

# 基于大尺度衰落系数的联合用户分组和导频分配策略

周 围<sup>1</sup>, 唐 俊<sup>2,3</sup>, 马茂琼<sup>2,3</sup>, 陈星宇<sup>2,3</sup>

(1.重庆邮电大学 光电工程学院,重庆 400065; 2.重庆邮电大学 通信与信息工程学院,重庆 400065;

3.重庆邮电大学 移动通信技术重庆市重点实验室,重庆 400065)

**摘 要:** 导频长度受限会导致相同的导频复用给不同的小区用户,由此引起导频污染问题。导频污染将使得信道状态信息估计不准,从而降低系统性能。针对小区内不同区域用户遭受导频污染程度不同的问题,分析图着色和部分导频交替复用(AFPR)2种导频分配方案,在这2种方案的基础上进行折中,提出一种基于大尺度衰落系数的联合用户分组以及导频分配方案。对用户与本基站之间的大尺度衰落系数大小进行升序排序,将所有小区用户根据所受导频污染严重程度的不同,依次分类为安全边缘用户、危险边缘用户和中心用户,对于安全边缘用户和非安全边缘用户,分别采用加权图着色方案和AFPR方案进行导频分配。仿真结果表明,相比原有AFPR方案,该方案的用户平均上行可达和速率提高约2.2%,其能够有效利用不同区域用户信道质量的差异性来完成导频分配,并通过具有较低复杂度的策略降低导频污染对用户的影响。

**关键词:** 导频污染;部分导频交替复用;大尺度衰落系数;用户分组;安全边缘用户;非安全边缘用户;导频分配

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



**中文引用格式:** 周围,唐俊,马茂琼,等.基于大尺度衰落系数的联合用户分组和导频分配策略[J].计算机工程,2022,48(3):124-130.

**英文引用格式:** ZHOU W, TANG J, MA M Q, et al. Joint user grouping and pilot allocation strategy based on large-scale fading coefficients[J]. Computer Engineering, 2022, 48(3): 124-130.

## Joint User Grouping and Pilot Allocation Strategy Based on Large-Scale Fading Coefficients

ZHOU Wei<sup>1</sup>, TANG Jun<sup>2,3</sup>, MA Maoqiong<sup>2,3</sup>, CHEN Xingyu<sup>2,3</sup>

(1.School of Optoelectronic Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;

2.School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China; 3.Chongqing Key Laboratory of Mobile Communications Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications,

Chongqing 400065, China)

**[Abstract]** The limited pilot length causes the same pilot to be multiplexed to different cell users, resulting in pilot pollution, which in turn leads to inaccurate estimation of Channel State Information (CSI), reducing the system performance. To address the problem that users in different areas in the cell suffer from different degrees of pilot pollution, two pilot allocation schemes, graph coloring and Alternately Fraction Pilot Reuse (AFPR), are analyzed. A joint user grouping and pilot allocation scheme based on large-scale fading coefficient is proposed, employing these two schemes. The large-scale fading coefficients between users and the Base Station (BS) are sorted in ascending order to classify cell users into secure edge users, dangerous edge users, and central users according to the severity of pilot pollution. For secure edge and non-secure edge users, Weighted Graph Coloring (WGC) scheme and AFPR scheme are used for pilot allocation, respectively. Simulation results show that compared with the original AFPR scheme, the average uplink sum-rate of users in this scheme are increased by about 2.2%, it can effectively use the differences of user channel quality in different regions to complete pilot allocation, and reduce the impact of pilot pollution on users through strategies with lower complexity.

**[Key words]** pilot contamination; Alternately Fraction Pilot Reuse (AFPR); large-scale fading coefficients; user grouping; secure edge users; non-secure edge users; pilot allocation

**DOI:** 10.19678/j.issn.1000-3428.0061267

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目(61771085);重庆市基础与前沿研究计划项目(cstc2015jcyjA40040)。

**作者简介:** 周围(1971—),男,教授、博士,主研方向为无线移动通信技术、通信系统及信号处理、智能天线技术;唐俊、马茂琼、陈星宇,硕士研究生。

**收稿日期:** 2021-03-24

**修回日期:** 2021-05-17

**E-mail:** 2994656234@qq.com

## 0 概述

大规模 MIMO 技术是 5G 无线系统的核心技术之一,在 5G 无线系统中基站需要大量天线运行,大规模 MIMO 技术涉及多个单天线用户终端,由部署在基站上的大量天线提供服务<sup>[1-3]</sup>。由于使用了大量天线并应用了多用户检测和波束形成技术,使得大规模 MIMO 被证明比传统 MIMO 在频谱和能量效率方面有更优的性能<sup>[4-5]</sup>。

由于导频长度有限,导致相同的导频会复用给不同的小区用户,从而引起导频污染问题。导频污染会使得信道状态信息(Channel State Information, CSI)估计不精确,从而影响系统性能<sup>[6-7]</sup>。针对该问题,已有研究人员提出很多降低导频污染的导频分配方案。

文献[8]提出一种基于深度学习(Deep Learning, DL)的导频分配方案,该方案旨在学习导频分配与用户位置之间的关系,然而,DL 算法对数据的要求较高,因此,需要较长的时间来处理数据。文献[9]以迟滞噪声混沌神经网络为框架从而求取导频分配方式。文献[10]通过门限值将系统小区中的用户分成低干扰用户和高干扰用户,为低干扰用户随机分配导频,对于高干扰用户,通过亲和力传播(Affinity Propagation, AP)聚类算法进行聚类分组,然后根据不同类型的用户执行不同的导频分配策略。文献[11]基于用户环境提出一种最佳导频复用因子方案,以确保系统始终以最大的频谱效率运行,当导频序列足够支持正交性时,不同用户之间的导频污染为零,否则,导频污染从零变成有限值<sup>[12]</sup>。但是,若每个小区中用户复用正交导频,当信道相干时间与用户比值很大时,对应最优的复用正交导频数目也会增加,从而导致导频复用概率降低<sup>[13]</sup>。

