

多小区蜂窝网络波束成形优化策略

王 达 张晓宁* 依 那 项海格 金 野

(北京大学信息科学技术学院 北京 100871)

摘 要: 为了克服多小区的邻小区干扰问题, 该文在多小区蜂窝网络中, 研究了多小区多用户下行协同传输技术。该文提出一种联合优化基站和中继的波束成形权重的迭代算法, 在基站和中继总功率限制下最大化最差用户接收信干噪比(Signal-to-Interference-and-Noise Ratio, SINR)。该文提出的联合优化波束成形策略, 可以应用半正定松弛技术(Semi-Definite Relaxation, SDR)得到有效的解决。仿真表明, 在多小区通信系统中, 该文提出的迭代算法只需要少量的迭代次数就可以达到近似最优性能, 并且在性能和资源消耗之间给出一种折中的传输策略。

关键词: 无线通信; 多小区系统; 中继传输; 波束成形; 最大化最差信干噪比

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)08-1779-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.01579

Collaborative Beamforming in Multicell Systems

Wang Da Zhang Xiao-ning Yi Na Xiang Hai-ge Jin Ye

(School of Electronic Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: For coping with the severe inter-cell interference in the future cellular systems, this paper studies the collaborative multicell downlink transmission for multiusers in multicell systems. This paper proposes an iterative scheme to optimize jointly relay and the Base Station (BS) beamforming weights to maximize the worst-case Signal-to-Interference-and-Noise Ratio (SINR) under total relay and BS power constraints. The proposed optimization problems for relay and BS beamforming weights can be effectively solved by using the Semi-Definite Relaxation (SDR) technology. The simulation results show that the proposed relay and BS beamforming iterative scheme can achieve near-optimal performance within a few iterations for multiusers in multicell systems.

Key words: Wireless communication; Multicell system; Relay transmission; Beamforming; Max-worst Signal-to-Interference-and-Noise Ratio (SINR)

1 引言

在下一代蜂窝通信系统中, 为大量用户提供可以覆盖大范围的高速数据传输仍面临很大挑战。中继通信系统^[1,2]可以获得更高的频谱效率和更大的小区覆盖率, 因此中继系统已经成为4G通信系统的关键技术之一^[3]。近几年, 学者广泛研究了协同中继系统, 其可以看成是分布式的多天线系统。基于分布式协同中继系统不需要使用多个天线就可以利用多用户系统的空间分集增益, 对用户发送虚拟波束, 从而增强了下行链路的传输性能^[4]。

中继传输策略主要包括, 放大转发策略^[1]和解码转发策略^[2]。其中放大转发策略实现较为简单, 是一种有吸引力的中继传输策略。文献[5]在已知信

道状态二阶统计信息的前提下, 提出了两种波束成形方案, 分别实现了最小化中继传输总功率以及最大化用户接收信噪比。同样的问题也在完全已知信道状态信息的条件下^[6]进行了研究。同时文献[6]也提出了一种波束成形分布式实现算法, 可以使每个中继节点分别计算自己的波束成形参数从而达到近似最优的通信性能。针对单小区多用户中继波束成形系统, 文献[7,8]分别提出了一种最优和一种次优的迭代分布式中继波束成形策略, 从而最大化最差用户信干噪比(Signal-to-Interference-and-Noise Ratio, SINR)。

但对于多小区通信, 4G系统降低了对于多小区频率规划的约束, 使得所有小区都可以使用所有的频率带宽发送数据。因此, 在未来的通信网络中, 需要使用多小区联合处理技术, 解决小区间用户使用相同时频资源进行传输导致同频干扰问题。所以研究多小区协作中继系统波束成形策略具有重要的意义, 其可以减少小区间干扰, 提高多小区中

2013-10-14 收到, 2014-03-12 改回

国家863计划项目(2012AA01A506), 国家自然科学基金(61071083)和中国博士后科学基金(2013M530477)资助课题

*通信作者: 张晓宁 zxn@pku.edu.cn

继系统的信道容量, 增强其对于小区边缘用户的传输性能。文献[9,10]在多小区单中继单用户的场景下, 研究了信道状态信息对多小区中继波束成形的影响。文献[11]研究了多小区共用同一个多天线中继时, 最大化最差用户 SINR 的中继波束成形策略。针对多小区单用户的场景, 文献[12,13]也研究了多小区中继联合波束成形问题。但实际每个小区边缘存在多个受到相邻小区干扰的用户, 因此对多个边缘用户通信质量保障的研究显得尤其重要。

为了减少小区间干扰, 提高多个边缘用户的通信质量, 本文在已知信道信息的情形下, 研究了多小区内放大转发协同中继传输策略, 其中多个中继经过衰落信道向多个用户传输基站发送的信号。本文在完全已知信道状态信息的情况下, 设计了一种基站和中继的波束成形联合优化策略, 使得在基站和中继总功率受限的条件下, 多小区中最差用户接收 SINR 最大化。本文的主要贡献在于提出的一种迭代算法联合优化基站和中继的波束成形矢量, 从而克服多小区中的小区间干扰问题。应用半正定松弛技术(Semi-Definite Relaxation, SDR)^[14]把本文提出的波束成形联合优化策略转化为半正定规划(Semi-Definite Programming, SDP)^[15], 从而得到有效的解决。

