



大规模 MIMO 系统中基于用户分类的动态导频分配

张进彦, 金凤, 尹礼欣

(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: 针对大规模 MIMO 系统导频污染问题, 提出一种基于用户分类的动态导频分配策略。根据目标小区用户信号强度的方差设置合理的用户信号强度临界值, 将目标小区用户分为中心用户和边缘用户。中心用户采用最大载干比算法分配导频, 以最大化中心用户总信道容量。边缘用户采用贪婪算法分配导频, 以提高每个边缘用户的信干噪比。仿真结果表明, 所提策略在提高边缘用户信干噪比的同时能够有效提高系统的信道容量。

关键词: 大规模 MIMO; 导频污染; 导频分配; 用户分类

中图分类号: TN929

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2017212

Dynamic pilot assignment in massive MIMO system based on user classification

ZHANG Jinyan, JIN Feng, YIN Lixin

Chongqing Key Lab of Mobile Communications Technology,
Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

Abstract: Aiming at the problem of pilot contamination in massive MIMO system, a dynamic pilot assignment strategy based on user classification was proposed. The target cell user was divided into the central user and the edge user based on the variance of target cell user signal intensity. The central user used the maximum C/I algorithm to assign pilots to maximize the channel capacity of the central user. The edge user used greedy algorithm to assign pilots to improve the signal to interference and noise ratio of each edge user. Simulation results show that the proposed strategy can improve the channel capacity of the system while improving the signal to interference and noise ratio of the edge user.

Key words: massive MIMO, pilot contamination, pilot assignment, user classification

1 引言

近年来, 无线通信终端数量不断增加, 网络数据量爆炸式增长, 传统 LTE 技术已无法满足日益增长的用户需求^[1]。高数据传输率的 5G 移

动通信技术成为当前重点研究方向^[2,3]。大规模 MIMO 在基站端配置大量天线, 很好地利用了空间维度的优势^[4], 大幅度提高系统频谱效率与信道容量^[5], 成为 5G 移动通信的关键技术之一^[6]。

大规模 MIMO 系统获取信道状态信息 (channel state information, CSI) 的方式分为两种, 其中一种为在频分双工 (frequency division duplexing, FDD) 模式中采用的反馈模式, 但由于反馈模式所需的时间与基站天线数成正比, 这样会大幅度增加反馈负荷和反馈时延。针对上述问题, 当前大规模 MIMO 系统主要是基于时分双工 (time division duplexing, TDD) 模式^[7], 根据 TDD 模式上下行信道互易的特点, 在一个相干时间内基站根据用户上行导频进行信道估计获得上行 CSI, 再通过互易性获得下行 CSI。

大规模 MIMO 系统中使用正交导频进行信道估计, 由于系统相干时间限制了导频序列的长度, 系统所能提供的正交导频数量是有限的, 所以通常在不同小区中复用相同的导频。当不同小区中采用相同导频的用户同时发射导频信号时, 会导致基站不能够识别出目标用户的导频信号, 造成信道估计不准确, 不能够获得准确的上行 CSI, 这种现象叫做导频污染。根据随机矩阵分析可得^[8], 基站的天线数很大时, 小区内干扰以及噪声对用户性能产生的不利影响将会大幅度减弱, 但因导频污染造成的小区间干扰却不能随着天线数的大幅增加而得到有效改善, 导致信道容量随着基站天线的增多逐渐趋于饱和。导频污染已经成为制约大规模 MIMO 系统性能的主要问题, 采取行之有效的导频分配策略减轻导频污染刻不容缓。

针对大规模 MIMO 系统中的导频分配策略, 参考文献[9]采用导频时移的方式, 将系统中的小区分类, 不同类小区导频发射时隙与数据发射时隙相互重叠。此方案能够有效减轻导频污染, 但同时也会导致不同类小区用户数据信号与导频信号的相互干扰。参考文献[10]提出软导频复用分配方案, 根据用户的信号强度将小区用户分为中心用户和边缘用户, 相邻小区的中心用户分配相同的导频, 边缘用户则分配

相互正交的导频。此方案可以大幅度提高小区边缘用户的信号与干扰加噪声比 (signal to interference and noise ratio, SINR), 但系统正交导频开销较大且用户分类方式也不够准确。参考文献[11]提出一种基于贪婪算法的智能导频分配方案, 通过给小区中信道质量较差用户分配小区间干扰较小的导频来最大化小区边缘用户 (信道质量较差用户) 的 SINR, 但由于贪婪算法的局限性导致系统容量未得到明显提高。参考文献[12]提出一种基于用户地理位置信息的导频分配方案, 当两个用户的信号到达角度 (angle of arrival, AOA) 不重叠时, 就不会产生小区间干扰, 可以分配相同的导频, 但该方案需要对用户信号到达角进行复杂准确的检测。参考文献[13]提出一种根据小区间干扰信号强度与有用信号强度之间的差值将用户分类的导频分配方案, 此方案通过小区间协作显著提高了系统容量, 但此方案对于中心用户的分配采用随机导频分配方式, 未能最大化系统容量。

