

大规模 MIMO-FBMC 系统下的空间消隐方法

王家南, 周小平, 李莉, 向浩凯, 王斌

(上海师范大学信息与机电工程学院, 上海 200234)

摘要: 在大规模多入多出正交频分复用技术(MIMO-FBMC)下行链路系统中,大量微小区部署在宏小区覆盖区域内,并且宏小区和微小区共享相同频谱.在宏小区引入大规模多进多出(MIMO)技术,在相对较窄的角度扩展下从宏小区可以看到同一热点内的用户几乎位于同一位置,这就引起了方向性的信道向量.利用这个信道向量的空间方向信息采用协调波束成形,获得空间消隐,即将传输能量集中在某些特定的方向上,从而给位于其他方向上的微小区创造传输数据的机会,以减少对这些微小区的干扰.此方法类似于增强型小区间干扰协调技术(eICIC)中的几乎空白子帧(ABS)方法.仿真结果表明,该方案能有效提高大规模MIMO-FBMC系统的容量.

关键词: 大规模 MIMO-FBMC; 微小区; 空间消隐; 协调波束成形

中图分类号: TN 911.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5137(2017)01-0079-07

Spatial blanking method for massive MIMO-FBMC system

Wang Jia'nan, Zhou Xiaoping, Li Li, Xiang Haokai, Wang Bin

(College of Information, Mechanical and Electrical Engineering, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China)

Abstract: In this paper, we study the downlink performance of MIMO-FBMC system where small cells are deployed under a macrocell, both macro and small cells share the same spectrum. Assume the regime of massive MIMO in the macrocell, the users of the same hotspot are seen under a relatively narrow angular spread from the macrocell appearing almost co-located to the macrocell. This leads to directional channel vectors, which can be exploited to simplify coordinated beamforming technique and obtain spatial blanking, a means of concentrating energy only in certain directions while creating transmission opportunities for the small cells lying in the other directions, and mitigating interference to the small cells. It is in analogy with the almost-blank subframes approach of eICIC. Simulation results show that the proposed algorithm can improve the system capacity of massive MIMO-FBMC.

Key words: massive MIMO-FBMC; small cells; spatial blanking; coordinated beamforming

0 引言

由于先进通信设备的引进,在典型的密集城市市场下^[1],大部分数据流量通过高度集中的用户群产生热点来传输.解决数据需求的一个可能方案是采用大规模多进多出(MIMO)技术^[2],例如一个基站配有600根天线也许只服务10个用户,基站端采用大规模天线阵列,可以无需正交化时频资源,就能提

收稿日期: 2016-11-29

基金项目: 上海市自然基金项目(16ZR1424500)

作者简介: 王家南(1991-),女,硕士研究生,主要从事无线通信方面的研究. E-mail: 773674945@qq.com

导师简介: 周小平(1981-),男,博士,副教授,主要从事宽带无线通信,新一代移动通信和物联网技术方面的研究.

E-mail: zxpshnu@163.com(通信联系人)

供干扰协调. 传统的正交频分复用技术 (OFDM) 难以实现严格同步和非连续频带的传输, 会有严重的频谱泄露. 而滤波器组多载波技术 (FBMC) 可以通过使用良好的滤波器解决上述问题, 文献 [3] 中研究了正交频分复用技术/偏移正交幅度调制 (FBMC/OQAM) 系统下的信道估计方法. 所以大规模 MIMO 和 FBMC 技术的结合受到广泛关注与研究.

另一解决数据流量需求的可行方案是部署大量低功率基站 (微小区), 尤其是部署在更靠近高密度用户区域, 但代价是增加了干扰功率. 因此研究者都集中在研究干扰协调策略, 这也是 3GPP 下采用增强型小小区干扰协调 (eICIC) 技术的主要目标, 该技术分别通过部分频率复用方法和几乎空白子帧方法来实现频率和时间的正交化^[4-5], 从而减轻小小区干扰. 文献 [6] 提出了一种“认知”微小区方法, 其中微小区基站具有解码宏小区基站控制信道的能力, 利用解码出来的控制信息, 采用一种简单的功率控制方案来处理层间干扰, 主要是调整它们的发送功率电平, 使得在宏小区接收端的平均干扰功率不超过某个阈值 k .