本文其余部分的结构包括: 第2节描述了协同中继的多小区多用户蜂窝系统模型; 第3节在系统总功率约束下, 解决了基站和中继波束成形权重优化问题, 之后给出联合优化基站和中继波束成形迭代算法; 在第4节中, 给出并讨论了仿真结果; 本文结论在第5节给出。

2 系统模型

本节主要介绍本文所研究的多中继多用户系统, 假设系统内共有 L 个小区, 每个小区使用相同频带传输业务。系统框图如图1所示, 每个小区内共有 M 个单天线中继和 K 个单天线用户, 第 l 个小区内的基站(Base Station, BS)有 D_l 根发射天线, 其中 $K \leq D_l$, $l = 1, 2, \dots, L$ (如果 $K > D_l$, 那么基站可以每次选择一部分用户进行通信, 从而实现用户选择分集增益^[16])。设每个小区内用户接收不到其他小区基站的发送信号, 但是其会接收到其他小区中继转发的信号。因为所有小区都工作在同一频带内, 所以其会对用户接收信号造成干扰, 设相邻小区中继转发的信号对第 l 个小区内第 k 个用户的干扰信号为 $i_{l,k}$ 。

本文中中继采用两跳放大转发策略, 在第1跳中, 本小区基站利用波束成形技术向中继发送本小区用户信息; 在第2跳中, 本小区的中继节点直接

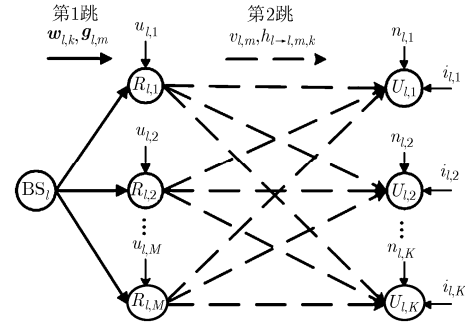


图1 第 l 个小区内多中继多用户系统框图

把基站发送的信号放大转发给本小区的多个用户, 放大转发的权重为中继波束成形的权重。

设信号功率 $P_{l,k} = \mathbb{E}[|s_{l,k}|^2]$, $\mathbb{E}[\cdot]$ 为计算随机变量的期望。本系统中信号的所有频率成分都经历相同幅度的衰落, 设 $g_{l,m}$ 为第 l 个小区内基站到第 m 个中继的信道参数。那么第1跳中第 l 个小区内第 m 个中继接收到的信号 $r_{l,m}$ 为

$$r_{l,m} = g_{l,m} \sum_{k=1}^K w_{l,k} s_{l,k} + u_{l,m} \quad (1)$$

其中, $s_{l,k}$ 为第 l 个小区内第 k 个用户所需信息, $w_{l,k}$ 为第 l 个小区基站对第 k 个用户发送的波束成形矢量, $u_{l,m}$ 为第 l 个小区内第 m 个中继附近的高斯白噪声, $u_{l,m} \sim CN(0, N_{l,m})$ 。

第2跳中第 l 个小区内第 m 个中继发送的信号为

$$x_{l,m} = v_{l,m} r_{l,m} \quad (2)$$

其中, $v_{l,m}$, $m = 1, 2, \dots, M$ 为第 l 个小区内中继节点的波束成形权重。

第 l 个小区内第 k 个用户接收的信号为

$$\begin{aligned} y_{l,k} &= \sum_{m=1}^M h_{l \rightarrow l, m, k} v_{l,m} r_{l,m} \\ &+ \sum_{l'=1, l' \neq l}^L \sum_{m=1}^M h_{l' \rightarrow l, m, k} v_{l', m} r_{l', m} + n_{l,k} \\ &= \sum_{m=1}^M h_{l \rightarrow l, m, k} v_{l,m} g_{l,m} w_{l,k} s_{l,k} \\ &+ \sum_{m=1}^M h_{l \rightarrow l, m, k} v_{l,m} g_{l,m} \sum_{k'=1, k' \neq k}^K w_{l,k'} s_{l,k'} \\ &+ \sum_{m=1}^M h_{l \rightarrow l, m, k} v_{l,m} u_{l,m} + \sum_{l'=1, l' \neq l}^L \sum_{m=1}^M h_{l' \rightarrow l, m, k} v_{l', m} g_{l', m} \\ &\cdot \sum_{k'=1}^K w_{l', k'} s_{l', k'} + \sum_{l'=1, l' \neq l}^L \sum_{m=1}^M h_{l' \rightarrow l, m, k} v_{l', m} n_{l', m} + n_{l,k} \quad (3) \end{aligned}$$

其中, $h_{l' \rightarrow l, m, k}$ 是第 l' 个小区内的第 m 个中继对第 l 个小区内第 k 个用户的信道参数, $n_{l,k}$ 是在第 l 个小区内用户处的高斯白噪声, $n_{l,k} \sim CN(0, N_{l,k})$ 。

