

大规模MIMO多小区多用户TDD系统导频污染抑制方法

吴玉成, 刘 统, 曹 猛, 杨婷婷

(重庆大学 通信工程学院, 重庆 400044)

摘 要:针对大规模MIMO系统中导频污染问题,提出一种基于路径损耗执行用户分组的导频调度策略(pilot scheduling based on path loss to perform user grouping, PLUG),该策略以用户受导频干扰程度为依据将用户划分为中心用户组和边缘用户组,受导频污染较轻的中心用户分配相同导频,受导频污染严重的边缘用户分配正交导频,从而抑制导频污染的影响。PLUG策略假定每个小区的边缘用户数相同,为提高PLUG策略灵活性,进一步提出一种改进的基于路径损耗执行用户分组的导频调度策略(improved pilot scheduling based on path loss to perform user grouping, IPLUG),该策略利用判决参数实现每个小区边缘用户数的动态选取,成功地避免一些信道条件好的用户被误划为边缘用户造成导频开销浪费,或信道条件差的用户被误划为中心用户导致通信质量下降,提高了用户分组的准确性和合理性。理论分析和仿真结果表明,所提策略均能在不明显降低中心用户性能的前提下显著提高小区边缘用户的信道估计归一化MSE、上行链路SINR和上行可达速率。由此可知,所提策略可有效抑制大规模MIMO系统的导频污染并降低通信中断概率。

关键词:大规模MIMO;导频污染;导频调度;用户分组

中图分类号:TN929.5

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2018)02-0105-07

Pilot Contamination Suppression in Massive MIMO Multi-cell Multi-user TDD Systems

WU Yucheng, LIU Tong, CAO Meng, YANG Tingting

(College of Communication Eng., Chongqing Univ., Chongqing 400044, China)

Abstract: In order to suppress the pilot contamination in Massive MIMO system, a pilot scheduling scheme based on path loss to perform user grouping (PLUG) was proposed. The proposed PLUG scheme divided the users into the center user group and the edge user group according to different levels of pilot contamination. The proposed PLUG scheme assigned the same pilot sequences to the center users who suffering from slight pilot contamination and assigns orthogonal pilot sequences to the edge users who suffering from severe pilot contamination, thus inhibiting the impact of pilot contamination. The PLUG scheme assumed that the number of edge users in each cell is the same. To improve flexibility of PLUG, an improved pilot scheduling scheme based on path loss to perform user grouping (IPLUG) was proposed. By introducing the decision parameters, the strategy dynamically grouped and selected the number of edge users per cell. It avoided users in good channel conditions being wrongly divided into edge user group which would increase the pilot overhead, or users in bad channel conditions being wrongly divided into center user group which would decrease the quality of communication. In this way, the accuracy and rationality of user grouping were improved. Theory analysis and simulation results showed that the proposed scheduling can improve the channel estimation normalized MSE, uplink SINR and achievable rate of edge users with little performance loss of center users. In conclusion, the proposed schemes can effectively suppress the pilot pollution of Massive MIMO system and reduce the probability of communication interruption.

Key words: Massive MIMO; pilot contamination; pilot scheduling; user grouping

大规模MIMO^[1-2]作为5G的一项关键技术,可利用多天线成倍提升频谱效率。理想情况下大规模MIMO应当采用全正交导频调度策略(fully orthogon-

al pilot scheduling, FOPS)为每个用户分配正交导频,但导频序列的长度和导频集合规模受限于信道相干时间,典型场景下1 ms相干时间内最大正交导频序

收稿日期:2016-09-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(91438104);重庆市自然科学基金重点项目资助(CSTC2013jjB40004)

作者简介:吴玉成(1971—),男,教授。研究方向:无线通信技术。E-mail: wuyucheng@cqu.edu.cn

网络出版时间:2018-03-20 23:58:41

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20180320.2358.011.html>

列数约为200个^[3],因此大规模MIMO系统一般采用全复用导频调度策略(fully reused pilot scheduling, FRPS)。由于用户间导频非正交或完全相同,导频污染不可避免^[4]。当基站天线数趋于无穷且不存在协作时,影响系统性能的主要因素是导频污染带来的小区间干扰^[3],因此导频污染对于大规模MIMO系统的性能提升至关重要。

目前,针对大规模MIMO导频污染抑制技术主要从3个方面进行:信道估计方法^[5-8]、矩阵预编码方案^[9-10]、导频分配策略^[11]。以导频分配策略为指导开展研究,调研发现:王海荣等^[10]在最大化信漏噪比(signal leakage noise ratio, SLNR)预编码准则下,使小区间相互干扰较小的用户采用相同导频而相互干扰较大的用户采用正交导频,在导频污染的情况下提升了系统的整体性能,但是该导频调度方案需要基站间大规模协作,并需获知各用户的大尺度衰落因子,这在本身结构复杂的大规模MIMO系统中是非常困难的。Saxena等^[12]提出了一种基于功率控制的导频分配策略,使交叉增益相对较大的小区间的导频发射时隙错开,但确保几个小区的导频动态同步并非易事,控制机制的选取将直接影响策略的性能。Zhu等^[13]提出了导频协调分配方案,通过识别导频使用情况分配导频序列,选择受导频污染影响最小的用户复用导频,从而降低导频污染,但小区间协作给系统带来了额外的负担与开销。董婷婷等^[14]提出了基于软导频复用的改进策略,在软导频复用技术的基础上,引入分组参数进行二次分组,但需获知路径损耗因子、阴影衰落、各个用户的大尺度衰落因子等参数,模型较为复杂,且实现二次分组的运算复杂度较高。

