



大规模 MIMO 系统中基于图着色的半动态导频分配

许方敏, 钱慧, 曹海燕

(杭州电子科技大学通信工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 针对大规模 MIMO 系统中存在的导频污染问题, 提出了一种基于图着色的半动态导频分配方案。首先, 推导出各个小区可以复用导频的用户与其服务基站的最大距离门限。然后, 根据该门限值将系统内各小区的用户分为小区中心用户和小区边缘用户; 允许各个小区门限值之内的用户 (小区中心用户) 复用相同的导频; 最后, 基于图着色理论协同分配各个小区的小区边缘用户的导频, 达到降低导频干扰的目的。仿真结果显示, 该方案减少了用户间的导频干扰, 有效地提升了整个系统的上行可达和速率。

关键词: 大规模 MIMO; 导频污染; 图着色; 可达和速率

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2020184

Semi-dynamic pilot allocation based on graph coloring in massive MIMO systems

XU Fangmin, QIAN Hui, CAO Haiyan

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

Abstract: To alleviate the performance loss caused by pilot contamination in massive multiple-input multiple-output (MIMO) systems, a semi-dynamic pilot allocation scheme based on graph coloring was proposed. Firstly, a pilot reuse threshold was derived for users. Then, based on the pilot reuse threshold, users of each cell are divided into cell-center users and cell-edge users, where cell-center users were allowed to reuse the same pilot. Finally, based on the graph coloring theory, the pilot resources were allocated to cell-edge users with serious pilot interference by multi-cell coordination. The simulation results show that the proposed pilot allocation scheme reduces the pilot interference and improves the uplink achievable rate of the whole system effectively.

Key words: massive MIMO, pilot contamination, graph coloring, total achievable rate

1 引言

近年来, 作为 5G 研究的关键技术, 大规模多输入多输出 (multiple-input multiple-output,

MIMO) 技术已经成为无线通信行业的重点研究内容^[1-2]。为充分发挥大规模 MIMO 技术的优势, 准确地估计信道状态信息 (channel state information, CSI) 是至关重要的。目前, 大多数研究都

收稿日期: 2020-01-17; 修回日期: 2020-06-18

基金项目: 浙江自然科学基金资助项目 (No.LY20F10009)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of Zhejiang Province of China (No.LY20F10009)



是基于时分双工 (time division duplexing, TDD) 系统的, 利用信道的互易性获取 CSI。但因为正交导频数量有限, 所以会出现距离较近的小区用户被分配相同导频的情况, 这就导致基站接收导频信息时无法区分信息是来自哪个小区的用户, 造成信道估计误差, 进而影响下行链路预编码的性能, 这就是导频污染现象^[3]。因为在用户数目不变, 而基站天线数目不断变大的情况下, 小区内的干扰以及不相关的噪声会显著减少^[4-5], 但即使在天线数目变大时相邻小区因复用导频引起的导频污染也不会缓解, 所以导频污染是研究大规模 MIMO 系统的一大难题。

传统的导频分配方案是系统内各小区复用同一组正交导频序列, 但在消除小区内各用户之间干扰的同时, 相邻小区用户间的导频污染却被忽视了。因此, 有效抑制相邻小区用户间干扰成为研究的热点^[6-16]。参考文献[6]采用导频时移抑制导频污染, 此方案在小区间同步传输的基础上保证小区内导频时隙和相邻小区的数据时隙对齐实现导频污染的缓解, 但此方案带来的后果是导频和数据间的相互干扰, 又需做另外的处理。参考文献[7]重构帧结构中导频的位置, 将目标小区发送导频的时间与其相邻小区发送导频的时间错开, 在某种程度可以达到降低导频污染的效果, 但是不能保证时间上准确对齐, 因而实现起来比较难。参考文献[8]从信道估计角度, 基于信道协方差理论提出低速率协调方法, 结果表明在一定程度上缓解了导频污染, 但此方案有计算复杂度较高的缺点。同一小区的不同部分之间的用户被分配相互正交的导频, 同时有效地减轻了导频污染, 但是系统正交导频开销较大。参考文献[9]将整个通信系统中每个小区等额地划分成 6 个部分, 同一小区的不同部分之间的用户被分配相互正交的导频, 同时有效地减轻了导频污染, 但是系统正交导频开销较大。参考文献[10]提出了人工鱼群算法, 以用户的和速率为目标实现最优化

