

文章编号:1007-5321(2020)02-0074-06

DOI:10.13190/j.jbupt.2019-128

# SRS 资源受限场景中联合导频分配的多用户分组

曾天一, 常永宇, 李君瑶  
(北京邮电大学 信息与通信工程学院, 北京 100876)

**摘要:**为解决时分双工大规模多输入多输出(MIMO)系统中探测参考信号(SRS)资源受限造成的系统性能下降问题,基于用户信道变化速率的不同,提出确定用户探测周期的准则,设计扩充了可调度用户集合的导频分配方案,并提出了匹配的多用户分组调度方案.采用3-D MIMO信道对算法进行了验证,仿真结果表明,该算法可有效提升系统性能.

**关 键 词:** 探测参考信号资源受限;多用户分组;导频分配

中图分类号:TN911.22

文献标志码:A

## Joint Pilot Allocation and User Grouping Scheme with Limited SRS Resources

ZENG Tian-yi, CHANG Yong-yu, LI Jun-yao

(School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunication, Beijing 100876, China)

**Abstract:** To solve the system performance degradation problem caused by the limited sounding reference signal (SRS) resources in time duplex division (TDD) massive multiple-input-multiple-output (MIMO) systems, based on the fact that the channel variant rates of various users are different, one metric that determines the sounding period is provided firstly, and then a pilot allocation scheme is given to expand the scheduling set, and finally a matched multi-user grouping scheme is introduced. Meanwhile, a 3-D MIMO channel model is used to verify the scheme. Simulations show that the system performance is effectively enhanced.

**Key words:** limited sounding reference signal resources; multi-user grouping; pilot allocation

在大规模多输入多输出(MIMO, multiple input multiple output)系统中,多用户(MU, multi-user)技术因可大幅提升系统的频谱效率(SE, spectral efficiency)而被广泛采用<sup>[1]</sup>.为保证MU的良好性能,基站需获得较准确的信道状态信息(CSI, channel state information).时分双工(TDD, time duplex division)因可利用上下行信道的互易性而备受推荐<sup>[2]</sup>.TDD系统中基站利用探测参考信号(SRS, sounding reference signal)估计上行CSI来近似代替下行CSI,

TDD很好地保障了MU的良好性能.

实际中SRS资源十分有限,SRS受限的原因包括<sup>[3]</sup>:1)为避免多小区间导频污染,基站不会使用全部SRS序列;2)为满足用户更高的速率需求,MU数需进一步增多,此时需要更多的CSI来近似下行信道;3)移速快的用户因多普勒分量增大而引起信道过时加重.SRS资源受限时,基站每次只能更新部分用户的下行信道.如果只调度CSI准确的用户,不仅MU数受限,而且用户间的信道相关性会造

收稿日期:2019-07-01

作者简介:曾天一(1992—),男,博士生.

通信作者:常永宇(1963—),女,教授,E-mail:yychang@bupt.edu.cn.

成能量损失;然而若将所有用户都纳入可调度集合,过时 CSI 却会引入干扰. SRS 资源受限造成的系统 SE 恶化已成为重要问题.

相关学者已给出一些缓解 SRS 受限的方案. CSI 参考信号 (CSI-RS, CSI reference signal) 用来测量过时 CSI,通过给出准确用户与非准确用户的标准和多用户分组调度可以实现吞吐量和公平性的提升<sup>[3]</sup>. 此外还有作者提出基于聚类的分组调度方法来缓解 CSI 有限造成的能量损耗<sup>[4]</sup>. 但文献[3]中方法测量效果有限,而文献[4]中方法复杂度过高且性能不稳定. 缓解 SRS 受限的算法仍有改善空间.