因此, 第 l 个小区的第 k 个用户接收 SINR 为

$$\text{SINR}_{l,k} = \frac{P_s^{l,k}}{P_{\text{intra}}^{l,k} + P_{\text{inter}}^{l,k} + P_n^{l,k}} \quad (4)$$

其中, 第 l 个小区内第 k 个用户接收的信号功率为

$$P_s^{l,k} = P_{l,k} \left| \sum_{m=1}^M h_{l \rightarrow l,m,k} v_{l,m} \mathbf{g}_{l,m} \mathbf{w}_{l,k} \right|^2 \quad (5)$$

第 l 个小区内第 k 个用户接收的本小区内多用户间干扰信号的功率为

$$P_{\text{intra}}^{l,k} = \sum_{k'=1, k' \neq k}^K P_{l,k'} \left| \sum_{m=1}^M h_{l \rightarrow l,m,k} v_{l,m} \mathbf{g}_{l,m} \mathbf{w}_{l,k'} \right|^2 \quad (6)$$

第 l 个小区内第 k 个用户接收的相邻小区中继干扰信号的功率为

$$P_{\text{inter}}^{l,k} = \sum_{l'=1, l' \neq l}^L \sum_{k'=1}^K P_{l',k'} \left| \sum_{m=1}^M h_{l' \rightarrow l,m,k} v_{l',m} \mathbf{g}_{l',m} \mathbf{w}_{l',k'} \right|^2 \quad (7)$$

以及第 l 个小区内第 k 个用户接收的噪声功率为

$$\begin{aligned} P_n^{l,k} &= \sum_{m=1}^M |h_{l \rightarrow l,m,k}|^2 |v_{l,m}|^2 N_{l,m} \\ &+ \sum_{l'=1, l' \neq l}^L \sum_{m=1}^M |h_{l' \rightarrow l,m,k}|^2 |v_{l',m}|^2 N_{l',m} + N_{l,k} \\ &= \sum_{l'=1}^L \sum_{m=1}^M |h_{l' \rightarrow l,m,k}|^2 |v_{l',m}|^2 N_{l',m} + N_{l,k} \end{aligned} \quad (8)$$

3 最大化最差用户 SINR 的波束成形联合优化策略

本文在总功率约束下设计了基站和中继的波束成形的权重使得多小区系统中最差用户接收 SINR 最大化。本文首先给出基站和中继波束成形权重优化问题的解, 最后给出基站和中继联合迭代优化策略。

3.1 基站协同波束成形策略

在第 l 个小区内第 k 个用户的接收 SINR(式(4)) 可以表示为

$$\begin{aligned} \text{SINR}_{l,k} &= \left\{ P_{l,k} \mathbf{w}_{l,k}^H \mathbf{A}_{l \rightarrow l,k} \mathbf{w}_{l,k} \right\} \\ & \left/ \left\{ \sum_{k' \neq k}^K P_{l,k'} \mathbf{w}_{l,k'}^H \mathbf{A}_{l \rightarrow l,k} \mathbf{w}_{l,k'} \right. \right. \\ & \left. \left. + \sum_{l' \neq l}^L \sum_{k'=1}^K P_{l',k'} \mathbf{w}_{l',k'}^H \mathbf{A}_{l' \rightarrow l,k} \mathbf{w}_{l',k'} + P_n^{l,k} \right\} \end{aligned} \quad (9)$$

其中

$$\mathbf{A}_{l \rightarrow l,k} = \left(\sum_{m=1}^M h_{l \rightarrow l,m,k} v_{l,m} \mathbf{g}_{l,m} \right) \left(\sum_{m=1}^M h_{l \rightarrow l,m,k} v_{l,m} \mathbf{g}_{l,m} \right)^H$$

给定 L 个小区基站的发送总功率限制 P_{Btotal} 的前提下, 使得多小区系统中最差用户接收 SINR 最大化。优化问题可以表示为

$$\max_{\mathbf{w}_{l,k}} \min_{l,k} \text{SINR}_{l,k}, \quad \text{s.t.} \quad \sum_{l=1}^L P_B^l \leq P_{\text{Btotal}} \quad (10)$$

但优化问题式(10)是准凸的, 直接求解一般比

较困难。本文可以采用二分法^[17]求得问题式(10)的最优解。即可以在给定 Γ 的情况下通过求解式(11)得到最终解:

$$\left. \begin{aligned} \min_{\mathbf{w}_{l,k}} \quad & \sum_{l=1}^L P_B^l \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{l=1}^L P_B^l \leq P_{\text{Btotal}}, \quad \text{SINR}_{l,k} \geq \Gamma \\ & l = 1, 2, \dots, L, \quad k = 1, 2, \dots, K \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

