

一种多小区多用户能效波束赋形分层优化算法

张敏^{1,2} 何世文² 陆莹² 李元稳² 黄永明² 杨绿溪²

(1. 湖南邮电职业技术学院移动通信系, 长沙, 410015; 2. 东南大学信息科学与工程学院, 南京, 210096)

摘要: 研究在用户服务质量需求和功率约束等条件下最大化系统能效的多小区多用户系统中的波束赋形技术。首先引入辅助变量将分式形式的非凸优化目标函数转化为凹凸分数形式的优化目标函数, 并利用分式规划和低复杂度凸逼近法进行功率分配优化; 然后将波束优化问题转化成满足一定约束条件的最小化发射功率优化问题, 并利用二阶锥规划求解相应的波束赋形优化问题。仿真结果表明: 所提的能效分层优化算法可以经过有限迭代次数逐渐收敛到稳定值; 在低发射功率区域, 所提算法能够同时获得最大频谱效率和能源效率; 而在高发射功率区域, 本文算法所获得的能效性能明显优于传统的频谱效率最大化算法。

关键词: 能效传输; 波束赋形; 分式规划; 凸逼近; 二阶锥规划

中图分类号: TN92 文献标识码: A

Energy Efficient Beamforming Layered Optimization Algorithm for Multiuser in Multicell Systems

Zhang Min^{1,2}, He Shiwen², Lu Ying², Li Yuanwen², Huang Yongming², Yang Lüxi²

(1. Mobile Communication Department of Hunan Post and Telecommunication College, Changsha, 410015, China; 2. School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing, 210096, China)

Abstract: Energy-efficient beamforming design for multiuser is investigated in multicell systems to maximize the system energy efficiency subjected to some given quality of service demands and transmit power constraint. The non-convex optimization objective function in fractional form is firstly transformed into an optimization objective function in concave-convex fractional form, and the power allocation is realized by introducing some auxiliary variables and using jointly the fractional programming and the lower complexity convex approximation method. Then the beamforming optimization problem is transformed into a problem of minimizing the transmit power which can be solved with the second-order conic programming method. Numerical results illustrate that the proposed algorithm converges to a stable point within a limited number of iterations. It is also observed that the best spectral efficiency and energy efficiency can be simultaneously achieved by the proposed algorithm at low transmit power region. However, in high transmit power region the proposed algorithm outperforms obviously the traditional spectral efficiency maximization algorithm in terms of energy efficiency.

Key words: energy efficient transmission; beamforming; fractional programming; convex approximation; second-order cone programming

基金项目: 国家科技重大专项(2013ZX03003006-02)资助项目; 国家自然科学基金(61471120, 61271018, 61372101)资助项目; 江苏省自然科学基金(BK20130019, BK2011597)资助项目; 江苏省工业支撑项目(BE2012167)资助项目; 教育部新世纪优秀人才资助计划(NCET-11-0088)资助项目; 中兴通讯股份有限公司产学研项目(CON1211090001)资助项目。

收稿日期: 2014-11-17; **修订日期:** 2015-05-21

引言

随着无线通信技术的不断发展,高数据速率、高可靠性及无线覆盖范围等高用户服务质量要求促进了多输入多输出(Multiple-input multiple-output, MIMO)技术的迅速发展。MIMO技术利用其空间复用和分集增益,在不增加带宽和天线发射功率的情况下提高无线信道容量,同时提高信道的可靠性及降低误码率。因此,目前已有许多关于MIMO技术的研究^[1],如多小区多用户MIMO系统的协作多点传输(Coordinated multiple points transmission, CoMP)技术,可以有效地减少小区间干扰(Inter-cell Interference, ICI)^[2-9]。从理论和技术方面,文献[2,3]概述了无线网络中协作多小区MIMO技术可以减少小区间的干扰,从而显著提高系统性能。针对在给定目标信干噪比(Signal to interference plus noise ratio, SINR)约束条件下的最小化传输功率的优化问题,文献[4]提出了一种协作式波束赋形算法。文献[5,6]分别利用了上下行链路的对偶性和极大极小对偶理论。文献[7]利用凸逼近法研究了正交频分多址(Orthogonal frequency division multiple access, OFDMA)系统中的功率分配问题。而且,在分别考虑系统总功率约束和每个小区基站功率约束的条件下,文献[8]采用凸逼近法(Successive convex approximation with low complexity, SCALE)研究最大化系统加权和速率优化问题的波束成形和功率算法。文献[9]则是在上行多用户中继网络中,针对中继协作波束成形与多天线基站联合优化的问题。然而,上述研究工作主要是关注如何提高系统频谱效率(Spectral efficiency, SE),而没有考虑到功率消耗问题,即忽略研究单位能量消耗所能传输的比特数问题。随着节能环保意识的增强,无线通信者提出并研究绿色通信技术,因此需要在SE和功率消耗之间取得一定的性能折中。在单输入单输出(Single-input single-output, SISO)的正交频分多址(Orthogonal frequency division multiple access, OFDMA)系统中,文献[10]提出一种基于能效(Energy efficiency, EE)的链路自适应方案,根据信道状态信息(Channel state information, CSI)合理分配功率。文献[11]考虑了用户公平性,设计了一种联合传输系统中的能效波束成形算法,其优化目标是在一定约束条件下最大化最小用户能效。文献[12]是关于MIMO广播信道(MIMO broadcast channels, MIMO-BC)的能效优化问题,其中融入了传输天线的选择思路。在协作式多小区多用户系统中,利用分式规划、速率与最小均方误差(Minimum mean-square error, MMSE)的关系,文献[13]提出一种联合功率分配和波束设计的两层能效优化算法。在文献[13]的基础上,文献[14]进一步提出了一种异构网络中的协作波束设计方案,其中对泄漏干扰进行约束,从而提高系统能效。

