

文章编号:1007-5321(2018)02-0032-06

DOI:10.13190/j.jbupt.2017-109

基于区域用户密度的毫米波 MU-MISO 自适应调度方案

邹卫霞^{1,2}, 王海勇¹, 刘学锋¹

(1. 北京邮电大学 泛网无线通信教育部重点实验室, 北京 100876; 2. 东南大学 毫米波国家重点实验室, 南京 210096)

摘要: 为了解决毫米波信道条件下有限区域内多用户调度问题,提出了一种基于毫米波多用户多输入单输出(MU-MISO)下行链路信道的自适应多用户调度方案. 首先,根据各个用户反馈的区域位置信息,基站对用户进行分组,并根据区域的用户密度为每个区域分配适当的射频链资源;然后,基于获取到的各个区域角度范围信息和各区域所分配的射频链数,为每个区域设计通信波束;最后,在综合考虑组内和组间波束干扰的情况下,在用户端为每个满足匹配约束条件的用户确定最佳通信波束,并将该波束的信噪比值和信道质量信息反馈给基站,在基站端,根据用户反馈的信息,为每个区域的通信波束依次选择最佳用户. 仿真结果表明,该方案能获得较好的和速率性能,尽管与 SUS-ZFBF 算法相比有一定的差距,但降低了反馈信息量,而且射频资源的分配方式在一定程度上更能保证用户通信的公平性.

关 键 词: 毫米波; 用户调度算法; 破零预编码

中图分类号: TN929.53

文献标志码: A

Adaptive User Scheduling Scheme for mmWave MU-MISO System Based on Regional User-Density

ZOU Wei-xia^{1,2}, WANG Hai-yong¹, LIU Xue-feng¹

(1. Key Laboratory of Universal Wireless Communications, Ministry of Education,
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

2. State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: A new adaptive user scheduling was proposed to solve the multi-user scheduling problem of millimeter wave multi-user multiple-input single-output (MU-MISO) downlink system, in which users are located in the finite areas. Firstly, the area's user will be grouped based on the access information of user, and then the radio frequency chain will be properly allocated for each area based on the user density. Secondly, based on the RF's number and the range of angle of departure of each area, the communication beams will be designed. Finally, the best matched user will be selected to each pre-designed random beam for minimum inter-interference of beams in the base station, based on the channel quality indicator and the channel state information (CSI) feedback only from the matched users. It is shown that, the proposed scheme can achieve good rate performance. Although there is a certain gap compared with the semi-orthogonal user selection with zero-forcing beamforming that requires full CSI feedback from all us-

收稿日期: 2017-06-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(61571055); 毫米波国家重点实验室开放课题经费项目(K201815); 国家科技重大专项项目(2017ZX03001028)

作者简介: 邹卫霞(1972—), 女, 副教授, 博士生导师, E-mail: zwx0218@bupt.edu.cn.

ers, it reduces feedback overhead to some degree. Moreover, the allocation of RF resources guarantees the fairness of user communication to a certain extent.

Key words: millimeter wave; user scheduling algorithm; zero-forcing precoding

由于毫米波信号波长较短(1 ~ 10 mm), 其具有较高的自由空间路径损耗^[1-2], 多径信道内散射簇有限, 再加上信号的高频特性, 导致其信道相干时间较小, 使得毫米波信道的特性有别于传统蜂窝网络信号的信道特性, 从而使现有的用户调度算法不能直接用于毫米波通信. 因此, 为了解决毫米波信道条件下有限区域内多用户调度问题, 受传统多用户多输入多输出 (MU-MIMO, multi-user multi-input multi-output) 调度方案 (随机波束成形方案 (RBF, random beamforming)^[3]、基于破零预编码的半正交选择方案 (SUS-ZFBF, the semi-orthogonal user selection with zero-forcing beamforming)^[4] 等) 的启发, 提出了一种适用于该场景下的毫米波多用户多输入单输出 (MU-MISO, multi-user multi-input single-output) 自适应用户调度方案. 不同于传统方案, 提出了根据用户分布区域进行分组, 并根据区域内用户密度为每个区域分配合适的射频链资源与通信波束的自适应调度方案. 方案中, 假设不同区域具有相近的区域面积, 相互隔离, 且每用户信道内均有一主簇多径 (主要的通信多径), 此外同一区域内的用户具有相同主簇多径的发射角 (AoD, angle of departure) 分布区间. 其次, 在具体的用户选择过程中, 根据匹配用户反馈的波束间信干噪比 (SINR, signal to inter-

