



文章编号:1001-9081(2019)07-2030-05

DOI:10.11772/j.issn.1001-9081.2018122456

## 异构网络中天线资源有限时的部分干扰对齐方案

李世宝\*, 王宜馨, 赵大印, 叶伟, 郭琳, 刘建航

(中国石油大学(华东) 计算机与通信工程学院, 山东 青岛 266580)

(\*通信作者电子邮箱 lishibao@upc.edu.cn)

**摘要:**针对异构网络中天线资源有限导致无法实现完全干扰对齐(IA)这一问题,提出一种根据异构网络特点使天线资源利用率最大的部分IA方案。首先,根据异构网络中部分连通性构建系统模型,并分析系统实现IA的可行性条件;然后,基于网络的异构性(基站功率和用户稳定性不同)对用户划分不同的优先级并分配不同的天线资源;最后,以系统总速率最大和天线资源利用率最大为目标设计高优先级用户完全对齐、低优先级用户消除最大干扰的部分IA方案。在Matlab仿真实验中,所提算法相比传统的IA算法在天线有限情况下能提高10%的系统总速率,并且高优先级用户接收到的速率比低优先级用户的速率高40%。实验结果表明,所提算法能充分利用有限天线资源,在满足用户差异性需求的同时实现系统总速率最大。

**关键词:**异构网络;优先级;有限天线资源;系统总速率;部分干扰对齐

**中图分类号:** TN929.5    **文献标志码:**A

### Partial interference alignment scheme with limited antenna resource in heterogeneous network

LI Shibao\*, WANG Yixin, ZHAO Dayin, YE Wei, GUO Lin, LIU Jianhang

(College of Computer and Communication Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao Shandong 266580, China)

**Abstract:** To solve the problem that the antenna resources in heterogeneous network are limited which leads to the unrealizable Interference Alignment (IA), a partial IA scheme for maximizing the utilization of antenna resources was proposed based on the characteristics of heterogeneous network. Firstly, a system model based on partial connectivity in heterogeneous network was built and the feasibility conditions for entire system to achieve IA were analyzed. Then, based on the heterogeneity of network (the difference between transmitted power and user stability), the users were assigned to different priorities and were distributed with different antenna resources according to their different priorities. Finally, with the goal of maximizing total rate of system and the utilization of antenna resources, a partial IA scheme was proposed, in which the high-priority users had full alignment and low-priority users had the maximum interference removed. In the Matlab simulation experiment where antenna resources are limited, the proposed scheme can increase total system rate by 10% compared with traditional IA algorithm, and the received rate of the high-priority users is 40% higher than that of the low-priority users. The experimental results show that the proposed algorithm can make full use of the limited antenna resources and achieve the maximum total system rate while satisfying the different requirements of users.

**Key words:** heterogeneous network; priority; limited antenna resources; total rate of system; partial Interference Alignment (IA)

### 0 引言

异构网络是多种网络接入技术相互交融的网络共同体<sup>[1]</sup>,被认为是满足无线网络中高速流量需求的最有前途的方法之一。通过在传统的蜂窝网络中部署微小区,异构网络可以提高频谱利用率,改善蜂窝网络的覆盖情况,提高网络容量。虽然微小区的部署可以显著提高频谱效率,但也会对蜂窝网络造成严重干扰,因此,有效管理异构网络中的干扰至关重要。

近年来,干扰对齐(Interference Alignment, IA)作为管理无线网络干扰的重要技术得到广泛研究。文献[2]中提出通

过构造发射机的预编码矩阵将干扰对齐到每个接收机的降维子空间,可以使用更多的信号维度传输无干扰的有用数据流,并证明能够在K-用户干扰信道中实现K/2自由度,即实现自由度随着网络中用户的数量线性增加。文献[3]研究了K用户多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)信道中IA的可行性条件。在此基础上,文献[4]中提出了基于信道互易性的最小干扰泄漏算法和最大信噪比算法,通过收发机双方反复迭代来计算预编码矩阵和干扰抑制矩阵,实现了干扰对齐。研究人员将IA应用在传统的蜂窝网络中,研究了多小区下行信道的IA算法及能实现的自由度<sup>[5]</sup>,蜂窝小区MIMO信道的IA算法<sup>[6]</sup>以及如何在实际场景通过链路反

收稿日期:2018-12-12;修回日期:2019-01-28;录用日期:2019-02-27。    基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(61601519, 61872385);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(18CX02134A, 18CX02137A, 18CX02133A)。