本文利用小区间协作, 根据目标小区中不同用户的信号强度不同以及干扰小区中分配相同导频序列的用户产生的小区间干扰不同的特点, 提出一种基于用户分类的动态导频分配策略。首先, 根据目标小区中所有用户信号强度的方差设置合理的信号强度临界值将目标小区分为中心用户和边缘用户。然后, 中心用户采用最大载干比导频分配算法, 边缘用户采用贪婪算法分配导频。仿真结果证明, 所提策略能够显著提高边缘用户的下行 SINR 以及系统的信道容量。

2 系统模型

大规模 MIMO 系统模型如图 1 所示, 系统包括 L 个蜂窝小区, 每个蜂窝小区包括一个基站和 K 个单天线用户。其中, 每个基站配置 M 根天线。

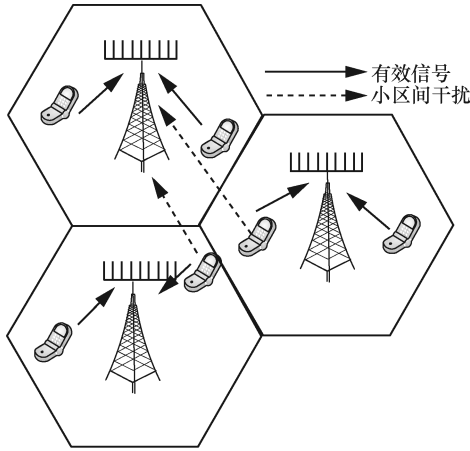


图1 大规模 MIMO 系统模型

假设系统中存在不同小区中使用相同导频的用户在同一时刻进行上行信道估计, 第 j 个小区用户发送长度为 τ 的正交导频序列 $\phi_j = [\phi_{j,1}, \phi_{j,2}, \dots, \phi_{j,K}]$ 进行信道估计, 其中, $\phi_j \in C^{\tau \times K}$ 且 $\phi_j^H \phi_j = I_K$, I_K 表示 K 阶单位矩阵。若第 l 小区是目标小区, 则第 l 小区基站接收到的导频信号可以表示为:

$$Y_l^P = \sqrt{\rho_{\text{pilot}} \tau} \sum_{j=1}^L G_{l,j} \phi_j^T + N_l^P \quad (1)$$

其中, ρ_{pilot} 表示导频发射功率, $N_l^P \sim CN(0,1)$ 表示加性高斯噪声。 $G_{l,j} = [g_{l,j,1}, g_{l,j,2}, \dots, g_{l,j,K}] \in C^{M \times K}$, 其中:

$$g_{l,j,k} = h_{l,j,k} \sqrt{\beta_{l,j,k}} \quad (2)$$

式 (2) 表示第 j 小区内第 k 个用户到第 l 个小区基站天线的信道向量。其中, $h_{l,j,k} \in C^{M \times 1}$ 表示第 j 小区内第 k 个用户到第 l 个小区基站 M 根天线的小尺度衰落向量。 $\beta_{l,j,k}$ 表示第 j 小区内第 k 个用户到第 l 个小区基站天线的大尺度衰落因子。由于基站上两根天线之间的距离相对于用户到基站之间的距离可以忽略不计, 可以认为每个用户到基站上不同天线的大尺度衰落因子都是相同的。第 l 个小区基站采用匹配滤波器 (matched filtering, MF) 信道估计算法得到本小区内第 k 个用户的上行信道估计向量为:

$$\hat{g}_{l,l,k} = \frac{1}{\sqrt{\rho_{\text{pilot}} \tau}} Y_l^P \phi_{j,k} = g_{l,l,k} + \underbrace{\sum_{j \neq l} g_{l,j,k}}_{\text{导频污染}} + \frac{1}{\sqrt{\rho_{\text{pilot}} \tau}} N_l^P \phi_{j,k} \quad (3)$$

从式 (3) 容易看出, 第 l 个小区内第 k 个用户的上行信道估计向量 $\hat{g}_{l,l,k}$ 包括干扰小区中与目标小区内第 k 个用户使用相同导频的用户到目标小区基站的信道向量, 这就是导频污染产生的原因。

根据 TDD 系统上下行信道互易的特性, 导频污染造成基站无法获取准确的下行 CSI, 影响小区内用户的下行预编码。MF 预编码通常用于下行

数据传输, 其预编码矩阵为 $W_l = \frac{1}{\sqrt{\eta_l}} (\hat{g}_{l,l})^*$, 其中,

$$\eta_l = \left\| (\hat{g}_{l,l})^* \right\|_F^2, \quad W_l = [w_{l,1}, w_{l,2}, \dots, w_{l,K}]$$

