



大规模 MIMO 系统中基于用户位置和用户分类的导频分配

曹海燕, 马子昌, 杨晓慧, 胡文娟, 许方敏, 方昕
(杭州电子科技大学, 浙江 杭州 310018)

摘要: 针对大规模 MIMO 通信系统中存在的导频污染问题, 提出了一种基于用户位置和用户分类的导频分配方案。该方案根据路径损耗和到达角设计目标函数及合理阈值, 通过将用户的目标函数与阈值进行比较, 把系统中所有用户分为高干扰和低干扰两类, 接着为低干扰用户复用导频序列、高干扰用户分配额外正交导频序列来减轻导频污染。仿真结果表明, 该方案提高了通信系统性能。

关键词: 大规模 MIMO; 导频污染; 导频分配; 归一化均方误差; 信干噪比; 可达和速率

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2019191

Pilot allocation based on users' location and user classification in massive MIMO system

CAO Haiyan, MA Zichang, YANG Xiaohui, HU Wenjuan, XU Fangmin, FANG Xin
Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China

Abstract: Aiming at the problem of pilot contamination in massive MIMO systems, a pilot allocation scheme based on users' location and user classification was proposed. The scheme designed the objective function and reasonable threshold based on path loss and angle of arrival. By comparing the user's objective function with the threshold, all users in the system were divided into two types: high interference and low interference, and the low-interference users multiplex pilot sequences and extra orthogonal pilot sequences were assigned to high interference users to mitigate pilot contamination. Simulation results show that the scheme improves the performance of the communication system.

Key words: massive MIMO, pilot contamination, pilot allocation, NMSE, signal to noise ratio, achievable sum rate

1 引言

大规模多输入多输出 (multiple-input and multiple-output, MIMO) 技术是当前无线通信领

域的一个热门研究对象^[1]。其核心思想是通过在小区基站处配置几十甚至上百根天线, 小区中的用户利用大规模天线形成的天线阵列提供的并行传输链路, 在同一时间频率资源上与小区基站进

收稿日期: 2019-04-08; 修回日期: 2019-07-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61501158)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.61501158)

行通信,从而极大地提升了通信系统的频谱效率及能效。大规模 MIMO 技术因此被称为 5G 无线通信的关键技术之一。

在基站 (base station, BS) 处准确估计出信道状态信息 (channel state information, CSI) 对于在大规模 MIMO 中实现高频谱效率是至关重要的。上行通信阶段中,用户向基站发送导频,基站使用收到的导频序列进行信道估计。由于时频资源的短缺,可供使用的正交导频序列的数量是有限的。因此必须在用户间复用导频序列,这导致信道估计结果会受到使用相同导频的其他小区用户的干扰,这就是大规模 MIMO 系统中的导频污染问题。目前,导频污染问题是制约大规模 MIMO 系统性能的瓶颈问题^[2-3]。

如何减轻导频污染正受到广泛关注。参考文献[4]提出了一种自适应导频分配方案,首先计算出每个用户到其他小区基站的大尺度衰落系数并求和;接着设置一个阈值,根据阈值对用户进行分类;最后针对两类用户分别进行导频分配。该方案显著提高了上行可达和速率,但该方案使用的信干噪比表达式为理想情况,未进行现实情况的仿真。参考文献[5]提出了一种基于到达角 (angle of arrival, AOA) 和路径损耗的公平导频分配方案。导频分配方案不仅考虑用户的 AOA,而且考虑用户的路径损耗。即首先为 AOA 不重叠的用户分配相同导频,最后分配导频的用户的 AOA 无法保证与干扰用户的 AOA 不重叠,这时考虑让用户之间的距离足够大。该方案不仅提高了整体系统性能,且保证了最差用户的性能。但是该方案只考虑了目标小区的性能,未考虑通信系统中的其他小区。参考文献[6]提出了一种基于图着色算法的导频分配方案。导频分配被定义为一种组合优化问题以最大化用户平均上行可达和速率。通过构建一种边缘权重干扰图来描述用户之间潜在干扰,但是并未讨论该算法的复杂度问题。参考文献[7]提出了一种根据位置感知的导频

