

## 大规模 MIMO 系统中动态导频分配

方昕<sup>①②</sup> 张建锋<sup>\*①</sup> 曹海燕<sup>①</sup> 刘超<sup>①</sup> 潘鹏<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(杭州电子科技大学通信工程学院 杭州 310016)

<sup>②</sup>(东南大学移动通信国家重点实验室 南京 210024)

**摘要:** 针对大规模多输入多输出(MIMO)系统中存在的导频污染问题, 该文提出一种动态导频分配方案。所提方案利用目标小区与干扰小区用户之间的信号干扰强度差将干扰小区分为  $U_{in}$  和  $U_{out}$  两类, 并对  $U_{in}$  中的用户进行最优导频分配,  $U_{out}$  中的用户进行随机导频分配来提升系统的平均下行可达和速率。同时, 在存在额外正交导频组的情况下对所提方案做了进一步优化。仿真结果表明, 所提的动态导频分配方案能够有效地提升大规模 MIMO 系统的性能。

**关键词:** 大规模多输入多输出; 导频污染; 导频分配; 可达和速率

**中图分类号:** TN929.5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2016)08-1901-07

**DOI:** 10.11999/JEIT151091

## Dynamic Pilot Allocation in Massive MIMO System

FANG Xin<sup>①②</sup> ZHANG Jianfeng<sup>①</sup> CAO Haiyan<sup>①</sup> LIU Chao<sup>①</sup> PAN Peng<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(School of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310016, China)

<sup>②</sup>(National Mobile Communication Laboratory of Southeast University, Nanjing 210024, China)

**Abstract:** A dynamic pilot allocation scheme is proposed in case of the pilot contamination existing in massive MIMO system. Based on the signal to interference difference between the aim cell user and the interference cell user, the interference cell is divided into  $U_{in}$  and  $U_{out}$ . Specifically, in order to improve the average downlink achievable sum rates, the users in the  $U_{in}$  are operated with the optimal pilot allocation, and the users in the  $U_{out}$  are operated with the random pilot allocation. Simultaneously, the proposed pilot allocation scheme is further optimized with an extral set of orthogonal pilots. Simulation results show that the proposed dynamic pilot allocation scheme can enhance the downlink performance of the massive MIMO system effectively.

**Key words:** Massive MIMO; Pilot contamination; Pilot allocation; Achievable sum rates

### 1 引言

最近, 拥有大量基站天线的蜂窝网络系统成为了无线通信的一个研究热点<sup>[1]</sup>。这就是所谓的大规模 MIMO<sup>[2-4]</sup>, 相对于传统的 MIMO 系统, 其能够提升几十倍的信道容量<sup>[5]</sup>与几百倍的频谱效率<sup>[6]</sup>。随着

大数据<sup>[7,8]</sup>时代的到来, 原有的 LTE 技术越来越不能满足用户对网络的需求, 大规模 MIMO 因其巨大的潜在在 5G 无线通信中有着很好的应用前景。

大规模 MIMO 是一种依赖空间复用的技术, 它需要获得精确的上下行信道状态信息<sup>[9]</sup>(CSI)。上行 CSI 基站可以利用用户发送的导频通过信道估计获得, 但要获得下行 CSI 相对比较困难。在传统的 MIMO 系统中, 下行 CSI 可以通过用户反馈<sup>[10]</sup>获得, 但在高速移动环境下的大规模 MIMO 系统中, 用于下行导频的时频资源和每个用户需要估计的信道均与基站天线数成正比, 在这种情况下, 很难通过反馈来获得下行 CSI。因此, 目前对大规模 MIMO 系统的研究一般基于时分双工<sup>[11]</sup>(TDD)模式, 即上下行信道具有互易性。

在这种基于信道互易性的系统中, 上行导频训练阶段带来的干扰会直接对下行的数据发送产生干扰, 这就是所谓的导频污染<sup>[12-14]</sup>。基于随机矩阵理

收稿日期: 2015-09-23; 改回日期: 2016-05-06; 网络出版: 2016-06-24

\*通信作者: 张建锋 zjf\_hdu@163.com

基金项目: 东南大学移动通信国家重点实验室开放研究基金(2012D18), 国家自然科学基金(61501158), 浙江省教育厅项目(Y201329723), 浙江省固态存储和数据安全关键技术重点科技创新团队项目(2013TD03)

Foundation Items: The Open Research Fund of National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University (2012D18), The National Natural Science Foundation of China (61501158), The Project of Zhejiang Province Educational Department of China (Y201329723), Key Scientific and Technological Innovation Team Project of Solid-state Storage and Data Security Technologies of Zhejiang Province (2013TD03)

论<sup>[2]</sup>的近似分析表明, 小区内的干扰和不相关的噪声会随着基站天线数的不断增加而逐渐消失, 但由复用相同导频引起的小区间干扰并不会随着基站天线数的增加而消失。因此, 导频污染成为了影响大规模 MIMO 系统性能的一个重要因素。