若第 l 个小区基站向本小区内第 k 个用户发送的数据信号为 $x_{l,k}^{\text{dl}}$, 经过预编码后信号变为 $w_{l,k} x_{l,k}^{\text{dl}}$ 。则在下行数据传输阶段, 第 l 个小区内第 k 个用户接收到的信号为:

$$y_{l,k}^{\text{dl}} = \sqrt{\rho_{\text{dl}}} \sum_{j=1}^L \sum_{k=1}^K g_{j,l,k}^T w_{l,k} x_{l,k}^{\text{dl}} + N_l^{\text{dl}} \quad (4)$$

其中, ρ_{dl} 为下行数据发射功率, N_l^{dl} 为信道高斯噪声。若采用 MF 检测算法检测下行信号, 则第 k 个用户检测到的信号为:

$$\hat{x}_{l,k}^{\text{dl}} = \hat{g}_{l,l,k}^H y_{l,k}^{\text{dl}} = \sqrt{\rho_{\text{dl}}} g_{l,l,k}^H g_{l,l,k}^T w_{l,k} x_{l,k}^{\text{dl}} + \sqrt{\rho_{\text{dl}}} \sum_{j \neq l} \sum_{k=1}^K g_{j,l,k}^H g_{l,j,k}^T w_{l,k} x_{l,k}^{\text{dl}} + \omega_{l,k}^{\text{dl}} \quad (5)$$

其中, $\omega_{l,k}^{\text{dl}}$ 表示下行小区内干扰和噪声。第 l 个小区内第 k 个用户的下行 SINR 可以表示为:

$$\text{SINR}_{l,k}^{\text{dl}} = \frac{|g_{l,l,k}^T g_{l,l,k}^*|^2}{\sum_{j \neq l} |g_{l,j,k}^T g_{l,j,k}^*|^2 + |\omega_{l,k}^{\text{dl}}|^2 / \rho_{\text{dl}}} \quad (6)$$

基站天线数很大时, 可以将式 (6) 简化为:

$$\text{SINR}_{l,k}^{\text{dl}} = \frac{\beta_{l,l,k}^2}{\sum_{j \neq l} \beta_{l,j,k}^2} \quad (7)$$

其中, $\beta_{l,l,k}^2$ 定义为第 l 个小区内第 k 个用户的信号强度, $\sum_{j \neq l}^L \beta_{l,j,k}^2$ 表示干扰小区中所有与第 l 个小区内第 k 个用户使用相同导频的用户对其产生的小区间干扰。

相应地, 第 l 小区内第 k 个用户的平均下行传输速率为:

$$C_{l,k}^{\text{dl}} = E \{ \log(1 + \text{SINR}_{l,k}^{\text{dl}}) \} \quad (8)$$

很明显可以看出, 当基站天线数趋于无穷大时, 热噪声以及小尺度衰落对于用户下行传输速率的影响被平均掉, 然而, 由于导频污染的存在, 导致用户受到的小区间干扰不能随着天线数的不断增加而消失, 影响了用户下行传输速率的提高。采取合理的导频分配策略来减轻导频污染是提高用户下行传输速率的一条重要途径。

3 导频分配

为简化问题, 仅考虑目标小区 l 的导频分配, 假设每个小区可分配的正交导频数 S 等于用户数 K 。传统导频分配方式是将正交导频随机地分配给用户, 不考虑用户的信道质量及小区间干扰, 无法消除导频污染的影响。本文提出的导频分配策略要同时考虑用户的信道质量及小区间干扰, 根据目标小区用户信号强度的方差将目标小区用户分类, 对不同类用户采用不同的导频分配算法。

3.1 用户的分类

传统的用户分类方式是根据用户到基站的距离将用户分为中心用户与边缘用户, 这种分类方式虽然简单易行, 但用户信号强度的衰减是由用户到基站间信道的路径损耗以及阴影衰落决定的, 仅根据用户位置来确定用户的信号强度进而将用户分类是不准确的。参考文献[10]提出根据用户到基站的大尺度衰落因子定义用户的信号强度, 进而将用户分类, 提高了用户分类的准确性。但参考文献[10]在设置用户分类的信号强度临界

值时, 简单地采用了一个固定值, 没有考虑小区中用户的分布情况, 而小区中用户的分布情况是不断变化的, 因此采用固定临界值将用户分类也不够准确。

针对上述问题, 本文提出一种根据目标小区所有用户信号强度的方差, 动态地设置临界值将用户分类的方法。用户分类的信号强度临界值设定为:

$$\lambda = \gamma \cdot \bar{S} \quad (9)$$

其中:

$$\gamma = \frac{\sqrt{\mu^2}}{K} \quad (10)$$

γ 为信号强度临界值控制因子, 其中,

$$\mu^2 = \frac{\sum_{k=1}^K (S_k - \bar{S})^2}{K} \text{ 为用户信号强度方差, } S_k = \beta_{l,l,k}^2$$

