

# 双层异构网络下多用户干扰对齐算法

杨敬文, 李莉, 邱昊

(上海师范大学信息与机电工程学院, 上海 200234)

**摘要:** 针对多个毫微微蜂窝网络与宏蜂窝网络共存的网络环境, 基于干扰对齐技术, 提出了一种双层预编码方案, 首先定义宏蜂窝网络对毫微微蜂窝网络造成的干扰为跨层干扰, 毫微微蜂窝网络之间的干扰为同层干扰, 分别对毫微微蜂窝用户和宏蜂窝用户进行预编码, 宏蜂窝用户的预编码使得跨层干扰最小, 使之可比拟于背景噪声, 毫微微蜂窝用户的预编码与毫微微蜂窝基站的后置编码进行迭代, 以最小均方误差(MMSE)准则输出, 仿真结果表明所提算法使得毫微微蜂窝网络的吞吐量相较于单层 MMSE 算法在信噪比为 0 ~ 30 dB 区间内平均提高了 3 bps/Hz.

**关键词:** 干扰对齐; 双层异构网络; 毫微微蜂窝; 最小均方误差

**中图分类号:** TN 929.5   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1000-5137(2016)02-0150-05

## 0 引言

随着室内用户对室内通信的重视程度越来越高, 必然会有更多的用户选择在家庭安装毫微微蜂窝基站, 随着毫微微蜂窝在小区中数量的提升, 在考虑毫微微蜂窝网络与宏蜂窝网络之间干扰的同时, 各个毫微微蜂窝之间的干扰也不容忽视. 加之无线用户的逐年递增, 普通干扰对齐技术单一的一层预编码与后置编码已经不足以应对复杂网络环境下的交错干扰, 如何针对多用户多基站情形下的异构网络进行干扰管理是干扰对齐算法推广和普及的制约因素之一. 文献[1]提出了一种双层异构网络中对于下行链路的干扰对齐, 优化了宏蜂窝网络的下行链路速率, 保证了宏蜂窝用户的服务质量. 文献[2]提出了一种仅需牺牲主用户网络小部分的吞吐量但能极大增加次用户网络吞吐量的干扰对齐算法. 文献[3]针对异构网络中的开放用户群和封闭用户群这两种模式, 提出了一种分层的干扰对齐.

但上述文献算法均未对多个毫微微蜂窝基站共同作用于同一小区的情形加以讨论与优化. 本文作者基于上述文献的部分结论, 将重点放在多个毫微微蜂窝网络与宏蜂窝网络共存的无线网络环境中, 基于多用户多基站模型, 提出了一种针对多用户的干扰对齐算法: 在一个小区中覆盖了一个宏蜂窝基站和多个毫微微蜂窝基站, 定义宏蜂窝网络对毫微微蜂窝网络造成的干扰为跨层干扰, 毫微微蜂窝网络之间的干扰为同层干扰, 利用不同的编码方式分别处理跨层干扰与同层干扰, 实验结果表明了该算法在保证误码率的同时, 提高了毫微微蜂窝网络的吞吐量.

文章结构如下, 第一节给出相应的系统模型, 第二节重点介绍了多用户干扰对齐算法, 第三节针对所提出的算法对进行的仿真并对结果进行分析, 最后在第四节给出总结. 以下符号贯穿全文,  $\mathbf{A}^{-1}$  代表

收稿日期: 2016-01-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(61503251)

通信作者: 李莉, 中国上海市徐汇区桂林路 100 号, 上海师范大学信息与机电工程学院, 邮编: 200234, E-mail: lilyxuan@shnu.edu.cn

矩阵  $\mathbf{A}$  的逆,  $\mathbf{A}^H$  表示  $\mathbf{A}$  的厄密共轭矩阵,  $\text{tr}(\mathbf{A})$  为矩阵  $\mathbf{A}$  的迹,  $\text{rank}(\mathbf{A})$  为矩阵  $\mathbf{A}$  的秩,  $\det|\mathbf{A}|$  为矩阵  $\mathbf{A}$  的行列式,  $\mathbf{I}$  为单位矩阵.

### 1 系统模型

图1为多个毫微微蜂窝网络与宏蜂窝网络共同覆盖下的小区示意图,宏蜂窝基站(MBS)覆盖半径为  $R$  的整个小区,毫微微蜂窝基站(FBS)覆盖半径为  $r$ ,多个宏蜂窝用户(MU)随机的分布在小区覆盖范围之内,各个毫微微蜂窝基站中均拥有一个毫微微蜂窝用户(FU)与其进行通信,与MU不同,FU位置相对局限在与其通信的FBS覆盖范围之内.