ference plus noise ratio) 值, 采用传统的空间聚类手段为每个预分配的离散傅里叶变换 (DFT, discrete fourier transform) 波束匹配到一个最佳用户. 最后, 针对区域内被选用户的数字信号, 采用 ZFBF 预编码进行处理, 以消除区域内用户间的干扰. 在整个方案设计过程中, 所需要的反馈信息包括用户接入基站时所处的区域位置信息以及波束匹配的用户计算得到的通信波束间的 SINR 值和具体的信道状态信息.

1 系统模型

1.1 信号模型

主要考虑毫米波 MU-MISO 下行链路系统, 如图 1 所示. 现假设 U 个单天线用户随机分布在 G 个有限的固定区域内 (见图 2), 每个区域随机分布了 U_g 个用户, 即满足 $\sum_{g=1}^G U_g = U$, 且基站端部署有 N_t 根发射天线, N_{RF} 条射频链. 假设基站从第 g 组区域 U_g 个用户中选取 K_g 个用户进行通信, 且 $\sum_{g=1}^G K_g = K$, 即从 U 个用户中选出 K 个用户进行通信, 且满足 $K \leq N_{RF} \leq N_t$. 在第 g 组用户群中, U_g 个用户多径信道的主散射簇分布在同一角度范围内.

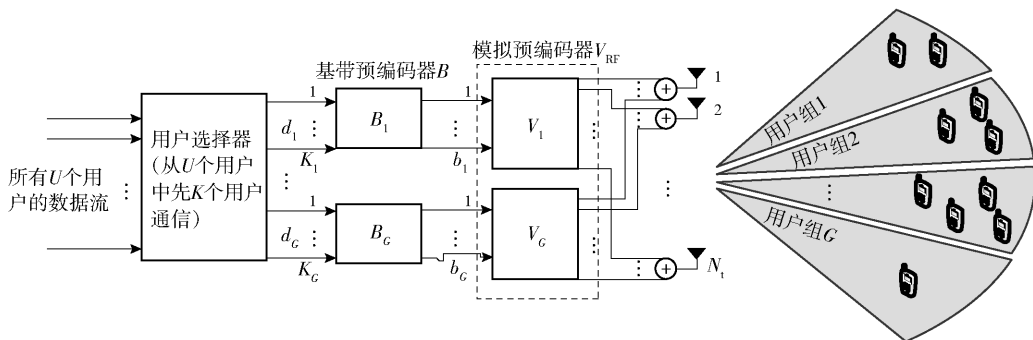


图1 毫米波 MU-MISO 数模混合波束赋形系统

在下行链路中, 基站端采用两段式多用户混合预编码设计方案^[5], 包括一个 $N_t \times N_{RF}$ 维的 RF 预编码器 $V = [V_1, V_2, \dots, V_G]$ 和 $N_{RF} \times K$ 维的 MU-MIMO 块对角预编码矩阵 $B = \text{diag}(B_1, B_2, \dots, B_G)$, 其中 $V_g \in \mathbb{C}^{N_t \times b_g}$ 和对角元素 $B_g \in \mathbb{C}^{b_g \times K_g}$ 分别表示基站对第 g 组被选用户的模拟和数字预编码矩阵, 满足

