐渐加大。这主要因为正态

分布下的大多数用户聚集在中心小区与其相邻边缘小区的交汇处, 存在大量的干扰。

图4(a)和图4(b)表明无论是功率 $p$ 或天线数 $M$ 增加, 3种方案(RPA, GA和JUG-AG)的平均服务速率都递增。由于受到导频污染的影响, 其递增幅度逐渐变小。显然, JUG-AG优于GA和RPA。

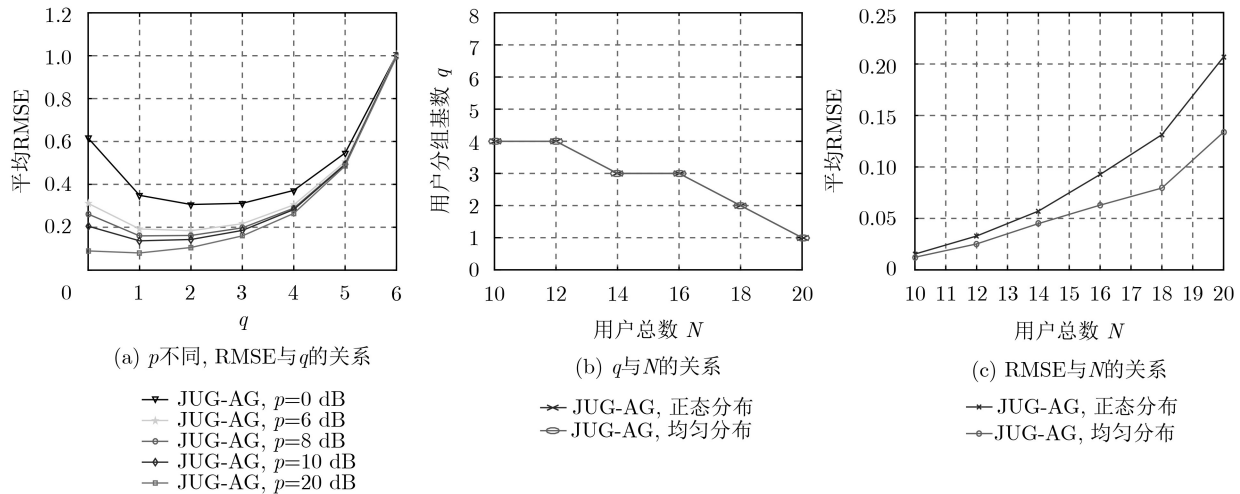


图3 平均RMSE与 $q$ ,  $q$ 与 $N$ 以及平均RMSE与 $N$ 间的关系

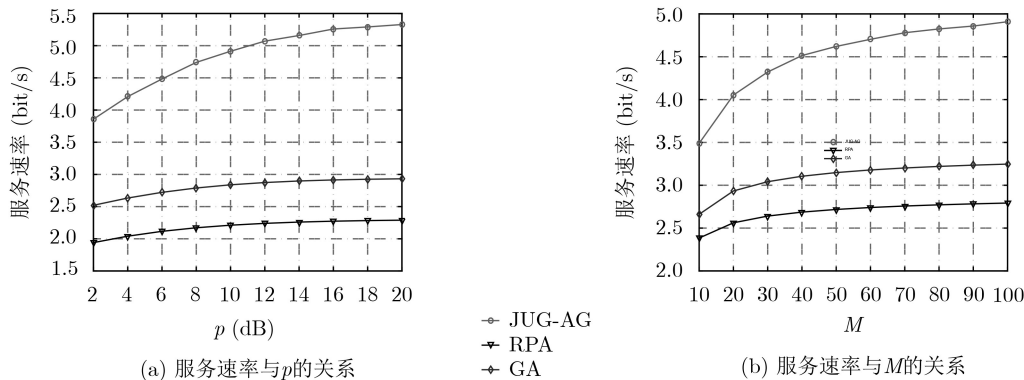


图4 服务速率与 $p$ ,  $M$ 间的关系

## 5 结束语

为了减轻大规模MIMO系统中的导频污染, 本文提出一种基于JUG-AG的动态导频分配方案。该方案适用于用户随机分布场景(即每个小区的用户数不固定), 本文给出的用户分组方法不受限于用户的实际分布情况, 这使得所提的方案更加灵活。对于B组用户, 分析了某一联盟结构下每个用户的两种效用函数(即信号检测的RMSE和用户的服务速率), 给出了联盟调整规则1, 规则2和联盟稳定条件。由此, 总结出JUG-AG方案下的导频分配算法, 该算法可以获得整体最优解。仿真结果表明, 与RPA和GA相比, JUG-AG方案能够获得更准确的信号检测以及更高的服务速率, 从而在一定程度上

抑制了导频污染, 提高了系统的整体性能。在后续的工作中, 我们将展开针对异构网络下大规模MIMO系统中导频污染的分析与研究。

## 参考文献

- [1] ZHANG Ruoyu, ZHAO Honglin, ZHANG Jiayan, *et al.* Hybrid orthogonal and non-orthogonal pilot distribution based channel estimation in massive MIMO system[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2018, 29(5): 881-898. doi: 10.21629/JSEE.2018.05.01.
- [2] KIM K, LEE J, and CHOI J. Deep learning based pilot allocation scheme (DL-PAS) for 5G massive MIMO system[J]. *IEEE Communications Letters*, 2018, 22(4): 828-831. doi: 10.1109/LCOMM.2018.2803054.