在原有能效研究基础上,本文提出一种新颖的多小区多用户能效波束赋形分层优化算法。其优化问题是在传输功率和目标信干噪比SINR双约束条件下,联合波束赋形和功率分配最大化系统能效,其中能效定义为系统所有用户的加权和速率与总功率消耗之比。原始问题由于其分式形式和优化变量的耦合性使得其难以直接解决。为了解决此非凸的优化问题,提出分层优化思路:首先引入辅助变量,在波束赋形给定的基础上,利用低复杂度的SCALE^[7-8]和分式规划^[15-16]进行功率分配和辅助变量优化;然后将优化问题转换为最小化传输功率问题,利用二阶锥规划(Second order cone programming, SOCP)^[15-17]进行波束赋形优化设计;如此不断地迭代更新优化变量直至能效值收敛。仿真结果证明了所提的能效分层优化算法的有效性,及其可以经过有限次迭代逐渐收敛到稳定值;在低发射功率区域,所提算法能够同时获得最大频谱效率和能源效率;而在高发射功率区域,所提算法所获得的能效性能明显优于传统的频谱效率最大化算法。

1 系统模型

本文主要研究多小区多用户下行链路通信系统中的多小区协同波束成形优化设计问题,即各小区基站协同设计各自发射波束,进而尽力减少用户间及小区间的干扰,特别是以提升小区边缘用户的性能

为主要目的。考虑多小区多用户多输入单输出 (Multi-user Multi-input single-output, MU-MISO) 系统, 假设系统中有 K 个协作小区, 小区 j 中的基站 (Base station, BS) 配置有 M_j 个传输天线, 并且服务 N_j 个单天线用户, 其中 $j=1, \dots, K$, 如图 1 所示。将小区 j 中的第 k 个用户和小区 m 中的基站分别表示成 $\text{User}_{j,k}$ 和 BS_m 。 $\text{User}_{j,k}$ 接收信号 $y_{j,k}$ 可以表示为

$$y_{j,k} = \sum_{m=1}^K \sum_{n=1}^{N_m} \sqrt{p_{m,n}} \mathbf{h}_{m,j,k}^H \mathbf{w}_{m,n} x_{m,n} + z_{j,k} \quad (1)$$

式中: $p_{j,k}$ 为分配给 $\text{User}_{j,k}$ 的传输功率; $\mathbf{h}_{m,j,k} \in \mathbf{C}^{M_m}$ 为 BS_m 和 $\text{User}_{j,k}$ 之间的平坦衰落信道系数, 包括大尺度衰落、小尺度衰落和阴影衰落; $\mathbf{w}_{j,k} \in \mathbf{C}^{M_j}$ 为 $\text{User}_{j,k}$ 的波束赋形矢量且满足 $\|\mathbf{w}_{j,k}\|=1$; $x_{j,k}$ 为 BS_j 传输给 $\text{User}_{j,k}$ 的信息信号且满足 $E\{x_{j,k}\}=0$ 和 $E\{\|x_{j,k}\|^2\}=1$; $z_{j,k}$ 是均值为零, 方差为 $\sigma_{j,k}^2$ 的循环对称复高斯随机噪声。假设用户信号之间彼此独立且用户信号与噪声相互独立, 则 $\text{User}_{j,k}$ 的接收信干噪比 $\text{SINR}_{j,k}$ 可以表示为

$$\text{SINR}_{j,k} = \frac{p_{j,k} \|\mathbf{h}_{j,j,k}^H \mathbf{w}_{j,k}\|^2}{\mathbf{I}_{j,k} + \sigma_{j,k}^2} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{I}_{j,k}$ 为干扰信号, 包括小区内用户间干扰和 ICI, 表示为

$$\mathbf{I}_{j,k} = \sum_{n=1, n \neq k}^{N_j} p_{j,n} \|\mathbf{h}_{j,j,k}^H \mathbf{w}_{j,n}\|^2 + \sum_{m=1, m \neq j}^K \sum_{n=1}^{N_m} p_{m,n} \|\mathbf{h}_{m,j,k}^H \mathbf{w}_{m,n}\|^2 \quad (3)$$

为了简化符号表示, 记 $\mathbf{W} = \{\mathbf{w}_{j,k}\}$, $\mathbf{p} = \{p_{j,k}\}$, $\forall j, k \in \Gamma_j$, 其分别表示波束赋形矢量的集合和传输功率分配的矢量, 其中 Γ_j 表示属于小区 j 的用户集合。本文将系统中所有用户速率的加权和与系统总功率消耗之比定义为系统能效, 其表达式为

$$f(\mathbf{W}, \mathbf{p}) = \frac{\sum_{j,k} \alpha_{j,k} R_{j,k}}{\xi \sum_{j,k} p_{j,k} + \sum_j (M_j P_C + P_0)} \quad (4)$$