$|[V_g]_{m,n}| = 1/\sqrt{N_t}$ 和 $\sum_{g=1}^G b_g = N_{RF}$, 且第 g 组区域分配的 RF 数 $b_g \geq K_g$. 此外系统的功率约束条件满足 $\|VB\|_F^2 = K$ ^[5-6]. 经系统调度后, 第 g 组被选用户 g_k 的接收信号 y_{g_k} 可表示为

$$y_{g_k} = \mathbf{h}_{g_k} \mathbf{V} \mathbf{B} \mathbf{d} + \mathbf{z}_{g_k} =$$

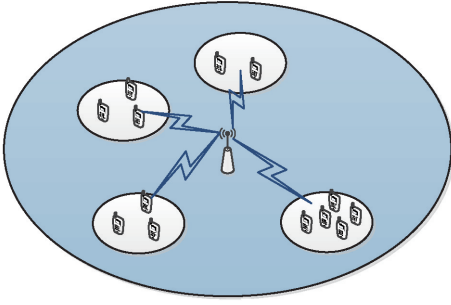


图 2 通信系统内用户分布

$$\mathbf{h}_{g_k} \mathbf{V}_g \mathbf{b}_{g_k} d_{g_k} + \mathbf{h}_{g_k} \sum_{i=1, i \neq k}^K \mathbf{V}_g \mathbf{b}_{g_i} d_{g_i} + \mathbf{h}_{g_k} \sum_{g'=1, g' \neq g}^G \mathbf{V}_{g'} \mathbf{B}_{g'} d_{g'} + \mathbf{z}_{g_k} \quad (1)$$

其中: $\mathbf{d} = [\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2, \dots, \mathbf{d}_G]^T \in \mathbb{C}^K$ 表示系统总的传输数据流矢量, $\mathbf{d}_g = [d_{g_1}, d_{g_2}, \dots, d_{g_{K_g}}]^T$ 表示第 g 组被选用户的传输数据流矢量, 且满足 $E\{\mathbf{d}\mathbf{d}^H\} = \frac{P}{K} \mathbf{I}_K$, P 表示平均的总传输功率值, 即假设不同的用户数据流间具有相同的平均传输功率; $\mathbf{h}_{g_k} \in \mathbb{C}^{1 \times N_t}$ 表示基站到第 g 组被选用户 g_k 的信道矢量; \mathbf{z}_{g_k} 表示独立同分布且服从均值为 0、方差为 σ^2 的复高斯噪声, 即 $\mathbf{z}_{g_k} \sim \text{CN}(0, \sigma^2)$. 此外, 定义信噪比 (SNR, signal to noise ratio) 为 $\zeta = P/\sigma^2$, 则用户 g_k 的 SINR 可表示为

$$\varepsilon = \frac{|\mathbf{h}_{g_k} \mathbf{V}_g \mathbf{b}_{g_k}|^2}{\frac{K}{\zeta} + \sum_{i \neq k} |\mathbf{h}_{g_k} \mathbf{V}_g \mathbf{b}_{g_i}|^2 + \sum_{g' \neq g} \|\mathbf{h}_{g_k} \mathbf{V}_{g'} \mathbf{B}_{g'}\|^2} \quad (2)$$

1.2 信道模型

由于毫米波信号具有较高的路径损耗特性和毫米波信道有限的散射特性, 现有研究^[5-6]均采用了几何信道模型对毫米波信道进行建模. 因此, 笔者也采用这种信道模型, 并假设每个用户的信道内均具有 N_{cl} 个散射簇, 且每个簇内均含有 N_{ray} 条传播路径. 则基于此信道模型下, 信道矩阵可表示为

$$\mathbf{h} = \gamma \sum_{i=1}^{N_{cl}} \sum_{l=1}^{N_{ray}} \alpha_{i,l} \mathbf{a}_l^H(\theta_{i,l}) \quad (3)$$