典型的宏基站是部署在一个很高的位置 (如屋顶或塔式安装), 这样在一个相对窄的角度扩展下既能看到自己的用户, 也能看到被微小区服务的用户, 这样就会产生方向性的信道向量. 文献 [7-9] 中提出宏小区利用这个空间方向信息通过联合空分复用 (JSDM) 来减少对微小区的跨层干扰, 主要原理是将用户空间分成用户组, 使得用户具有近似相同的协方差, 将下行波束成形分为预波束成形矩阵和预编码矩阵. 本文作者提出利用这个信道向量的空间方向信息, 基于协调波束成形的空间消隐算法, 将传输数据集中在某些特定的方向上, 从而给位于其他方向上的微小区创造传输数据的机会, 以减少对这些微小区的干扰.

1 系统模型

研究场景的系统模型如图 1 所示, 在该场景下的一个小区中有一个宏基站 (MBS), 宏小区的覆盖半径为 R_{mc} , 单天线用户非均匀分布在宏小区中, 假设用户聚集在某些高密度热点, 本文作者称之为用户组. 假设 N_u 个用户组均匀且独立分布在宏小区, 每一个用户组集中的区域远小于宏小区覆盖区域. 在该系统下有 N_f 个微小区 ($N_f \leq N_u$), 每一个微小区覆盖一个用户组, 这些用户组的集合为 Ω . 剩下的 $N_u - N_f$ 个用户组的集合为 R . 宏基站的天线数为 N_m , 微小区基站的天线数为 N_s , 宏基站考虑大规模 MIMO 体制^[10], 即 $N_m \geq N_s \geq 1$.

微小区通过空间复用服务多个用户, 一个微小区服务组内 S_f 个用户. 所有活跃微小区信号以峰值功率 P_f 传输, 由于存在多用户, 所以会产生区内干扰, 这可以通过迫零波束形成消除. g 组的一个用户 k 和 f 组的一个微小区之间的信道向量 $\mathbf{h}_{gk,f}$ 大小为 $N_s \times 1$, 服从独立同分布 $CN(0, a(g, f))$, $a(g, f)$ 是 g 组用户和 f 组微小区之间的距离路径损耗系数, 表示为^[11]:

$$a(g, f) = \frac{w^{n_w(g, f)}}{1 + \left(\frac{d(g, f)}{d_0}\right)^\alpha} \quad (1)$$

其中 $d(g, f)$ 是 g 组用户和 f 组微小区之间的距离, d_0 是截止距离, α 是路径损耗系数, w 是墙穿透损失, $n_w(g, f)$ 是用户组 g 和 f 组微小区之间墙壁个数:

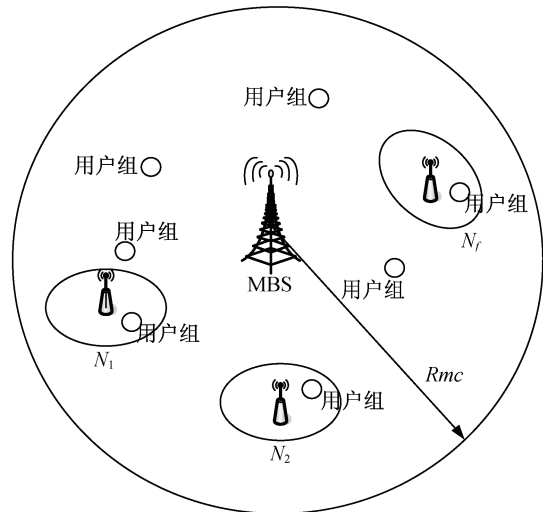


图1 系统模型示意图

$$n_w(g, f) = \begin{cases} 0, & g = f \\ 1, & g \in R, f \in \Omega \text{ or } g \in \Omega, f \in R. \\ 2, & g, f \in \Omega, g \neq f \end{cases} \quad (2)$$