- [3] ZHI Hui and HU Yanjun. Novel multi-cell precoding schemes for TDD massive MIMO systems[J]. *Wireless Personal Communications*, 2017, 97(4): 6111–6129. doi: [10.1007/s11277-017-4829-4](https://doi.org/10.1007/s11277-017-4829-4).
- [4] ZHU Xudong, WANG Zhaocheng, QIAN Chen, *et al.* Soft pilot reuse and multicell block diagonalization precoding for massive MIMO systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(5): 3285–3298. doi: [10.1109/TVT.2015.2445795](https://doi.org/10.1109/TVT.2015.2445795).
- [5] 张进彦, 金凤, 尹礼欣. 大规模MIMO系统中基于用户分类的动态导频分配[J]. *电信科学*, 2017, 33(9): 76–84. doi: [10.11959/j.issn.1000-0801.2017212](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-0801.2017212).  
ZHANG Jinyan, JIN Feng, and YIN Lixin. Dynamic pilot assignment in massive MIMO system based on user classification[J]. *Telecommunications Science*, 2017, 33(9): 76–84. doi: [10.11959/j.issn.1000-0801.2017212](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-0801.2017212).
- [6] ZHU Xudong, WANG Zhaocheng, DAI Linglong, *et al.* Smart pilot assignment for massive MIMO[J]. *IEEE Communications Letters*, 2015, 19(9): 1644–1647. doi: [10.1109/LCOMM.2015.2409176](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2015.2409176).
- [7] KU Li, FAN Jiancun, and DENG Jianguo. Low complexity pilot allocation in massive MIMO systems[C]. The 8th IEEE International Conference on Communication Software and Networks, Beijing, China, 2016: 402–406.
- [8] AKBAR N, YANG Nan, SADEGHI P, *et al.* Multi-cell multiuser massive MIMO networks: User capacity analysis and pilot design[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2016, 64(12): 5064–5077. doi: [10.1109/TCOMM.2016.2614674](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2016.2614674).
- [9] JING Xiaorong, LI Mengwan, LIU Hongqing, *et al.* Superimposed pilot optimization design and channel estimation for multiuser massive MIMO systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(12): 11818–11832. doi: [10.1109/TVT.2018.2875480](https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2875480).
- [10] CASTAÑEDA GARCIA M H and LUO Jian. Time-shifted pilots multiplexed with uplink data and unequal power allocation[C]. 2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Barcelona, Spain, 2018: 1–6.
- [11] GAO Hongyuan, SU Yumeng, ZHANG Shibo, *et al.* Antenna selection and power allocation design for 5G massive MIMO uplink networks[J]. *China Communications*, 2019, 16(4): 1–15.
- [12] GUO Kaifeng, GUO Yan, and ASCHEID G. Energy-efficient uplink power allocation in multi-cell mu-massive-MIMO systems[C]. The 21th European Wireless Conference, Budapest, Hungary, 2015: 1–5.
- [13] AHMADI H, FARHANG A, MARCHETTI N, *et al.* A game theoretic approach for pilot contamination avoidance in massive MIMO[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2016, 5(1): 12–15. doi: [10.1109/LWC.2015.2487261](https://doi.org/10.1109/LWC.2015.2487261).
- [14] MOCHAOURAB R, BJÖRNSSON E, and BENGTTSSON M. Adaptive pilot clustering in heterogeneous massive MIMO networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(8): 5555–5568. doi: [10.1109/TWC.2016.2561289](https://doi.org/10.1109/TWC.2016.2561289).
- [15] BOGOMOLNAIA A and JACKSON M O. The stability of hedonic coalition structures[J]. *Games and Economic Behavior*, 2002, 38(2): 201–230. doi: [10.1006/game.2001.0877](https://doi.org/10.1006/game.2001.0877).
- [16] OSBORNE M J and RUBINSTEIN A. A Course in Game Theory[M]. Cambridge, USA: MIT Press, 1994: 255–298.
- 智慧: 女, 1984年生, 讲师, 研究方向为大规模MIMO、协作通信和无线传感器网络等。  
王飞跃: 男, 1989年生, 硕士生, 研究方向为无线中继网络、协作通信、大规模MIMO。  
黄子菊: 女, 1993年生, 硕士生, 研究方向为大规模MIMO、第五代(5G)移动通信系统。

责任编辑: 陈倩