**作者简介:**李世宝(1978—),男,山东潍坊人,副教授,硕士,主要研究方向:移动计算、无线传感器网络、干扰对齐;王宜馨(1995—),女,河南南阳人,硕士研究生,主要研究方向:干扰对齐;赵大印(1995—),男,山东聊城人,硕士研究生,主要研究方向:干扰对齐;叶伟(1996—)男,安徽铜陵人,硕士研究生,主要研究方向:干扰对齐;郭琳(1995—),女,山东烟台人,硕士研究生,主要研究方向:干扰对齐;刘建航(1978—),男,辽宁锦州人,副教授,博士,主要研究方向:移动计算、无线传感器网络、车联网。



馈来实现干扰对齐<sup>[7]</sup>,结果表明 IA 可以有效解决传统蜂窝网络中的干扰,并增加系统的自由度。文献[8]和文献[9]分别研究了两个蜂窝小区的多址广播信道的 IA 方案和可行性条件,证明一个上行一个下行的广播信道能实现更多的自由度,将 IA 的研究扩展到更复杂的信道中。文献[10]研究了全双工蜂窝网络中找到封闭解的循环 IA 方案,通过基站 (Base Station, BS) 协调配合减少了不必要的系统开销,显著提高系统吞吐量。相对于最初的  $K$  用户干扰信道,干扰对齐的应用场景越来越复杂,需要消除的干扰种类和总量都大幅度增加。

学者们也研究了如何利用 IA 管理异构网络中的干扰。文献[11]中提出了异构网络下行链路开放模式和封闭模式下的分层干扰对齐方案,不仅解决了跨层干扰和层间干扰,还增加了系统的自由度;文献[12]考虑了为了管理由毫微微小区基站处的宏小区用户引起的上行链路干扰,提出了宏小区用户与最近的毫微微小区基站之间的协作的干扰对齐算法,将多个微基站处的相同子空间中的宏小区用户的接收信号对齐到同一维度上;文献[13]研究了蜂窝上行链路下的设备到设备 (Device to Device, D2D) 通信网络,将来自设备的干扰对齐消除,使蜂窝用户的链路完全没有干扰;文献[14]中提出了一种两阶段 IA 方案,利用异构网络的异构性和部分连通性来解决跨层干扰和层间干扰,让整个网络实现了更多的自由度;文献[15]针对用户配备单个可重构天线的宏毫微微双层网络提出了认知盲干扰对齐方案;文献[16]中提出了一种新的异构蜂窝网虚拟化框架,将虚拟化和 IA 技术结合起来提高系统总速率;文献[17]研究了异构网络上行链路中最优的数据流消除顺序和相应的干扰对齐方案。但是,以上工作都是在天线数目满足可行性条件的前提下研究系统中所有用户完全干扰对齐的方案,通过分层设计、减少系统开销和选择最佳的消除顺序等方法来最大化消除异构网络中的干扰,使 IA 性能更佳,没有研究异构网络中天线数目不能实现完全干扰对齐的情况。

在实际场景中,通信网络中的天线数目经常不能满足完全干扰对齐的条件,尤其是异构网络里的微站、微微站、毫微微基站等天线数目更加有限,因此,天线不足情况下如何根据网络特点和用户需求充分合理地分配有限的天线资源使系统总速率最大是当前亟待解决的问题。

本文针对具有不同类型微基站的异构网络通信模型,在对网络中的干扰和 IA 可行性条件进行分析的基础上,提出了有限天线资源时的部分干扰对齐方案,根据异构网络的特点,优先保证部分用户完全干扰对齐,其他用户利用剩余资源消除系统最大干扰,实现有限天线资源利用率的最大化。

## 1 系统模型

考虑如图 1 所示的异构网络,一个宏小区下部署了几个微小区。所有的小区共用相同的频段资源。宏基站有  $M_0$  根发射天线,服务于一个或多个用户。图 1 中的微小区按微基站发射功率的大小分为大功率微小区和小功率微小区,两类微小区基站的天线数分别为  $M_1$  和  $M_2$ ,且  $M_0 \geq M_1 \geq M_2$ 。用户的天线数都为  $N$ 。大功率微小区之间由于发射功率大,且覆盖范围比较广,因此对其他用户都造成干扰。小功率微基站不仅发射功率小,而且一般距离较远,相互之间的干扰经过衰弱后可以忽略不计。将宏基站和大功率微基站标号记为集合  $\hat{L} = \{0, 1, \dots, L\}$ ,小功率基站记为集合  $\hat{J} = \{L+1, L+2, \dots, L+J\}$ 。第

$k$  个接收端接收到的信号可以表示为:

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{U}_k^H \sqrt{\eta_{k,k} p} \mathbf{H}_{k,k} \mathbf{V}_k \mathbf{s}_k + \mathbf{U}_k^H \sum_{i \in \hat{L} \cup \hat{J}, i \neq k} \sqrt{\eta_{k,i} p_i} \mathbf{H}_{k,i} \mathbf{V}_i \mathbf{s}_i + \mathbf{U}_k^H \mathbf{n}_k \quad (1)$$

式(1)右边的三项分别表示实际接收到的期望信号、来自其他发射端的干扰以及接收到的噪声。 $\mathbf{s}_k = [s_k^1, s_k^2, \dots, s_k^d]^T$  表示发送端发送的独立同分布信号,  $d$  为数据流条数。对应的预编码矩阵  $\mathbf{V}_i = [\mathbf{v}_i^1, \mathbf{v}_i^2, \dots, \mathbf{v}_i^d]$ , 干扰抑制矩阵  $\mathbf{U}_i = [\mathbf{u}_i^1, \mathbf{u}_i^2, \dots, \mathbf{u}_i^d]$ , 其中对  $\mathbf{V}_i$  和  $\mathbf{U}_i$  中的元素  $\mathbf{v}_i^j$  和  $\mathbf{u}_i^j$  满足  $\|\mathbf{v}_i^j\|_F = \|\mathbf{u}_i^j\|_F = 1$ ,  $\mathbf{H}_{k,i}$  为第  $i$  个发送端到第  $k$  个接收端的信道矩阵。 $\mathbf{n}_k$  表示接收端  $k$  接收的加性高斯白噪声,且  $\mathbf{n}_k \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2 \mathbf{I}_N)$ ,  $p_{k,j}$  表示发送端  $k$  为第  $j$  条数据流分配的发送功率,  $\eta_{k,i}$  表示发送端  $i$  到接收端  $k$  的路径损耗,单位 dB,可由国际电信联盟 无线通信局 (Radiocommunication sector of the International Telecommunication Union, ITU-R) 提出的信道模型计算:

$$10 \lg \eta_{k,i} = 40 \lg r_{k,i} + 30 \lg f + 49 \quad (2)$$

其中: $r_{k,i}$  为发送端  $i$  到接收端  $k$  的距离(单位为 km);  $f$  为载波信号频率(单位为 MHz)。

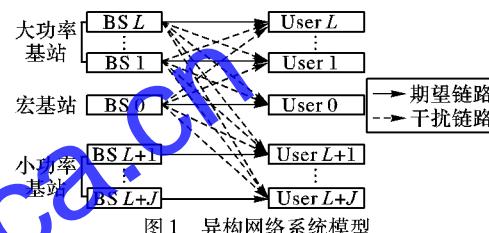


图 1 异构网络系统模型  
Fig. 1 Heterogeneous network system model

用户  $k$  可获得的传输速率可表示为:

$$R_k = \text{lb} \left( 1 + \frac{p_k \eta_{k,k} |\mathbf{U}_k^H \mathbf{H}_{k,k} \mathbf{V}_k|^2}{\sigma^2 + \sum_{i \in \hat{L} \cup \hat{J}, i \neq k} \eta_{k,i} p_i |\mathbf{H}_{k,i} \mathbf{V}_i \mathbf{s}_i|^2} \right) \quad (3)$$

## 2 天线资源有限时的干扰对齐方案

从实际情况考虑,功率大的基站覆盖范围广,干扰强度大,小区比较稳定,用户流动性不大,应该最优先解决其干扰问题。功率小的微基站发射的信号经过路径损耗,相互之间的干扰很小,只会对随机分散的宏用户产生干扰。因其覆盖范围小,且用户具有更强的流动性,因此小功率微小区的用户的优先级比较低。

本章首先对系统实现干扰对齐的可行性条件进行分析,证明大多数场景中天线资源不能满足完全干扰对齐的需求,为此,根据用户不同的优先级,提出差异化分配有限天线资源的部分干扰对齐方案以提高天线利用率。

### 2.1 可行性条件分析

为了实现整个系统的干扰对齐,以下条件需要满足:

$$\mathbf{U}_l^H \mathbf{H}_{k,i} \mathbf{V}_i = 0; \forall i \neq l, i, l \in \hat{L} \quad (4)$$

$$\mathbf{U}_0^H \mathbf{H}_{0,j} \mathbf{V}_j = 0; \forall j \in \hat{J} \quad (5)$$

$$\mathbf{U}_j^H \mathbf{H}_{j,i} \mathbf{V}_i = 0; \forall i \in \hat{L}, j \in \hat{J} \quad (6)$$

$$\text{rank}(\mathbf{U}_i^H \mathbf{H}_{k,k} \mathbf{V}_i) = d_i; \forall i \in \hat{L} \cup \hat{J} \quad (7)$$

