

基于软导频复用和加权图着色的导频分配方案

谢斌 范有伟 汪宁

(江西理工大学信息工程学院 江西 赣州 341000)

摘要 针对大规模 MIMO 系统中存在导频污染的问题,提出一种基于软导频复用和加权图着色的导频分配方案。分别将小区用户和导频序列分成两组,小区边缘用户由于受到严重的导频污染而分配正交导频序列组;对于小区中心用户,在经典的图着色基础上使用加权干扰图的方法来进行进一步净化小区中心用户间的轻微导频污染。仿真结果表明,相比于传统方法,该方法可以有效地减轻导频污染,上行可达和速率得到了明显的提高。

关键词 大规模 MIMO 导频污染 软导频复用 加权图着色 导频分配 和速率

中图分类号 TP393.04 **文献标志码** A **DOI**:10.3969/j.issn.1000-386x.2020.09.009

PILOT ALLOCATION SCHEME BASED ON SOFT PILOT MULTIPLEXING AND WEIGHTED GRAPH COLORING

Xie Bin Fan Youwei Wang Ning

(School of Information Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China)

Abstract Aiming at the problem of pilot pollution in massive MIMO systems, this paper proposes a pilot allocation scheme based on soft pilot multiplexing and weighted graph coloring. The cell user and the pilot sequence were respectively divided into two groups, and the cell edge users were allocated orthogonal pilot sequence groups due to serious pilot pollution; for the cell center user, the method of weighted interference graph was used to further purify the slight pilot pollution between the users in the cell center based on the classical graph coloring. The simulation results show that compared with the traditional method, our method can effectively reduce the pilot pollution, and the uplink achievable sum rate is significantly improved.

Keywords Massive MIMO Pilot pollution Soft pilot multiplexing Weighted graph coloring Pilot allocation Sum rate

0 引言

近年来,随着移动通信数据量的增长和通信设备能耗的不断提高,现有的通信技术已不能满足日益增长的无线通信需求^[1]。与传统 MIMO 技术相比,大规模 MIMO 系统在基站端配置了众多的天线,大大提高了小区内天线数量与用户数量之间的比例,使得用户间信道近乎正交^[2-3]。通过这种方式,系统的频谱效率和能量效率可以得到较大提高,不仅能够满足用户对通信数据业务增多的需求,而且还契合当前社会大力发展绿色通信的政策导向。大规模 MIMO 技术的巨

大优势引起了业内人士的广泛关注,该技术被视为第五代移动通信系统(5G)的关键技术之一^[4]。在大规模 MIMO 系统传输过程中,基站需要获取准确的信道状态信息^[5-6],即上行链路中的数据检测信息和下行链路中的多用户传输功率控制信息^[7]。在时分双工(TDD)协议中,上行链路中的数据检测易受不同用户发送的导频干扰的影响。由于导频资源非常有限,传统方法^[8-9]通常在相邻小区中复用导频序列,以提高频谱利用率。但是,该类方法在某个目标小区中获得的信道估计很容易受到其他小区用户发送的导频影响,从而对目标小区基站的信道估计造成严重的干扰,这种现象称为导频污染^[10]。虽然增加基站天线的数

量可以更好地减少各种噪声和相邻小区之间的干扰,但是随着基站天线数量的增加,导频污染并不会消失,这将非常容易导致信道容量趋于饱和。因此,导频污染被认为是多小区大规模 MIMO 系统的性能瓶颈^[11-12]。

近年来,部分学者在减轻导频污染方面做了大量的研究工作,其中主要包括基于信道估计的方法^[13-14]、基于信号到达角的方法^[15-16]和基于导频分配的方法^[17-20]。文献[13]提出了一种利用统计信道协方差信息的贪婪导频分配算法,使小区间导频复用的空间趋于正交,从而减轻小区间导频污染。文献[14]提出了一种基于子空间投影的非线性信道估计方法,通过扩大天线阵列来提高信道估计的精度,达到减少蜂窝系统导频污染的目的。上述基于信道估计的方法^[13-14]都是建立在信道二阶统计量上的,而在实际通信系统中,信道的二阶统计量往往难以准确获取,因此这类方法的实际应用能力相对较低。文献[15]提出了一种基于到达角(AOA)的导频分配方法,使用用户信号到达角的差异来分配导频,以达到降低导频污染的目的。文献[16]提出了一种基于贝叶斯方法进行信道估计的方案,通过利用用户信号到达角的不同,把有用信道和干扰信道分开,以减轻导频污染。上述基于信号到达角的方法^[15-16]都是建立在信号到达角度较小且服从均匀分布的假设之上的,但在实际应用中到达角并不会严格地服从均匀分布,这使得该类方法的使用存在较大的局限。与基于信道估计的方法和基于信号到达角的方法相比,基于导频分配的方法通过对用户发射的导频重新分配,能在较大程度上减轻小区用户复用导频产生的导频污染,因此该类方法得到了人们的重点关注。文献[17]提出了一种时移导频方案,通过在相邻小区之间采用异步通信的方式来减小相邻小区间的导频污染,但该方法可能会导致用户数据和导频信号之间相互干扰,从而影响用户间的正常通信。文献[18]在文献[17]的基础上将小区间干扰最小的导频序列优先分配给具有最差信道质量的用户,通过这种智能调度方案可以有效地减轻小区边缘用户存在的严重导频污染,但是该分配方案不能有效地保证算法的收敛性。为此,文献[19]提出了一种软导频复用方案,先将用户划分为小区中心用户和小区边缘用户两组,然后再采用多小区块对角化预编码来进行导频分配。这种方法可以使导频分配具有针对性,降低小区中心用户的轻微导频污染,但在求预编码伪逆矩阵时具有很高的复杂度。文献[20]进一步提出了一种图着色导频分配方案,通过构造干扰图来描述用户之间的导频污染程度关系,然后用贪婪导频