为改善 SRS 受限造成的系统 SE 恶化问题,笔者提出联合导频分配的用户分组调度方案. 为使基站获得更多较准确的 CSI,优化导频分配的效率更高. 由于实际中用户移速、视距传播情况等原因,不同用户 CSI 变化的速率不同,因此可为设置不同的用户探测周期. 首先研究了用户 CSI 变化的特性,给出确定用户探测周期的算法,根据用户的探测周期,提出导频分配方案;最后基于 SoCC (square of channel correlation) 准则<sup>[5]</sup>,提出多用户分组调度方案,并利用 3-D MIMO 信道验证了所提算法的可有效提升系统的性能.

## 1 系统模型

### 1.1 3-D MIMO 信道模型

假设有二维的矩形阵列, $t$  时刻的时域径为<sup>[3]</sup>

$$h_{u,s,n}(t) = \sum_{m=1}^M \left( \sqrt{P_{n,m}} \{ c_{u,s,n,m} \exp(j2\pi\lambda^{-1} \mathbf{d}_s \boldsymbol{\varphi}_{n,m}) \times \exp(j2\pi \mathbf{d}_u \boldsymbol{\varphi}'_{n,m}) \exp(j2\pi v_{n,m} t) \} \right) \quad (1)$$

其中: $u, s$  分别为基站和用户天线编号,  $P_{n,m}$  为时域径  $m$  中子径  $n$  的能量,  $c_{u,s,n,m}$  为由方向图和初始随机相位计算得到的参数,  $\mathbf{d}_s$  和  $\mathbf{d}_u$  代表位置,  $\boldsymbol{\varphi}_{n,m}$  和  $\boldsymbol{\varphi}'_{n,m}$  为离开和到达角,  $v_{n,m}$  为多普勒分量. 根据文献[6]中的计算方法,可得用户在基站天线的时域信道,再进行 FFT 便可得用户的频域信道.

### 1.2 SRS 容量

假设小区内扇区的数目为  $N_s$ , 每个扇区占用相同的 SRS 资源,则一个扇区的 SRS 容量为<sup>[3]</sup>

$$N_{\text{SecSRS}} = \frac{B_{\text{BS}} N_{\text{CS}} N_{\text{C}} T_{\text{UE}}}{B_{\text{UE}} T_{\text{BS}} N_{\text{S}}} \quad (2)$$

其中: $B_{\text{BS}}$  和  $B_{\text{UE}}$  分别代表基站和用户的 SRS 带宽,

$N_{\text{CS}}$  为循环移位数,  $N_{\text{C}}$  为序列数,  $N_{\text{S}}$  代表梳状结构,  $T_{\text{BS}}$  为基站探测周期,  $T_{\text{UE}}$  为用户探测周期, 基站探测用户数  $N_{\text{SecSRS}}^{\text{Per}}$  可假设  $T_{\text{UE}} = T_{\text{BS}}$  计算得出.

### 1.3 SINR 与 SE

以单小区为研究场景,基站和用户天线数分别为  $N_{\text{T}}$  和 1, 总用户数为  $K_0$ , MU 数为  $K$ . 接收信号  $\mathbf{y} \in C^{K \times 1}$  为

$$\mathbf{y} = \boldsymbol{\eta} \mathbf{H} \hat{\mathbf{W}}^{\text{norm}} \mathbf{P}^{1/2} \mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (3)$$

其中: $\boldsymbol{\eta}$  和  $\mathbf{P}$  为对角阵,分别为大尺度衰落和发射功率; $\mathbf{H} \in C^{K \times N_{\text{T}}}$  为实际信道; $\mathbf{x} \in C^{K \times 1}$  为数据; $\mathbf{n} \in C^{K \times 1}$  为高斯白噪声,  $\hat{\mathbf{W}}^{\text{norm}} \in C^{N_{\text{T}} \times K}$  为归一化的估计预编码矩阵,计算方法为

$$\hat{\mathbf{W}}^{\text{norm}} = \left[ \frac{\hat{\mathbf{w}}_1}{\|\hat{\mathbf{w}}_1\|}, \frac{\hat{\mathbf{w}}_2}{\|\hat{\mathbf{w}}_2\|}, \dots, \frac{\hat{\mathbf{w}}_K}{\|\hat{\mathbf{w}}_K\|} \right] \quad (4)$$