作者提出一种基于路径损耗执行用户分组的导频调度策略(PLUG),以用户与基站的距离为分组依据将用户分为中心用户组与边缘用户组,再按相应原则为划分后的两组用户分配导频序列。在中心用户性能略有损失的情况下,小区边缘用户的通信中断概率显著降低, QoS(quality of service)显著提高。在PLUG策略的基础上进一步提出改进策略(IPLUG),引入判决参数 λ 动态选取边缘用户数,实现中心用户、边缘用户的动态划分,提升策略的灵活性。本文策略无需基站大规模协作,只需获知当前小区各用户与基站之间的距离及判决参数,利用划分原则完成一次动态分组即可。模型复杂度低且需要的参数少,简单易行。

1 大规模MIMO系统模型及导频污染成因

1.1 系统模型

图1为大规模MIMO系统模型。

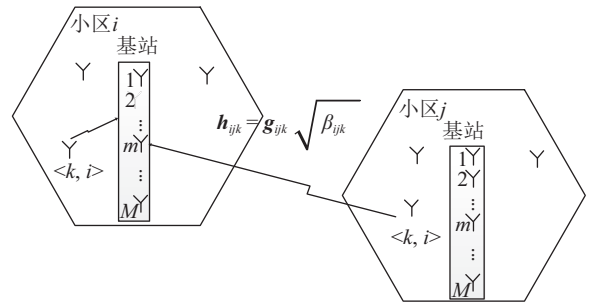


图 1 大规模MIMO多小区多用户TDD系统模型

Fig.1 Model of massive MIMO multi-cell multi-user TDD system

该系统包含 $L(L > 1)$ 个时间同步、全频谱复用的正六边形小区,每个小区采用集中式的方式在小区中心安装 M 根天线,且以同一频率为 K 个单天线用户提供服务($M \gg K$)。小区 j 中所有用户到小区 i 基站的信道传播矩阵为:

$$\mathbf{H}_{ij} = \mathbf{G}_{ij} \mathbf{D}_{ij}^{1/2} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{G}_{ij} = [\mathbf{g}_{ij1} \ \mathbf{g}_{ij2} \ \cdots \ \mathbf{g}_{ijk}]$, $\mathbf{g}_{ijk} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 为小尺度衰落向量,各向量相互独立且均服从均值为0、方差为 \mathbf{I}_M 的循环复高斯分布,即 $\mathbf{g}_{ijk} \sim \text{CN}(0, \mathbf{I}_M)$; $\mathbf{D}_{ij} = \text{diag}(\beta_{ij1}, \beta_{ij2}, \cdots, \beta_{ijk})$ 是 $K \times K$ 阶对角阵,用以描述小区 j 中各用户到小区 i 基站的大尺度衰落, $\beta_{ijk} = z_{ijk} / (r_{ijk}/R)^\alpha$,表示小区 j 中用户 k 到基站 i 的大尺度衰落因子。其中,阴影衰落 z_{ijk} 服从对数正态分布,即 $10 \lg(z_{ijk})$ 服从均值为0、标准差为 σ_{shadow} 的高斯分布, R 定义为小区半径, r_{ijk} 表示小区 j 中用户 k 到小区 i 基站的距离, α 表示路径损耗因子,且 z_{ijk} 、 r_{ijk} 、 α 彼此独立。同时,假设同一基站下天线阵列在排列时足够紧凑,特定用户的大尺度衰落在所有传播路径上相等,但不同用户的大尺度衰落彼此独立,并且假设信道具有互易性,即上行链路传播矩阵的共轭转置是下行链路传播矩阵^[2]。对多小区多用户的大规模MIMO系统而言,基站安装的天线阵列数量庞大,信道满足渐进正交性,即:

$$\left(\frac{\mathbf{H}_{ij}^H \mathbf{H}_{ij}}{M} \right) = \mathbf{D}_{ij}^{1/2} \left(\frac{\mathbf{G}_{ij}^H \mathbf{G}_{ij}}{M} \right)_{M \gg K} \mathbf{D}_{ij}^{1/2} \approx \mathbf{D}_{ij} \quad (2)$$

