

基于干扰和功率控制的多小区分布式波束成形

董明科¹,李应博²,王 达¹,金 野¹,李 俊³

(1. 北京大学信息科学技术学院,北京 100871; 2. 国家互联网应急中心,北京 100029;
3. 总参信息化部驻杭州地区军事代表室,浙江杭州 310052)

摘 要: 在多小区干扰信道中,基于分布式竞争设计,提出两种优化基站发射波束成形矩阵的设计,使每个小区的最差信干噪比最大.一种是基于干扰控制的设计,利用差异化的干扰系数,抑制小区间的干扰,提高系统性能.另一种是基于功率控制的设计,通过调整各基站的发射功率,提高系统性能.这两种设计,都能保持算法的分布式特性,又能有效地提高用户信干噪比.仿真分析表明,基于功率控制的设计在功率大的情况下,性能优于基于干扰控制的设计.

关键词: 波束成形;多小区;分布式算法;竞争设计

中图分类号: TN914 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2015)03-0597-04

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.03.027

Distributive Beamforming Design in Multicell Downlinks Using Interference and Power Control

DONG Ming-ke¹, LI Ying-bo², WANG Da¹, JIN Ye¹, LI Jun³

(1. School of EE and CS, Peking University, Beijing 100871, China; 2. CERT of China, Beijing 100029, China;
3. Resident Office of the Military Representatives in Hangzhou Region of IDGS, Hangzhou, Zhejiang 310052, China)

Abstract: In a multicell scenario, two improved competitive beamforming design schemes are proposed to maximize the worst SINR in each cell for downlink transmissions. One is the competitive design with interference control. We use different interference control factors to suppress the inter-cell interference. The other design is the competitive design with power control. We adjust the power of each base station (BS) to improve the system performance. Both the two improved designs keep the distributive nature of the competitive design and improve the worst SINR of the system. Simulation results show that the competitive design with power control outperforms that with the interference control when the transmit power increases.

Key words: beamforming; multicell; distributive algorithm; competitive design

1 引言

随着用户对无线通信的需求增加,学者们的研究逐渐从过去的单小区,扩展到多小区的范围.多小区之间的竞争与协作,成为目前无线通信领域的一个热点话题.文献[1]提供了一个多小区的综述,详细阐述了多小区研究领域存在的问题.

多小区研究可以分为很多种类.按照设计的目标不同,可以分为最小化功率和最大化信干噪比两种^[2].最小化功率的问题,是在保证用户 QoS(Quality of Service)约束的条件下,最小化基站的发射功率.每个用户有一个信干噪比门限的需求,要求通信时的接收信干噪比大于门限值.基站在满足用户需求的前提下,使用最小的

发射功率完成通信.文献[3]研究了这种情况下的协同设计,即在一个中心控制设备上完成波束成形矩阵的计算.利用 Lagrangian 方法求解优化问题,得到下行通信的对偶上行问题,通过求解对偶问题得到最优的波束成形.虽然协同设计能达到最优的性能,但是其所有的计算量集中在一个设备上,信息交互较多,需占用信令交换信道.因此,许多文献研究分布式算法,文献[4]研究多小区用户调度问题,提出了分布式处理小区间干扰的方法.文献[5]比较了竞争设计与协同设计的区别,利用博弈论,在竞争设计中引入干扰控制技术,提高了分布式竞争设计的性能.

最大化信干噪比的问题,是在满足基站功率约束的条件下,最大化用户的接收信干噪比.每个基站有一个

发射功率的门限,要求通信时发射功率小于门限值.基站在功率限制的条件下,使用户的信干噪比最大.文献[6]研究一个基站服务一个单天线用户的情景,提出了一种分布式竞争设计波束成形矩阵的方法.文献[7]研究一个基站服务一个多天线用户的情景,提出分布式竞争设计下达到纳什均衡的条件.这些研究只涉及一个基站服务一个用户的情况.

本文研究多用户情况下的最大化信干噪比的问题.基于分布式竞争设计,提出两种优化基站发射波束成形矩阵的设计,使每个小区的最差信干噪比最大化.