在宏小区和每个用户组之间考虑一环信道模型,同一组内的用户与宏基站天线阵列的信道向量是相互独立但又同分布的,而且具有相同的协方差矩阵.在每个传输时频时隙上,宏小区调度 G 个用户组 ($G \leq N_u$),其中 g 组中被服务的用户数为 N_g ,其取决于用户组信道协方差矩阵的秩. g 组的一个用户 k 和宏基站之间的瞬时信道在任何给定的传输时频时隙上是一个大小为 $N_m \times 1$ 的高斯随机向量,表示为 $\mathbf{h}_{gk,0}$,用 KL 变换表示为:

$$\mathbf{h}_{gk,0} = \mathbf{U}_g \mathbf{\Lambda}_g^{1/2} \mathbf{w}_{gk}, \quad (3)$$

$$\mathbf{R}_g = \mathbf{U}_g \mathbf{\Lambda}_g \mathbf{U}_g^H. \quad (4)$$

式中 \mathbf{R}_g 是秩为 r 的信道协方差矩阵, $\mathbf{U}_g \in \mathbf{C}^{N_m \times r}$ 是 \mathbf{R}_g 的特征向量组成的高酉矩阵, $\mathbf{\Lambda}_g \in \mathbf{C}^{r \times r}$ 是 \mathbf{R}_g 的特征值构成的的对角正定矩阵. $\mathbf{w}_{gk} \sim CN(0, \mathbf{I}_r)$ 是随机向量.

根据一环散射模型^[12],其中用户组到基站的到达角(AOA)为 θ_g ,角度扩展(AS)为 Δ_g .则 \mathbf{R}_g 的第 (m, n) 个元素表示为:

$$[R(\theta_g, \Delta_g)]_{(m,n)} = \frac{a_{g,0}}{2\Delta_g} \int_{\theta_g - \Delta_g}^{\theta_g + \Delta_g} e^{-j\pi(m-n)\sin\alpha} d\alpha. \quad (5)$$

式中 $a_{g,0}$ 为由于传播环境造成的路径损耗.宏小区的总发射功率为 P_0 .本文作者考虑等功率分配,所有宏小区下行数据流分配到相同的功率 P_0/S ,其中 S 是在所有组中被服务的总用户数.

为了提高系统的频谱利用率,发送给 g 组用户的数据符号向量 $\mathbf{X}_g \in \mathbf{R}^{N_g \times 1}$ 在发送端发送之前首先被预编码,所以 g 组用户接收到的信号表示为:

$$\mathbf{y}_g = \mathbf{H}_{g,0}^H \mathbf{M}_g \mathbf{X}_g + \sum_{g' \neq g} \mathbf{H}_{g,0}^H \mathbf{M}'_{g'} \mathbf{X}'_{g'} + \sum_{f \in \Omega} \mathbf{H}_{g,f}^H \mathbf{M}_f \mathbf{X}_f + \mathbf{z}_g. \quad (6)$$

其中 $\mathbf{H}_{g,0} = [h_{g1,0} \cdots h_{gN_g,0}]$ 是宏基站天线阵列与 g 组内被服务用户的信道矩阵. $\mathbf{M}_g \in \mathbf{C}^{N_m \times N_g}$ 是 g 组的发送预编码矩阵, $\mathbf{H}_{g,f} = [h_{g1,f} \cdots h_{gN_g,f}]$ 是 g 组用户与微小区 f 间的信道矩阵, \mathbf{M}_f 和 \mathbf{X}_f 分别是微小区 f 的预编码矩阵和发送数据符号向量. \mathbf{z}_g 是加性高斯白噪声,服从独立同分布 $CN(0, 1)$.式(6)中第一项为 g 组用户的有效数据,第二和第三项是其他用户组对 g 组的干扰,而第二项的干扰可以通过块对角化波束成形来消除^[7].