分配算法分配导频,以此来有效地减轻导频污染。但是该方法只能有效降低小区边缘用户的严重导频污染,小区中心用户间的轻微导频污染并没有得到有效改善。

针对传统导频分配方法存在的上述问题,本文提出了一种基于软导频复用和加权图着色的大规模 MIMO 系统导频分配方案。小区中的用户被分为两种类型:小区中心用户和边缘小区用户。小区中心用户由于受到轻微的导频污染而复用相同的导频序列,而小区边缘用户由于受到严重的小区间干扰而应用其他的正交导频序列,来避免严重的导频污染,这样可以大大提高小区边缘用户的性能。对于小区中心用户,本文引入了加权图着色算法来进行导频分配,通过构造加权图的方法来描述用户间潜在的导频污染关系,以有效地减轻由于复用导频产生的污染,并且提高小区中心用户的性能。本文方案结合了文献[19]和文献[20]的方法。为了验证本文方案的优越性,选择文献[19]和文献[20]和传统方案进行比较。实验结果表明,相对于现有方案,本文方案可以有效地提高系统的上行链路可达速率,较好地改善大规模 MIMO 系统的性能。

1 大规模 MIMO 系统模型

一般而言,多小区大规模 MIMO 系统模型由图 1 所示。

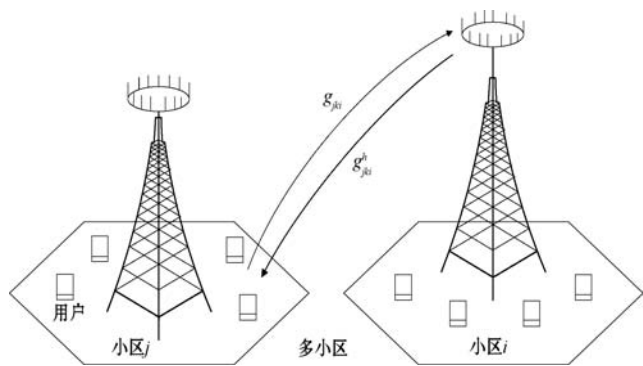


图1 多小区大规模 MIMO 系统模型

大规模 MIMO 系统由 J 个六边形小区组成,假设每个小区由一个具有 M 根天线的基站和 K ($K \ll M$) 个单天线用户组成,系统采用时分双工(TDD)的工作模式,信道模型为快衰落信道,在小区中使用长度为 τ 的导频序列 L ($L \geq K$),导频矩阵为 $\Phi = [\phi_1 \ \phi_2 \ \dots \ \phi_K]^T \in \mathbf{C}^{K \times \tau}$,列向量彼此正交 $\Phi^H \Phi = \mathbf{I}_K$ 。在上行链路中,基站可以根据用户发送的导频信号来估计信道状态信息。由于在时分双工模式下信道有互易性,可以轻易得到下行链路的信道状态信息。从第 j 个小区的

第 k 个用户到第 i 个小区基站的信道模型可以建模为:

$$\mathbf{h}_{jki} = \mathbf{g}_{jki} \sqrt{\beta_{jki}} \quad (1)$$

式中: \mathbf{g}_{jki} 为一个 $M \times K$ 矩阵,表示传输信道的小尺度衰落信道向量,满足 $\mathbf{h}_{jki} \sim CN(0, \mathbf{I}_M)$; β_{jki} 表示大尺度衰落信道向量,并且处在同一基站中的不同天线之间是相等的,可以表示为:

$$\beta_{jki} = \frac{z_{jki}}{(r_{jki}/r)^\alpha} \quad (2)$$

式中: r 表示小区的半径; α 表示路径传播的损耗指数; r_{jki} 用来衡量第 j 个小区的第 k 个用户到第 i 个小区基站的距离大小; z_{jki} 表示阴影衰落系数,其服从标准差为 σ 的零均值高斯分布,并且遵循 $10\lg(z_{jki})$ 的对数正态分布。

