

文章编号:1006-2467(2019)03-0327-07

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2019.03.010

大规模多输入多输出系统中基于匹配博弈的 导频分配算法

冯文江¹, 李 乐¹, 代才莉^{1,2}

(1. 重庆大学 通信工程学院, 重庆 400044; 2. 重庆电子工程职业学院 通信工程学院, 重庆 401331)

摘 要: 为了使得大规模多输入多输出(MIMO)系统的上行链路可达速率最大化,提出一种基于匹配博弈的导频分配(PA-MG)算法. 在用户侧,根据用户效用函数生成对导频的偏好列表,并向排列最优的导频发出申请;在基站侧,根据导频效用函数生成对请求用户的偏好列表,并依次将导频分配给排列最优的用户,直到完成所有用户的导频分配. 仿真结果表明:相比于潜博弈的导频分配(PG-PA)算法,所提 PA-MG 算法支持的小区规模更大、复杂度更低;相比于 WGC-PD(Weighted Graph Coloring Based Pilot Decontamination)算法,PA-MG 算法能够获得更大的上行链路可达速率,各用户的信干噪比分布更均匀,且对阴影衰落的鲁棒性更强.

关键词: 大规模多输入多输出; 导频污染; 导频分配; 匹配博弈; 效用函数

中图分类号: TN 915

文献标志码: A

Pilot Allocation Based on Matched Game for Massive Multiple-Input Multiple-Output Systems

FENG Wenjiang¹, LI Le¹, DAI Caili^{1,2}

(1. College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. School of Communication Engineering, Chongqing College of Electronic Engineering,
Chongqing 401331, China)

Abstract: In order to maximize the uplink achievable sum rate of the multi-cell and multi-user massive multiple-input multiple-output (MIMO) system, a pilot allocation algorithm based on matched game (PA-MG) between users and pilots is proposed. Firstly, on the user side, a preference list of pilots is generated according to the user utility function, and an application is made to the pilots with the best arrangement for all users. Then, on the base station side, the preference list of the requesting users is generated according to the pilot utility function, and the pilots are assigned to the users with the best arrangement in turn until all users are assigned with the pilot. Simulation results show that the PA-MG algorithm supports larger cellular and less time complexity than the pilot allocation based on potential game (PG-PA) algorithm. Compared with the weighted graph coloring based pilot decontamination (WGC-PD) algorithm, the PA-MG algorithm can achieve greater uplink achievable sum rate, making the distribution of signal to interference plus noise ratio (SINR) of each user be more uniform, and the robustness to shadow fading is stronger.

收稿日期:2017-07-20

基金项目:重庆市基础科学与前沿技术研究专项重点项目(cstc2017jcyjBX0047),重庆市教委科学技术研究基金资助项目(KJ1602903)

作者简介:冯文江(1963-),男,四川省西充县人,教授,博士生导师,主要研究方向为新一代宽带移动通信和认知无线电等.

电话(Tel.):023-65103544;E-mail:fengwj@cqu.edu.cn.

Key words: massive multiple-input multiple-output (MIMO); pilot contamination; pilot allocation; matched game; utility function

大规模多输入多输出(MIMO)系统在基站侧配置了大量可控天线单元,利用空间自由度(DoF)来提高能量效率和系统容量^[1]. 基于随机矩阵论(RMT)的分析表明^[2],随着基站天线数趋于无穷大,小区内用户间的干扰和不相关噪声逐渐消失. 而大规模 MIMO 技术依赖于发射机和接收机所获的信道状态信息(CSI),通常采用基于导频的数据辅助技术来进行信道估计^[3]. 由于正交导频资源有限,所以小区间导频复用产生的导频污染^[4-5]将影响信道估计的精度,进而降低上行接收检测和下行预编码的性能. 抑制导频污染的主要途径包括合理分配导频、设计信道估计算法、采用预编码^[6-9]. 相关研究包括:文献[10-11]中提出一种相邻小区间异步传输的时移导频分配方法,能够有效抑制导频污染,但会导致数据与导频之间产生相互干扰;文献[12]中提出一种智能导频分配算法,可为信道质量最差的用户分配干扰最小的导频,以降低系统的导频污染;文献[6,13]中将小区划分为中心区和边缘区,使各小区的中心区用户复用相同导频,给边缘区用户分配正交导频,以牺牲中心区用户的部分性能为代价来减少导频污染;文献[14]中将时移与小区划分相结合,从时域和空域的角度来降低导频复用度和受干扰角度,从而降低了导频污染;文献[15]中提出基于用户到达角(AOA)的导频分配方案,但要求 AOA 的扩展很小,不符合实际;文献[16]中提出一种预编码方案,通过多小区联合处理的方法来减轻小区间的干扰,但由于信息交换的开销较大而造成频谱效率降低;文献[17]中提出一种基于空间分割的盲算法以抑制小区间的干扰,但其复杂度较高;文献[18]中针对大规模多输入多输出频分双工(MIMO FDD)系统的下行链路传输,提出一种综合优化导频训练时间、导频功率、数据功率的迭代能效资源分配算法,以使能量效率和频谱效率最大化;文献[19]中分析了导频长度对系统性能的影响,给出了大规模 MIMO FDD 系统中基站天线数增加时导频长度的选取准则.

