

基于毫米波大规模 MIMO 的用户调度问题

任 静

(西安邮电大学通信与信息工程学院,西安,710121)

摘要 毫米波传播具有很高的路径损耗以及较强的方向性,对障碍物造成的阻挡以及由运动引起的多普勒频移等非常敏感,因此如何提供稳定的链路质量成为毫米波通信系统中必须解决的问题,又因为电磁波有不同的传播特性,基于天线个数的不断增加和对成本的考量,传统的多用户预编码技术难以运用在毫米波通信系统中,因此如何将毫米波通信与 Massive MIMO 进行结合成为未来无线通信发展的重要研究方向。针对毫米波系统的以上几点特性,提出了一种基于 FDMA 的毫米波系统中用户频域调度与多个用户进行混合预编码的联合算法,通过运用该算法可以提高毫米波通信系统的性能。仿真结果表明:该算法的性能近似于纯数字预编码的性能,与其它同类算法相比,计算复杂度增加的并不明显,可以大大改善毫米波 Massive MU-MIMO 系统的性能。

关键词 大规模 MIMO;毫米波;混合预编码;调度算法

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2020.06.010

中图分类号 TP393.2;TN929.5 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2020)06-0060-06

Research on User Scheduling Problems Based on Millimeter Wave Massive MIMO

REN Jing

(School of Communications and Information Engineering, Xi'an University of
Posts & Telecommunications, Xi'an 710121, China)

Abstract Millimeter wave is high in path loss, strong in directivity, and is very sensitive to the obstacles caused by obstacles and the Doppler frequency shift caused by motion. Therefore, how to provide a stable link quality becomes a problem to be solved in millimeter wave communication systems. Aimed at the problems that electromagnetic waves have different propagation characteristics in consideration of the continuous increase in the number of antennas and cost, traditional multi-user precoding technology is difficult to use in millimeter wave communication systems, and the combination of millimeter wave communications with the Massive MIMO has become an important research direction for future wireless communication development, a joint algorithm of user frequency domain scheduling in the millimeter wave system is proposed based on FDMA and mixed precoding of multiple users, improving the performance in the millimeter wave communication system. The simulation results show that this algorithm is similar to the pure digital precoding in performance. Compared with other similar algorithms, the increase in computational complexity is not obvious, and the algorithm can greatly improve the performance in the millimeter wave Massive

收稿日期: 2020-03-11

作者简介: 任 静(1993—),女,陕西泾阳人,硕士生,主要从事无线机场研究。E-mail:1040194618@qq.com

引用格式: 任静. 基于毫米波大规模 MIMO 的用户调度问题[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2020, 21(6): 60-65. REN Jing. Research on User Scheduling Problems Based on Millimeter Wave Massive MIMO[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2020, 21(6): 60-65.

MU-MIMO system.

Key words massive MIMO; millimeter-wave; hybrid precoding; scheduling algorithm

当前,人类社会已经进入了高效信息化时代。全球通信业务呈现出需求激增的状态,这给未来的无线移动宽带系统在频率、技术和操作方面都带来了特别大的挑战,但也为其发展提供了一种难得的机遇^[1-4]。由于频谱效率的提高无法满足高速无线服务传输的相关业务需求,因此无线通信的频谱短缺这一状态已经成为 5G 移动通信系统发展过程中首要面对的问题。由于毫米波(30~300 GHz)具有丰富的频带资源,因此高频毫米波通信已经成为 5G 移动通信系统的重要实现解决方案^[5-9]。

在毫米波蜂窝系统中,无线信道的多径特性和大带宽性使得频率选择性信道存在,不同频带上信道衰落动态范围不同,多用户频率选择性资源调度就是将不同的频率资源对应分配给在其信道上传输中增益最大的用户^[10-13]。本文将讨论一种基于频分多址(Frequency Division Multiple Access, FD-MA)的用户调度算法。具体而言,在固定的时间范围内,在整个频带上调度多个空间复用用户组,其

中,该用户组的每个成员的空间特征均大同小异,而具有相同的空间特征的那些用户在不同的频带中调度,通过采用频域调度的方式来对多用户之间存在的相关干扰进行消除;具有不同空间特征的用户可以使用不同的混合预编码来获得最佳性能,并使用空间处理的方式对用户之间的干扰进行消除。

