

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2015.12.005

引用格式:文芳艳,孙长印,卢光跃,等. LTE-A 高密异构网场景下基于干扰排污技术的干扰管理[J]. 电讯技术,2015,55(12):1337-1341.
[WEN Fangyan,SUN Changyin,LU Guangyue,et al. Interference Management Based on Interference Draining Technology in LTE-A High-density Heterogeneous Network[J]. Telecommunication Engineering,2015,55(12):1337-1341.]

LTE-A 高密异构网场景下基于干扰排污技术的干扰管理*

文芳艳**,孙长印,卢光跃,谢永斌

(西安邮电大学 无线网络安全技术国家工程实验室,西安 710121)

摘 要:在 LTE-A 高密异构网场景下,干扰对齐(IA)被用来消除小区间的干扰。然而,随着小区数目的增加,干扰对齐的条件会变得很难满足。针对此问题,提出了干扰排污(ID)的思想,通过寻找未被充分利用的系统资源空间,并且适当地放宽干扰对齐的条件,实现对空域、频域自由度(DOF)的充分利用。首先,寻找干扰排污空间,然后基于交替最小化的方法求解小区的预编码矩阵和接收滤波器,最后对干扰排污空间用户利用 IRC(Interference Rejection Combine) 算法重新求解其接收滤波器。仿真结果表明,可以在每个基站天线数目固定的条件下不断地增加小区数目,并且同时获得一定的吞吐量增益。

关键词:高密异构网;干扰对齐;干扰排污;自由度;交替最小化;IRC 算法

中图分类号:TN929.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2015)12-1337-05

Interference Management Based on Interference Draining
Technology in LTE-A High-density Heterogeneous Network

WEN Fangyan,SUN Changyin,LU Guangyue,XIE Yongbin

(National Engineering Laboratory of Wireless Network Security,
Xi'an University of Post and Telecommunications,Xi'an 710121,China)

Abstract: Interference alignment(IA) technology can be used to eliminate inter-cell interference(ICI) in the LTE-A high-density heterogeneous network. However,due to an increase of cell number,interference alignment conditions cannot be always met. In view of this problem,this paper proposes a scheme based on interference draining(ID) thoughts. By looking for the underused space of system resource and appropriately relaxing the IA conditions,the full utilization of degrees of freedom(DOF) in the spatial and frequency domain is achieved. Firstly,it looks for the available draining space,then obtains the pre-coding and receive filter according to the alternating minimization approach. Finally,for the draining space provider,it uses Interference Rejection Combine(IRC) algorithm to solve the receiving filter again. Simulation results indicate that the scheme is effective to get some throughput gain when fixed number of base station antennas is assumed and the number of cells continues to increase.

Key words: high-density heterogeneous network; interference alignment; interference draining; degrees of freedom, alternating minimization approach; IRC algorithm

* 收稿日期:2015-04-13;修回日期:2015-07-02 Received date:2015-04-13;Revised date:2015-07-02
基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2014AA01A703);陕西省自然科学基金资助项目(2014JM8317,2013JK1045)
Foundation Item:The National High-tech R&D Program of China(863 Program)(2014AA01A703);The Natural Science Foundation of Shaanxi Province(2014JM8317,2013JK1045)

** 通讯作者:18729581334@163.com Corresponding author:18729581334@163.com

1 引言

干扰对齐(Interference Alignment, IA)作为端到端干扰网络中一种非常有效的干扰消除技术,已经引起业界持续的关注。干扰对齐技术主要是利用发射端的预编码矩阵把来自其他小区的干扰信号对齐到特定的空间上,然后在接收端把接收到的信号投影到与该特定子空间正交的空间上,以此实现多小区干扰抑制。假设基站知道完整的信道状态信息,理论上讲,在信噪比高的区域,所有并发的干扰对齐链路 with 干扰非对齐情形相比,可以获得一半的系统容量。为此,干扰对齐技术被研究用作消除多小区干扰情形。