分配方案,使用莱斯衰落信道,提出一个基于视距干扰的导频污染指标,通过最小化视距干扰来减小导频污染。但是仿真性能只与随机分配比较,没有与其他导频分配方案比较。参考文献[8]提出了一种根据位置的信道估计和导频分配方案,在传统的导频辅助信道估计后加入快速傅里叶变换来提高信道估计精确度。但是该方案只考虑目标小区的性能,未考虑通信系统中的其他小区。

本文以减轻大规模 MIMO 系统中的导频污染为着眼点,以提高信道估计精确程度为目标,提出了一种基于用户位置和用户分类的导频分配方案。该方案通过用户到基站的 AOA 和路径损耗将用户进行分类,然后按照一定规则进行导频分配。仿真结果表明,所提出的导频分配算法不仅提高了通信系统的信道估计性能,而且有效提升了系统的上行信干噪比及可达和速率。

2 系统模型

考虑一个多用户大规模 MIMO 系统,系统包含 L 个小区。每个多用户小区有 K 个单天线用户及 1 个配置有 M 根天线的基站。用户在小区中随机生成,小区基站位于小区中心。系统模型如图 1 所示。本文使用大规模 MIMO 系统中的时分双工 (time division duplexing, TDD) 协议^[9]。

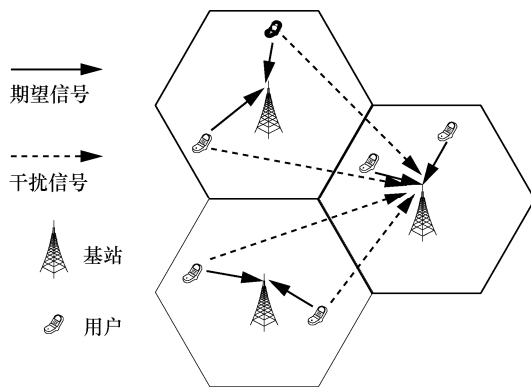


图1 大规模 MIMO 系统模型

本文使用如下的多径信道模型^[10]:



$$h_{lkj} = \frac{1}{\sqrt{P}} \sum_{p=1}^P a(\theta_{lkj}^p) a_{lkj}^p \quad (1)$$

其中, h_{lkj} 为第 l 个小区中的第 k 个用户到第 j 个小区基站的 $M \times 1$ 维上行信道矢量, P 为到达路径的数量, θ_{lkj}^p 为第 p 条路径的到达角, $\theta \in [0, 2\pi]$ 。 $a(\theta)$ 为天线导向矢量^[11], 如式 (2) 所示:

$$a(\theta) = \begin{bmatrix} 1 \\ \exp(-j2\pi D \cos \theta / \lambda) \\ \vdots \\ \exp(-j2\pi(M-1)D \cos \theta / \lambda) \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, D 为天线间距, 基站天线为均匀分布阵列, λ 为信号波长。 $a_{lkj}^p \sim \text{CN}(0, \beta_{lkj})$ 为第 p 条路径的信道系数。 β_{lkj} 为第 l 个小区中的第 k 个用户到第 j 个小区基站间的大尺度衰落系数:

$$\beta_{lkj} = \frac{\alpha}{d_{lkj}^\gamma} \quad (3)$$

其中, d_{lkj} 为第 l 个小区中的第 k 个用户到第 j 个小区基站的距离, γ 为路径损耗系数, α 为:

$$\alpha = \gamma \text{SNR} + 10\gamma \lg R + 10 \lg \sigma_n^2 \quad (4)$$

其中, γSNR 为小区边缘信噪功率比, R 为小区半径, σ_n^2 为噪声功率。

3 导频分配

3.1 上行训练阶段

假设可用的导频序列的个数是 $\tau (\tau \geq K)$, 即导频组 $S = [s_1 \ s_2 \ \dots \ s_\tau]$ 中有 τ 个相互正交的、长度为 τ 的导频序列。即:

$$\begin{aligned} s_k^H s_k &= \tau \\ s_k^H s_i &= 0, \quad i \neq k \end{aligned} \quad (5)$$

在上行链路训练阶段, 系统中所有用户将其对应的导频序列发送到基站。归一化导频发射功率, 第 j 个小区基站接收到的所有导频序列为:

$$Y_j^{\text{pilot}} = \sqrt{P_\rho} \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K h_{lkj} s_{lk}^H + N_j \quad (6)$$