文献[15-19]从导频分配的角度对导频污染问题进行了深入的研究。文献[15,16]提出了利用导频时移来减轻导频污染的导频分配方案, 通过将某个小区内的导频时隙对齐到相邻小区的数据时隙, 在不同小区同步传输方案下有效地抑制了导频污染, 但该方案同时也引入了导频与数据的相互干扰。文献[17]提出了一种基于扇区分类的导频分配方案, 不同扇区中的用户导频在物理空间上相互独立, 从而有效地减轻了导频污染, 在基站天线数足够大时, 极大地提升系统吞吐量。文献[18]提出了一种导频序列分配策略, 该方案的思路是为小区中心的用户分配相同的导频, 而小区边缘的用户分配正交的导频, 从而减轻导频污染, 提升系统的容量, 但当小区边缘的用户数量相对较大时, 如何获得所需数量的正交导频序列是一个必须解决的问题。文献[19]考虑到不同用户与基站之间的信道质量可能不同的情况, 提出了一种智能导频分配方案来减轻导频污染, 并证明该方案能够有效地提升系统的上行 SINR。

本文利用实际通信系统中不同用户与基站之间的大尺度衰落系数不同的特点, 提出了一种基于信号干扰强度差的动态导频分配方案来提升受限于导频污染的系统性能。首先检测目标小区内用户的信号强度与干扰小区内用户的干扰强度, 其次设置信号干扰强度差限对干扰小区进行分类, 最后利用所提的导频分配方案对不同小区的用户进行导频分配, 并在存在额外正交导频组的情况下对该方案进行了优化。仿真结果证明了所提的动态导频分配方案在典型的大规模 MIMO 系统中能够有效地提升系统的下行 SINR。

## 2 系统模型

系统模型如图 1 所示, 考虑一个由  $L$  个小区组成的多用户大规模 MIMO 系统。其中, 每个小区中有  $K$  个单天线用户和一个配备  $M$  根天线的基站。假设信道质量由小尺度衰落系数与大尺度衰落系数同时决定, 则信道可以建模为

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

其中,  $\mathbf{h}_{jlk}$  表示由小尺度衰落系数组成的  $M \times 1$  维向量, 而  $\beta_{jlk}$  表示大尺度衰落系数, 它和用户与基站间的距离及阴影衰落有关, 可以表示为

$$\beta_{jlk} = \frac{s_{jlk}}{(r_{jlk}/R)^\alpha} \quad (2)$$

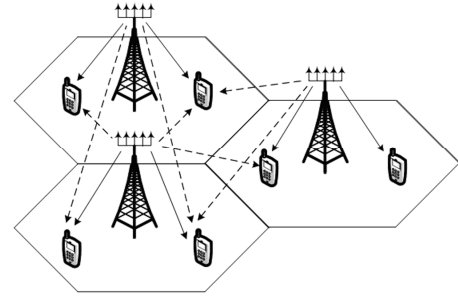


图 1 大规模 MIMO 系统模型

其中,  $s_{jlk}$  表示阴影衰落,  $10 \lg(s_{jlk}) \sim C(0, \sigma_{sh})$ ,  $r_{jlk}$  表示第  $l$  个小区内第  $k$  个用户与第  $j$  个小区基站间的距离,  $R$  为小区半径,  $\alpha$  为路径损耗因子。

### 2.1 上行链路

假设第  $j$  个小区发送长度为  $\tau$  的导频序列  $\boldsymbol{\varphi}_j = [\varphi_{j1}, \varphi_{j2}, \dots, \varphi_{jK}]$ ,  $\boldsymbol{\varphi}_j \in \mathbb{C}^{\tau \times K}$  ( $\boldsymbol{\varphi}_j^H \boldsymbol{\varphi}_j = \mathbf{I}_K$ )。则第  $l$  个小区基站接收到的导频信号可以表示为

$$\mathbf{Y}_l = \sqrt{\rho_r \tau} \sum_{j=1}^L \mathbf{G}_{jl} \boldsymbol{\varphi}_j^T + \mathbf{n}_l \quad (3)$$

其中,  $\rho_r$  表示导频发射功率,  $\mathbf{n}_l$  表示第  $l$  个小区内的加性高斯白噪声。

每个基站利用导频信号获得所需的信道估计值。假设  $\hat{\mathbf{G}}_l$  表示第  $l$  个小区内  $M$  根基站天线与  $K$  个用户之间的信道估计值, 当基站采用简单的匹配滤波器(MF)信道估计时,  $\hat{\mathbf{G}}_l$  可以表示为

$$\hat{\mathbf{G}}_l = \mathbf{Y}_l \boldsymbol{\varphi}_l^* / \sqrt{\rho_r \tau} = \sum_{j=1}^L \mathbf{G}_{jl} \mathbf{P}_{jl} + \mathbf{z}_l \quad (4)$$