导频分配, 但当小区和用户数目增长时, 其算法复杂度也随之增长。参考文献[11]以目标小区中具有最差信道质量的用户的 SINR 的最大化为前提, 基于各用户与基站之间的信道质量不同, 对目标小区相邻小区边缘用户进行动态导频分配使目标小区的导频污染得到有效缓解。参考文献[12]通过引入下行导频得到精确的下行预编码向量, 显著提高了下行速率。但这增加了导频开销, 而且也需要考虑下行导频干扰带来的性能损失问题。除此之外, 还有一些参考文献提出了先对用户进行分组, 再对不同组的用户采用不同导频分配的策略。比如: 参考文献[13]提出一种联合用户分组和联盟博弈的导频分配方案, 让接收基站信号强度弱的小区边缘用户使用相互正交的导频, 其余用户则借助联盟博弈重复使用剩余的导频。参考文献[14-15]提出了分数导频复用和软导频复用策略, 在导频数量足够的时候可以用很低的复杂度获得相当高的性能。但在导频数量等于或小于每个小区的用户数时, 不能为所有边缘用户分配正交导频, 导致很多用户得不到服务。

针对现有导频分配方案在性能和复杂度间难以折中的问题, 基于参考文献[11]的分配方案和参考文献[14-15]的用户分组思想, 本文采取了集中优先分配导频资源给受污染严重的边缘用户分配导频的方案, 目的是最大化信噪比以及下行可达和速率。但不同的是, 考虑到小区边缘用户受导频污染更严重, 本文首先推导出各个小区复用导频的用户与其服务基站的门限值, 根据该门限值将用户分为小区中心用户和小区边缘用户, 各小区中心用户复用相同导频, 而边缘用户则在图着色的基础上进行动态导频分配, 以达到优先分配导频资源给受污染严重的边缘用户的目的。仿真结果可知, 本文方案在一定程度上缓解了导频污染, 提升了上行平均可达和速率的效果。

2 系统模型

考虑大规模 MIMO TDD 系统由 L 个小区组成, 其中每小区配备一个具有 M 根天线的基站和 K 个单天线的用户。借助上行训练序列可获得信道估计, 第 j 个小区的第 k 个用户 $u(j,k)$ 到第 l 个小区基站信道模型为:

$$h_{l,jk} = g_{l,jk} \sqrt{\beta_{l,jk}} \quad (1)$$

其中, $g_{l,jk}$ 表示小尺度衰落矢量, 满足 $CN(0, I_M)$ 分布; 而 $\beta_{l,jk}$ 是大尺度衰落系数, 可以表示为:

$$\beta_{l,jk} = \frac{z_{l,jk}}{(r_{l,jk} / R)^\alpha} \quad (2)$$

其中, $r_{l,jk}$ 是用户 $u(j,k)$ 到第 l 个小区基站的距离; α 表示路径损耗衰落系数; $z_{l,jk}$ 表示阴影衰落。

2.1 上行信号的传输以及基站侧信号的处理

上行链路中为获得 CSI, 用户需要发送导频序列, 基站通过导频序列来进行信道的估计。假设可用的导频序列数目为 K , 则导频序列 $\Phi \in \mathbb{C}^{K \times \tau}$ 可以表示为:

$$\Phi = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_K] \quad (3)$$

其中, τ 是导频序列的长度, ϕ_k 表示第 k 个用户的导频序列, 因为系统内正交导频资源有限, 所以所有小区使用同一组导频, 但为保证同一小区用户不存在干扰, 需对其分配相互正交的导频, 则满足正交特性:

$$\phi_{k_1} \cdot \phi_{k_2}^H = \begin{cases} \tau, & k_1 = k_2 \\ 0, & k_1 \neq k_2 \end{cases} \quad (4)$$

假设系统内所有小区全复用同一组正交导频, 且所有小区中第 k 个用户被分配导频 ϕ_k , 第 j 个小区基站接收到的导频信号可以表示为:

$$Y_j^P = \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K \rho_{jk} h_{l,jk} \phi_k^H + N_j^P \quad (5)$$