其中, s_{lk} 为第 l 个小区中的第 k 个用户发送的导

频。 N_j 为 $M \times \tau$ 维高斯白噪声矩阵, 矩阵里的元素服从均值为 0、方差为 σ_n^2 的复高斯分布。

本文使用最小均方误差估计 (minimum mean square error estimation, MMSE) 方法进行信道估计, 由参考文献[10]可知信道估计结果为:

$$\begin{aligned} \hat{h}_{jkj} &= \arg \min E(|h_{jkj} - \hat{h}_{jkj}|^2) = \\ & R_{jkj} (\sigma_n^2 I_M + \tau \sum_{l=1}^L R_{lkj})^{-1} \bar{s}^H (\bar{s} \sum_{l=1}^L h_{lkj} + n_j) \end{aligned} \quad (7)$$

其中, $\bar{s} = s^T \otimes I_M$, $n_j = \text{vec}(N_j)$, I_M 为单位矩阵, R_{lkj} 为第 l 个小区中第 k 个用户到第 j 个小区基站的信道协方差矩阵, 为:

$$R_{lkj} = \beta_{lkj} \int p(\theta_{lkj}) a(\theta_{lkj}) a^H(\theta_{lkj}) d\theta_{lkj} \quad (8)$$

其中, $p(\theta_{lkj})$ 为 AOA 的概率密度函数, 服从均匀分布。

当所有用户都使用正交导频时, 即导频污染消失时, 信道估计结果如下所示^[10]:

$$\hat{h}_{jkj}^{\text{nois}} = R_{jkj} (\sigma_n^2 I_M + \tau R_{jkj})^{-1} \bar{s}^H (\bar{s} h_{jkj} + n_j) \quad (9)$$

3.2 基于用户位置和用户分类的导频分配方案

在现实通信场景下, 由于用户周围的散射体的存在, 上行信号传输会受到这些散射体的影响。本文考虑以用户为中心, 由于散射体形成一个半径为 r_s 的环形, 如图 2 所示。

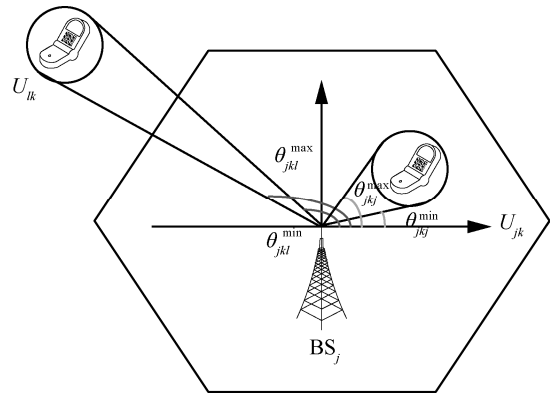


图 2 散射体影响下的信号传输

$\theta_{lkj}^{\text{max}}$ 和 $\theta_{lkj}^{\text{min}}$ 分别为第 l 个小区中的第 k 个用户向第 j 个小区基站的发送信号的到达角的最小

值和最大值, 即式(8)的积分上下限, 分别为:

$$\theta_{lkj}^{\max} = \arctan\left(\frac{U_{lk}^2 - \text{BS}_j^2}{U_{lk}^1 - \text{BS}_j^1}\right) + \arcsin\left(\frac{r_s}{d_{lkj}}\right) \quad (10)$$

$$\theta_{lkj}^{\min} = \arctan\left(\frac{U_{lk}^2 - \text{BS}_j^2}{U_{lk}^1 - \text{BS}_j^1}\right) - \arcsin\left(\frac{r_s}{d_{lkj}}\right) \quad (11)$$

其中, U_{lk}^1 和 U_{lk}^2 分别为第 l 个小区中第 k 个用户的纵横坐标, BS_j^1 和 BS_j^2 分别为第 j 个小区基站的纵横坐标。

到达角为 $[\theta_{lkj}^{\min}, \theta_{lkj}^{\max}]$ 的用户对应信道矢量 h_{lkj} 。参考文献[2]已经证明了当 $L-1$ 个与期望用户使用相同导频的干扰用户到达角范围 $[\theta_{lkj}^{\min}, \theta_{lkj}^{\max}]$, $l=1, \dots, L$, $l \neq j$, 与期望用户到达角范围 $[\theta_{jkj}^{\min}, \theta_{jkj}^{\max}]$ 严格不重叠时, 有:

$$\lim_{M \rightarrow \infty} \hat{h}_{jkj} = \hat{h}_{jkj}^{\text{noin}} \quad (12)$$