2 系统模型

本文考虑一个存在干扰的多小区场景,所有的小区共享频率资源,相互干扰的相邻小区数目为 Q . 每小区有一个配置 M 根天线的基站和 K 个单天线的用户. 每个基站只为本小区的用户服务,每个用户只从本小区的基站接收数据.

第 q 个基站为小区内的 K 个用户服务,给 q_i 个用户发射的符号为 u_{q_i} ($i = 1, \dots, K$). 天线发射的信号为 K 个信息符号的波束成形加权和,表示为

$$\mathbf{x}_q = \sum_{i=1}^K \mathbf{w}_{q_i} u_{q_i} \quad (1)$$

其中, \mathbf{w}_{q_i} 为 u_{q_i} 所对应的波束成形向量,维度为 $M \times 1$. 基站的总发射功率是有限的. 假设,每个基站的总功率约束为 P ,即

$$\sum_{i=1}^K \mathbf{w}_{q_i}^H \mathbf{w}_{q_i} \leq P, q = 1, \dots, Q \quad (2)$$

其中,上标 H 表示共轭转置. 基站 m 到用户 q_i 的信道参数为 \mathbf{h}_{mq_i} ,用户 q_i 会接收到 Q 个基站发射的信号,则用户 q_i 接收到的信号为

$$y_{q_i} = \mathbf{h}_{qq_i}^H \mathbf{x}_q + \sum_{m=1, m \neq q}^Q \mathbf{h}_{mq_i}^H \mathbf{x}_m + z_{q_i} \quad (3)$$

其中, z_{q_i} 是均值为 0, 方差为 σ^2 的加性高斯白噪声. 经计算,得到用户 q_i 相应的接收信干噪比

$$\text{SINR}_{q_i} = \frac{|\mathbf{h}_{qq_i}^H \mathbf{w}_{q_i}|^2}{\sum_{j \neq i}^K |\mathbf{h}_{qq_i}^H \mathbf{w}_{q_j}|^2 + \sum_{m \neq q}^Q \sum_{j=1}^K |\mathbf{h}_{mq_i}^H \mathbf{w}_{m_j}|^2 + \sigma^2} \quad (4)$$

本文的设计目标是使用户的最差 SINR 最大,设计的约束条件是每个基站的总功率限制,设计变量是每个基站的发射波束成形向量 \mathbf{w}_{q_i} .

3 竞争设计

在用户 q_i 接收到信号后,可以估计出接收信干噪比 SINR_{q_i} , 并通过反馈信道,将 SINR_{q_i} 回传基站. 由于 SINR_{q_i} 中的分子和分母中的第一项小区内干扰只与本

小区的信道参数有关,基站 q 是知道的. 所以,基站可以根据反馈的 SINR 信息,估计出用户 q_i 接收到的小区间干扰加噪声,定义为 r_{q_i} ,

$$r_{q_i}(\mathbf{W}_{-q}) = \sum_{m \neq q}^Q \sum_{j=1}^K |\mathbf{h}_{mq_i}^H \mathbf{w}_{m_j}|^2 + \sigma^2 \quad (5)$$

其中, r_{q_i} 与其他小区的发射波束成形向量有关,记为 \mathbf{W}_{-q} ,下标中的负号表示除 q 之外的小区. 基站 q 的总的发射波束成形矩阵写成 $\mathbf{W}_q = [\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_K]$.

基站 q 接收到本小区用户的反馈信息后,计算得到每个用户的 r_{q_i} 值,根据本小区的信道参数 \mathbf{h}_{qq_i} ,计算波束成形向量 \mathbf{w}_{q_i} ,使本小区用户的最差 SINR 最大. 这个最优化问题可以描述为

$$\begin{aligned} & \underset{\mathbf{w}_q}{\text{maximize}} && \min_i \text{SINR}_{q_i} \\ & \text{subject to} && \sum_{i=1}^K \mathbf{w}_{q_i}^H \mathbf{w}_{q_i} \leq P \end{aligned} \quad (6)$$

或等价地描述为

$$\begin{aligned} & \underset{\mathbf{w}_q}{\text{maximize}} \min_i && \frac{|\mathbf{h}_{qq_i}^H \mathbf{w}_{q_i}|^2}{\sum_{j \neq i}^K |\mathbf{h}_{qq_i}^H \mathbf{w}_{q_j}|^2 + r_{q_i}} \\ & \text{subject to} && \|\mathbf{W}_q\|_F^2 \leq P \end{aligned} \quad (7)$$

