



TDD 模式下无小区大规模 MIMO 系统的导频干扰抑制

王越, 许方敏, 曹海燕

(杭州电子科技大学通信工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 为了缓解无小区大规模 MIMO 系统的导频干扰、提高系统性能, 提出了一种综合导频复用、AP 选择和功率控制的导频干扰抑制策略。首先, 提出了基于用户距离排序的导频分配, 合理地避免了两个距离较近的用户复用导频, 以减少导频干扰的影响。然后, 通过分析系统吞吐量表达式中的影响因子确定 AP 选择的标准, 只选择对用户的宏分集增益有主要影响的 AP 作为用户的服务 AP。最后, 提出了一种改进的最大最小功率控制算法, 提高系统平均吞吐量。仿真结果显示, 提出的导频干扰抑制策略有效地减轻了导频干扰带来的性能损失。

关键词: 无小区大规模多输入多输出; 导频复用; 导频污染; 接入点选择; 功率控制

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022071

Pilot interference mitigation for TDD cell-free massive MIMO systems

WANG Yue, XU Fangmin, CAO Haiyan

School of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China

Abstract: To alleviate the pilot interference for cell-free massive multi-input multi-output (MIMO) system and improve system's performance, a comprehensive approach including the pilot reuse, access point (AP) selection and power allocation was proposed. Firstly, to alleviate the pilot contamination, the pilot assignment based on the order of user distance was proposed, in which the pilot sharing was only allowed when the distance between two users is large enough to reduce the impact of pilot reuse. Then, by AP selection, only the APs which have main impact on the macro diversity gain were selected as the user's serving APs. Finally, a modified max-min power control algorithm was proposed to improve the system's average throughput. Simulation results show that the pilot interference mitigation strategy proposed improves the performance of the system significantly.

Key words: cell-free massive MIMO, pilot reuse, pilot contamination, AP selection, power control

0 引言

无小区大规模多输入多输出 (multi-input mul-

ti-output, MIMO) 采用无小区式的网络架构^[1-4], 将大量安装一根或多根天线的接入点 (access point, AP) 分布在一个较大的区域, 通过回程链路将数

收稿日期: 2022-01-10; 修回日期: 2022-04-08

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目 (No.LY20F010009, No.LY22F010012)

Foundation Items: The Natural Science Foundation of Zhejiang Province (No.LY20F010009, No.LY22F010012)



据传输到中央处理单元 (central processing unit, CPU), 并使用相同的时频资源为多用户提供服务。该系统引入了“以用户为中心”的思想, 其中的 AP 端天线数量通常远远大于用户数量。这种技术减小了 AP 与用户之间的平均距离、大幅降低了路径损耗, 并利用大量 AP 带来的“有利传播”和信道硬化, 减少了多用户干扰, 同时, 还能获得巨大的空间宏分集增益, 从而使全区域均匀覆盖并大幅提升用户的服务质量^[1-3]。虽然在 5G 以及之前的网络架构也有“去蜂窝”式的发展倾向, 出现了类似于无小区大规模 MIMO 的一些概念^[4], 如分布式 MIMO、广义 MIMO、协作多点通信系统, 但这些系统没有考虑 AP 端天线数量远远大于用户数量的情况, 也不能很好地利用大样本性质进行信息理论分析。由于这些优势, 无小区大规模 MIMO 被认为是未来移动通信系统中重要的研究方向之一。

在时分双工 (time division dual, TDD) 无小区大规模 MIMO 系统中, AP 利用用户发送的上行导频训练序列进行信道估计, 从而获得信道状态信息; 系统利用上下行链路的互易性得到下行信道状态信息。然而, 由于正交导频数量的限制, 用户间需要复用导频。导频的复用导致了 AP 不能准确地获得信道状态信息, 使得上行和下行链路将受到严重的影响, 这种不利影响称为导频污染^[2]。导频污染问题是制约 TDD 无小区大规模 MIMO 系统性能的瓶颈^[3]。合理的导频分配可以有效地减轻导频污染带来的性能损失。但是, 无小区大规模 MIMO 系统没有小区和小区边缘的概念, 在信息理论分析、信号处理技术等方面与传统的大规模 MIMO 有很大区别, 因此, 基于传统大规模 MIMO 信息理论分析的导频分配方法不再适用于无小区大规模 MIMO 系统。另一方面, 无小区大规模 MIMO 系统现有导频分配策略虽然可以减轻导频污染, 但复杂度高, 除了与用户数量以及导频数量有关以外, 甚至还可能依赖于 AP