干扰对齐必须满足干扰对齐条件。假设高密度异构网络场景^[1],采用空间复用模式将若干用户的信息传输分配到两个层上,其中层 1 有 K_p 个用户,层 2 有 K_s 个用户,层 1 的发射端和接收端分别有 M_p 和 N_p 根天线,层 2 的发射端和接收端分别有 M_s 和 N_s 根天线,层 1 用户有 d_p 个数据流传输,层 2 用户有 d_s 个数据流传输。为了实现干扰对齐,即同时满足层间干扰和层内干扰对齐^[2]的条件,显然,对于高密度的异构网场景,当层 1 和层 2 用户数目增加时,也就是小区的数目增加时,用户的天线数目已超过实际可以承受的范围。换句话说,对于固定的天线数目,IA 能够消除的小区间干扰是有限的。

干扰排污(Interference Draining, ID)就是为了克服 IA 方法的限制而提出来的^[3],其基本思想是充分利用层 1 用户未被利用的自由度,同时,对层 1 用户干扰最小。本质而言,ID 是层间资源共享情形 IA 概念的进一步扩展,具体表现在:干扰对齐的某些条件被适当放宽;容许存在一定量的、接收端可容忍的干扰信号;在上述条件假设下,满足干扰对齐的条件,则可充分利用空域、频域的自由度。

ID 的研究包括空域和时域 ID 技术,以便在有限的天线数目情形下增加层 2 用户的数目^[1];基于时域 ID 技术,同时采用部分对齐的技术,以增加层 2 用户的吞吐量^[4]。

上述技术层 1 和层 2 间实际上是松耦合,即未进行紧密的协作,为此,ID 需要采取合理的协作策略,以便使得层 2 用户可以动态的复用层 1 用户未被充分利用的空域和频域自由度,这方面的研究可参见文献[4-7]。

2 ID 信号模型

研究考虑 K 个用户的下行链路传输。假定基

站和用户分别具有 N_t 个发射天线和 N_r 个接收天线。为简单起见,在每个小区的每个载波上发送功率保持不变。

用 $\mathbf{g}_k = \mathbf{H}_{k,k} \mathbf{F}_k$ 表示在某个链路 k 的信道增益, $\mathbf{H}_{k,k}$ 表示信道, $\mathbf{F}_k$ 表示波束形成矩阵, $\Phi_k \in \mathbb{C}^{N_r \times 1}$ 表示接收矩阵,假设是块衰落场景,则信干噪比为

$$\text{SINR}_k = \frac{P_k |\Phi_k \mathbf{H}_{k,k} \mathbf{F}_k|^2}{\sum_{l=1, l \neq k}^K P_l |\Phi_l \mathbf{H}_{k,l} \mathbf{F}_l|^2 + \sigma_k^2} \quad (1)$$

基于 ID 算法的求解方法:将小区间干扰分为两个层次,即层 1 和层 2;层 1 提供干扰排污子空间 Ω ;在子空间 Ω 中,下属关系成立:

$\exists \Omega$

$$\text{span}[\Phi_k \mathbf{H}_{k,j} \mathbf{F}_j] \perp \text{span}[\Phi_k \mathbf{H}_{k,s} \mathbf{F}_s], \forall s, j \in K,$$
$$\frac{P_p |\Phi_p \mathbf{H}_{p,p} \mathbf{F}_p|^2}{P_s |\Phi_s \mathbf{H}_{p,s} \mathbf{F}_s|^2} \geq \delta, \forall s \in K_o. \quad (2)$$

上式中第一个条件表示在层 2 中,相互干扰的链路在用户 k 的接收端,有用信号和干扰是正交的;同时,层 2 发射端对层 1 用户 p 的干扰小区其容忍阈值为 δ 。