条件式(4)是大功率微小区的用户和宏用户的干扰能够对齐到用户的正交空间中;条件式(5)保证消除了宏用户接收到的来自小功率微基站的干扰;条件式(6)消除了来自大功率微基站和宏基站对小功率微小区用户的干扰。

式(4)中包含的总变量的个数为  $L(M_1 + N - 2d)d +$



$(M_0 + N - 2d)$ , 包含的等式总数为  $L(L - 1)d^2 + Ld^2 + Ld^2$ 。为了便于化简, 假定  $M_0 = M_1 = M$ , 则当干扰对齐可行时, 以下条件需要满足:

$$(M + N - 2d) \geq Ld \quad (8)$$

实现式(5)要满足  $(M_2 - d')d' \geq dd'$ , 即:

$$d' \leq M_2 - d \quad (9)$$

条件式(6)要满足:  $(L + 1)(M_1 - d)d + J(N_2 - d')d' \geq (L + 1)Jdd'$ , 即:

$$M_1 \geq Jd' + d - \frac{J(N_2 - d')d'}{(L + 1)d} > Jd' + d - N_2 + d' \quad (10)$$

求得:

$$M_1 + N_2 \geq (J + 1)d' + d \quad (11)$$

通过式(11)可知, 对小功率微小区用户实现干扰对齐时, 对大功率基站的天线数目有额外的需求, 这在实际场景中很难满足。一般的场景中天线资源只能满足大功率微小区用户和宏小区用户消除干扰的需求。当天线资源不满足式(11)时, 系统不能实现干扰对齐, 只能充分利用天线使资源利用率最大。

## 2.2 部分干扰对齐方案

高优先级的用户受到其他所有大功率基站的信号干扰, 所以大功率的微基站小区构成全  $K$ -用户干扰网络, 定义第  $K$  个用户的第  $l$  个数据流的信干噪比(Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR)为:

$$\text{SINR}_{kl} = \frac{(\mathbf{U}_k^l)^H \mathbf{H}_{kk} \mathbf{V}_k^l (\mathbf{V}_k^l)^H \mathbf{H}_{kk}^H \mathbf{U}_k^l}{(\mathbf{U}_k^l)^H \mathbf{B}_{kl} \mathbf{U}_k^l} \frac{P_k}{d_k} \quad (12)$$

其中  $\mathbf{B}_{kl}$  是该数据流的干扰和噪声协方差矩阵:

$$\mathbf{B}_{kl} = \sum_{j=1}^k \frac{P_j}{d_j} \sum_{d=1}^{d_j} \mathbf{H}_{kj} \mathbf{V}_j^d (\mathbf{V}_j^d)^H \mathbf{H}_{kj}^H - \frac{P_k}{d_k} \mathbf{H}_{kk} \mathbf{V}_k^l (\mathbf{V}_k^l)^H \mathbf{H}_{kk}^H + \mathbf{I}_{N_T} \quad (13)$$

最大 SINR 的干扰抑制矩阵  $\mathbf{U}_k^l$  为:

$$\mathbf{U}_k^l = (\mathbf{B}_{kl})^{-1} \mathbf{H}_{kk} \mathbf{V}_k^l / \|(\mathbf{B}_{kl})^{-1} \mathbf{H}_{kk} \mathbf{V}_k^l\| \quad (14)$$

用传统的迭代干扰对齐算法可以消除来自其他大功率基站的干扰。求解过程中的信道矩阵为等效矩阵:

$$\hat{\mathbf{H}}_u = \mathbf{H}_u \hat{\mathbf{V}}_l \quad (15)$$

其中:  $\hat{\mathbf{V}}_l$  用于消除对低优先级用户的干扰, 将在后面部分给出。通过传统的迭代干扰对齐算法求解出  $K$  用户网络的预编码矩阵和接收滤波矩阵, 分别记为  $\bar{\mathbf{V}}_l, \bar{\mathbf{U}}_l$ , 大功率基站的预编码矩阵表示为  $\mathbf{V}_l = \bar{\mathbf{V}}_l \hat{\mathbf{V}}_l$ 。

小功率的微基站对宏用户产生的干扰, 可通过在其发射端进行预编码将数据发送到宏用户的正交空间中被消除。小功率的微基站的预编码矩阵为:

$$\mathbf{G}_j = \text{null}(\mathbf{U}_0^H \mathbf{H}_{0,j}); j \in \hat{J} \quad (16)$$

