

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2015.01.013

引用格式:李校林,周冰,卢清.使用对偶分解的 MU-CoMP-JT 联合资源分配[J].电讯技术,2015,55(1):73-79. [LI Xiaolin,ZHOU Bing,LU Qing. Joint Resource Allocation Using Dual Decomposition for MU-CoMP-JT[J]. Telecommunication Engineering,2015,55(1):73-79.]

## 使用对偶分解的 MU-CoMP-JT 联合资源分配\*

李校林<sup>1,2</sup>, 周冰<sup>1,\*\*</sup>, 卢清<sup>1</sup>

(1. 重庆邮电大学 通信新技术应用中心,重庆 400065;2. 重庆信科设计有限公司,重庆 400065)

**摘要:**在 MU-CoMP-JT(Multi-User Coordinated Multiple-Points Joint Transmission)联合资源分配问题中,传统的迫零预编码矩阵会使得每根天线发送功率互不相同,当 CoMP 节点发射功率仅满足总功率约束时性能损失不明显,而当 CoMP 节点分布在不同的地理位置时将受到单节点功率约束,这势必会降低系统功率利用率。为了进一步提升系统吞吐量,基于对偶分解理论提出了一种联合预编码优化的资源分配算法。该算法以最大化用户权重速率为目标,将原优化问题分解成若干个优化的子问题,不同子问题对应不同接收天线数的联合优化问题。当子信道的发送天线数大于接收天线数时,通过多次迭代计算得到预编码矩阵,并且预编码矩阵会随着拉格朗日因子的变化而变化。仿真结果表明所提联合预编码优化的联合资源分配算法能够明显提升系统吞吐量,且提高天线功率利用效率。

**关键词:**正交频分多址系统;协作多点;对偶分解;资源分配;单节点功率约束

**中图分类号:**TN929.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2015)01-0073-07

## Joint Resource Allocation Using Dual Decomposition for MU-CoMP-JT

LI Xiaolin<sup>1,2</sup>, ZHOU Bing<sup>1</sup>, LU Qing<sup>1</sup>

(1. Institute of Application of Advanced Telecommunication Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China; 2. Chongqing Information Technology Designing Co., Ltd., Chongqing 400065, China)

**Abstract:** In the joint resource allocation problem of multi-user coordinated multiple-points joint transmission (MU-CoMP-JT), the traditional zero-forcing precoding matrix makes the transmitting power of each antenna different, the loss of performance is not obvious when the transmitting power of the CoMP node only meets the total power constraint, but it will be influenced by single node power constraint when the CoMP node distributes in different geographical position, which is bound to reduce the power utilization of the system. In order to further improve the system throughput, a joint precoding optimized resource allocation algorithm is proposed based on dual decomposition theory. The algorithm is aimed at maximum user weight rate and decomposes the original optimization problem into multiple optimization sub-problems, different sub-problems correspond to the joint optimization problem of the different number of receiving antennas. When the number of transmit antennas is greater than that of receiving antennas, the precoding matrix can be obtained by several times of iterative computation and it will change with Lagrange factor. The simulation results show that the proposed combined precoding optimization algorithm can improve the system throughput significantly and utilization efficiency of antenna power.

**Key words:** OFDMA system; coordinated multiple-point; dual decomposition; resource allocation; per-node power constraint

\* 收稿日期:2014-07-03;修回日期:2014-09-12 Received date:2014-07-03;Revised date:2014-09-12

基金项目:重庆市自然科学基金资助项目(cstc2012jjA40054)

Foundation Item: Chongqing Natural Science Foundation Project(cstc2012jjA40054)

\*\* 通讯作者:454148593@qq.com Corresponding author:454148593@qq.com

## 1 引言

协作多点 (Coordinated Multiple-Points, CoMP) 技术作为 LTE-A 关键技术之一, 主要用来扩大高速覆盖区域以及提高边缘用户的频谱效率。CoMP 技术又分为协作调度/波束成形 (Coordinated Scheduling/Beamforming, CS/CB) 和联合处理 (Joint Processing, JP)。根据数据信息是否同时由多个传输节点传输, JP 又分为联合传输 (Joint Transmission, JT) 技术和动态小区选择 (Dynamic Cell Selection, DCS) 技术, 其中 JT 技术因其理论上性能增益最好而受到广泛关注, 具有重要的研究意义, 成为学术界和产业界的研究热点<sup>[1]</sup>。