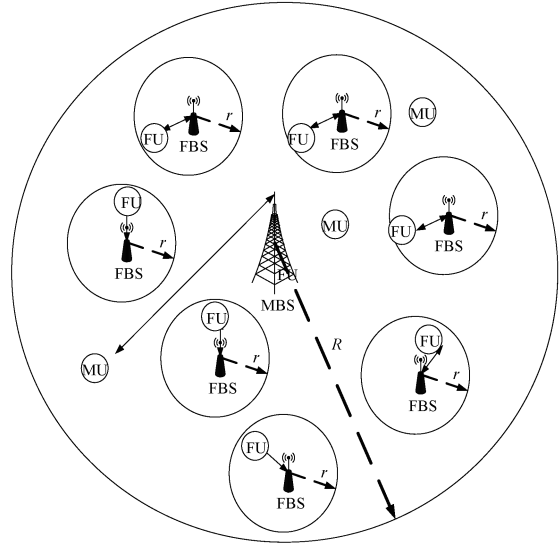


图1 多用户多基站双层异构网络覆盖示意图

具体干扰模型如图2所示,设定在该通信场景中  $M$  个宏蜂窝用户( $MU_1, \dots, MU_M$ )与一个宏蜂窝基站进行通信,  $K$  个毫微微蜂窝对应  $K$  个毫微微蜂窝基站( $BS_1, BS_2, \dots, BS_K$ ),每个毫微微蜂窝拥有1个毫微微蜂窝用户,记为  $FU_k (k=1, 2, \dots, K)$ ; 其中,  $FU_k (k=1, 2, \dots, K)$ 、 $MU_m (m=1, 2, \dots, M)$  各自具有  $N_f$  根发射天线,毫微微蜂窝基站、宏蜂窝基站各自具有  $N_r$  根接收天线.

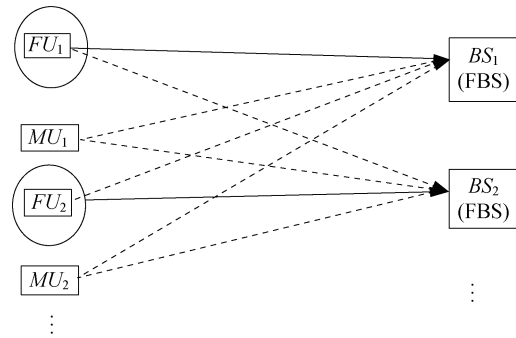


图2 多用户多基站双层异构网络干扰模型

在此通信场景中,分析各个 FBS 的干扰来源,主要由下面两部分组成:一方面,由于宏蜂窝网络的作用范围, MU 与 MBS 进行通信时会对各个 FBS 造成干扰,即跨层干扰;另一方面,而各个 FBS 与其对应的 FU 进行通信时,同样会对其他 FBS 造成干扰,也就是同层之间的相互干扰.

### 2 多用户干扰对齐算法

因为干扰信号来源复杂,为了便于区分,定义  $\mathbf{h}_{km} (N_r \times N_t)$  为第  $m (m=1, 2, \dots, M)$  个 MU 到第  $k (k=1, 2, \dots, K)$  个 FBS 的信道系数矩阵; 设定  $\mathbf{H}_{ij} (N_r \times N_t)$  为第  $j$  个 FU 到第  $i$  个 FBS 的信道系数矩阵 ( $i, j=1, 2, \dots, K$ ), 各毫微微蜂窝用户与宏蜂窝用户的发送端对各自发射信号进行归一化处理,使其发射信号均值为0,方差为1. 记  $FU_k$  的发射信号为  $s_k$ ;  $BS_k$  接收到的噪声向量记做  $\mathbf{n}_k$ , 维数是  $N_r \times 1$ , 服从均值为0,方差为  $\sigma^2$  的高斯分布,  $E(\mathbf{n}_k \times (\mathbf{n}_k)^H) = \sigma^2 \mathbf{I}$ ,  $\mathbf{I}$  为  $N_r$  阶的单位矩阵.