1 系统模型

1.1 信号模型

如图 1 所示,本文考虑一个具有单个基站和 K 个用户终端的单小区 MU-MIMO 下行链路系统。基站配备 N_t 个发射天线,基站同时将 N_s 个数据流传输给 K 个 MU-MIMO 空间复用用户,这些用户是从总用户集 K_{all} 中选取的,每个用户终端配备 N_r 个接收天线。同时,发射机配备有 N_{RF} 条射频链路,且射频链路数目满足 $N_s \leq N_{\text{RF}} \leq N_t$ 。在每个时隙的持续时间内,发射机传播 N_b 个资源块。

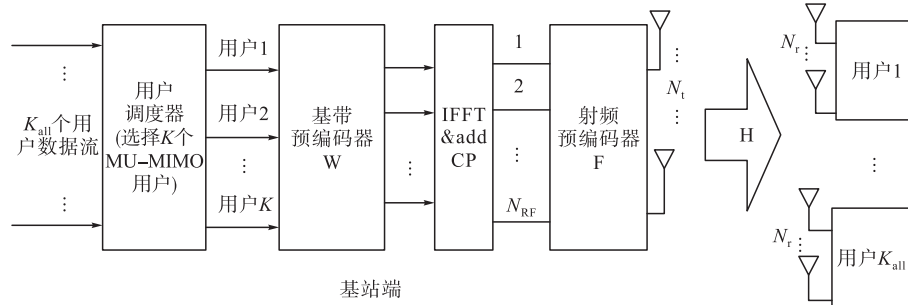


图 1 基于频域用户调度的毫米波 MU-MIMO 系统框图

假设当彼此独立的不同用户开始发射信号时,调度在第 n 个资源块中的第 k 个用户的接收信号 $\mathbf{Y}_{n,k} \in \mathbb{C}^{N_r}$ 为:

$$\mathbf{Y}_{n,k} = \mathbf{B}_{n,k}^H \mathbf{H}_{n,k} \mathbf{F} \mathbf{W}_{n,k} \mathbf{s}_{n,k} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^k \mathbf{B}_{n,k}^H \mathbf{H}_{n,k} \mathbf{F} \mathbf{W}_{n,j} \mathbf{s}_{n,j} + \mathbf{B}_{n,k}^H \mathbf{n}_{n,k} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{s}_{n,k} \in \mathbb{C}^{N_s^{n,k}} \times 1$ 表示第 n 个资源块中第 k 个用户的发射数据,满足 $E[\mathbf{S}_{n,k}^H \mathbf{s}_{n,k}]$, $E[\mathbf{S}_{n,k}^H \mathbf{s}_{n,j}]$, $E[\mathbf{S}_{n,k}^H \mathbf{n}_{n,k}]$, $N_s^{n,k}$ 表示第 n 个资源块中的第 k 个用户的数据流数。 $\mathbf{W}_{n,k} \in \mathbb{C}^{N_{\text{RF}} \times N_s^{n,k}}$ 表示第 n 个资源块第 k 个用户的发射数字预编码器, $\mathbf{F} \in \mathbb{C}^{N_t \times N_{\text{RF}}}$ 表示频域发射模拟预编码器,由时域 \mathbf{f} 通过 FFT 变换而来,得到了关于 $\mathbf{f} = [\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2, \dots, \mathbf{f}_{N_{\text{RF}}}]$ 。 $\mathbf{B}_{n,k} \in \mathbb{C}^{N_r \times N_s^{n,k}}$ 表示用于检测发射信号的线性接收预编码。 $\mathbf{H}_{n,k} \in \mathbb{C}^{N_r \times N_t}$ 表示第 k 个用户的 MIMO 信道。 $\mathbf{n}_{n,k}$ 是均值为零,方差为 σ^2 的独立同分布加性复高斯噪声。

1.2 信道模型

该系统的信道考虑使用 3D-MIMO 信道模型,不仅能区分 X/Y 平面的目标方向,而且能分辨垂直高度上的目标用户,因此将使用更多天线数的二维天线阵^[14-16]。为了在垂直高度区分不同的用户,3D-MIMO 不采用传统的均匀线阵(Uniform Linear Array, ULA)或圆阵,而采用二维的均匀矩形阵列(Uniform Rectangular Array, URA)或交叉极化阵列^[17]。该模型不仅能在目标用户区域集中波束的能量以提高用户的链路质量;同时更加精确区分相同 X/Y 坐标、不同垂直高度的用户,减小用户间干扰,提高系统吞吐量^[18-19]。