数量或 AP 数量的 n 次方, 对于具有庞大 AP 数量的无小区大规模 MIMO 系统来说, 实现非常困难。因此, 针对传统导频分配不能直接应用于无小区式网络架构, 而现有导频分配复杂度高的缺点, 研究适用于 TDD 无小区大规模 MIMO 系统的低复杂度、高效率的导频分配策略, 具有十分重要的理论研究和实际应用价值。

现有研究表明, 如何合理地给用户分配导频是解决导频污染问题的重要手段之一。常见的导频分配有随机分配和贪婪分配^[5]。随机导频分配最简单, 但是会产生严重的导频污染。贪婪导频分配是在随机导频分配的基础上, 采用迭代的方法更新最低速率用户的导频, 贪婪导频分配会提高最低速率用户的性能, 并不能提高所有用户的速率, 而且也只是略微提高最低速率。文献[6]提出一种以每个用户位置为圆心以一定的半径画圆, 在圆形区域内进行导频分配并结合贪婪导频算法, 半径的选取会影响系统的性能, 当半径过大时并不能保证圈里的用户彼此使用正交导频, 当半径选取过小时算法的迭代次数会大大增加。文献[7]提出了一种结构化的导频分配, 目的是使用同一导频的用户距离最大化。

另外, AP 选择和功率分配也可以有效地缓解导频污染带来的性能损失。比如在无小区大规模 MIMO 系统的 AP 选择方面, 文献[5]基于给用户随机选择 AP 的方法, 这种 AP 选择的方法最简单但是不能真正地反映系统的性能。文献[8]根据接收信号功率的 AP 选择算法和根据大尺度衰落系数的 AP 选择算法最大化系统吞吐量。文献[9]提出基于最大 SINR 的 AP 选择算法选择服务质量较好的 AP。文献[10]提出基于传输功率最小化的 AP 选择算法同时讨论大尺度衰落对其的影响。在功率控制方面也有了一定的研究成果。为了避免某些用户的速率太低, 可以通过对用户或者 AP 的发射功率进行控制, 以减小干扰并提高系统的整体性能。文献[5]提出最大最小功率控制算法, 以

最大化最小用户的速率来整体提高系统的性能。文献[11]从提升用户的服务质量出发,提出加权最大最小功率控制来满足不同用户的服务需求。文献[12]针对用户导频的功率进行控制,采用泰勒展开对导频的功率进行分配,可以提高系统性能但是计算的复杂度过高。

1 系统模型

本文考虑 TDD 无小区大规模 MIMO 系统,假设系统由 M 个 AP 和 K 个用户构成 ($M \gg K$),每个 AP 和用户都只配置一根天线,所有的 AP 和用户都随机分布在一个广泛的区域且每个 AP 都与 CPU 相连接,所有的 AP 使用同一时频资源为所有的用户提供服务,第 m 个 AP 到第 k 个用户的信道定义为:

$$\mathbf{g}_{mk} = \beta_{mk}^{\frac{1}{2}} \mathbf{h}_{mk} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{h}_{mk}$ ($m=1,2,\dots,M, k=1,2,\dots,K$) 代表第 m 个接入点和第 k 个用户之间的小尺度衰落系数, β_{mk} 代表相应的大尺度衰落系数。假设小尺度衰落系数遵循独立同分布随机变量,并且 $\mathbf{h}_{mk} \sim \text{CN}(0,1)$ 。