设式(10)的最优解为 γ_{opt} 。如果在式(11)中 $\Gamma = \gamma_{\text{opt}}$, 那么式(11)的最优解 $\mathbf{w}_{l,k}$ 就是式(10)的最优解。因此, 对于一个给定的 Γ , 本文可以使用二分法在优化问题式(11)中反复地搜索最优的 Γ ^[17]。下面在给定 Γ 的前提下求解式(11)。

应用第 l 个小区基站发送功率以及用户接收 SINR(式(9)), 并通过 $\mathbf{W}_{l,k} \triangleq \mathbf{w}_{l,k} \mathbf{w}_{l,k}^H$ 把式(11)转化为矩阵形式为

$$\left. \begin{aligned} \min_{\mathbf{W}_{l,k}} \quad & \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K P_{l,k} \text{Tr}(\mathbf{W}_{l,k}) \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{W}_{l,k} \succeq 0, \quad \text{rank}(\mathbf{W}_{l,k}) = 1, \\ & \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K P_{l,k} \text{Tr}(\mathbf{W}_{l,k}) \leq P_{\text{Btotal}}, \\ & \left(\frac{P_{l,k}}{\Gamma} + P_{l,k} \right) \text{Tr}(\mathbf{A}_{l \rightarrow l,k} \mathbf{W}_{l,k}) \\ & - \sum_{l'=1}^L \sum_{k'=1}^K P_{l',k'} \text{Tr}(\mathbf{A}_{l' \rightarrow l,k} \mathbf{W}_{l',k'}) \geq P_n^{l,k}, \\ & l = 1, 2, \dots, L, \quad k = 1, 2, \dots, K \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

其中, $\mathbf{W}_{l,k} \succeq 0$ 表示 $\mathbf{W}_{l,k}$ 必须是一个半正定矩阵。但是由于 $\text{rank}(\mathbf{W}_{l,k}) = 1$ 的限制条件不是凸的, 所以式(12)并不是凸优化问题, 不能用相应的凸优化方法得到最优化解决。类似文献[14]中, 本文利用 SDR 技术, 去掉式(12)中的秩等于 1 的限制条件, 使其转变为 SDP 凸优化问题, 从而得到最优解^[17]。

$$\left. \begin{aligned} \min_{\mathbf{W}_{l,k}} \quad & \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K P_{l,k} \text{Tr}(\mathbf{W}_{l,k}) \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{W}_{l,k} \succeq 0, \quad \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K P_{l,k} \text{Tr}(\mathbf{W}_{l,k}) \leq P_{\text{Btotal}}, \\ & \left(\frac{P_{l,k}}{\Gamma} + P_{l,k} \right) \text{Tr}(\mathbf{A}_{l \rightarrow l,k} \mathbf{W}_{l,k}) \\ & - \sum_{l'=1}^L \sum_{k'=1}^K P_{l',k'} \text{Tr}(\mathbf{A}_{l' \rightarrow l,k} \mathbf{W}_{l',k'}) \geq P_n^{l,k}, \\ & l = 1, 2, \dots, L, \quad k = 1, 2, \dots, K \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

根据文献[15]可知, SDP 凸优化问题可以用内点法得到其最优解, 并且复杂度不高, 为多项式复

杂度。设解的精度为 σ ，式(13)的复杂度为 $O((LK)^3 D_l^{3.5} \lg(1/\sigma))$ 。

由于利用 SDR 技术去掉了式(12)秩等于 1 的限制条件，则式(13)的最优解应该是式(12)解的下界。但是本文在大量的仿真中看到 SDP 优化式(13)最优解的秩总是等于 1。同样的现象也发生在文献[18]中，用来设计最优的波束成形策略。因此，得到的 SDP 优化式(13)的最优解就等价于式(12)的最优解。如果求解 SDP 优化式(13)得到的最优解的秩不等于 1，本文可以应用几种随机化方法从 SDP 式(13)的最优解 $\mathbf{W}_{l,k}$ 中得到式(12)的近似最优解，具体的随机化方法见文献[19]。

3.2 中继协同波束成形策略

第 l 个小区内第 k 个用户的 SINR(式(4))可以表示为

$$\text{SINR}_{l,k} = \frac{P_{l,k} |\mathbf{b}_{l \rightarrow l,k}^T \mathbf{v}_l|^2}{\sum_{k' \neq k} P_{l,k'} |\mathbf{b}_{l \rightarrow l,k'}^T \mathbf{v}_l|^2 + \sum_{l' \neq l} \sum_{k'=1}^K P_{l',k} |\mathbf{b}_{l' \rightarrow l,k'}^T \mathbf{v}_{l'}|^2 + P_{l,k}} \quad (14)$$

其中

$$P_{l,k}^n = \sum_{l'=1}^L \mathbf{v}_{l'}^H \mathbf{H}_{l' \rightarrow l,k} \mathbf{v}_{l'} + N_{l,k}$$

$$\mathbf{b}_{l \rightarrow l,k} = [h_{l \rightarrow l,1,k} \mathbf{g}_{l,1} \mathbf{w}_{l,k}, h_{l \rightarrow l,2,k} \mathbf{g}_{l,2} \mathbf{w}_{l,k}, \dots, h_{l \rightarrow l,m,k} \mathbf{g}_{l,m} \mathbf{w}_{l,k}]^T$$

$$\mathbf{H}_{l' \rightarrow l,k} = \text{diag}(|h_{l' \rightarrow l,1,k}|^2 N_{l',1}, |h_{l' \rightarrow l,2,k}|^2 N_{l',2}, \dots, |h_{l' \rightarrow l,m,k}|^2 N_{l',m})$$