在 SPA 方案中,为信道质量最差的用户集合分配小区间干扰最小的导频序列<sup>[14]</sup>,虽然这些导频序列干扰最小,但在被信道质量较差的用户使用时,仍被认为是高干扰导频序列,因此,与导频序列相关的干扰必须最小化。文献[15]提出一种基于 SPA 的改进算法,通过利用大尺度衰落系数来最大化目标小区的最小用户上行速率。文献[16]提出一种基于顶点图着色的导频分配方案,根据小区间干扰图将导频序列分配给用户,其中,干扰图的评价既取决于到达角(Angle of Arrival, AOA)的相关性,也取决于用户之间的距离,然而,该方案需要二阶信道信息来构造 ICI 图。文献[17]对比博弈论的匹配方案与随机分配方案,结果表明,前者可以明显改善估计信道的准确性。

在现实的信道模型中,当一些具有不正交或者相同导频序列的用户在到达角不重叠时,也不会互相干扰。文献[18]考虑到通过用户强度对用户进行分组时,部分遭受其他小区干扰程度较小的用户不用特意分配独一无二的导频。文献[19]先用极坐标对每个小区内的所有用户方位进行标注,然后根据用户的极角大小依次分配导频序列,接着采用不同时间延的伪随机码对不同小区使用同一导频序列的用

户进行加扰的导频分配。文献[20]提出一种半动态导频分配方案,其能推导出各个小区可以复用导频的用户与其服务基站的距离门限,但是该方案和文献[21]方案均增加了导频开销。文献[22]提出一种部分交替复用导频分配方案,其核心是以提高系统频谱效率为准则,根据每个小区用户位置信息将小区划分为中心和边缘 2 个区域,边缘区域的导频资源互相正交,中心区域的导频资源为相邻小区边缘区域的导频资源,当且仅当中心用户率  $\varepsilon = 2/3$  时,系统导频资源数目可以被三等分。但在实际应用中,小区用户数目若无法满足三等分的条件,则该方案将存在明显不足。

本文根据小区内不同区域的用户遭受污染程度不同的现象,分析图着色和部分导频交替复用(Alternately Fraction Pilot Reuse, AFPR)2 种方案的优缺点,并提出一种基于大尺度衰落系数的联合用户分组和导频分配策略,该策略是图着色和 AFPR 这 2 种方案的折中。对用户与本基站之间的大尺度衰落系数大小进行升序排序,将所有小区用户依次分类为安全边缘用户、危险边缘用户和中心用户,对安全边缘用户和非安全边缘用户分别采用加权图着色(Weighted Graph Coloring, WGC)方案和 AFPR 方案进行导频分配,从而降低算法复杂度并提高用户的平均上行可达和速率。

## 1 系统模型

本文研究一个多用户 MIMO 系统,如图 1 所示,该系统包括  $L$  个小区,每个小区有一个基站,每个基站有  $M$  根天线且服务  $K$  个用户( $N \gg K$ ),小区索引号与基站索引号保持一致。

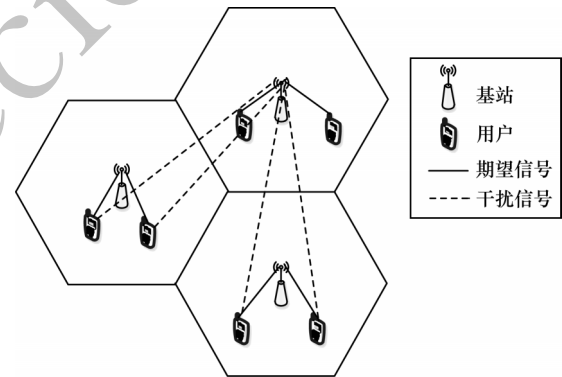


图 1 系统模型

Fig.1 System model

第  $i$  小区的  $k$  用户与第  $j$  小区基站之间的信道向量可表示为:

$$\mathbf{h}_{ik}^j = \mathbf{g}_{ik}^j \sqrt{\beta_{ik}^j} \quad (1)$$

$$\beta_{ik}^j = \frac{\alpha}{\|\mathbf{x}_{ik}^u - \mathbf{x}_j^b\|^\eta} \quad (2)$$

其中:  $\mathbf{g}_{ik}^j$  是小尺度衰落系数,服从  $\text{CN}(\mathbf{0}, \mathbf{I}_M)$ ;  $\beta_{ik}^j$  是大尺度衰落系数,小尺度衰落系数被假设为对于不同用户或每个基站的不同天线是不同的,而大尺度衰

落系数对于同一基站的不同天线是相同的,但是该系数取决于用户位置信息; $x_{ik}^u$ 是第*i*小区中第*k*用户的位置; $x_j^b$ 是第*j*小区基站的位置; $\eta$ 为路径损耗指数; $\alpha$ 为常量。发送导频信号可以获取信道信息,因为导频资源有限,所以应重复使用长度为 $\tau$ 的正交导频序列的同一集合 $\Phi$ ,并保证在单个小区内不重复使用该导频。因此, $\Phi = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_S] \in \mathbb{C}^{\tau \times S}$ ,它们的列向量彼此正交,满足 $\Phi^H \Phi = I_K$ 。