1.1 上行训练模型

对于无小区大规模 MIMO 系统,上行链路过程包括两个阶段。在第一阶段,每个用户同时向所有 AP 发送其导频序列进行信道估计,其中, τ 是上行链路训练阶段的长度, T 是相干间隔的长度 ($\tau < T$)。正交导频的数量取决于上行链路训练阶段的长度 τ , 长度为 τ 的序列最多存在 τ 个两两相互正交的导频,即可用的正交导频个数,而这个长度远远小于用户数 K ($K > \tau$),因此,用户之间需要复用导频。然而,在系统中进行导频复用时会出现导频干扰,这将降低系统的性能。假设,第 k 个用户的导频表示为 $\sqrt{\tau} \boldsymbol{\varphi}_k \in C^{\tau \times 1}$, 并且满足 $\|\boldsymbol{\varphi}_k\|^2 = 1$ 。本文描述并分析了上行链路的传输模型并建立了数学表达式。在上行链路训练阶段,第 m 个接入点接收的导频信号可以描述为:

$$\mathbf{y}_{p,m} = \sqrt{\tau \rho_p} \sum_{k=1}^K \mathbf{g}_{mk} \boldsymbol{\varphi}_k + \mathbf{w}_{p,m} \quad (2)$$

其中, ρ_p 是归一化导频信号的信噪比, $\mathbf{w}_{p,m}$ 是第 m 个 AP 的噪声向量, $\mathbf{w}_{p,m}$ 是独立同分布的随机变量且满足 $\mathbf{w}_{p,m} \sim \text{CN}(0,1)$ 。

根据式 (2) 可以计算第 m 个 AP 对 $\mathbf{g}_{mk}$ 的信道估计。首先,将式 (2) 与导频向量进行内积运算得到:

$$\hat{\mathbf{y}}_{p,mk} = \boldsymbol{\varphi}_k^H \mathbf{y}_{p,m} \quad (3)$$

然后采用最小均方误差估计来提高信道估计的精确度,得到信道估计为:

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

其中:

$$c_{mk} = \frac{\sqrt{\tau \rho_p} \beta_{mk}}{\tau \rho_p \sum_{k'=1}^K \beta_{mk'} |\boldsymbol{\varphi}_k^H \boldsymbol{\varphi}_{k'}|^2 + 1} \quad (5)$$

其中,大尺度衰落系数 β_{mk} 根据第 m 个 AP 和第 k 个用户之间的距离来计算^[5],与小尺度衰落相比,它的变化非常缓慢,因此可以被准确估计,从而可以看成是已知的; $\hat{\mathbf{g}}_{mk}$ 是服从高斯分布的,即:

$$\hat{\mathbf{g}}_{mk} \sim \text{CN}(0, \gamma_{mk}) \quad (6)$$

其中:

$$\gamma_{mk} = \mathbb{E}\{|\hat{\mathbf{g}}_{mk}|^2\} = \sqrt{\tau \rho_p} \beta_{mk} c_{mk} \quad (7)$$

1.2 上行数据传输模型

在无小区大规模 MIMO 系统的上行数据传输过程中,第 m 个 AP 接收到信号为所有用户发送的数据,则表示为:

$$\mathbf{y}_{u,m} = \sqrt{\rho_u} \sum_{k=1}^K \mathbf{g}_{mk} \sqrt{\eta_k} \mathbf{q}_k + \mathbf{w}_{u,m} \quad (8)$$

其中, $\mathbf{q}_k$ 代表来自第 k 个用户发送的信号, $\mathbb{E}\{|\mathbf{q}_k|^2\} = 1$, η_k 代表功率控制系数, $\mathbf{w}_{u,m} \sim$



CN(0,1) 是加性高斯白噪声, ρ_u 是归一化的上行链路信噪比, 它可以通过上行链路数据的发射功率除以噪声功率来计算。

为了检测第 k 个用户发送的信息, 第 m 个 AP 接收的信号与信道估计的共轭相乘得到 $\hat{g}_{mk}^* y_{u,m}$ 通过网络向 CPU 发送, 则第 k 个用户在 CPU

处的接收信号为:

$$r_{u,k} = \sum_{m=1}^M \hat{g}_{mk}^* y_{u,m} = \sum_{k'=1}^K \sum_{m=1}^M \sqrt{\rho_u \eta_{k'}} \hat{g}_{mk}^* g_{mk'} q_{k'} + \sum_{m=1}^M \hat{g}_{mk}^* w_{u,m} \quad (9)$$