其中, ρ_{jk} 表示第 j 个小区中第 k 个用户的导频发射功率; N_j^P 表示 $M \times \tau$ 维独立同分布的加性高斯

白噪声矩阵。

联合式 (4) 中导频正交特性, 对导频 ϕ_k 做归一化处理, 则第 j 个小区基站关于导频 ϕ_k 的信号为:

$$y_{jk}^P = Y_j^P \frac{\phi_k}{\|\phi_k\|} = \sqrt{\tau} \sum_{l=1}^L \sqrt{\rho_{jk}} h_{l,jk} + n_{jk}^P \quad (6)$$

其中, $n_{jk}^P = N_j^P \frac{\phi_k}{\|\phi_k\|}$ 。

假设 $\hat{h}_{j,jk}$ 为 $h_{j,jk}$ 的估计值, 则 MMSE 估计结果为:

$$\hat{h}_{j,jk} = \sqrt{\rho_{jk}} h_{j,jk} + \sum_{l=1, l \neq j}^L \sqrt{\rho_{jk}} h_{l,jk} + z_{jk} \quad (7)$$

其中, z_{jk} 为高斯白噪声。

上行链路中, 系统内所有用户利用相同的时频资源向基站发送数据信号, 则第 l 个小区的基站接收的信号为:

$$y_l^u = \sqrt{\rho_u} \sum_{j=1}^L \sum_{k=1}^K h_{l,jk} x_{jk}^u + n_l^u \quad (8)$$

其中, x_{jk}^u 表示系统内第 j 个小区中的第 k 个用户发送的数据符号, 且此数据可以归一化 $E\{|x_{jk}^u|^2\} = 1$, ρ_u 是上行链路的用户发送数据的平均传输功率, 且 $\rho_u > 0$; $h_{l,jk}$ 表示第 j 个小区中的第 k 个用户与第 l 个小区的基站信道向量, 且满足 $h_{l,jk} \sim CN(0, \beta_{l,jk} I_M)$; 而 n_l^u 是满足 $n_l^u \sim CN(0, \sigma^2 I_M)$ 的加性高斯白噪声。

信道估计的基础上, 基站要对接收到信号进行信号检测才能把来自不同小区用户的上行数据分离开来, 假设基站采用匹配滤波器 (MF) 进行检测, 则可以获得第 j 个小区、第 k 个用户检测后的信号是:

$$\hat{x}_{jk}^u = \hat{h}_{j,jk} y_j^u = \sqrt{\rho_u} \cdot (\sqrt{\rho_{jk}} h_{j,jk}^H h_{j,jk} x_{jk}^u + \sum_{l=1, l \neq j}^L h_{j,lk}^H h_{j,lk} x_{lk}^u) + \varepsilon_{jk}^u \quad (9)$$

其中, x_{jk}^u 表示第 j 个小区、第 k 个用户发送的原始数据, ε_{jk}^u 表示包括不相干噪声在内的其他的不



相干干扰。式(9)等号右边的第一项表示第 j 个小区收到来自本小区的移动用户发送的导频信号,而第二项则是来自干扰小区中移动用户发送的导频信号。明显可以看出,第 j 个小区基站接收的信号,不仅仅来自于本小区的移动用户,还来自其他干扰小区中使用相同导频移动用户发送的信号。则上行链路中第 j 个小区的第 k 个用户的信号与干扰噪声比(signal to interference plus noise ratio, SINR)可表示为^[12]:

$$\text{SINR}_{jk}^u = \frac{\rho_{jk} |h_{j,jk}^H h_{j,jk}|^2}{\sum_{l=1, l \neq j}^K \rho_{lk} |h_{j,lk}^H h_{j,lk}|^2 + \frac{|\varepsilon_{jk}|^2}{\rho_u}} \quad (10)$$

特别地,在大规模 MIMO 系统中,当基站天线的数目 M 渐近于无穷的时候,式(10)中上行渐近 SINR 可以表示为:

$$\text{SINR}_{jk}^u \stackrel{M \rightarrow \infty}{\approx} \frac{\rho_{jk} \beta_{j,jk}^2}{\sum_{l=1, l \neq k}^L \beta_{j,lk}^2 \rho_{lk}} \quad (11)$$