式中: 加权因子 $\alpha_{j,k}$ 为 $\text{User}_{j,k}$ 的优先级; 用户速率 $R_{j,k} = \log_2(1 + \text{SINR}_{j,k})$; $\xi \geq 1$ 表示功率放大器的低效率, 为常数; P_C 为基站每根天线的电路级功率消耗, 包括传输滤波器、混频器、频率合成器和数模 (D/A) 转换器的功率消耗; P_0 为基站的基本功率消耗, 与传输天线数目无关^[13]。因此, 基于能效的优化问题为

$$\max_{\mathbf{W}, \mathbf{p}} f(\mathbf{W}, \mathbf{p}) \quad (5)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{k=1}^{N_j} p_{j,k} \leq P_j, \|\mathbf{w}_{j,k}\|=1, \text{SINR}_{j,k} \geq \gamma_{j,k}, \forall j, k \in \Gamma_j$$

式中: P_j 为 BS_j 的传输功率约束; $\gamma_{j,k}$ 为 $\text{User}_{j,k}$ 的目标 SINR 要求。从式 (5) 的定义可以看出其实质是在保证一定的频谱效率前提下最大化系统能源效率, 进而在二者之间取得良好的性能折中。

2 能效波束成形算法设计

由于能效优化问题式 (5) 是分式形式, 并且优化变量 $\{\mathbf{W}, \mathbf{p}\}$ 存在耦合性, 这使得优化问题是一个难以直接解决的非凸问题。为了简化问题, 首先考虑引入辅助变量 $\boldsymbol{\eta} = \{\eta_{j,k}\}$, $\forall j, k \in \Gamma_j$, 优化问题式 (5) 可以转换为^[18]

$$\max_{\mathbf{W}, \mathbf{p}, \boldsymbol{\eta}} \frac{\sum_{j,k} \alpha_{j,k} \log_2(1 + \eta_{j,k})}{\xi \sum_{j,k} p_{j,k} + \sum_j (M_j P_C + P_0)} \quad (6)$$

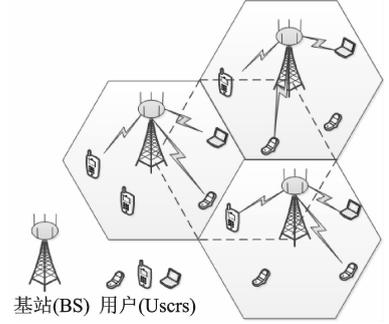


图 1 多小区多用户 MISO 系统图
Fig. 1 Multicell multiuser MISO system model

$$\begin{aligned} \text{s. t. } \quad & \text{SINR}_{j,k} \geq \eta_{j,k}, \text{SINR}_{j,k} \geq \gamma_{j,k}, \forall j, k \in \Gamma_j \\ & \|\mathbf{w}_{j,k}\| = 1, \forall j, k \in \Gamma_j, \sum_{k=1}^{N_j} p_{j,k} \leq P_j, \forall j \end{aligned}$$

式中:不等式约束 $\text{SINR}_{j,k} \geq \eta_{j,k}, \forall j, k \in \Gamma_j$ 当且仅当优化问题式(6)达到最佳优化值时等式成立,即 $\text{SINR}_{j,k}(\mathbf{W}^*, \mathbf{p}^*) = \eta_{j,k}^*, \forall j, k \in \Gamma_j$, 其中 $\mathbf{W}^*, \mathbf{p}^*, \boldsymbol{\eta}^*$ 分别对应波束赋形矢量 \mathbf{W} 、功率分配策略 \mathbf{p} 和辅助变量 $\boldsymbol{\eta}$ 的最优值。值得注意的是:式(6)中优化变量的耦合性导致其仍然不可以直接求得其最佳值,但是可以将其分解成两个子问题^[19]:(1)假设波束赋形矢量 \mathbf{W}^* 一定,对式(6)进行功率分配策略和辅助变量优化,获得 \mathbf{p}^* 和 $\boldsymbol{\eta}^*$; (2)以 \mathbf{p}^* 和 $\boldsymbol{\eta}^*$ 为已知条件,对式(6)进行波束赋形矢量的优化,获得 \mathbf{W}^* 。因此可以通过两步优化法解决式(6),下面将详细描述两步优化方案。

2.1 功率分配策略

假设波束赋形 \mathbf{W}^* 给定,很容易发现优化式(6)属于典型的分式规划问题,解决此类问题的通用方法是利用分式规划和参数规划的关系将分式问题转换成一个线性规划问题^[15-16]。依据这一思路,可以将式(6)转换为

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{p}, \boldsymbol{\eta}} \quad & \sum_{j,k} (\alpha_{j,k} \ln(1 + \eta_{j,k}) - \ln 2 \rho \xi p_{j,k}) \\ \text{s. t. } \quad & \text{SINR}_{j,k} \geq \eta_{j,k}, \text{SINR}_{j,k} \geq \gamma_{j,k}, \sum_{k=1}^{N_j} p_{j,k} \leq P_j, \forall j, k \end{aligned} \quad (7)$$

式(7)中忽略了一个固定部分 $\sum_j \ln 2 \rho (M_j P_C + P_0)$, 因为它与优化变量无关并不对最终优化结果造成影响,所以可以忽略不计;引入的参数 ρ 可以看作是一个可实现的系统能效值,可以通过次梯度法不断迭代求解上述问题从而获得参数 ρ 的最优值,即系统能效的最优值。注意式(7)由于约束 $\text{SINR}_{j,k} \geq \eta_{j,k}, \forall j, k \in \Gamma_j$ 依然是一个非凸优化问题。因此,为了使得式(7)关于功率分配策略 \mathbf{p} 和辅助变量 $\boldsymbol{\eta}$ 可以进行凸优化,提出利用低复杂度连续凸逼近法^[7-8]将式(7)逼近成下界,则