传统的导频分配方法通常将导频序列 ϕ_k 分配给第 k 个用户。因此,第 i 个小区基站接收的导频序列 $\mathbf{Y}_i^p \in \mathbf{C}^{M \times \tau}$ 可表示为:

$$\mathbf{Y}_i^p = \sqrt{\rho_p} \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \mathbf{h}_{ijk} \phi_k^T + \mathbf{N}_i^p \quad (3)$$

式中: ρ_p 表示导频发射功率; $\mathbf{N}_i^p \in \mathbf{C}^{M \times \tau}$ 表示高斯白噪声。类似地,第 i 个小区基站接收到的上行用户数据 $\mathbf{y}_i^u \in \mathbf{C}^{M \times 1}$ 可以表示为:

$$\mathbf{y}_i^u = \sqrt{\rho_u} \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \mathbf{h}_{ijk} \mathbf{x}_{jk}^u + \mathbf{n}_i^u \quad (4)$$

式中: ρ_u 表示上行链路用户发射的平均功率; $\mathbf{n}_i^u \in \mathbf{C}^{M \times 1}$ 表示加性高斯白噪声向量; \mathbf{x}_{jk}^u 表示来自第 j 个小区中的第 k 个用户的符号向量,且满足 $E\{|\mathbf{x}_{jk}^u|^2\} = 1$ 。于是,第 i 个小区中第 k 个用户的信道估计可以表示为:

$$\hat{\mathbf{h}}_{ik} = \frac{1}{\sqrt{\rho_p}} \mathbf{Y}_i^p \phi_k^H = \sum_{j=1}^J \mathbf{h}_{ijk} + \mathbf{v}_{ik} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{v}_{ik} = \frac{1}{\sqrt{\rho_p}} \mathbf{N}_i^p \phi_k^H$ 表示等效噪声。由式(5)可知,第

i 个小区中第 k 个用户的信道估计 $\hat{\mathbf{h}}_{ik}$ 是信道 \mathbf{h}_{ijk} 的线性组合。小区中用户使用相同的导频序列,这就产生了导频污染。

采用匹配滤波器检测器(MF)来进行信道估计,第 i 个小区中第 k 个用户的检测符号可以表示为:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_{ik}^u &= \hat{\mathbf{h}}_{ik}^H \mathbf{y}_i^u = \\ & \left(\sum_{j=1}^J \mathbf{h}_{ijk} + \mathbf{v}_{ik} \right)^H \left(\sqrt{\rho_u} \sum_{j=1}^J \sum_{k'=1}^K \mathbf{h}_{ijk'} \mathbf{x}_{jk'}^u + \mathbf{n}_i^u \right) = \\ & \sqrt{\rho_u} \left(\mathbf{h}_{ik}^H \mathbf{h}_{ik} \mathbf{x}_{ik}^u + \sum_{j \neq i} \mathbf{h}_{ijk}^H \mathbf{h}_{ijk} \mathbf{x}_{jk}^u \right) + \boldsymbol{\varepsilon}_{ik} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $\boldsymbol{\varepsilon}_{ik}$ 表示小区内干扰和不相关噪声。一般而言,可以通过增加基站天线数量来显著降低这些干扰和噪

声。因此,第 j 个小区中第 k 个用户的上行信噪比(SINR)可以计算为:

$$\begin{aligned} SINR_{j,k}^u &= \frac{|\mathbf{h}_{jk}^H \mathbf{h}_{jk}|^2}{\sum_{(j',k') \in \Gamma_{(j,k)}} |\mathbf{h}_{j'k'}^H \mathbf{h}_{j'k'}|^2 + \sigma_{jk}^2} \approx \\ & \frac{\beta_{jk}^2}{\sum_{(j',k') \in \Gamma_{(j,k)}} \beta_{j'k'}^2} \end{aligned} \quad (7)$$

式中: σ_{jk}^2 表示不相关干扰和噪声的功率; $\sum_{(j',k') \in \Gamma_{(j,k)}} \beta_{j'k'}^2$ 表示由导频复用引起的导频污染; $\Gamma_{(j,k)}$ 表示与用户 (j,k) 具有相同导频的用户组。因此,用户 (j,k) 的上行可实现速率可以表示为:

$$\mathbf{R} = (1 - \mu) E\{\log_2(1 + SINR_{j,k}^u)\} \quad (8)$$

式中: μ 表示系统传输产生的频谱效率损失。显然,上行可实现的速率仍然受到导频污染的限制,并且不能通过简单地分配增加的传输功率或导频功率来改善。

本文目标是通过优化导频分配方式来减轻导频污染,使系统上行链路的可达和速率 R 最大化。当天线数趋于无穷时,优化问题可以近似表示为:

$$Q: \max_{\phi_{(j,k)}} \left\{ \log_2 \left(1 + \frac{\beta_{jk}^2}{\sum_{(j',k') \in \Gamma_{(j,k)}} \beta_{j'k'}^2} \right) \right\}$$