本文根据匹配博弈论^[20]的思想,提出基于匹配博弈的导频分配(PA-MG)算法,将导频分配过程抽象为用户与导频之间的博弈匹配. 在用户侧,依据用户效用函数生成对导频的偏好列表,并向排列最优的导频发出申请;在基站侧,根据导频效用函数生成

对用户的偏好列表,将对应的导频分配给列表中排列最优的用户,从导频分配的角度抑制用户间的干扰,降低用户间潜在的导频污染,使得上行链路中基站能够根据导频信号获得更加准确的信道估计,从而提升系统的上行链路可达速率.

1 系统模型

图 1 所示为一种简化的多小区多用户大规模 MIMO 系统模型,包括 L 个正六边形小区,每个小区中心配备一个基站,每个基站配置 M 根天线,且各天线之间不存在空间相关性,可同时为小区内多个用户提供服务,小区半径为 R . 假设每个小区随机均匀分布 $K(M \gg K)$ 个单天线用户,将位于小区 j 的用户 k 与小区 i 的基站天线之间的信道传播向量^[6]模型化为

$$\mathbf{h}_{(j,k),i} = \mathbf{g}_{(j,k),i} \beta_{(j,k),i}^{1/2}, \quad i, j \in L, \quad k \in K \quad (1)$$

式中: $\mathbf{g}_{(j,k),i}$ 为 $M \times 1$ 维小尺度衰落向量,服从独立同分布,且服从均值为 $\mathbf{0}$ 、方差为 \mathbf{I}_M 的复高斯分布^[6],即 $\mathbf{g}_{(j,k),i} \sim \text{CN}(\mathbf{0}, \mathbf{I}_M)$; $\beta_{(j,k),i}$ 为大尺度衰落系数,同一基站不同天线的 $\beta_{(j,k),i}$ 相同,且与用户有关,具体表达式为

$$\beta_{(j,k),i} = \frac{z_{(j,k),i}}{r_{(j,k),i}^{\alpha}}$$

其中: $z_{(j,k),i}$ 为阴影衰落系数,其对数服从正态分布,即 $10 \lg z_{(j,k),i} \sim \text{CN}(0, \sigma_{\text{sh}}^2)$; σ_{sh} 为阴影衰落标准差; $r_{(j,k),i}$ 为小区 j 的用户 k 到小区 i 的基站的距