则第 j 个小区第 k 个用户的上行期望可达传输速率可以表示为:

$$R_{jk}^u = E\{\ln(1 + \text{SINR}_{jk}^u)\} \quad (12)$$

联合式(11)和式(12)可知,当天线数无穷大时,影响系统性能 R_{jk}^u 的唯一原因是导频污染,它使得用户上行可达速率也不会随着天线数目的增加而增加,而是趋于一个饱和值。

2.2 基于图着色算法的半动态导频分配

本文方案先基于信道质量将小区内的用户分成中心和边缘用户,使各个小区中心用户使用同一组导频,而边缘用户则是在传统图着色基础上进行导频分配。

由上分析可知,小区中心用户收到的干扰比小区边缘用户的干扰小,因而对小区用户的划分可根据式(11)的用户上行渐近 SINR 划分,其规则如下:

$$\begin{cases} \frac{E(\beta_{i,ik}^2)}{E\left(\sum_{j=1, j \neq i}^L \beta_{i,jk}^2\right)} > T_i, \text{中心用户} \\ \frac{E(\beta_{i,ik}^2)}{E\left(\sum_{j=1, j \neq i}^L \beta_{i,jk}^2\right)} \leq T_i, \text{边缘用户} \end{cases} \quad (13)$$

其中, T_i 代表第 i 个小区中心用户和边缘用户的平均信干噪比门限值,考虑信号干扰强度最差的情况,可以得出:

$$\frac{E\beta_{i,ik}^2}{E\sum_{j=1, j \neq i}^L \beta_{i,jk}^2} > \frac{E(\min_k \beta_{i,ik}^2)}{(L-1)E(\max_{j,k} \beta_{i,jk}^2)} > T \quad (14)$$

结合式(2)和式(14)可以得到:

$$\begin{cases} r_{i,ik} < \rho_i, \text{小区中心用户} \\ r_{i,ik} \geq \rho_i, \text{小区边缘用户} \end{cases} \quad (15)$$

即以小区基站为圆心、一定的门限阈值为半径,在圆内的为小区中心用户,在其外的为小区边缘用户,具体如图1所示。假设目标小区周围有6个相邻的干扰小区,可以得出第 i 小区的门限值为:

$$\rho_i = \frac{\sqrt{3}R}{(T_i/6)^{\frac{1}{2\alpha}} + 1} \quad (16)$$

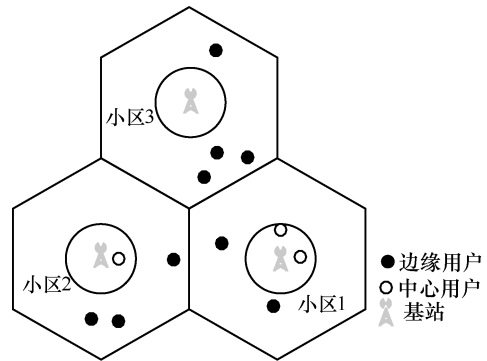


图1 用户分类

通过调整 T_i , 可以适当地调整内部区域和外部区域用户数分配,使其更合理地安排。

从式(14)~式(16)中复用导频的门限值的

推导过程得出, 小区中心用户可以复用同一组导频。下面, 本文将基于图着色算法对小区边缘用户进行导频分配。其中, 传统的图着色算法是先对顶点的度数进行降序排序, 再最大程度地复用颜色来对它们依次着色^[13]。本文借助边权值干扰图, 优先给边的权值较大的边缘用户, 即导频污染较为严重的用户分配导频。