3 干扰排污空间选择及准则设计

ID 算法设计如图 1 所示。

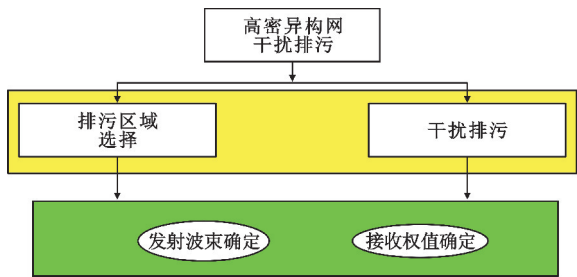


图 1 ID 方案总体框图
Fig. 1 The general block diagram of ID scheme

从图 1 中可以看出,首先要做的就是干扰排污区域的确定。干扰排污空间选择依据排污空间选择准则进行。本文考虑的排污空间准则设计为

$$\text{SINR}(k) \geq \text{Th}r, \quad (3)$$

$$\text{Rank}(\mathbf{H}_{k,k}) < \min(N_t, N_r). \quad (4)$$

式(3)表示排污空间选择信干噪比足够高的链路,即使其他链路的干扰排放,也不足以影响原链路的传输质量,或传输质量的下降在原用户的容忍范围之内。而式(4)则表示干扰排污链路具有不同的链路质量空间,此时,其他链路可采用集中排放的方式,占用链路质量差的自由度空间。前者为均匀排污,而后者则为集中排污。

4 基于交替最小化方法的 ID 算法

在确定了干扰排污空间 Ω 后,我们就可以在排污空间 Ω 中进行干扰对齐。干扰排污用户仍然要满足式(3)和式(4)。在本文中,我们利用交替最小化的方法实现干扰对齐。

根据干扰对齐的思想,干扰对齐可通过最小化接收信号子空间的总干扰投影^[8]实现,为此,算法的目标优化函数为

$$J_{IA} = \sum_{k=1}^K E \parallel \Phi_k^H \sum_{l=1}^K H_{k,l} F_l s_l \parallel_F^2 \quad (5)$$

式中, F_l 是发射端用户 l 的预编码矩阵,而 Φ_k 为接收端用户 k 的接收矩阵, s_l 是用户 l 的发送信号, $H_{k,l}$ 是用户 l 到用户 k 的信道矩阵, K 是用户数,且 $k, l = 1, 2, \dots, K, k \neq l$ 。

估计该期望,并且利用信号的相互独立性有

$$J_{IA} = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^K \parallel \Phi_k^H H_{k,l} F_l \parallel_F^2 \quad (6)$$

以图 2 所示的干扰链路为例,假如用户 2 和用户 5 被选为干扰排污空间用户,即 $k_d = \{2, 5\}$, 同时,定义

$$I(k) = \{l | l \in K, l \neq k, H_{k,l} \geq \xi\}, k \in K, \quad (7)$$

$$I^{-1}(l) = \{k | k \in K, k \neq l, H_{k,l} \geq \xi\}, l \in K, \quad (8)$$

即 $I(k)$ 是接收端 k 的所有干扰发射端,而即 $I^{-1}(l)$ 是发射端 l 的所有干扰接收端。显然, $I^{-1}(2) = \{1, 3, 4, 6\}$, $I^{-1}(5) = \{1, 3, 4, 6\}$, 而对其他发射端 l , $I^{-1}(l) = \{k\}, k = 1 \sim 6, k \neq l$ 且 $k \notin k_d$ 。

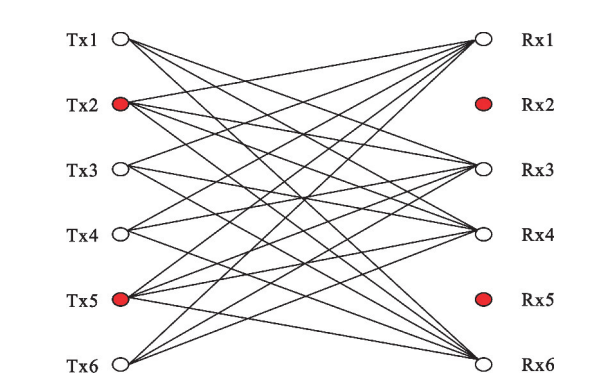


图 2 干扰排污图例
Fig. 2 The legend of ID

采用交替最小化方法^[9]得到预编码矩阵和接收滤波器每次迭代的解,在每次迭代中, F_l 的解为

$$F_l = v_{\min}^{S_k} \left(\sum_{k=I^{-1}(l)} H_{k,l}^H \Phi_k \Phi_k^H H_{k,l} \right), \quad (9)$$