由相应微小区服务的 f 组用户接收到的信号表示为:

$$\mathbf{y}_f = \mathbf{H}_{f,f}^H \mathbf{M}_f \mathbf{X}_f + \sum_{f' \neq f, f' \in \Omega} \mathbf{H}_{f,f'}^H \mathbf{M}'_{f'} \mathbf{X}'_{f'} + \sum_{g=1}^G \mathbf{H}_{f,0}^H \mathbf{M}_g \mathbf{X}_g + \mathbf{z}_f. \quad (7)$$

式中 $\mathbf{H}_{f,f'} = [h_{f1,f'} \cdots h_{fS_f,f'}]$ 是 f 组内用户与 f' 组微小区阵列的信道矩阵, \mathbf{z}_f 是加性高斯白噪声. f 组用户除了受到由其他微小区服务的用户组的干扰(此项可通过块对角化消除),也受到由宏小区服务的用户组的干扰.

从(6)和(7)式可以分别得知宏小区调度 g 组的一个用户 k 的接收 SINR(λ) 和由微小区服务的 f 组的一个用户 k 的接收 SINR,表示如下:

$$\lambda_{gk}^{mc} = \frac{|\mathbf{h}_{gk,0}^H \mathbf{M}_g|^2 \frac{P_0}{S}}{1 + \sum_{g' \neq g} |\mathbf{h}_{gk,0}^H \mathbf{M}'_{g'}|^2 \frac{P_0}{S} + \sum_{f \in \Omega} |\mathbf{h}_{gk,f}^H \mathbf{M}_f|^2 \frac{P_1}{S_f}}, \quad (8)$$

$$\lambda_{fk,f}^{sc} = \frac{|\mathbf{h}_{fk,f}^H \mathbf{M}_{fk,f}|^2 \frac{P_1}{S_f}}{1 + \sum_{f' \in \Omega, f' \neq f} |\mathbf{h}_{fk,f'}^H \mathbf{M}'_{f'}|^2 \frac{P_1}{S_{f'}} + \sum_{g=1}^G |\mathbf{h}_{fk,0}^H \mathbf{M}_g|^2 \frac{P_0}{S}}. \quad (9)$$

2 基于协调波束成形的空间消隐

当基站发射的信号只被用户部分有效接收时,很自然想到通过波束成形技术使阵列天线发射的电磁波的主瓣方向对准期望用户,而零瓣方向对准干扰源,由此提高信噪比,增加系统容量.第1节已提到本系统场景下能得到有方向性的信道向量,通过进行联合波束成形设计,使得信号在空间上相互隔开,将传输数据高度集中在某些特定的方向上,从而给位于其他方向上的微小区创造传输数据的机会,以大大减少对这些微小区的干扰,由此(6)式的第三项和(7)式的第三项可近似忽略.由于区内组间用户干扰可通过块对角化预编码算法消除,所以(6)和(7)式分别简化为:

$$\mathbf{y}_g = \mathbf{H}_{g,0}^H \mathbf{M}_g \mathbf{X}_g + \mathbf{z}_g, \quad (10)$$

$$\mathbf{y}_f = \mathbf{H}_{f,j}^H \mathbf{M}_f \mathbf{X}_f + \mathbf{z}_f. \quad (11)$$

将解码也考虑进去,则只要将(10)、(11)式的接收信号乘以译码矩阵即可.以 g 组用户接收到的信号(10)为例,为简化方便,以下将各字母下标 g 省略.用联合迭代法更新预编码矩阵和译码矩阵,首先定义一个等效信道矩阵 \mathbf{H}_{eq} :

$$\mathbf{H}_{\text{eq}} = \mathbf{D}^T \mathbf{H} \in \mathbf{D}^{N_g \times N_m}. \quad (12)$$