解决优化问题 Q 的直接方式是用穷举法,对于 K 个用户和 L 个导频,第 j 个小区中不同类型的导频分配的数量是 Q_L^K 。但是考虑到所有的小区单元,复杂度就是 $(Q_L^K)^{(J-1)}$,这在实际中是不可行的。因此,需要一个优化的方案。

2 导频分配方案

为了尽可能减小导频污染,提高系统上行链路的和速率,本文提出了一种结合软导频复用和加权图着色的导频分配新方法。假设小区 j 为目标小区,即只考虑这个小区的导频分配。传统随机导频分配方法是随机地将正交导频序列分配给用户,而不考虑用户间的导频干扰,如此将可能产生严重的导频污染。本文在图着色方法^[20]的基础上引入软导频复用,首先利用大规模衰落系数 β_{jk} 将目标小区 j 用户分组,然后对不同用户进行导频分配,对小区中心的用户采用加权图着色方法进一步分配导频。这样不仅去除了边缘用户的严重导频污染,而且进一步降低了中心用户间的轻微导频污染。本文方案流程示意如图2所示。

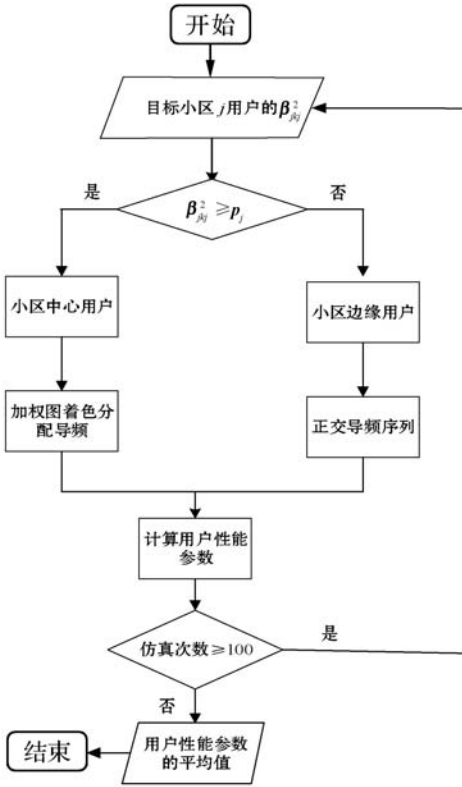


图2 导频分配方案示意图

2.1 用户和导频分组

传统的用户分组是根据用户与基站的距离不同来实现的,但这种方法不能反映用户的真正信号强度。从式(7)可知,第 j 小区的第 k 个用户的上行 SINR 由第 j 个小区定义的。因此,可以用 β_{jk}^2 来估计第 j 小区第 k 个用户的导频污染严重性,由此可以比较容易地获取第 j 小区中所有用户的大规模衰落系数 $\{\beta_{jk}^2\}$ 。利用不同小区用户与基站间大规模衰落系数不同的特点可以将第 j 小区中的 k 个用户可以分成两类:

$$\begin{cases} \beta_{jk}^2 \geq p_j & \text{小区中心用户} \\ \beta_{jk}^2 < p_j & \text{小区边缘用户} \end{cases} \quad (9)$$

式中: p_j 表示用来用户分类的阈值。

$$p_j = \frac{\theta}{K} \sum_{k=1}^K \beta_{jk}^2 \quad (10)$$

式中: θ 可以根据具体的系统配置进行调节。考虑典型的多小区大规模 MIMO 系统,其由 J 个六边形小区组成,假设第 j 小区支持 K_j 个用户,所需的正交导频数量可以被计算为:

$$K_{\text{all}} = \max\{K_j, j = 1, 2, \dots, J\}$$

根据式(9)可以将 j 小区 k 个用户分成两组:

$$K_j = K_{j,c} + K_{j,e} \quad (11)$$

$K_c = \max\{K_{j,c}, j = 1, 2, \dots, J\}$ 表示分配给 j 小区

中心用户的导频序列的数量; $K_e = \sum_{j=1}^J K_{j,e}$ 表示专门用

于小区边缘用户的导频序列的数量。所有 J 小区可用的导频资源集合可以被分成:

$$\Phi_{\text{all}} = [\Phi_c^T \Phi_e^T] \quad (12)$$

式中: $\Phi_c \in \mathbf{C}^{K_c \times \tau}$ 被重用于所有小区的中心用户; $\Phi_e \in \mathbf{C}^{K_e \times \tau}$ 被用于所有边缘小区用户,并且 Φ_e 可以分成 J 行分区,对应于 $K_{j,e}$ 边缘用户。这保证了所有小区边缘用户的导频的正交性,从而可以显著提高其通信服务质量。