为了进行导频分配,变量 $a_{i,k} \in \{1, 2, \dots, S\}$ 表示将导频序列 $\phi_{a_{i,k}}$ 分配给小区用户 $u_{k,i}$ 。因此,基站*i*接收的导频信号 $Y_i^{\text{pilot}}$ 可表示为:

$$\begin{aligned} Y_i^{\text{pilot}} &= \sqrt{\rho^{\text{pilot}}} \sum_{j=1}^L H_i^j \Phi + N_i^{\text{pilot}} = \\ &\sqrt{\rho^{\text{pilot}}} H_i^j \Phi + \sqrt{\rho^{\text{pilot}}} \sum_{j=1, j \neq i}^L H_i^j \Phi + N_i^{\text{pilot}} \\ H_i^j &= \begin{pmatrix} h_{i,1}^{j,1} & \dots & h_{i,K}^{j,1} \\ \vdots & & \vdots \\ h_{i,1}^{j,M} & \dots & h_{i,K}^{j,M} \end{pmatrix} = G_i^j (D_i^j)^{1/2} \\ G_i^j &= \begin{pmatrix} g_{i,1}^{j,1} & \dots & g_{i,K}^{j,1} \\ \vdots & & \vdots \\ g_{i,1}^{j,M} & \dots & g_{i,K}^{j,M} \end{pmatrix} \\ D_i^j &= \begin{pmatrix} \beta_{i,1}^j & & \\ & \ddots & \\ & & \beta_{i,K}^j \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

其中: $H_i^j$ 、 $G_i^j$ 和 $D_i^j$ 分别表示*j*小区与*i*基站之间的信道、小尺度衰落系数和大尺度衰落系数矩阵; $N_i^{\text{pilot}}$ 是噪声矩阵。

在通过LS算法得到信道估计之后,根据上行链路数据传输阶段中第*i*小区中*k*用户的接收信号,可计算出第*i*小区中*k*用户的信干噪比,如下:

$$S_{\text{SINR}(ik)}^{\text{UL}} = \frac{|E\{(\tilde{h}_{ik}^j)^H h_{ik}^j\}|^2}{\sum_{(j',k') \in \Gamma(j,k)} |E\{(\tilde{h}_{j',k'}^j)^H h_{j',k'}^j\}|^2 + \sigma_n^2} \quad (4)$$

当 $M \rightarrow \infty$ 时,由于满足以下信道特性:

$$\begin{aligned} \frac{\|h_{ik}^j\|^2}{E\{\|h_{ik}^j\|^2\}} &\rightarrow (\beta_{ik}^j)^2 \\ \frac{(h_{ik}^j)^H h_{jk}^j}{\sqrt{E\{\|h_{ik}^j\|^2\}} E\{\|h_{jk}^j\|^2\}}} &\rightarrow 0 \end{aligned}$$

因此,式(4)可化简为式(5):

$$S_{\text{SINR}(ik)}^{\text{UL}} = \frac{(\beta_{ik}^j)^2}{\sum_{(j',k') \in \Gamma(j,k)} (\beta_{j',k'}^j)^2} \quad (5)$$

其中: $(j',k') \in \Gamma(j,k)$ 表示不同小区的用户 $u_{k,i}$ 使用相同导频; $\sum_{(j',k') \in \Gamma(j,k)} (\beta_{j',k'}^j)^2$ 表示导频污染。当 $M$ 趋向

无限时,SINR仅依赖于信道的大尺度衰落因子,而小尺度衰落因子和噪声被平均。因此,上行链路中相关平均上行可达和速率表示为:

$$R = (1 - \mu_0) E\left\{ \left(1 + S_{\text{SINR}(ik)}^{\text{UL}}\right) \right\} \quad (6)$$

其中: $\mu_0$ 是导频开销系数。本文的研究目标是最大化可达和速率,因此,优化问题P1为:

$$\max_{a_{i,k}} \sum_{(j,k)} E\left\{ \left(1 + S_{\text{SINR}(ik)}^{\text{UL}}\right) \right\} \quad (7)$$

其中: $(j,k)$ 定义了KL所有用户数。

将P1问题转换为P2:

$$\max_{a_{i,k}} \sum_{(j,k)} E\left\{ \left(1 + \frac{(\beta_{ik}^j)^2}{\sum_{(j',k') \in \Gamma(j,k)} (\beta_{j',k'}^j)^2} \right) \right\} \quad (8)$$

P2问题的最优解算法理论上是穷举算法。当某个小区中有*K*个用户和*Q*个导频,则第*j*个小区中有 $\frac{Q!}{(Q-K)!}$ 种导频分配方案。但是,如果考虑到所有小

区,则有 $\left(\frac{Q!}{(Q-K)!}\right)^{L-1}$ 种导频分配方案,找到一个最优解的任务量巨大,这显然不太现实,因此,需要找到一个合理的优化方案。

## 2 问题描述

如果将每个小区内的用户分成2个部分,每个小区内的部分用户在整个系统中重用相同的导频子集,而其余的用户根据重用参数被分配正交子集,上述过程称为部分导频复用。因此,存在部分用户复用相同导频子集的情况。

本节主要分析文献[17]中提出的部分交替复用导频分配方案。部分交替复用导频分配方案的核心是提高系统频谱效率为准则,根据每个小区用户位置信息将小区划分为中心和边缘2个区域。边缘区域的导频资源互相正交,中心区域的导频资源为相邻小区边缘区域的导频资源。假设有3个小区分别为*A*、*B*、*C*,每个小区的用户数均为*K*,所有小区分配的正交导频序列集合的总长度 $T_p$ 为:

$$T_p = 3 \times K \times (1 - \varepsilon), 0 \leq \varepsilon \leq 2/3 \quad (9)$$