其中,  $\mathbf{P}_{jl}$  表示不同小区间导频的互相关系数矩阵,  $\mathbf{z}_l = \mathbf{n}_l \boldsymbol{\varphi}_l^* / \sqrt{\rho_r \tau}$ 。

### 2.2 下行链路

假设基站向用户发送的数据为  $\mathbf{s}_l$ , 预编码矩阵  $\mathbf{A}_l = f(\hat{\mathbf{G}}_l)$ , 其中  $f(\bullet)$  表示基站处特定的预编码技术, 则经预编码之后的数据可以表示为  $\mathbf{A}_l \mathbf{s}_l$ , 此时小区  $j$  内第  $k$  个用户接收到的数据可以表示为

$$x_{jk} = \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^K \sqrt{\rho_f} \mathbf{g}_{jlk}^T \mathbf{a}_{li} \mathbf{s}_l + n_{jk} \quad (5)$$

其中,  $\rho_f$  表示下行数据发射功率,  $\mathbf{a}_{li}$  表示预编码矩阵  $\mathbf{A}_l$  的第  $i$  个列向量,  $n_{jk}$  是  $\mathbf{n}_j$  的第  $k$  个元素。

在传统导频分配方案下第  $j$  个小区内第  $k$  个用户的下行信号干扰噪声比可以表示为

$$\text{SINR}_{jk}^d = \frac{|\mathbf{g}_{jlk}^T \mathbf{a}_{jk}|^2}{\sum_{(l,i) \neq (j,k)} |\mathbf{g}_{jli}^T \mathbf{a}_{li}|^2 + |n_{jk}|^2 / \rho_f} \quad (6)$$

当  $M \rightarrow \infty$  时, 式(6)可以简化为

$$\text{SINR}_{jk}^d \rightarrow \frac{\beta_{jk}\alpha_{jk}}{\sum_{(l,i) \neq (j,k)} \beta_{ji}\alpha_{li}} \quad (7)$$

其中,  $\alpha_{li} = \lim_{M \rightarrow \infty} |a_{li}|^2 / M$ 。

从式(7)可以看出, 当基站天线数趋向于无穷大时, 快衰落效应和系统热噪声将被平均掉。然而, 小区间的干扰即导频污染并不会随着基站天线数的不断增加而逐渐消失。因此, 导频污染的存在是限制大规模 MIMO 系统性能的一个瓶颈。

### 3 导频分配

考虑系统的下行 SINR, 为了方便讨论, 我们将式(7)重新表示为

$$\text{SINR}_{jk}^d \rightarrow \frac{\beta_{jk}\alpha_{jk}}{\sum_{(l,i) \neq (j,k)} \beta_{ji}\alpha_{li}}, \quad \text{s.t. } M \rightarrow \infty \quad (8)$$

从式(8)可以看出, 当基站天线数趋向于无穷大时, 系统的下行 SINR 只与  $\beta_{ji}$  和  $\alpha_{li}$  有关。而对于  $\alpha_{li}$  而言, 无论是 MF 预编码还是 ZF 预编码, 在基站天线数很大时, 其只与  $\beta_{ji}$  和  $\varphi_{li}$  有关。因此, 在大尺度衰落系数  $\beta_{ji}$  确定的情况下, 选用怎样的导频便成为了限制系统下行 SINR 的唯一因素, 这就意味着我们可以通过设计导频分配方案来提高系统的下行 SINR。

#### 3.1 导频分配方案

基于导频分配的下行 SINR 可以建模为

$$\text{SINR}_{jk}^d \rightarrow \frac{\beta_{jk}\alpha_{jk}}{\sum_{\substack{m: \mu(l,i) = \mu(j,k) \\ (l,i) \neq (j,k)}} \beta_{ji}\alpha_{li}}, \quad \text{s.t. } M \rightarrow \infty \quad (9)$$

其中,  $m: \mu(l,i) = \mu(j,k)$  表示的是导频分配, 即对第  $l$  个小区的第  $i$  个用户与第  $j$  个小区的第  $k$  个用户分配相同的导频  $m$ 。

从式(9)可以看出, 系统的下行 SINR 会随大尺度衰落系数  $\beta_{ji}$  的变化而变化。传统的导频分配方案是将一组正交导频随机地分配给小区内的用户, 该方案虽然易于实施, 但其没有考虑邻近小区用户与目标小区基站间的距离对系统下行 SINR 产生的影响。事实上, 当邻近小区与目标小区内用户相对目标小区基站的距离越小, 导频污染越严重; 反之, 导频污染的影响较小。基于以上考虑, 两小区交界处的用户是需要着重考虑的对象, 由于小区交界处的用户相对目标小区基站的距离小, 导频污染势必较为严重, 而远离小区交界处的用户之间相对目标小区基站的距离大, 导频污染相对较轻, 在小区半径足够大的情况下, 这些用户之间的导频污染甚至可以忽略不计。因此本节利用不同小区用户相对目