而且,对所有给定的预编码矩阵, Φ_k 的解为

$$\Phi_k = v_{\min}^{S_k} \left(\sum_{l=I^{-1}(k)} H_{k,l} F_l F_l^H H_{k,l}^H \right), k \notin k_d. \quad (10)$$

式中, S_k 为传输的空间数据流个数。上述交替最小

化方法的初值通过对信道矩阵进行特征值分解,并把最小特征值对应的特征向量赋给 F 和 Φ 。

上面我们求出了 $k \notin k_d$ 的用户的接收滤波器,那么对于干扰排污用户(即 $k \in k_d$)的接收滤波器的设计,我们考虑到该用户的信干噪比很高,所以,可通过其信道的特征值分解求解它们的接收滤波器,或者 IRC(Interference Rejection Combine)算法^[10]。

因为 IRC 将信号向主要干扰信号的垂直自空间投影,而且它能很好地从受干扰的信号中检测出目标信号,所以它较信道的特征值分解能获得更好的吞吐量增益。其计算过程如下:

$$R_k = \sum_{l=1}^K H_{k,l} F_l F_l^H H_{k,l}^H + E\{n_k n_k^H\}. \quad (11)$$

式中, R_k 是干扰信号和噪声的协方差矩阵^[11], n_k 是高斯白噪声。从上面已经知道 $g_k = H_{k,k} F_k$ 表示在某个链路 k 的信道增益,则对于干扰排污用户 $k \in k_d$,我们就可以求得它的接收矩阵如下式:

$$\Phi_{k \text{ IRC}}^H = \frac{g_k^H R_k^{-1}}{g_k^H R_k^{-1} g_k}, k \in k_d, \quad (12)$$

这样我们就求得了所有的接收滤波器。

5 干扰排污方案的性能仿真

本节对干扰排污算法进行仿真性能比较,仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数
Table 1 Simulation parameters

参数	参数值
载波带宽/MHz	10
载波个数	2
发射天线个数	2
接收天线个数	2
用户数目	100
微基站的路损/dB	140.7+36.7lg(R) (R 单位为 km)
宏基站的路损/dB	128.1+37.6lg(R) (R 单位为 km)
阴影衰落/dB	8
宏小区的传输功率/dBm	43
微小区的传输功率/dBm	20

宏基站和微基站的路损是根据其功率所设定的,综合实际信号传输场景特点,本文采用以上两种路径损耗。仿真场景分别如图 3、图 5 和图 7 所示,大圆代表宏小区,圆心代表宏小区的基站;小圆代表微小区,圆心代表微小区的基站,并且微小区按照田字形进行分布,里面蓝色的星星代表用户,它们随机分布在微基站的周围。

5.1 第一组仿真

仿真场景如图 3 所示,仿真结果见图 4。

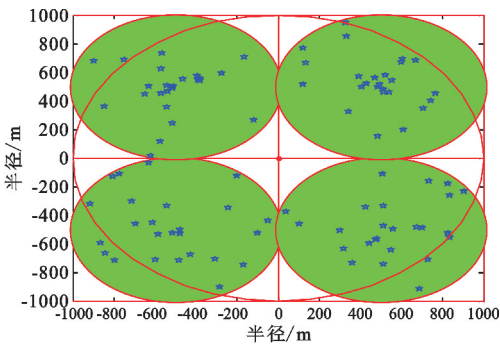


图 3 5 小区仿真场景
Fig. 3 Simulation scenario of 5 cells

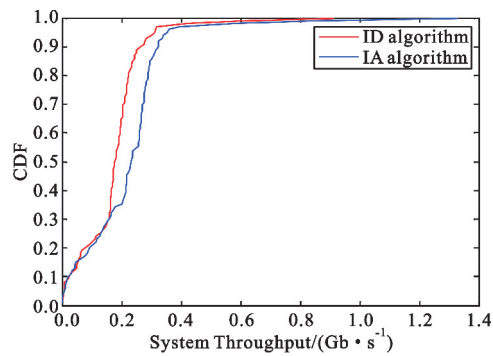


图 4 5 小区吞吐量的 CDF 曲线
Fig. 4 CDF curve of throughput of 5 cells

从图 4 中可以看出,在小区数目相对比较少的情况下,干扰对齐的性能比干扰排污的性能好,这是因为当小区数目比较少时,小区之间的干扰很小,干扰对齐的效果比较理想,我们可以不用放弃某个链路专门进行干扰排污,并且利用全部的空间自由度进行干扰的对齐和信号的传输,所以干扰对齐的吞吐量增益比较好。