为第 k 个用户的信号强度, $\bar{S} = \frac{\sum_{k=1}^K \beta_{l,l,k}^2}{K}$ 为所有用

户信号强度均值。根据式(9), 当用户信号强度 $S_k > \lambda$ 时, 将此用户视为中心用户; 当用户信号强度 $S_k < \lambda$ 时, 将此用户视为边缘用户。结合实际蜂窝系统中用户的分布规律, 当小区边缘用户相对增多, 小区中用户分布相对分散时, 不同用户的信号强度差异较大, 各用户信号强度偏离用户信号强度均值的程度也将变大; 反之, 当小区边缘用户较少, 小区中用户分布较为集中(主要分布于小区的中心区域)时, 小区中不同用户的信号强度差异不明显, 各用户信号强度偏离用户信号强度均值的程度较轻。综上所述并结合方差的统计学意义, 本文将 γ 作为信号强度临界值控制因子。当小区用户数固定时, γ 与用户信号强度的方差成正比。当用户信号强度方差较大时, 说明用户分布较为分散, 边缘用户较多, 通过式(9)增大用户分类临界值可以将更多用户划分到边缘用户集合



中；当用户信号强度方差较小时，说明用户分布较为集中，中心用户数量增大，根据式（9），通过减小用户分类临界值来增加划分到中心用户集合中的用户数。通过设定基于用户信号强度方差的用户分类临界值，实现了根据用户在小区中的分布情况将用户分类的目的。只有将用户准确地分类，才能发挥导频分配算法的优势，从而有助于提高系统的整体容量。

3.2 不同类用户导频分配

小区用户分类后，针对每一类用户分别进行导频分配。边缘用户信道质量差且易受到严重的导频污染，而中心用户则正好相反。针对不同类用户的特点，本文提出对不同类用户采用目的性不同的导频分配算法。

由于中心用户信道质量好、信号强度大，且不易受到导频污染的影响，因此给中心用户分配对目标小区用户产生导频污染较大的导频序列，而将产生导频污染较小的导频序列分配给边缘用户。这样可以避免边缘用户分配到导频污染较大的导频序列，能够有效提高边缘用户的下行传输速率，从而能够提高整个系统的容量。

针对中心用户的特点，对中心用户采取能够使系统容量最大化的最大载干比导频分配算法。最大载干比算法的缺陷是没有考虑用户的公平性，会导致边缘用户的通信性能严重下降。但本文所提导频分配策略中最大载干比导频分配算法只针对中心用户，故可以有效避免算法缺陷。本文所提导频分配策略对每一个中心用户采用最大载干比算法来分配导频。若某时刻可以用来分配给中心用户的导频集合为 $\psi_C = \{\phi_{C,1}, \phi_{C,2}, \dots, \phi_{C,N}\}$ ，根据传统最大载干比算法思想，使中心用户集合中第 k 个用户的下行 SINR 较大的导频被选择的优先级更高，则此时被选择的导频为：

$$\phi_{C,n} = \arg \max \{(SINR_k)_{\psi_C}\} \quad (11)$$

集合 $\{(SINR_k)_{\psi_C}\}$ 表示将导频集和 ψ_C 中各导频分别分配给第 k 个用户后计算得到的下行 SINR。根据式（11），每一个中心用户所分配的导频都能够使用户的下行 SINR 达到当前的最大值。由式（8）可知，最大载干比导频算法能够使每一个实现导频分配的中心用户达到下行传输速率的最大值，从而能够使中心用户的系统容量达到当前条件下的最大值。

由于边缘用户传输速率的下降会严重影响系统容量的提升，提高边缘用户的传输速率变得尤其重要。为使每个边缘用户取得较好的通信性能，本文所提策略针对边缘用户的特点，将边缘用户导频分配问题建模为：

$$P' : \max \frac{\min_{\forall k} \beta_{l,l,k}^2}{\sum_{j \neq l} \beta_{l,j,s}^2} \quad (12)$$

模型的意义是最大化边缘用户中信道质量最差的用户的下行 SINR。根据式（12），通过给每一个边缘用户分配当前产生导频污染最小的导频序列来降低小区间干扰，从而达到最大化边缘用户下行 SINR 的目的。由于小区中信道质量最差的用户其信号强度最小且最容易受到导频污染，因此针对边缘用户的导频分配首先从信道质量最差的用户开始，按照用户信号强度增加的顺序依次分配。针对模型 P' ，利用贪婪算法为所有边缘用户分配导频。综上所述，本文所提导频分配策略的具体步骤如下。