首先,设计  $MU_m$  预编码矩阵  $\mathbf{T}_m (N_t \times 1)$ , 使得所有毫微微蜂窝基站所受宏蜂窝用户的总干扰噪声功率  $J_{\text{sum}}$  最小:

$$J_{\text{sum}} = \sum_{k=1}^K J_k \tag{1}$$

其中,  $J_k$  为第  $k$  个毫微微蜂窝基站受到来自  $M$  个宏蜂窝用户的干扰加噪声的平均功率:

$$J_k = \left( \sum_{i=1}^M \mathbf{h}_{ki} \mathbf{T}_i + \mathbf{n}_k \right)^H \left( \sum_{i=1}^M \mathbf{h}_{ki} \mathbf{T}_i + \mathbf{n}_k \right) \tag{2}$$

对  $J_{\text{sum}}$  求梯度,令  $\nabla J_{\text{sum}} = 0$ , 得到:

$$\mathbf{R} = - \left( \sum_{k=1}^K \mathbf{Q}_k \right)^{-1} \left( \sum_{k=1}^K \mathbf{P}_k \right). \quad (3)$$

其中  $\mathbf{Q}_k = (\mathbf{h}_{k1}, \dots, \mathbf{h}_{kM})^H (\mathbf{h}_{k1}, \dots, \mathbf{h}_{kM})$ ,  $\mathbf{R} = (\mathbf{T}_1^H, \mathbf{T}_2^H, \dots, \mathbf{T}_M^H)$ ,  $\mathbf{P}_k = (\mathbf{h}_{k1}, \dots, \mathbf{h}_{kM})^H \mathbf{n}_k$ ;

所得矩阵  $\mathbf{R}$  中的分量  $\mathbf{T}_m$  即为  $MU_m$  上的预编码 ( $m = 1, 2, \dots, M$ );

设计  $FU_k$  上的预编码  $\mathbf{w}_k$ , 维数是  $N_t \times 1$ ; 设计  $BS_k$  上的干扰抑制矩阵  $\mathbf{g}_k$ , 维数是  $N_f \times 1$ ; 第  $k$  个毫微微蜂窝基站接收端信号均方误差计为  $\varepsilon_k$ , 表示为:

$$\begin{aligned} \varepsilon_k &= E(|\hat{s}_k - s_k|^2) = \\ &E\left(\left|\left(\sum_{i=1}^K \mathbf{g}_k^H \mathbf{H}_{ki} \mathbf{w}_i s_k + J_k\right) - s_k\right|^2\right) = \\ &|\mathbf{g}_k^H \mathbf{H}_{kk} \mathbf{w}_k - 1|^2 + \sum_{i \neq k} |\mathbf{g}_k^H \mathbf{H}_{ki} \mathbf{w}_i|^2 + J_k^2. \end{aligned} \quad (4)$$

则在功率受限的条件下, 使所有毫微微蜂窝基站接收端信号均方误差最小<sup>[4]</sup>, 即:

$$\min_{\substack{\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_k \\ \mathbf{g}_1, \dots, \mathbf{g}_k}} \sum_{k=1}^K \varepsilon_k \quad \text{s. t. } \mathbf{w}_k^H \mathbf{w}_k \leq 1 \quad (k = 1, 2, \dots, K). \quad (5)$$

由于  $\varepsilon_k$  为凸, 所以上式必存在唯一解  $\mathbf{w}_k, \mathbf{g}_k$ , 可以通过牛顿迭代有效的找到, 具体求解过程如下:

1: 初始化编码矩阵  $\mathbf{w}_k$ ;

2: 计算干扰抑制矩阵  $\mathbf{g}_k$ :

$$\mathbf{g}_k = \frac{\left(\sum_{i=1}^N \mathbf{H}_{ki} \mathbf{w}_i (\mathbf{H}_{ki} \mathbf{w}_i)^H + J_k \mathbf{I}\right)^{-1} (\mathbf{H}_{kk} \mathbf{w}_k)}{\left\| \left(\sum_{i=1}^N \mathbf{H}_{ki} \mathbf{w}_i (\mathbf{H}_{ki} \mathbf{w}_i)^H + J_k \mathbf{I}\right)^{-1} (\mathbf{H}_{kk} \mathbf{w}_k) \right\|}. \quad (6)$$