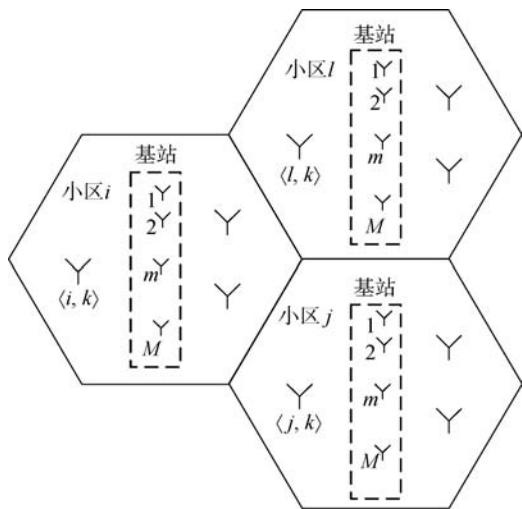


图 1 系统模型

Fig. 1 System model

离^[6]; α 为路径衰减因子。

采用块衰落信道模型,即在相干时间内信道的传播向量 $\mathbf{h}_{(j,k),i}$ 不变。假设可用导频集合为 $S(S \geq K)$, 符号长度为 τ 的导频序列 $\varphi_i(i = 1, 2, \dots, S)$ 彼此正交, 即 $\Phi\Phi^H = \mathbf{I}_S, \Phi = [\varphi_1 \ \varphi_2 \ \dots \ \varphi_S]^T, \mathbf{I}_S$ 为单位矩阵。由于正交导频资源有限, 所以导频序列必然在不同的小区复用。采用随机分配法^[4] 将导频随机分配给小区内的各个用户, 但需保证同一小区所有用户分配的导频彼此正交, 即小区 j 中用户 k 的导频 $p_{(j,k)} \in \{\varphi_i, i \in S\}, p_{(j,k)} \neq p_{(j,k')}, k \neq k'$ 。完成导频分配后, 假设基站采用匹配滤波法来估计信道状态信息, 小区 j 中用户 k 接收信号的信干噪比^[16] 可表示为

$$\text{SINR}_{(j,k)}^U = \frac{\|\mathbf{h}_{(j,k),j}^H\|^4}{\sum_{(j',k') \in O_{(j,k)}} \|\mathbf{h}_{(j',k'),j}^H\|^4 + \sigma_{(j,k)}^2 / \rho^2} \quad (2)$$

式中: $O_{(j,k)} = \{\langle j', k' \rangle : p_{(j',k')} = p_{(j,k)}\} \setminus \{\langle j, k \rangle\}$, 为除 $\langle j, k \rangle$ 之外使用相同导频的用户集合; $\sigma_{(j,k)}^2$ 为噪声功率; ρ 为传输功率。

当 $M \rightarrow \infty$ 时, 式(2)可简化为

$$\text{SINR}_{(j,k)}^U = \frac{\beta_{(j,k),j}^2}{\sum_{(j',k') \in O_{(j,k)}} \beta_{(j',k'),j}^2}, \quad M \rightarrow \infty \quad (3)$$

由此获得小区 j 中用户 k 的上行链路可达速率为

$$C_{(j,k)}^U = (1 - \mu_s) E[\log_2(1 + \text{SINR}_{(j,k)}^U)] \quad (4)$$

式中: μ_s 为导频开销造成的频谱效率损耗; $E[\cdot]$ 为数学期望。

2 基于匹配博弈的导频分配算法

将导频分配等效为最大化系统的上行链路可达速率, 即

$$C^U = \max_{p_{(j,k)}} \sum_{j=1}^L \sum_{k=1}^K C_{(j,k)}^U \quad (5)$$

PA-MG 算法包括两步, 具体描述如下:

(1) 在用户侧, 以各小区用户分配导频后接收的信干噪比作为用户效用函数, 每个用户根据自身效用函数生成对导频的偏好列表, 并向排列最优的导频发出分配申请;

(2) 在基站侧, 以能够达到的上行链路可达速率作为导频效用函数, 根据导频效用函数降序的排列生成对用户的偏好列表, 并将对应的导频分配给列表中排列最优的用户。重复用户申请及导频分配过程, 直到完成所有用户的导频分配。

需要说明的是, 在执行 PA-MG 算法前, 用户应向基站上传自身位置和导频发射功率等信息, 以便在执行 PA-MG 算法过程中基站之间能够交换信

息, 从而协作完成导频分配。

2.1 用户效用函数

设计的用户效用函数如下:

$$U_{(j,k)}(\varphi_i) = \frac{\beta_{(j,k),j}^2}{\sum_{(j',k') \in O_{(j,k)}} \beta_{(j',k'),j}^2} \quad (6)$$