1.2 导频污染成因

大规模MIMO多小区多用户TDD系统中,基站在每一个相干时间内通过用户发送上行导频信号估计信道并完成信号检测和下行预编码。在每一个相干时间的开始时刻,所有小区内所有用户同时发送导频序列。假设 $\boldsymbol{\psi}_i = (\psi_{i1}, \psi_{i2}, \cdots, \psi_{iK})^T$ 是小区 i 中所有用户的 $K \times \tau$ 维导频序列矩阵(τ 为导频序列长度),满足 $\boldsymbol{\psi}_i \boldsymbol{\psi}_i^H = \mathbf{I}_K$, \mathbf{I}_K 为 $K \times K$ 维单位矩阵。在FRPS策略下,上行链路小区 i 基站接收到的导频矩阵为:

$$\mathbf{y}_i^p = \sqrt{p_p} \left(\sum_{j=1}^L \mathbf{H}_{ij} \boldsymbol{\psi}_j \right) + \mathbf{n}_i^p \quad (3)$$

式中, p_p 为导频信号发射功率, \mathbf{n}_i^p 为 $M \times \tau$ 维加性高斯白噪声矩阵。接收完导频信号后, 基站开始进行上行链路信道估计。采用之前介绍过的LS信道估计得到目标小区 i 的信道估计值 $\hat{\mathbf{H}}_{ii}$ 为:

$$\hat{\mathbf{H}}_{ii} = \frac{1}{\sqrt{p_p}} \mathbf{y}_i^p \boldsymbol{\psi}_i^H = \mathbf{H}_{ii} + \sum_{j \neq i} \mathbf{H}_{ij} + \frac{1}{\sqrt{p_p}} \mathbf{n}_i^p \boldsymbol{\psi}_i^H \quad (4)$$

由式(4)可以看出, i 小区信道估计值 $\hat{\mathbf{H}}_{ii}$ 除了目标信道和噪声的影响外, 还包含其他小区到目标小区的信道传播矩阵的叠加, 这就是导频污染。

在用户发送完导频后, 所有用户向基站发送数据信号且使用同一时频资源, 小区 i 基站接收到的信号被定义为:

$$\mathbf{y}_i^u = \sqrt{p_u} \sum_{j=1}^L \sum_{k=1}^K \mathbf{h}_{ijk} x_{jk}^u + \mathbf{n}_i^u \quad (5)$$

式中: x_{jk}^u 为小区 j 中用户 k 的发送数据符号; p_u 为上行链路用户数据符号平均发射功率; \mathbf{h}_{ijk} 表示小区 j 中用户 k 到小区 i 基站的信道传输向量, 也就是 \mathbf{H}_{ij} 的第 k 列; \mathbf{n}_i^u 为 $M \times 1$ 维加性高斯白噪声向量。基站利用式(4)的信道估计值 $\hat{\mathbf{H}}_{ii}$ 与接收信号向量 \mathbf{y}_i^u , 以及MF检测获知小区 i 中用户 k 发送的原始数据符 \hat{x}_{ik}^u :

$$\hat{x}_{ik}^u = \hat{\mathbf{h}}_{ik}^H \mathbf{y}_i^u = \left(\sum_{j=1}^L \mathbf{h}_{ijk}^H + \mathbf{v}_{ik}^H \right) \left(\sqrt{p_u} \sum_{j=1}^L \sum_{k=1}^K \mathbf{h}_{ijk} x_{jk}^u + \mathbf{n}_i^u \right) \quad (6)$$

式中, \mathbf{v}_{ik} 为矩阵 $\mathbf{n}_i^p \boldsymbol{\psi}_i^H / \sqrt{p_p}$ 的第 k 列向量。基站天线数 M 趋近正无穷时, 由式(2)易知, 大规模MIMO系统的信道呈现渐进正交性, 则式(6)的渐进表达式为:

$$\hat{x}_{ik}^u \approx M \sqrt{p_u} \left(\beta_{ik} x_{ik}^u + \sum_{j \neq i} \beta_{ijk} x_{jk}^u \right) \quad (7)$$

由式(7)可知, 当基站天线数 $M \rightarrow \infty$ 时, 数据符号 \hat{x}_{ik}^u 将不受小尺度衰落因子和噪声影响。因此, 当 $M \rightarrow \infty$ 时, 可将小区 i 中用户 k 上行链路接收信号的信干噪比定义为:

$$SINR_{ik}^u = \frac{\beta_{ik}^2}{\sum_{j \neq i} \beta_{ijk}^2} \quad (8)$$

由式(8)可见, 由于导频污染的存在, 上行信号信干噪比受限于干扰小区中使用相同导频用户的大尺度衰落因子。根据式(8)可得目标小区 i 中用户 k 的上行链路可达速率为:

$$C_{ik}^u = (1 - \mu_0) E \{ \log(1 + SINR_{ik}^u) \} \quad (9)$$

式中, μ_0 为全复用时的导频开销系数, 表示用于信道

估计的导频序列导致的频谱效率损失, 当采用其他导频分配策略时, 式(9)中的 μ_0 要做适当调整。

2 PLUG策略

由式(8)的渐进结果可知, 小区内用户上行链路 $SINR$ 与自身大尺度衰落因子成正比。小区内各用户经历的大尺度衰落并不相同, 因此不同用户的上行链路 $SINR$ 也不同。不难得知, 相同小区内距离基站较远即路径损耗较大的用户更容易受到来自相邻小区使用非正交或相同导频用户的干扰, 即导频污染更严重。作者提出的PLUG策略根据用户与基站距离远近即路径损耗大小将用户分为易受导频污染的边缘用户组和不易受导频污染的中心用户组, 并且假定每个小区的边缘用户数相同。在完成分组后为中心用户与边缘用户分配导频序列, 不同小区的中心用户复用相同导频序列, 而不同小区边缘用户使用相互正交的导频序列。