其设置具有 L_k 条多径的几何信道模型,因此第 n 个资源块第 k 个用户的信道 $\mathbf{H}_{n,k}$ 表示为:

$$\mathbf{H}_{n,k} = \sqrt{\frac{N_r N_t}{L_k \rho_k}} \sum_{l=1}^{L_k} \boldsymbol{\alpha}_R(\varphi_l^R, \theta_l^R) \beta_l \boldsymbol{\alpha}_T^T(\varphi_l^T, \theta_l^T) \quad (2)$$

式中: β_l 为第 l 条路径的信道冲激响应, 满足 $E[|\beta_l|^2]=1$; ρ_k 为 BS 和用户之间的路径损耗; 考虑水平角和俯仰角, $\mathbf{a}_T(\varphi_l^T, \theta_l^T)$ 和 $\mathbf{a}_R(\varphi_l^R, \theta_l^R)$ 分别表示归一化的发射和接收阵列导向矢量。

对于 X/Y 平面中的均匀平面阵列 (Uniform Planar Array, UPA), 在 x 轴上有 N_{row} 个元素, y 轴上有 N_{col} 个元素, BS 处的发射阵列导向矢量为:

$$\mathbf{a}_T(\varphi_l^T, \theta_l^T) = \text{vec}(\alpha_{N_{\text{row}}}(\mu) \mathbf{a}_{N_{\text{col}}}^{T(v)}(v)) = \frac{1}{\sqrt{N_{\text{row}} N_{\text{col}}}} [1, e^{jv}, \dots, e^{j(N_{\text{col}}-1)v}, e^{j(\mu+v)}, \dots, e^{j[\mu+(N_{\text{col}}-1)v]}, \dots, e^{j(N_{\text{row}}-1)\mu}, \dots, e^{j[(N_{\text{row}}-1)\mu+(N_{\text{col}}-1)v]}]^T \quad (3)$$

$$\mu = 2\pi d_x \cos \varphi \sin \theta / \lambda$$

$$v = 2\pi d_y \sin \varphi \sin \theta / \lambda$$

式中: λ 是波长, d_x 和 d_y 分别是 x 轴和 y 轴上的 2 个相邻天线单元之间的距离。在用户端的天线阵列采用均匀线性阵列, 其接收阵列导向矢量由下式给出:

$$\mathbf{a}_R(\theta_l^R) = \frac{1}{\sqrt{N_r}} [1, e^{j\frac{2\pi}{\lambda} d \sin(\theta)}, \dots, e^{j(N_r-1)\frac{2\pi}{\lambda} d \sin(\theta)}]^T \quad (4)$$

式中: $\mathbf{a}_R(\theta_l^R)$ 是 $N_r \times 1$ 维列向量。

2 多用户调度

首先, 根据传播信道的相关性将多用户小区划分为几个微小区, 其中每个微小区内的用户之间的传播信道相关空间特性相似度较高。所以, 每个微小区内的用户可以用相同的模拟预编码权值。

然后, 假设系统中频率资源块的个数为 N_b , 基站为每个微小区的成员分配频率资源, 每个资源块上调度信道增益最佳的用户以最大化系统的合速率。

最后, 定义所需要调度用户的数量为 N 。在微小区中, 分别对每个用户进行加权速率的计算, 从而为微小区选择可最大合速率的用户。

接下来, 根据上述步骤详细阐述本文所提出的用户调度算法。

2.1 微小区的划分

在多用户毫米波系统中, 本文利用毫米波的稀疏特性, 即波束能量集中在某些点上, 将信道相关性作为用户间干扰的评估标准。我们将用户 i 和用户 j 之间的信道相关性表示为:

$$v = C f_{\mathbf{H}_i, \mathbf{H}_j} = \frac{\text{cov}(\mathbf{H}_i, \mathbf{H}_j)}{\sqrt{\text{var}(\mathbf{H}_i)} \sqrt{\text{var}(\mathbf{H}_j)}} \quad (5)$$