标小区基站的距离(以下简称相对距离)对不同小区内的用户进行分类, 假设相对距离限为  $r$ , 即当目标小区与干扰小区内用户相对目标小区基站的距离超过  $r$  时, 可以不考虑这些用户之间的导频污染。在上述假设下, 将干扰小区内相对距离小于  $r$  的用户归为一类, 而超过  $r$  的用户归为另一类。

进一步研究可以发现, 不同用户之间距离的远近可以近似等效为用户之间的不同信道。在大规模 MIMO 系统中, 信道的性能主要是受大尺度衰落系数的影响, 从前面的研究中已经得出大尺度衰落系数和用户与基站之间的距离是密切相关的, 即  $\beta_{ji} \rightarrow r_{ji}^{-\alpha}$ 。因此, 本节将利用不同用户与基站之间大尺度衰落系数不同的特点进行动态导频分配。利用目标小区内用户与基站之间的大尺度衰落系数来定义目标小区内用户  $k$  的期望信号, 表示为

$$S_k^{\text{sig}} = \beta_{jk}^2, \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (10)$$

利用邻近小区内用户与目标小区基站之间的大尺度衰落系数来定义邻近小区内用户  $k$  的干扰信号, 表示为

$$S_k^{\text{int}} = \sum_{l \neq j} \beta_{lk}^2, \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (11)$$

在上述条件下, 图 2 给出了基于信号干扰强度差的动态导频分配方案。假设基站已知每个用户的大尺度衰落系数。定义信号干扰的强度差为  $d = |S_k^{\text{sig}} - S_k^{\text{int}}|$ , 考虑信号干扰强度差的界值为  $d_s$ , 即当信号干扰强度差  $d > d_s$  时, 不考虑这些用户产生的导频污染, 而当  $d \leq d_s$  时, 则认为这些用户会产生较为严重的导频污染。在信号干扰强度差限  $d_s$  确定的情况下, 利用  $d_s$  对干扰小区内的用户进行分类: 信号干扰强度差  $d \leq d_s$ , 将这些用户归为第 1 类, 表示为  $U_{\text{in}}$ ; 信号干扰强度差  $d > d_s$ , 则将这些用户归为第 2 类, 表示为  $U_{\text{out}}$ 。

对小区用户进行分类后, 考虑每个小区内用户的导频分配问题。假设其中一个特定的小区为目标小区, 而邻近小区为干扰小区。在目标小区中我们用传统的导频分配方案为用户分配导频, 而对于干

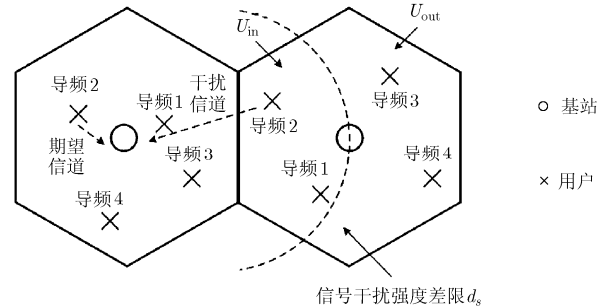


图 2 基于信号干扰强度差的导频分配

扰小区，利用小区间协作的优势，干扰小区能够获得目标小区内导频分配的信息。基于以上考虑，本节利用所提的基于信号干扰强度差的动态导频分配方案为干扰小区进行导频分配，该导频分配方案可以建模为

$$\left. \begin{aligned} & \arg \max_{\{A^{\text{opt}}\}, k=1,2,\dots,K_{\text{in}}} \sum_k \frac{\beta_{ijk} \alpha_{jk}}{\sum_{(l,i_{\text{in}}) \neq (j,k)} \beta_{jli_{\text{in}}} \alpha_{li_{\text{in}}}}, \text{ s.t. } d \leq d_s \\ & \arg_{\{A^{\text{rnd}}\}, k=1,2,\dots,K_{\text{out}}} \frac{\beta_{ijk} \alpha_{jk}}{\sum_{(l,i_{\text{out}}) \neq (j,k)} \beta_{jli_{\text{out}}} \alpha_{li_{\text{out}}}}, \text{ s.t. } d > d_s \end{aligned} \right\} (12)$$

其中，式(12)的第 1 部分表示对  $U_{\text{in}}$  进行导频分配， $\{A^{\text{opt}}\}$  表示最优的导频分配方案，该分配方案能够使系统的平均下行 SINR 达到最大， $K_{\text{in}}$  表示该类小区内的用户个数；而式(12)的第 2 部分则表示对  $U_{\text{out}}$  进行导频分配， $\{A^{\text{rnd}}\}$  表示一种随机的导频分配方式， $K_{\text{out}}$  表示该类小区内的用户个数。基于式(12)的导频分配算法由表 1 给出。

