

# 多波束赋形在非正交多址接入技术中的应用研究

刘彦平, 侯蓉晖

(西安电子科技大学网络与信息安全学院, 陕西西安 710071)

**摘要:** 为解决非正交多址接入(NOMA)技术在毫米波 Massive MIMO 系统中用户的分组受限于基站波束宽度的问题,提出了一种能够产生指向多个方向的波束的波束赋形方案.基于该多波束波束赋形方案,建立了多小区多用户场景下的用户资源分配的数学模型.为降低计算的复杂性,采用两阶段的资源分配算法.在第一阶段中,在给定的功率分配条件下将模型转化为联盟博弈中联盟的生成问题,并提出一种通过迭代确定用户分组和天线单元分配的算法;在第二阶段中,通过将非凸的数学优化问题转化为 DC 规划问题,提出用户功率分配的算法.仿真结果表明,本文所提多波束波束赋形方案能够有效产生指向多个方向的波束,且所提资源分配算法能够有效提高系统的性能.

**关键词:** 非正交多址接入; 波束赋形; 大规模多输入多输出

**中图分类号:** TN92

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112(2021)11-2138-08

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.12263/DZXB.20200773

## Research on the Application of Beamforming in Non-orthogonal Multiple Access Technology

LIU Yan-ping, HOU Rong-hui

(School of Cyber Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that the user grouping of non-orthogonal multiple access (NOMA) in the mm-wave massive MIMO system is limited by the beam width of the base station, a beamforming scheme which can generate beams pointing in multiple directions is proposed. Based on the multi-beam beamforming scheme, a mathematical model of user resource allocation in multi-cell and multi-user scenario is established. In order to reduce the complexity of computation, a two-stage resource allocation algorithm is adopted. In the first stage, under the given power allocation conditions, the model is transformed into the coalition generation in the coalition game theory, and an algorithm for iteratively determining user grouping and antenna unit allocation is proposed; in the second stage, an algorithm of user power allocation is proposed by transforming the non-convex mathematical optimization problem into a DC programming problem. The simulation results show that the proposed multi-beam beamforming scheme can effectively generate beams pointing to multiple directions, and the proposed resource allocation algorithm can effectively improve the performance of the system.

**Key words:** non-orthogonal multiple access(NOMA); beamforming; massive MIMO

### 1 引言

现有的移动通信系统大多都部署在低于 6GHz 的频带上,这个频谱带宽小,可能无法满足一些高速率的服务要求.为此人们将目标转移到了 30GHz 至 300GHz 的毫米波频段上,该频段上的频谱资源非常丰富,能够提供数十 Gbps 级别的高速数据传输<sup>[1,2]</sup>.因此,毫米波通信被认为是 5G 移动通信中实现高速数据速率的重要技术之一.除此之外,大规模多输入多输

出(Massive Multiple Input Multiple Output, Massive MIMO)技术也是 5G 无线通信系统中的一项关键技术,其能够大幅提高系统数据传输速率、可靠性及频谱效率<sup>[3]</sup>.Massive MIMO 技术通过在基站端搭载大规模的天线阵列,从而提供更高的空间自由度.同时,结合波束赋形技术,Massive MIMO 技术可以在空间域上克服用户间的干扰,实现空间复用增益,从而在相同的时频资源中同时为更多用户提供服务,能够大幅提高系统的频谱效率<sup>[4]</sup>.通过将毫米波通信技术与 Massive

MIMO 技术相结合,能够促进优势互补.一方面,与传统的移动通信系统相比较,Massive MIMO 技术可以提供更高的波束赋形增益,从而可以克服毫米波在空间中传输损耗严重的问题.另一方面,频率越高波长越短,因此毫米波的波长很短,可以大大缩小 Massive MIMO 系统中天线阵列的尺寸,降低天线的部署的难度与成本.因此,采用了毫米波以及波束赋形技术的 Massive MIMO 系统是 5G 中提高数据传输速率的非常关键的技术之一.

NOMA 技术通过功率域的复用,能够大大提高系统的频谱效率,增加系统的用户容量.而毫米波频段能够提供非常大的带宽,从而显著提高用户的数据传输速率.将这两种技术进行结合,可以促进优势互补从而获得优异的性能,目前已经有许多这方面的研究.在文献[5]中,作者提出采用随机波束赋形的方式来避免基站在进行波束赋形之前需要提前知道所有用户的信道状态信息的情况,从而降低了系统的复杂度,但这样会牺牲很大一部分系统性能.在文献[6]中,作者将 NOMA 技术应用在 MIMO 系统中,从而打破了传统 MIMO 系统中服务用户数不能大于射频(Radio Frequency, RF)链路数的限制,同时采用了一种基于迫零原理的预编码方案来减少波束之间的干扰.文献[7]则从波束赋形、用户调度和功率分配三个方面对 NOMA 技术在毫米波通信中的应用进行了研究,同时采用随机波束赋形技术来减少由于反馈信道状态信息造成的开销.然而,这些研究都采用的是传统的单波束的波束赋形方案,这在 NOMA 系统中会限制用户配对的灵活性.

本文主要的研究工作如下:

(1) 针对传统单波束波束赋形中 NOMA 用户必须处于同一个波束覆盖范围内,从而限制 NOMA 系统中用户分组灵活性的问题.提出一种能够产生多个波束的波束赋形方案,并将该波束赋形方案从均匀线性天线阵列(Uniform Linear Array, ULA)推广到均匀矩形天线阵列(Uniform Rectangular Array, URA)中.

(2) 在提出的多波束波束赋形方案的基础上,建立多小区多用户场景下的资源分配问题的数学模型,并通过两个阶段给出资源分配的结果.在第一个阶段中,利用联盟博弈的方法给出用户分组和天线分配的方案,在第二个阶段中,通过将模型转化为凸优化的形式给出用户功率分配的方案.

(3) 仿真结果表明,本文所提出的多波束的波束赋形方案能够有效地产生指向多个方向的波束.同时相较于单波束波束赋形方案和正交多址接入(Orthogonal Multiple Access, OMA)方案,本文的多波束赋形方案在本文提出的资源分配方案下能够取得更好的性能.