式中: \mathbf{H}_i 和 \mathbf{H}_j 分别表示第 i 个用户和第 j 个用户的传输信道。

根据用户信道之间的相关性, 将多用户小区划分为多个微小区, 其中信道相关性强的用户构成一个微小区, 则微小区的分配问题表示如下:

$$User_i, User_j \in MicroCell_l \quad \text{s. t.} \quad v \quad (6)$$

式中: $MicroCell_l$ 表示第 l 个微小区用户组; v 表示用于判断用户 i 和用户 j 之间相关性的阈值。将所有用户组集分为 L 个微小区用户组, 其定义为: $Cell = \{MicroCell_1, MicroCell_2, \dots, MicroCell_L\}$ 。

2.2 资源分配

假设系统中频率资源块的个数为 N_b , 基站为每个微小区的用户分配频率资源, 每个资源块上调度信道增益最佳的用户以最大化系统的合速率, 则第 l 个微小区用户组 $MicroCell_l$ 的调度过程表示为:

$$User_l^n = \max_{User_i \in MicroCell_l} (SNR_{n,i}) = \max_{User_i \in MicroCell_l} (\|\mathbf{H}_{n,i}\|^2 / \sigma^2) \quad (7)$$

式中: $SNR_{n,i}$ 为第 n 个资源块第 i 个用户的信噪比。

在频率资源调度完成后, 该组用户重新排序如下:

$$MicroCell_l = \{User_1^l, User_2^l, \dots, User_N^l\} \quad (8)$$

之后, 将每个 FDMA 用户组中所有成员的频域信道合并为一个综合信道, 其代表了频分复用在不同频率资源上用户的空间特性。该综合信道定义为:

$$\bar{\mathbf{H}}_l = [\mathbf{H}_1^l | \mathbf{H}_2^l | \dots | \mathbf{H}_{N_b N_r \times N_c}^l] \quad (9)$$

式中: \mathbf{H}_l^n 表示第 l 个微小区用户组调度在第 n 个资源块中的用户信道。

2.3 用户选择

每个微小区均可视为一个虚拟用户, 这些虚拟用户和其他候选用户构成待选用户集 $Cell$ 。特别是, 所有空间复用用户的 MU-MIMO 信道定义为 $\bar{\mathbf{H}}_1, \bar{\mathbf{H}}_2, \dots, \bar{\mathbf{H}}_K$ 。对于一个微小区用户组, $\bar{\mathbf{H}}_i$ 是该用户组对应的综合信道。对于一个独占整个频带的用户, $\bar{\mathbf{H}}_j$ 是第 j 个 MU-MIMO 用户自身的信道。空间复用用户选择这一部分的目标是实现总和速率的最大化, 详细的解决方案可以分为 2 个阶段:

第 1 阶段, 为了降低空间复用用户选择的复杂度, 首先选择出具有最佳信道增益的用户, 即选择 SNR 最大的用户作为首用户, 其表达式为:

$$user_{\text{first}} = \max_{User_i \in Cell} (SNR_i) = \max_{User_i \in Cell} (\|\tilde{\mathbf{H}}_i\|^2 / \sigma^2) \quad (10)$$

式中: $\tilde{\mathbf{H}}_i = U_i^H \bar{\mathbf{H}}_i$ 是用户 i 的等效信道; V_i 和 U_i 是用户 i 的 MIMO 信道 $\bar{\mathbf{H}}_i$ 经过 SVD 分解 ($\bar{\mathbf{H}}_i = U_i \mathbf{\Lambda}_i V_i^H$) 之后的纯数字预编码权值。

第 2 阶段, 为了考虑公平性, 剩余空间复用用户选择的目标函数定义为加权合速率, 表示如下:

$$WR_{\text{sum}} = \sum_k \lambda_k R_k \quad (11)$$

式中: λ_k 表示用户 k 的权重; R_k 表示用户 k 的可达速率。当调度用户 k 时,合速率表示为:

$$R_{\text{sum}}^k = \log\left(1 + \frac{\|U_k^H \bar{H}_k V_k\|^2}{\sum_{j \in \text{Cell}_s, k \in \text{Cell}_c} \|U_j^H \bar{H}_j V_j\|^2 + \sigma^2} + \frac{\sum_{j \in \text{Cell}_s} \|U_j^H \bar{H}_j V_j\|^2}{\sum_{j \in \text{Cell}_s, i \neq j} \|U_i^H \bar{H}_i V_i\|^2 + \|U_k^H \bar{H}_k V_k\|^2 + \sigma^2}\right) \quad (12)$$