式中 $\mathbf{D} \in \mathbf{R}^{N_g \times N_g}$ 是实值译码矩阵,将 g 组预编码矩阵 \mathbf{M} 分解成两部分,表示为:

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2 \in \mathbf{C}^{N_m \times N_g}. \quad (13)$$

式中 $\mathbf{M}_1 \in \mathbf{C}^{N_m \times N_x}$, $\mathbf{M}_2 \in \mathbf{R}^{N_x \times N_g}$.

协调波束成形算法主要步骤如下:

第1步:初始化译码矩阵 $\mathbf{D}^{(0)}$,设置一个阈值 ε 作为停止标准.如果当前子载波是第一个,则译码矩阵是随机生成的.否则将当前译码矩阵设置成前一个子载波所计算出的译码矩阵.

第2步:设置 $p = p + 1$,并计算第 p 次迭代的等效信道矩,

$$\mathbf{H}_{\text{eq}}^{(p)} = \mathbf{D}^{(p-1)T} \mathbf{H} \in \mathbf{C}^{N_g \times N_m}, \quad (14)$$

定义一个矩阵 $\hat{\mathbf{H}}_{\text{eq}}^{(p)}$:

$$\hat{\mathbf{H}}_{\text{eq}}^{(p)} = [\text{Im}\{\mathbf{H}_{\text{eq}}^{(p)}\} \text{Re}\{\mathbf{H}_{\text{eq}}^{(p)}\}] \in \mathbf{R}^{N_g \times 2N_m}. \quad (15)$$

第3步:计算第 p 次迭代的预编码矩阵 $\mathbf{M}^{(p)} = \mathbf{M}_1^{(p)} \mathbf{M}_2^{(p)}$.对 $\hat{\mathbf{H}}_{\text{eq}}^{(p)}$ 进行奇异值分解(SVD):

$$\hat{\mathbf{H}}_{\text{eq}}^{(p)} = \mathbf{U}_1^{(p)} \boldsymbol{\Sigma}_1^{(p)} \mathbf{V}_1^{(p)T}. \quad (16)$$

定义 $\hat{\mathbf{H}}_{\text{eq}}^{(p)}$ 的秩为 $r^{(p)}$,其中 $\mathbf{V}_{1,0}^{(p)} \in \mathbf{R}^{2N_m \times N_x}$ 包含后 $N_x = 2N_m - r^{(p)}$ 个右奇异向量, $\mathbf{V}_{1,0}^{(p)}$ 构成了 $\hat{\mathbf{H}}_{\text{eq}}^{(p)}$ 零空间的正交基,而它的列构成了 g 组用户的预编码矩阵.因此预编码矩阵 $\mathbf{M}_1^{(p)}$ 可以通过以下公式获得,

$$\mathbf{V}_{1,0}^{(p)} = \begin{bmatrix} \text{Re}\{\mathbf{M}_1^{(p)}\} \\ \text{Im}\{\mathbf{M}_1^{(p)}\} \end{bmatrix}. \quad (17)$$

为了进一步计算 $\mathbf{M}_2^{(p)}$,将第 p 次迭代的等效信道矩阵定义如下:

$$\tilde{\mathbf{H}}_{\text{eq}}^{(p)} = \text{Re}\{\mathbf{H}_{\text{eq}}^{(p)} \mathbf{M}_1^{(p)}\} \in \mathbf{R}^{N_g \times N_x}. \quad (18)$$

再计算 $\tilde{\mathbf{H}}_{\text{eq}}^{(p)}$ 的SVD,同(16)式. $\mathbf{V}_{2,1}^{(p)} \in \mathbf{R}^{N_x \times N_g}$ 包含前 N_g 个右奇异向量,因此 $\mathbf{M}_2^{(p)}$ 通过 $\mathbf{M}_2^{(p)} = \mathbf{V}_{2,1}^{(p)}$ 得到.