低优先级用户接收到来自大功率微基站的干扰和宏基站的干扰, 如果要将这些干扰进行对齐并且正交消除, 对发出干扰的基站有较高的天线要求。当天线数目有限时, 可以将低优先级用户接收到的这些干扰按照干扰能量或者其他方法进行排序; 然后再依据可行性条件, 以系统总的和速率或者其他目标为优化目标, 选择出最有利于优化目标的干扰链路; 接下来将选出的干扰链路设计接收解码矩阵消除干扰, 从而使得充分利用有限资源优化系统性能得到优化, 并且可以降低传统干扰对齐技术的复杂度。

所有低优先级用户接收到的总速率为:

$$R_{\Sigma} = \sum_{j=1}^J R_j = \sum_{j=1}^J \text{lb} \left( 1 + \frac{p \eta_{j,j} |\mathbf{U}_j^H \mathbf{H}_{j,j} \mathbf{V}_j|^2}{\sigma^2 + \bar{I}} \right) \quad (17)$$

其中  $\bar{I}$  表示大功率微基站和宏基站发送的数据流对低优先级用户的干扰:

$$\bar{I} = \sum_{i=0}^L p_i \eta_{k,i} |\mathbf{U}_k^H \mathbf{H}_{k,i} \mathbf{V}_i|^2 \quad (18)$$

当满足可行性条件式(8)、(9)、(11)时, 将大功率微基站对低优先级用户的干扰对齐到宏基站的干扰信号维度上, 即:

$$\text{span}(\mathbf{H}_{j,0} \mathbf{V}_0) = \text{span}(\mathbf{H}_{j,1} \mathbf{V}) = \text{span}(\mathbf{H}_{j,2} \mathbf{V}_2) = \dots = \text{span}(\mathbf{H}_{j,L} \mathbf{V}_L) \quad (19)$$

大功率基站  $l$  需要满足:

$$\begin{cases} \text{span}(\mathbf{H}_{1,l} \mathbf{V}_l) = \text{span}(\mathbf{H}_{1,0} \mathbf{V}_0) \\ \text{span}(\mathbf{H}_{2,l} \mathbf{V}_l) = \text{span}(\mathbf{H}_{2,0} \mathbf{V}) \\ \vdots \\ \text{span}(\mathbf{H}_{J,l} \mathbf{V}) = \text{span}(\mathbf{H}_{J,0} \mathbf{V}) \end{cases} \quad (20)$$

式(20)的解为:

$$\hat{\mathbf{V}}_l = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{1,l} \\ \mathbf{H}_{2,l} \\ \vdots \\ \mathbf{H}_{J,l} \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{1,0} \mathbf{V}_0 \\ \mathbf{H}_{2,0} \mathbf{V}_0 \\ \vdots \\ \mathbf{H}_{J,0} \mathbf{V}_0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

其中,  $A^+ = A^H (A A^H)^{-1}$

当天线数目不满足式(8)、(9)、(11)时, 需要充分利用大功率基站的剩余天线来尽可能多地消除干扰, 实现系统总速率的最大, 即:

$$\max \sum_{j=1}^J \text{lb} \left( 1 + \frac{p \eta_{j,j} |\mathbf{U}_j^H \mathbf{H}_{j,j} \mathbf{V}_j|^2}{\sigma^2 + \bar{I}} \right) \quad (22)$$

为此, 本文提出一种简便的方案来最大化减少系统中干扰, 具体操作如下:

步骤1 基站  $l$  ( $l \in \hat{L}$ ) 对所有低优先级用户  $j$  ( $j = L + 1, L + 2, \dots, L + J$ ) 产生的干扰  $I_{j,l}$  按照强度进行降序排列, 并记为  $I_l^1, I_l^2, \dots, I_l^J$ 。

步骤2 基站  $l$  的剩余  $q$  根天线通过发射端的预编码矩阵  $\hat{\mathbf{V}}_l = \text{null}([\mathbf{H}_{L+1,l}^H, \mathbf{H}_{L+2,l}^H, \dots, \mathbf{H}_{L+q,l}^H, 0, \dots, 0])$  来消除步骤1中的最强的  $q$  个低优先级用户的干扰。

步骤3 计算高优先级用户的  $\tilde{\mathbf{H}}_{k,i}$  ( $k, i \in \hat{L}$ ), 进行高优先级用户的干扰对齐, 求出预编码矩阵  $\mathbf{V}_k$  和干扰抑制矩阵  $\mathbf{U}_k$ 。

干扰抑制矩阵要消除已经对齐到宏基站发射的干扰信号维度的干扰信号, 将其对齐到正交空间, 所以需要满足:

$$\mathbf{F}_j = \text{null}((\mathbf{H}_{j,0} \mathbf{V}_0)^H) \quad (23)$$

再计算等效信道矩阵:

$$\tilde{\mathbf{H}}_{j,j} = \mathbf{F}_j^H \mathbf{H}_{j,j} \mathbf{G}_j \quad (24)$$