其中: $\hat{\mathbf{w}}_i$  为估计迫零预编码矩阵  $\hat{\mathbf{W}}$  的第  $i$  列,且有

$$\hat{\mathbf{W}} = \hat{\mathbf{H}}^{\text{H}} (\hat{\mathbf{H}} \hat{\mathbf{H}}^{\text{H}})^{-1} \quad (5)$$

$\hat{\mathbf{H}} \in C^{K \times N_{\text{T}}}$  为估计信道,则信号干扰加信噪比 (SINR, signal to interference plus noise ratio)  $\gamma_k$  为

$$\gamma_k = \frac{p_k \eta_k |\mathbf{h}_k \hat{\mathbf{w}}_k|^2}{\|\hat{\mathbf{w}}_k\|^2 \sum_{j=1, j \neq k}^K (\eta_j |\mathbf{h}_k \hat{\mathbf{w}}_j|^2 / \|\hat{\mathbf{w}}_j\|^2) + B_k \sigma_n^2} \quad (6)$$

其中: $p_k$  为基站对用户  $k$  的发射功率,设每个用户功率相同,则有  $p_k = P_{\text{I}}/K$ ,  $P_{\text{I}}$  为总体发射功率; $\eta_k$  为用户  $k$  的大尺度衰落; $\sigma_n^2$  为噪声功率谱密度; $B_k$  为传输带宽. 定义用户  $k$  和  $j$  间的信道相关性为

$$\rho_{kj} = \frac{|\mathbf{h}_k \mathbf{h}_j^{\text{H}}|}{\|\mathbf{h}_k\| \|\mathbf{h}_j\|} \quad (7)$$

根据香农定理,系统 SE 为

$$\omega = \sum_{k=1}^K \text{lb}(1 + \gamma_k) \quad (8)$$

## 2 联合导频分配的多用户分组调度

### 2.1 问题描述与总体思路

已有的多用户分组调度研究中通常假设已知全部用户的 CSI. 在 SRS 受限即  $N_{\text{SecSRS}}^{\text{Per}}$  有限场景中,基站每次只能更新部分用户 CSI,而未被探测的用户的 CSI 失准. 如果调度 CSI 严重过时的用户,过时用户性能严重恶化;然而,如果只调度基站刚探测的用户,不仅 MU 数目受限,而且很多功率会被损耗以抵消信道相关性. 由于候选用户集合受导频分配影响,多用户分组调度需联合导频分配,扩充可调度集合,才能合理高效调度用户.

提出的联合导频分配多用户分组调度算法包括3部分:用户信道探测周期的测量;基于信道变化速率的导频分配;基于信道变化速率的多用户分组调度。

图1为提出算法的总体流程,其中: $L$ 为轮询探测 $K_0$ 个用户所需的基站探测周期数, $I$ 为导频分配与分组调度的时长,仿真时长 $T_{\text{tot}}$ 为 $I + 2L$ 。下面具体阐述联合导频分配的多用户分组调度算法的3部分算法。

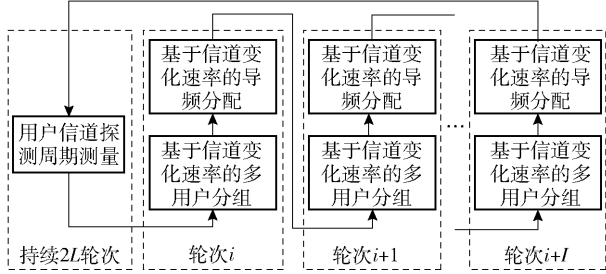


图1 联合导频分配的多用户分组调度算法总体流程

## 2.2 用户信道探测周期的测量

假设用户 $k$ 在 $t$ 时刻的实际信道为 $\mathbf{h}_k(t)$ ,间隔时间 $T$ 后的信道为 $\mathbf{h}_k(t+T)$ ,目标信道相关性门限为 $\alpha$ ,则用户探测周期测量准则可以描述为