得到上行链路的 SINR 表达式为:

$$\text{SINR}_k^u = \frac{\rho_u \eta_k \left(\sum_{m=1}^M \gamma_{mk} \right)^2}{\rho_u \sum_{k' \neq k}^K \eta_{k'} \left(\sum_{m=1}^M \gamma_{mk'} \frac{\beta_{mk'}}{\beta_{mk}} \right)^2 |\phi_k^H \phi_{k'}|^2 + \rho_u \sum_{k'=1}^K \eta_{k'} \sum_{m=1}^M \gamma_{mk} \beta_{mk'} + \sum_{m=1}^M \gamma_{mk}} \quad (10)$$

根据式 (10) 并结合本文的 AP 选择获得上行可达速率的表达式为:

$$R_{u,k}^f = \text{lb} \left(1 + \frac{\rho_u \eta_k \left(\sum_{m=A_k(1)}^{A_k} \gamma_{mk} \right)^2}{\rho_u \sum_{k' \neq k}^K \eta_{k'} \left(\sum_{m=A_k(1)}^{A_k} \gamma_{mk'} \frac{\beta_{mk'}}{\beta_{mk}} \right)^2 |\phi_k^H \phi_{k'}|^2 + \rho_u \sum_{k'=1}^K \eta_{k'} \sum_{m=A_k(1)}^{A_k} \gamma_{mk} \beta_{mk'} + \sum_{m=A_k(1)}^{A_k} \gamma_{mk}} \right) \quad (11)$$

其中, A_k 代表第 k 个用户选择的 AP 子集合。

2 导频干扰抑制策略

本节主要研究结合 AP 选择的导频分配策略和功率控制策略, 以减轻导频干扰带来的系统性能损失。

2.1 导频分配及 AP 选择

CPU 先获取每个用户的坐标, 在为用户分配导频序列的同时避免造成严重的导频污染, 那么使用相同导频序列用户的距离需要尽可能大。以系统中心位置为参考点, 得到所有用户到参考点的距离并保存到向量 $\mathbf{d}_k$ 中, 然后将 $\mathbf{d}_k$ 按照升序排列得到新的向量 $\bar{\mathbf{d}}_k$ 并记录排序后用户的编号到 $\mathbf{U}_{\text{num}}$ 向量中。前面已知正交导频的个数为 τ , 先给 $\mathbf{U}_{\text{num}}$ 中前 τ 个用户分配正交导频序列, 同时将这些用户使用的导频序列编号记录保存到 $\mathbf{P}_{\text{num}}$ 中。接下来进行导频复用, 以步长为 τ , 找出 $\mathbf{U}_{\text{num}}$ 中间隔为 τ 的用户编号, 给他们分配相同的导频。这种导频分配有一个优点, 能有效避免随机导频

分配中某些导频出现次数较多, 而有的导频出现次数较少, 从而解决导频复用的公平性问题。导频分配示意图如图 1 所示, 图 1 中举例当 $K=8$ 、 $\tau=4$ 时的导频分配, 其中形状相同的图形表示分配到相同导频的用户, 图形旁边的数字代表用户到中心点的距离的排序。例如, 图 1 中两个实心圆用户复用导频。

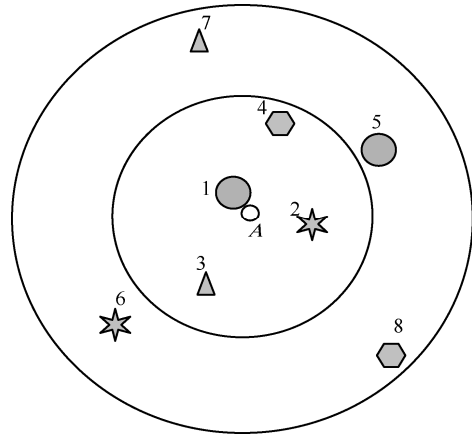


图 1 导频分配示意图

另一方面, 对于无小区大规模 MIMO 系统, 并不是所有的 AP 都能起到良好的服务作用, 也

就是说,有的 AP 几乎不起作用而且消耗能量,因此有必要进行 AP 选择。由式 (10) 分母中的第一项和第二项可以看出,第 k 个用户的上行 SINR 与使用相同导频用户的大尺度衰落系数密切相关。与文献[8]类似,本文基于大尺度衰落系数,对第 k 个用户选择出满足式 (12) 的 AP:

$$\sum_{m=1}^{A_k} \frac{\bar{\beta}_{mk}}{\sum_{m=1}^M \beta_{mk}} \geq \zeta\% \quad (12)$$