2.2 加权图着色对中心小区用户进行导频分配

前文已经讨论了在小区边缘用户应用专门的导频序列而不存在严重的导频污染的情况,针对多个小区中心用户间复用导频产生轻微导频污染的情况,本文将对小区中心用户应用加权图着色的方法来进行导频分配。由式(7)可以看出,对于特定用户 (j, k) 重用导频引起的小区间干扰强度可以通过构造一个值来衡量,本文用 $\eta_{(j,k)(j',k')}$ 来衡量两用户在不同小区中的干扰,其可以表示为: $\eta_{(j,k)(j',k')} = \beta_{j'k'j}^2 / \beta_{jkj'}^2 + \beta_{jkj'}^2 / \beta_{j'k'j}^2$ 。将两用户 (j, k) 和 (j', k') 连接起来,构造任意两个用户之间导频污染程度关系图,其直观图如图3所示。

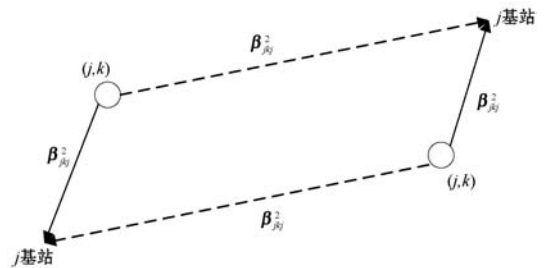


图3 不同小区用户导频污染程度关系

当 $\eta_{(j,k)(j',k')}$ 比较大时,表示两用户用相同的导频时将会产生比较大的小区间干扰。可以把这种用户间的干扰转化为图论问题: $G = (U, E)$, 其中 U 代表用户, E 代表存在的小区间干扰引起的导频污染强度,用 $\eta_{j,k}(j',k')$ 来衡量。通过贪婪算法为具有较大权重的连接用户分配不同的导频来实现导频的合理分配,同时有效减小小区间干扰引起的导频污染。其算法分为初始化导频,用户的选择,导频分配,具体步骤如下:

(1) 输入系统参数 K, J , 大规模衰落系数 β_{jk} 。

(2) 将导频 $\varphi_{j,k}$ 初始化分配,导频用户集合 Ω 初始化为空集。

(3) 循环分配导频。用户轮流分配剩余的导频序列,直到小区所有用户都分配了相应的导频序列。

(4) 用户选择。考虑到干扰图中的权重大的连接会导致严重的导频污染,选择出在相邻小区中具有最

大连接并且尚未分配有任何导频的用户 (j_0, k_0) :

$$(j_0, k_0) = \arg \max_{(j,k) \in \Omega} \left\{ \sum_{j' \neq j} \eta_{(j,k)(j',k')} \right\}$$

(5) 可用的导频集。为了避免小区干扰引起的导频污染,同一小区内不会重用相同的导频。尚未分配给第 j_0 个小区中的用户的导频包括用户 (j_0, k_0) 的可用导频集 Λ :

$$\Lambda = \{1, 2, \dots, K\} \setminus \{\varphi_{(j,k)} : 1 \leq k \leq K\}$$

(6) 导频分配选择。尽量给连接的用户分配不同的导频来减轻小区间干扰,从用户 (j_0, k_0) 的可用导频集 Λ 中选择索引为 λ_0 的导频,该导频在选择的用户 (j_0, k_0) 的连接中具有最小重复使用次数:

$$\lambda_0 = \arg \min_{\lambda \in \Lambda} \left\{ \sum_{\varphi_{(j,k)} = \lambda} \eta_{(j_0, k_0)(j, k)} \right\}$$

(7) 导频分配。在每个循环中,索引为 λ_0 的所选导频将被分配给所选用户 (j_0, k_0) ,然后该用户将被添加到集合 Ω 中。步骤(3)至步骤(7)的过程将持续 KJ 次,直到所有用户都被分配了相应的导频。

3 仿真实验结果及分析

为了验证所提基于软导频复用和加权图着色的新型导频分配方案的有效性,本文通过蒙特卡洛数值仿真方法分析了所提方案的性能。考虑具有 J 个小区的典型六边形蜂窝网络,其中每个小区具有 K 个单天线用户和具有 M 个天线的基站。仿真总小区数为 19 个,传输的频谱损失 μ 为 0.05,阈值参数 θ 取值为 0.05 ~ 1,对数阴影衰落系数 δ 为 8 dB。分别在不同信噪比、不同天线数、不同用户数和不同发射功率的条件下对本文方案的性能进行仿真分析,并与不同导频分配方案进行了性能比较。通过这种方式,可以验证本文方案对减轻小区间干扰而引起导频污染的有效性。