不同小区用户之前的导频污染程度如图 2 所示, 连接两用户的那条边的权值大小 $W_{(j,k)(i,l)}$ 即表示受导频污染严重程度。

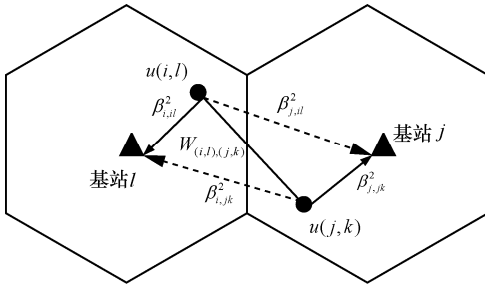


图 2 不同小区用户之间的导频污染程度

鉴于小区用户与基站间大尺度衰落不同的特点, 为最大化式 (12) 的上行可达和速率, 本文采用 $W_{(i,l)(j,k)}$ 表示并不同小区的两用户之间的边的权值即导频污染程度。

$$W_{(i,l)(j,k)} = \frac{\beta_{i,jk}^2}{\beta_{j,jk}^2} + \frac{\beta_{j,il}^2}{\beta_{i,il}^2} + \frac{\beta_{i,jk}^2}{\beta_{j,jk}^2} \frac{\beta_{j,il}^2}{\beta_{i,il}^2} \quad (17)$$

具体整个小区的导频分配流程为: 首先将小区内用户分为小区中心用户和小区边缘用户 (步骤 (1)), 再将这组正交导频的前 N 个导频用于各小区中心用户的复用, 其中小区的 nums_k 个中心用户依次被分配导频 (步骤 (2)), 然后对干扰小区的边缘用户进行基于图着色的导频分配, 其主要包括 3 个部分: 初始化、用户选择以及导频选择。其伪代码如下所示。

算法 1 基于图着色的半动态导频分配算法

(1) 系统内小区的用户分类,

for $r_{i,ik} < \rho_i$

通过式 (16) 计算 ρ_i

for $r_{i,ik} < \rho_i$

if $r_{i,ik} < \rho_i$

$u_{i,ik} \in U_{in}$

$\text{nums}_i = \text{nums}_i + 1$

else

$u_{i,ik} \in U_{out}$

end if

end for

end for

$N = \max[\text{nums}_1, \text{nums}_2, \dots, \text{nums}_L]$

(2) 计算所有小区中心用户数目最大值 $N = \max[\text{nums}_1, \text{nums}_2, \dots, \text{nums}_L]$ 将系统内导频序列 $\Phi = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_K]$ 的前 N 个导频序列 $[\phi_1, \dots, \phi_N]$ 用于系统所有小区的中心用户的复用; 剩余的导频 $[\phi_{N+1}, \phi_{N+2}, \dots, \phi_K]$ 用于系统内边缘用户的导频分配, 给每个小区内中心用户依次分配导频 $[\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_{\text{nums}_k}]$, 其中 $\text{nums}_k \leq N$ 。

for $W_{(i,l)(j,k)}$

for $k=1:\text{nums}_k$

$u_{in}(i, k) \leftarrow \phi_k$

end for

end for

(3) 根据式 (17) 计算所有边缘用户之间的导频污染的导频污染 $W_{(i,l)(j,k)}$

(4) 选择 $W_{(i,l)(j,k)}$ 值最大的所对应的两个用户:

$$\{i_1, k_1, i_2, k_2\} = \arg \max W_{(i,l)(j,k)}$$

(5) 令 $\Phi_s = [\phi_{N+1}, \dots, \phi_K] = [\phi_{s,1}, \phi_{s,2}, \dots, \phi_{s,K-N}]$,

给选中的两个用户分配导频

$$\varphi(i_1, k_1) = \phi_{s,1}; \quad \varphi(i_2, k_2) = \phi_{s,2}$$

(6) $\Omega = \{u(i_1, k_1), u(i_2, k_2)\}$

(7) 剩余未分配用户数为 $W_{(i,l)(j,k)}$, while

($W_{(i,l)(j,k)}$), do

(8) 引入新参数 $\sigma_{(i,k)} = \sum_{(i,k) \notin \Omega, (j,k') \in \Omega} W_{(j,k')(i,k)}$,