本文设计了一个衡量用户干扰程度的目标函数, 如下所示:

$$I_{li} = \frac{\sum_{j=1, j \neq l}^L \sum_{k=1}^K |\cos \theta_{lij}^{\text{mid}} - \cos \theta_{jkj}^{\text{mid}}|}{d_{li}^{\gamma}}, \quad (13)$$

$i=1, \dots, K, l=1, \dots, L$

其中, $\theta_{lij}^{\text{mid}}$ 为用户到基站的中间角度, 为:

$$\theta^{\text{mid}} = (\theta^{\min} + \theta^{\max}) / 2 \quad (14)$$

随后, 提出目标函数的阈值, 如下所示:

$$I = \frac{\sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^K \sum_{j=1, j \neq l}^L \sum_{k=1}^K |\cos \theta_{lij}^{\text{mid}} - \cos \theta_{jkj}^{\text{mid}}|}{KLR^{\gamma}} \quad (15)$$

定义 $I_{li} < I$, $i=1, \dots, K$, $l=1, \dots, L$ 的用户为高干扰用户, $I_{li} \geq I$, $i=1, \dots, K$, $l=1, \dots, L$ 的用户为低干扰用户。下面分步骤介绍本文所提导频分配方案。

步骤 1 根据提前已知的用户位置信息, 得出系统中所有用户的 d_{lij} , $i=1, \dots, K$, $l=1, \dots, L$, $j=1, \dots, L$ 。使用式(10)、式(11)和式(14)得出系统中所有用户的 $\theta_{lij}^{\text{mid}}$, $i=1, \dots, K$, $l=1, \dots, L$,

$j=1, \dots, L$ 。

步骤 2 将步骤 1 中所得结果代入式(13)中计算出系统中所有用户的 I_{li} , $i=1, \dots, K$, $l=1, \dots, L$ 。

步骤 3 将步骤 1 中所得结果代入式(15)计算出系统中所有用户的阈值 I , 并将 I_{li} , $i=1, \dots, K$, $l=1, \dots, L$ 与 I 进行比较, 按照上述定义将系统中所有用户分成高干扰和低干扰两类。

步骤 4 为每个小区的高干扰用户分配正交导频。将每个小区的低干扰用户按照 I_{li} 从大到小进行排序, 并对应分配相同导频。

3.3 上行数据信号传输阶段

在上行数据信号传输阶段, 所有小区的用户将其对应的数据信号发送到基站。第 j 个基站接收到的数据信号如下所示:

$$Y_j^{\text{data}} = \sqrt{P_u} \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K h_{lkj} x_{lk} + \tilde{N}_j \quad (16)$$

其中, P_u 为发送数据信号的功率, x_{lk} 表示第 l 个小区中的第 k 个用户发送的数据信号, 满足 $E\{|x_{lk}|^2\}=1$ 。 $\tilde{N}_j$ 为 $M \times 1$ 维高斯白噪声向量, 向量中的元素服从均值为 0、方差为 σ_n^2 的复高斯分布。

基站接收到数据信号后对期望数据信号进行检测。第 j 个小区中的第 k 个用户发送的数据信号的检测结果可以表示为:

$$\begin{aligned} \tilde{x}_{jk} &= a_{jk} h_{jkj} x_{jk} + \\ & a_{jk} \sum_{i=1, i \neq k}^K h_{jij} x_{ji} + a_{jk} \sum_{l=1, l \neq j}^L \sum_{i=1}^K h_{lij} x_{li} + \\ & 1 / \sqrt{P_u} \cdot a_{jk} \tilde{N}_j \end{aligned} \quad (17)$$

其中, a_{jk} 为第 j 个小区中的第 k 个用户的检测矩阵, 使用 ZF (zero-forcing, 迫零) 检测方法, 检测矩阵为:

$$a_{jk} = (\hat{h}_{jkj}^H \hat{h}_{jkj})^{-1} \hat{h}_{jkj}^H \quad (18)$$

3.4 性能分析

3.4.1 信道估计性能

本文中, 信道估计性能使用归一化均方误差



(normalized mean square error, NMSE) 来表示, 如下所示:

$$\text{NMSE} = 10 \lg \left(\frac{\|\hat{h} - h\|_F^2}{\|h\|_F^2} \right) \quad (19)$$