其中, $\{\bar{\beta}_{1k}, \dots, \bar{\beta}_{Mk}\}$ 是 $\{\beta_{1k}, \dots, \beta_{Mk}\}$ 经过降序排列的集合,第 k 个用户的服务质量主要与 A_k 相关联, ζ 是一个门限值,表示所需信号的总接收功率中至少有 ζ 是在第 k 个用户处贡献的。通过给用户进行 AP 选择,将 A_k 对应的结果记录至二进制矩阵 $\mathbf{B}_{M \times K}$ 中, $\mathbf{B}_{M \times K}$ 的每一列可以得到每个用户选择的 AP, $\mathbf{B}$ 中值为 1 表示选择该 AP, 0 则表示不选择该 AP。并根据 AP 的选择保留所选信道,将所选的 AP 替换到计算的表达式中。具体的步骤见算法 1。

算法 1 基于用户距离排序的导频分配和 AP 选择联合优化

根据用户的坐标和中心点坐标 A , 计算所有用户到 A 的距离并保存到 $\mathbf{d}_k$, 将 $\mathbf{d}_k$ 经升序排序得到 $\overline{\mathbf{d}_k}$, 并得到 $\mathbf{U}_{\text{num}}$ 。

先给 $\mathbf{U}_{\text{num}}$ 中前 τ 个用户分配正交导频, 并记录每个用户使用的导频编号至 $\mathbf{P}_{\text{num}}$ 。

while ($N > \tau \ \& \ N \leq K$) do

根据步骤 2 记录的导频编号, 给 $\mathbf{U}_{\text{num}}$ 中间隔

为 τ 的用户分配相同的导频。并继续记录使用的导频编号至 $\mathbf{P}_{\text{num}}$ 。

end while

for $k=1$ to K do

设置一个阈值 ζ , 根据式 (12) 进行 AP 选择, 得到第 k 个用户的有效服务子集 $\mathbf{A}_k$ 。

将选择的结果记录至 $\mathbf{B}_{M \times K}$ 中。

end for

返回经过导频分配后的 $\mathbf{P}_{\text{num}}$ 和 AP 选择后的

$\mathbf{B}_{M \times K}$ 。

2.2 改进的最大最小功率控制

最大最小功率控制算法采用最大化最小速率的思想, 能够提高系统整体的性能。其缺点是需要不断地在所有用户中寻找最小速率的用户, 而事实上有些高速率用户只需要采用等功率之类的低复杂度功率分配就能达到较高的信干噪比。为此, 本文提出一种改进的最大最小功率控制方案, 只对低速率用户组采用最大最小功率控制, 高速率组采用平均功率控制。具体地, 首先, 将所有的用户分为两组: 速率较低的一部分用户记作低速率用户组 (LK); 剩下的用户速率较高, 记作高速率用户组 (HK)。然后, 针对不同的用户组使用不同的功率控制算法。对低速率用户组在最大发射功率的约束下, 使用最大最小功率控制, 以最大化低速率用户组的最小速率, 求解得到一组最优的功率控制系数。由于对用户进行了分组, 因此, 不会影响其他用户的速率。在总功率一定的情况下, 对高速率用户组采用平均功率控制, 以减少功率控制的复杂度。上述的问题可以表示为: 总的功率控制等于低速率用户组采用最大最小功率控制和高速率用户组采用平均功率控制。

对低速率用户组进行的功率控制如下:

$$\begin{aligned} \max_{\{\eta_{lk}\}} \min_{k=LK(1), \dots, LK(k)} R_{u,k}^{ef} \\ \text{s.t. } 0 \leq \eta_{lk} \leq 1, k = LK(1), \dots, LK(k) \end{aligned} \quad (13)$$