由式(9)可知,导频资源数目为 $T_p$ ,在 $0 \leq \varepsilon \leq 2/3$ 区域内,导频资源数目随着用户中心率 $\varepsilon$ 的增加而不断减少。对这3个小区分别进行导频分配:首先将3个小区中的用户 $U_A$ 、 $U_B$ 和 $U_C$ 分别按照一定中心用户率 $\varepsilon$ 分成中心用户和边缘用户,分别表示为 $U_A^{\text{center}}$ 、 $U_A^{\text{edge}}$ 、 $U_B^{\text{center}}$ 、 $U_B^{\text{edge}}$ 、 $U_C^{\text{center}}$ 、 $U_C^{\text{edge}}$ ,则每个小区的中心用户个数和边缘用户个数可分别表示为:

$$\begin{aligned} |U_i^{\text{center}}| &= \varepsilon K, i = A, B, C \\ |U_i^{\text{edge}}| &= (1 - \varepsilon)K \end{aligned} \quad (10)$$

其中: $|\cdot|$ 表示集合的势。

将导频序列*V*集合等分成3个子集,分别为 $V_1$ 、 $V_2$ 和 $V_3$ ,表示为:

$$\begin{aligned} V_1 &= \{v_1 \ v_2 \ \dots \ v_{(1-\varepsilon)K}\} \\ V_2 &= \{v_{(1-\varepsilon)K+1} \ v_{(1-\varepsilon)K+2} \ \dots \ v_{2(1-\varepsilon)K}\} \\ V_3 &= \{v_{2(1-\varepsilon)K+1} \ v_{(1-\varepsilon)K+2} \ \dots \ v_{3K(1-\varepsilon)}\} \end{aligned}$$

然后分别将 $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$ 三组导频序列随机分配给



$U_A^{\text{edge}}, U_B^{\text{edge}}, U_C^{\text{edge}}$ , 最后将  $V_2 \cup V_3, V_1 \cup V_3, V_1 \cup V_2$  三组导频序列随机分配给  $U_A^{\text{center}}, U_B^{\text{center}}$  和  $U_C^{\text{center}}$ 。

通过对文献[17]进行研究可知,导频序列的长度  $T_p$  与每个小区的用户总数  $K$ 、中心率  $\varepsilon$  有关,且  $K \leq T_p \leq 3K$ 。由于传输信号的长度有限,因此导频序列的长度也会在在一定程度上影响系统性能。由式(9)可知,部分交替复用导频分配方案不仅要求小区用户使用的导频序列集合的长度始终被等分成三部分,还要求对于中心用户的导频分配是采用随机分配,牺牲了每个小区中心用户的性能。当且仅当  $\varepsilon = 2/3$  时,小区用户数目无法满足三等分的条件。因此,针对部分交替复用导频分配方案在实际应用中存在的不足,本文提出一种改进的分配方案。

### 3 导频分配策略

#### 3.1 小区用户分类

本文方案将用户分成两类,每类用户分别对应不同的导频分配方案。由P2表达式可知,每个小区中用户的  $\beta_{ik}^l$  值可决定导频污染的严重程度,因此,可以将  $U$  集合中每个小区的用户按照  $\beta_{ik}^l$  值大小进行分组。假设有相邻的小区如图2所示,  $U_l$  表示  $l$  小区中的用户集合,  $\{b_1, b_2, \dots, b_K\}$  表示  $\{1, 2, \dots, K\}$  的一个组合。将  $K$  个用户按照  $\beta_{ib}^l$  值大小进行排序,如下:

$$\beta_{ib_1}^l < \beta_{ib_2}^l < \dots < \beta_{ib_K}^l, \quad l = A, B, C \quad (11)$$

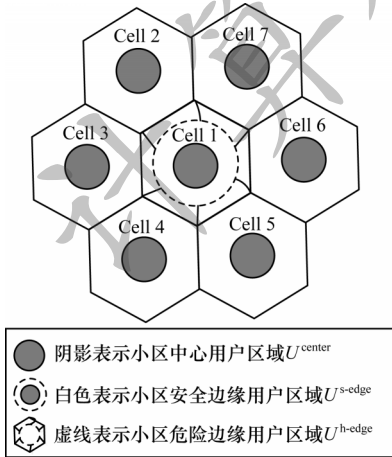


图2 基于污染程度的小区用户划分

Fig.2 Community users division based on pollution degree

假设对  $U_l$  用户集合进行分类,根据干扰用户遭受污染程度的不同,将小区  $l$  内的  $K$  个用户  $U_l = \{u_{l,b_1}, u_{l,b_2}, \dots, u_{l,b_K}\}$  分成集合  $U_l^{\text{center}}$  和  $U_l^{\text{edge}}$ , 分别表示为:

$$U_l^{\text{center}} = \{u_{l,b_1}, u_{l,b_2}, \dots, u_{l,b_K}\} \quad (12)$$

$$U_l^{\text{edge}} = \{u_{l,b_{\varepsilon K+1}}, u_{l,b_{\varepsilon K+2}}, \dots, u_{l,b_K}\}$$

可以将  $U_l^{\text{edge}}$  分为  $U_l^{\text{h-edge}}$  和  $U_l^{\text{s-edge}}$  两部分,分别表示为:

$$U_l^{\text{h-edge}} = \{u_{l,b_{\varepsilon K+1}}, u_{l,b_{\varepsilon K+2}}, \dots, u_{l,b_{\varepsilon K+\ell}}\}$$

$$U_l^{\text{s-edge}} = \{u_{l,b_{\varepsilon K+\ell+1}}, u_{l,b_{\varepsilon K+\ell+2}}, \dots, u_{l,b_K}\} \quad (13)$$