假设小区 j 有 K_{jc} 个中心用户, K_{je} 个边缘用户, 由于每个小区选取的边缘用户数与中心用户数均相同, 则 $K_c = K_{jc}, K_e = K_{je}, L = 1, 2, \dots, L$ 。将式(1)中的信道传播矩阵 \mathbf{H}_{ij} 划分为两部分:

$$\mathbf{H}_{ij} = \left[\mathbf{H}_{ij}^c \quad \mathbf{H}_{ij}^e \right] \quad (10)$$

式中: \mathbf{H}_{ij}^c 为 $M \times K_c$ 维矩阵, 定义为小区 j 的中心用户到目标小区 i 基站的信道传播矩阵; \mathbf{H}_{ij}^e 是 $M \times K_e$ 维矩阵, 定义为小区 j 的边缘用户到目标小区 i 基站的信道传播矩阵。设 $\boldsymbol{\psi}$ 为大规模MIMO系统的导频集合, $\boldsymbol{\psi}_{cj}$ 为小区 j 的中心用户导频集合, $\boldsymbol{\psi}_{ej}$ 为小区 j 的边缘用户导频集合, 则 $\boldsymbol{\psi}_{cj} = \boldsymbol{\psi}(r: K_c)$, 即 $\boldsymbol{\psi}_{cj}$ 为导频矩阵 $\boldsymbol{\psi}$ 的前 K_c 行向量。根据式(3)可得目标小区 i 基站收到的导频向量为:

$$\bar{\mathbf{y}}_i^p = \sqrt{p_p} \left(\sum_{j=1}^L \mathbf{H}_{ij}^c \boldsymbol{\psi}_{cj} + \sum_{j=1}^L \mathbf{H}_{ij}^e \boldsymbol{\psi}_{ej} \right) + \bar{\mathbf{n}}_i^p \quad (11)$$

式中, $\bar{\mathbf{n}}_i^p$ 为上行链路的加性高斯白噪声。根据LS信道估计方法可得中心用户的信道传播矩阵为:

$$\hat{\mathbf{H}}_{ii}^c = \frac{1}{\sqrt{p_p}} \bar{\mathbf{y}}_i^p \boldsymbol{\psi}^H(r: K_c) = \mathbf{H}_{ii}^c + \sum_{j \neq i} \mathbf{H}_{ij}^c(r: K_c) + \bar{\mathbf{n}}_i^c \quad (12)$$

式中: $\bar{\mathbf{n}}_i^c = \bar{\mathbf{n}}_i^p \boldsymbol{\psi}^H(r: K_c) / \sqrt{p_p}$, 且随天线数 M 的增大逐渐消失; $\mathbf{H}_{ij}^c(r: K_c)$ 由信道传播矩阵 \mathbf{H}_{ij}^c 的前 K_c 列组成。由此可见, 中心用户仍然受到了导频污染, 因此中心用户的 $SINR$ 表达式与FRPS策略相同, 即:

$$SINR_{ik}^{uc} = \frac{\beta_{ik}^2}{\sum_{j \neq i} \beta_{ijk}^2} \quad (13)$$

对于边缘用户,由LS估计可得信道传播矩阵 $\hat{\mathbf{H}}_{ii}^e$ 为:

$$\hat{\mathbf{H}}_{ii}^e = \frac{1}{\sqrt{p_p}} \bar{\mathbf{y}}_i^p \boldsymbol{\psi}_{ci}^H = \mathbf{H}_{ii}^e + \bar{\mathbf{n}}_i^e \quad (14)$$

式中, $\bar{\mathbf{n}}_i^e = \bar{\mathbf{n}}_i^p \boldsymbol{\psi}_{ci}^H / \sqrt{p_p}$, 且随天线数 M 的增大逐渐消失。由式(14)可以看到,边缘用户不存在导频污染,只受高斯噪声的影响。根据式(8),由于边缘用户不存在导频污染,即不存在式(8)的分母项,因此当 $M \rightarrow \infty$ 时,边缘用户 $SINR_{ik}^{uc} \rightarrow \infty$ 。

PLUG策略的代价是增加部分导频开销,即导频开销系数变成了 $\mu_0 \times K_{\text{PLUG}} / K_{\text{FRPS}}$ 。其中: K_{FRPS} 表示FRPS策略所需的正交导频序列集合,也就是每个小区中用户数目 K ; K_{PLUG} 表示PLUG策略所需的正交导频序列集合,为各小区边缘用户数目叠加与目标小区中心用户之和,即 $K_{\text{PLUG}} = LK_e + K_c$ 。因此,在PLUG策略下,中心用户和边缘用户的平均上行可达速率分别为:

$$C_{ik}^{uc} = \frac{\left(1 - \mu_0 \frac{LK_e + K_c}{K}\right) E\{\text{lb}(1 + SINR_{ik}^{uc})\}}{K_c} \quad (15)$$

$$C_{ik}^{ec} = \frac{\left(1 - \mu_0 \frac{LK_e + K_c}{K}\right) E\{\text{lb}(1 + SINR_{ik}^{ec})\}}{K_c} \quad (16)$$