式 (13) 可以等价:

$$\begin{aligned} \max_{\{\eta_{lk}\}, r} r \\ \text{s.t. } r \leq R_{u,k}^{ef}, k = LK(1), \dots, LK(k) \\ 0 \leq \eta_{lk} \leq 1, k = LK(1), \dots, LK(k) \end{aligned} \quad (14)$$

其中, 式 (14) 涉及的所有不等式都是线性的, 因此, 式 (14) 是准线性的。可以利用二分法求



解一系列线性可行性问题来解决式 (14) 问题。设包含最优解 p 的初始区间为 $[d, u]$ 。从区间 $[d, u]$ 开始, 在区间中点 $\text{mid}=(d+u)/2$ 处求解可行性问题, 判断最优解在上半部还是在下半部并更新区间, 产生一个包含最优解的新区间, 该新区间每次长度缩小为原来的一半, 重复进行直到区间长度小于误差范围。

高速率用户组使用平均功率控制如下。

满足 $P_{\text{总}}$ 一定的条件下, 根据 $P_{\text{总}} = P_{\text{lk}} + P_{\text{hk}}$,

上述对低速率用户组进行最大最小功率控制确定了 P_{lk} , 从而得到高速率用户组中每个用户的功率分配为: P_{hk} / 高速率用户组用户个数。

具体的步骤见算法 2。

算法 2 改进的最大最小功率控制算法

对于低速率用户组初始化: 设置一个区间下界 $d \leq p$, 区间上界 $u \geq p$, 误差允许范围 e

repeat

 令 $\text{mid}=(d+u)/2$

 求解式 (14) 的可行性问题

 if 式 (14) 可行, then $u=\text{mid}$

 else $d=\text{mid}$

 end if

until $u-d \leq e$

返回一组低速率用户组的最佳功率控制系数 $\{\eta_{\text{lk}}^*\}$

高速率用户组采用平均功率控制, 满足 $P_{\text{总}} = P_{\text{lk}} + P_{\text{hk}}$, 在 $P_{\text{总}}$ 一定的条件下, 得到高速率用户组控制系数 $\{\eta_{\text{hk}}^*\}$

3 仿真与分析

本节主要对提出的算法进行性能仿真与分析。

3.1 仿真参数设置

模拟一个包含 M 个 AP 和 K 个用户的正方形区域, 其中, 区域面积为 1 km^2 , AP 和用户的位置在区域内随机生成。若无特殊说明, 默认设置 $M=100$ 、 $K=40$ 、 $\tau=20$ 。仿真中的大尺度

衰落模型采用三段式模型, 与文献[5]相同, 噪声方差为 $\sigma_{\omega}^2 = 290 \times \kappa \times B \times \eta f$, 其中, κ 、 B 和 ηf 分别为玻尔兹曼常数、带宽和噪声系数。系统仿真参数见表 1。

表 1 系统仿真参数

参数	取值
载波频率	1.9 GHz
带宽	20 MHz
AP 天线高度	15 m
用户天线高度	1.65 m
噪声系数	9 dB
ρ_p	100 mW
ρ_u	100 mW
d_1	50 m
d_0	10 m
ζ	0.98
τ	20
T	200
ζ	0.98

3.2 评价指标

考虑信道估计开销, 定义上行链路用户吞吐量为:

$$S_{u,k}^{cf} = B \frac{1-\tau/T}{2} R_{u,k}^{cf} \quad (15)$$

为了进一步分析每种算法的性能, 定义 95% 用户的吞吐量为用户中排名在前 95% 中吞吐量的最小值, 同理定义 50% 用户的吞吐量为用户中排名在前 50% 中吞吐量的最小值。

定义系统平均吞吐量为:

$$\overline{S_{u,k}^{cf}} = \frac{\left(\sum_{k=1}^K S_{u,k}^{cf} \right)}{K} \quad (16)$$

3.3 性能分析

在这一节中, 首先对本文提出结合 AP 选择的导频分配算法进行性能分析与比较。

每用户上行链路吞吐量的累积分布如图 2 所示, 本文提出的算法性能优于随机导频分配、位置结合贪婪导频分配和贪婪导频分配。本文算法在 95% 用户的吞吐量方面达到了正交分配方案的 93%, 原因是算法有效地避免了严重的导频污染, 以及避免了相同导频用户使用相同 AP 对系统性能的影响。