进行奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)得:

$$\tilde{\mathbf{H}}_{j,j} = \tilde{\mathbf{U}}_j \Lambda_j \tilde{\mathbf{V}}_j^H \quad (25)$$

低优先级用户的预编码矩阵和接收滤波矩阵分别为  $\mathbf{V}_j = \mathbf{G}_j \tilde{\mathbf{V}}_j, \mathbf{U}_j = \mathbf{F}_j \tilde{\mathbf{U}}_j$ 。

如果只追求总速率最大, 可能会导致低优先级用户中有些要求速率较高的用户实际接收到的速率很低, 而有些没有高需求的用户却得到更大的速率, 因此, 如果低优先级的部分用户有特殊需求, 将这部分用户划定为高级用户, 没有特殊需求的用户为普通用户。

通过对大功率基站的发射端进行预编码设计, 可以优先



消除高级用户接收到的两条最大干扰。具体流程如下。

步骤1 对高级用户 $j$ 的接收到的干扰按照强度进行降序排序，并记为 $I_{l,j}^1, I_{l,j}^2, \dots, I_{l,j}^{L+1}$ 。

步骤2 判定大功率基站 $i$ 是否有多余天线，有剩余天线的所有基站记为集合 $A$ 。

步骤3 判断最大的两条干扰的发射基站是否都在集合 $A$ 中，如果不在，则找到次最大干扰进行判定，直到发出两个干扰的基站都在集合 $A$ 中。

步骤4 在这两个基站的发射端进行预编码 $\hat{V}_i = \text{null}([\mathbf{H}_{L+1,i}^H, \mathbf{H}_{L+2,i}^H, \dots, \mathbf{H}_{L+q,i}^H])$ ，更新集合 $A$ 。

步骤5 转到第2步，继续下一个高级用户的操作。

步骤6 计算出高优先级用户的信道矩阵。

接收滤波矩阵与2.1节中低优先级用户的设计方案相同。

高级用户的两条最大干扰数据流被正交消除后，剩下的天线资源能消除的干扰非常有限，分别按照尽可能所有用户都通信和普通用户总速率最大两种标准来设计方案。

如果以让普通用户尽可能通信为目标，则将没有用于消除高级用户干扰的大功率微基站记为集合 $W$ ，基站 $l$  ( $l \in W$ ) 对所有普通用户产生的干扰按照强度进行降序排列，通过预编码消除基站 $l$ 对未消除干扰的普通用户产生的最大干扰，同时把干扰消除的用户标记为已消除用户。

如果以系统总速率最大为目标，则将没有用于消除高级用户干扰的大功率微基站记为集合 $W$ ，基站 $l$  ( $l \in W$ ) 对所有普通用户产生的干扰按照强度进行降序排列，然后通过预编码消除其中的最大干扰。这样资源能得到最充分的利用，让普通用户的总速率最大。

### 3 实验仿真与分析

本章利用Matlab仿真实验评估在天线数目有限的情况下所设计的干扰对齐方案能否充分利用资源，实现系统总速率最大并且满足不同用户的需求。仿真实验环境为 $L + J$ 个微小区，每个微小区有一个发射端基站，接收端位于小区的边缘。每个发射端向本小区边缘的用户发送数据，用户很容易受到多个小区发射信号的影响。假定发射端与接收端的距离随机分布在 $0.9r$ 到 $r$ 之间，其中 $r$ 取400 m，其中的信道路径损耗根据国际电信联盟无线通信局提出的信道模型进行计算，载波频率取2 GHz，噪声功率给定为-113 dB。小功率基站的发射功率为30 dBm，大功率基站的发射功率为60 dBm。实验在高优先级用户数为5，有8根发送天线，6根接收天线，发送1个数据流；低优先级用户收发天线数都为2，发送2个数据流的条件下重复进行蒙特卡罗实验1000次，通过改变低优先级用户的数目，观察比较不同算法下系统总速率和各级用户的速率。

图2为天线数目足够时的分层干扰对齐算法、天线资源有限时分层干扰对齐算法与本文提出的充分利用天线资源的系统总速率的对比。天线充足的异构分层干扰对齐算法干扰能完全消除，系统总速率随着用户总数的增多呈线性增长。当低优先级用户数目为1时，大功率基站的天线有冗余，可以完全消除干扰，因此三条线重合。当低优先级用户数目大于1时，天线资源不足，干扰无法完全消除，系统总速率有较大损失，并且异构分层干扰对齐算法比本文所提算法的系统总速率低。这是因为异构分层对齐算法的天线消除哪条干扰是