## 2 多波束波束赋形方案

### 2.1 基于 ULA 天线的波束赋形

假设 ULA 天线阵列中天线单元数量为  $M$ ,用户与基站之间的偏移角度为  $\theta$ ,同时为了简化参数,假设天线单元之间的间距等于半波长,即  $d = \lambda/2$ ,则通过调整移相器的相位得到的模拟波束矢量为<sup>[8]</sup>

$$\mathbf{w} = \frac{1}{\sqrt{M}} \left[ 1, \dots, \exp(j(M-1)\pi \cos\theta) \right]^T \quad (1)$$

假设一个 NOMA 用户组中最多有两个用户,则需要产生两个波束来指向这两个用户所在的方向.多波束的波束赋形的基本思想是将原本的 ULA 天线阵列分成两个子天线阵列,然后分别模拟波束赋形.假设基站通过多波束的波束赋形技术为用户 1 和用户 2 提供信号覆盖,其中用户 1 和用户 2 与基站之间的偏移角度分别为  $\theta_1$  和  $\theta_2$ ,分配给用户 1 和用户 2 的子天线阵列分别包含  $M_1$  个天线单元和  $M_2$  个天线单元,且  $M_1 + M_2 = M$ .

对于子天线阵列 1,产生的指向用户 1 的模拟波束矢量为

$$\mathbf{w}_1(\theta_1) = \frac{1}{\sqrt{M}} \left[ 1, \dots, \exp(j(M_1-1)\pi \cos\theta_1) \right]^T \quad (2)$$

对于子天线阵列 2,产生的指向用户 2 的模拟波束矢量为

$$\mathbf{w}_2(\theta_2) = \frac{\exp(jM_1\pi \cos\theta_1)}{\sqrt{M}} \left[ 1, \dots, \exp(j(M_2-1)\pi \cos\theta_2) \right]^T \quad (3)$$

这样,整体的波束矢量为

$$\mathbf{w} = \left[ \left( \mathbf{w}_1(\theta_1) \right)^T, \left( \mathbf{w}_2(\theta_2) \right)^T \right]^T \quad (4)$$

### 2.2 基于 URA 天线的波束赋形

假设 URA 天线上天线单元数量为  $M_x \times M_y$ ,用户与基站之间的方位角为  $\theta$ ,仰角为  $\varphi$ ,同时令水平方向和垂直方向上的天线单元之间的间距均为半波长,即  $d_x = d_y = \lambda/2$ ,则 URA 天线阵列的波束矢量为

$$\mathbf{w} = \mathbf{w}_x(\theta, \varphi) \mathbf{w}_y(\theta, \varphi)^T \quad (5)$$

其中,  $\mathbf{w}_x$  和  $\mathbf{w}_y$  分别为  $x$  方向和  $y$  方向上的波束矢量.

假设基站通过多波束的波束赋形技术为用户 1 和用户 2 提供信号覆盖,其中用户 1 和基站之间的方位角为  $\theta_1$ ,仰角为  $\varphi_1$ ,用户 2 与基站之间的方位角为  $\theta_2$ ,仰角为  $\varphi_2$ .与 ULA 中的多波束的波束赋形类似,通过将 URA 天线单元分成两个子阵列,实现多波束的波束赋形.假设将天线阵列以  $y$  方向分成两个子阵列,第一个子阵列的天线单元数为  $M_x \times M_{y,1}$ ,第二个子阵列的天线单元数为  $M_x \times M_{y,2}$ ,其中  $M_{y,1} + M_{y,2} = M_y$ .

对于所划分的第一个天线子阵列,产生的指向用户 1 的波束矢量为

$$\mathbf{w}_1 = \mathbf{w}_x(\theta_1, \varphi_1) \mathbf{w}_{y,1}(\theta_1, \varphi_1)^T \quad (6)$$

同理,对于所划分的第二个天线子阵列,产生的指向用户 2 的波束矢量为

$$\mathbf{w}_2(\theta_2, \varphi_2) = \mathbf{w}_x(\theta_2, \varphi_2) \mathbf{w}_{y,2}(\theta_2, \varphi_2)^T \quad (7)$$

这样,最终得到的基于 URA 的多波束的波束赋形矢量为

$$\mathbf{w} = [\mathbf{w}_1(\theta_1, \varphi_1), \mathbf{w}_2(\theta_2, \varphi_2)] \quad (8)$$

### 3 系统模型

本文考虑一种多小区多用户的下行毫米波 Massive MIMO 通信场景. 假设系统中共有  $N$  个小区,每个小区中有一个基站,位于小区中心位置,每个基站的天线单元数为  $M_{BS}$ . 每个基站的 RF 链路数量为  $N_{RF}$ ,并且基站的天线单元数量远大于 RF 链路数量,即  $M_{BS} \gg N_{RF}$ . 采用全连接结构. 假设每个小区中有  $K$  个用户,且小区中的用户数不小于基站的 RF 链路数,即  $K \geq N_{RF}$ . 我们用  $enb_i, i = 1, \dots, N$  来表示第  $i$  个小区的基站,用  $ue_k^{(i)}, i = 1, \dots, N, k = 1, \dots, K$  表示第  $i$  个小区中的第  $k$  个用户.

采用 Saleh-Valenzuela 信道模型<sup>[9]</sup>作为基站和 UAV 之间的信道模型.  $ue_k^{(i)}$  和  $enb_j$  之间的下行信道矩阵  $\mathbf{H}_{k,j}^{(i)} \in \mathbb{C}^{1 \times M_{BS}}$  可以通过下式得到

$$\mathbf{H}_{k,j}^{(i)} = \alpha_{k,j,0}^{(i)} \mathbf{H}_{k,j,0}^{(i)} + \sum_{l=1}^L \alpha_{k,j,l}^{(i)} \mathbf{H}_{k,j,l}^{(i)} \quad (9)$$

其中

$$\mathbf{H}_{k,j,l}^{(i)}(\theta_{k,j,l}^{(i)}) = [1, \dots, \exp(-j(M_{BS} - 1)\pi \cos\theta_{k,j,l}^{(i)})] \quad (10)$$

在同一个小区中,根据  $ue_k^{(i)}$  和  $enb_i$  之间 LOS 路径的方位角  $\theta_{k,j,0}^{(i)}$  和路径增益  $\alpha_{k,j,0}^{(i)}$  进行用户分组,其中,  $K$  个路径增益是按从大到小的顺序进行排列的,定义变量  $c_{k,r}^{(i)}$  来表示  $ue_k^{(i)}$  的分组情况,若  $ue_k^{(i)}$  分配到 RF 链路  $r$ , 则  $c_{k,r}^{(i)} = 1$ , 反之则为 0.

对于所配备的  $M_{BS}$  个天线单元,用  $M_{k,r}^{(i)}$  表示基站  $enb_i$  分配给该用户  $ue_k^{(i)}$  与第  $r$  条 RF 链路相关联的天线子阵列的天线单元数量.