其中, $\hat{h}$ 为估计信道, h 为实际信道。

对于整个通信系统中的用户, 平均 NMSE 可以表示为:

$$\text{NMSE}_{\text{avg}} = \frac{1}{LK} \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K 10 \lg \left(\frac{\|\hat{h}_{lk} - h_{lk}\|_F^2}{\|h_{lk}\|_F^2} \right) \quad (20)$$

其中, $\hat{h}_{lk}$ 为第 l 个小区中的第 k 个用户的估计信道, h_{lk} 为第 l 个小区中的第 k 个用户的实际期望

信道。

3.4.2 信噪比

将式 (17) 代入式 (16), 可得第 j 个小区中的第 k 个用户发送的数据信号的信号检测结果, 如式 (21) 所示。第 j 个小区中的第 k 个用户的信息干扰噪声比 (signal to interference plus noise ratio, SINR) 如式 (22) 所示。

$$\tilde{x}_{jk} = (\hat{h}_{jk}^H \hat{h}_{jk})^{-1} \hat{h}_{jk}^H h_{jk} x_{jk} + (\hat{h}_{jk}^H \hat{h}_{jk})^{-1} \hat{h}_{jk}^H \sum_{i=1, i \neq k}^K h_{ji} x_{ji} + (\hat{h}_{jk}^H \hat{h}_{jk})^{-1} \hat{h}_{jk}^H \sum_{l=1, l \neq j}^L \sum_{i=1}^K h_{li} x_{li} + 1 / \sqrt{P_u} \cdot (\hat{h}_{jk}^H \hat{h}_{jk})^{-1} \hat{h}_{jk}^H \tilde{N}_j \quad (21)$$

$$\text{SINR}_{jk} = \frac{|(\hat{h}_{jk}^H \hat{h}_{jk})^{-1} \hat{h}_{jk}^H h_{jk}|^2}{\sum_{i=1, i \neq k}^K |(\hat{h}_{jk}^H \hat{h}_{jk})^{-1} \hat{h}_{jk}^H h_{ji}|^2 + \sum_{l=1, l \neq j}^L \sum_{i=1}^K |(\hat{h}_{jk}^H \hat{h}_{jk})^{-1} \hat{h}_{jk}^H h_{li}|^2 + |1 / \sqrt{P_u} \cdot (\hat{h}_{jk}^H \hat{h}_{jk})^{-1} \hat{h}_{jk}^H \tilde{N}_j|^2} \quad (22)$$

第 j 个小区中的第 k 个用户的可达和速率为:

$$R_{jk} = \lg(1 + \text{SINR}_{jk}) \quad (23)$$

系统平均可达和速率为:

$$R_{\text{avg}} = \frac{1}{LK} \sum_{j=1}^L \sum_{k=1}^K \lg(1 + \text{SINR}_{jk}) \quad (24)$$

4 仿真结果

仿真参数见表 1。仿真使用由 L 个多用户小区组成的大规模 MIMO 通信系统, 每个小区中均包含 K 个单天线用户以及配置了 M 根天线、位于小区中心的基站。用户在距离基站 d_s 的小区范围内随机生成。本文性能仿真包括系统中所有小区的性能, 而非只考虑中心目标小区的性能。

如图 3 所示, 本文对比了所提导频分配方案与传统导频分配方案、随机分配方案在无导频污染情况时的信道估计平均归一化均方误差。传统分配方案使用贪婪搜索算法进行导频分配。从图 3 中可以看到, 当基站天线数增长时, 信道估计平均 NMSE 会逐渐减小。且当天线数较小时, 增长速率较快; 当天线数较大时, 增长速率变慢。

表 1 仿真参数

参数	参数
小区数 L / 个	7
每个小区中的用户数 K / 个	10
天线数 M / 根	50
小区半径 R / m	1 000
用户生成范围 d_s / m	100~1 000
散射体半径 r_s / m	100
小区边缘信噪功率比 r_{SNR} / dB	20
路径损耗系数 γ	2.5
噪声的方差 σ^2 / dBm	10^{-6}
信号波长 λ / m	0.1
天线间距 D / m	0.05
散射路径数 P / 条	50
发送导频功率 P_p / dB	20
发送数据功率 P_u / dB	10