假设两个小区使用同一组正交导频，定义  $\psi_k$  为目标小区内第  $k$  个用户的导频， $d_s$  为给定的信号干扰强度差界值， $E(\bullet)$  为求信号强度的函数， $\mu_{\beta_k}^{\text{aim}}$  和  $\mu_{\beta_k}^{\text{adj}}$  分别为目标小区和干扰小区内的第  $k$  个用户。利用式(10)定义信号强度的方式对目标小区内的用户按信号强度降序排序，其中信号强度最弱的用户为  $\mu_{\beta_K}^{\text{aim}}$ 。

通过比较信号强度和干扰强度差值的绝对值与  $d_s$  的大小，将干扰小区内的用户分为  $U_{\text{in}}$  和  $U_{\text{out}}$  两类：对于  $U_{\text{in}}$  内的用户按照干扰强度从小到大进行升序排序，而  $U_{\text{out}}$  内的用户则进行随机排序。若得到  $U_{\text{in}}$  内的用户数为  $N$ ，则将目标小区内经排序后的前  $N$  个用户的导频按顺序依次分配给  $U_{\text{in}}$  内排序后的  $N$  个用户，而  $U_{\text{out}}$  内的用户则随机分配目标小区内剩余的导频。该导频分配算法收敛的条件为所有用户均分配到各自的导频。

### 3.2 性能分析

本小节中，我们将证明所提的基于信号干扰强度差的导频分配方案是一种最优的导频分配方案。

考虑式(12)所提的模型，由于该式第 2 部分是随机导频分配，我们仅证明其第 1 部分为最优导频分配。为了便于证明与表示，我们考虑两个小区的情况，并将目标小区内第  $k$  个用户的信号强度表示为

$$v_{jk} = \beta_{ijk} \alpha_{jk}, k = 1, 2, \dots, K \quad (13)$$

干扰小区内第  $k$  个用户的干扰强度为

$$\gamma_{lk} = \beta_{jlk} \alpha_{lk}, k = 1, 2, \dots, K \quad (14)$$

假设有另一种分配方案，其平均 SINR 比所提

表 1 基于信号干扰强度差的导频分配算法

算法 1 基于信号干扰强度差的导频分配算法

输入： $\psi_k, \mu_{\beta_k}^{\text{aim}}, \mu_{\beta_k}^{\text{adj}}, k = 1, 2, \dots, K, d_s, E(\bullet)$

(1) 将  $\psi_k$  分配给目标小区内的第  $k$  个用户；  
 (2) 将目标小区内的用户按信号强度降序排列， $U_{\text{aim}}^{\text{down}}$ ：

$$[\mu_{\beta_1}^{\text{aim}}, \mu_{\beta_2}^{\text{aim}}, \dots, \mu_{\beta_K}^{\text{aim}}]$$

(3) 对干扰小区内的用户分类

for  $k = 1 : K$

if  $|E(\mu_{\beta_K}^{\text{aim}} - \mu_{\beta_k}^{\text{adj}})| \leq d_s$

$$\mu_{\beta_k}^{\text{adj}} \in U_{\text{in}}$$

else

$$\mu_{\beta_k}^{\text{adj}} \in U_{\text{out}}$$

end

end

(4)  $U_{\text{in}}$  用户按干扰强度升序排序， $U_{\text{in}}^{\text{up}} : [\mu_{\beta_1}^{\text{adj}}, \mu_{\beta_2}^{\text{adj}}, \dots, \mu_{\beta_N}^{\text{adj}}]$ ，

$$U_{\text{out}}$$
 用户随机排序， $U_{\text{out}}^{\text{rnd}} : [\mu_{\beta_1}^{\text{adj}}, \mu_{\beta_2}^{\text{adj}}, \dots, \mu_{\beta_{K-N}}^{\text{adj}}]$

(5)  $U_{\text{in}}$  用户导频分配

for  $k = 1 : N$

$$\psi_k : \mu_{\beta_k}^{\text{adj}} \leftarrow \mu_{\beta_k}^{\text{aim}}$$

end

$U_{\text{out}}$  用户导频分配

for  $k = N + 1 : K$

$$\psi_k : \mu_{\beta_k}^{\text{adj}} \leftarrow \mu_{\beta_k}^{\text{aim}}$$

end

输出：干扰小区用户导频  $\psi_k, k = 1, 2, \dots, K$ 。

方案大：

$$\text{SINR}_{k'} = \frac{1}{K} \sum_k \frac{v_{jk}}{\gamma_{lk'}} > \text{SINR}_k = \frac{1}{K} \sum_k \frac{v_{jk}}{\gamma_{lk}} \quad (15)$$

下面我们证明这种分配方案是不存在的。假设干扰小区中的任意一个用户  $k_m$  分配了与目标小区中用户  $k_n$  一样的导频，则干扰小区中一定存在一个用户分配了与目标小区中用户  $k_m$  一样的导频，假设这个用户为  $k_n$ ，则系统的平均 SINR 可以表示为

$$\text{SINR}_{k'} = \frac{1}{K} \left[ \frac{v_{jn}}{\gamma_{ln}} + \frac{v_{jm}}{\gamma_{lm}} + \sum_{\substack{k \neq m \\ k \neq n}} \frac{v_{jk}}{\gamma_{lk}} \right] \quad (16)$$