则 $(i_0, k_0) = \arg \max \{\sigma_{(i,k)}, (i,k) \notin \Omega\}$

(9) 构建最优导频集: $\Gamma_s = \{\phi_{s,n} : \phi_{s,n} \neq \phi_{i_0,k}\}$,



$$\forall \phi_{s,n} \in \Phi_s$$

$$(10) \gamma_{\phi_{s,n}} = \sum_{\{(i,k) \in \Omega, \phi_{i,k} = \phi_{s,n}\}} W_{(i_0, k_0), (i, k)}, \forall \in \Gamma_s$$

$$(11) \varphi(i_0, k_0) = \arg \min_{\phi_{s,n}} \{\gamma_{\phi_{s,n}}, \phi_{s,n} \in \Gamma_s\}$$

$$(12) \Omega = \Omega \cup \{u(i_0, k_0)\}; W_{(i, l), (j, k)}$$

接下来对边缘小区导频分配做详细解释。

根据算法 1 可知, 小区边缘用户的导频分配是先进行初始化(步骤(3)~(6)): 在无向加权图中选择 $W_{(i, l), (j, k)}$ 值最大的边所连接的两个用户 $u(i_1, k_1)$ 和 $u(i_2, k_2)$; 在步骤(5)中, 对上面导频污染最大的两个用户分别分配导频 $\phi_{s,1}$ 和 $\phi_{s,2}$; 步骤(6)中将上面选择的用户添加到 Ω 集合中进行初始化。之后, 再对剩余未分配导频的用户依次分配, 直到所有用户都获得相应导频。

再进行用户的选择(步骤(8)): 引入一个新的参数 $\sigma_{(i,k)}$, 用来定义用户 $u(i,k)$ 与 K_2 中各个用户之间的导频污染总和, 去除 Ω 中用户, 选出 $\sigma_{(i,k)}$ 值最大时所对应的用户 $u(i_0, k_0)$ 。

最后进行导频的分配(步骤(9)~(12)): 步骤(9)中构建最优导频集 Γ_s , 为保证排除小区内干扰即同一小区内不存在导频复用, 则 Γ_s 中不包含第 i_0 小区已经被使用的导频; 步骤(10)假设用户 $u(i_0, k_0)$ 分配导频 $\phi_{s,n}$, 本文定义了 $\gamma_{\phi_{s,n}}$ 来表示在 Ω 集合中使用导频 $\phi_{s,n}$ 的用户与 $u(i_0, k_0)$ 的之间的导频污染程度, 也就是 $\phi_{s,n}$ 被使用的次数; 步骤(11)中将最小的 $\gamma_{\phi_{s,n}}$ 所对应的导频 $\phi_{s,n}$ 分配给受污染程度最大的用户, 之后再将分配好导频的用户 $u(i_0, k_0)$ 添加到集合 Ω 中。依次类推, 直到 $K_2=0$ 的时候, 则系统内所有小区边缘用户都将被分配相应导频。

3 仿真结果与分析

本文将对所提的基于图着色的半动态导频分配方案进行仿真分析, 并将其与传统随机导频分配方案即系统内各小区复用同一组正交导频序列的方案 1, 参考文献[11]中的导频分方案 2 以及方

案 3 进行对比, 其中, 方案 3 采用经典的穷尽搜索法使得系统的平均可达和速率最优。其仿真参数归纳为表 1。

表 1 仿真参数

参数	数值
小区数 L	3
基站天线数目 M	50~400
小区用户数 K	4
小区半径 R/m	500
路径损耗因子 α	3.8
对数阴影衰落/dB	8
导频数目	[9, 11, 13]
导频发射功率/dB	[-30, 30]
用户发射功率/dB	30

仿真中, 每个小区随机分布了 K 个单天线用户, 而每个基站有 M 根天线。

图 3 为天线数目 M 趋向于无穷时, 用户平均可达和速率的累积概率分布函数。由图 3 可以看出, 本文方案的上行平均可达和速率明显优于方案 1、方案 2。这是因为本文所提出的方案效地避开了导频干扰严重的用户复用导频。同时, 本文方案的性能接近于最优的穷尽搜索算法。