系统中第 l 个小区内所有中继发送的总功率为

$$P_t^l = \sum_{m=1}^M |v_{l,m}|^2 \mathbb{E}[|r_{l,m}|^2]$$

$$= \sum_{m=1}^M |v_{l,m}|^2 \left(\sum_{k=1}^K P_{l,k} |\mathbf{g}_{l,m} \mathbf{w}_{l,k}|^2 + N_{l,m} \right) = \mathbf{v}_l^H \mathbf{E}_l \mathbf{v}_l \quad (15)$$

其

中 $\mathbf{v}_l = [v_{l,1}, v_{l,2}, \dots, v_{l,m}]^T$ ， $\mathbf{E}_l = \text{diag} \left(\sum_{k=1}^K P_{l,k} |\mathbf{g}_{l,1} \mathbf{w}_{l,k}|^2 + N_{l,1}, \dots, \sum_{k=1}^K P_{l,k} |\mathbf{g}_{l,m} \mathbf{w}_{l,k}|^2 + N_{l,m} \right)$ 。 $\text{diag}(e_1, e_2, \dots, e_k)$ 表示一个对角矩阵，其中 e_1, e_2, \dots, e_k 为其对角元素。

考虑中继一般在本小区内进行规划，在给定第 l 个小区内中继的发送总功率限制 $P_{\text{Rtotal}}^l, l=1, 2, \dots, L$ 的前提下，使得多小区系统中最差用户接收 SINR 最大化。当中继采用电池供电时，其受限于电池寿命。此中继协同波束成形优化问题可以表示为

$$\max_{\mathbf{v}_l} \min_l \text{SINR}_{l,k}, \text{ s.t. } P_t^l \leq P_{\text{Rtotal}}^l, l=1, 2, \dots, L \quad (16)$$

同样式(16)是准凸的。本文可以在给定 Γ 的情况下通过求解式(17)得到最终解：

$$\left. \begin{aligned} \min_{\mathbf{v}_l} \quad & \sum_{l=1}^L P_t^l \\ \text{s.t.} \quad & P_t^l \leq P_{\text{Rtotal}}^l, l=1, 2, \dots, L, \\ & \text{SINR}_{l,k} \geq \Gamma, k=1, 2, \dots, K \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

类似式(11)，本文可以使用二分法在式(17)中反复地搜索最优的 Γ [17]，从而得到式(16)的最优解。同样类似上一小节，本文需要利用 SDR 技术去掉非凸的秩等于 1 的限制条件，使其转变为 SDP 凸优化问题。其问题的复杂度为 $O((LK)^3 M^{3.5} \lg(1/\sigma))$ 。

3.3 联合迭代优化策略

基于 3.1 节和 3.2 节的结论，本节在基站和中继总功率受限的情况下，给出多小区联合波束成形迭代优化算法，使得多小区内多用户的最差用户接收 SINR 最大化。该算法需要一对上限和下限用于实现最大化最差用户的 SINR 问题中的二分法算法，定义上下限分别为 γ_{UB} 和 γ_{LB} 。在实际应用中，下限 γ_{LB} 可以被简单地设为 0，上限 γ_{UB} 可以通过去除功率限制条件求解得到。具体算法如表 1 所示。

该算法在基站和中继功率受限的条件下，搜索多用户系统可达到的最差用户 SINR 从而找到最优的基站和中继发送功率。因此，基站和中继节点可以对本小区内所有用户形成虚拟波束，提高本小区边缘用户的接收信号质量，降低对相邻小区其他用户的信号干扰，从而保证多小区多用户系统中最差用户的接收 SINR 最大。根据 3.1 节和 3.2 节，本文提出的基站和中继联合迭代优化算法迭代一次的复杂度为

$O((LK)^3 (M^{3.5} + D_l^{3.5}) \lg(1/\sigma) [\log_2((\gamma_{UB} - \gamma_{LB})/\epsilon)])$ 其中 O 表示复杂度的上限， $\lceil \cdot \rceil$ 对元素上取整， $\lceil \log_2((\gamma_{UB} - \gamma_{LB})/\epsilon) \rceil$ 为二分法算法复杂度。 $\theta_{l,m}$ 的初始值为区间 $[0, 2\pi]$ 上的随机变量，这是因为本文假设不知道中继服务的用户的相对位置。如果在实际蜂窝小区中用户通过上行链路上报其位置信息，中继根据上报的位置信息，生成指向用户的发送波束相位，以此作为该迭代算法中继波束成形权重相位 $\theta_{l,m}$ 的初始值，可以更精确地收敛到其近似最优值。此外，在表 1 的步骤(4)和步骤(11)中的优化问题都是使用户的接收 SINR 最大化，并通过求解 SDP 问题使优化问题得到最优解，所以只需经过少量迭代本文提出的迭代优化算法就会收敛到其近似最优值，其可以在第 4 节的仿真中得到验证。