其中: $\alpha_{i,l}$ 和 $\theta_{i,l} \in [\theta_{i,\min}, \theta_{i,\max}]$ 分别表示第 i 个散射簇内第 l 条多径信道的复增益值和 AoD 值, $[\theta_{i,\min}, \theta_{i,\max}]$ 则表示第 i 个散射簇 AoD 的角度扩散区间, 且 $E\{|\alpha_{i,l}|^2\} = \sigma_{i,\alpha}^2$; 此外, γ 是一个常数, 且使约束条件 $E\{\|\mathbf{h}\|_F^2\} = N_t$ 成立^[6]; 最后, $\mathbf{a}_l(\theta_{i,l})$ 则表示了基站端的天线阵列响应矢量. 为了便于后续的分析, 考虑使用统一的线性天线阵列 (ULA, uniform

linear array) 作为通信阵列, 且天线阵元间间距为半波长, 即 $D = \lambda/2$, λ 为信号波长, 则 ULA 标准的阵列响应矢量 $\mathbf{a}_l(\theta)$ 可表示为

$$\mathbf{a}_l(\theta) = \frac{[1, e^{j\pi \sin \theta}, \dots, e^{j\pi(N_t-1)\sin \theta}]^T}{\sqrt{N_t}} \quad (4)$$

基于所考虑的场景进行建模时, 为了更好地区别每个用户的主簇 (主要的通信簇) 与次簇空间, 假设主簇的复增益变化功率值远大于其他所有次簇的复增益功率值, 即满足 $\sigma_{i,\alpha}^2 \gg \sigma_{j,\alpha}^2 (\forall j \in \{1, \dots, i-1, i+1, \dots, N_{cl}\})$.

2 多用户调度

受传统多用户 MIMO 调度方案的启发, 提出了一种有限区域内基于预定义随机码本, 且使得波束间干扰最小的自适应用户调度方案. 假设通信过程中, 基站已知每个区域的角度范围 $[\theta_{g,\min}, \theta_{g,\max}]$ 和用户已知基站广播的波束信息, 并能根据信道估计技术^[7] 获取到对应的信道状态信息 \mathbf{h} , 则整个调度过程描述如下.

2.1 自适应分配射频资源及通信波束设计

假设用户与基站初次通信或当用户所在区域位置变化较大时, 用户需要向基站发送接入请求信号, 且接入信号中包含该用户大致的区域位置信息, 而非具体的位置信息.

根据每个接入用户发送的位置信息, 基站对所有用户进行区域归类和用户统计, 并分别计算每个区域内的平均用户密度 $\rho_g = U_g/S_g$, 其中 S_g 表示第 g 组区域的区域面积. 而后, 基站根据每个区域的 ρ_g 值, 为每个区域按以下规则分配合适的 RF 链资源:

$$\begin{aligned} \rho_1: \rho_2: \dots: \rho_G &= b_1: b_2: \dots: b_G \\ \text{s. t. } \sum_{g=1}^G b_g &= N_{\text{RF}} \\ b_g &\leq b_{g,\max}, \forall g \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $b_{g,\max}$ 表示基站为第 g 组区域分配最多的射频链数.

为每个区域分配完射频链资源后, 基站根据每个区域的角度范围 $[\theta_{g,\min}, \theta_{g,\max}]$ 和分配的 RF 链数 $b_g (\neq 0)$, 通过式 (4) 为每个区域设计相应的通信波束, 其过程为

$$\begin{aligned} \theta_g &= [\theta_{g,\min}: (\theta_{g,\max} - \theta_{g,\min})/b_g: \theta_{g,\max}] \\ \mathbf{V}_g &= \{\mathbf{a}_l(\theta) \mid \forall \theta \in \theta_g\} \\ \text{s. t. } (\theta_{g,\max} - \theta_{g,\min})/b_g &\geq \pi/N_t \end{aligned} \quad (6)$$