CoMP-JT 技术通过基站间的协同发射将干扰变为有用信号, 能有效地消除小区间干扰, 但多个基站的协同传输改变了网络结构, 使得 CoMP-JT 的资源分配变得更加复杂<sup>[2]</sup>。以最大化用户权重速率为目标, 文献[3]提出了一种基于 SU-CoMP-JT 的多小区迭代注水功率分配算法, 文献[4]提出了两种基于对角化块编码的注水分配算法, 文献[5]提出的多小区合作的 MU-MIMO (Multi-User Multiple Input Multiple Output) 方案对预编码和功率分配进行了联合优化, 文献[6]以最大化用户权重速率为目标推导出了对角化预编码和功率分配的联合优化算法, 但这些算法是在给定每个子信道的调度用户集合下进行的, 降低了系统的多用户分集增益。为了确定每个子信道的调度用户集合, 文献[7]提出了基于 SU-CoMP-JT 系统的联合用户选择和边界功率控制的资源分配算法, 但考虑的是单载波系统, 并不适用于多载波的正交频分多址 (Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA) 系统, 此时 CoMP-JT 资源分配需要穷尽搜索每个子信道上可能的用户调度集合, 然后利用凸优化方法为每个子信道上的调度用户分配最佳功率。因此, 搜索最优解需要极高的复杂度, 这使得算法难以适用于多载波 CoMP-JT 系统。文献[8]提出的多小区联合预编码和功率控制算法考虑等用户功率分配或等资源块 (Resource Block, RB) 功率分配, 这使得优化问题变成了凸优化问题但一定程度上牺牲了系统性能。以上文献研究目标要么考虑给定每子信道调度用户或者考虑单载波系统, 要么考虑等 RB 或等用户功率分配, 这虽然也能得到最优解但不是全局最优解。文献[9]基于对偶理论将此非凸优化问题分解成多

个独立子信道的优化问题, 然后通过次梯度迭代法更新拉格朗日因子直至收敛, 所求最优解非常接近穷尽最优解, 但每个基站并不总是以全功率发送, 这是因为为了消除协作簇内同频干扰每根天线在每个子信道上发送功率将受到预编码矩阵的影响, 从而导致部分天线不能满功率发送信号。

本文主要研究在 CoMP 系统中 MU-CoMP-JT 的下行资源分配问题, 采用迫零 (Zero-Forcing, ZF) 预编码消除多个小区边缘用户间的同频干扰。在单天线功率约束下以最大化用户权重速率为目标, 在多个协作小区间联合优化每个信道上的调度用户、预编码矩阵以及功率分配。本文参考基于对偶分解的多用户 OFDM 资源分配算法<sup>[10]</sup>, 在 MU-CoMP-JT 系统中将联合优化问题分解成多个独立子问题的优化, 通过次梯度法更新拉格朗日因子直至目标值最优, 其中子问题数量等于发送天线总数。值得注意的是, 当子信道上的波束成形流数或接收天线数 (以下简称 CoMP 模式) 小于发射天线数时, 采用一种预编码迭代计算方法, 该子信道上的发射预编码会随着拉格朗日因子的变化而变化, 当算法收敛时每根天线的功率利用率、系统吞吐量将高于现有算法。

## 2 系统模型与问题描述

### 2.1 系统模型

考虑  $N$  基站协作簇和  $M$  个用户的下行多小区 OFDMA 系统 (本文考虑 3 基站协作)。基站和用户都配备一根天线, 系统带宽为  $B$ , 子信道数为  $K$ , 每个小区均采用全频率复用方案, 同时协作簇中的基站不仅共享数据信息更共享用户的信道状态信息。假设来自协作簇外的干扰能被有效地消除或设为定值, CoMP 用户  $m$  的接收信号可表示为

$$y_m^k = \mathbf{H}_m^k \mathbf{W}^k \mathbf{x}^k + n_m^k \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{H}_m^k = [H_{m1}^k, H_{m2}^k, \dots, H_{mN}^k]$  表示用户  $m$  在子信道  $k$  上的信道矩阵向量;  $\mathbf{W}^k = [\mathbf{W}_1^k, \mathbf{W}_2^k, \dots, \mathbf{W}_{|s(k)|}^k]$  表示  $N$  个基站在子信道  $k$  上的发射预编码矩阵;  $\mathbf{x}^k = [x_1^k, x_2^k, \dots, x_{|s(k)|}^k]^T$  表示  $N$  个基站在子信道  $k$  上的发送符号向量, 令其协方差为  $p_m^k = E(\|\mathbf{x}_m^k\|^2)$ ;  $n_m^k$  是在子信道  $k$  上的加性高斯白噪声与协作簇外干扰之和, 其协方差为  $\delta_m^2$ ;  $|s(k)|$  表示子信道  $k$  上的联合传输用户数。假设  $|s(k)| \leq N$ , 令  $\mathbf{W}^k = [w_{1m}^k, w_{2m}^k, \dots, w_{Nm}^k]^T$ , 在  $N$  个协作基站间使用迫零