表1 基站和中继联合波束成形迭代优化算法

具体步骤:

- (1)初始化 γ_{LB}, γ_{UB} 以及 P_{Btotal}, P_{Rtotal}^l 。对于给定的计算精度 $\varepsilon > 0$
- (2)**WHILE** $\gamma_{UB} - \gamma_{LB} > \varepsilon$ **do**
- (3)初始化中继波束成形权重 $v_{l,m} = c_{l,m} e^{j\theta_{l,m}}$, $l = 1, 2, \dots, L$, $m = 1, 2, \dots, M$, 其中 $c_{l,m} = P_{Rtotal}^l / M$, $\theta_{l,m}$ 为均匀分布在区间 $[0, 2\pi]$ 上的随机变量。
- (4)已知 $\Gamma = (\gamma_{LB} + \gamma_{UB}) / 2$, 根据当前中继波束成形权重, 用内点法求解优化式(13)。
- (5)如果基站优化式(13)是可解的, 可以得到最优解 $\mathbf{W}_{l,k}^{opt}$ 。
- (6)**IF** $\text{rank}(\mathbf{W}_{l,k}^{opt}) = 1$ **then**
- (7)应用标准矩阵分解, 把最优解 $\mathbf{W}_{l,k}^{opt}$ 分解得到基站发送波束成形权重 $\mathbf{w}_{l,k}$, 即基站波束成形优化式(10)的最优解。
- (8)**ELSE**
- (9)应用随机化方法, 从 $\mathbf{W}_{l,k}^{opt}$ 中得到基站波束成形权重 $\mathbf{w}_{l,k}^{[19]}$ 。
- (10)**END IF**
- (11)根据当前基站波束成形权重, 用内点法求解优化式(17)。
- (12)如果中继优化式(17)是可解的, 可以得到最优解 \mathbf{V}_i^{opt} 。
- (13)类似基站优化式(13), 如果 $\text{rank}(\mathbf{V}_i^{opt}) = 1$, 那么 \mathbf{V}_i^{opt} 可以分解得到中继波束成形优化式(16)的最优解 \mathbf{v}_i ; 如果 $\text{rank}(\mathbf{V}_i^{opt}) \neq 1$, 应用随机化方法, \mathbf{V}_i^{opt} 可以分解得到中继波束成形权重 \mathbf{v}_i 。
- (14)**IF** 中继总功率 $\sum_{l=1}^L P_t^l$ 收敛到一个近似值 **or** 达到了最大的迭代次数 **then**
- (15)停止迭代转到步骤(19)。
- (16)**ELSE**
- (17)转到步骤(4)。
- (18)**END IF**
- (19)**IF** 基站和中继凸优化式(13)和式(17)都是可解的 **then**
- (20) $\gamma_{LB} = \Gamma$ 。
- (21)**ELSE**
- (22) $\gamma_{UB} = \Gamma$ 。
- (23)**END IF**
- (24)**END WHILE**
- (25)**RETURN** 最差用户 SINR $\gamma_{opt} = \Gamma$, 基站发送波束成形权重 $\mathbf{w}_{l,k}$ 和中继发送波束成形权重 \mathbf{v}_i 。

4 性能仿真分析

本节在多用户系统下仿真并分析了提出的多小区多用户基站和中继总功率限制下的联合迭代波束成形优化策略的性能。为了仿真方便, 假设每个小区基站对用户的发送功率都一样, 即 $P_{l,k} / N_0 = 10 \text{ dB}$, $l = 1, 2, \dots, L, k = 1, 2, \dots, K$, 其中 $P_{l,k}$ 为第 l 个小区基站对本小区内第 k 个用户的发送功率。基站和中继的总功率限制是相同的, 即 $P_{Btotal} = P_{Rtotal}^l = P_{total}$ 。中继到用户和基站到中继的信道为瑞利平

坦衰落信道, 信道参数为 $g_{l,m}, h_{l \rightarrow l,m,k}, l = 1, 2, \dots, L, m = 1, 2, \dots, M, k = 1, 2, \dots, K$ 。另外假设仿真系统中各个小区的所有用户节点和中继节点附近的高斯白噪声都具有相同的噪声功率, 即 $N_{l,m} = N_{l,k} = N_0$ 。在仿真中, 本文应用 CVX 工具求解 SDP 优化问题^[20]。

图 2 中, 本文比较了不同迭代次数的场景下, 使用本文提出的基站和中继总功率受限的情况下多小区多用户基站和中继联合迭代波束成形优化策略得到的系统中最差用户的接收 SINR。仿真系统中共有 2 个小区, 每个小区的基站有 4 根天线, 每个小区内含有 6 个中继和 2 个受邻小区干扰的用户。图 2 中迭代次数不限的曲线为一直迭代直到中继总功率收敛为止的仿真性能。图 2 结果表明, 最差用户接收 SINR 随着迭代次数的增加而增大, 经过 3 次迭代之后的仿真性能非常接近迭代次数不限的仿真性能, 即本文提出的基站和中继联合迭代波束成形优化算法迭代 3 次可以达到近似最优的性能。