其中: π/N_l 表示系统中模拟移相器设置的最小分辨率(波束宽度), 即基站为每个区域设计的波束宽度应大于等于最小波束宽度。从而可知, 根据不同区域的用户密度, 基站为每个区域设计通信波束的波束宽度(分辨率)有所差别, 即用户密集区域采用细波束通信, 而用户稀疏区域采用宽波束通信, 并保证能够覆盖区域的角度范围。随之, 基站将所设计的区域波束信息以广播信号的方式向所有接入用户进行广播, 使得每个用户均能获知基站在某个时隙内的通信波束 $\mathbf{V} = [\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2, \dots, \mathbf{V}_G]$ 。

2.2 基于传统的空间聚类手段选择用户

在现有多用户调度算法^[8]的启发下, 采用传统的空间聚类方法进行用户选择, 并将整个用户选择过程分为 2 步。

首先, 在用户端, 每个用户根据已知的信息, 通过波束双锥匹配模型^[8-9]为其匹配满足匹配约束条件 $\alpha (0 \leq \alpha \leq 1)$ 的波束, 不同于文献[8]中在基于低频信道二阶统计特性的情况下, 以最大化信道幅度和信号的准 SINR 值作为每个用户选择匹配波束的准则, 笔者则是将最小化波束间干扰情况同时作为用户和波束双向匹配过程的判决条件。即有

$$\Gamma_{g_k} = \left\{ i \mid \frac{|\mathbf{h}_{g_k}^H \mathbf{v}_i|}{\|\mathbf{h}_{g_k}\|} \geq \alpha, \mathbf{v}_i \in \mathbf{V}, i = 1, 2, \dots, N_{\text{RF}} \right\} \quad (7)$$

其中 Γ_{g_k} 和 \mathbf{h}_{g_k} 分别表示第 g 组第 k 个用户的匹配通信波束编号集和信道矩阵。

当用户 g_k 匹配的通信波束编号集 Γ_{g_k} 为非空集时, 区别于文献[8]以最大信道幅度作为用户匹配波束的标准, 在只考虑通信波束间干扰的情况下, 提出通过其余所有通信波束对某一匹配波束的干扰情况来判决用户 g_k 的最佳通信波束, 以保证用户 g_k 能够获取到使得波束间干扰达到最小的波束 $i_{g_k}^* \in \Gamma_{g_k}$, 即有

$$i_{g_k}^* = \underset{i \in \Gamma_{g_k}}{\operatorname{argmax}} R(g_k) = \underset{i \in \Gamma_{g_k}}{\operatorname{argmax}} \frac{|\mathbf{h}_{g_k}^H \mathbf{v}_i|^2}{1 + \sum_{\mathbf{v}_j \in \mathbf{V}, \mathbf{v}_j \neq \mathbf{v}_i} |\mathbf{h}_{g_k}^H \mathbf{v}_j|^2} \quad (8)$$

用户 g_k 将所得信道质量标识信息 (CQI, channel quality indicator) 以及对应的信道状态信息 CSI 反馈回基站, 其中 CQI 包括最佳波束编号 $i_{g_k}^*$ 和对应的 $R(g_k)_{\max}$ 。不同于文献[8], 其反馈的 $R(g_k)_{\max}$ 值是用户信号的准 SINR 值, 仅用于基站端的波束匹

配用户过程, 而所计算的 $R(g_k)_{\max}$ 值表示的是波束间的干扰情况, 并分别应用于用户端和基站端的用户-波束对的双向匹配过程。若 $\Gamma_{g_k} = \emptyset$, 用户 g_k 则不需要反馈任何信息。

其次, 在基站端, 基站根据获得的反馈信息为每个通信波束最终确定匹配的用户, 使之与基站通信, 即有

$$k_{g,i} = \underset{k \in W_{g,i}}{\operatorname{argmax}} R(g_k) \quad (9)$$

直到选出 K 个用户或者 $W_{g,i} = \emptyset$ 为止。其中, $W_{g,i}$ 表示基站端得到的第 g 组第 $i (1 \leq i \leq b_g)$ 个预定义波束对应的反馈用户集。