步骤 1 将系统正交导频集合 $\psi = \{\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_S\}$ 中的导频随机地分配给干扰小区中的用户。

步骤 2 计算目标小区用户集合 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_K\}$ 中各用户的信号强度 $S_k = \beta_{l,l,k}^2 (k=1, 2, \dots, K)$ 。

步骤 3 计算目标小区所有用户信号强度 S_k 的方差 μ^2 。

步骤 4 用户分类：根据方差 μ^2 计算临界值 $\lambda = \frac{\sqrt{\mu^2}}{K^2} \sum_{k=1}^K S_k$ ，若用户 u_k 信号强度 $S_k > \lambda$ ，则为

中心用户, 存入中心用户集合 U_C 中; 反之, 存入边缘用户集合 U_E 中。

步骤5 计算集合 U_E 中用户数量 N , 对 U_E 中的 N 个用户根据信号强度降序排列, 重新排列后的边缘用户集合 $U'_E = \{u_{e1}, u_{e2}, \dots, u_{eN}\}$; 将 U_C 中的 $K-N$ 个用户根据信号强度降序排列, 重新排列后的中心用户集合 $U'_C = \{u_{c1}, u_{c2}, \dots, u_{c(K-N)}\}$ 。

步骤6 计算各干扰小区内使用导频 ϕ_s 的用户对目标小区用户的小区间干扰强度之和 $ICI_s = \sum_{j \neq l} \beta_{l,j,s}^2 (s=1, 2, \dots, S)$ 。根据导频 ϕ_s 的干扰强度和对 S 个导频序列进行降序排列, 重新排列后的正交导频集合 $\psi' = \{\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_S\}$ 。

步骤7 对分类后的用户进行导频分配。边缘用户导频分配: 采用贪婪算法, 将排序后的导频集合 ψ' 中后 N 个导频 $\{\phi_{S-N+1}, \phi_{S-N+2}, \dots, \phi_S\}$ 依次分配给目标小区边缘用户集合 $U'_E = \{u_{e1}, u_{e2}, \dots, u_{eN}\}$ 中的各个用户。中心用户导频分配: 将导频集合 ψ' 的前 $S-N$ 个导频 $\{\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_{S-N}\}$ 存入集合 ψ'_C 中, ψ'_C 中的导频用来分配给 U'_C 中的用户。首先, 对 U'_C 的第一个用户 u_{c1} , 采用最大载干比算法分配导频, 将导频分配结果存入集合 $A = \{a(k, s)_{k=1, 2, \dots, K-N; s=1, 2, \dots, S-N}\}$ 中, 其中, $a(k, s)$ 表示将导频 ϕ_s 分配给中心用户 u_{ck} 。将已经被分配的导频存入集合 ψ'_{CH} 中, 则对下一个中心用户进行导频分配时, 可用来分配的导频集合 $\psi'_{CU} = \psi'_C - \psi'_{CH}$ 。然后, 根据 U'_C 中的用户顺序依次对其余用户采用最大载干比算法分配导频, 直到所有中心用户都分配到相应导频。

4 仿真分析

本节对所提基于用户分类的动态导频分配策略进行了仿真验证, 仿真结果证明, 本文提出的导频分配策略能够有效减轻导频污染。具体的仿真参数见表1。其中, 大尺度衰落因子 $\beta_{l,j,k}$ 可以表示为:

$$\beta_{l,j,k} = \frac{z_{l,j,k}}{(r_{l,j,k}/R)^\alpha} \quad (13)$$

其中, $z_{l,j,k}$ 为阴影衰落, 满足 $10\lg z_{l,j,k} \sim CN(0, \sigma)$, $r_{l,j,k}$ 为第 j 小区内第 k 个用户到第 l 小区基站的距离。

表1 仿真参数

名称	参数
小区数 L /个	7
每小区用户数 K /个	8~16
基站天线数 M /个	8~512
导频长度 τ	32
小区半径 R /m	1 000
导频发射功率 ρ_{pilot} /dB	15
下行数据发射功率 ρ_{dl} /dB	20
路径损耗因子 α	3.8
对数阴影衰落 σ /dB	8
基站与用户之间最小距离 $r_{\min}$ /m	100
传统中心用户距基站的最远距离 $r_{C\max}$ /m	800

图2是关于本文所提导频分配策略与传统导频方案以及参考文献[11,13]中导频分配方案系统下行可达和速率的对比。从图2中可以看出, 随着基站天线数的增多, 系统下行可达和速率不断提高, 而且由于导频污染的影响, 其增长幅度逐渐减小。本文所提导频分配策略与传统方案以及参考文献[11]相比, 系统下行可达和速率有了大幅度的提高, 参考文献[11]所提导频分配方案未对用户进行分类, 对小区中所有用户采用贪婪算法分配导频, 由于贪婪算法极易产生局部最优值, 得不到整体最优值, 所以未能显著提高系统容量。而本文所提导频分配策略对小区用户进行了合理的分类, 虽然对边缘用户也采取了贪婪算法分配导频, 但是对数量较多的中心用户却采用能够使中心用户整体容量达到最大值的最大载干比分配算法分配导频, 因此相对于参考文献[11]所提方案系统容量有了大幅提升。另外, 本文所提策略与参考文献[13]方案相比也有了一定程度的提高。参考文献[13]所提方案同样对用户进行了分类, 由于