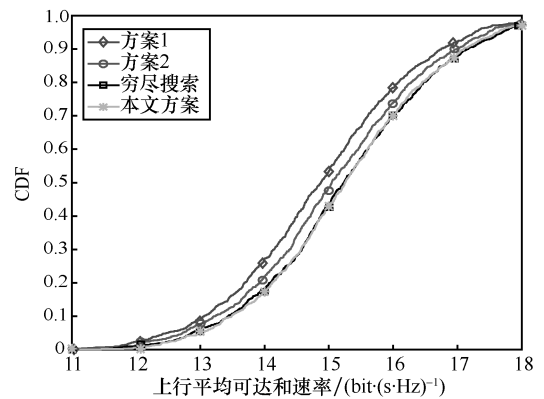


图 3 用户上行平均可达和速率的累积概率分布函数

上行链路平均可达和速率随着基站的天线数目的变化趋势如图 4 所示。由图 4 可以看出, 随着基站的天线数增加, 上行可达和速率也不断地

增大。而当天线数增长到一定程度时,用平均可达和速率逐渐变缓。其主要原因是天线数目较少时,系统性能主要受限于基站的天线数目,而天线数目较大的时候,系统性能主要受限于导频污染,因而即使添加基站天线数目,上行可达和速率变化也不会很大。与此同时,对比 4 条仿真曲线可知,本文提出的导频分配方案,在不同天线数目条件下,都明显优于方案 1 以及方案 2,接近于穷尽搜索方案。

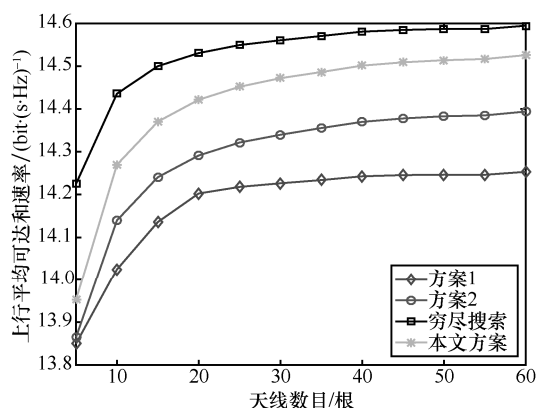


图4 上行平均可达和速率随基站天线数目 M 的变化

上行平均可达和速率随上行导频平均功率的变化趋势如图 5 所示,由图 5 可知,随着上行导频发射功率的增长,上行平均可达和速率不断增长,可以发现当功率较小的时候,这种增长速率很快,但当上行导频发射速率达到某个水平之后,这种增长趋势逐渐平缓,即通过提高上行发射速率提高系统性能的能力是有限的。与此同时,对比方案 1 以及方案 2,本文提出的导频分配方案进一步提升了上行可达和速率,缓解了导频污染带来的影响。

在复杂度方面,方案 1 的复杂度为 $O(KL)$,方案 2 的复杂度为 $O(K^2L^2)$,穷尽搜索的复杂度为 $O(K!)^L$,本文方案的复杂度为 $O(K^2L(K-K_l))$ 。比较了 4 种算法的复杂度如图 6 所示,可以看到,穷尽搜索复杂度最高,远远高于其他算法的复杂度,在用户数为 4 的时候已经超过 10^4 了,当用户