2.3 基于 ZFBF 的数字预编码

经调度后, 采用 ZFBF 预编码方法对组内被选用户信号进行数字处理, 即定义 $\bar{\mathbf{h}}_{g_k} = \mathbf{h}_{g_k}^H \mathbf{V}_g$ 表示第 g 组内被选用户 g_k 等效的信道矢量, 则第 g 组用户 MU-MIMO 预编码矩阵 $\mathbf{B}_g = \bar{\mathbf{H}}_g^H (\bar{\mathbf{H}}_g \bar{\mathbf{H}}_g^H)^{-1}$, 其中 $\bar{\mathbf{H}}_g = [\mathbf{h}_{g_1}^H, \mathbf{h}_{g_2}^H, \dots, \mathbf{h}_{g_{K_g}}^H]^H$ 表示第 g 组所有被选用户等效信道矢量的联合矩阵。又已知系统需要满足约束条件 $\|\mathbf{V}\mathbf{B}\|_F^2 = K$, 且 $\mathbf{B}_g = [\mathbf{b}_{g_1}, \mathbf{b}_{g_2}, \dots, \mathbf{b}_{g_{K_g}}]$, 则归一化表示为 $\mathbf{b}_{g_k} = \mathbf{b}_{g_k} / \|\mathbf{V}_g \mathbf{b}_{g_k}\|_F, k = 1, 2, \dots, K_g$ 。

3 仿真结果

下面主要讨论所提用户调度方案在不同条件下的仿真结果。假设基站端部署有 $N_l = 64$ 根发射天线的 ULA, $N_{\text{RF}} = 16$ 条射频链, 噪声功率 $\sigma_{g_k}^2 = \sigma^2 = 1 (\forall g_k)$ 。为了便于分析, 假设系统中用户随机集中分布在 $G = 4$ 组固定的通信区域内, 且各区域角度区间分布分别为 $[-170^\circ, -150^\circ]$ 、 $[-70^\circ, -50^\circ]$ 、 $[10^\circ, 30^\circ]$ 和 $[110^\circ, 130^\circ]$ 。此外, 用户多径信道散射簇数 $N_{\text{cl}} = 4$, 各散射簇内多径数均为 $N_{\text{ray}} = 6$, 且主散射簇复增益变化功率 (CGPMSC, complex gain power of main scattering cluster) 为 $\sigma_{i,\alpha}^2$, 次散射簇 $\sigma_{j,\alpha}^2 = 1 (\forall j \in \{1, \dots, i-1, i+1, \dots, N_{\text{cl}}\})$, 则信道矩阵常数 $\gamma = \sqrt{N_l / (N_{\text{ray}} (N_{\text{cl}} - 1 + \sigma_{i,\alpha}^2))}$ 。

为了验证所提算法在所定义的通信场景下具有鲁棒性, 对用户多径信道内不同的主簇复增益功率 (分别为 1、2、5、10、20) 下和速率性能随 SNR 变化的曲线进行了仿真, 如图 3 所示, 其中匹配约束条件 $\alpha = 0.1$ 。可知, 当 SNR 值一定时, 随功率值 $\sigma_{i,\alpha}^2$ 的增大, 系统的和速率也随之增大, 且当 $\sigma_{i,\alpha}^2 = 1$ 时, 即问题退化到当用户多径信道内通信簇之间不存在主次之分时, 系统获得的和速率性能最低。从而可证, 在