3: 根据矩阵  $\mathbf{g}_k$  求得编码矩阵  $\mathbf{w}_k$ :

$$\mathbf{w}_k = \frac{\left(\sum_{i=1}^N \mathbf{H}_{ki} \mathbf{g}_i (\mathbf{H}_{ki} \mathbf{g}_i)^H + J_k \mathbf{I}\right)^{-1} (\mathbf{H}_{kk} \mathbf{g}_k)}{\left\| \left(\sum_{i=1}^N \mathbf{H}_{ki} \mathbf{g}_i (\mathbf{H}_{ki} \mathbf{g}_i)^H + J_k \mathbf{I}\right)^{-1} (\mathbf{H}_{kk} \mathbf{g}_k) \right\|}. \quad (7)$$

4: 重复上述计算  $\mathbf{g}_k$  和  $\mathbf{w}_k$  的步骤直至  $\varepsilon_k$  收敛所得  $\mathbf{w}_k, \mathbf{g}_k$  即为所求解.

至此, 分别求出了毫微微蜂窝、宏蜂窝用户的预编码以及毫微微蜂窝基站的后置编码, 下一节将通过仿真结果具体表明该算法的有效性.

### 3 实验结果与分析

本节涉及的仿真场景为: 在多个毫微微蜂窝网络与宏蜂窝网络共同覆盖下的小区系统模型中, 包括 2 个宏蜂窝用户与 1 个宏蜂窝基站进行通信, 2 个毫微微蜂窝对应 2 个毫微微蜂窝基站. 每个毫微微蜂窝拥有 1 个毫微微蜂窝用户, 其中, 毫微微蜂窝用户与宏蜂窝用户各自具有 3 根发射天线, 毫微微蜂窝基站、宏蜂窝基站各自具有 3 根接收天线.

为了验证该编码方式的可靠性, 首先针对运用了该算法后毫微微蜂窝网络的误码率进行了仿真, 仿真结果如图 3 所示, 在采用了所提的多用户干扰对齐预编码后, 各个毫微微蜂窝网络的误码率随着信噪比的提高下降明显, 在信噪比为 20 dB 左右时已经低于  $10^{-3}$ , 表明了该编码方式的可行性.

接下来, 为了验证所提算法为毫微微蜂窝网络系统性能带来的提升, 针对使用了本算法、文献[4]

所提 MMSE 干扰对齐算法和未使用干扰对齐算法这 3 种方式对毫微微蜂窝网络的吞吐量进行了仿真。如图 4 所示,采用了本算法后,吞吐量曲线随着信噪比的增长其增长趋势明显,文献[4]所提 MMSE 干扰对齐算法的曲线在信噪比达到 15 dB 时增长趋于平缓。本算法比文献[4]所提 MMSE 算法在信噪比为 0~30 dB 区间内平均提高了 3 bps/Hz,体现了本算法的优越性,而未采用干扰对齐算法的吞吐量曲线随着信噪比的增长却无任何增益,如果不对干扰加以抑制,会对整个通信系统带来严重的影响。进一步说明了研究多个毫微微蜂窝网络与宏蜂窝网络共存下的多用户干扰管理预编码技术具有十分重要的现实意义。