图 4 为在每个小区用户数为 10、用户终端为单天线及信噪比为 15 dB 的情况下,目标小区用户平均上行的速率与基站天线数量的关系曲线。可以看出,当用户数固定时,随着基站天线数量的增加,各个方案平均用户上行速率都得到了不同程度的提高。在天线规模较小时,本文方案的用户平均上行速率略优于文献[20]的图着色导频分配方案,当天线规模增大时,本文方案的速率显著优于其他 3 种导频分配方案。在天线数 $M = 512$ 时,本文方案的上行速率比文献[20]中仅采用图着色导频分配方案提升了约 0.16 dB,比文献[19]中的软导频复用方案提升了约 0.53 dB,比传统的随机导频分配方案提升了约 0.78 dB。

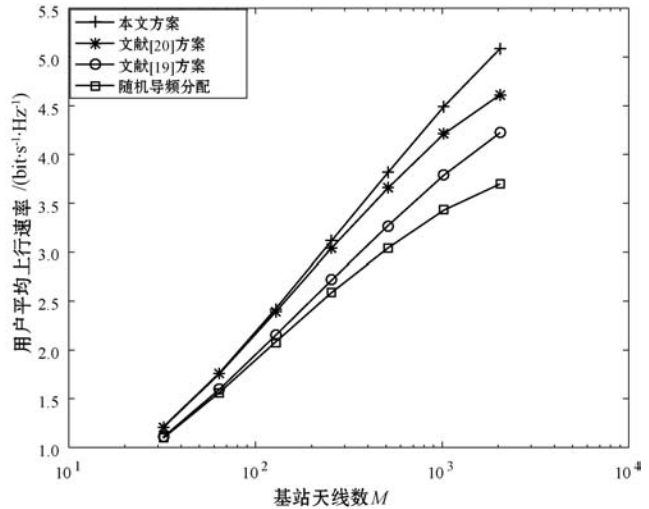


图 4 用户平均上行速率与天线数量的关系曲线

图 5 给出了上述 4 种导频分配方案下,目标小区用户平均上行速率与发射功率的关系曲线。仿真环境为:小区用户数为 10,正交导频序列数 L 为 15,基站天线数为 512。可以看出,系统的用户平均上行速率随发射功率的增加都得到了一定程度的提高。显然,与传统随机导频分配方案、文献[19]的软导频复用方案和文献[20]的图着色导频分配方案相比,本文方案获得的用户平均上行速率具有更大的提升,可以有效地减轻用户由于小区间干扰而受到的导频污染。随着发射功率的增加,系统的用户平均上行速率趋于饱和,本文方案仍然有着最优的速率。仿真结果表明,本文方案在相同的发射功率时有着较好的速率,可以有效地减轻导频污染产生的干扰。

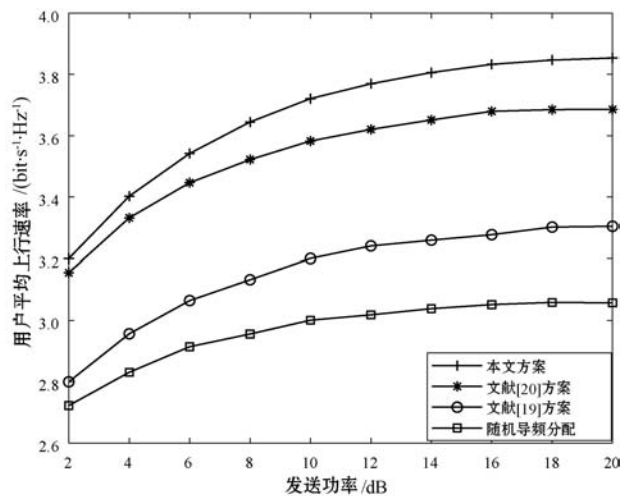
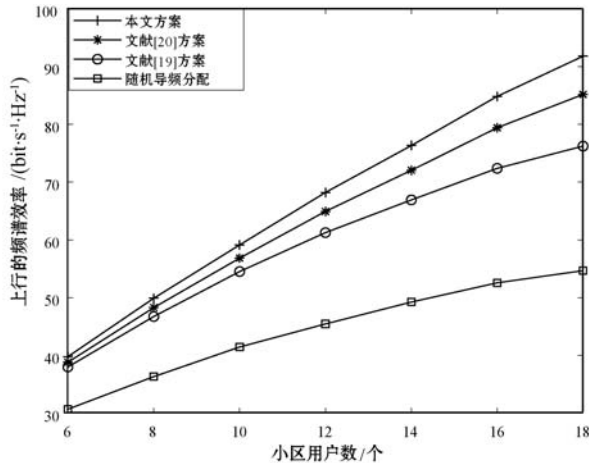