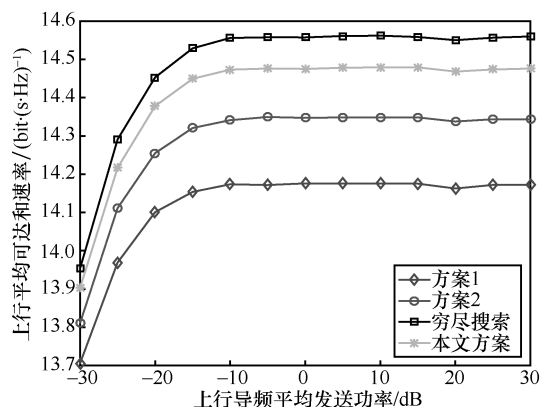


图5 上行平均可达和速率随上行导频平均功率的变化

数再增大时,由于复杂度太高,与其他算法不在一个数量级,因此没有显示在图 6 的坐标中。综合来说,本文算法在复杂度和性能方面能得到比较好的折中。

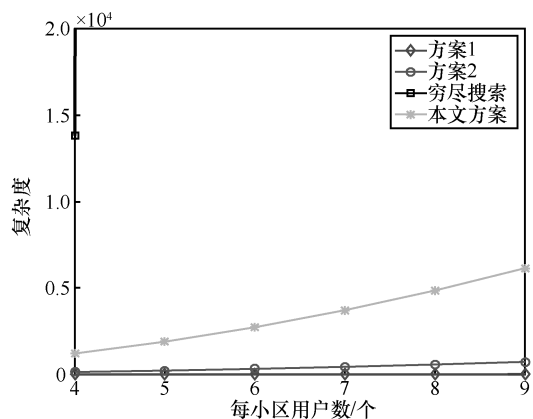


图6 复杂度比较

4 结束语

本文针对大规模 MIMO 系统中存在的导频污染问题,提出了一种基于图着色的半动态导频分配方案。通过阈值的推导与分析,本文得出在基站一定范围内的用户可以复用导频,而某些用户集合需要协同分配导频。因此,根据所得出的门限值,将用户划分为小区中心用户和小区边缘用户,再基于图着色的理论基础对小区边缘用户进行动态地分配导频。这种结合小区中心用户静态复用和小区边缘用户动态分配的半动态导频分



配方法有效地降低了导频分配的复杂度。仿真结果表明, 本文提出的方案有效地缓解了导频污染带来的系统性能损失, 提高了系统的上行可达和速率。

参考文献:

- [1] WU J, ZHANG Y, ZUKERMAN M, et al. Energy-efficient base-stations sleep-mode techniques in green cellular networks: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(2): 803-826.
- [2] KLAUS D, HENDRIK B. 6G vision and requirements: is there any need for beyond 5G? [J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2018, 13(3): 72-80.
- [3] CHOI J, CHANCE Z, OVE D J, et al. Noncoherent trellis coded quantization: a practical limited feedback technique for massive MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 1(12): 5016-5029.
- [4] ADHIKARY A, ASHIKHMIN A, MARZETTA T L. Uplink interference reduction in large scale antenna systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(5): 2194-2206.
- [5] BJORNSSON E, LARSSON E G, DEBBAH M. Massive MIMO for maximal spectral efficiency: how many users and pilots should be allocated?[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(2): 1293-1308.
- [6] FERNANDERS 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.
- [7] MAHYIDDIN W, MARTIN P A, MITH P J. Pilot contamination reduction using time-shifted pilots infinite massive MIMO systems [C]//Proceedings of IEEE 80th Vehicular Technology Conference (VTC Fall). Piscataway: IEEE Press, 2014: 1-5.
- [8] HAIFAN Y, DAVID G F. 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.
- [9] ZHAO Z, CHEN Z, LIU Y. Cell sectorization-based pilot assignment scheme in massive MIMO systems[C]//Proceedings of Wireless Telecommunications Symposium. New York: ACM Press, 2015: 1-5.
- [10] ZHANG N, AI Z Q, HANG B, et al. Algorithm based pilot allocation scheme for massive MIMO system[C]//Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Communication Systems (ICCS). Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-5.
- [11] ZHU X, WANG Z, DAI L, et al. Smart pilot assignment for massive MIMO[J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(9):

1644-1647.

- [12] QIAN C, YANG H, LI G. Massive MU-MIMO downlink training with orthogonal pilots allocation[C]//Proceedings of International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [13] 智慧, 王飞跃, 黄子菊. 大规模 MIMO 系统中联合用户分组和联盟博弈的动态导频分配方案[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(10): 1-8.
- ZHI H, WANG F Y, HUANG Z J. Dynamic pilot allocation scheme for joint user grouping and alliance game in massive MIMO systems[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2020, 42(10): 1-8.
- [14] PARIDA P, DHILLON H S. Stochastic geometry-based uplink analysis of massive MIMO systems with fractional pilot reuse[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(3): 1651-1668.
- [15] LI Y, WANG R, ZHANG Z Z. Massive MIMO downlink goodput analysis with soft pilot or frequency reuse[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2018, 7(3): 448-451.
- [16] ZHU X, DAI L, WANG Z. Graph coloring based pilot allocation to mitigate pilot contamination for multi-cell massive MIMO systems[J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(10): 1842-1845.

[作者简介]



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。



钱慧 (1994—), 女, 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、大规模天线系统的导频污染、导频资源分配策略等。



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。