$$T_{\text{UE}}^k = \tilde{T}_{\text{UE}}^k T_{\text{BS}} \quad (9)$$

且

$$\tilde{T}_{\text{UE}}^k = \lfloor \arg\max \tau_k \rfloor \quad (10a)$$

$$\text{s. t. } \alpha - \rho(\tau_k) > 0 \quad (10b)$$

其中: $\rho_t(\tau_k) = \frac{|\mathbf{h}_k(t)\mathbf{h}_k^H(t+\tau_k T_{\text{BS}})|}{\|\mathbf{h}_k(t)\| \|\mathbf{h}_k(t+\tau_k T_{\text{BS}})\|}$ 为以时间 $t$ 为基准,用户经时间 $\tau_k T_{\text{BS}}$ 后的CSI与 $t$ 时刻CSI的相关性, $\rho_t(\tau_k)$ 越大说明CSI变化越小; $\alpha$ 为设定的最低阈值,其物理意义为最低信道准确度。

对时间 $t$ ,由 $\rho_t(0) = 1$ 定义信道变化速率为

$$v_t(\tau_k) = \frac{1}{\tau_k T_{\text{BS}}} (1 - \rho_t(\tau_k)) \quad (11)$$

由于 $T_{\text{BS}}$ 很短,若干 $T_{\text{BS}}$ 内时域径的到达离开角,移动性及视距情况等可近似不变,短时间内 $v(\tau_k)$ 几乎不随测量时刻变化,即 $t$ 与 $\hat{t}$ 很接近时 $v_t(\tau_k) \approx v_{\hat{t}}(\tau_k)$ 。基于此即可估算 $t + \Delta T$ 时刻与 $t$ 时刻的真实信道相关性,方法为

$$\rho_t\left(\frac{\Delta T}{T_{\text{BS}}}\right) \approx 1 - v_t(1) \frac{\Delta T}{T_{\text{BS}}} \quad (12)$$

因此 $v_t(1)$ 和式(12)可被当成确定 $T_{\text{UE}}^k$ 的重要依据。

此时,用户信道探测周期测量标准转化为

$$T_{\text{UE}}^k = f(\alpha, v_t(1)) \quad (13)$$

综上所述,通过仿真统计所有满足 $v_t(1) \leq 1 - \alpha$ 的用户随时间的相关性变化趋势,即可得 $T_{\text{UE}}^k = f(\cdot)$ ,仿真结果见3.2节。用户信道探测周期的测量算法如下(此算法的执行周期为若干 $T_{\text{BS}}$ )。

### 算法1 用户信道探测周期测量

输入: $N_{\text{SecSRS}}^{\text{Per}}, K_0$

输出:用户信道探测周期 $T_{\text{UE}}^k$ ,且 $k = 1, 2, \dots, K_0$

- 1 对于轮次 $i = 1:2L$
- 2 计算被探测用户的起始与终止编号为: $K_s = \lceil i/2 \rceil N_{\text{SecSRS}}^{\text{Per}} + 1, K_e = (\lceil i/2 \rceil + 1) N_{\text{SecSRS}}^{\text{Per}}$ ;
- 3 对于用户 $k = K_s:K_e$
- 4 探测估计用户 $k$ 在轮次 $i$ 的信道 $\mathbf{h}_k(i)$ ;
- 5 如果 $\text{mod}(i, 2)$ 等于0;
- 6 用 $\mathbf{h}_k(i), \mathbf{h}_k(i-1)$ 计算用户 $k$ 的 $v(1)$ 和 $T_{\text{UE}}^k$ (见式(17));