这是由于当天线数量 M 比较小时, 小区内部干扰及噪声等非导频污染是降低系统性能的主要因素; 而随着天线数量 M 逐渐增大, 非导频污染在干扰中占的比重逐渐减小, 导频污染问题变成影响系统性能的瓶颈问题。在基站天线数量为 200 时, 所提导频分配方案的平均归一化均方误差与传统导频

分配相比,降低了近 8 dB,与随机分配方案相比降低了近 15 dB,信道估计的精确程度得到了提升。

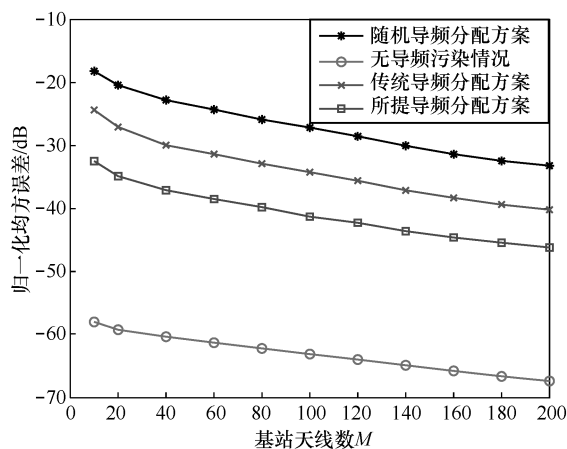


图3 信道估计平均 NMSE 随基站天线数 M 的变化

图 4 给出了不同天线数情况下的系统上行平均可达和速率。从图 4 中可以看出,在天线数较少的情况下,随机分配及所提导频分配方案的可达和速率接近无导频污染情况时的可达和速率。这是因为在基站天线数较少的情况下,非导频污染(即使用不同导频用户的干扰和噪声干扰等)占据主导地位。随着基站天线数的增加,非相关干扰逐渐减小,导频污染在干扰中所占的权重逐渐增加。可以看到,当基站天线数目增多时,小区可达和速率的增速变得缓慢。这时,所提导频分配方案的小区上行可达和速率优于传统导频分配方案和随机方案。

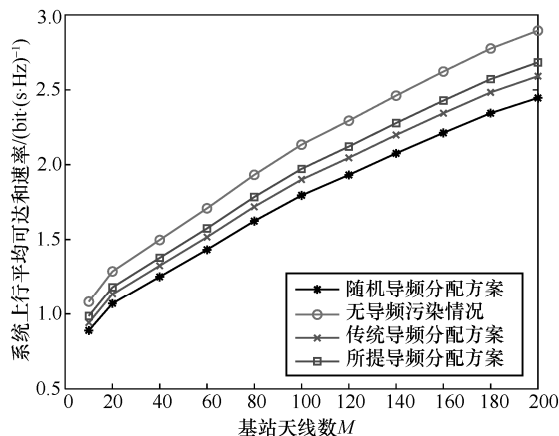


图4 小区可达和速率随基站天线数 M 的变化

图 5 比较了在基站天线数为 128 时,3 种导频分配方案和无导频污染情况的上行 SINR 的累积概率分布函数。从图 5 中可以看出,本文所提导频分配方案的上行 SINR 与随机分配方案及传统方案相比均有提高。

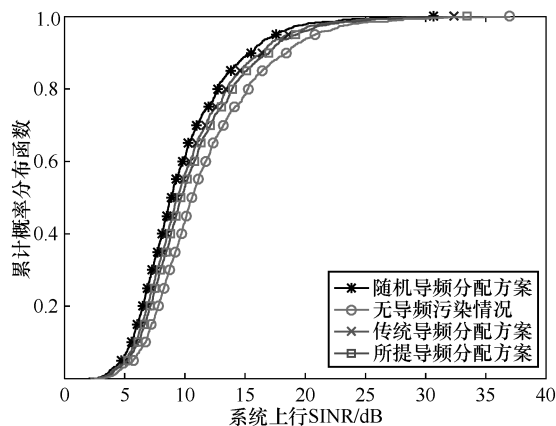


图5 系统上行 SINR 的累积概率分布函数

图 6 对比了 3 种导频分配方案及无导频污染情况的性能最差用户的信道估计归一化均方误差。从图 6 中可以看出,本文所提导频分配方案的性能最差用户的信道估计平均归一化均方误差明显低于传统方案及随机分配方案。这是由于本文所提导频分配方案通过设定目标函数及相应阈值将用户分为高干扰和低干扰用户,低干扰用户复用导频,高干扰用户分配正交导频,因此不会存在性能很差的用戶,提高了用户的公平性。传统方案的性能最差用户的信道估计平均归一化均方误差甚至低于随机分配方案,这是因为传统分配方案使用贪婪算法,而贪婪算法很容易得出局部最优解,导致优先分配导频的用户组性能最好,但是最后分配导频的用户组的性能非常差。本文所提导频分配方案不仅考虑了系统整体性能,也考虑了用户的公平性,降低了性能最差用户的信道估计 NMSE。