随机的，没有针对性地消除最大干扰，而本文所提算法通过分配天线优先消除最大干扰提高系统总速率，使天线利用率最大。

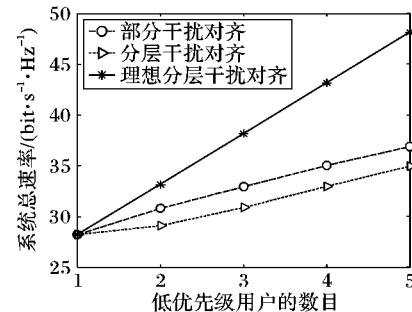


图2 不同算法下系统总速率对比

Fig. 2 Comparison of total system rate under different algorithms

图3为高优先级用户和低优先级用户的平均速率的对比。从图中可以看出，高优先级的用户速率明显高于低优先级的用户平均速率，证明了所提方案能够满足用户的差异化需求。图中低优先级用户的平均速率随着用户数目的增多而减小，这是由于低优先级用户数增多造成总的干扰增多，而天线资源不变，能够消除的干扰数据流条数不变，因此系统中剩余干扰增多，用户接收到的平均速率减小。随机分配天线资源时，低优先级用户的速率大幅度低于所提方案中的低优先级用户速率，因为天线可能被分配去消除很小的干扰，而很强的干扰被留下没有消除，天线资源没有被最大化利用。

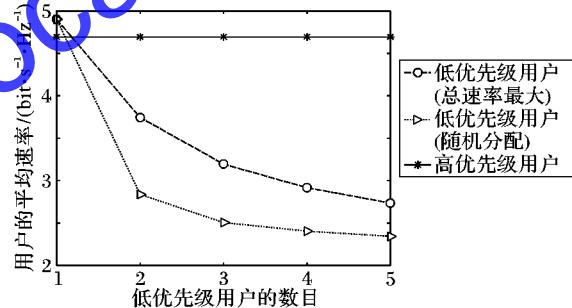


图3 高优先级和低优先级用户平均速率对比

Fig. 3 Comparison of average rate for high-priority and low-priority users

图4为用户分为三级时各级用户的平均速率对比。在两级用户的基础上将低优先级用户分成高级用户和普通用户。当低优先级的用户数小于2时，没有普通用户，所以低级用户的平均速率为0。当低优先级用户较少时，天线资源相对充足，所以高级用户和普通用户的平均速率相差不大；当低优先级用户较多时，而高级用户仍然保持比较稳定的资源分配消除最大的两条干扰，速率变化不大，而普通用户由于资源有限，只能消除一条最大的干扰或者没有消除干扰，因而高级用户的平均速率明显高于普通用户。低优先级用户的平均速率低于用户分为两级时的平均速率，是因为有两条天线总是会消除高级用户的干扰，其干扰往往不是较大的干扰，因而此时天线利用率相对较低。

图5为高级用户和普通用户的平均速率对比，普通用户分别以总速率最大和尽可能通信为目标消除干扰。可以看出，尽可能保证每个用户通信的平均速率略低于普通用户总速率最大算法的速率，因为牺牲了部分整体性能来保证每个用户的基础通信，但是随着低优先级用户数目的增多，天线资源不变，残留干扰更多，两种方案下普通用户的平均速率趋于一致。