其中:  $U_l^{\text{h-edge}}$  表示危险边缘用户集合;  $U_l^{\text{s-edge}}$  表示安全边缘用户集合;  $\ell = \left(1 - \frac{3}{2}\varepsilon\right)$  表示安全边缘用户占每

小区用户总数的比率。小区内所有用户数大小为  $K = K_{\text{WGC}} + K_{\text{AFPR}}$ ,  $K_{\text{WGC}}$  和  $K_{\text{AFPR}}$  分别为:

$$K_{\text{WGC}} = |U_l^{\text{s-edge}}|$$

$$K_{\text{AFPR}} = |U_l^{\text{h-edge}}| + |U_l^{\text{center}}| \quad (14)$$

#### 3.2 基于用户分类的导频分配策略

将导频序列  $\Phi$  集合分为:

$$\Phi = V_{\text{WGC}} \cup V_{\text{AFPR}} \quad (15)$$

$$|V_{\text{WGC}}| = K_{\text{WGC}}$$

$$|V_{\text{AFPR}}| = 3K_{\text{AFPR}}(1-\varepsilon) = 3\left(\frac{1}{2}\varepsilon|U_l| + \varepsilon|U_l|\right) \times (1-\varepsilon) \quad (16)$$

将  $V_{\text{AFPR}}$  等分成 3 个子集,如图3所示,表述如式(17)所示:

$$V_{\text{AFPR},1} = \{v_1, v_2, \dots, v_{(1-\varepsilon)K_{\text{AFPR}}}\}$$

$$V_{\text{AFPR},2} = \{v_{(1-\varepsilon)K_{\text{AFPR}}+1}, v_{(1-\varepsilon)K_{\text{AFPR}}+2}, \dots, v_{2(1-\varepsilon)K_{\text{AFPR}}}\}$$

$$V_{\text{AFPR},3} = \{v_{2(1-\varepsilon)K_{\text{AFPR}}+1}, v_{2(1-\varepsilon)K_{\text{AFPR}}+2}, \dots, v_{3K_{\text{AFPR}}(1-\varepsilon)}\} \quad (17)$$

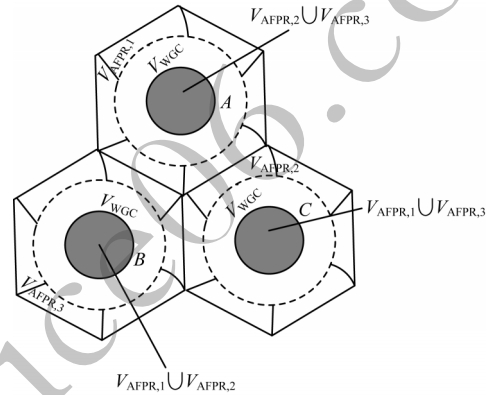


图3 不同用户对应的导频配置

Fig.3 Pilot configuration corresponding to different users

对每个小区用户分组和导频序列集合进行划分,满足下式:

$$V_{\text{AFPR}} = \bigcup_{i=1}^3 V_{\text{AFPR},i}, \quad i = 1, 2, 3$$

$$|V_{\text{AFPR},1}| = |V_{\text{AFPR},2}| = |V_{\text{AFPR},3}|$$

$$U_l = U_l^{\text{center}} \cup U_l^{\text{s-edge}} \cup U_l^{\text{h-edge}}, \quad l = 1, 2, \dots, L$$

$$U_l^{\text{edge}} = U_l^{\text{s-edge}} \cup U_l^{\text{h-edge}} \quad (18)$$

$$|U_l^{\text{center}}| = \varepsilon|U_l|, \quad 0 \leq \varepsilon \leq 2/3$$

$$|U_l^{\text{s-edge}}| = \left(1 - \frac{3}{2}\varepsilon\right)|U_l|$$

$$|U_l^{\text{h-edge}}| = \frac{1}{2}\varepsilon|U_l|$$

将  $V_{\text{AFPR},1}$  集合的补集表示为  $\text{CuA}V_{\text{AFPR},1} = V_{\text{AFPR}} \setminus V_{\text{AFPR},1} = V_{\text{AFPR},2} \cup V_{\text{AFPR},3}$ 。同理,  $V_{\text{AFPR},2}$  和  $V_{\text{AFPR},3}$  集合的补集分别为  $\text{CuA}V_{\text{AFPR},2}$  和  $\text{CuA}V_{\text{AFPR},3}$ 。最后,给用户分配导频,依次给用户  $U_A^{\text{h-edge}}$  和  $U_A^{\text{center}}$  分别随机分配导频  $V_{\text{AFPR},1}$  和  $\text{CuA}V_{\text{AFPR},1}$ 。A、B、C不同的用户类对应的导频

配置如图3所示。其中,  $U_A^{s-edge}$  用户按照加权图着色方案分配导频  $V_{WGC}$ , 同理, 给  $B$ 、 $C$  小区的用户分配对应的导频序列。当存在  $\varepsilon = 2/3$  时, 需要满足中心小区用户数量是边缘用户的2倍, 由于  $U_i^{s-edge}$  集合的存在, 因此可解决该问题。例如, 如表1所示, 当  $K = S = 20$  时, 可以存在  $|U_i^{h-edge}| = 10$ 、 $|U_A^{s-edge}| = 5$ 、 $|U_i^{center}| = 5$  这种分配方案, 则可以解决文献[17]中存在的问题。

表1 2种用户分类方案对比

Table 1 Comparison of two user classification schemes

$ U_i  = K = S$	文献[17]方案	本文方案
12	$ U_i^{edge}  = 4$ , $ U_i^{center}  = 8$	$ U_i^{s-edge}  = 2$ , $ U_i^{h-edge}  = 6$ , $ U_i^{center}  = 4$
20	不满足倍数	$ U_i^{s-edge}  = 5$ , $ U_i^{h-edge}  = 5$ , $ U_i^{center}  = 10$