对于用户的功率分配,用  $p_{k,r}^{(i)}$  表示  $enb_i$  在 RF 链路  $r$  上分配给  $ue_k^{(i)}$  的功率,  $p_{BS}$  基站的总发送功率. 假设  $enb_i$  发送给  $ue_k^{(i)}$  的信号为  $x_k^{(i)}$ , 则对于  $enb_i$  来说,在 RF 链路  $r$  上所发送的最终经过叠加编码的信号为

$$s_r^{(i)} = \sum_{k=1}^K c_{k,r}^{(i)} \sqrt{p_{k,r}^{(i)}} x_k^{(i)} \quad (11)$$

在接收端,经过信道传输后,用户  $ue_k^{(i)}$  接收的信

号为

$$y_k^{(i)} = \sum_{i=1}^N \mathbf{H}_{k,i}^{(i)} \sum_{r=1}^{N_{RF}} \mathbf{w}_r^{(i)} s_r^{(i)} + n_k \quad (12)$$

由香农公式,用户  $ue_k^{(i)}$  的数据传输速率可表示为:

$$R_{k,r}^{(i)} = B \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{|\mathbf{H}_{k,i}^{(i)} \mathbf{w}_r^{(i)}|^2 c_{k,r}^{(i)} p_{k,r}^{(i)}}{\left( I_{k,r}^{(i)} \right)_{\text{intra-group}} + \left( I_{k,r}^{(i)} \right)_{\text{inter-group}} + \left( I_{k,r}^{(i)} \right)_{\text{inter-cell}} + \sigma^2} \right) \quad (13)$$

其中,

$$\begin{aligned} \left( I_{k,r}^{(i)} \right)_{\text{intra-group}} &= \left| \mathbf{H}_{k,i}^{(i)} \mathbf{w}_r^{(i)} \right|^2 \sum_{k'=1}^{k-1} c_{k',r}^{(i)} p_{k',r}^{(i)} \\ \left( I_{k,r}^{(i)} \right)_{\text{inter-group}} &= \sum_{r'=1, r' \neq r}^{N_{RF}} \left| \mathbf{H}_{k,i}^{(i)} \mathbf{w}_{r'}^{(i)} \right|^2 \sum_{k'=1}^K c_{k',r'}^{(i)} p_{k',r'}^{(i)} \\ \left( I_{k,r}^{(i)} \right)_{\text{inter-cell}} &= \sum_{i'=1, i' \neq i}^N \sum_{r'=1}^{N_{RF}} \left| \mathbf{H}_{k,i'}^{(i)} \mathbf{w}_{r'}^{(i)} \right|^2 \sum_{k'=1}^K c_{k',r'}^{(i')} p_{k',r'}^{(i')} \end{aligned} \quad (14)$$

以系统总传输速率为目标,可以得出系统的数学模型如式(15)所示.

$$\begin{aligned} \max_{c_{k,r}^{(i)}, M_{k,r}^{(i)}, p_{k,r}^{(i)}} R_{\text{sum}} &= \max_{c_{k,r}^{(i)}, M_{k,r}^{(i)}, p_{k,r}^{(i)}} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K \sum_{r=1}^{N_{RF}} R_{k,r}^{(i)} \\ \text{C1: } c_{k,r}^{(i)} &\in \{0, 1\}, \forall k, r, i \\ \text{C2: } \sum_{k=1}^K c_{k,r}^{(i)} &\leq 2, \forall r, i \\ \text{C3: } \sum_{r=1}^{N_{RF}} c_{k,r}^{(i)} &\leq 1, \forall k, i \\ \text{C4: } \sum_{k=1}^K c_{k,r}^{(i)} M_{k,r}^{(i)} &= M_{BS}, \forall r, i \\ \text{s.t. } \text{C5: } M_{k,r}^{(i)} &\geq c_{k,r}^{(i)} M_{\min}, \forall k, r, i \\ \text{C6: } p_{k,r}^{(i)} &\geq 0, \forall k, r, i \\ \text{C7: } \sum_{k=1}^K \sum_{r=1}^{N_{RF}} c_{k,r}^{(i)} p_{k,r}^{(i)} &\leq p_{BS}, \forall i \\ \text{C8: } c_{k,r}^{(i)} c_{g,r}^{(i)} p_{k,r}^{(i)} &\geq c_{k,r}^{(i)} c_{g,r}^{(i)} p_{g,r}^{(i)}, \forall k > g \\ \text{C9: } p_{k,r}^{(i)} &\geq c_{k,r}^{(i)} p_{\min}, \forall k, r, i \end{aligned} \quad (15)$$

### 4 算法设计

为了降低计算的复杂性,本文采用一种两阶段的资源分配算法来进行资源分配. 这种将复杂问题分成两个阶段来求解的方法在许多方面都有应用<sup>[10,11]</sup>, 因为其可以在降低问题的计算复杂性的前提下获得问题的次优解.

#### 4.1 第一阶段——用户分组与天线分配

在这一阶段中,假设基站  $enb_i$  将其总功率平均分配给所有的  $K$  个用户. 这样系统的优化目标变为用户分

组变量  $c_{k,r}^{(i)}$  和天线分配  $M_{k,r}^{(i)}$ . 将已知功率分配  $p_{k,r}^{(i)}$  下用户速率记为  $\bar{R}_{k,r}^{(i)}$ , 则系统模型 (15) 转化为

$$\begin{aligned} \max_{c_{k,r}^{(i)}, M_{k,r}^{(i)}} \bar{R}_{\text{sum}} &= \max_{c_{k,r}^{(i)}, M_{k,r}^{(i)}} \sum_{r=1}^N \sum_{k=1}^K \sum_{r=1}^{N_{\text{RF}}} \bar{R}_{k,r}^{(i)} \\ \text{s.t.} \quad & C1 \sim C5 \end{aligned} \quad (16)$$

该数学模型是一个非凸的数学优化问题, 很难找到该问题的全局最优解. 为了降低算法的复杂度, 我们将问题转化为一个联盟博弈算法来获得用户配对和天线分配的结果.

将系统中每个小区中的  $K$  个用户看做是一个协作集合, 用  $G^{(i)} = \{ue_1^{(i)}, ue_2^{(i)}, \dots, ue_K^{(i)}\}$  表示, 同时将  $N$  个小区中的所有用户看作一个大的集合.  $S^{(i)} \subseteq G^{(i)}$  来表示一个联盟, 即一个 NOMA 的用户分组. 我们用每个用户的数据传输速率作为衡量其收益的指标. 给定一个联盟  $S^{(i)}$ , 该联盟中用户的收益取决于联盟内用户的天线分配结果, 联盟的价值  $V(S^{(i)})$  是联盟  $S^{(i)}$  中所有用户的收益的集合.