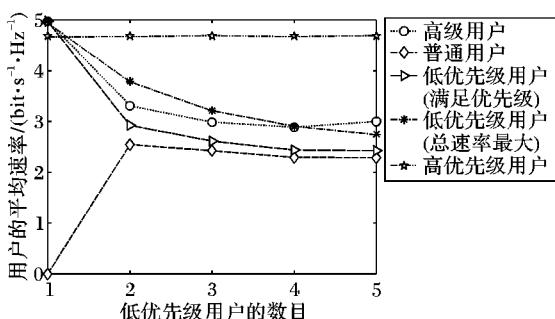


图4 不同优先级用户的平均速率对比

Fig. 4 Comparison of average rate for users with different priority

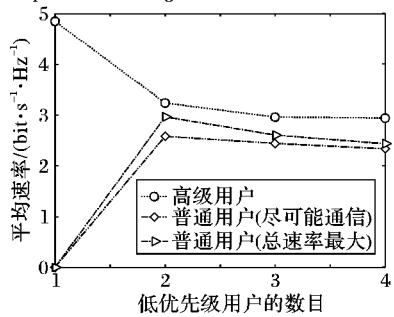


图5 高级用户和普通用户的平均速率对比

Fig. 5 Average rate comparison between advanced users and ordinary users

#### 4 结语

为了减少异构网络中由于干扰造成的速率损失,本文研究了天线资源受限、微小区基站功率不同情况下的干扰对齐算法。在分析了系统实现完全干扰对齐的可行性条件的基础上,提出了天线数目有限条件下的部分干扰对齐方案,该方案根据小区用户的特点来差异化分配天线资源,并对不同等级的用户设计不同的干扰对齐方案,利用有限的天线资源实现系统总速率最大。由仿真结果可知,所提算法能够在不同优先级的用户得到不同的速率的同时显著提高系统总速率,使资源利用率最大。下一步将研究异构网络干扰对齐过程中如何通过差异化分配反馈比特来满足用户更具体的差异化需求。

#### 参考文献 (References)

- [1] DAMNjanovic A, MONTOJO J, WEI Y, et al. A survey on 3GPP heterogeneous networks [J]. IEEE Wireless Communications, 2011, 18(3): 10–21.
- [2] CADAMBE V R, JAFAR S A. Interference alignment and degrees of freedom of the K-user interference channel [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2008, 54(8): 3425–3441.
- [3] YETIS C M, GOUT J, JAFAR S A, et al. On feasibility of interference alignment in MIMO interference networks [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(9): 4771–4782.
- [4] GOMADAM K, CADAMBE V R, JAFAR S A. A distributed numerical approach to interference alignment and applications to wireless interference networks [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2011, 57(6): 3309–3322.
- [5] SUH C, HO M, TSE D N C. Downlink interference alignment[J]. IEEE Transactions on Communications, 2011, 59 (9): 2616 – 2626.
- [6] TANG J, LAMBOTHARAN S. Interference alignment techniques for MIMO multi-cell interfering broadcast channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(1): 164 – 175.
- [7] 章扬, 周正, 石磊, 等. 蜂窝网络下行链路单反馈干扰对齐算法研究[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(12): 2816 – 2822. (ZHANG Y, ZHOU Z, SHI L, et al. Interference alignment with single feedback for downlink cellular networks[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2012, 34(12): 2816 – 2822.)
- [8] JEON S W, SUH C. Degrees of freedom of uplink-downlink multiantenna cellular networks[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2016, 62(8): 4589 – 4603.
- [9] JEON S W, KIM K, YANG J, et al. The feasibility of interference alignment for MIMO interfering broadcast—multiple-access channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16 (7): 4614 – 4625.
- [10] SHIN W, LIM J B, CHOI H H, et al. Cyclic interference alignment for full-duplex multi-antenna cellular networks [J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(6): 2657 – 2671.
- [11] SHIN W, NOH W, JANG K, et al. Hierarchical interference alignment for downlink heterogeneous networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(12): 4549 – 4559.
- [12] GULER B, YENER A. Uplink interference management for coexisting MIMO femtocell and macrocell networks: an interference alignment approach [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(4): 2246 – 2257.
- [13] YANG L, ZHANG W, JIN S. Interference alignment in device-to-device LAN underlaying cellular networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(7): 3715 – 3723.
- [14] LIU G, SHENG M, WANG X, et al. Interference alignment for partially connected downlink MIMO heterogeneous networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(2): 551 – 564.
- [15] MOHALES C M, PLATA C J, TOUMPAKARIS D, et al. Cognitive blind interference alignment for macro-femto networks [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2017, 65(19): 5121 – 5136.
- [16] WANG K, LI H, YU F R, et al. Interference alignment in virtualized heterogeneous cellular networks with imperfect channel state information [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(2): 1519 – 1532.
- [17] SHENG M, LIU G, WANG X, et al. Interference alignment and cancelation for the uplink of heterogeneous networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66 (2): 1104 – 1115.

This work is partially supported by the Young Scientists Fund of National Natural Science Foundation of China (61601519, 61872385), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (18CX02134A, 18CX02137A, 18CX02133A).

**LI Shibao**, born in 1978, M. S., associate professor. His research interests include mobile computing, wireless sensor network, interference alignment.

**WANG Yixin**, born in 1995, M. S. candidate. Her research interests include interference alignment.

**ZHAO Dayin**, born in 1995, M. S. candidate. His research interests include interference alignment.

**YE Wei**, born in 1996, M. S. candidate. His research interests include interference alignment.

**GUO Lin**, born in 1995, M. S. candidate. Her research interests include interference alignment.

**LIU Jianhang**, born in 1978, Ph. D., associate professor. His research interests include mobile computing, wireless sensor network, Internet of vehicles.