技术,预编码向量应满足

$$\mathbf{H}_m^k \mathbf{W}_n^k = \begin{cases} 0, n \neq m \\ 1, n = m \end{cases} \quad m, n \in s(k). \quad (2)$$

式中,  $\mathbf{W}_n^k = [W_{1n}^k, W_{2n}^k, \dots, W_{Nn}^k]^T$ 。进而,式(1)变成  $\gamma_m^k = x_m^k + n_m^k$ 。基站  $n$  在子信道  $k$  上的发送信号功率可表示为

$$P_n^k = \sum_{m \in s(k)} |W_{nm}^k|^2 P_m^k \quad (3)$$

用户  $m$  在子信道  $k$  的瞬时速率可表示为

$$R_m^k = \text{lb}(1 + \rho_m^k / \delta_m^2). \quad (4)$$

## 2.2 问题描述

假设每个基站有最大功率约束  $P_{\max}$ ,因此基站发送功率满足  $\sum_{k=1}^K P_n^k \leq P_{\max}$ 。在任意给定的时隙,  $N$  个基站需要联合决定每个子信道的用户集合  $s(k)$  以及  $s(k)$  中每个用户的功率分配。考虑到每个子信道上只能存在一种天线协作方式,联合资源分配问题可表示为式(5):

$$\max \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \rho_k^n \sum_{m \in s(k,n)} \alpha_m R_{m,n}^k,$$

$$\text{约束 1: } \sum_{n=1}^N \rho_k^n \leq 1, \rho_k^n = \{0, 1\}, \quad (5)$$

$$\text{约束 2: } \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \sum_{m \in s(k,n)} P_{m,n}^{k,i} |W_{i,m}^k|^2 \leq P_{\max}^i, \forall i,$$

$$\text{约束 3: } s(k, n) \subseteq \{1, \dots, M\}, \forall k,$$

$$\text{约束 4: } |s(k, n)| = n, \forall k.$$

如果 CoMP 模式  $n$  (即  $s(k)$  中有  $n$  个用户时) 处于激活状态时,令  $\rho_k^n = 1$ , 否则令  $\rho_k^n = 0$ ;  $R_{m,n}^k$  代表 CoMP 模式  $n$  处于激活状态时子信道  $k$  为用户  $m$  分配的传输速率;  $\alpha_m$  为用户间的公平性系数。

约束 1 保证了每个子载波最多只能分配给一种 CoMP 模式,约束 2 保证了每天线最大可发送功率,约束 3 和 4 保证了每一种 CoMP 模式的可选用户范围和可选用户总数。除此之外,预编码矩阵  $\mathbf{W}_{i,m}^k$  还需要满足式(2)约束,从而避免协作簇内的同频干扰。传统的迫零预编码矩阵如下所示:

$$\mathbf{W}^k = (\mathbf{H}^{kH} \mathbf{H}^k)^{-1} \mathbf{H}^{kH}. \quad (6)$$

值得注意的是,当收发天线不等时,传统 ZF 预编码矩阵会使得每根天线发送功率互不相同,当这些天线的发射功率仅满足总功率约束时性能损失不明显(例如单小区 MIMO),而当这些发射天线分布在不同的地理位置时将受到单天线功率约束(例如多小区 CoMP-JT),因此仅仅使用式(6)所示 ZF 预编码矩阵会降低每天线功率使用效率。因此,问题(5)表述的联合资源分配问题还应考虑预编码矩阵

的优化。

## 3 MU-CoMP 联合资源分配算法

如果每个子信道上调度用户集是预定义的,且满足问题(5)中约束 3 和约束 4,那么问题(5)便成了一个联合功率分配问题。这是一个凸优化问题,因为目标函数是凸函数,且约束 1 和约束 2 是线性约束,因此它能够通过标准的凸优化方法求解。但一般情况下,问题(5)不是一个凸优化问题,因为它需要为每个子信道寻找最优的调度用户集合,而这是一个联合优化问题。令每个子信道上的用户调度集合数  $\Psi = M! / (M-N+1)! (N-1)!$ ,从而需要穷尽搜索  $\Psi^K$  种用户调度集合,这便使得问题(5)的最优资源分配需要对每一种用户调度集合情况进行求解,然后从中选出最优分配方式。因此,随着协作小区簇内小区数、子信道数和用户数的增加,穷尽搜索最优解的复杂度会高得难以接受,甚至难以实现。