表 2 中给出了在图 2 的仿真场景中基站波束成形优化算法、中继波束成形优化算法以及基站和中继联合迭代波束成形优化策略迭代一次的复杂度。在实际仿真基站和中继联合迭代波束成形优化策略时, 根据仿真条件, 二分法算法中下限 γ_{LB} 设为 0, 上限 γ_{UB} 设为 50, 计算精度 ε 设为 0.01。从表 2 中本文可以看出, 基站和中继波束成形优化算法的复杂度都与小区数目 L 和每个小区中受到邻小区干扰的用户数 K 相关, 其区别在于基站波束成形优化算法的复杂度与基站天线数相关, 而中继波束成形优化算法的复杂度与小区内中继数目相关, 因此表 2 中中继波束成形优化算法的复杂度相比于基站波束成形优化算法的复杂度更高, 这是由于中继个数较多造成的。基站和中继联合迭代波束成形优化策略迭代一次的复杂度与基站、中继波束成形优化算法的复杂度以及二分法算法的复杂度相关, 因此其复杂度更高。

图 3 在不同基站和中继发送信噪比下, 仿真了本文提出的多小区多用户基站和中继联合迭代波束成形优化策略在不同小区数目场景下的最差用户接收 SINR。由于本文提出的迭代算法迭代 3 次就可

表2 复杂度对比表(σ 为SDP问题解的精度)

本文提出的优化算法	复杂度上限
基站波束成形优化算法	$8.2 \times \lg(1/\sigma) \times 10^3$
中继波束成形优化算法	$3.4 \times \lg(1/\sigma) \times 10^4$
基站和中继联合迭代波束成形优化策略(迭代一次)	$5.5 \times \lg(1/\sigma) \times 10^5$

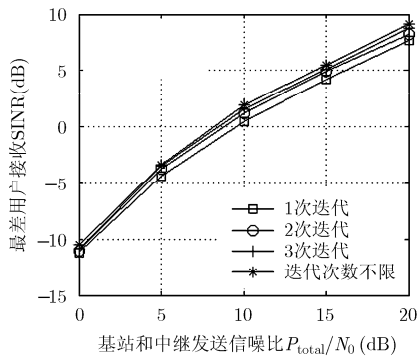


图 2 不同迭代次数时的最大化最差用户 SINR

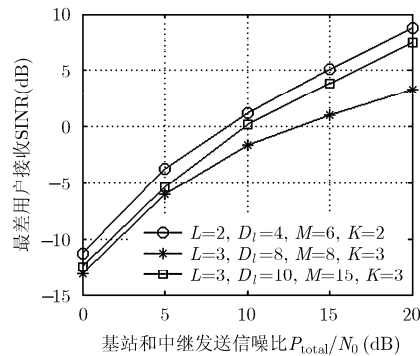


图 3 不同小区场景时的最大化最差用户 SINR

以达到近似最优的性能, 因此, 图 3 中采用最大迭代次数为 3 次进行仿真。分别仿真了 3 种多小区多用户场景: $L=2, D_l=4, M=6, K=2$; $L=3, D_l=8, M=8, K=3$; $L=3, D_l=10, M=15, K=3$ (L 表示小区数目, D_l 表示每个小区基站天线数目, M 表示每个小区的中继数目, K 表示每个小区内受邻小区干扰的用户数目)。在 3 个小区每个小区内存在 3 个受干扰用户的仿真场景中(标记为 * 和 \square 的曲线), 用户接收 SINR 比 2 个小区每个小区内存在 2 个受干扰用户的仿真场景中(标记为 \circ 的曲线)的 SINR 要差, 表明增加小区数目和小区内用户数, 会给用户带来更多的邻小区干扰和更多的用户间干扰。此时本文可以通过增加小区基站天线数和小区内中继个数, 从而提升系统性能, 避免不利因素(小区数目和小区内用户数目)增多带来系统性能的降低。例如, 在 3 个小区每个小区内存在 3 个受干扰用户的仿真场景中, 本文可以增加基站天线数和小区内中继个数(标记为 \square 的曲线), 系统最差用户接收 SINR 的性能接近 2 个小区仿真场景的最差用户接收 SINR(标记为 \circ 的曲线)。

5 结论

本文在多小区蜂窝网络中提出了一种多用户基站和中继波束成形协同传输技术, 从而克服小区间干扰, 为小区边缘用户提供更好的通信质量。本文首先在系统总功率受限的情况下, 以最大化最差用户 SINR 为目标分别优化了基站和中继的波束成形权重, 之后提出了一种联合优化基站和中继波束成形权重的迭代算法。仿真结果证明了本文的理论分析并表明了本文提出的多用户基站和中继波束成形迭代优化策略只需要 3 次迭代就可以达到近似最优的性能。

参考文献

[1] 吉晓东, 郑宝玉. 不对称放大转发双向中继功率分配及中继位置选择[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(2): 416-422.