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{p}, \boldsymbol{\eta}} \quad & \sum_{j,k} (\alpha_{j,k} \bar{R}_{j,k} - \ln 2 \rho \xi p_{j,k}) \\ \text{s. t. } \quad & \text{SINR}_{j,k} \geq \eta_{j,k}, \text{SINR}_{j,k} \geq \gamma_{j,k}, \sum_{k=1}^{N_j} p_{j,k} \leq P_j, \forall j, k \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $\bar{R}_{j,k} = -\frac{\theta_{j,k}}{\eta_{j,k}} + \vartheta_{j,k}$, $\theta_{j,k}$ 和 $\vartheta_{j,k}$ 为近似点 $\bar{\eta}_{j,k}$ 处的逼近常数值,计算公式为

$$\theta_{j,k} = \frac{\bar{\eta}_{j,k}^2}{1 + \bar{\eta}_{j,k}}, \vartheta_{j,k} = \frac{\bar{\eta}_{j,k}}{1 + \bar{\eta}_{j,k}} + \ln(1 + \bar{\eta}_{j,k}) \quad (9)$$

根据上述分析,优化式(8)可以利用几何规划法较容易解决,即在波束赋形矢量 \mathbf{W}^* 已知的条件下,设计一个算法求解式(8)的最优解。为了简单起见,这里将不再详细描述功率分配策略 \mathbf{p} 和辅助变量 $\boldsymbol{\eta}$ 更新算法,可以参考文献[8]中所提的方法。

2.2 波束赋形设计

如果波束赋形矢量 \mathbf{W}^* 一定,可以通过分式规划和 SCALE 对式(6)进行关于功率分配 \mathbf{p} 和辅助变量 $\boldsymbol{\eta}$ 的优化,获得 \mathbf{p}^* 和 $\boldsymbol{\eta}^*$ 。这里将把 \mathbf{p}^* 和 $\boldsymbol{\eta}^*$ 作为已知条件,进行波束赋形优化设计。回到优化式(6), $\boldsymbol{\eta}^*$ 已经确定,可以将式(6)转换为在基站传输功率约束和用户信干噪比 SINR 约束条件下最小化系统总传输功率的优化问题,表达为

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{W}} \quad & \sum_{j,k} \|\bar{\mathbf{w}}_{j,k}\|^2 \\ \text{s. t. } \quad & \sum_{k=1}^{N_j} \|\bar{\mathbf{w}}_{j,k}\|^2 \leq P_j, \text{SINR}_{j,k} \geq \eta_{j,k}^* \quad \forall j, k \in \Gamma_j \end{aligned} \quad (10)$$

式中: $\bar{\mathbf{W}} = \{\bar{\mathbf{w}}_{j,k}\}, \forall j, k \in \Gamma_j$, 与 $\mathbf{w}_{j,k}, p_{j,k}$ 的关系式及 $\text{SINR}_{j,k}$ 的计算公式为

$$\forall j, k \in \Gamma_j \quad \mathbf{w}_{j,k} = \frac{\bar{\mathbf{w}}_{j,k}}{\|\bar{\mathbf{w}}_{j,k}\|} \quad p_{j,k} = \|\bar{\mathbf{w}}_{j,k}\|^2$$

$$\text{SINR}_{j,k} = \frac{\|\mathbf{h}_{j,j,k}^H \bar{\mathbf{w}}_{j,k}\|^2}{I_{j,k} + \sigma_{j,k}^2} \quad (11)$$

$$I_{j,k} = \sum_{n=1, n \neq k}^{N_j} \|\mathbf{h}_{j,j,k}^H \bar{\mathbf{w}}_{j,n}\|^2 + \sum_{m=1, m \neq j}^K \sum_{n=1}^{N_m} \|\mathbf{h}_{m,j,k}^H \bar{\mathbf{w}}_{m,n}\|^2$$

值得注意的是,关于波束赋形优化式(10)可以利用 SOCP 优化工具求解。为了标记简单,这里将优化所获得的最佳波束赋形矢量记为 $\bar{\mathbf{W}}^*$ 。

推论 1 利用波束赋形矢量 $\bar{\mathbf{W}}^*$ 计算所得的系统能效值一定大于或等于利用 \mathbf{W}^* 和 \mathbf{p}^* 计算所得的系统能效值,即满足

$$f(\bar{\mathbf{W}}^*) \geq f(\mathbf{W}^*, \mathbf{p}^*) \quad (12)$$

证明:由式(6)可知, $\text{SINR}_{j,k}(\mathbf{W}^*, \mathbf{p}^*) = \eta_{j,k}^* \forall j, k$, 式(10)将 η^* 设为信干噪比 SINR 的优化约束条件之一,即在实现目标 SINR 的基础上最小化系统总的传输功率。也可以理解为 $\bar{\mathbf{W}}^*$ 可以达到跟 \mathbf{W}^* 和 \mathbf{p}^* 一样的 SINR,即 η^* , 但是不额外增加传输功率。因此,式(10)的最佳波束赋形矢量 $\bar{\mathbf{W}}^*$ 对应的能效值一定不少于 \mathbf{W}^* 和 \mathbf{p}^* 对应的能效 EE。