优化问题式(7)虽然不是凸优化问题,但是,可以通过有效的方法求解. 优化问题式(7)是在基站功率有限的情况下,使小区内用户的最差 SINR 最大. 若 \mathbf{W}_q^d 是最优解,那么,基站 q 采用波束成形矩阵 \mathbf{W}_q^d 时,小区 q 中的用户 SINR 都相等,假设为

$$\text{SINR}_{q_i} = \Gamma^d, i = 1, \dots, K \quad (8)$$

这样,通过固定 Γ ,计算每个用户达到 Γ 时,基站所需的发射功率,再判断是否符合功率约束,可以不断地搜索得到最大的 Γ .

优化问题式(7)的反问题是

$$\begin{aligned} & \underset{\mathbf{w}_q}{\text{minimize}} && P_o \\ & \text{subject to} && \begin{cases} \|\mathbf{W}_q\|_F^2 \leq P_o \\ \frac{|\mathbf{h}_{qq_i}^H \mathbf{w}_{q_i}|^2}{\sum_{j \neq i}^K |\mathbf{h}_{qq_i}^H \mathbf{w}_{q_j}|^2 + r_{q_i}} \geq \Gamma, j = 1, \dots, K \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

对 Γ 二分查找,可以得到式(6)的最优解. 每个基站通过求解优化问题得到波束成形向量后,又一次发射信号. 每个用户接收到信号后,再次重复上述步骤. 从基站发射信号,用户估计反馈 SINR_{q_i} , 基站计算 r_{q_i} , 到基站计算波束成形向量,称为一次博弈. 经过多次博弈后,达到纳什均衡,即没有一个基站愿意单独改变发射波束成形矩阵,换句话说,如果达到纳什均衡后,基站 q 单独改变了发射波束成形矩阵,那么小区 q 中用户的

最差 SINR 将会减小.

如果存在一个中心控制设备,知道所有用户的信道信息和功率约束条件 P ,便可以通过协同设计,最优化计算波束成形向量.

4 改进的竞争设计

4.1 基于干扰控制的竞争设计

每个基站在优化发射波束成形矩阵的时候,不再是只考虑本小区用户的 SINR 最大化,同时还要减小本基站发射信号对其他小区用户的干扰.基站 q 对其他小区用户产生的干扰总和为

$$\sum_{m \neq q}^Q \sum_{j=1}^K \| \mathbf{h}_{qm_j}^H \mathbf{W}_q \|^2 \quad (10)$$

在优化问题式(7)中,引入干扰约束,得到基于干扰控制的竞争设计:

$$\begin{aligned} & \underset{\mathbf{w}_q}{\text{maximize}} \quad \min_i \frac{| \mathbf{h}_{qq_i}^H \mathbf{w}_q |^2}{\sum_{j \neq i}^K | \mathbf{h}_{qq_j}^H \mathbf{w}_q |^2 + r_{q_i}} \\ & \text{subject to} \quad \begin{cases} \| \mathbf{W}_q \|_F^2 \leq P \\ \sum_{m \neq q}^Q \sum_{j=1}^K \| \mathbf{h}_{qm_j}^H \mathbf{W}_q \|^2 \leq T \end{cases} \end{aligned} \quad (11)$$

其中, T 为基站 q 对其他小区用户产生的总干扰上限.

每个基站在求解问题式(7)时,实际上是求解反问题式(9),因此,我们在反问题中引入干扰控制,并采用文献[5]的方法引入控制系数 c .

$$\begin{aligned} & \underset{\mathbf{w}_q}{\text{minimize}} \quad P_o + \sum_{m \neq q}^Q \sum_{j=1}^K c \| \mathbf{h}_{qm_j}^H \mathbf{W}_q \|^2 \\ & \text{subject to} \quad \begin{cases} \| \mathbf{W}_q \|_F^2 \leq P_o, \\ \text{SINR}_{q_j} \geq \Gamma, j = 1 \cdots, K \end{cases} \end{aligned} \quad (12)$$

干扰控制系数 c 的选择会影响最终的性能,我们采用文献[5]的方法,经过多次均衡,选择一个较好的系数 c .具体做法是:

步骤 1 中心控制设备将系数 c 通知每个基站

步骤 2 基站通过多次博弈达到纳什均衡

步骤 3 中心控制设备根据均衡状态,调整系数 c

步骤 4 重复步骤 1~3,直到最差 SINR 不再提高

在文献[5]中,系数 c 的选取是这样的,首先初始化 $c = 0$,达到均衡后, c 设置为一个较大的正数,每次均衡后,减小系数 $c - \Delta c$,直到系统性能不再提高.