而所提的基于信号干扰强度差的系统平均 SINR 为

$$\text{SINR}_k = \frac{1}{K} \left[ \frac{v_{jn}}{\gamma_{ln}} + \frac{v_{jm}}{\gamma_{lm}} + \sum_{\substack{k \neq m \\ k \neq n}} \frac{v_{jk}}{\gamma_{lk}} \right] \quad (17)$$

通过比较式(16)与式(17)，不难发现：

$$\frac{v_{jn}}{\gamma_{ln}} + \frac{v_{jm}}{\gamma_{lm}} \leq \frac{v_{jn}}{\gamma_{ln}} + \frac{v_{jm}}{\gamma_{lm}} \quad (18)$$

联合式(16)，式(17)和式(18)，可以得出

$$\text{SINR}_{k'} \leq \text{SINR}_k \quad (19)$$

通过比较式(15)与式(19)可以得出假设不成立，即所提的基于信号干扰强度差的导频分配方案是一种最优的导频分配方案。从以上证明还可以发现最优的导频分配方案可能不止一种，例如当  $v_{jm} = v_{jm}$  或  $\gamma_{lm} = \gamma_{lm}$  时，但此时交换这两个用户的导频对于系统的平均 SINR 没有影响。

### 3.3 基于额外正交导频组的导频分配

上面提出的基于信号干扰强度差的导频分配方案能够在不增加导频资源的条件下有效地提高系统的平均下行 SINR，从而提升系统的性能增益。在导频资源较为丰富的情况下，可以对所提的导频分配方案做进一步优化。该优化方案的思路为：假设所有小区的用户复用同一组正交导频  $\psi_m$ ，同时存在一组额外的正交导频  $\psi_e$  ( $\psi_m \psi_e = \mathbf{0}$ )。如果两小区用户之间的信号干扰强度差  $d \leq d_s$ ，则在额外的正交导频组中选择一个导频分配给干扰小区中对应的用户。这种基于额外正交导频组的导频分配算法由表 2 给出。

表 2 基于额外正交导频组的导频分配算法

**算法 2** 基于额外正交导频组的导频分配算法：  
 输入：  $\psi_{m,k}, \psi_{e,k}, \mu_{\beta_k}^{\text{aim}}, \mu_{\beta_k}^{\text{adj}}, k = 1, 2, \dots, K, d_s, E(\bullet)$   
 (1) 在每个小区中将  $\psi_{m,k}$  分配给对应的第  $k$  用户  
 (2) 选出目标小区中信号强度最小的用户  $\mu_{\text{min}}^{\text{aim}} = \mu_{\beta_k}^{\text{aim}}$   
 (3) 对邻近小区内的用户进行导频分配  
 for  $k = 1 : K$   
     if  $|E(\mu_{\text{min}}^{\text{aim}} - \mu_{\beta_k}^{\text{adj}})| \leq d_s$   
          $\mu_{\beta_k}^{\text{adj}} \leftarrow \psi_{e,k}$   
     end  
 end  
 输出：干扰小区用户导频  $\psi_{m,k}, k = 1, 2, \dots, K$ 。

表 2 中， $\psi_{m,k}$  为所有小区中第  $k$  个用户的导频， $\psi_{e,k}$  为额外正交导频组中的第  $k$  个导频序列， $d_s$  为信号干扰强度差的界值， $E(\bullet)$  为求信号强度的函数。 $\mu_{\text{min}}^{\text{aim}}$  为目标小区中信号强度最弱的用户， $\mu_{\beta_k}^{\text{adj}}$  为干扰小区中第  $k$  个用户，如果干扰小区中第  $k$  个用户  $\mu_{\beta_k}^{\text{adj}}$  与  $\mu_{\text{min}}^{\text{aim}}$  的信号干扰强度差的绝对值小于  $d_s$ ，则将正交导频组中第  $k$  个导频序列  $\psi_{e,k}$  分配给  $\mu_{\beta_k}^{\text{adj}}$ 。算法的收敛条件为所有用户分配到相应的导频。

从以上导频分配算法可以看出，利用额外的正交导频组，该导频分配方案的算法复杂度得到了极大的降低。同时，由于额外正交导频的存在，系统的下行 SINR 将得到进一步提升。

## 4 仿真结果

本节将通过蒙特卡罗法对所提的导频分配方案进行仿真分析。仿真中考虑了一个由  $L$  个小区组成

的蜂窝系统，每个小区包含  $K$  个单天线用户和配备  $M$  根天线的基站。其中，大尺度衰落系数  $\beta_{jlk}$  通过式(2)随机生成。我们将被其他小区包围的中心小区设为目标小区，仿真中的性能均针对目标小区而言。同时，仿真中还将所提方案与传统导频分配方案和文献[19]中的导频方案进行了对比。系统的参数归纳为表 3 所示。