由式(6)可见, 当给用户 $\langle j, k \rangle$ 分配导频 φ_i 时, 接收的信干噪比越高, 用户的效用函数越大。

2.2 导频效用函数

设计的导频效用函数如下:

$$U_{\varphi_i}(\langle j, k \rangle) = \text{lb}(1 + U_{(j,k)}(\varphi_i)) + \sum_{(j'',k'') \in \Omega(\varphi_i)} \text{lb}\left[1 + \frac{\beta_{(j'',k''),j''}^2}{\sum_{(j',k') \in O_{(j'',k'')}} \beta_{(j',k'),j''}^2}\right] \quad (7)$$

式中: $\Omega(\varphi_i)$ 为已分配导频 φ_i 的用户集合; $O_{(j'',k'')} = \{\langle j'', k'' \rangle : p_{(j'',k'')} = p_{(j'',k'')}\} \setminus \{\langle j', k' \rangle\}$, 为除 $\langle j', k' \rangle$ 之外使用相同导频的用户集合。

由此可见, 导频效用函数包含两部分: 第1部分是申请导频 φ_i 的用户可达速率; 第2部分是假设给小区 j 的用户 k 分配导频 φ_i 后, 系统中已分配导频 φ_i 的用户可达速率的总和。

2.3 算法流程

在描述算法流程之前, 首先给出匹配矩阵 \mathbf{M} 的定义和构造方法。 \mathbf{M} 是一个 $L \times K$ 阶矩阵, 其元素 $m_{jk} = \varphi_i (j = 1, 2, \dots, L; k = 1, 2, \dots, K; i = 1, 2, \dots, S)$ 表示给小区 j 的用户 k 分配导频 φ_i 。未分配导频时, \mathbf{M} 中元素的初始值为 0。

PA-MG 算法的流程如下:

(1) 初始化。选择由 L 个小区构成的蜂窝系统的中心小区, 为该小区内所有用户随机分配正交导频序列, 并将已分配导频的用户加入匹配矩阵 \mathbf{M} 。

(2) 用户生成对导频的偏好列表。由用户效用函数(式(6))计算用户 $\langle j, k \rangle$ 对可用导频序列集合 S 的效用函数值, 其中同一小区内的导频不复用, 在可用导频序列集合中剔除小区 j 内已分配的导频序列; 按照用户效用函数值降序的排列生成对可用导频序列的偏好列表

$$U_{(j,k)} = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_S\} \quad (j \in L, k \in K)$$

(3) 用户竞价。用户 $\langle j, k \rangle$ 向排列靠前的一组导频子集 φ_i 发出申请。

(4) 基站生成对用户的偏好列表。由导频效用函数(式(7))计算所有申请导频 φ_i 的效用函数值, 并根据导频效用函数值降序的排列生成对请求用户的偏好列表

$U_{\varphi_i} = \{\langle j, k \rangle, \dots, \langle m, n \rangle\} \quad (j, m \in L; k, n \in K)$ 其中, 同一小区内的导频不复用, 即若匹配矩阵 \mathbf{M}

的小区 j 中存在用户已分配导频 φ_i , 则将导频 φ_i 和用户 $\langle j, k \rangle$ 从各自偏好列表中剔除。

(5) 基站决策(导频分配). 根据 $U_{\langle j, k \rangle}$ 和 U_{φ_i} 执行匹配博弈, 将对应的导频序列分配给偏好列表中排列最优的用户, 并将已分配导频的用户加入 M 中。

(6) 重复执行以上步骤(2)~(5), 更新用户效用函数及其偏好列表和导频效用函数及其偏好列表, 直到完成所有用户的导频分配。

2.4 算法的收敛性分析

在多小区多用户大规模 MIMO 系统中, 总的用户数 $L \times K$ 远大于导频数 S , 但因同一小区内的导频不复用, 故导频数 S 应不小于单小区的用户数 K , 博弈是一对多匹配博弈, 即一个导频匹配多个不同小区的用户。

(1) 当导频数等于单小区用户数时, 算法结束的条件是已为所有用户分配导频。根据算法流程, 由于未限制导频复用次数, 意味着每个导频必然在每个小区复用, 且所有导频的复用次数相同, 即小区数均为 L , 最后形成了每个导频与每个小区用户两两匹配。

(2) 当导频数大于单小区用户数时, 单小区内所有用户完成导频分配后还会剩余导频资源。根据算法流程, 剩余的导频将根据分配原则分配到其他小区或复用。此时的某些导频复用次数将减少, 但由于导频复用次数无限制, 所以最终所有用户必然会完成导频匹配。