图 7 比较了在基站天线数为 128 时,3 种导频分配方案及无导频污染情况时的上行最小 SINR 的累积概率分布函数。由图 7 可知,所提导频分

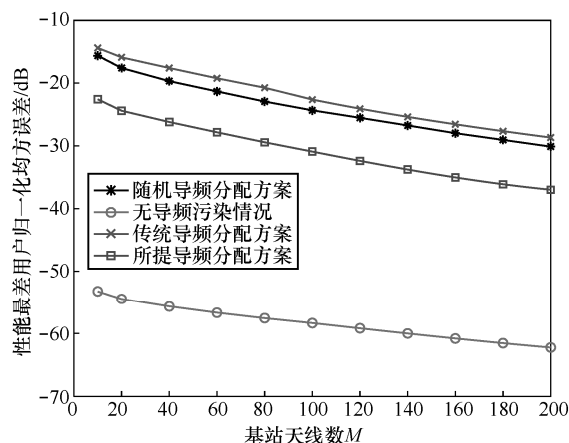


图6 性能最差用户的信道估计归一化均方误差随基站天线数 M 的变化

配方案的最差用户上行 SINR 高于传统方案及随机分配方案。因此可以得出与图 6 类似的结论, 即所提导频分配方案不仅考虑了系统整体性能, 也考虑到了用户间的公平性, 提高了最差用户的性能。

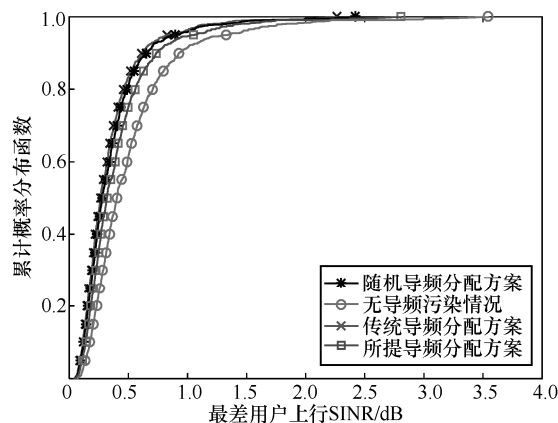


图7 最差用户上行 SINR 的累积概率分布函数

但是所提算法在提高系统性能的同时也付出了一些代价, 即需要为算法筛选出的高干扰用户分配正交导频来抑制导频污染, 也就是需要额外的正交导频。通过仿真得出, 天线数为 128 时系统所需的额外正交导频数为 5, 此时系统性能获得了明显的提升。

5 结束语

本文提出了一种基于用户位置和用户分类的

导频分配方案。根据不同小区用户到基站的路径衰落和 AOA 不同的特点, 设计衡量用户干扰程度的目标函数及合理阈值, 将通信系统内所有用户分为两类, 并根据所提算法分别对两类用户进行导频分配。与以往导频分配方案只考虑目标小区不同, 该方案考虑通信系统中所有小区的性能。从仿真结果可以得出, 本文提出的导频分配方案有效降低了信道估计 NMSE, 提高了上行可达和速率以及信干噪比, 同时也考虑到性能较差用户, 提高了较差用户的性能, 提高了用户间的公平性。