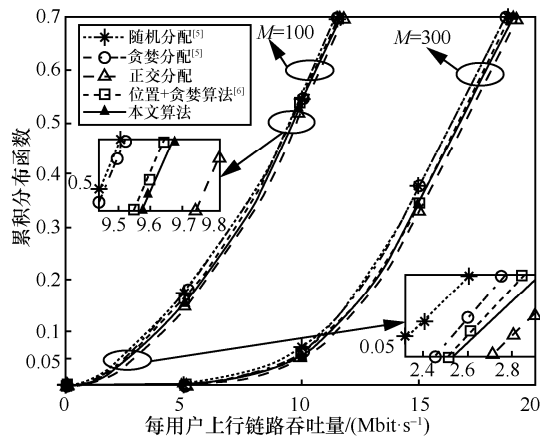


图2 每用户上行链路吞吐量的累积分布

不同用户数对应上行链路平均吞吐量如图 3 所示, 平均吞吐量随着 K 的增加而减少。然而, 与其他 3 个方案相比, 本文方案能够有效地保证无小区大规模 MIMO 系统的性能, 因为本文的方案有效地缓解了严重的导频污染问题。

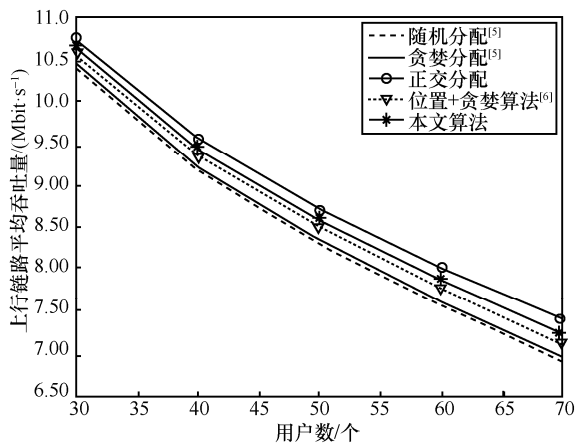


图3 同用户数对应上行链路的平均吞吐量

不同功率控制下上行链路吞吐量的累积分布如图 4 所示。可以看出, 在 95% 用户吞吐量至 50%

用户吞吐量之间, 改进的最大最小功率控制与最大最小功率控制相差不是很大; 对于累积分布函数的值在 0.5~1, 改进的最大最小功率控制算法要优于最大最小功率控制算法。就 95% 用户的吞吐量来看, 改进的最大最小功率控制达到最大最小功率控制的 93%。