用  $Q^{(i)}$  来表示第  $i$  个小区中的用户组成的联盟的集合, 同时用  $Q$  来表示整个系统中所有  $N$  个小区的联盟的集合, 则有

$$Q = \bigcup_{i=1}^N Q^{(i)} = \bigcup_{i=1}^N \{S_1^{(i)}, S_2^{(i)}, \dots, S_{|Q^{(i)}|}^{(i)}\} \quad (17)$$

其满足条件

$$\bar{R}_{k,r}^{(i)} = \begin{cases} B \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{|H_{k,i}^{(i)} \mathbf{w}_r^{(i)}|^2 p_{k,r}^{(i)}}{(I_{k,r}^{(i)})_{\text{intra-group}} + (I_{k,r}^{(i)})_{\text{inter-group}} + (I_{k,r}^{(i)})_{\text{inter-cell}} + \sigma^2} \right), & k \in S_r^{(i)} \\ 0, & k \notin S_r^{(i)} \end{cases} \quad (22)$$

其中

$$\begin{aligned} (I_{k,r}^{(i)})_{\text{intra-group}} &= |H_{k,i}^{(i)} \mathbf{w}_r^{(i)}|^2 \sum_{k' < k, k' \in S_r^{(i)}} p_{k',r}^{(i)} \\ (I_{k,r}^{(i)})_{\text{inter-group}} &= \sum_{r' \neq r, S_r^{(i)} \in Q^{(i)}} |H_{k,i}^{(i)} \mathbf{w}_{r'}^{(i)}|^2 \sum_{k' \in S_{r'}^{(i)}} p_{k',r'}^{(i)} \\ (I_{k,r}^{(i)})_{\text{inter-cell}} &= \sum_{i' \neq i, S_r^{(i)} \in Q} |H_{k,i'}^{(i')} \mathbf{w}_r^{(i')}|^2 \sum_{k' \in S_r^{(i')}} p_{k',r}^{(i')} \end{aligned} \quad (23)$$

根据上面的概念, 在给定的联盟集合  $Q$  和对应的天线分配集合  $P$  下, 系统的传输速率

$$\bar{R}_{\text{sum}}(Q, P) = \sum_{S_r^{(i)} \in Q} \sum_{ue_k^{(i)} \in S_r^{(i)}} v_k(S_r^{(i)}, Q, P) \quad (24)$$

**定义 1** 给定两个联盟的集合  $Q_1$  和  $Q_2$ , 其对应的用户天线分配集合分别为  $P_1$  和  $P_2$ . 对于分别处于这两个联盟集合中的两个联盟  $S_r^{(i)} \in Q_1$  和  $S_{r'}^{(i)} \in Q_2$ , 对应的天线分配分别为  $P_r^{(i)}$  和  $P_{r'}^{(i)}$ , 并且这两个联盟中均包括用户  $ue_k^{(i)}$ , 本文定义

$$\begin{aligned} S_d^{(i)} \cap S_{d'}^{(i)} &= \phi, \forall d \neq d' \\ |Q^{(i)}| & \\ \bigcup_{d=1}^{|Q^{(i)}|} S_d^{(i)} &= G^{(i)} \end{aligned} \quad (18)$$

用  $P^{(i)}$  来表示第  $i$  个小区中的用户的天线分配的集合, 同时用  $P$  来表示整个系统中所有的  $N$  个小区中的用户的天线分配集合, 则有

$$P = \bigcup_{i=1}^N P^{(i)} = \bigcup_{i=1}^N \{P_1^{(i)}, P_2^{(i)}, \dots, P_{|Q^{(i)}|}^{(i)}\} \quad (19)$$

其中  $P_r^{(i)} = \{M_{k,r}^{(i)} | \forall ue_k^{(i)} \in S_r^{(i)}\}$  表示联盟  $S_r^{(i)}$  中用户的天线分配的集合.

从上面的分析可以得出, 联盟  $S_r^{(i)}$  的价值不仅与本联盟内的用户天线分配有关, 还与其他联盟中的用户的天线分配有关. 因此, 联盟  $S_r^{(i)}$  的价值  $V(S_r^{(i)}, Q, P)$  由下式给出

$$V(S_r^{(i)}, Q, P) = \{v_k(S_r^{(i)}, Q, P) | \forall ue_k^{(i)} \in S_r^{(i)}\} \quad (20)$$

其中  $v_k(S_r^{(i)}, Q, P)$  表示的是用户  $ue_k^{(i)}$  在联盟  $S_r^{(i)}$  之内时的联盟收益.

$$v_k(S_r^{(i)}, Q, P) = \begin{cases} \frac{N_{\text{RF}}}{|Q^{(i)}|} \bar{R}_{k,r}^{(i)}, & |Q^{(i)}| > N_{\text{RF}} \\ \bar{R}_{k,r}^{(i)}, & |Q^{(i)}| \leq N_{\text{RF}} \end{cases} \quad (21)$$

利用上面给出的与联盟博弈相关的概念说明与定义, 我们将用户  $ue_k^{(i)}$  与 RF 链路  $r$  相关联的在给定发送功率的条件下的数据传输速率  $\bar{R}_{k,r}^{(i)}$  改写为

$$\begin{aligned} (S_r^{(i)}, Q_1, P_1) &<_k (S_{r'}^{(i)}, Q_2, P_2) \\ \Leftrightarrow \max_{P_r^{(i)}} \bar{R}_{\text{sum}}(Q_1, P_1) &< \max_{P_{r'}^{(i)}} \bar{R}_{\text{sum}}(Q_2, P_2) \end{aligned} \quad (25)$$

其中  $(S_r^{(i)}, Q_1, P_1) <_k (S_{r'}^{(i)}, Q_2, P_2)$  表示用户  $ue_k^{(i)}$  处于联盟集合  $Q_2$  中, 且天线分配集合为  $P_2$  时系统的性能要优于处于联盟集合  $Q_1$  中, 天线分配集合为  $P_1$  的情况, 说明此时用户  $ue_k^{(i)}$  更应该处于联盟  $S_r^{(i)}$  中. 此外,  $\max_{P_r^{(i)}} \bar{R}_{\text{sum}}(Q_1, P_1)$  表示在联盟集合  $Q_1$  和相应的天线分配集合为  $P_1$  的情况下,  $\bar{R}_{\text{sum}}(Q_1, P_1)$  取得的最大值时联盟  $S_r^{(i)}$  中的天线分配  $P_r^{(i)}$ ,  $\max_{P_{r'}^{(i)}} \bar{R}_{\text{sum}}(Q_2, P_2)$  同理. 并且记  $\tilde{P}_r^{(i)} = \arg \max_{P_r^{(i)}} \bar{R}_{\text{sum}}(Q, P)$ .