3 IPLUG策略

PLUG策略显著改善了边缘用户的QoS,但是缺乏一定的灵活性,这是因为PLUG策略中每个小区选取的边缘用户数相同,且只跟本小区内其他用户与基站之间的距离相比较,并未考虑用户自身的具体环境。因此,作者提出了一种改进的基于路径损耗执行用户分组的导频调度(IPLUG)策略,通过引入判决参数 λ 动态选取每个小区的边缘用户数。图2为IPLUG策略判决参数示意图。

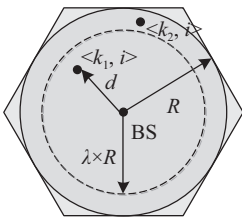


图2 IPLUG策略判决参数示意图

Fig.2 Grouping illustration of IPLUG

改进的IPLUG策略以PLUG策略为基础,旨在提升执行用户分组时的准确性和合理性。在IPLUG策略中,当判决参数 λ 选定时,基站可根据用户距离 d 与 $\lambda \times R$ 进行比较进而完成动态分组。具体的划分原则是:

$$d \stackrel{?}{\geq} \lambda \times R \rightarrow \begin{cases} \text{是} \rightarrow \text{边缘用户,} \\ \text{否} \rightarrow \text{中心用户} \end{cases} \quad (17)$$

设中心用户集合为 U_c , 边缘用户集合为 U_e , 中心用户导频集合为 $\boldsymbol{\psi}_c$, 边缘用户导频集合为 $\boldsymbol{\psi}_e$, 小区 j 导频集合为 $\boldsymbol{\psi}_j = (\boldsymbol{\psi}_{1j}, \boldsymbol{\psi}_{2j}, \dots, \boldsymbol{\psi}_{Kj})^T, j = 1, 2, \dots, L$, 则:

$$\boldsymbol{\psi}_{ki} \boldsymbol{\psi}_{kj}^H = \begin{cases} 1 \rightarrow \boldsymbol{\psi}_{ki} \subseteq \boldsymbol{\psi}_c \text{ 且 } \boldsymbol{\psi}_{kj} \subseteq \boldsymbol{\psi}_c, \\ 0 \rightarrow \text{其他} \end{cases} \quad (18)$$

则目标小区 i 基站收到的导频向量为:

$$\bar{\mathbf{y}}_i^p = \sqrt{p_p} \sum_{j=1}^L \left(\sum_{k=1, k \in U_c}^K \mathbf{h}_{ijk} \boldsymbol{\psi}_{kj} + \sum_{k=1, k \in U_e}^K \mathbf{h}_{ijk} \boldsymbol{\psi}_{kj} \right) + \bar{\mathbf{n}}_i^p \quad (19)$$

对于目标小区 i 用户 k , 采用LS信道估计得到目标信道估计值为:

$$\hat{\mathbf{h}}_{ik} = \frac{1}{\sqrt{p_p}} \bar{\mathbf{y}}_i^p \boldsymbol{\psi}_{ki}^H \quad (20)$$

结合式(19)、(20),当天线数 $M \rightarrow \infty$ 时得到IPLUG策略下中心用户的信干噪比为:

$$SINR_{ik}^{uc} = \frac{|\hat{\mathbf{h}}_{ik}^H \mathbf{h}_{iik}|^2}{\sum_{j \neq i, \boldsymbol{\psi}_{ki} \subseteq \boldsymbol{\psi}_c, \boldsymbol{\psi}_{kj} \subseteq \boldsymbol{\psi}_c} |\hat{\mathbf{h}}_{jik}^H \mathbf{h}_{jik}|^2} \quad (21)$$

而边缘用户由于不受导频污染影响,因此当 $M \rightarrow \infty$ 时,边缘用户 $SINR_{ik}^{uc} \rightarrow \infty$ 。

IPLUG策略的信道估计归一化MSE、上行链路SINR和上行可达速率表达式仍与PLUG策略一致,只不过IPLUG策略所需正交导频序列集合为:

$$K_{\text{IPLUG}} = \sum_{j=1}^L K_{je} + \max\{K_{1c}, K_{2c}, \dots, K_{Lc}\} \quad (22)$$

因此,在IPLUG策略下,中心用户和边缘用户的平均上行可达速率分别为:

$$C_{ik}^{uc} = \left(1 - \frac{\mu_0}{K} \left(\sum_{j=1}^L K_{je} + \max\{K_{1c}, K_{2c}, \dots, K_{Lc}\} \right)\right) E\{\text{lb}(1 + SINR_{ik}^{uc})\} / K_{ic} \quad (23)$$

$$C_{ik}^{ec} = \left(1 - \frac{\mu_0}{K} \left(\sum_{j=1}^L K_{je} + \max\{K_{1c}, K_{2c}, \dots, K_{Lc}\} \right)\right) E\{\text{lb}(1 + SINR_{ik}^{ec})\} / K_{ie} \quad (24)$$