第4步:在 $\tilde{\mathbf{H}}_{\text{eq}}^{(p)}$ 基础上更新译码矩阵,其中仅考虑在发射端的处理.

$$\tilde{\mathbf{H}}_{\text{eq,tx}}^{(p)} = \text{Re}\{\mathbf{H} \mathbf{M}^{(p)}\} \in \mathbf{R}^{N_g \times N_g}. \quad (19)$$

当使用MMSE接收机时,译码矩阵表示为:

$$\mathbf{D}^{(p)} = \tilde{\mathbf{H}}_{\text{eq,tx}}^{(p)} (\tilde{\mathbf{H}}_{\text{eq,tx}}^{(p)T} \tilde{\mathbf{H}}_{\text{eq,tx}}^{(p)} + \mathbf{I}_{N_g})^{-1}. \quad (20)$$

第5步:计算 $\Delta(\mathbf{M})$,

$$\Delta(\mathbf{M}) = \|\mathbf{M}^{(p+1)} - \mathbf{M}^{(p)}\|_F^2. \quad (21)$$

如果 $\Delta(\mathbf{M}) < \varepsilon$, 则收敛, 并且迭代过程结束. 否则返回到第 2 步.

空间消隐方法是将传输能量高度集中在某些特定的方向上, 从而降低其他方向上微小区传输数据时所受到的干扰, 即可近似忽略宏小区和微小区间的层间干扰. 那么到底宏小区选择哪些用户来服务又是一个问题, 根据用户组选择算法^[7], 来确保每个用户组都有平等被服务的机会, 另外此算法保证了被同时服务的用户组的信道协方差特征空间近似相互正交.

第一步给定用户组的优先级向量 \mathbf{c} , 初始化 $G = g^*$, $R_{\text{res}}^{(0)} = R \setminus g^*$, $S^{(0)} = \sum_{g \in G} N_g = N_{g^*}$, 其中 g^* 是从用户组集合 R 里随机选择的具有最高优先级的用户组. R_{res} 表示与已选择的用户组兼容的用户组的集合. 定义每个用户组 g 的一组间隔 i_g ,

$$i_g = \left[-\frac{1}{2} \sin(\theta_g + \Delta_g), -\frac{1}{2} \sin(\theta_g - \Delta_g) \right]. \quad (22)$$

第二步迭代 n 次, 定义集合 $R_{\text{res}}^{(n)} = \emptyset$, 将这些用户组仅存入到与 G 中已选择的用户组无重叠间隔的集合中, 因此每个用户组 $g' \in R_{\text{res}}^{(n-1)}$,

$$R_{\text{res}}^{(n)} = R_{\text{res}}^{(n-1)} \cup g' \text{ if } i'_g \cap i_g = \emptyset \quad \forall g \in G. \quad (23)$$

第三步选择一个具有最高优先级且能最小化与 G 中已选择的用户组之间最大干扰的用户组 g , 对于每个用户组 $g' \in R_{\text{res}}^{(n)}$, 计算用户组 g 收到的总组间干扰:

$$(\mathbf{I}_g^{\max})' = \max_{g' \in G} \frac{P_0 N'_g}{S^{(n-1)} + N'_g} \mathbf{I}_{g,g'}^{mc} \quad (24)$$