2.3 能效波束赋形算法设计

根据上述功率分配策略和波束赋形设计两步优化的分析,本文将提出一个针对优化式(5)的算法,具体算法步骤见算法 1,其中参数 ρ 为可达的系统能效值; ζ 为预先定义的停止迭代的阈值。

算法 1 一种多小区多用户能效波束赋形分层优化算法

(1) 设 $n=0$, 初始化波束赋形矢量 $\mathbf{W}^{(n)}$ 和功率分配 $\mathbf{p}^{(n)}$, 使得其满足功率约束和目标 SINR 约束。已知初始 $\mathbf{W}^{(n)}$ 和 $\mathbf{p}^{(n)}$, 根据式(4)计算初始能效值,记为 $\rho^{(n)}$ 。

(2) 已知 $\mathbf{W}^{(n)}$ 和 $\mathbf{p}^{(n)}$, 利用文献[8]提出的 SCALE 算法优化式(7), 获得优化变量的最佳值,记为 $\mathbf{p}^{(n+1)}$ 和 $\eta^{(n+1)}$ 。

(3) 已知 $\eta^{(n+1)}$ 并将其作为新的目标 SINR 约束, 利用 SOCP 优化工具解决式(10), 获得波束赋形的最佳设计 $\bar{\mathbf{W}}^{(n+1)}$ 。

(4) 计算 $\bar{\mathbf{w}}_{j,k}^{(n+1)} = \frac{\bar{\mathbf{w}}_{j,k}^{(n+1)}}{\|\bar{\mathbf{w}}_{j,k}^{(n+1)}\|}$, $p_{j,k}^{(n+1)} = \|\bar{\mathbf{w}}_{j,k}^{(n+1)}\|^2, \forall j, k$ 。根据更新的波束赋形 $\mathbf{W}^{(n+1)}$ 和功率分配 $\mathbf{p}^{(n+1)}$ 计算系统能效值,记为 $\rho^{(n+1)}$ 。

(5) 如果 $\left| \sum_{j,k} (\alpha_{j,k} \ln(1 + \eta_{j,k}^{(n+1)}) - \ln 2 \rho^{(n)} \xi p_{j,k}^{(n+1)}) \right| \leq \zeta$, 那么输出 $\rho^{(n+1)}$, $\mathbf{p}^{(n+1)}$ 和 $\mathbf{W}^{(n+1)}$; 否则让 $n=n+1$, $\rho^{(n)} = \rho^{(n+1)}$, $\mathbf{p}^{(n)} = \mathbf{p}^{(n+1)}$ 和 $\mathbf{W}^{(n)} = \mathbf{W}^{(n+1)}$ 返回步骤(2)。

推论 2 算法 1 生成的序列是一个单调递增的序列且总是收敛的。

证明:根据文献[8]的结论和推论 1, 可以发现算法 1 中的步骤(2,3)的优化原理均旨在提高系统能效值,因此算法 1 生成的序列是递增的; 又因为传输功率 $\{P_j\}_{j=1}^K$ 的约束限制, 系统和速率是有上界的, 即可达的最大系统和速率为

$$R_{\max} = \sum_{j,k} \log_2 \left(1 + \frac{P_j \mathbf{h}_{j,j,k}^2}{\sigma_{j,k}^2} \right) \quad (13)$$

式中忽略了小区内用户间的干扰和小区间干扰, 并且最大限度地使用传输功率。再依据文献[20]中的单调收敛定理, 可证明算法 1 中的序列总是收敛的。从算法描述过程中可以看出, 本文提出的算法也可以类似地应用于和速率最大化问题, 即文献[8]所研究的多点协同波束成形及功率分配算法。但与多点协作通信系统的和速率最大化波束成形及功率分配优化问题、发射功率最小化波束成形优化问题的求解算法相比较, 所研究的多点协同通信系统的系统能效最大化问题更加复杂, 其求解算法设计更加困难。相比于传统的和速率最大化优化问题或者发射功率最小化优化问题, 所提算法在运算量, 即算法

复杂度方面有所增加。

3 仿真结果

仿真环境为一个 $K=3$ 的相邻正六边形小区结构,其中小区 j 中的基站 BS_j 配置 M_j 传输天线并且服务于 N_j 单天线用户。小区的服务半径设为 $R_{\text{cell}}=500$ m,并且要求每个用户与其服务基站的距离至少 400 m。 BS_m 到 $User_{j,k}$ 的信道系数计算公式为

$$\mathbf{h}_{m,j,k} \triangleq \sqrt{\theta_{m,j,k}} \mathbf{h}_{m,j,k}^w \quad (14)$$

式中: $\mathbf{h}_{m,j,k}^w$ 为小尺度衰落,设为服从零均值和单位协方差矩阵的高斯分布; $\theta_{m,j,k}$ 为大尺度衰落因子,其以 dB 形式的计算公式为

$$10\log_{10} \theta_{m,j,k} = -38\log_{10} d_{m,j,k} - 34.5 + \eta_{m,j,k} \quad (15)$$