综上所述,IPLUG策略的好处是,每个小区的边缘用户数并不相同甚至可能为0,能够避免信道条件较好的用户被误划分为边缘用户而浪费资源,或信道条件较差的用户被误划为中心用户导致通信质量下降甚至中断,并且不需要基站之间的大规模协作,无需获知大量参数,只需要基站获知当前小区各用户与基站之间的距离与判决参数 λ 即可。因此,模型更简单,且计算简便易实现。

4 算法性能仿真

4.1 仿真场景及参数设置

以MATLAB软件为仿真平台,假设大规模MIMO多小区多用户TDD系统包含7个正六边形小区,如图3所示。假设天线间距为载波波长的1/2倍,即天线间存在相关性,但本文不考虑其相关性,并且假设所有天线均为全向天线。各小区用户数 $K = 10$,用户在小区内服从均匀分布,导频长度为128,路径损耗因子为3,导频开销系数为 $\mu_0 = 0.05$,小区半径 $R = 500$ m,集中式天线数 $16 \leq M \leq 1024$,对数正态阴影衰落为4 dB(仅最后一个仿真时对数正态阴影衰落设为2 dB),仿真次数均为2 000次。根据上述仿真参数,采用蒙特卡罗法仿真上行链路SINR、信道估计归一化MSE和目标小区可达速率,从而对比PLUG策略、IPLUG策略与FRPS策略之间的性能。

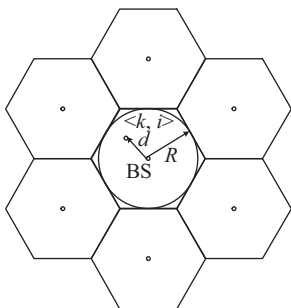


图3 $L=7$ 小区仿真场景示意图

Fig.3 Simulation scenario illustration of seven cells

4.2 PLUG策略仿真结果分析

图4、5分别描述了边缘用户数为1时,中心用户和边缘用户的信道估计归一化MSE、上行链路SINR的性能随天线数增长的变化曲线。

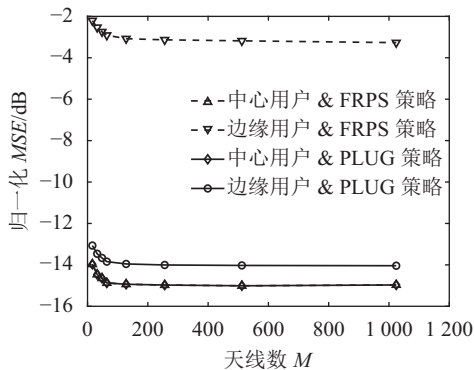


图4 FRPS和PLUG策略下用户MSE性能

Fig.4 Normalized MSE of FRPS and PLUG

由图4和5可知:两种策略下边缘用户和中心用户的信道估计归一化MSE随天线数 M 的增加均呈下降趋势。但是,两种策略下的中心用户MSE和SINR曲线均重合,说明中心用户复用导频导致导频污染相

同。而边缘用户在PLUG策略下分配了正交导频,因此不存在导频污染;当天线数为256时,边缘用户的归一化MSE性能提升了10.88 dB, SINR性能提升了3.23 dB。

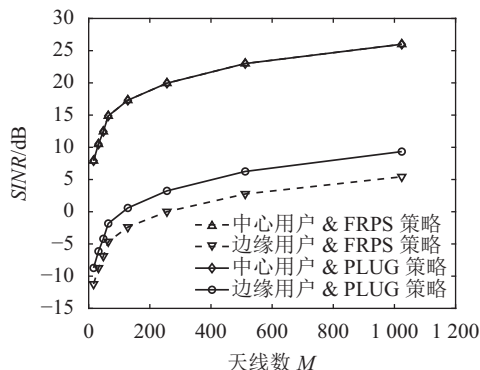


图5 FRPS和PLUG策略下用户SINR性能

Fig.5 SINR performance of FRPS and PLUG

图6是当边缘用户数为1时中心用户和边缘用户随着天线数增长时的平均可达速率性能变化曲线。图7是当边缘用户数为1时中心用户和边缘用户随天线数增长时的目标小区上行可达和速率的性能变化曲线。