其对中心用户采用随机导频分配方式,虽然系统容量相对参考文献[11]也有了大幅提升,但未能最大化中心用户的整体容量,从而导致其系统容量低于本文所提导频分配策略。

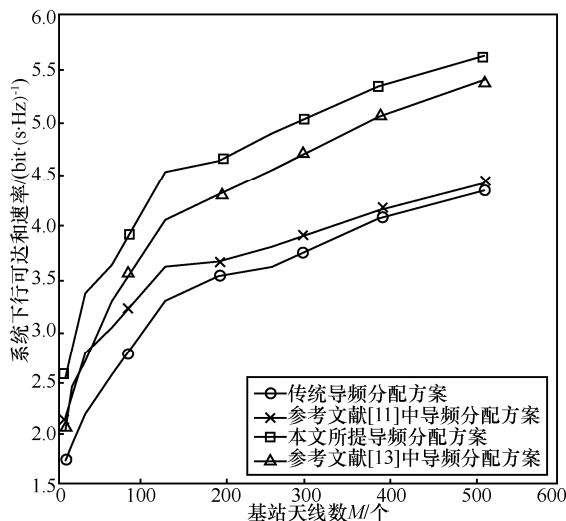


图2 系统下行可达速率随基站天线数的变化

图3对比了在基站天线数为128时,不同导频分配方案系统下行链路SINR的累积分布曲线,从图3中曲线易得,本文所提策略的下行SINR与传统导频分配方案相比提高了0.8 dB,而与参考文献[13]方案相比也有了较小程度的提高。

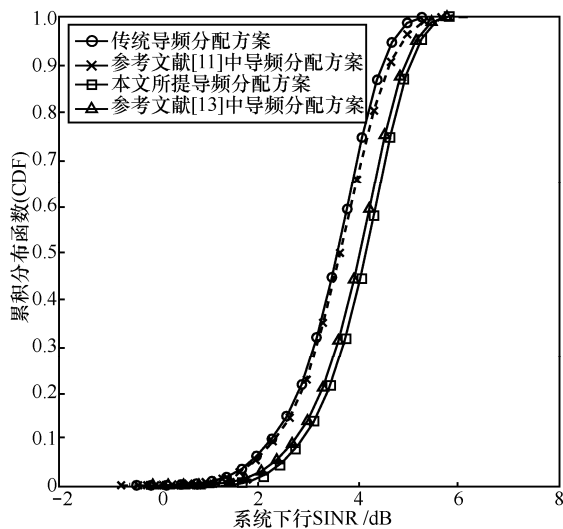


图3 系统下行SINR的概率分布函数

图4比较了在基站天线数 $M=512$ 时,本文所提导频分配策略中心用户和边缘用户最小下行

SINR 与其余导频分配方案中用户最小下行 SINR 的累积概率分布曲线。从图4中可以看出,本文所提策略的边缘用户最小 SINR 与参考文献[11]所提方案大体相当,因为本文所提策略对于边缘用户采取了与参考文献[11]相同的贪婪算法来分配导频。与中心用户相比大约提高了 0.2 dB。这是由于中心用户所用最大载干比算法没有考虑用户公平性,未能提高部分中心用户的下行 SINR。但由于中心用户的信道质量相对较高,其用户最小 SINR 仍然比参考文献[13]所提方案及传统导频分配方案中用户最小 SINR 有了明显提高。传统导频分配方案和参考文献[13]中对于中心用户的分配方式都采用了随机导频分配方式,这会导致信道质量较差的用户分配到产生导频污染较强的导频序列的概率增加,从而导致用户最小下行 SINR 下降。