**定义 2** 给定两个联盟的集合  $Q_1$  和  $Q_2$ , 其对应的用户天线分配集合分别为  $P_1$  和  $P_2$ . 对于处于联盟集合

$Q_1$  中的两个联盟  $S_{r_1}^{(i)}, S_{r_2}^{(i)} \in Q_1$ , 其对应的天线分配分别为  $P_{r_1}^{(i)}$  和  $P_{r_2}^{(i)}$ , 且这两个联盟中均包含用户  $ue_k^{(i)}$ , 处于联盟集合  $Q_2$  中的两个联盟  $S_{r_1}^{(i)}, S_{r_2}^{(i)} \in Q_2$ , 其对应的天线分配分别为  $P_{r_1}^{(i)}$  和  $P_{r_2}^{(i)}$ , 这两个联盟中均包含用户  $ue_g^{(i)}$ . 本文定义

$$\begin{aligned} & \left( S_{r_1}^{(i)}, S_{r_2}^{(i)}, Q_1, P_1 \right) <_k^g \left( S_{r_1}^{(i)}, S_{r_2}^{(i)}, Q_2, P_2 \right) \\ \Leftrightarrow & \max_{P_{r_1}^{(i)}, P_{r_2}^{(i)}} \bar{R}_{\text{sum}}(Q_1, P_1) < \max_{P_{r_1}^{(i)}, P_{r_2}^{(i)}} \bar{R}_{\text{sum}}(Q_2, P_2) \end{aligned} \quad (26)$$

其中  $\left( S_{r_1}^{(i)}, S_{r_2}^{(i)}, Q_1, P_1 \right) <_k^g \left( S_{r_1}^{(i)}, S_{r_2}^{(i)}, Q_2, P_2 \right)$  表示在用户  $ue_k^{(i)}$  处于联盟  $S_{r_1}^{(i)}$ , 用户  $ue_g^{(i)}$  处于联盟  $S_{r_2}^{(i)}$  的情况下, 系统的性能不如在用户  $ue_k^{(i)}$  处于联盟  $S_{r_1}^{(i)}$ , 用户  $ue_g^{(i)}$  处于联盟  $S_{r_2}^{(i)}$  的情况, 这说明此时用户  $ue_k^{(i)}$  更应当处于联盟  $S_{r_1}^{(i)}$  中, 用户  $ue_g^{(i)}$  更应当处于联盟  $S_{r_2}^{(i)}$  中. 此外,  $\max_{P_{r_1}^{(i)}, P_{r_2}^{(i)}} \bar{R}_{\text{sum}}(Q_1, P_1)$  表示在联盟集合  $Q_1$  和相应的天线分配集合  $P_1$  的条件下,  $\bar{R}_{\text{sum}}(Q_1, P_1)$  取得最大值时联盟  $S_{r_1}^{(i)}$  和  $S_{r_2}^{(i)}$  的天线分配,  $\max_{P_{r_1}^{(i)}, P_{r_2}^{(i)}} \bar{R}_{\text{sum}}(Q_2, P_2)$  同理, 并且记  $\left\{ \tilde{P}_{r_1}^{(i)}, \tilde{P}_{r_2}^{(i)} \right\} = \arg \max_{P_{r_1}^{(i)}, P_{r_2}^{(i)}} \bar{R}_{\text{sum}}(Q, P)$ .

根据上面给出的两个定义, 接下来分析一下联盟形成的迭代过程. 假设在第  $\text{iter}$  次迭代中, 当前的联盟集合为  $Q_{\text{iter}}$ , 其对应的天线分配集合为  $P_{\text{iter}}$ , 则对于联盟形成的下一次迭代, 存在以下两种情况:

**情况 1** 假设当前的联盟集合  $Q_{\text{iter}}$  中存在两个联盟  $S_{r_1}^{(i)}, S_{r_2}^{(i)} \in Q_{\text{iter}}$ , 用户  $ue_k^{(i)} \in S_{r_1}^{(i)}$ , 并且  $|S_{r_2}^{(i)}| = 1$ , 即联盟  $S_{r_2}^{(i)}$  中只有一个用户. 则当满足式(27)的条件时, 用户  $ue_k^{(i)}$  会离开当前联盟  $S_{r_1}^{(i)}$  然后加入联盟  $S_{r_2}^{(i)}$

$$\left( S_{r_1}^{(i)}, Q_{\text{iter}}, P_{\text{iter}} \right) <_k \left( S_{r_2}^{(i)} \cup \{ue_k^{(i)}\}, Q_{\text{iter}+1}, P_{\text{iter}+1} \right) \quad (27)$$

其中

$$Q_{\text{iter}+1} = \left\{ Q_{\text{iter}} \setminus \left\{ S_{r_1}^{(i)}, S_{r_2}^{(i)} \right\} \right\} \cup \left\{ S_{r_1}^{(i)} \setminus \{ue_k^{(i)}\}, S_{r_2}^{(i)} \cup \{ue_k^{(i)}\} \right\}.$$

每个联盟最多只能有两个用户, 当用户  $ue_k^{(i)}$  离开联盟  $S_{r_1}^{(i)}$  加入联盟  $S_{r_2}^{(i)}$  后, 联盟  $\left\{ S_{r_1}^{(i)} \setminus \{ue_k^{(i)}\} \right\}$  中若为一个用户, 则其天线分配  $\tilde{P}_{r_1}^{(i)} = M_{\text{BS}}$ , 若没有用户则  $\tilde{P}_{r_1}^{(i)} = 0$ . 同时, 联盟  $S_{r_2}^{(i)} \cup \{ue_k^{(i)}\}$  中有两个用户, 其天线分配可以通过在  $[M_{\text{min}}, M_{\text{BS}} - M_{\text{min}}]$  区间内进行搜索得到, 记天线分配结果为  $\tilde{P}_{r_2}^{(i)}$ , 则有

$$P_{\text{iter}+1} = \left\{ P_{\text{iter}} \setminus \left\{ P_{r_1}^{(i)}, P_{r_2}^{(i)} \right\} \right\} \cup \left\{ \tilde{P}_{r_1}^{(i)}, \tilde{P}_{r_2}^{(i)} \right\} \quad (28)$$