本文方案将每个小区中  $K_{AFGC}$  个  $U_i^{h-edge}$  和  $U_i^{center}$  用户通过部分导频交替方案复用, 将  $U_i^{s-edge}$  通过图着色算法分配导频, 具体流程如图4所示。

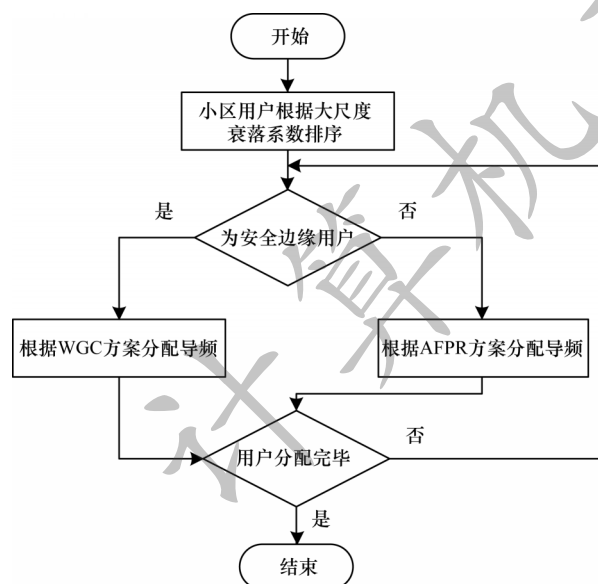


图4 导频分配流程

Fig.4 Pilot allocation procedure

本文引入一个变量  $\zeta$ , 用来衡量2个用户之间潜在的导频污染:

$$\zeta_{(j,k)(j',k')} = \left( \beta_{(j',k')}^j / \left( \beta_{(j,k)}^{j'} \right)^2 + \left( \beta_{(j,k)}^j / \left( \beta_{(j',k')}^{j'} \right)^2 \right) \quad (19)$$

$\zeta$  越大, 当这2个用户重用相同的导频资源时它们之间发生的导频污染越严重。通过图着色算法为较大干扰的2个用户分配不同的导频。图着色算法描述如下:

#### 算法1 安全边缘用户图着色导频分配策略

输入 初始化系统参数  $K_{WGC}$ ,  $L$ ,  $S_{WGC}$

输出 导频分配结果  $\{p(j, k)\}$ ,  $1 < j < L$ ,  $1 < k < K_{WGC}$

1. 初始化

$$2. \{(j_1, k_1), (j', k')\} = \underset{\{(j_1, k_1), (j', k') \in K_{WGC}, j_1 \neq j'\}}{\operatorname{argmax}} \zeta_{(j,k)(j',k')}$$

$$3. \text{if } \{p(j, k)\} = 0, p(j_1, k_1) = 1, p(j', k') = 2$$

$$4. \Omega = \{(j_1, k_1), (j', k')\}$$

5. while  $\exists p(j, k) = 0$  do

$$6. g(j, k) = \sum_{(j', k') \in \Omega, j \neq j'} \zeta_{(j,k)(j',k')}$$

$$7. (j_0, k_0) = \underset{(j,k)}{\operatorname{argmax}} \{g(j, k), (j, k) \notin \Omega\}$$

$$8. \Lambda = \{s: \forall k, p(j_0, k) \neq s, 1 \leq s \leq S_{WGC}\}$$

$$9. \eta_s = \sum_{(j,k) \in \Omega, p(j,k) = s} \zeta_{(j_0, k_0)(j,k)}$$

$$10. p(j_0, k_0) = \underset{s}{\operatorname{argmin}} \{\eta_s: s \in \Lambda\}$$

$$11. \Omega = \Omega \cup (j_0, k_0)$$

12. end while

13. return  $\{p(j, k)\}$

算法1的主要步骤如下:

1) 初始化。步骤2在所有小区  $K_{WGC}$  个  $U_i^{h-edge}$  用户中, 通过计算比较加权干扰值  $\zeta$  选择出2个不同小区中具有最大加权干扰的2个用户, 记为  $(j_1, k_1)$  和  $(j', k')$ 。步骤3将这2个用户分别分配导频  $\phi_1$  和  $\phi_2$ , 然后将它们添加到已经分配的用户集合  $\Omega$  中, 作为步骤4中的  $\Omega$  初始化。此后, 依次选择其余用户并为其分配导频, 直到不存在  $p(j, k) = 0$ 。

2) 用户选择(步骤6和步骤7)。引入优先级参数  $g(j, k)$ , 该参数定义为步骤6中连接用户  $(j, k)$  和  $\Omega$  内其他小区中用户的边缘权重之和。步骤7通过计算未分配导频用户和集合  $\Omega$  中用户的优先级参数, 优先分配最大潜在PC强度的用户  $(j_0, k_0)$ 。

3) 导频分配(步骤8-步骤11)。选择用户  $(j_0, k_0)$  后, 方案旨在从可选导频中选择对该用户造成最小潜在PC的导频资源。首先, 在步骤8中构造可选的导频集合  $\Lambda$ , 该可选导频集合包括第  $j_0$  个小区中未使用的导频, 以确保在同一小区内没有导频被重用, 即  $p(j, k) \neq p(j, k'), k \neq k'$ 。然后, 在步骤9中定义  $\eta_s$ , 分别计算用户  $(j_0, k_0)$  和  $\Omega$  集合中的复用导频  $s$  的用户之间的潜在PC强度。最后, 在步骤10中选择具有最小潜在PC强度  $\eta_s$  的导频分配给用户  $(j_0, k_0)$ , 并在步骤11中将用户  $(j_0, k_0)$  添加到分配的集合  $\Omega$  中。依次执行, 直到为每个小区中所有  $K_{WGC}$  个用户分配相应的导频为止。