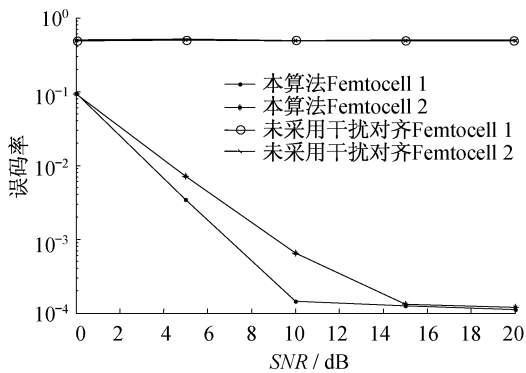


图3 两个毫微微蜂窝网络误码率仿真图

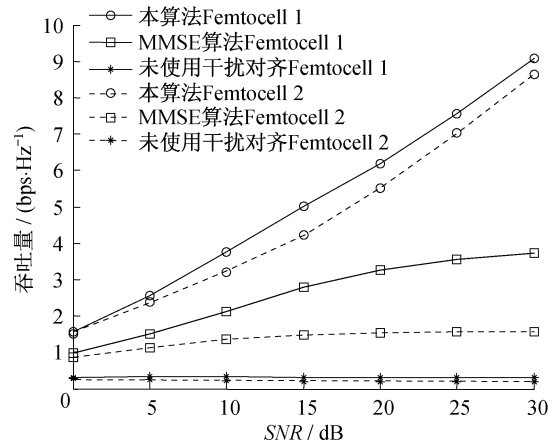


图4 两个毫微微蜂窝网络吞吐量仿真图

## 4 总结

本文作者主要探究了多个毫微微蜂窝网络与宏蜂窝网络共存下的多用户干扰管理预编码技术,研究了一种双层异构网络下多用户干扰对齐算法——分别对毫微微蜂窝用户和宏蜂窝用户进行预编码,宏蜂窝用户的预编码使得跨层干扰最小,使之可比拟于背景噪声,毫微微蜂窝用户的预编码与毫微微蜂窝基站的后置编码进行迭代,以最小均方误差准则输出,在保证信噪比在 10 dB 时毫微微蜂窝网络的误码率低于  $10^{-3}$ 。毫微微蜂窝的吞吐量比文献[4]所提 MMSE 算法在信噪比为 0~30dB 区间内平均提高了 3 bps/Hz,保证了毫微微蜂窝用户的服务质量。但本文作者并没有将宏蜂窝基站所受来自毫微微用户的干扰考虑其中,在下一步的研究中,将会在重点放在如何设计出兼顾宏蜂窝基站与毫微微蜂窝基站的干扰对齐预编码中。

## 参考文献:

- [1] Li Q, Gu X, Li H, et al. Interference alignment for MIMO downlink femtocell networks [J]. IEEE International Conference on Networks, 2013, 121(1): 1-4.
- [2] Seo J, Yang C, Park G, et al. Partial Interference Alignment in Heterogeneous Networks [C]//IEEE. Military Communications Conference. San Diego: IEEE, 2013.
- [3] 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.

- [ 4 ] Schmidt D A, Shi C, Berry R A, et al. Minimum mean squared error interference alignment [J]. Asilomar Conference on Signals, 2009, 59(9) :2616 – 2626.
- [ 5 ] 李莉, 杨敬文, 周小平. 一种认知双层异构网络系统下的干扰管理策略; 201410314568[P]. 2014 – 10 – 29.
- [ 6 ] Wu Z, Jiang L, Ren G, et al. A novel joint spatial-code clustered interference alignment scheme for large-scale wireless sensor networks [J]. Sensors, 2015, 15(1) :1964 – 1997.
- [ 7 ] Chen S, Cheng R S. Clustering for interference alignment in multiuser interference network [J]. Vehicular Technology IEEE Transactions on, 2012, 63(6) :1 – 5.
- [ 8 ] Jingwen Y, Li L, Xiaoping Z. Regionalized interference alignment in Two-Tiered cognitive heterogeneous networks [J]. Journal of Communications, 2014, 9(11) :829 – 835.
- [ 9 ] Rao X, Ruan L, Lau V K N. Limited feedback design for interference alignment on MIMO Interference networks with heterogeneous path loss and spatial Correlations [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61(10) :2598 – 2607.
- [ 10 ] Lertwiram N, Popovski P, Sakaguchi K. A Study of trade-off between opportunistic resource allocation and interference alignment in femtocell scenarios [J]. Wireless Communications Letters IEEE, 2012, 1(4) :356 – 359.
- [ 11 ] 李莉, 杨敬文, 王珍. 异构网络下的干扰管理预编码技术; 201510319826. 9[P]. 2015 – 12 – 28.

## Multiple-users interference alignment base on two-tiered heterogeneous networks

YANG Jingwen, LI li, QIU Hao

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

**Abstract:** Interference alignment is a novel interference alignment way, which is popular in interference management of two-tiered heterogeneous networks. Based Interference alignment technique, a two level precoding scheme has been presented to solve the interference in the case of multi-femtocell network coexist with macrocell network. First we define co-layer interference as the interference between femtocell and femtocell, correspondingly, we define cross-layer interference as the interference between macrocell and femtocell, and use precoders at macrocell users and femtocell users respectively. The precoders of macrocell users minimize the cross-layer interference, and output of iteration between precoders of femtocell users and post code of base station bases on mean square error minimization algorithm, which would be used to handle co-layer interference, thus it will reduce interference of femtocell at last and ensure the QoS of femtocell users.

**Key words:** interference alignment; two-tiered heterogeneous networks; femtocell; MMSE

(责任编辑:包震宇)