重复上述过程,直到选出 K 个空间复用用户,已选用户 $\text{Cell}_s = \{\text{Cell}_s^1, \text{Cell}_s^2, \dots, \text{Cell}_s^k, k \leq N_{\text{RF}}\}$ 。其中, Cell_s^1 表示第 s 个用户集的第 1 个用户。注意,多用户复用的最大用户数等于 RF 链路数。调度算法的流程总结为:

Step 1 初始化微小区的用户组集合 $\text{Cell} = \varphi$,

待选用户集 $\text{Cell}_c = \varphi$,

已选用户集 $\text{Cell}_s = \varphi$,

$\text{Cell} = \{\text{MicroCell}_1, \text{MicroCell}_2, \dots, \text{MicroCell}_L\}$

Step 2 信道相关的用户构成微小区用户组集合 $\text{MicroCell}_l; \text{User}_i, \text{User}_j \in \text{MicroCell}_s \quad \text{s. t. } v$

$$\text{MicroCell}_l = \{\text{User}_i^1, \text{User}_i^2, \dots, \text{User}_i^{N_b}\}$$

Step 3 对于每个微小区用户组集合,将频率资源分配给在其上信道增益最佳的成员并定义综合信道 \bar{H}_l ;

Loop 1 $l=1, 2, \dots, L$

Loop 2 $n=1, 2, \dots, N_b$

$$\text{User}_i^n = \max_{\text{User}_i \in \text{User}_i \in \text{Cell}} (\|H_{n,i}\|^2 / \sigma^2)$$

End Loop 2

重新排序 MicroCell_l

$$\bar{H}_l = [H_l^1 | H_l^2 | \dots | H_l^{N_b}]$$

End Loop 1

Step 4 将每个 FDMA 用户组作为虚拟用户,和其他候选用户组成待选用户集 Cell_c ,从中选择 SNR 最大的用户作为本次调度的首用户;

$$\text{User}_{\text{first}} = \max_{\text{User}_i \in \text{Cell}_c} (\text{SNR}_i) = \max_{\text{User}_i \in \text{Cell}_c} (\|\tilde{H}_i\|^2 / \sigma^2) \quad (13)$$

Step 5 选择空间复用用户,使系统和速率最大;

$$\max_{\text{User}_k \in \text{Cell}_s} R_{\text{sum}}^k \quad (14)$$

Step 6 如果已选用户集 Cell_s 中元素个数不等于用户数 K 时,跳转到 **Step 5**,否则结束。

最终得到已选用户集 $\text{Cell}_s: \text{Cell}_s = \{\text{Cell}_s^1, \text{Cell}_s^2, \dots, \text{Cell}_s^k\}$ 。

2.4 计算复杂度分析

由前文的算法流程可知,该算法经过了 2 个循环,第 1 个循环过程的计算量与第 2 个循环过程的计算量相同,均为 $K(K+2)$,相比于直接的矩阵求逆操作,所提出算法的仍然得到了有效抑制,所以整体来说所提出算法的复杂度增加并不明显。

3 仿真结果

在本节中,将信道类型设置为复高斯信道,对不同时隙下轮询、最大载干比和比例导读算法的吞吐量曲线进行仿真,将这些算法分别与 MMSE 预编码相结合,得出了它们对应的吞吐量曲线,其过程主要参数如表 1 所示。同时,将该机会调度与 ZF 预编码相结合,得出对应的吞吐量曲线,与 ZF 预编码结合随机调度的吞吐量曲线作对比,其仿真过程中主要参数如表 2 所示。

表 1 RR、MAX_CI 和 PFS 调度仿真参数

| 仿真参数 | 取值 |
|--------|-----------------|
| 小区个数 | 1 |
| 用户个数 | 10 |
| 基站天线根数 | 256 |
| 用户天线根数 | 1 |
| 基站发射功率 | 10 |
| 信道类型 | 3D-MIMO |
| 预编码算法 | SVD、MMSE |
| 调度算法 | RR, MAX_CI, PFS |

表 2 ZF 预编码下机会调度仿真参数

| 仿真参数 | 取值 |
|----------|--------------|
| 小区个数 | 1 |
| 用户个数 | 100 |
| 基站天线根数 | 256 |
| 用户天线根数 | 1 |
| 基站发射功率 | 10 |
| 信道类型 | 3D-MIMO |
| 信噪比 | -20 : 2 : 20 |
| 时隙数 | 1 000 |
| 复用用户数/时隙 | 10 |
| 预编码算法 | ZF |
| 调度算法 | 机会调度 |