在最大化最差 SINR 的设计目标下,这种相等系数的设计并不是最好.这时,就需要尽量减小其他基站对该小区的影响,这样系统的整体性能才会提高.

本文设计不同的干扰抑制系数 c_m .经过一次均衡后,如果小区 m 的 SINR 低于各小区平均值,就增大 c_m .这样多次均衡,直到最差 SINR 不再增加.

$$\begin{aligned} & \underset{\mathbf{w}_q}{\text{minimize}} \quad P_o + \sum_{m \neq q}^Q \sum_{j=1}^K c_m \| \mathbf{h}_{qm_j}^H \mathbf{W}_q \|^2 \\ & \text{subject to} \quad \begin{cases} \| \mathbf{W}_q \|_F^2 \leq P_o, \\ \text{SINR}_{q_j} \geq \Gamma, j = 1 \cdots, K \end{cases} \end{aligned} \quad (13)$$

系数 c_m 的选取是这样的,首先初始化 $c_m = 0$,达到均衡后,增大低于平均性能的小区系数 $c_m + \Delta c$,直到系统性能不再提高.

4.2 基于功率控制的竞争设计

上述设计中,固定每个小区的发射功率,调整干扰系数.本小节的设计思路是,固定每个小区的干扰系数,调整发射功率.所有小区的干扰控制系数 $c_m = 1$ 取固定值.经过一次均衡后,如果小区 q 的 SINR 高于各小区平均值,则减小基站 q 的发射功率.这样多次均衡,直到最差 SINR 不再增加.具体做法是:

步骤 1 中心控制设备将每个基站的功率 P_q 通知基站;

步骤 2 基站通过多次博弈达到纳什均衡;

步骤 3 中心控制设备根据均衡状态,调整系数 P_q ;

步骤 4 重复步骤 1~3,直到最差 SINR 不再提高.

P_q 初始化为 $P_q = P$,一次均衡后,减小高于平均性能的小区功率 $P_q - \Delta P$,直到系统性能不再提高.

在步骤 2 步中,基站 q 求解的反问题是

$$\begin{aligned} & \underset{\mathbf{w}_q}{\text{minimize}} \quad P_o + \sum_{m \neq q}^Q \sum_{j=1}^K \| \mathbf{h}_{qm_j}^H \mathbf{W}_q \|^2 \\ & \text{subject to} \quad \begin{cases} \| \mathbf{W}_q \|_F^2 \leq P_o, \\ \text{SINR}_{q_j} \geq \Gamma, j = 1 \cdots, K \end{cases} \end{aligned} \quad (14)$$

5 仿真分析

本章通过仿真结果,分析各种设计的性能.文献[5]的固定干扰系数的设计,称为基于干扰控制的竞争设计 1,本文的差异干扰系数的设计,称为基于干扰控制的竞争设计 2.

仿真的多小区场景如图 1 所示. $Q = 3$ 个相邻小区,小区间的距离归一化为 $D = 1$.每个小区中有两个用户,每个用户距离基站的距离为 d ,其中一个靠近中心,另外一个远离中心.

图 2 显示了不同基站功率约束条件下,各种设计的性能.基站天线数 $M = 3$,用户到基站距离固定为 $d = 0.4$.当每个基站的功率较小时,基于功率控制的设计优势并不明显.在功率为 -8dB 时,基于功率控制的设计性能不如基于干扰控制的设计 2.随着基站功率的增加,基于功率控制的设计性能提升最快,在大约 4dB 时,性能已赶上基于干扰控制的设计 2.继续增大功率,基于功率控制的设计性能超过基于干扰控制的设计 2,在功率约束 20dB 时,高出约 1dB .