由此可见, PA-MG 算法是收敛的。

此外, 将本文的 PA-MG 算法与文献[4]中的 CS(Classical Scheme)算法、文献[20]中基于潜博弈的导频分配(PG-PA)算法以及文献[21]中的 WGC-PD(Weighted Graph Coloring Based Pilot Decontamination)算法相对比可见: CS 算法随机分配导频, 小区间无协作; PG-PA 算法以最小化用户间的干扰为目标, 采用潜博弈分配导频, 能够降低导频污染, 但仅适用于小区用户较少的场景, 且复杂度高; WGC-PD 算法引入用户间潜在的导频干扰参数, 结合贪婪思想寻找潜在的干扰最小的用户并为其分配干扰最小的导频, 以提高用户的最小信干噪比, 但牺牲了潜在的导频干扰小的用户性能; 而 PA-MG 算法以系统上行链路可达速率最大为目标分配导频, 并均衡了用户能够达到的性能与分配导频后产生的干扰, 既不会牺牲小区间干扰小的用户的性能, 也兼顾了小区间干扰大的用户的性能。

特别地, 本文从多小区多用户大规模 MIMO 系

统整体的角度分配导频, 相比于分区域导频分配, 所涉及的问题更多。执行 PA-MG 算法时, 假设小区用户随机分布且移动范围可控, 但在实际中, 小区用户位置移动过大时将可能发生小区切换, 因此, 本文采用定时监控来反馈用户位置信息, 并结合用户的移动、分布来评估算法的性能。一旦超过某一阈值, 则应重新执行 PA-MG 算法, 并按需调整分配导频。但是, 针对用户快速移动而导致小区间频繁切换的问题, 采用 PA-MG 算法重新分配将使导频分配次数增加, 从而导致算法的时间复杂度增大。

3 仿真结果与分析

运用 Monte Carlo 仿真方法分析 PA-MG 算法的性能。利用图 1 中的多小区多用户大规模 MIMO 系统模型, 各小区基站配备 $M(10 < M < 1024)$ 根天线, 同时同频服务各小区单天线用户。用户随机均匀分布于小区内, 基站采用匹配滤波法进行信号检测, 具体仿真参数分别为 $L=7, R=500 \text{ m}, K=16, S=20, \alpha=3.8, \sigma_{\text{sh}}=8 \text{ dB}, \mu_{\text{s}}=0.05, \rho=15 \text{ dB}$ 。

将 PA-MG 算法与 CS 算法、PG-PA 算法和 WGC-PD 算法进行对比仿真, 所得单小区用户数 $K=6, 7$ 时的上行链路用户平均可达速率 $C^U/(LK)$ 对比如图 2 所示, 图 3 所示为 4 种算法的收敛时间随用户数变化的情况。综合图 2 和 3 可以看出: 当小区用户较少时, 采用 PG-PA 算法所得上行链路用户平均可达速率相对较高, 但随着用户数增加, 算法的收敛时间迅速增加, 时间复杂度很高, 无法适用较多用户数的应用场景; 而 PA-MG 算法比 WGC-PD 算法的上行链路用户平均可达速率高, 而收敛时间仅略有增大。