表2将3种方案的复杂度进行对比。从表2可以看出: 本文方案第一阶段通过冒泡算法对用户的大尺度衰落系数大小进行排序, 复杂度为  $O(LK^2)$ ; 第二阶段在导频中随机抽取  $K_{AFGC}$  个导频在  $K_{AFGC}$  个用户内复用, 复杂度为  $O(K_{AFGC})$ ; 然后直接对  $K_{WGC}$  个用户构造干扰图进行图着色算法分配, 复杂度为  $O(|V_{WGC}|(K_{WGC})^3)$ 。在3种对比方案中, 本文所提方案复杂度较低。

表2 算法复杂度对比

Table 2 Comparison of algorithms complexity

导频分配方案	算法复杂度
文献[16]方案	$O(S(KL)^3)$
文献[22]方案	$O(LK^3)$
本文方案	$O(LK^2 + K_{AFGC} +  V_{WGC} (K_{WGC})^3)$

4 仿真分析

本节将对所提方案进行蒙特卡洛方法模拟,并将其与文献[16,20,22]所提方案以及随机导频分配方案的性能进行对比。考虑一个典型的多小区模型,其由7个小区组成,且每个基站服务单天线用户小区,基站配备 $M$ 根天线,仿真参数如表3所示。

表3 仿真参数

Table 3 Simulation parameters	
仿真参数	参数值
小区数	7
基站天线数 $M$	16~2 048
小区半径 $R/\text{m}$	1 000
用户散射半径/m	100
用户和基站之间的距离/m	100~1 000
路径损耗指数 $\eta$	3.5
阴影衰落系数 $\sigma_{\text{shadow}}/\text{dB}$	8
天线间隔	$\lambda/2$
系统带宽 $B_w/\text{MHz}$	20
正交导频数 $S$	15~72
用户数 $K$	15~72

在  $K=72$ 、 $M=512$ 、 $K_{\text{AFPR}} \in [0, 72]$ 、仿真次数为300时,本文方案中小区平均上行容量随着非中心边缘用户数的变化关系如图5所示。从图5可以看出,当非安全边缘用户数为0( $K_{\text{AFPR}}=0$ )时,小区平均上行容量值最大,此时每个小区中的所有用户都使用图着色算法分配导频。同理,当非安全边缘用户数为72( $K_{\text{AFPR}}=K$ )时,小区平均上行容量值最小,此时使用AFPR方案对系统中的所有用户分配导频。通过验证可以得到,基于大尺度衰落系数的联合用户分组和导频分配策略具有可行性。

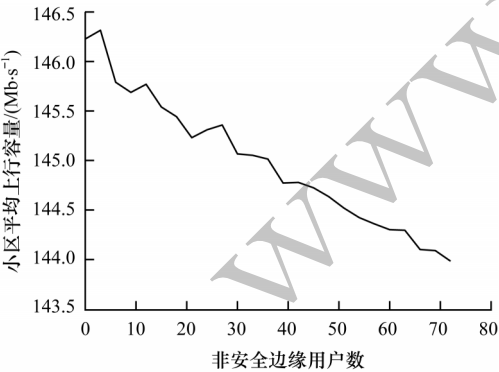


图5 非安全边缘用户数不同时小区平均上行容量  
Fig.5 Average uplink capacity of cells with different number of non-secure edge users

在基站天线数为512、 $K \in [15, 48]$ 时,不同方案中用户平均速率和用户数的关系曲线如图6所示。由图6可看出,随着用户数的增加,每个用户的平均

速率逐渐降低,这是因为系统中的用户干扰随着用户的增加而增加。本文方案相比文献[16]方案虽然平均速率略差,但是相对其他几种导频分配方案仍有优势。

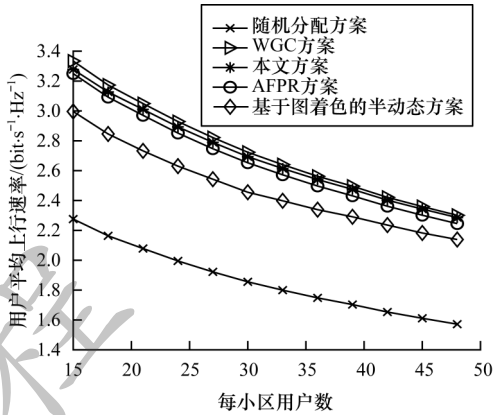


图6 用户平均上行速率与用户数的关系  
Fig.6 Relationship between the average uplink rate of users and the number of users

当用户天线数为[32, 2 048]时,用户平均上行可达和速率对比如图7所示。从图7可以看出,随着天线数目的增加,各种方案的用户上行可达和速率都在增加,本文方案的可达和速率虽然比WGC方案差但是相比其他方案更好,这是因为WGC方案比较整个小区系统中的两两用户之间的潜在干扰,而本文方案只比较部分用户之间的干扰,复杂度较低。本文方案的平均可达和速率相比AFPR方案提高了约2.2%,因此,本文方案更具实用性。