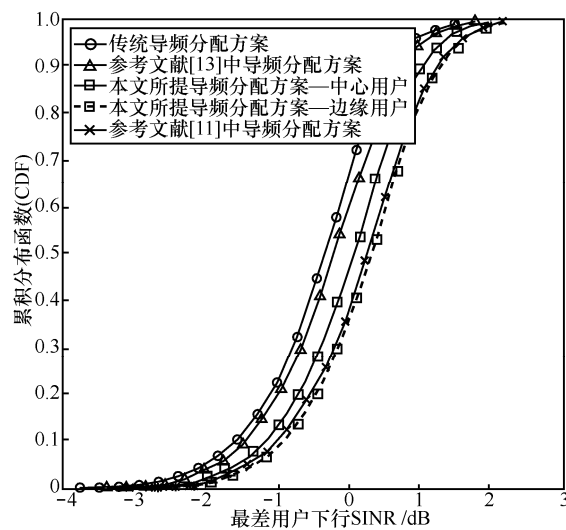


图4 最小下行SINR的概率分布函数

图5为本文所提用户分类方式与传统用户分类方式及参考文献[10]所提用户分类方式下都采用本文所提导频分配策略时系统下行可达速率的对比曲线。其中,参考文献[10]中根据经过仿真迭代得到的最佳临界值(最佳参数 $\delta=0.1$)将用户分类;传统用户分类方式下,设置中心用户到基站的最远距离为0.8倍的小区半径。从图5中可以看出,本文所提用户分类方式系统性能明显优于传统分类方式,且相对于参考文献[10]所提利用

固定临界值将用户分类的方式也有了一定程度的提高。参考文献[10]通过仿真得到的最佳临界值是经过多次仿真得到的平均值,但对于每一次仿真不一定是最佳临界值。由于参考文献[10]未考虑小区用户的分布情况而将小区用户分类,可能出现两种用户分类不合理的情况:第一种是当小区中用户分布比较分散,边缘用户大幅增加时,但仿真得到的最佳临界值相对较小,未能将信号强度较小的用户划分到边缘用户集合中;第二种是当小区用户分布过于集中(都集中分布于小区中心)时,但仿真得到的最佳临界值相对较大时,也会造成用户分类的不合理。这两种情况都会影响后续的导频分配,从而导致系统容量的下降。而本文所提分类方式能够根据用户信号强度方差动态地估计用户在小区中的分布情况,从而能更准确地将用户分类。

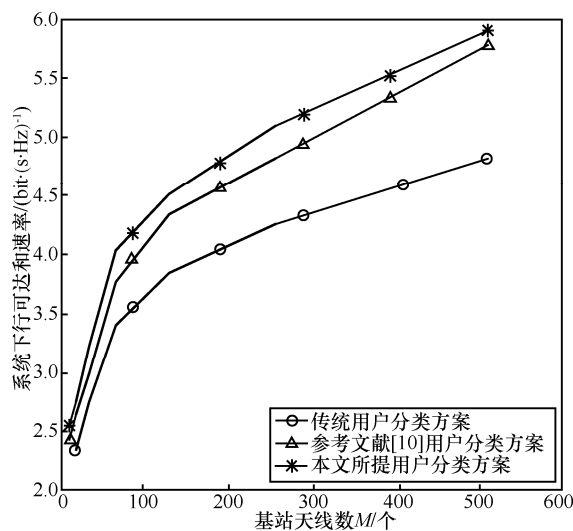


图5 不同用户分类方式系统可达和速率对比曲线

图6为在基站天线数 $M=128$,小区用户数为16时,信号强度临界值控制因子 γ 在 $[0,1]$ 范围内取值时系统边缘用户数的变化曲线以及系统下行可达和速率的变化曲线。从图6(a)可以看出,随着信号强度临界值控制因子 γ 不断增大,边缘用户数也不断增加。这是因为随着控制因子不断增大,用户信号强度的方差也不断增大,导致小区中用

户分布愈发分散,边缘用户增多。但从图6中可以看出在控制因子大于0.8后,边缘用户数不再增加而趋于稳定。这说明控制因子 γ 的取值主要集中在0~0.8之间。从图6(b)可以看出,随着信号强度临界值控制因子 γ 不断增加,系统下行可达和速率不断下降,这是因为随着控制因子不断增大,边缘用户也逐渐增多,而边缘用户易受到严重的导频污染,导致系统下行可达和速率不断下降。然而,由于边缘用户在控制因子大于0.8后不再增加,所以系统下行可达和速率也逐渐趋于稳定。