图 2 表示不同时隙下轮询调度、最大载干比调度和比例公平调度算法的吞吐量曲线,其中时隙的变化范围为 0~80,信噪比设为 10 dB,预编码算法采用 SVD 算法。通过图 2 可以看出,随着时隙的变化,3 种调度算法的和速率也会相应的改变,总体来说对于每个时隙,轮询调度算法的和速率最差,最大

载干比调度算法和比例公平调度算法和速率相似,但是对于某些时隙,最大载干比调度算法性能更优,然而如果考虑公平性,最大载干比调度算法比例公平调度算法更差一些。

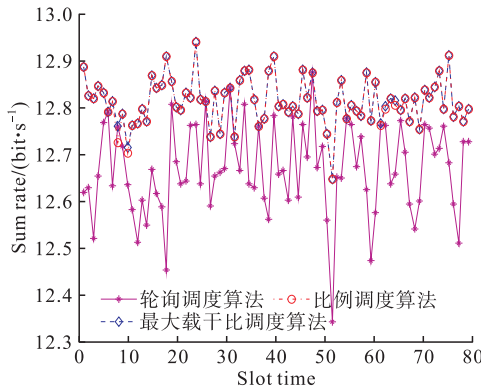


图2 不同时隙下轮询、最大载干比和比例公平调度算法的吞吐量对比

图3表示在基站端配置256根发射天线的情况下,采用MMSE预编码下的轮询调度、最大载干比调度和比例公平调度算法的吞吐量曲线,其中,仿真SNR的变化范围是 $-20 \sim 20$ dB,时隙数设为1000,每个时隙复用的用户数为10。通过图3可以看出,3种调度算法的和速率都随着SNR的增加而增加,当SNR增加至15 dB时,轮询调度算法的和速率达到最大值,而当SNR大约增加至12 dB时,最大载干比调度和比例公平调度算法的和速率达到最大值。对于每个SNR,最大载干比调度算法的性能最优,而轮询调度算法的性能最差。

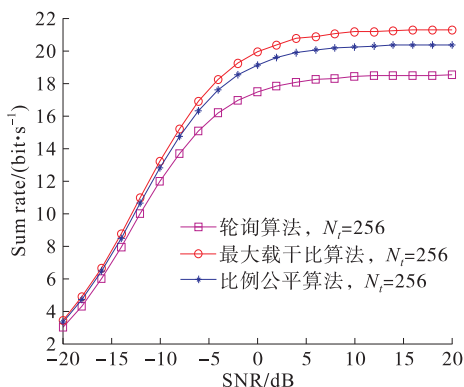


图3 MMSE预编码结合轮询、最大载干比和比例调度算法的性能对比

图4表示在基站端配置256根发射天线的情况下,ZF预编码分别结合机会调度和随机调度的吞吐量曲线,其中,仿真SNR的范围是 $-20 \sim 20$ dB。通过图4可以看出,2条曲线都随着SNR的增加而增加,曲线之间的差距也相应的增大,当SNR增加至10 dB时,两者的和速率均达到最大值,差值也趋于稳定。对于每个SNR,采用机会调度算法的和速率更高,因此机会调度算法可以提高系统性能。

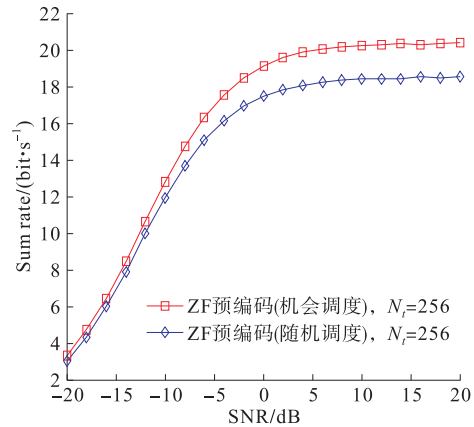


图4 ZF预编码结合机会调度和随机调度算法的性能对比

4 结语

本论文提出了一种基于FDMA的毫米波Massive MIMO系统用户调度和多用户混合预编码联合算法。它可适用于各种混合预编码算法。利用多用户调度算法,在有限的带宽上合理分配资源,尽可能地改善频谱效率和系统吞吐量,因而在多用户MIMO系统中用户调度算法可同混合预编码算法相结合,进一步优化系统性能。通过仿真结果表明,该算法的性能近似于纯数字预编码的性能,并能在很大程度上改善毫米波Massive MU-MIMO系统性能。