式中: $d_{m,j,k}$ 为 BS 与 $User_{j,k}$ 之间的距离; $\eta_{m,j,k}$ 为呈对数正态分布的阴影衰落,其均值为零,标准偏差为 8 dB^[21]。基站每根天线的电路级功耗 $P_c=30$ dBm,基站的基础功耗 $P_0=40$ dBm^[22],基站的传输功率约束 $P=P_j, \forall j$,即每一个基站的功率约束值一样。噪声系数设为 9 dB,体现用户优先级的加权因子和功率放大器的低效率分别设为 $\alpha_{j,k}=1, \forall j,k, \xi=1$; 收敛阈值 $\zeta=1 \times 10^{-4}$ 。

在仿真过程中,需要将本文所提的能效分层优化算法与其他几种算法进行性能比较分析,例如最大比传输(Maximum ratio transmission, MRT)算法、功率最小化(Power minimization, PM)算法以及加权和速率最大化(Weighted sum rate maximization, WSRMax)算法^[14]。其中,MRT 算法是在基站传输功率约束下联合 MRT 波束赋形(归一化)和平均功率分配,即波束赋形矢量 \mathbf{W} 和功率分配策略 \mathbf{p} 分别满足

$\mathbf{w}_{j,k} = \mathbf{h}_{j,j,k} / \|\mathbf{h}_{j,j,k}\|, p_{j,k} = P_j / N_j, \forall j,k$ 。根据式(2),利用 MRT 算法中的 $\{\mathbf{W}_{\text{MRT}}, \mathbf{p}_{\text{MRT}}\}$ 计算信干噪比并且设为目标信干噪比,即 $\gamma_{j,k} = \text{SINR}_{j,k}, \forall j,k$ 。PM 算法是在基站传输功率约束和目标信干噪比要求下最小化系统总传输功率。WSRMax 算法的优化目标是在一定约束条件下最大化用户速率加权之和,其中利用了分式规划以及速率与最小均方误差的关系。图 2 给出了本文所提的能效分层优化算法的收敛性能曲线图,其中相关仿真参数设置为 $M_j=4, N_j=2, P_j=46$ dBm, $\forall j$ 。随机初始化波束赋型矢量 \mathbf{W} 以及最大限度利用传输功率,即满足 $\sum_{k=1}^{N_j} p_{j,k} = P_j, \forall j,k$; 利用初始化的 $\{\mathbf{W}, \mathbf{p}\}$ 计算信干噪比 SINR,并且设为目标 SINR。观察 4 次随机生成信道的收敛性能曲线,仿真结果表明:所提算法在迭代过程中生成的序列是非递减的,同时经过有限的迭代次数 EE 可以收敛到稳定值。

将本文所提算法与 MRT 算法、PM 算法及 WSRMax 算法比较,图 3 给出了基站传输功率约束 P_j 对系统性能的影响,其中 $M_j=16, N_j=2, \forall j$ 。图 3 中实线表示系统能效 EE,如左侧坐标轴所示;虚线表示系统频谱效率 SE,如右侧坐标轴所示;其中系统能效 EE 与频谱效率 SE 都是 1 000 次随机信道实现下的均值。仿真结果表明:从系统能效 EE 的角度,所提算法的 EE 性能明显优于 MRT 算法和 PM 算法;WSRMax 算法以系统加权和速率为优化目标,忽略功率消耗,在较高功率约束区域所获得的和速率增益不能弥补能耗损失,因此能效性能呈现下降趋势;然而本文所提算法同时考虑系统容量和能源消耗问题,以能效为优化目标,在较高功率约束区域降低发射功率从而提升或维持系统能效性能。从系统频谱效率 SE 的角度,所提算法在低功率约束时 SE 性能与 WSRMax 算法相近并且呈上升趋势,然而在约束功率达到 42 dBm 时,SE 性能曲线逐渐趋于平缓,因此所提算法是牺牲频谱效率提

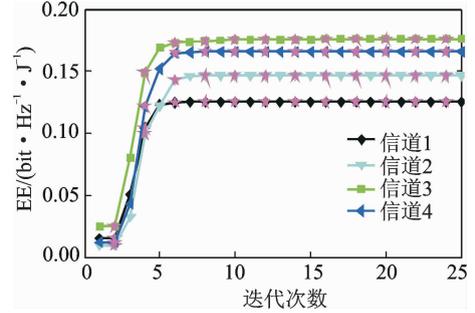


图 2 本文算法的收敛性能 ($M_j=4, N_j=2, P_j=46$ dBm, $\forall j$)

Fig. 2 Convergence behavior of proposed algorithm ($M_j=4, N_j=2, P_j=46$ dBm, $\forall j$)