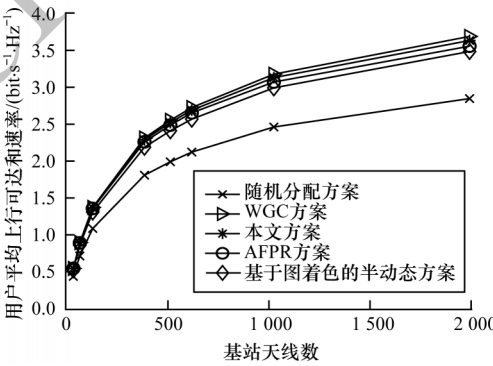


图7 用户平均上行可达和速率与天线数的关系  
Fig.7 Relationship between the average uplink sum-rate of users and the number of antennas

5 结束语

本文提出一种基于大尺度衰落系数的联合用户分组和导频分配策略,该策略考虑小区内不同区域用户遭受的导频污染程度不同,将每个小区内的用户按照一定规则分成安全边缘用户、危险边缘用户和中心用户,对于受到严重干扰的危险边缘用户和受到轻微干扰的安全中心用户,通过AFPR方案对



其进行导频分配,对于受到较严重干扰的安全边缘用户,则以WGC方案优先给干扰较为严重的中心用户分配最优导频。实验结果表明,该方案能降低导频污染对小区用户的影响,且具有更低的运算复杂度。后续将通过搭建深度学习模型来提高该方案在每个小区用户数目不同时的适用性。

### 参考文献

- [1] LARSSON E G, EDFORS O, TUFVESSON F, et al. Massive MIMO for next generation wireless systems[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(2): 186-195.
- [2] NGO H Q, LARSSON E G, MARZETTA T L. Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(4): 1436-1449.
- [3] YAO R, LI T, LIU Y, et al. Analytical approximation of the channel rate for massive MIMO system with large but finite number of antennas[J]. IEEE Access, 2018, 6: 6496-6504.
- [4] AL-WAHHAMY A, BURIS N E, AL-RIZZO H M, et al. An efficient paradigm for evaluating the channel capacity of closed-loop massive MIMO systems[J]. Progress in Electromagnetics Research C, 2020, 98: 1-16.
- [5] PRASAD K N R S V, HOSSAIN E, BHARGAVA V K. Energy efficiency in massive MIMO-based 5G networks: opportunities and challenges[J]. IEEE Wireless Communications, 2017, 24(3): 86-94.
- [6] KHANSEFID A, MINN H. On channel estimation for massive MIMO with pilot contamination[J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(9): 1660-1663.
- [7] KIM K, LEE J. Deep Learning Based Pilot Allocation Scheme(DL-PAS) for 5G massive MIMO system[J]. IEEE Communications Letters, 2018, 22(4): 828-831.
- [8] LIU G, DENG H, QIAN X, et al. Joint pilot allocation and power control to enhance max-min spectral efficiency in TDD massive MIMO systems[J]. IEEE Access, 2019, 7: 149191-149201.
- [9] SHAO K, LI S D, WANG G Y. Hysteretic noisy chaotic neural networks based pilot assignment[J]. Journal of Electronics and Information, 2020, 42(10): 2454-2461.
- [10] GAO H, ZHANG T, FENG C, et al. Clustering based pilot allocation algorithm for mitigating pilot contamination in massive MIMO systems[C]//Proceedings of 2018 Asia-Pacific Microwave Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2018: 878-880.
- [11] CHATAUT R, AKL R. Optimal pilot reuse factor based on user environments in 5G massive MIMO[C]//Proceedings of IEEE Computing & Communication Workshop & Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2018: 845-851.
- [12] WANG H, ZHANG W, LIU Y, et al. On design of non-orthogonal pilot signals for a multi-cell massive MIMO system[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2017, 4(2): 129-132.
- [13] SOHN J Y, YOON S W, MOON J. On reusing pilots among interfering cells in massive MIMO[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017(12): 12-23.
- [14] ZHU X, WANG Z, DAI L, et al. Smart pilot assignment for massive MIMO[J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19: 1644-1647.
- [15] AL-HUBAISHI A, NORDIN N K, SALI A, et al. An efficient pilot assignment scheme for addressing pilot contamination in multicell massive MIMO systems[J]. Electronics, 2019, 8(4): 372-375.
- [16] ZHU X, DAI L, WANG Z, et al. Weighted graph coloring based pilot decontamination for multicell massive MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(3): 2829-2834.
- [17] 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.
- [18] 李建坡, 薛鹏, 杨涛, 等. 基于分组导频复用的大规模多输入多输出系统导频污染抑制方法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2021, 51(6): 2225-2236.
- [18] LI J P, XUE P, YANG T, et al. Pilot contamination suppression method for massive MIMO system based on divided pilot reuse[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2021, 51(6): 2225-2236. (in Chinese)
- [19] 韩知雨, 董静薇, 闫宁, 等. 大规模MIMO系统中伪随机序列加扰法的导频分配[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2021, 26(1): 115-121.
- [19] HAN Z Y, DONG J W, YAN N, et al. Pilot allocation scheme for pseudo random sequence scrambling in massive MIMO system[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2021, 26(1): 115-121. (in Chinese)
- [20] XU F M, QIAN H, CAO H Y. Semi-dynamic pilot allocation based on graph coloring in massive MIMO systems[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(11): 39-46.
- [21] 谢斌, 范有伟, 汪宁. 基于软导频复用和加权图着色的导频分配方案[J]. 计算机应用与软件, 2020, 37(9): 49-55.
- [21] XIE B, FAN Y W, WANG L. Pilot allocation scheme based on soft pilot multiplexing and weighted graph coloring[J]. Computer Applications and Software, 2020, 37(9): 49-55. (in Chinese)
- [22] LI M W, JING X R, MO L L. Pilot contamination reduction method with alternately fractional pilot reuse for multi-cell massive MIMO systems[J]. Journal of Signal Processing, 2017(8): 82-92.

编辑 吴云芳