表 3 仿真参数

参数	数值
小区数	$L = 7$
基站天线数	$20 \leq M \leq 260$
每个小区内的用户数	$K = 16$
导频长度	$\tau = 32$
上下行发射功率(dB)	$\rho_r = 10, \rho_t = 20$
小区半径(m)	$R = 1000$
路径损耗因子	$\alpha = 3$
对数阴影衰落(dB)	$\sigma_{\text{sh}} = 8$
信号干扰强度差界值(dB)	$8 \leq d_s \leq 12$

图 3 对比了所提导频分配方案与传统导频分配方案和文献[19]中导频分配方案的下行链路平均可达和速率，其中天线数  $M = 100$ 。从图 3 中可以看出，所提导频分配方案在没有额外正交导频组的情况下，系统的下行链路平均可达和速率会随着信号干扰强度差限  $d_s$  的增加先增加后减小。这是因为当信号干扰强度差限过大时，两小区交界处的用户会分配相同的导频，使得小区交界处的干扰急剧增加，从而降低了系统的性能。当  $d_s$  在 9.5~10.0 dB 范围内时，所提方案的平均可达和速率几乎与文献[19]导频分配方案一样，并且可以发现，当  $d_s$  在 9.9 dB 附近时，所提方案的性能比文献[19]中导频分配方案的性能好。除此之外，当存在额外正交导频组时，所提导频分配方案的性能远远超过文献[19]中的导频分配方案，并且随着  $d_s$  的增加，系统性能将得到进一步提升。

图 4 为系统下行链路 SINR 的累计概率分布曲线，其中信号干扰强度差限  $d_s = 9.9$  dB。从图 4 中可以看出，基站天线数的增加能够有效地提升系统的下行 SINR，当基站天线数从  $M = 48$  增加到  $M = 168$  时，系统的下行 SINR 提升了近 6.5 dB。考虑  $M = 168$  时的情况，所提方案的下行 SINR 比传统的导频分配方案提升了近 1.5 dB，而相较于文献[19]中的导频分配方案，所提方案的性能也得到了小幅度的提升。此外，当存在额外正交导频组时，所提方案的下行 SINR 相对于传统的导频分配方案与文献[19]中的导频分配方案都获得了极大地提升。

图 5 为系统下行链路平均可达和速率随基站天

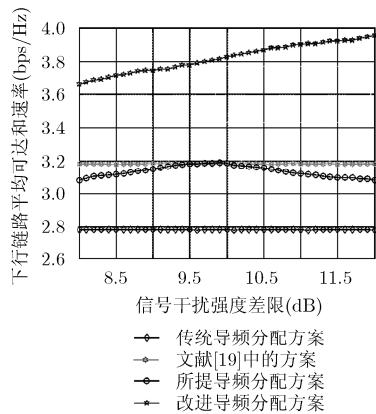


图3 下行链路平均可达和速率随信号干扰强度差限的变化

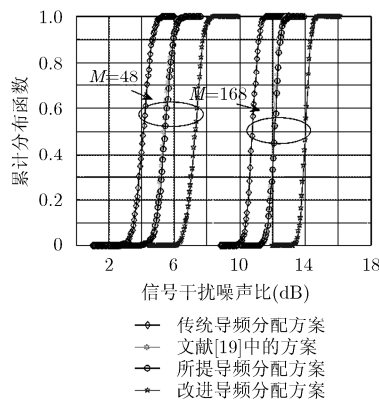


图4 下行链路 SINR 的概率分布函数

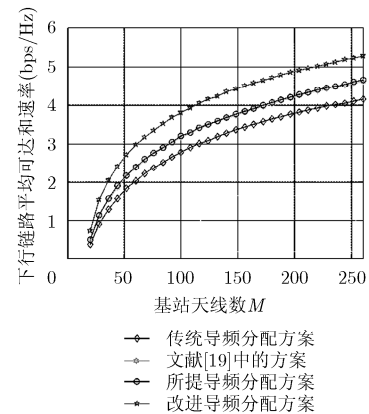


图5 下行链路平均可达和速率随基站天线数的变化

线数的变化趋势, 其中信号干扰强度差限  $d_s=9.9$  dB。从图5中可以看出, 随着基站天线数的不断增加, 系统的可达和速率会不断增加, 且在天线数较少时, 增长速率比较快, 而在天线数较多时, 增长速率变得相对平稳。这是因为天线数较少时, 天线的数量是影响系统性能的主要因素, 而当天线数量已经很大时, 导频污染成了系统性能的主要瓶颈, 导致天线数的增加对系统性能的改善变得不明显。同时可以发现, 无论是与传统的导频分配方案还是与文献[19]中的导频分配方案相比, 所提导频分配方案的系统性能均得到了不同幅度的提升。特别是存在额外正交导频组时, 系统的下行平均可达和速率得到了大幅提升。