高系统能效。

图 4 给出了基站传输天线数目 M 对系统性能影响的曲线图,其中基站服务的用户数目固定,即 $N_j=2, \forall j$,基站的传输功率约束 $P_j=46 \text{ dBm}, \forall j$,基站传输天线数目 $M_j, \forall j$ 依次取值 $[4, 8, 16, 32, 48, 64]$,随机信道实现次数为 1 000。仿真结果表明:无论从系统能效 EE 还是频谱效率 SE 角度,所提算法的性能都明显优于 PM 算法。在基站服务的用户数目固定时,随着基站传输天线数目的增加,两种算法的系统能效 EE 开始是不断提高的,但是当 $M_j \geq 16, \forall j$ 时,能效 EE 出现下降趋势。所以可以得出结论固定的基站服务用户数目存在对应的最佳传输天线数目 M_j^* ,例如在此仿真参数设置下,对应的天线数目最佳值 $M_j^*=16, \forall j$ 。另外,两种算法的系统频谱效率 SE 都随着天线数目的增加而提高。图 5 给出了系统性能 EE/SE 与基站传输天线 M 的关系图,与图 4 不同的是基站传输天线数目与服务用户数目的比值(M_j/N_j)一定,即用户数目随天线数目以一定比例增加。仿真中比值 $M_j/N_j=8, P_j=46 \text{ dBm}, \forall j$,能效 EE 与频谱效率 SE 取 1 000 次信道实现的均值。仿真结果表明:基站传输天线数目 M 与服务用户数目 N 以一定比值增加,所提算法的能效 EE 和频谱效率 SE 能同时提高。另外,本文所提算法的系统性能优于 PM 算法,并且随着天线数目的增多这种优势就更加明显。图 6 给出了上述 4 种算法的平均系统能效 EE 与基站每根天线的电路级功耗 P_c 的关系图,其中 $M_j=16$,

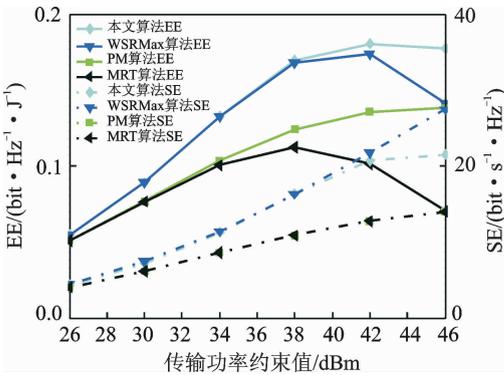


图 3 基站传输功率约束 P_j 对系统性能的影响 ($M_j=16, N_j=2, \forall j$)

Fig. 3 Impact of transmit power constraint P_j of BS on system performance ($M_j=16, N_j=2, \forall j$)

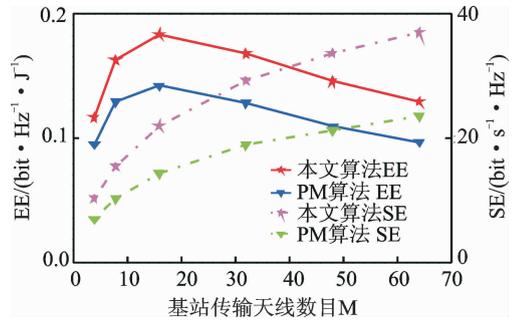


图 4 基站传输天线数目 M 对系统性能的影响 ($N_j=2, P_j=46 \text{ dBm}, \forall j$)

Fig. 4 Impact of number of transmit antennas M of BS on system performance ($N_j=2, P_j=46 \text{ dBm}, \forall j$)

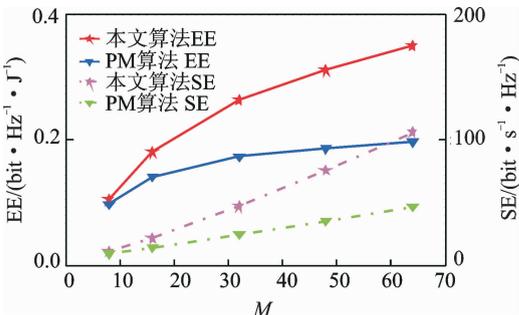


图 5 基站传输天线数目 M 对系统性能的影响 ($M_j/N_j=8, P_j=46 \text{ dBm}, \forall j$)

Fig. 5 Impact of number of transmit antennas M of BS on system performance ($M_j/N_j=8, P_j=46 \text{ dBm}, \forall j$)

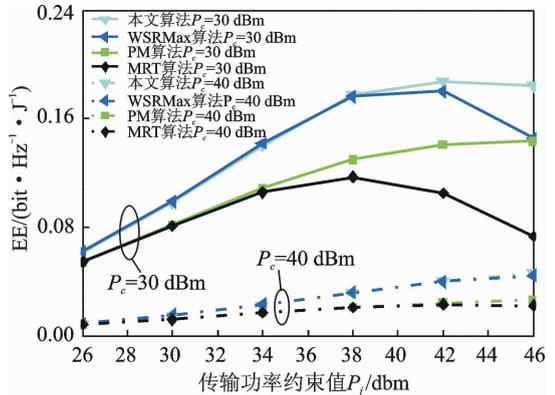


图 6 系统能效 EE 与天线电路级功耗 P_c 的关系 ($M_j=16, N_j=2, \forall j$)

Fig. 6 System energy efficiency vs circuit power consumption of antenna P_c ($M_j=16, N_j=2, \forall j$)

$N_j = 2, \forall j, P_0 = 40$ dBm, 随机信道实现次数为 1 000。图中的实线和虚线分别表示 $P_C = 30$ dBm, $P_C = 40$ dBm。仿真结果表明:当基站天线电路级功耗 P_C 从 40 dBm 降低到 30 dBm 时,系统能效值 EE 随之增加,如传输功率约束为 46 dBm 时能效增益约为 4.7 dB;并且 $P_C = 30$ dBm 时,在较高传输功率约束值区间内(如 38~46 dBm),所提算法的能效 EE 性能明显优于其他 3 种算法。