参考文献

- [1] LYU T K. Capacity of Multi-User MIMO Systems with MMSE and ZF Precoding[C]//2016 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). San Francisco, CA, USA: IEEE, 2016: 1083-1084.
- [2] AYACH O E, HEATH R W, ABU-SURRA S, et al. Low Complexity Precoding for Large Millimeter Wave MIMO Systems[C]//2012 IEEE International Conference on Communications (ICC). Ottawa, ON, Canada: IEEE, 2012: 3724-3729.
- [3] LI Y, SUN Y, ZHOU F. Long Step User Selection Algorithm for Unitary Beamforming[C]//2012 IEEE 75th Vehicular Technology Conference (VTC Spring). Yokohama, Japan: IEEE, 2012: 1-6.
- [4] JORSWIECK E, SEZGIN A, OTTERSTEN B, et al. Feedback Reduction in Uplink MIMO OFDM Systems by Chunk Optimization[C]//2008 IEEE International Conference on Communications. Beijing, China: IEEE, 2008: 4348-4352.
- [5] METIS Project. The 5G Mobile and Wireless Communication System[R]. Mandelieu; Aff Osseiran, 2013-11.

- [6] BERRAKI D E, ARMOUR S M D, NIX A R. Codebook Based Beamforming and Multiuser Scheduling Scheme for Mmwave Outdoor Cellular Systems in the 28, 38 and 60 GHz Bands[C]//2014 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). Austin, TX, USA; IEEE, 2015; 382-387.
- [7] BOGALE T E, LE L B, HAGHIGHAT A. User Scheduling for Massive MIMO OFDMA Systems with Hybrid Analog-Digital Beamforming[C]//2015 IEEE International Conference on Communications (ICC). London, UK ;IEEE, 2015; 1757-1762.
- [8] JORSWIECK E, SEZGIN A, OTTERSTEN B, et al. Feedback Reduction in Uplink MIMO OFDM Systems by Chunk Optimization[C]//2008 IEEE International Conference on Communications. Beijing, China; IEEE, 2008; 4348-4352.
- [9] BOGALE T E, LE L B. Pilot Optimization and Channel Estimation for Multiuser Massive MIMO Systems [C]//2014 48th Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS). Princeton, NJ, USA; IEEE, 2014; 1-6.
- [10] BOGALE T E, LE L B. Beamforming for Multiuser Massive MIMO Systems; Digital Versus Hybrid Analog-Digital[C]//2014 IEEE Global Communications Conference. Austin, TX, USA; IEEE, 2014, 4066-4071.
- [11] ALKHATEEB A, HEATH R W, LEUS G. Achievable Rates of Multi-User Millimeter Wave Systems with Hybrid Precoding[C]//2015 IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW). London, UK; IEEE, 2015; 1232-1237.
- [12] MALTSEV A. IEEE doc. 802.11-09/0334r8. Channel Models for 60 GHz WLAN Systems[S]. 2010.
- [13] ADHIKARY A, AL SAFADI E, SAMIMI M K, et al. Joint Spatial Division and Multiplexing for mm-Wave Channels[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(6): 1239- 1255.
- [14] BERTSEKAS D, GALLAGAR R. Data Networks [M]. Englewood Cliffs;Prentice-Hall, 1992.
- [15] WENGERTER C, OHLHORST J, VON ELBWART A G E. Fairness and Throughput Analysis for Generalized Proportional Fair Frequency Scheduling in OFDMA[C]// 2005 IEEE 61st Vehicular Technology Conference. Stockholm, Sweden; IEEE, 2005; 1903-1907.
- [16] SOMARRIBA O, ZANDER J. Robust STDMA Scheduling in Multi-Hop Wireless Networks for Single-Node Position Perturbations[C]//2009 IEEE 20th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Tokyo, Japan; IEEE, 2009; 566-571.
- [17] LI C, CAI R, LIU D. A Suboptimal STDMA Scheduling for Concurrent Transmissions in mmWave Wireless Networks[C]//2014 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC). Guilin, China; IEEE, 2014; 137-141.

(编辑:韩茜,徐楠楠)