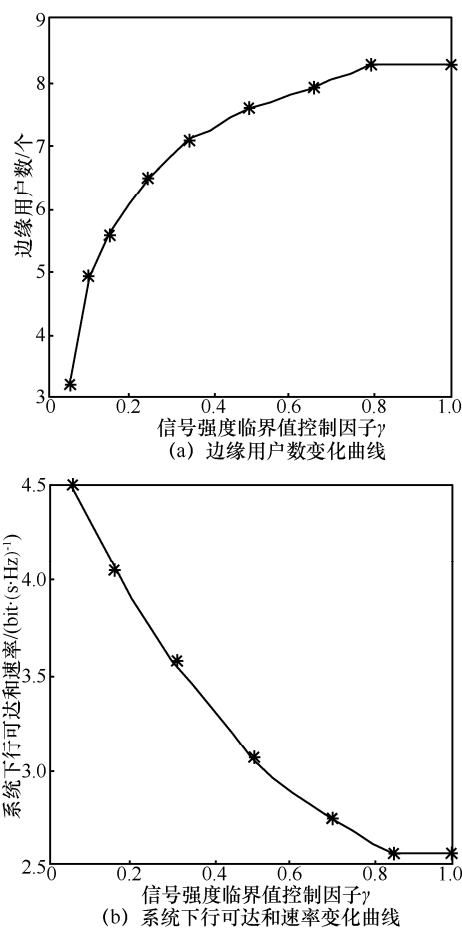


图6 不同信号强度临界值控制因子 γ 下边缘用户数与系统下行可达和速率变化曲线

5 结束语

本文提出一种基于用户分类的动态导频分配策略,有效减轻了大规模MIMO系统的导频污染。



通过计算目标小区所有用户信号强度的方差估计用户在小区中的分布情况,进而根据方差设置合理的用户信号强度临界值将用户分为中心用户以及边缘用户。根据干扰小区用户所用导频对目标小区用户的干扰程度分别对目标小区不同类用户采用不同的导频分配算法。中心用户采用最大载干比算法以最大化系统容量,边缘用户采用贪婪算法以提高每个用户的 SINR。仿真结果表明,本文所提导频分配策略能够有效提高边缘用户的 SINR 以及系统容量。

参考文献:

- [1] LU L, LI G Y, SWINDLEHURST A L, et al. An overview of massive MIMO: benefits and challenges[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2014, 8(5): 742-758.
- [2] RUSEK F, PERSSON D, LAU B K, et al. Scaling up MIMO: opportunities and challenges with very large arrays[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2013, 30(1): 40-60.
- [3] 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.
- [4] 王东明, 张余, 魏浩, 等. 面向 5G 的大规模天线无线传输理论与技术[J]. 中国科学: 信息科学, 2016(1): 3-21.
WANG D M, ZHANG Y, WEI H, et al. Theory and technology of large scale antenna wireless transmission for 5G[J]. Chinese Science: Information Science, 2016(1): 3-21.
- [5] KRISHNAN N, YATES R D, MANDAYAM N B. Uplink linear receivers for multi-cell multiuser MIMO with pilot contamination: large system analysis[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(8): 4360-4373.
- [6] 胡莹, 黄永明, 俞菲, 等. 多用户大规模 MIMO 系统能效资源分配算法[J]. 电子与信息学报, 2015(9): 2198-2203.
HU Y, HUANG Y M, YU F, et al. Energy efficient resource allocation algorithm for multiuser massive MIMO system[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015(9): 2198-2203.
- [7] MARZETTA T L. Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(11): 3590-3600.
- [8] ZHANG C, QIU R C. Massive MIMO as a big data system: random matrix models and tested[J]. IEEE Journals & Magazines, 2015(3): 837-851.
- [9] JIN S, WANG X, LI Z, et al. On massive MIMO zero-forcing transceiver using time-shifted pilots[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(1): 59-74.
- [10] ZHU X, WANG Z, 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): 1.
- [11] ZHU X, WANG Z, DAI L, et al. Smart pilot assignment for massive MIMO[J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(9): 1.
- [12] MUPPIRISSETTY L S, WYMEERSCH H, KAROUT J, et al. Location-aided pilot contamination elimination for massive MIMO systems[C]//IEEE Global Communications Conference, Dec 6-10, 2015, San Diego, CA, USA. New Jersey: IEEE Press, 2015: 1-5.
- [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 assignment in large scale MIMO systems[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2016, 38(8): 1901-1907.
- [14] 倪善金, 赵军辉. 5G 无线通信网络物理层关键技术[J]. 电信科学, 2015, 31(12): 48-53.
NI S J, ZHAO J H. Key technologies in physical layer of 5G wireless communications network[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(12): 48-53.
- [15] 李建东, 刘磊, 盛敏, 等. 面向 5G 无线网络的智能干扰管理技术[J]. 电信科学, 2016, 32(6): 3-14.
LI J D, LIU L, SHENG M, et al. Intelligent interference management in 5G wireless networks[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(6): 3-14.
- [16] 林金桐, 许晓东. 第五代移动互联网[J]. 电信科学, 2015, 31(5): 7-14.
LIN J T, XU X D. The 5th generation of mobile internet[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(5): 7-14.

[作者简介]



张进彦(1990-), 男, 重庆邮电大学移动通信技术重庆市重点实验室硕士生, 主要研究方向为大规模 MIMO 中的导频污染。



金凤(1993-), 女, 重庆邮电大学移动通信技术重庆市重点实验室硕士生, 主要研究方向为大规模 MIMO 中的信道估计。



尹礼欣(1993-), 男, 重庆邮电大学移动通信技术重庆市重点实验室硕士生, 主要研究方向为大规模 MIMO 中的资源分配。