有限区域的通信场景内,当 $\sigma_{i,\alpha}^2 \gg \sigma_{j,\alpha}^2$ 时,所提算法具有一定的鲁棒性。

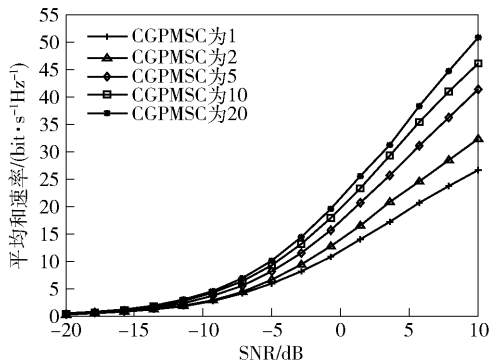


图3 不同主簇复增益功率下和速率性能曲线

所提算法获得的系统和速率性能随匹配约束条件 α 的变化趋势如图4所示,其中 $\sigma_{i,\alpha}^2 = 10$, SNR 为 5 dB, $U = \{100, 200, 400, 1\,000, 2\,000\}$ 。由图可知,在用户数 U 一定的条件下,在一定范围内系统和速率基本不变,但是当其大于某个值时,和速率性能随 α 值的增大而急剧下降,该拐点的值称为最大的最佳匹配参数 $\alpha_{\text{opt,max}}$ 。另外, $\alpha_{\text{opt,max}}$ 随用户数 U 的增大而增大,这是由于用户数 U 越大,区域内用户密度越大,每个预定义波束匹配到满足约束条件的用户概率越大。且 α 表示用户信道矢量方向与预定义波束矢量方向的夹角余弦值, α 越大,夹角越小,即表示两矢量间的匹配程度越高,但相应区域内满足条件的用户数会大幅度减小,甚至为0。因此,当 $\alpha \in (0, \alpha_{\text{opt,max}}]$ 时,系统依然能匹配到既满足匹配约束条件,又能使波束间干扰最小的用户,从而不改变系统的和速率性能。而当 $\alpha \in (\alpha_{\text{opt,max}}, 1]$ 时,匹配程度变高,导致部分预定义的随机波束未能匹配到用户,进而导致系统和速率值下降。

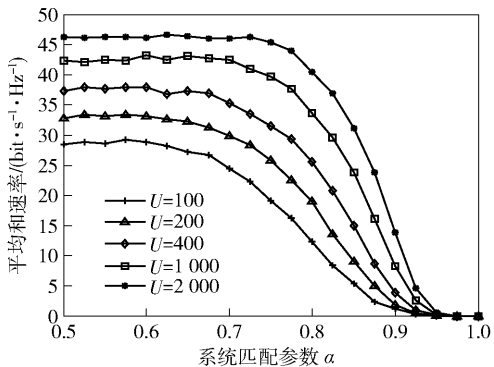


图4 和速率随匹配参数 α 变化的曲线

此外,为了验证所提算法使用宽窄不一的通信

波束与多用户进行通信,能够获得比使用固定波束码本通信获得的和速率性能更高,即所提算法性能更优。对所提算法在 DFT 码本^[10]下的性能也进行了仿真,仿真结果如图5所示。其中 $U = 400$, $\sigma_{i,\alpha}^2 = 10$ 。相比于 DFT 码本,系统采用提出的基于用户密度设计的通信波束进行通信时,所获得的和速率更高,且两者间和速率差距随 SNR 的增大而变大。这是由于基站为每个区域分配的射频链资源有限,且无法获知每个用户具体的位置信息,所以当使用 DFT 码本进行通信时,基站是根据区域的射频链数从覆盖该区域的 DFT 波束码本子集中随机选取相应的波束数对该区域进行通信的。因此,系统无法保证所选的 DFT 通信波束能够覆盖到区域内的所有用户,且均能匹配到对应最佳的通信用户,即存在通信波束零匹配用户的问题,从而导致系统性能的大幅度下降。