当 $N_m \rightarrow \infty$, 将(8)式利用确定性等效法化简, 其中 $\mathbf{I}_{g,g'}^{mc}$ 是耦合定点方程的解,

$$\mathbf{I}_{g,g'}^{mc} = \frac{n_{g,g'}}{m_g},$$

$$\begin{aligned} n_{g,g'} &= \frac{\frac{1}{N_x} \text{tr}(\mathbf{M}_1^H \mathbf{R}_g \mathbf{M}_1 \mathbf{T}_g^{-1} \mathbf{M}_1^H \mathbf{R}_{g'} \mathbf{M}_1 \mathbf{T}_g^{-1})}{1 - \mathbf{F}_g}, \\ \mathbf{F}_g &= \frac{\frac{1}{N_x} \text{tr}(\mathbf{M}_1^H \mathbf{R}_g \mathbf{M}_1 \mathbf{T}_g^{-1} \mathbf{M}_1^H \mathbf{R}_g \mathbf{M}_1 \mathbf{T}_g^{-1})}{m_g^2}, \\ m_g &= \frac{1}{N_x} \text{tr}(\mathbf{M}_1^H \mathbf{R}_g \mathbf{M}_1 \mathbf{T}_g^{-1}), \\ \mathbf{T}_g &= \mathbf{I}_{N_x} + \frac{N_g}{N_x} \frac{\mathbf{M}_1^H \mathbf{R}_g \mathbf{M}_1}{m_g}. \end{aligned} \quad (25)$$

第四步将 g^* 分配到 G 中, G 集合具有最高优先级且能最小化与已选择的用户组之间的最大干扰. 定义向量 \mathbf{c} 的最大元素 c_{\max} , 且集合 $C = \emptyset$, 对于每 $g' \in R_{\text{res}}^{(n)}$:

$$C = C \cup g' \text{ if } c'_g = c_{\max}. \quad (26)$$

第五步寻找用户组 g^* ,

$$\begin{aligned} g^* &= \underset{g \in C}{\text{argmin}} (\mathbf{I}_g^{\max})', \\ G &= G \cup g', S^{(n)} = \sum_{g \in G} N_g, R_{\text{res}}^{(n)} = R_{\text{res}}^{(n)} \setminus g^*. \end{aligned} \quad (27)$$

如果 $R_{\text{res}}^{(n)} = \emptyset$ 或 $|G| = G$, 则停止迭代, 输出结果 G , 否则 n 增加 1, 返回到第二步. 选择用户组后, 宏小区从已选择的用户组 g 中利用协调波束成形算法服务组内 N_g 个用户, 来消除组内干扰.

3 仿真结果

为了验证所提出算法的有效性,对该算法进行了仿真.仿真实验带宽为 10 MHz,宏基站配置天线数为 50,微小区基站天线数为 4,被宏小区服务的用户组数为 4,微小区个数为 3.仿真了文献[7]提出的 JSDM 算法和本算法下用户接收的平均信干噪比累积分布函数,如图 2 所示,图 3 给出了文献[7]方案和本提出的方案对系统容量的仿真.从图 2 中可以看出基于协调波束成形的空间消隐算法的用户信干噪比优于 JSDM 算法,而且本算法具有收敛性快的优点.在用户平均信干噪比为 40 dB 时,分布趋于稳定.从图 3 曲线中系统容量随着信干噪比的增长而增长的趋势,可以看出所提出的方案优于基于 JSDM 方案.