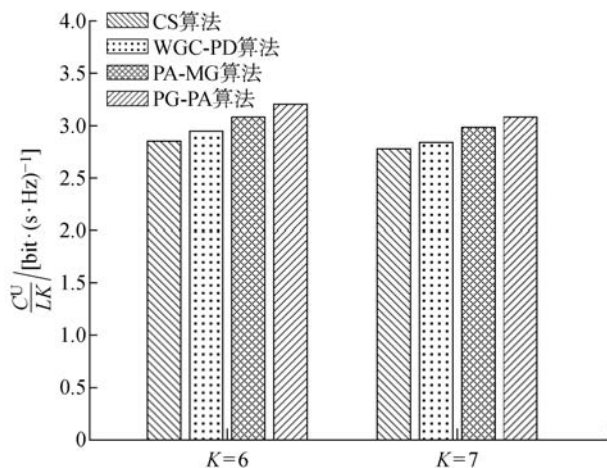


图 2 上行链路用户平均可达速率

Fig. 2 Average uplink achievable rate per user

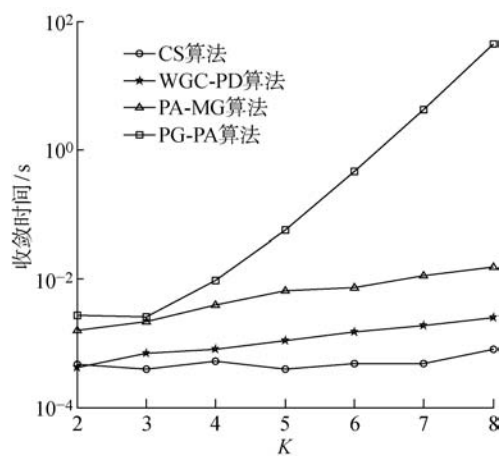


图 3 算法收敛时间随用户数变化的情况
Fig. 3 The convergence time varies with the number of users

考虑到 PG-PA 算法的时间复杂度太高,在仿真较多用户时,本文选用 CS 算法、WGC-PD 算法与 PA-MG 算法进行对比,图 4 所示为 3 种算法的上行链路用户平均可达速率随基站天线数变化的情况.由图可知,当基站天线数增加时,3 种算法获得的上行链路用户平均可达速率都有所提高,这是因为随着基站天线数增加,热噪声和小尺度衰落效应逐渐消失.在同等条件下,PA-MG 算法优于其余 2 种算法,获得了更大的上行链路用户平均可达速率,对导频污染的抑制效果显著.

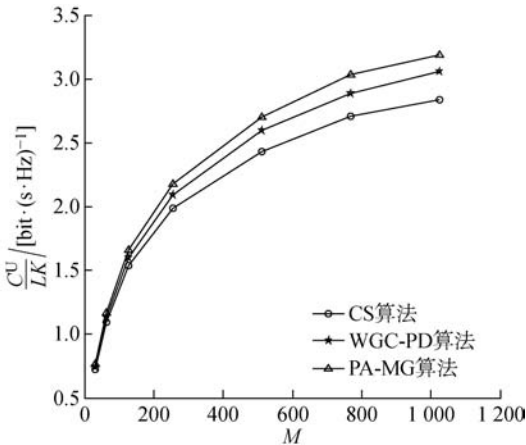


图 4 上行链路用户平均可达速率随基站天线数变化的情况
Fig. 4 Average uplink achievable rate varies with the base station antenna number

图 5 和 6 所示为 $M=512$ 时上行链路用户信干噪比和上行链路可达速率的累积分布函数 CDF 的变化曲线.由图可知:PA-MG 算法优于 CS 算法;相比于 WGC-PD 算法,虽然 PA-MG 算法的低 SINR

的用户相对较多,但高 SINR 的用户以及能够获得高可达速率的用户分布更多,总体而言,执行 PA-MG 算法时用户的 SINR 分布相对均匀,能够获得较高的上行链路用户平均可达速率.