**情况 2** 假设当前的联盟集合  $Q_{\text{iter}}$  中存在两个联盟

$S_{r_1}^{(i)}, S_{r_2}^{(i)} \in Q_{\text{iter}}$ , 对于这两个联盟中的两个用户  $ue_k^{(i)} \in S_{r_1}^{(i)}$  和  $ue_g^{(i)} \in S_{r_2}^{(i)}$ . 则当满足式(29)的条件时, 用户  $ue_k^{(i)}$  和  $ue_g^{(i)}$  会彼此进行联盟交换

$$\begin{aligned} & \left( S_{r_1}^{(i)}, S_{r_2}^{(i)}, Q_{\text{iter}}, P_{\text{iter}} \right) \\ & <_k^g \left( S_{r_1}^{(i)} \setminus \{ue_k^{(i)}\} \cup \{ue_g^{(i)}\}, S_{r_2}^{(i)} \setminus \{ue_g^{(i)}\} \cup \{ue_k^{(i)}\}, Q_{\text{iter}+1}, P_{\text{iter}+1} \right) \end{aligned} \quad (29)$$

其中

$$\begin{aligned} & Q_{\text{iter}+1} \\ & = \left\{ Q_{\text{iter}} \setminus \left\{ S_{r_1}^{(i)}, S_{r_2}^{(i)} \right\} \right\} \cup \left\{ S_{r_1}^{(i)} \setminus \{ue_k^{(i)}\} \cup \{ue_g^{(i)}\}, S_{r_2}^{(i)} \setminus \{ue_g^{(i)}\} \cup \{ue_k^{(i)}\} \right\} \end{aligned} \quad (30)$$

同样的, 将两个用户彼此交换后的联盟  $S_{r_1}^{(i)} \setminus \{ue_k^{(i)}\} \cup \{ue_g^{(i)}\}$  和  $S_{r_2}^{(i)} \setminus \{ue_g^{(i)}\} \cup \{ue_k^{(i)}\}$  的天线分配分别记为  $\tilde{P}_{r_1}^{(i)}$  和  $\tilde{P}_{r_2}^{(i)}$ , 则有

$$P_{\text{iter}+1} = \left\{ P_{\text{iter}} \setminus \left\{ P_{r_1}^{(i)}, P_{r_2}^{(i)} \right\} \right\} \cup \left\{ \tilde{P}_{r_1}^{(i)}, \tilde{P}_{r_2}^{(i)} \right\} \quad (31)$$

综上, 可以给出用户分组和天线分配的算法如算法 1 所示.

#### 算法 1 用户分组和天线分配算法

初始化迭代计数器  $\text{iter} = 0$ ; 将每一个用户作为一个联盟初始化联盟集合  $Q_0 = \bigcup_{i=1}^N \{S_1^{(i)}, S_2^{(i)}, \dots, S_k^{(i)}\}$ , 其中  $S_k^{(i)} = \{ue_k^{(i)}\}, \forall k, i$ ; 相应的, 每个用户分配所有的  $M_r$  个天线单元作为初始天线分配集合  $P_0 = \bigcup_{i=1}^N \{P_1^{(i)}, P_2^{(i)}, \dots, P_k^{(i)}\}$ , 其中  $P_k^{(i)} = \{M_{\text{BS}}\}, \forall k, i$

- 1) 循环
- 2) 对于  $ue_k^{(i)} \in S_{r_1}^{(i)}$ , 遍历所有  $S_{r_2}^{(i)} \in Q_{\text{iter}}, r_2 \neq r_1$
- 3) if  $|S_{r_2}^{(i)}| = 1$  且满足式(27)的条件
- 4) 按情况 1 进行处理
- 5) else if 对于  $ue_g^{(i)} \in S_{r_2}^{(i)}$  满足式(29)的条件
- 6) 按照情况 2 进行处理
- 7) end if
- 8) until 联盟之间不再发生用户的离开或加入
- 9) 得到最终用户分组  $Q_{\text{iter}}$  和天线分配  $P_{\text{iter}}$

## 4.2 第二阶段——功率分配

通过第一阶段得到的最终的用户分组  $Q^*$  和天线分配  $P^*$ , 可以确定变量  $c_{k,r}^{(i)}$  和  $M_{k,r}^{(i)}$  的取值, 将其代入式(15)中, 并根据(15)中的约束 C6~C9, 可以得到功率分配问题模型

$$\begin{aligned} \max_{p_{k,r}^{(i)}} R_{\text{sum}} &= \max_{p_{k,r}^{(i)}} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K \sum_{r=1}^{N_{\text{RF}}} R_{k,r}^{(i)} \quad (32) \\ \text{s.t.} & \quad \text{C6~C9} \end{aligned}$$

该问题也是一个非凸的数学优化问题, 可以将其转化为一个 DC 规划形式<sup>[12,13]</sup>

$$\begin{aligned} & \min_{\mathbf{p}_{k,r}^{(i)}} T_1(\mathbf{p}) - T_2(\mathbf{p}) \\ & \text{s.t. } C6 \sim C9 \end{aligned} \quad (33)$$

其中

$$\begin{aligned} T_1(\mathbf{p}) &= - \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K \sum_{r=1}^{N_{RF}} B \cdot \log_2(F_1^{i,k,r}(\mathbf{p})) \\ T_2(\mathbf{p}) &= - \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K \sum_{r=1}^{N_{RF}} B \cdot \log_2(F_2^{i,k,r}(\mathbf{p})) \end{aligned} \quad (34)$$

$T_1(\mathbf{p})$ 和 $T_2(\mathbf{p})$ 是两个关于功率 $\mathbf{p}$ 可微的凸函数,对于第 $iter$ 次迭代的功率分配 $\mathbf{p}_{iter}$ ,有

$$T_2(\mathbf{p}) \geq T_2(\mathbf{p}_{iter}) + \nabla_{\mathbf{p}} T_2(\mathbf{p}_{iter})^T (\mathbf{p} - \mathbf{p}_{iter}) \quad (35)$$

此时,问题转化为

$$\begin{aligned} & \min_{\mathbf{p}_{k,r}^{(i)}} T_1(\mathbf{p}) - T_2(\mathbf{p}_{iter}) - \nabla_{\mathbf{p}} T_2(\mathbf{p}_{iter})^T (\mathbf{p} - \mathbf{p}_{iter}) \\ & \text{s.t. } C6 \sim C9 \end{aligned} \quad (36)$$

通过迭代获取功率分配的算法如算法 2 所示.