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] JOSE J, ASHIKHMIN A, MARZETTA T L, et al. Pilot contamination problem in multi-cell TDD systems[C]//IEEE International Conference on Symposium on Information Theory, June 28-July 3, 2009, Seoul, South Korea. Piscataway: IEEE Press, 2009: 2184-2188.
- [3] YAO T Q, LI Y. Pilot contamination reduction by shifted frame structure in massive MIMO TDD wireless system[J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2015, 20(3): 221-228.
- [4] ALKHALED M, ALSUSA E, HAMDI K A. Adaptive pilot allocation algorithm for pilot contamination mitigation in TDD massive MIMO systems[C]//Wireless Communications and Networking Conference, March 19-22, 2017, San Francisco, CA, USA. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [5] ECHIGO H, OHTSUKI T, JIANG W, et al. Fair pilot assignment based on AOA and pathloss with location information in massive MIMO[C]//GLOBECOM 2017-2017 IEEE Global Communications Conference, Dec 4-8, 2017, Singapore. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [6] 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.
- [7] AKBAR N, YAN S, YANG N, et al. Mitigating pilot contamination through location-aware pilot assignment in massive MIMO networks[C]//GLOBECOM Workshops, Dec 4-8, 2016, Washington, DC, USA. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-6.
- [8] WANG Z, QIAN C, DAI L, et al. Location-based channel esti-

- mation and pilot assignment for massive MIMO systems[C]//The Workshop on ICC, June 8-12, 2015, London, UK. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1264-1268.
- [9] JOSE J, ASHIKHMIN A, WHITING P, et al. Scheduling and pre-conditioning in multi-user MIMO TDD systems[J]. Mathematics, 2008: 4100-4105.
- [10] 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, 2013, 31(2): 264-273.
- [11] TSAI J A, BUEHRER R M, WOERNER B D. The impact of AOA energy distribution on the spatial fading correlation of linear antenna array[C]//2002 Vehicular Technology Conference, May 6-9, 2002, Birmingham, AL, USA. Piscataway: IEEE Press, 2002: 933-937.
- [12] MARZETTA T L. Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(11): 3590-3600.
- [13] 方昕, 张建锋, 曹海燕, 等. 大规模 MIMO 系统中动态导频分配[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(8): 1901-1907.
- FANG X, ZHANG J F, CAO H Y, et al. Dynamic pilot allocation in massive MIMO system[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2016, 38(8): 1901-1907.
- [14] 王庆扬, 谢沛荣, 熊尚坤, 等. 5G 关键技术与标准综述[J]. 电信科学, 2017, 33(11): 112-122.
- WANG Q Y, XIE P R, XIONG S K, et al. Key technology and standardization progress for 5G[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(11): 112-122.
- [15] 张平, 陶运铮, 张治. 5G 若干关键技术评述[J]. 通信学报, 2016, 37(7): 15-29.
- ZHANG P, TAO Y Z, ZHANG Z. Survey of several key technologies for 5G[J]. Journal on Communications, 2016, 37(7): 15-29.
- [16] 赵思聪, 黄磊, 申滨, 等. LTE-U: 未来移动通信系统发展的助推剂[J]. 电信科学, 2016, 32(4): 114-125.
- ZHAO S C, HUANG L, SHEN B, et al. LTE-U: the propellant for development of future mobile communication system[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(4): 114-125.
- [17] 王祖阳, 杨传祥, 张进, 等. 5G 无线网技术特征及部署应对策略分析[J]. 电信科学, 2018, 34(Z1): 9-16.
- WANG Z Y, YANG C X, ZHANG J, et al. Analysis on technology characteristics and deployment strategies of 5G wireless

network[J]. Telecommunications Science, 2018, 34(Z1): 9-16.

- [18] 陈山枝. 发展 5G 的分析与建议[J]. 电信科学, 2016, 32(7): 1-10.

CHEN S Z. Analysis and suggestion of future 5G directions[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(7): 1-10.

[作者简介]



曹海燕 (1975-), 女, 博士, 杭州电子科技大学副教授, 主要研究方向为无线通信系统的信道编码、信号检测、LTE 物理层标准等。



马子昌 (1995-), 男, 杭州电子科技大学硕士生, 主要研究方向为无线通信系统、大规模 MIMO 系统中的导频分配技术。



杨晓慧 (1996-), 女, 杭州电子科技大学硕士生, 主要研究方向为无线通信系统、毫米波大规模 MIMO 系统中的预编码技术。

胡文娟 (1994-), 女, 杭州电子科技大学硕士生, 主要研究方向为无线通信系统、大规模 MIMO 系统中的能效优化技术。

许方敏 (1980-), 女, 杭州电子科技大学讲师, 主要研究方向为先进移动通信系统及其关键技术, 包括干扰抑制策略、无线资源管理策略。

方昕 (1975-), 女, 杭州电子科技大学副教授, 主要研究方向为 4G/5G 移动通信物理层算法。