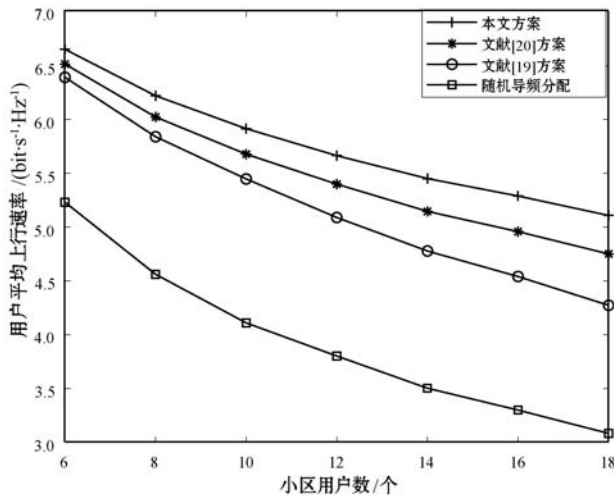
图 5 用户平均上行速率与发射功率的关系曲线

图 6 为基站天线数量为 256、终端天线数量为 2、信噪比为 0 dB 的情况下不同导频分配方案对应的频谱效率和用户平均上行速率与用户数的关系曲线。由图 6(a)可以看出,随着小区用户数的增加,本文方案的频谱效率要优于文献[19]和文献[20]的分配方案,并且随着用户数增加,本文方案与其他方案差距

逐渐增大,这是由于用户数增大时而导频数量有限,产生导频污染使用户间干扰增大造成的。从图6(b)可以看出,随着小区用户数增加,每个用户的平均上行速率逐渐降低,这是因为小区用户数增加时,系统中用户之间的干扰也逐渐增大,从而导致每个用户的平均速率逐渐降低,但本文提出的导频分配方案仍有较优的速率。



(a) 系统频谱效率与小区用户数的关系曲线



(b) 用户平均上行速率与用户数的关系曲线

图6 频谱效率和用户平均上行速率与用户数的关系

图7是用户上行的SINR的累积分布函数(假设基站天线数 $M=512$)。显而易见,随机导频分配方案性能最低,有相对较大的一部分用户上行链路的SINR低于0 dB。在SINR为0时,用户上行平均信噪比的累积分布函数值的顺序从大到小依次是:随机导频分配方案、文献[19]方案、文献[20]方案、本文方案。显然,当SINR小于0时,本文方案具有最小的用户,在高SINR用户方面具有明显优势。这是因为本文方案从两个方面考虑用户导频分配问题,在提高小区边缘用户性能的同时,也在最大限度上减轻中心用户受到的导频污染,保证中心用户的

性能。

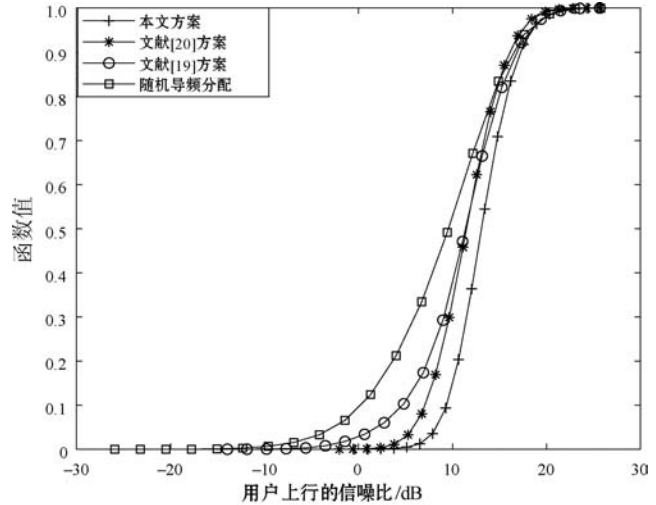


图7 用户上行平均信噪比的累积分布函数

4 结语

多小区大规模MIMO系统在进行通信时,由于导频资源有限,导频的重复使用会使小区间的信号产生导频污染,从而影响通信质量,不利于多小区大规模MIMO技术的应用。针对此问题,本文提出了一种基于软导频复用和加权图着色的大规模MIMO系统导频分配方案。首先依据大规模衰落系数将小区用户分成两类,将可用的正交导频序列分成两组,小区边缘用户使用专门的导频序列,从而保证边缘小区用户导频的正交性,提高通信质量;再对小区中心用户采用加权图着色方案,构建加权图来贪婪地对小区中心用户导频进行分配,大大地减轻了导频污染。仿真结果表明,本文方案在用户上行速率、频谱效率等方面优于现有的方案。在实际应用中,本文方案在大规模MIMO系统中具有良好的应用前景。

参考文献

- [1] Shi R H, Tang K, Dong J, et al. TDD-based massive mimo systems: overview and development [C]//International Conference on Algorithms and Architectures for Parallel Processing. Springer, 2015: 393 - 402.
- [2] Zhang R, Yang L L, Hanzo L. Error probability and capacity analysis of generalised pre-coding aided spatial modulation [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(1): 364 - 375.
- [3] Hoydis J, Brink S T, Debbah M. Massive MIMO: How many antennas do we need? [C]//2011 49th Annual Allerton Conference on Communication, Control and Computing. IEEE, 2011: 545 - 550.