### 2.3 基于信道变化速率的导频分配

假设轮次 $i$ 的子帧时间 $s_i$ ,调节因子 $T_c$ ,用户 $k$ 的传输速率 $r_k(s_i) = B_k \log(1 + \gamma_k)$ ,则平均速率为

$$R_k(s_i) = (1 - 1/T_c) R_k(s_i - 1) + r_k(s_i)/T_c \quad (14)$$

信道变化慢的用户应有高优先级,因为他们在若干 $T_{\text{BS}}$ 内都可被调度,成为“扩充用户”。基于PF算法,提出优先级的计算方法为

$$\xi_k^{\text{esti}}(s_i) = \frac{\gamma_k^{\text{CQI}}(s_i)}{R_k(s_i)} \cdot 10^{T_{\text{UE}}^k} \quad (15)$$

其中: $\gamma_k^{\text{CQI}}$ 代表用户的信道质量指示(CQI, channel quality indicator)为线性数值。基于信道变化速率的导频分配算法如下。

### 算法2 基于信道变化速率的导频分配

输入: $N_{\text{SecSRS}}^{\text{Per}}, K_0, K, T_{\text{UE}}^k, B_k, R_k(s_i)$ ,最临近被探测时间 $i_k$ ,其中 $k = 1, 2, \dots, K_0$

输出:不同基站探测轮次 $i$ 的探测集合 $\mathcal{S}$

- 1 对于用户 $k = 1:K_0$
- 2 如果 $i - i_k > T_{\text{UE}}^k$
- 3 将用户 $k$ 加入待探测集合 $\mathcal{S}$ ;
- 4 利用式(15)计算待探测集合 $\mathcal{S}$ 中用户优先级;
- 5 将 $\mathcal{S}$ 中用户按照优先级 $\xi_k^{\text{esti}}$ 由大到小排序;
- 6 选择前 $N_{\text{SecSRS}}^{\text{Per}}$ 用户组成轮次 $i$ 的探测集合 $\mathcal{S}$ ;
- 7 更新 $\mathcal{S}$ 中用户的信道探测轮次为 $i$

## 2.4 基于信道变化速率的多用户分组调度

SoCC 标准可使 CSI 相关性造成的能量损耗接近最低<sup>[5]</sup>. 本分组调度方案基于 SoCC, 分为 3 个步骤:

1) 筛选得到预选调度集合;

2) 从本轮探测的准确用户集合中选择优先级最大的用户加入调度集合, 优先级计算方法为

$$\xi_k^{\text{sche}}(s_i) = \frac{\gamma_k^{\text{CQI}}(s_i)}{R_k(s_i)} \quad (16)$$

3) 从预选调度集合选择与调度集合用户的 SoCC 之和最小的用户加入调度集合, 持续此操作直到达到预设调度多用户数.

提出的基于信道变化速率的多用户分组调度算法如下.

**算法 3** 基于信道变化速率的多用户分组调度

输入:  $K_0, T_{\text{UE}}^k, B_k$ , 最临近时刻  $s_c$  的平均速率  $R_k(s_c)$ , 最邻近探测时间  $i_k$ , 其中  $k = 1, 2, \dots, K_0$

输出: 多用户分组调度集合  $\mathcal{Q}$

- 1 对于用户  $k = 1: K_0$
- 2 将  $i - i_k < T_{\text{UE}}^k$  的用户加入预选调度集合  $\mathcal{U}$ ;
- 3 将  $i - i_k < T_{\text{UE}}^k$  的用户加入预选调度集合  $\mathcal{T}$ ;
- 4 利用式 (17) 计算用户  $k \in \mathcal{T}$  的优先级;
- 5 选择优先级最大的用户  $k_{\max}$  加入调度集合  $\mathcal{Q}$ ;
- 6 如果调度集合  $\mathcal{Q}$  中用户数小于  $K$ , 循环
- 7 对于用户  $k \in \mathcal{U}$
- 8 利用式 (7) 计算用户  $k$  与所有  $j \in \mathcal{Q}$  的相关性, 并求和得相关性之和为  $C_k^{\text{sum}}$ ;
- 9 选择使  $C_k^{\text{sum}}$  最小的用户  $k_{\min}$  加入  $\mathcal{Q}$ , 并从  $\mathcal{U}$  中删除用户  $k_{\min}$

## 3 仿真结果

### 3.1 仿真配置

表 1 所示为仿真的主要配置<sup>[7-9]</sup>. 由于市区内的 2 种常见移速场景为 3 km/h 和 30 km/h, 而且实际环境中同时存在多种移速, 所以配置用户的移动速度均匀分布在 [3 km/h, 30 km/h] 区间. 假设上行信道估计是理想的, 这表明基站通过信道估计得到的 CSI 只包含过时误差, 而不包含估计误差.