**算法 2 功率分配算法**

给定一个容忍误差  $\varepsilon$  和迭代次数上限  $iter_{max}$ , 初始化迭代计数器  $iter = 0$ , 给定一个初始功率分配  $\mathbf{p}_{iter}$

1) 循环

2) 将  $\mathbf{p}_{iter}$  代入式(36)中, 求得新的功率分配

$\mathbf{p}_{iter+1}$ , 令  $iter = iter + 1$

3) until  $iter = iter_{max}$  或  $\|\mathbf{p}_{iter} - \mathbf{p}_{iter-1}\| \leq \varepsilon$

4) 得到最终功率分配  $\mathbf{p}_{iter}$

**5 仿真分析**

假设基站配备的 ULA 天线阵列, 天线数量  $M_{BS} = 50$ , 天线单元之间的间距等于半波长. 在多波束方案中, 用户 1 和用户 2 与基站之间的偏移角分别为  $\theta_1 = 60^\circ$  和  $\theta_2 = 90^\circ$ , 给用户 1 和用户 2 划分的天线子阵列的天线单元数量分别为  $M_1 = 20$  和  $M_2 = 30$ . 而对于单波束方案, 假设用户与基站之间的偏移角  $\theta = 120^\circ$ .

天线阵列响应随角度的变化曲线如图 1 所示. 从图中我们可以看出在传统的单波束方案中, 天线的阵列响应只产生了一个指向  $\theta = 120^\circ$  的波束, 而在多波束方案中, 通过将两个子阵列的波束进行叠加, 得到的天线阵列响应中存在指向  $\theta_1 = 60^\circ$  和  $\theta_2 = 90^\circ$  两个方向上的波束, 这说明了本文所提出的通过划分天线子阵列进行多波束的波束赋形方案的有效性.

保持用户 1 和用户 2 所分配的天线单元的比例不变, 将基站天线数量增加为  $M_{BS} = 100$ , 此时分配给用户 1 和用户 2 的天线单元数量分别为  $M_1 = 40$ , 和  $M_2 = 60$ , 天线阵列响应随角度的变化曲线如图 2 所示. 对比图 1 和图 2 可知, 随着基站天线单元数量的增多, 基站所产生的波束的波束宽度逐渐减小.

接着仿真 URA 天线阵列的波束赋形方案. 假设基

站天线单元数量  $M_x \times M_y = 50 \times 50$ , 天线单元之间的间距依然为半波长. 对于用户 1, 其方位角  $\theta_1 = 60^\circ$ , 仰角  $\varphi_1 = 40^\circ$ , 给其划分的天线子阵列的天线单元的数量  $M_x \times M_{y,1} = 50 \times 30$ . 对于用户 2, 其方位角  $\theta_2 = 90^\circ$ , 仰角  $\varphi_2 = 80^\circ$ , 给其划分的天线子阵列的天线单元的数量  $M_x \times M_{y,2} = 50 \times 20$ .

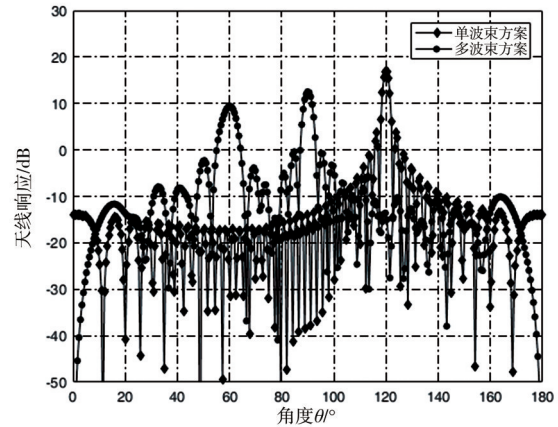


图 1 ULA 天线阵列响应随角度变化曲线 ( $M_{BS} = 50$ )

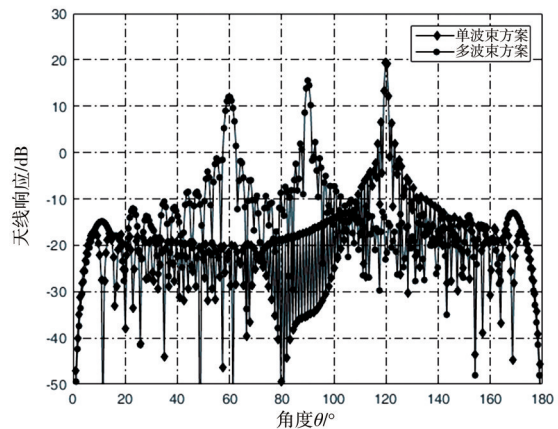


图 2 ULA 天线阵列响应随角度变化曲线 ( $M_{BS} = 100$ )

URA 天线阵列的阵列响应随方位角和仰角的变化曲线如图 3 和图 4 所示. 结合图 3 和图 4, 可以看出基站产生了指向  $\theta = 60^\circ, \varphi = 40^\circ$  和  $\theta = 90^\circ, \varphi = 80^\circ$  两个方向上的波束, 从而说明了本文所提出多波束波束赋形方案的有效性.

最后对本文所提出的资源分配方案的性能进行仿真, 并与采用单波束 NOMA 的方案和 OMA 的方案的性能进行对比. 假设系统中存在  $N = 3$  个彼此相邻的小区, 每个小区的覆盖半径  $r_c = 200\text{m}$ , 每个小区的基站位于小区的中心位置. 则相邻基站之间的距离为  $400\text{m}$ . 每个基站的发送功率  $p_{BS} = 30\text{dBm}$ , 每个基站配备的 RF 链路的数量  $N_{RF} = 6$ . 每个小区中存在  $K = 10$  个用户,

其均匀地分布在小区的覆盖范围之内,并且对于任意一个用户, 给其分配的天线单元的最小数量  $M_{\min} = M_{\text{BS}}/10$ . 此外, 我们假设基站和用户之间的信道包含 1 条 LOS 路径和  $L = 10$  条 NLOS 路径, 且 NLOS 路径的信道增益为 LOS 路径的 0.1 倍. 系统噪声功率  $\sigma^2 = -80\text{dBm}$ . 通过改变基站天线单元的数量, 仿真得到系统速率随基站天线单元数量的变化曲线如图 5 所示.