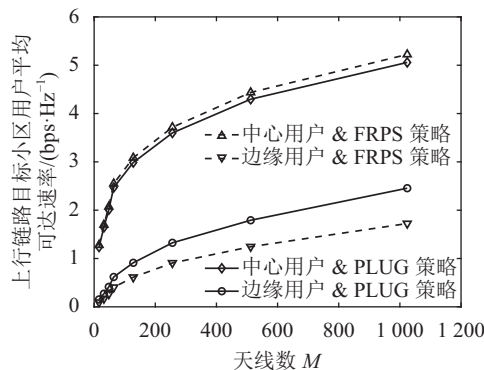


图6 FRPS和PLUG策略下目标小区用户平均可达速率

Fig.6 Target cell's average achievable rate of FRPS and PLUG

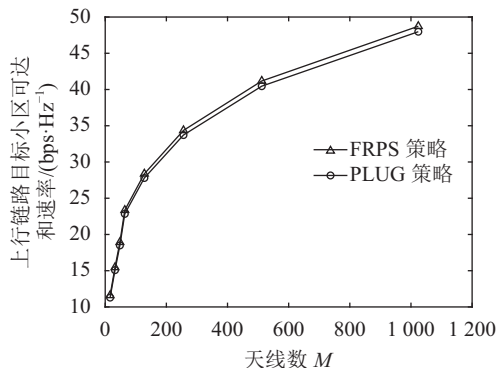


图7 FRPS和PLUG策略下目标小区可达和速率

Fig.7 Target cell's sum achievable rate of FRPS and PLUG

由图6可知, PLUG策略下中心用户平均可达速率略有损失, 这是因为该策略下增加了正交导频集合, 导频开销增大导致频谱效率降低, 但是边缘用户的性能获得了很大提升, 在天线数为256时平均可达速率增加了0.42 bps/Hz。由图7可以看到, 两种策略下目标小区上行可达和速率曲线基本重合, 这说明PLUG策略并没有给目标小区整体性能带来损失, 只是增加了中心用户和边缘用户的公平性, 大大降低了边缘用户通信中断的概率。

图8是当天线数为256时FRPS和PLUG策略不同边缘用户数情况下上行链路目标小区可达和速率。

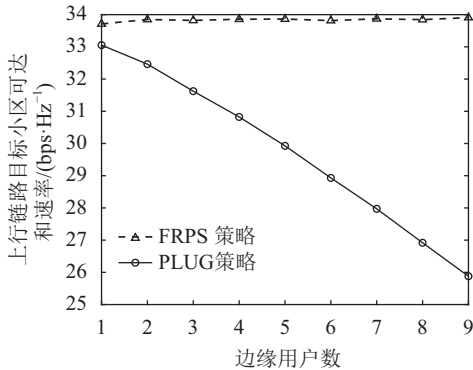


图 8 不同边缘数目情况下FRPS和PLUG策略目标小区可达和速率

Fig.8 Impact of different edge user numbers on the target cell's sum achievable rate of FRPS and PLUG

由图8可以看到, 当边缘用户数增大时, PLUG策略下可达和速率逐渐降低, 这是因为当边缘用户数大于1时, 导频开销的代价已经超过了PLUG策略带来的性能增益。

4.3 IPLUG策略仿真结果分析

图9是FRPS、PLUG和IPLUG策略下中心用户和边缘用户随天线数增长时的信道估计归一化MSE性能曲线, 其中, IPLUG策略对应判决参数 λ 为0.9, PLUG策略对应边缘用户数为1。

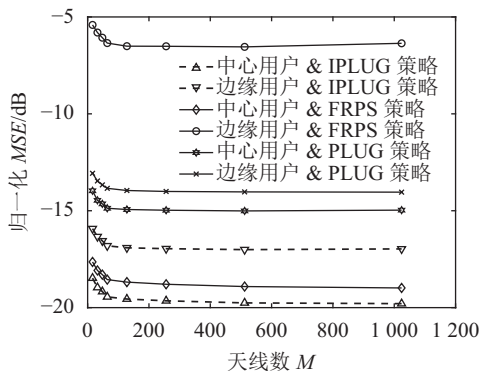


图 9 FRPS、PLUG和IPLUG策略下用户MSE性能

Fig.9 Normalized MSE of FRPS, PLUG and IPLUG

从图9中可以看出, 当天线数为256时, IPLUG策略下边缘用户的归一化MSE性能比PLUG策略提升了2.95 dB, 中心用户则提升了4.68 dB, 信道估计性能的提升极大地提高了上行信号检测和下行与编码的性能, 这是由IPLUG策略带来的灵活性导致的。

图10是当天线数为256时, FRPS和IPLUG策略在不同判决参数下上行链路目标小区可达和速率。

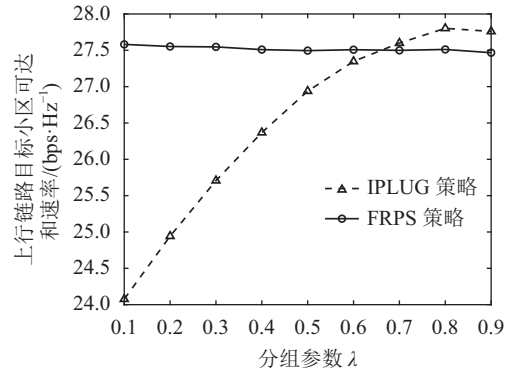


图 10 FRPS和IPLUG策略下不同判决参数 λ 情况下目标小区可达和速率

Fig.10 Impact of different grouping parameter λ on the target cell's sum achievable rate of FRPS and PLUG