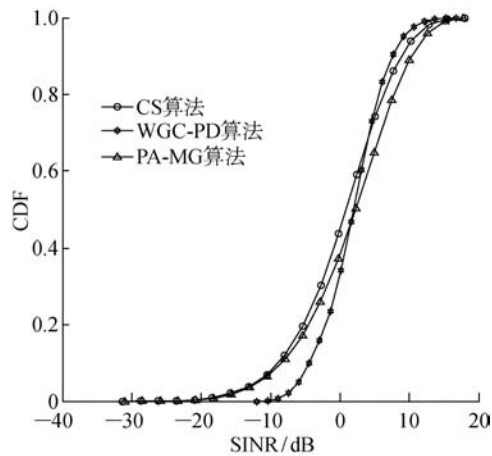


图 5 上行链路用户信干噪比的累积分布函数
Fig. 5 CDF of users' uplink SINR

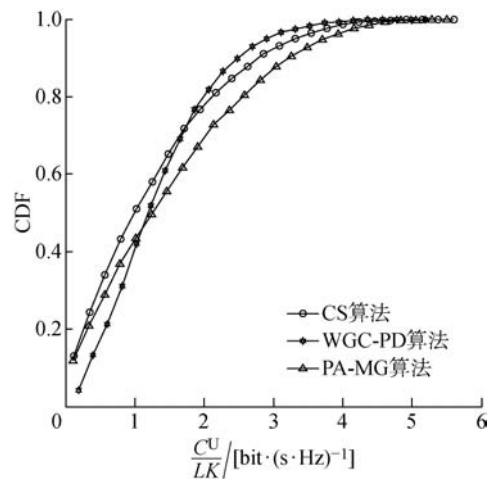


图 6 上行链路用户可达速率的累积分布函数
Fig. 6 CDF of users' uplink achievable rate

图 7 所示为上行链路用户平均可达速率随阴影衰落标准差 σ_{sh} 的变化情况.由图可知,随着 σ_{sh} 增大,3 种算法的上行链路用户平均可达速率都有所降低,这是因为 σ_{sh} 的增大会导致大尺度衰落因子增加,进而影响 SINR 和用户可达速率.但从图 7 还可以看出,相比于其他 2 种算法,PA-MG 算法的上行链路用户平均可达速率的降幅更低,对阴影衰落的鲁棒性更好.

图 8 所示为上行链路用户平均可达速率随传输功率 ρ 的变化情况.由图可知,随着导频传输功率增大,3 种算法的上行链路用户平均可达速率都有一定程度的提高.当 $\rho=30$ dB 时,PA-MG 算法相比于

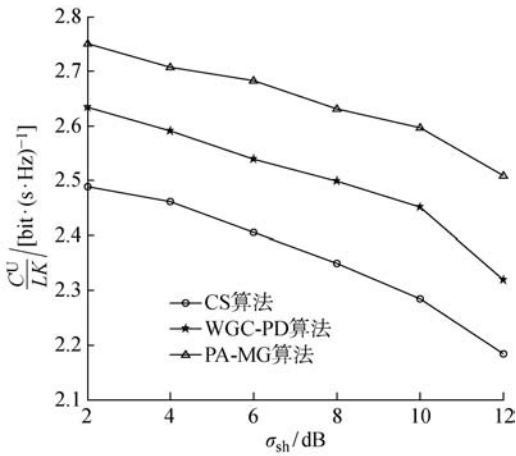


图 7 上行链路用户平均可达速率随 σ_{sh} 的变化情况

Fig. 7 Average uplink achievable rate varies with σ_{sh}

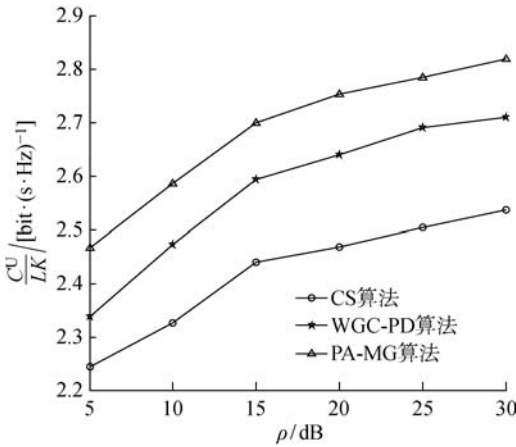


图 8 上行链路用户平均可达速率随传输功率的变化情况

Fig. 8 Average uplink achievable rate varies with the power

WGC-PD 和 CS 算法的上行链路用户平均可达速率分别提高了 0.1 和 0.3 bit/(s · Hz)。

4 结语

本文以最大化系统的上行链路可达速率为目标,提出了一种基于匹配博弈的导频分配算法 PA-MG,其核心思想是:在用户侧,根据用户效用函数生成对导频的偏好列表,并向列表最优的导频序列发出分配申请;在基站侧,根据导频效用函数生成对用户的偏好列表,将对应的导频分配给偏好列表中排列最优的用户。仿真结果表明,PA-MG 算法在保证导频开销较低的前提下能够有效降低导频污染,提高系统的上行链路可达速率,且各用户的信干噪比分布较均匀,对阴影衰落效应的鲁棒性更强。

参考文献:

[1] LARSSON E, EDFORS O, TUFVESSON F, *et al.*

Massive MIMO for next generation wireless systems [J]. **IEEE Communications Magazine**, 2013, 52(2): 186-195.