5.2 第二组仿真

仿真场景如图 5 所示,仿真结果见图 6。

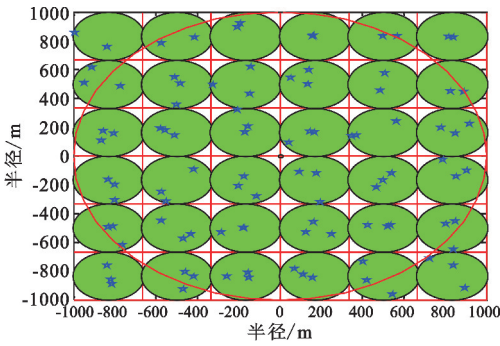


图 5 37 小区仿真场景
Fig. 5 Simulation scenario of 37 cells

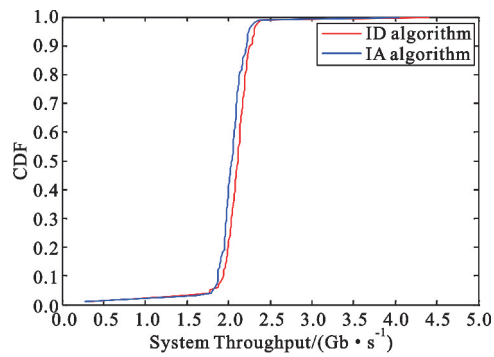


图 6 37 小区吞吐量的 CDF 曲线
Fig. 6 CDF curve of throughput of 37 cells

从图 6 中可以看出,干扰对齐的性能没有干扰排污的性能好,这是因为当随着小区的数目增加时,小区之间的信道状态信息变得异常复杂,每个小区受到其他小区的干扰会越来越多,干扰对齐的效果非常不理想,这时,我们就选择信干噪比大于500 dB的链路专门进行干扰排污,而且这样不会影响原链路的传输质量,或者传输质量的下降在可以忍受的范围内,这样整个系统的吞吐量也会得到提高。

5.3 第三组仿真

仿真场景如图 7 所示,仿真结果见图 8。

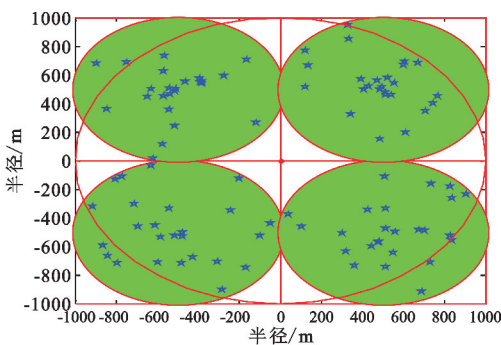


图 7 5 小区仿真场景
Fig. 7 Simulation scenario of 5 cells

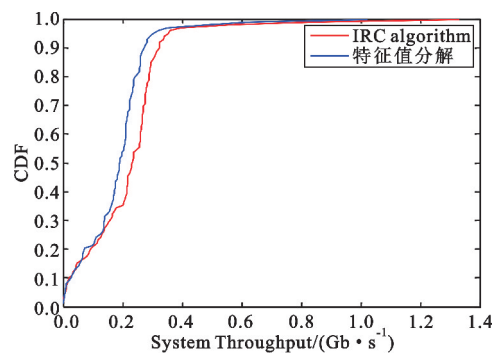


图 8 5 小区接收端 IRC 算法和特征值分解
Fig. 8 CDF curve of throughput of IRC algorithm and Eigen value decomposition in receiving end.