4 结束语

本文主要研究协作式多小区多用户系统中的能效优化波束赋形设计,其优化目标是在基站传输功率和目标信干噪比约束条件下最大化系统能效。由于优化问题是非凸的分式形式并且难以直接解决,因此本文提出一种能效分层优化算法。其基本思路是首先利用分式规划和低复杂度凸逼近法进行功率分配优化;然后将问题转换为最小化传输功率的波束赋形问题。仿真结果表明本文所提的能效分层优化算法可以经过有限次迭代逐渐收敛到稳定值;在低发射功率区域,所提算法能够同时获得最大频谱效率和能源效率;而在高发射功率区域,所提算法所获得的能源效率明显优于传统的频谱效率最大化算法。

参考文献:

- [1] Tao X, Xu X, Gu Q. An overview of cooperative communication[J]. IEEE Commun Mag, 2012, 6(6): 65-71.
- [2] 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.
- [3] Zheng G, Huang Y, Wong K. Heterogeneous cellular networks[M]. Cambs: Cambridge University Press, 2013.
- [4] Dahrouj H, Yu W. Coordinated beamforming for the multi-cell multi-antenna wireless system[J]. IEEE Transaction on Wireless Communications, 2010, 9(5): 1748-1759.
- [5] 张瑞,宋荣方. MISO 系统中上下行链路对偶性分析[J]. 数据采集与处理, 2012, 27(5): 521-527.
Zhang Rui, Song Rongfang. Duality of uplink and downlink channels in MISO systems [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2012, 27(5): 521-527.
- [6] Huang Y C, Tan C W, Rao B. Joint beamforming and power control in coordinated multicell: Max-min duality, effective network and large system transition[J]. IEEE Transaction on Wireless Communications, 2013, 12(6): 2730-2742.
- [7] John P, Jamie S E. SCALE: A low-complexity distributed protocol for spectrum balancing in multiuser DSL networks [J]. IEEE Transaction on Information Theory, 2009, 8(55): 3711-3724.
- [8] He S W, Huang Y M, Yang L X. Coordinated beamforming for sum rate maximization in multi-cell downlink systems [J]. Signal Processing, 2014, 105: 22-29.
- [9] 刘璐,王超,许宏吉,等. 多源多中继协作网络上行联合波束成形[J]. 数据采集与处理, 2014, 29(3): 360-365.
Liu Ju, Wang Chao, Xu Hongji, et al. Joint collaborative beamforming for multi-user multi-relay networks[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2014, 29(3): 360-365.
- [10] Miao G W, Himayat N, Li G. Energy-efficient link adaptation in frequency-selective channels[J]. IEEE Transaction on Communications, 2010, 58(2): 545-554.
- [11] He S W, Huang Y M, Jin S, et al. Max-min energy efficient beamforming for multicell multiuser joint transmission systems [J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(10): 1956-1959.
- [12] Xu J, Qiu L. Energy efficiency optimization for MIMO broadcast channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(2): 690-701.
- [13] He S W, Huang Y M, Jin S, et al. Coordinated beamforming for energy efficient transmission in multicell multiuser systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(12): 4961-4971.
- [14] He S W, Huang Y M, Wang H M, et al. Leakage-aware energy efficient beamforming for heterogeneous multicell multiuser systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(6): 1268-1281.
- [15] Dinkelbach W. On nonlinear fractional programming[J]. Bulletin of the Australian Mathematical Society, 1967, 13: 492-498.
- [16] Cruzeix J, Ferland J. Algorithms for generalized fractional programming[J]. Mathematical Programming, 1991, 52: 191-207.
- [17] Lobo M S, Vandenberghe L, Boyd S, et al. Applications of second-order cone programming[J]. Linear Algebra Applicat,

1998, 284: 193-228.

- [18] Wiesel A, Eldar Y C, Shamaï S. Linear precoding via conic optimization for fixed MIMO receivers[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2006, 54(1): 161-176.
- [19] Stanczak S, Wiczanowski N, Boche H. *Fundamentals of resource allocation in wireless networks: Theory and algorithms* [M]. New York: Springer Publishing Company, 2009.
- [20] Bibby J. Axiomatisations of the average and a further generalisation of monotonic sequences[J]. *Glasgow Mathematical Journal*, 1974, 15: 63-65.
- [21] 3GPP TR 36.931 Release 11. Radio frequency (RF) requirements for LTE pico node B[R]. 3GPP, TechRep, 2012.
- [22] He S W, Huang Y M, Yang L X, et al. Coordinated multicell multiuser precoding for maximizing weighted sum energy efficiency[J]. *IEEE Transaction on Signal Processing*, 2014, 62(3): 741-751.

作者简介:



张敏(1974-),女,副教授,研究方向:多用户通信、协作通信、绿色通信和大规模多输入多输出通信, E-mail: cszhangmin00@163.com。



何世文(1978-),男,博士,博士后,研究方向:协作通信、绿色通信、大规模多输入多输出通信以及毫米波通信无线局域网通信和优化理论。



陆莹(1991-),女,硕士研究生,研究方向:多用户通信、协作通信、绿色通信和大规模多输入多输出通信。



李元稳(1988-),女,硕士研究生,研究方向:毫米波频段无线局域网技术。



黄永明(1977-),男,博士,教授,研究方向:通信信号处理、多用户通信信号处理、协作通信、绿色通信、大规模多输入多输出通信和无线局域网通信技术。



杨绿溪(1964-),男,教授,博士生导师,研究方向:移动通信、协作通信、绿色通信、大规模多输入多输出通信、网络编码和无线局域网通信技术。