### 3.2 信道变化趋势与目标相关性门限

配置  $\alpha$  的数值为 0.95. 如图 2 所示, 用户在时域信道的信道相关性随时间间隔增大而减小. 图 2 的绘制方法为: 计算所有满足  $v(1) < 0.05$  的用户在若干  $T_{\text{BS}}$  间隔的相关性, 即统计了 10 种用户在 5 种

表 1 仿真参数表

仿真参数	配置
信道模型	3D-UMa
频率/GHz	2.6
基站天线数 $N_T$	128
天线间距	$\lambda/2$
噪声功率谱密度/(dBm·Hz <sup>-1</sup> )	-174
发射功率/(dBm·(20 MHz) <sup>-1</sup> )	49
流量模型	full buffer
$N_{\text{SecSRS}}^{\text{per}}$	16
基站探测周期 $T_{\text{BS}}$	1 无线帧
PF 调节因子 $T_c$	1.7
总体用户数 $K_0$	80
多用户数 $K$	12, 20
仿真时长 $T_{\text{tot}}$	100 无线帧
撒点数/次	50

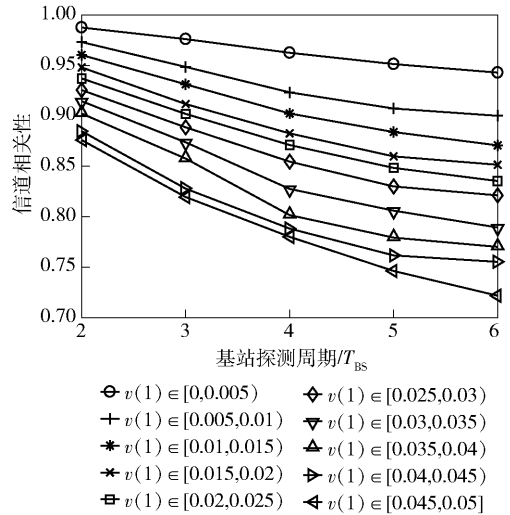


图 2 信道变化趋势

不同的  $T_{\text{BS}}$  间隔的相关性, 则可得总计 50 种组合的相关性数值集合. 对于每一种组合的相关性数值从小到大排序, 取第 10% 小的相关性作为这种组合的数值. 根据图 2 和  $\alpha$  即可确定  $T_{\text{UE}}^k$ . 如若  $k$  的  $v(1) < 0.005$ , 从图 2 由  $\rho(5) < 0.95 < \rho(4)$  可得  $T_{\text{UE}}^k = 4$ . 以此方法可以得到式 (17).

$$f(\alpha = 0.95, v(1)) = \begin{cases} 4, & v(1) \in [0, 0.005) \\ 3, & v(1) \in [0.005, 0.015) \\ 2, & v(1) \in [0.015, 0.05) \\ 1, & v(1) \in [0.05, 1] \end{cases} \quad (17)$$

结合式 (13) 和式 (17) 可得用户  $k$  的  $T_{\text{UE}}^k =$



$f(\alpha=0.95, v(1))$ .

### 3.3 系统性能分析

为方便表述,将所提的方案简称为联合用户分组的导频分配 (PAUG, pilot allocation with user grouping) 方案. 下面给出 PAUG 方案与文献[1]中基于 CSI-RS 的联合分组调度方案 (CJGSS, CSI-RS based joint grouping and scheduling scheme) 和自适应用户分组方案 (AUGS, adaptive user grouping scheme) 在 SINR、用户 SE、系统 SE 3 个性能指标上的对比.