[2] TULINO A M, VERD S. Random matrix theory and wireless communications[J]. **Journal Communications and Information Theory**, 2004, 1(1): 1-182.

[3] 卢颖辉. 多用户大规模 MIMO 上行系统信道估计方法研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2015.
LU Yinghui. Study on channel estimation methods of massive multiuser MIMO of uplink systems [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2015.

[4] MARZETTA T L. Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas[J]. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, 2010, 9(11): 3590-3600.

[5] GOPALAKRISHNAM B, JINDAL N. An analysis of pilot contamination on multi-user MIMO cellular systems with many antennas[C]//**IEEE International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications**. San Francisco, USA: IEEE, 2011: 381-385.

[6] 董婷婷. 多小区多用户大规模 MIMO 系统导频调度算法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
DONG Tingting. Research on the pilot scheduling algorithm for multi-cell multi-user massive MIMO systems[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.

[7] 程卿卿. Massive MIMO 系统中减小导频污染影响问题研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
CHENG Qingqing. Research on mitigating the influence of pilot contamination in massive MIMO systems [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.

[8] 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, 35(1): 24-33.

WANG Hairong, WANG Yuhui, HUANG Yongming, *et al.* Pilot contamination reduction in massive MIMO cellular network[J]. **Journal on Communications**, 2014, 35(1): 24-33.

[9] 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.

WANG Hairong, YU Fei, HUANG Yongming, *et al.* Precoding and pilot scheduling in massive MIMO multi-cell TDD systems[J]. **Journal of Signal Processing**, 2013, 29(8): 915-924.

[10] FERNANDES F, ASHIKHMIN A, MARZETTA T L. Inter-cell interference in noncooperative TDD large scale antenna systems[J]. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, 2013, 31(2): 192-201.

[11] APPAIAH K, ASHIKHMIN A, MARZETTA T L. Pilot contamination reduction in multi-user TDD systems[C]// **IEEE International Conference on Communications (ICC)**. Cape Town, South Africa: IEEE, 2010: 1-5.

[12] ZHU X D, WANG Z C, DAI L L, *et al.* Smart pilot assignment for massive MIMO[J]. **IEEE Communication Letters**, 2015, 19(9): 1644-1647.

[13] ZHU X D, WANG Z C, QIAN C, *et al.* Soft pilot reuse and multi-cell block diagonalization precoding for massive MIMO systems[J]. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, 2016, 65(5): 3285-3298.

[14] 宋新雷, 杨霖, 杜嘉良. 联合时移和空间划分方法抑制大规模 MIMO 导频污染[J]. **通信学报**, 2017, 38(2): 165-172.

SONG Xinlei, YANG Lin, DU Jialiang. Pilot decontamination in massivo MIMO systems combining time-shifted and cell sectorization pilot assignment [J]. **Journal on Communications**, 2017, 38(2): 165-172.

[15] 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.

[16] ASHIKHMIN A, MARZETTA T. Pilot contamination precoding in multicell large scale antenna systems [C]// **IEEE International Symposium on Information Theory**. Cambridge, USA: IEEE, 2012: 1137-1141.

[17] MÜLLER R R, COTTATELLUCCI L, VEHKAPERA M. Blind pilot decontamination[J]. **IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing**, 2013, 8(5): 773-786.

[18] WANG Y, LIC G, HUANG Y M, *et al.* Energy efficient optimization for downlink massive MIMO FDD systems with transmit-side channel correlation [J]. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, 2016, 65(9): 7728-7243.

[19] WANG Y, SONG W T, HUANG Y M, *et al.* Effects of the training duration in massive MIMO FDD system over spatially correlated channel[C]// **IEEE 82nd Vehicular Technology Conference (VTC2015-Fall)**. Boston, USA: IEEE, 2015: 1-5.

[20] AHMAD H, FARHANG A, MARCHETTI N, *et al.* A game theoretic approach for pilot contamination avoidance in massive MIMO[J]. **IEEE Wireless Communication Letters**, 2016, 5(1): 12-15.

[21] ZHU X D, DAI L L, WANG Z C. Weighted graph coloring based pilot decontamination for multi-cell massive MIMO systems [J]. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, 2017, 66(3): 2829-2834.

(本文编辑:何雪)