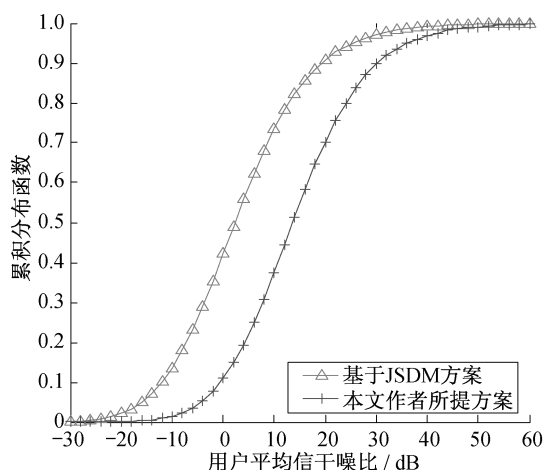


图2 所有用户得接收平均信干噪比的累积分布函数图

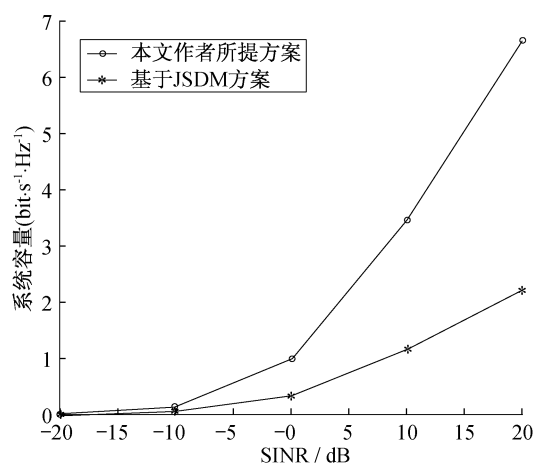


图3 系统容量仿真图

4 结论

在大规模 MIMO-FBMC 下行链路系统中,微小区部署在宏小区覆盖区域内将产生方向性的信道向量,本文作者利用这个信道向量的空间方向信息采用协调波束成形,将传输能量集中在某些特定的方向上,降低其他方向上的微小区传输数据时所受到的干扰,以获得空间消隐.根据用户组选择算法,服务具有最高优先级且对已选择的用户组干扰最小的用户组.在下一步的研究中将考虑微小区在宏小区部署的不同位置对用户的影响.

参考文献:

- [1] Cisco. Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2015 – 2020 [J/OL]. [2016-12-1], <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html>
- [2] Huh H, Caire G, Papadopoulos H C, et al. Achieving “massive MIMO” spectral efficiency with a not-so-large number of antennas [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(9): 3226 – 3239.
- [3] 龚帅, 周小平, 李莉, 等. 基于导频的 FBMC/OQAM 系统的信道估计方法 [J]. 上海师范大学学报(自然科学版), 2016, 45(2): 161 – 165.
Gong S, Zhou X P, Li L, et al. Channel estimation method for FBMC/OQAM system based on pilot [J]. Journal of Shang-

- hai Normal University (Natural Sciences), 2016, 45(2): 161 – 165.
- [4] Lopez-Perez D, Guvenc I, Roche G D L, et al. Enhanced intercell interference coordination challenges in heterogeneous networks [J]. IEEE Wireless Communications, 2011, 18(3): 22 – 30.
- [5] Boudreau G, Panicker J, Guo N, et al. Interference coordination and cancellation for 4G networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2009, 47(4): 74 – 81.
- [6] Adhikary A, Ntranos V, Caire G, et al. Cognitive femtocells: Breaking the spatial reuse barrier of cellular systems [C]. IEEE. Information Theory and Applications Workshop (ITA), California, 2011.
- [7] Adhikary A, Nam J, Ahn J Y, et al. Joint spatial division and multiplexing [J]. IEEE Transactions Information Theory, 2013, 59(10): 6441 – 6463.
- [8] Adhikary A, Safadi E A, Caire G, et al. Massive MIMO and inter-tier interference coordination [C]. IEEE. Information Theory and Applications Workshop (ITA), San Diego, 2014.
- [9] Nam J, Adhikary A, Ahn J, et al. Joint spatial division and multiplexing: Opportunistic beamforming, user grouping and simplified downlink scheduling [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2014, 8(5): 876 – 890.
- [10] Marzetta T L. Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(11): 3590 – 3600.
- [11] Adhikary A, Dhillon H S, Caire G. Massive-MIMO meets HetNet: Interference coordination through spatial blanking [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 33(6): 1171 – 1186.
- [12] Adhikary A, Dhillon H S, Caire G. Spatial blanking and inter-tier coordination in massive-MIMO heterogeneous cellular networks [C]. IEEE. Globecom Workshops (GC Wkshps), Austin, 2014.

(责任编辑:冯珍珍,包震宇)