CJGSS 方案利用 CSI-RS 测量过时 CSI,选择符合要求的过时用户,并同准确用户一起调度;AUGS 为常见方案,即轮询探测只基于相关性调度用户. 图 3 给出 3 种方案的 SINR 的累积分布函数 (CDF, cumulative distribution function) 曲线. SRS 受限时 AUGS 性能极差,当多用户数为 20,超过 20% 的 SINR 低于 0,可见提出缓解 SRS 资源受限算法的必要性. CJGSS 和 PAUG 都提升了 SINR. PAUG 对用户数较多时的低 SINR 区域性能提升更明显,因为 PAUG 方法可更好地扩充调度集合. 然而多用户数较少时,PAUG 仍实现了 SINR 的提升.

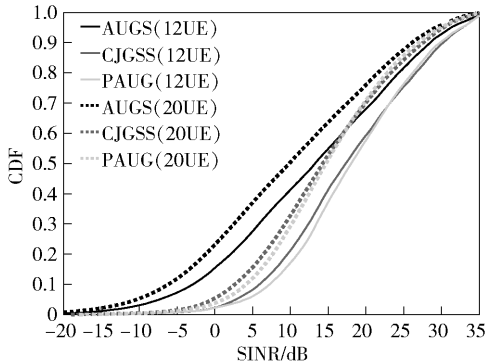


图 3 3 种方案 SINR 的 CDF 曲线

图 4 给出了用户 SE 的性能对比,因为 CJGSS 的测量效果有限,对相关性造成能量损耗的抑制效果不好,所以 CJGSS 的用户 SE 一直弱于 PAUG 方案. 图 5 给出了系统 SE 的性能对比. 在系统 SE 性能上,PAUG 方案相比于 AUGS 方案在多用户数为 12 和 20 时分别提升了 37.9% 和 40.9%;而相比于 CJGSS,PAUG 方案也略有提升,但需注意 CJGSS 会造成下行导频开销. 图 5 证实了 PAUG 方案的适用性.

### 3.4 时间复杂度分析

假设待探测用户数  $K' = |\tilde{\mathcal{K}}|$ , PAUG 方案所包含

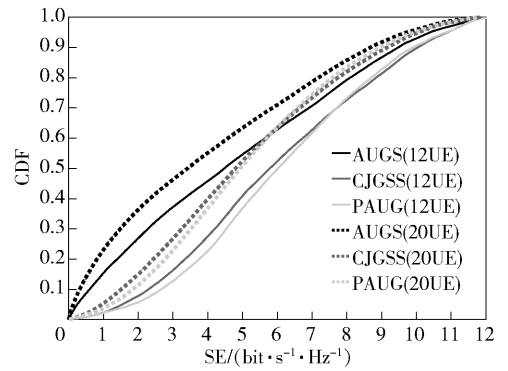


图 4 用户 SE 的 CDF 曲线

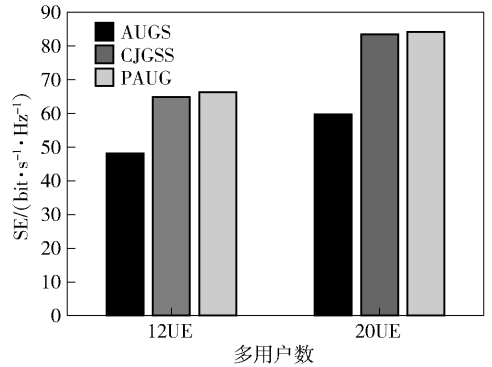


图 5 系统 SE 性能

的 3 部分算法的时间复杂度分别为  $O(K_0 N_T)$ 、 $O(K_0 + K' N_T + K' \ln K')$ 、 $O((K_0 - K' + N_{\text{SecSRS}}^{\text{Per}})^2 N_T)$ ; AUGS 中,用户不被区分,因此 AUGS 只包含调度算法的时间复杂度,且为  $O(K_0^2 N_T)$ ; CJGSS 共包含 2 部分的时间复杂度,分别为  $O((K_0 - N_{\text{SecSRS}}^{\text{Per}})(N_T + \ln(K_0 - N_{\text{SecSRS}}^{\text{Per}})))$  和  $O((N_{\text{SecSRS}}^{\text{Per}} + K_{\text{CJGSS}})^2 N_T)$ , 其中的  $K_{\text{CJGSS}}$  为可调度用户数. PAUG 方案的复杂度小于 AUGS,虽然略高于 CJGSS,但是系统性能得到了提升.