## 5 结论

本文提出了一种动态导频分配方案来提升大规模 MIMO 系统的下行平均 SINR。通过采用大尺度衰落特性的衰落信道, 利用不同小区用户之间的信号干扰强度不同的特点, 设置合适的信号干扰强度差限将干扰小区分为两类, 并利用所提的动态导频分配方案对第 1 类小区进行最优导频分配, 对第 2 类小区进行随机导频分配。同时, 在存在额外正交导频组的情况下对以上方案进行了优化。理论分析表明, 所提的动态导频分配方案能够有效地提升系统的下行平均可达和速率。数值仿真结果表明, 所提的动态导频分配方案在信号干扰强度差限为 9.9 dB 时, 系统的性能可以获得最大的提升。

## 参考文献

- [1] LARSSON E, EDFORS O, TUFVESSON F, *et al.* Massive MIMO for next generation wireless systems[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2014, 52(2): 186–195. doi: 10.1109/MCOM.2014.6736761.
- [2] MARZETTA T L. Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, 9(11): 3590–3600. doi: 10.1109/TWC.2010.092810.091092.
- [3] PANZNER B, ZIRWAS W, DIERKS S, *et al.* Deployment and implementation strategies for massive MIMO in 5G[C]. *Globecom Workshops(GC Wkshps)*, 2014: 346–351. doi: 10.1109/GLOCOMW.2014.7063455.
- [4] GAO X, EDFORS O, RUSEK F, *et al.* Massive MIMO performance evaluation based on measured propagation data[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, 14(7): 3899–3911. doi: 10.1109/TWC.2015.2414413.
- [5] 胡堂, 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, 37(9): 2198–2203. doi: 10.11999/JEIT150088.
- [6] HU Ying, HUANG Yongming, YU Fei, *et al.* Energy-efficient resource allocation based on multi-user massive MIMO system[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(9): 2198–2203. doi:10.11999/JEIT150088.
- [7] LU Lu, 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. doi: 10.1109/JSTSP.2014.2317671.
- [8] JIE L, ZHENG X, YA Y J, *et al.* The overview of big data storage and management[C]. *IEEE International Conference on Cognitive Informatics & Cognitive Computing(ICCI&CC)*, London, 2014: 510–513. doi: 10.1109/ICCI-CC.2014.6921508.
- [9] ZHANG C C and QIU R C. Massive MIMO as a big data system: random matrix models and tested[J]. *IEEE Journals & Magazines*, 2015, 3: 837–851. doi: 10.1109/ACCESS.2015.2433920.
- [10] FANG X, FANG S, YING N, *et al.* The performance of massive MIMO systems under correlated channel[C]. *IEEE International Conference on Networks (ICON)*, Singapore, 2013: 1–4. doi: 10.1109/ICON.2013.6781998.
- [11] JIANG Z Y, MOLISCH A F, CAIRE G, *et al.* Achievable

- rates of FDD massive MIMO systems with spatial channel correlation[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, 14(5): 2868–2882. doi: 10.1109/TWC.2015.2396058.
- [11] RUSEK F, PERSSON D, BUON K L, *et al.* Scaling up MIMO: opportunities and challenges with very large arrays[J]. *IEEE Signal Processing Magazines*, 2013, 30(1): 40–60. doi: 10.1109/MSP.2011.2178495.
- [12] KRISHNAN N, YATE R D, and 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. doi: 10.1109/TWC.2014.2320914.
- [13] SAXENA V, FODOR G, and KARIPIDIS E. Mitigating pilot contamination by pilot reuse and power control schemes for massive MIMO systems[C]. Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Glasgow, 2015: 1–6. doi: 10.1109/VTCSpring.2015.7145932.
- [14] NEUMANN D, JOHAM M, and UTSCHICK W. Suppression of pilot contamination in massive MIMO systems[C]. Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), Toronto, ON, 2014: 11–15. doi: 10.1109/SPAWC.2014.6941307.
- [15] APPAIAH K, ASHIKHMIN A, and MARZETTA T L. Pilot contamination reduction in multi-user TDD systems[C]. 2010 IEEE International Conference on Communications (ICC), Cape Town, 2010: 1–5. doi: 10.1109/ICC.2010.5502810.
- [16] 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. doi: 10.1109/TVT.2015.2391192.
- [17] ZHAO Z, CHEN Z, and LIU Y. Cell sectorization-based pilot assignment scheme in massive MIMO systems[C]. IEEE Wireless Telecommunications Symposium (WTS), New York, 2015: 1–5. doi: 10.1109/WTS.2015.7117245.
- [18] YAN X, YIN H, XIA M, *et al.* Pilot sequences allocation in TDD massive MIMO systems[C]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), New Orleans, LA, 2015: 1488–1493. doi: 10.1109/WCNC.2015.7127688.
- [19] 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. doi: 10.1109/LCOMM.2015.2409176.
- 方 昕： 女，1975年生，副教授，研究方向为第4代第5代移动通信物理层算法研究。
- 张建锋： 男，1990年生，硕士生，研究方向为无线移动通信。