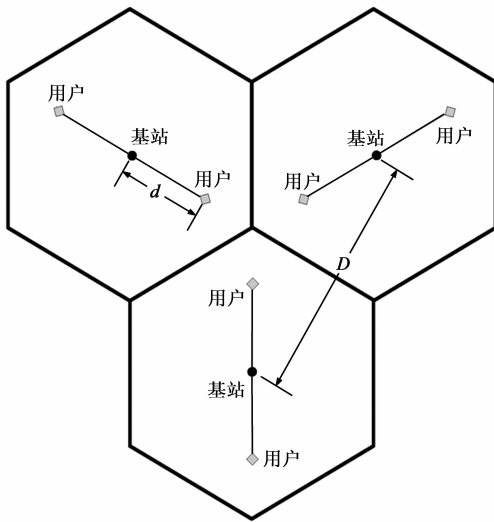


图1 多小区场景, $Q=3, K=2$, 小区间归一化距离 $D=1$, 用户到基站的距离 d

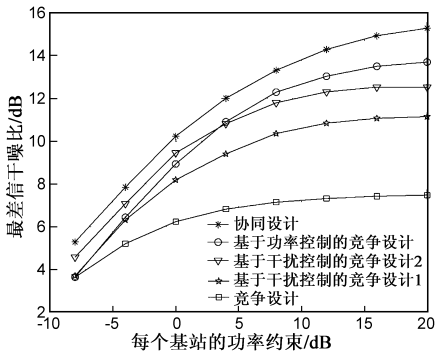


图2 不同基站功率约束条件下, 各种设计的性能对比

6 结论

本文研究存在干扰的多小区波束成形设计算法。通过优化基站的发射波束成形矩阵, 使每个小区的最差信干噪比最大。通过比较竞争设计和协同设计, 为了保持竞争设计的分布式特性和逼近协同设计的性能, 本文提出了两种改进的竞争设计。在基于干扰控制的设计中, 利用差异化的干扰系数, 抑制小区间的干扰, 提高系统性能。在基于功率控制的设计中, 通过调整各基站的发射功率, 提高系统性能。仿真分析表明, 基于功率控制的设计在功率大的情况下, 性能优于基于干扰控制的设计。

参考文献

- [1] Gesbert D, Hanly S, Huang H, et al. Multi-cell MIMO cooperative networks: a new look at interference[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2010, 28(9): 1380 - 1408.
- [2] 刘田, 杨琳, 等. 多小区分布式发射天线位置优化[J]. 电子学报, 2011, 39(12): 2721 - 2725.

Liu Tian, Yang Lin, et al. Antenna location optimization for distributed transmit antennas in a multicell environment[J]. Chinese Journal of Electronics, 2011, 39(12): 2721 - 2725. (in Chinese)

- [3] Dahrouj H, Yu Wei. Coordinated beamforming for the multicell multi-antenna wireless system[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(5): 1748 - 1759.
- [4] Liu G C, Su X H, Wu G, et al. Coordinated scheduling with adaptive feedback in cooperative multi-cell downlink system [A]. 2012 1st IEEE International Conference on Communications in China (ICCC) [C]. Beijing, China; IEEE Conference Publications, 2012. 647 - 652.
- [5] Nguyen Duy H N, Ngoc Tho Le. Multiuser downlink beamforming in multicell wireless systems: A game theoretical approach[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(7): 3326 - 3338.
- [6] Larsson E, Jorswieck E. Competition versus cooperation on the mimo interference channel[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(7): 1059 - 1069.
- [7] Scutari G, Palomar D P, Barbarossa S. The mimo iterative waterfilling algorithm[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(5): 1917 - 1935.

作者简介



董明科 男, 1973 年出生, 陕西人, 讲师, 研究方向为波束成形算法。

E-mail: mingke.dong@pku.edu.cn



李应博 男, 1986 年出生, 江西人, 博士, 研究方向为网络通信。

王 达(通信作者) 男, 1985 年出生, 天津人, 博士后, 研究方向为中继波束成形。

金 野 男, 1966 年出生, 内蒙古人, 教授, 博士生导师, 研究方向为通信网络、软件工程。

李 俊 男, 1983 年出生, 江西人, 硕士, 研究方向为移动通信。