## 4 结束语

TDD 大规模天线系统中, SRS 资源受限,导致下行 CSI 过时,进而使 SE 性能恶化. 为此,提出了联合导频分配的多用户分组方案,方案包括用户信道探测周期测量;基于用户信道变化速率的导频分配与多用户分组调度算法. 仿真结果表明,相比于普遍假设的非 SRS 受限方案,所提方案可使系统的 SE 性能显著提升,且提升幅度高达 40%,性能更优.

### 参考文献:

[1] Castaeda E, Silva A, Gameiro A, et al. An overview on

- resource allocation techniques for multi-user MIMO systems [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(1): 239-284.
- [2] Elijah O, Leow C, Rahman T, et al. A comprehensive survey of pilot contamination in massive MIMO-5G system [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(2): 905-923.
- [3] Zeng T, Chang Y, Hu M, et al. CSI-RS based joint grouping and scheduling scheme with limited SRS resources [C] // IEEE Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). Bologna: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [4] Zhang Q, Chang Y, Zeng T. SRS limited user grouping scheduling algorithm for downlink massive MIMO systems [C] // IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Marrakech: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [5] Hu M, Chang Y, Zeng T, et al. SINR loss and user selection in massive MU-MISO systems with ZFBF [J]. ETRI Journal, 2019, 41(5): 637-647.
- [6] 3GPP. Study on 3D channel model for LTE (Release 12): 3GPP TR 36.873, V12.3.0 [S]. Vienna, AT: 3GPP, 2016.
- [7] 3GPP. Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA) physical channels and modulation (release 15): TS 36.211, V15.3.0 [S]. Gold Coast, AU: 3GPP, 2018.
- [8] 3GPP. Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); physical layer procedures (release 15): TS 36.213, V15.3.0 [S]. Gold Coast, AU: 3GPP, 2018.
- [9] Liu G, Hou X, Jin J, et al. 3-D-MIMO with massive antennas paves the way to 5G enhanced mobile broadband: from system design to field trials [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(6): 1222-1233.
- ~~~~~
- (上接第 65 页)
- [7] Ulukus S, Yener A, Erkip E. Energy harvesting wireless communications: a review of recent advances [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 33(3): 360-381.
- [8] Lu X, Wang P, Niyato D, et al. Wireless networks with RF energy harvesting: a contemporary survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(2): 757-789.
- [9] Özlem T D, Tuncer T E. Robust optimum and near-optimum beamformers for decode-and-forward full-duplex multi-antenna relay with self-energy recycling [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(3): 1566-1580.
- [10] Xing H, Liu L, Zhang R. Secrecy wireless information and power transfer in fading wiretap channel [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 65(1): 180-190.
- [11] Zhao M, Wang X, Feng S. Joint power splitting and secure beamforming design in the multiple non-regenerative wireless-powered relay networks [J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(9): 1540-1543.
- [12] Feng Y, Yang Z, Zhu W P, et al. Robust cooperative secure beamforming for simultaneous wireless information and power transfer in amplify-and-forward relay networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(3): 2354-2366.
- [13] Luo Z Q, Ma W K, So M C, et al. Semidefinite relaxation of quadratic optimization problems [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2010, 27(3): 20-34.
- [14] Grant M, Boyd S. Matlab software for disciplined convex programming [EB/OL]. 2008 (2009-10-01) [2019-01-04]. <http://cvxr.com/cvx>.