图 8 表明,在相同的场景下,对干扰排污用户采取 IRC 算法时,由于 IRC 将信号向主要干扰信号的垂直自空间投影,所以,可以大大消除干扰信号(即其他干扰排污用户的影响),相比于对干扰排污用户采取特征值分解系统能获得更好的吞吐量增益。

6 结束语

在高密异构网情形下,干扰排污克服了干扰对齐所带来的局限性,即在小区数目不断增加而基站天线数目固定的情况下,干扰排污相对于干扰对齐方案,充分利用层 1 用户未被利用的自由度,消除了传统干扰对齐算法在此情形的自由度限制,消除了小区间的干扰,为系统带来了更多的吞吐量增益,而这在实际的超高密度小区是非常重要的,如 5G 的超高密度微微小区场景,所以本文研究对于未来移动通信系统具有非常重要的意义。

参考文献:

- [1] ZHOU H C, SELLATHURAI M, MASOUIROS C, et al. On dimension Scarcity for User Admission in MIMO Interference Aligned Networks [C]//Proceedings of 2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Shanghai: IEEE, 2012: 635–640.
- [2] NOSRAT-MAKOU EI B, ANDREWS J G, HEATH R W. User admission in MIMO interference alignment networks [C]//Proceedings of 2011 International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). Prague, Czech: IEEE, 2011: 3360–3362.
- [3] ZHOU H, RATNARAJAH T. A novel interference draining scheme for cognitive radio based on interference alignment [C]//Proceedings of IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum 2010. IEEE, 2010.
- [4] CAIRE G, ANDREWS J G, QUEK T Q S. Special issue on heterogeneous networks [J]. Journal of Communications and Networks, 2011, 31(4): 301–305.
- [5] GUVENC I. Capacity and fairness analysis of heterogeneous networks with range expansion and interference coordination [J]. IEEE Communications Letters, 2011, 15(10): 1084–1087.
- [6] ZHU H, LI B, CHEN W. A practical and efficient algorithm for distributed interference alignment based on cognitive radio [C]//Proceedings of Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing. Chengdu: IEEE, 2010: 1–4.

- [7] PERLAZA S, FAWAZ N, LASAULCE S, et al. From spectrum pooling to space pooling: Opportunistic interference alignment in MIMO cognitive networks [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(7): 3728–3741.
- [8] LOVE D J, HEATH R W, et al. What is the value of limited feedback for MIMO channels? [J]. IEEE Communications Magazine, 2004, 42(10): 54–59.
- [9] PETERS S W, HEATH R W. Cooperative Algorithms for MIMO Interference Channels [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(1): 206–218.
- [10] KARLSSON J, HEINEGARD J. Interference Rejection Combining for GSM [C]//Proceedings of 1996 IEEE 5th International Conference on Universal Personal Communications. Cambridge, MA: IEEE, 1996: 433–437.
- [11] BAI Z J, BADIC B, LWELSKI S, et al. On the Equivalence of MMSE and IRC Receiver in MU-MIMO Systems [J]. IEEE Communications Letters, 2011, 15(12).

作者简介:



文芳艳(1991—),女,陕西咸阳人,硕士研究生,主要研究方向为通信信号处理及应用;

WEN Fangyan was born in Xianyang, Shaanxi Province, in 1991. She is now a graduate student. Her research concerns communication signal processing and application.

Email: 18729581334@163.com

孙长印(1963—),男,陕西人,2000 年于西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室获博士学位,现为副教授,主要研究方向为下一代无线通信技术;

SUN Changyin was born in Shannxi Province, in 1963. He received the Ph. D. degree from Xidian University in 2000. He is now an associate professor. His research concerns next generation mobile communication technology.

Email: changyin_sun@163.com

卢光跃(1972—),男,陕西西安人,博士,教授,主要研究方向为移动通信;

LU Guangyue was born in Xi'an, Shaanxi Province, in 1972. He is now a professor with the Ph. D. degree. His research concerns mobile communication.

Email: 744016522@qq.com

谢永斌(1965—),男,山西人,1996 年于西安交通大学获博士学位,现为西安邮电大学教授,主要研究方向为无线通信技术。

XIE Yongbin was born in Shanxi Province, in 1965. He received the Ph. D. degree from Xi'an Jiaotong University in 1996. He is now a professor. His research concerns wireless communication.

Email: xieyongbin007@163.com