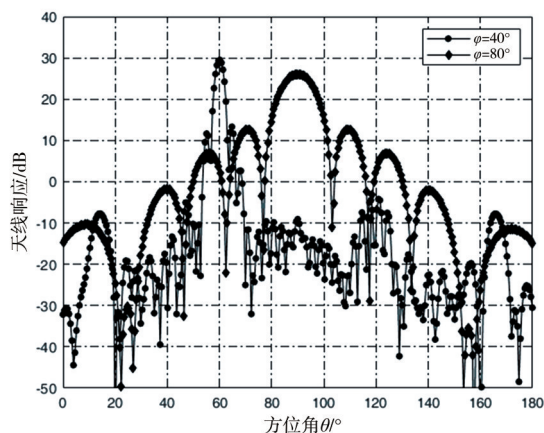


图3 URA 天线阵列响应随方位角变化曲线

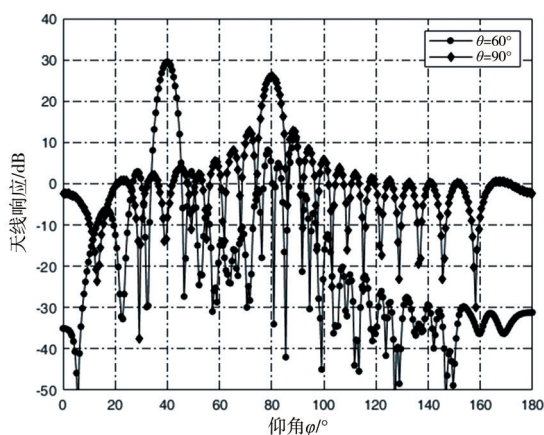


图4 URA 天线阵列响应随仰角变化曲线

从图 5 中可以看出, 随着基站的天线单元数量的增加, 系统速率逐渐增大. 此外, 当基站天线单元数量比较少, 单波束的 NOMA 方案的性能相较于 OMA 方案具有比较明显的提升, 而随着天线单元数量的增加, 单波束 NOMA 方案的速率曲线逐渐与 OMA 方案重合. 这是由于在天线单元数量较少的时候, 基站的波束宽度比较宽, 多个用户处于同一波束覆盖范围内的概率相对较大, 能够采用 NOMA 进行传输. 随着天线单元数量逐渐增多, 基站的波束会逐渐变窄, 此时单波束 NOMA 方案无法找到合适的用户进行配对, 从而导致单波束 NOMA 方案的性能与 OMA 方案相当. 而在基站天线单元

较多时, 本文所提出的多波束 NOMA 方案依然能够不受波束宽度的影响灵活的进行用户配对, 从而提升系统的速率.

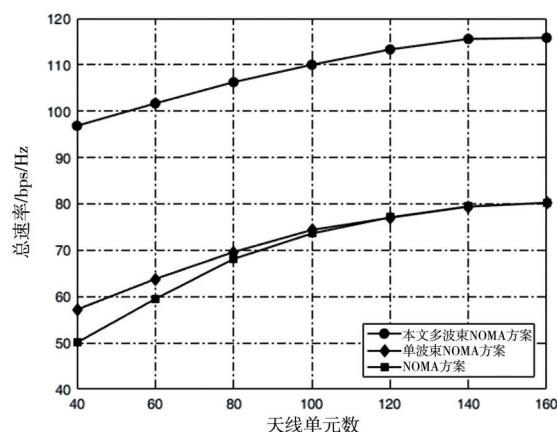


图5 系统速率随基站天线单元数量变化曲线

## 6 结束语

本文针对 NOMA 在毫米波 Massive MIMO 系统中用户分组受限的问题提出了一种多波束的波束赋形方案. 基于这种方案, 建立了基于系统速率最大化的多小区多用户场景下的资源分配模型, 并分为两个阶段对模型进行求解. 利用联盟博弈提出了用户分组和天线分配的方案; 通过将模型转化为 DC 规划形式提出了用户功率分配的方案. 仿真结果表明, 本文提出的多波束波束赋形方案能够有效的产生指向多个方向的波束, 并且相较于单波束的波束赋形方案以及 OMA 方案, 本文所提出的基于多波束波束赋形的方案能够有效的提高系统的性能.

## 参考文献

- [1] Al-Ogaili F, Shubair R M. Millimeter-wave mobile communications for 5G: Challenges and opportunities [A]. 2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI) [C]. Puerto Rico: IEEE, 2016. 1003 - 1004.
- [2] 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.
- [3] Marzetta Thomas L. Massive MIMO: an introduction [J]. Bell Labs Technical Journal, 2015, 20: 11 - 22.
- [4] 卢安安, 高西奇. 大规模 MIMO 传输技术与展望 [J]. 中国科学基金, 2020, 34(2): 186 - 192.  
Lu A A, Gao X Q. Prospects and overview of massive MIMO transmission [J]. Bulletin of National Natural Science

- Foundation of China, 2020, 34(2): 186 – 192. (in Chinese)
- [5] Ding Z, Fan P, Poor H V. Random beamforming in millimeter-wave NOMA networks [J]. IEEE Access, 2017, 5: 7667 – 7681.
- [6] Wang B, Dai L, Wang Z, et al. Spectrum and energy-efficient beamspace MIMO-NOMA for millimeter-wave communications using lens antenna array [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(10): 2370 – 2382.
- [7] Cui J, Liu Y, Ding Z, et al. Optimal user scheduling and power allocation for millimeter wave NOMA systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 17(3): 1502 – 1517.
- [8] Jiang L, Jafarkhani H. Multi-user analog beamforming in millimeter wave MIMO systems based on path angle information [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 18(1): 608 – 619.
- [9] Wang B, Dai L, Wang Z, et al. Spectrum and energy-efficient beamspace MIMO-NOMA for millimeter-wave communications using lens antenna array [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(10): 2370 – 2382.
- [10] 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.
- [11] Elmagzoub H M, Chen Q. On the multi-user MIMO hybrid precoding design in millimeter wave cellular systems [A]. 2018 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT) [C]. Chengdu: IEEE, 2018. 1 – 3.
- [12] Vucic N, Shi S, Schubert M. DC programming approach for resource allocation in wireless networks [A]. 8th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks [C]. Avignon, France: IEEE, 2010. 380 – 386.
- [13] Wei Z, Ng D W K, Yuan J, et al. Optimal resource allocation for power-efficient MC-NOMA with imperfect channel state information [J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(9): 3944 – 3961.

#### 作者简介



刘彦平 男, 1994年7月出生, 陕西渭南人. 现为西安电子科技大学通信工程学院研究生. 主要研究方向为5G和无人机通信.  
E-mail: ypliu721@stu.xidian.edu.cn



侯蓉晖 女, 1980年6月出生, 陕西白水人. 现为西安电子科技大学网络与信息安全学院教授. 主要研究方向为车联网、卫星组网、网络安全.  
E-mail: rhhou@xidian.edu.cn