从图10可以看到, 当判决参数 λ 增大时, IPLUG策略下上行链路目标小区可达和速率逐渐增大。当 $\lambda \geq 0.68$ 时, IPLUG策略可达和速率已经显著超过了FRPS策略, 这是一个IPLUG策略的明显优势, 避免了一些信道条件好的用户被误划为边缘用户造成导频开销浪费, 或一些信道条件差的用户被误划为中心用户导致通信中断。

5 结 论

提出一种基于路径损耗执行用户分组的导频调度策略(PLUG), 将用户分为中心用户和边缘用户, 边缘用户分配正交导频, 中心用户复用导频, 提高了边缘用户性能; 并在PLUG策略基础上进一步提出其改进策略(IPLUG), 通过引入判决参数, 动态选取各小区的边缘用户数。理论和仿真表明该策略能够避免一些信道条件好的用户被误划为边缘用户造成导频开销浪费, 或导致信道条件差的用户被误划为中心用户导致通信中断, 增加了各用户通信的公平性, 并且基站之间不需要大规模协作, 简单易行。所提出的两种策略均针对全向天线的小区, 并未考虑其他扇形小区, 同时, 导频分配均在目标小区内进行, 各小区间导频分配的情况相互独立, 存在一定的局限性。因此, 下一步的研究方向将是基于PLUG和IPLUG策略为基础重点研究扇形小区的导频污染抑制问题, 综合考虑各小区的相互联系在整个系统内合理

分配导频。

参考文献:

- [1] Larsson E,Edfors O,Tufvesson F,et al.Massive MIMO for next generation wireless systems[J].IEEE Communications Magazine,2014,52(2):186–195.
- [2] Wang Hairong,Wang Yuhui,Huang Yongming,et al.Pilot contamination reduction in very large MIMO cellular network[J].Journal on Communications,2014(1):24–33.[王海荣,王玉辉,黄永明,等.大规模MIMO蜂窝网络系统中的导频污染减轻方法[J].通信学报,2014(1):24–33.]
- [3] Marzetta T L.Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas[J].IEEE Transactions on Wireless Communications,2010,9(11):3590–3600.
- [4] Hoydis J,Ten Brink S,Debbah M.Massive MIMO in the UL/DL of cellular networks:How many antennas do we need?[J].IEEE Journal on Selected Areas in Communications,2013,31(2):160–171.
- [5] Sarker M A L, Lee M H.A fast channel estimation and the reduction of pilot contamination problem for massive MIMO based on a diagonal Jacket matrix[C]//Proceedings of 2013 4th International Workshop on Fiber Optics in Access Network.Almaty:IEEE,2013:26–30.
- [6] Yin H,Gesbert D,Filippou M,et al.A coordinated approach to channel estimation in large-scale multiple-antenna systems[J].IEEE Journal on Selected Areas in Communications,2012,31(2):264–273.
- [7] Neumann D,Joham M,Weiland L,et al.Low-complexity computation of LMMSE channel estimates in massive MIMO[C]//Proceedings of the 19th International ITG Workshop on Smart Antennas.Ilmeneau:VDE,2015:1–6.
- [8] Ngo H Q,Larsson E G.EVD-based channel estimation in multicell multiuser MIMO systems with very large antenna arrays[C]//Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Acoustics,Speech and Signal Processing.Kyoto:IEEE,2012:3249–3252.
- [9] Jin Shi,Wang Xiaoyu,Li Zheng,et al.On massive MIMO zero-forcing transceiver using time-shifted pilots[J].IEEE Transactions on Vehicular Technology,2016,65(1):59–74.
- [10] Wang Hairong,Yu Fei,Huang Yongming,et al.Precoding and pilot scheduling in very large MIMO multi-cell TDD systems[J].Journal of Signal Processing,2013,29(8):915–924.[王海荣,俞菲,黄永明,等.大规模MIMO多小区TDD系统中的预编码策略和导频调度[J].信号处理,2013,29(8):915–924.]
- [11] Dai X.Optimal training design for linearly time-varying MIMO/OFDM channels modelled by a complex exponential basis expansion[J].IET Communications,2007,1(5):945–953.
- [12] Saxena V,Fodor G,Karipidis E.Mitigating pilot contamination by pilot reuse and power control schemes for massive MIMO systems[C]//Proceedings of 2015 IEEE 81st Vehicular Technology Conference.Glasgow:IEEE,2015:1–6.
- [13] Zhu Xudong,Wang Zhaocheng,Dai Linglong,et al.Smart pilot assignment for massive MIMO[J].IEEE Communications Letters,2015,19(9):1644–1647.
- [14] Dong Tingting.Research on the pilot scheduling schemes for multi-cell multi-user massive MIMO system[D].Chongqing:Chongqing University,2016.[董婷婷.多小区多用户大规模MIMO系统导频调度策略研究[D].重庆:重庆大学,2016.]

(编辑 赵 婧)

引用格式: Wu Yucheng,Liu Tong,Cao Meng,et al.Pilot contamination suppression in massive MIMO multi-cell multi-user TDD systems[J].Advanced Engineering Sciences,2018,50(2):105–111.[吴玉成,刘统,曹猛,等.大规模MIMO多小区多用户TDD系统导频污染抑制方法[J].工程科学与技术,2018,50(2):105–111.]