- Ji Xiao-dong and Zheng Bao-yu. Optimum power allocation and relay location for symmetric two-way amplify-and-forward relaying[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(2): 416-422.
- [2] 陈瑾平, 何世文, 杨绿溪. 多小区 OFDMA 解码转发中继通信系统的分布式资源分配算法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(4): 787-794.
- Chen Jin-ping, He Shi-wen, and Yang Lü-xi. Distributed resource allocation for multi-cell OFDMA decode-and-forward relaying networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(4): 787-794.
- [3] 黄晓燕, 毛玉明, 吴凡, 等. 中继增强的无线蜂窝多小区系统的联合调度与功率控制算法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(7): 1665-1671.
- Huang Xiao-yan, Mao Yu-ming, Wu Fan, et al. Coordinated scheduling and power control algorithm for relay-enhanced cellular network with multicells[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(7): 1665-1671.
- [4] He Xin, Luo Tao, and Yue Guang-xin. Optimized distributed MIMO for cooperative relay networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2010, 14(1): 9-11.
- [5] Havary-Nassab V, Shahbazpanahi S, Grami A, et al. Distributed beamforming for relay networks based on second-order statistics of the channel state information[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, 56(9): 4306-4316.
- [6] Zheng Gan, Wong Kai-kit, Paulraj A, et al. Collaborative-relay beamforming with perfect CSI: optimum and distributed implementation[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2009, 16(4): 257-260.
- [7] Wang Da, Bai Lin, Chen Chen, et al. An optimal multiuser beamforming scheme based on the worst SNR in cellular systems[C]. 2012 IEEE 75th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Yokohama, Japan, 2012: 1-5.
- [8] Wang Da, Bai Lin, Zhang Xiao-ning, et al. Collaborative relay beamforming strategies for multiple destinations with guaranteed QoS in wireless machine-to-machine networks[J].

- International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2012, 2012(1): 1-10.
- [9] Kuo Chun-kai, Wu Sau-hsuan, and Tseng Chun-kai. Robust linear beamformer designs for coordinated multi-point AF relaying in downlink multi-cell networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2012, 11(9): 3272-3283.
- [10] Kuo Chun-kai, Wu Sau-hsuan, and Tseng Chun-kai. Robust linear beamformer designs for CoMP AF relaying in downlink multi-cell networks[C]. 2012 Asia-Pacific Signal & Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC), Hollywood, California, USA, 2012: 1-5.
- [11] Kim Seong-hyun, Son Hyuk-min, and Lee Sang-hoon. Receiver design for MIMO relay stations in multi-cell downlink system[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2012, 11(7): 2446-2456.
- [12] 王达, 张晓宁, 吕国成, 等. 基于最小化系统功率的多小区蜂窝中继波束成形研究[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2012, 24(5): 610-638.
Wang Da, Zhang Xiao-ning, Lü Guo-cheng, *et al.*. Collaborative relay beamforming based on minimum power in multicell systems[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science)*, 2012, 24(5): 610-638.
- [13] Wang Da, Bai Lin, Chen Chen, *et al.*. Coordinated relay beamforming based on the worst-case SINR in multicell wireless systems[C]. 2012 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Anaheim, California, USA, 2012: 3941-3945.
- [14] Luo Zhi-quan, Ma Wing-kin, So A M C, *et al.*. Semidefinite relaxation of quadratic optimization problems[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2010, 27(3): 20-34.
- [15] Vandenberghe L and Boyd S. Semidefinite programming[J]. *Society for Industrial and Applied Mathematics*, 1996, 38(1): 49-95.
- [16] Li Yan, Sun Yi, and Zhou Feng. Long step user selection algorithm for unitary beamforming[C]. 2012 IEEE 75th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Yokohama, Japan, 2012: 1-6.
- [17] Boyd S and Vandenberghe L. *Convex Optimization*[M]. Cambridge, England, Cambridge University Press, 2004: 145-430.
- [18] Nguyen D H N, Nguyen H H, and Tuan H D. Distributed beamforming in relay-assisted multiuser communications [C]. IEEE International Conference on Communications (ICC 2009), Dresden, Germany, 2009: 1-5.
- [19] Sidiropoulos N D, Davidson T N, and Luo Z Q. Transmit beamforming for physical layer multicasting[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2006, 54(6): 2239-2251.
- [20] Grant M and Boyd S. CVX users' guide for cvx version 1.21 (build 790) [OL]. <http://cvxr.com>, 2010.1.
- 王 达: 男, 1985 年生, 博士后, 研究方向为中继波束成形。
张晓宁: 男, 1980 年生, 讲师, 研究方向为中继通信。
依 那: 男, 1974 年生, 副教授, 研究方向为网络通信中的网络架构。
项海格: 男, 1941 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为无线通信与通信网络。
金 野: 男, 1966 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为通信网络、软件工程。