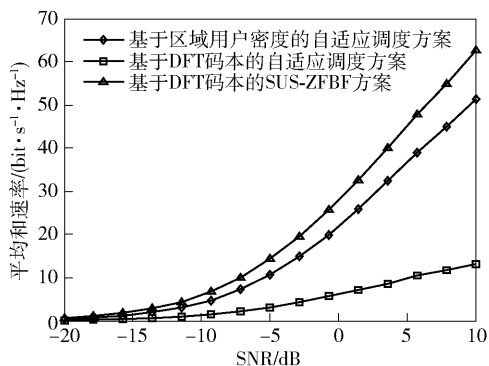


图5 不同通信波束下系统和速率性能曲线

此外,将所提的算法和 SUS-ZFBF 算法进行了性能对比,但由于 SUS-ZFBF 算法不能直接应用于毫米波通信场景下,笔者对该算法进行了调整,让其中被选用户的通信波束使用 DFT 码本^[10],并采用 ZFBF 预编码方式处理区域内被选用户的等效数字信号,其阈值参数 $\beta = 0.4$, $N_l = 64$,其余参数及系统结构与所提算法基本一致。与 SUS-ZFBF 算法相比,所提算法获得的和速率性能具有一定差距,但仍获得了较好的和速率。这是因为 SUS-ZFBF 算法在获取到所有通信用户具体的 CSI 条件下,利用用户信道的近似正交特性选择服务用户,并通过 DFT 波束码本为每个被选用户匹配最佳的通信波束,从而减小了被选用户间的干扰,提升了系统和速率性能。但由于 SUS-ZFBF 算法需要获取到所有用户具体的 CSI,而所提方案只需要知道部分匹配用户的 CSI,而且所提方案所需的部分反馈信息从数学角度上

看,比如用户所处的区域位置信息和波束间的 SINR 值,这些均是一些具体的数值标量,相对于矩阵形式 CSI,其所需要的反馈量也较小. 因此所提方案降低了系统反馈开销,提升了系统处理效率.

4 结束语

提出了一种基于部分匹配用户的 CQI 信息及毫米波 MU-MISO 下行链路信道下的自适应用户调度方案,适用于用户移动性低且集中分布在有限区域内的场景中,比如用户成群分布的露天宽旷区域等. 相比于固定码本通信,笔者根据不同区域的用户密度,设计了不同宽度的波束与区域内用户进行通信,即用户稀疏区域采用宽波束通信,而用户密集区域采用窄波束通信,这不仅保证了分配的波束能覆盖全区域内的用户,并能匹配到满足条件下的用户,还能够解决采用固定波束通信导致的性能大幅度下降问题和射频资源分配的不公平性问题. 此外,与 SUS-ZFBF 相比,所提算法在使用波束双锥匹配模型筛选用户的基础上,选择既满足约束条件又使得波束间干扰最小的用户作为通信用户,进一步减少了反馈信息量,提升了系统处理效率.

参考文献:

- [1] Rappaport T S, Sun S, Mayzus R, et al. Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: it will work! [J]. IEEE Access, 2013(1): 335-349.
- [2] Han S F, Chih-Lin I, Xu Z K, et al. Large-scale antenna systems with hybrid analog and digital beamforming for millimeter wave 5G [J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(1): 186-194.
- [3] Sharif M, Hassibi B. On the capacity of MIMO broadcast channels with partial side information [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2005, 51(2): 506-522.
- [4] Yoo T, Goldsmith A. On the optimality of multi-antenna broadcast scheduling using zero-forcing beamforming [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24(3): 528-541.
- [5] Alkhateeb A, Leus G, Heath R W. Limited feedback hybrid precoding for multi-user millimeter wave systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(11): 6481-6494.
- [6] El Ayach O, Rajagopal S, Abu-Surra S, et al. Spatially sparse precoding in millimeter wave MIMO systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(3): 1499-1513.
- [7] Alkhateeb A, El Ayach O, Leus G, et al. Channel estimation and hybrid precoding for millimeter wave cellular systems [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2014, 8(5): 831-846.
- [8] Lee G, Sung Y. A new approach to user scheduling in massive multi-user MIMO broadcast channels [J]. IEEE Transactions on Communications, 2017(99): 1481 - 1495.
- [9] Castaneda E, Silva A, Gameiro A, et al. An overview on resource allocation techniques for multi-user MIMO systems [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 19(1): 239-284.
- [10] Adhikary A, Nam J, Ahn J Y, et al. Joint spatial division and multiplexing-the large-scale array regime [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2013, 59(10): 6441-6463.