- [4] Yang S S, Hanzo L. Fifty years of MIMO detection: The road to large-scale MIMOs [J]. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2015, 17(4): 1941 – 1988.
- [5] Bogale T, Le L. Massive MIMO and mmWave for 5G wireless HetNet: Potential benefits and challenges [J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2016, 11(1): 64 – 75.
- [6] Jose J, Ashikhmin A, Marzetta T L, et al. Pilot contamination and precoding in multi-cell TDD systems [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(8): 2640 – 2651.
- [7] Wang Q, Jing Y. New rank detection methods for reduced-rank MIMO systems [J]. *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking*, 2015(1): 230.
- [8] Appaiah K, Ashikhmin A, Marzetta T L. Pilot contamination reduction in multi-user TDD systems [C]//2010 IEEE International Conference on Communications. IEEE, 2010: 1 – 5.
- [9] Jin S, Wang X Y, 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] Xu C, Zhang J H, Liu M M, et al. Pilot design for sparse channel estimation in large-scale MIMO-OFDM system [J]. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2016, 2016(5): 6142574.
- [11] Zhang C C, Qiu R C. Massive MIMO as a big data system: random matrix models and testbed [J]. *IEEE Access*, 2017, 3: 837 – 851.
- [12] 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.
- [13] Li M, Jin S, Gao X. Spatial orthogonality-based pilot reuse for multi-cell massive MIMO transmission [C]//2013 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing. IEEE, 2013: 1 – 6.
- [14] Vinogradova J, Bjornson E, Larsson E G. On the separability of signal and interference-plus-noise subspaces in blind pilot decontamination [C]//2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). IEEE, 2016: 3421 – 3425.
- [15] Fan D, Gao F F, Wang G P, et al. A 2D-DFT based channel estimation scheme in indoor 60GHz communication systems with large-scale multiple-antenna [C]//2016 83rd IEEE Vehicular Technology Conference. IEEE, 2016: 1 – 5.
- [16] Muppirisetty L S, Wymeersch H, Karout J, et al. Location-aided pilot contamination elimination for massive MIMO systems [C]//2015 IEEE Global Communications Conference. IEEE, 2015: 1 – 5.
- [17] Wang P B, Li R, Zhao C L, et al. Joint interference mitigation approach using space-time pilot design in large-scale antenna systems [J]. *IET Communications*, 2016, 10(3): 253 – 262.
- [18] Zhu X D, Wang Z C, Dai L L, et al. Smart pilot assignment for massive MIMO [J]. *IEEE Communications Letters*, 2015, 19(9): 1644 – 1647.
- [19] 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*, 2015, 65(5): 3285 – 3298.
- [20] 樊自甫, 胡敏, 李悦宁. 基于图着色的大规模 MIMO 系统中动态导频分配 [J]. *计算机应用*, 2017, 37(12): 3356 – 3360.
-
- (上接第 41 页)
- [7] 叶钦海. 城市公共自行车系统运营调度研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- [8] 刘路美. 城市公共自行车站点需求预测及调度优化方法研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [9] 贾文慧, 孙林子, 景英川. 基于 XGBoost 模型的股骨颈骨折手术预后质量评分预测 [J]. *太原理工大学学报*, 2018, 49(1): 174 – 178.
- [10] Mavrovouniotis M, Muller F M, Yang S. Ant colony optimization with local search for dynamic traveling salesman problems [J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2017, 47(7): 1743 – 1756.
- [11] Ming F, Han Q, Yang X. Energy minimization for on-line real-time scheduling with reliability awareness [J]. *Journal of Systems & Software*, 2017, 12(7): 168 – 176.
- [12] Zhang Y, Yu Y, Zhang S, et al. Ant colony optimization for Cuckoo Search algorithm for permutation flow shop scheduling problem [J]. *Systems Science & Control Engineering An Open Access Journal*, 2019, 7(1): 20 – 27.
- [13] Ma Y N, Gong Y J, Xiao C F, et al. Path planning for autonomous underwater vehicles: An ant colony algorithm incorporating alarm pheromone [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(1): 141 – 154.
- [14] Zang Z, Li Z, Dan Z, et al. Improving selection strategies in zeroth-level classifier systems based on average reward reinforcement learning [J]. *Journal of Ambient Intelligence & Humanized Computing*, 2018(2): 1 – 11.
- [15] Qin Z, Zhang C. An improved ant colony optimization algorithm with strengthened pheromone updating mechanism for constraint satisfaction problem [J]. *Neural Computing & Applications*, 2017(1): 1 – 12.
- [16] 程永强, 汪岚. 基于改进 MMAS 算法的堆垛机货物拣选路径优化 [J]. *延边大学学报(自然科学版)*, 2017(3): 70 – 73.