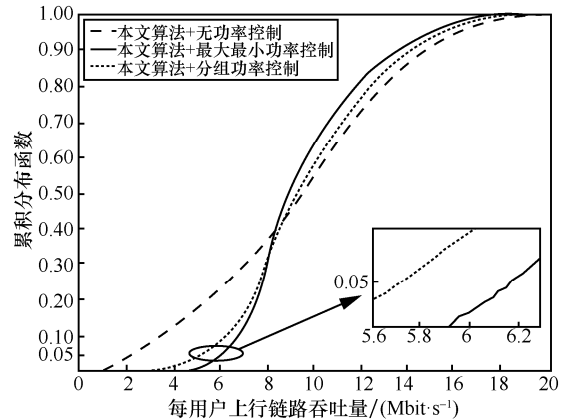


图4 不同功率控制下上行链路吞吐量的累积分布

不同功率控制下上行链路平均吞吐量如图 5 所示, 从平均吞吐量来看, 改进的最大最小功率控制相比于最大最小功率控制和无功率控制分别提升了 2% 和 3.5%。

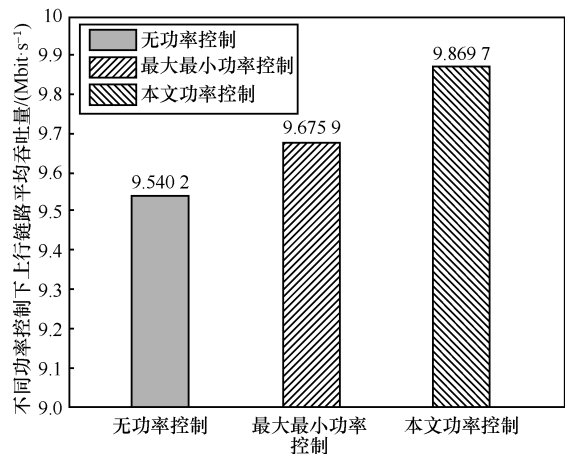


图5 不同功率控制下上行链路平均吞吐量

4 结束语

本文为无小区大规模 MIMO 系统提出了一种结合 AP 选择的导频分配策略。首先, 将正交导



频序列分配给距离较近的用户；而当两个用户的距离比较大时才共享导频。接着，本文选择最重要的 AP 为用户提供服务，同时能确保相同导频的用户没有公共 AP。最后，对上行链路功率控制进一步提升系统性能。仿真结果表明，本文提出的结合 AP 选择的导频分配策略可以有效缓解导频干扰，而且要优于传统的导频分配方案，尤其是在提高系统整体吞吐量方面。同时，所提出的改进的最大最小功率控制算法，在整体上的性能要优于最大最小功率控制算法。

参考文献：

- [1] 张平, 牛凯, 田辉, 等. 6G 移动通信技术展望[J]. 通信学报, 2019, 40(1): 141-148.
ZHANG P, NIU K, TIAN H, et al. 6G mobile communication technology outlook[J]. Journal of Communication, 2019, 40(1): 141-148.
- [2] ATTARIFAR M, ABBASFAR A, LOZANO A. Modified conjugate beamforming for cell-free massive MIMO[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019, 8(2): 616-619.
- [3] 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, 2020, 69(2): 2286-2290.
- [4] 许方敏, 陶小峰, 王莹, 等. 支持广义 MIMO 技术的软分数频率复用[J]. 北京邮电大学学报, 2008, 31(2): 46-49.
XU F M, TAO X F, WANG Y et al. Soft fractional frequency multiplexing in support of generalized MIMO techniques[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2008, 31(2): 46-49.
- [5] NGO H Q, ASHIKHMIN A, YANG H, et al. Cell-free massive MIMO versus small cells[J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2017, 16(3): 1834-1850.
- [6] ZHANG Y, CAO H, ZHONG P, QI C, et al. Location-based greedy pilot assignment for cell-free massive MIMO systems[C]//Proceedings of IEEE 4th International Conference on Computer and Communications (ICCC). [S.l.:s.n.], 2018: 392-396.
- [7] ATTARIFAR M, ABBASFAR A, LOZANO A. Random vs structured pilot assignment in cell-free massive MIMO wireless networks[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). [S.l.:s.n.], 2018: 1-6.
- [8] NGO H Q, TRAN L N, DUONG T Q, et al. On the total energy efficiency of cell-free massive MIMO[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2017, 2(1): 25-39.
- [9] 赵迪, 郭爱煌, 宋春林. 去蜂窝大规模 MIMO 系统功率控制算法[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(3): 854-860.
ZHAO D, GUO A H, SONG C L. Power control algorithm for cell free MIMO systems[J]. Systems Engineering and Electronics Technology, 2021, 43(3): 854-860.
- [10] NGUYEN T H, NGUYEN T K, HAN H D. Optimal power control and load balancing for uplink cell-free multi-user massive MIMO[J]. IEEE Access, 2018 (6): 14462-14473.
- [11] 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.
- [12] MAI T C, NGO H Q, EGAN M, et al. Pilot power control for cell-free massive MIMO[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(11): 11264-11268.

[作者简介]



王越（1993—），男，杭州电子科技大学通信工程学院硕士生，主要研究方向为无线通信。



许方敏（1980—），女，博士，杭州电子科技大学通信工程学院讲师，主要研究方向为大规模天线系统物理层安全、无限资源分配策略等。



曹海燕（1975—），女，博士，杭州电子科技大学通信工程学院副教授，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。