文献[9-11]中所研究方案考虑了子信道、功率的联合分配问题,但预编码是通过式(6)独立求解,虽然是在总天线发送功率约束下通过注水功率分配能够获得最优吞吐量性能,但不适合单天线功率约束情况。基于此,本节考虑一个联合预编码、功率和子信道资源分配问题。

基于对偶分解理论,通过对式(5)进行对偶分解推导出了一个联合资源分配算法(JRA)。令  $S$  为所有可能的用户配对集合,考虑每个子信道的用户配对情况相同,即考虑在可行域  $s(k) \in S$  内,问题(5)拉格朗日函数为

$$L(\lambda) = \max_{\rho} \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \rho_k^n \sum_{m \in s(k,n)} \alpha_m R_{m,n}^k + \sum_{k=1}^K \lambda_1^k (1 - \sum_{n=1}^N \rho_k^n) + \sum_{n=1}^N \lambda_2^i (P_{\max} - \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \rho_k^n \sum_{m \in s(k,n)} |W_{i,m}^k|^2 P_{m,n}^k). \quad (7)$$

式中,  $s(k) = \sum_{n \in [1, \dots, N]} \rho_k^n s(k, n)$ 。对偶目标函数可以表示为

$$g(\lambda) = \max L(s, P, \lambda) = \sum_{n=1}^N g_n(\lambda) + \sum_{k=1}^K \lambda_1^k + \sum_{i=1}^N \lambda_2^i P_{\max}^i. \quad (8)$$

式中,子问题  $n$  可表述为

$$g_n(\lambda) = \max \left\{ \sum_{k=1}^K \rho_k^n \left( \sum_{m \in s(k,n)} \alpha_m R_{m,n}^k - \lambda_1^k \right) - \sum_{i=1}^N \lambda_2^i \sum_{k=1}^K \sum_{m \in s(k,n)} |W_{i,m}^k|^2 P_{m,n}^k \right\}. \quad (9)$$

同理,基于对偶理论,对偶目标函数被分解成  $n$  个优化子问题,再将优化子问题分解成  $K$  个子信道的优化问题(简称二级子问题),如式(10)所示:

$$g_{n,k}(\lambda) = \max \left\{ \rho_k^n \left( \sum_{m \in s(k,n)} \alpha_m R_{m,n}^k - \lambda_1^k \right) - \right.$$

$$\sum_{i=1}^{i=N} \lambda_2^i \sum_{m \in s(k,n)} |W_{i,m}^k|^2 P_{m,n}^k \}。 (10)$$

### 3.1 $\rho_k^n$ 计算

首先观察式(10)子问题,可发现其目标函数是变量  $\rho_k^n$  的线性函数,因此最优解中的  $\rho_k^{n*}$  应满足

$$\rho_k^{n*} = \begin{cases} 1, & \text{if } \sum_{m \in s(k,n)} \alpha_m R_{m,n}^{k*} \geq \lambda_1^k \\ 0, & \text{if } \sum_{m \in s(k,n)} \alpha_m R_{m,n}^{k*} < \lambda_1^k \end{cases}。 (11)$$

### 3.2 $P_{m,n}^{k*}$ 计算

当  $\rho_k^n$  和  $s(k,n)$  确定以后,最优的功率分配  $P_{m,n}^{k*}$  可以用一种类似注水算法的形式得到,如下式:

$$P_{m,n}^{k*} = \left[ \frac{\alpha_m}{\ln 2 \sum_{i=1}^{i=N} \lambda_2^i |W_{i,n}^k|^2} - \delta^2 \right]^+, \forall m \in s(k,n)。 (12)$$

### 3.3 $W_m^k$ 计算

将式(12)代入式(10)可知当

$$\sum_{i=1}^{i=N} \sum_{m \in s(k,n)} \lambda_2^i |W_{i,m}^k|^2$$

取最小时,能使子载波  $k$  的目标函数值最大。由此可知式(10)中最佳预编码的求解问题可以表示为

$$\begin{aligned} \min f(W^k) &= \sum_{i=1}^{i=N} \sum_{m \in s(k,n)} \lambda_2^i |W_{i,m}^k|^2 \\ \text{s. t. } \sum_{i=1}^{i=N} H_{j,i}^k W_{i,m}^k &= \begin{cases} 0, & j \neq m \\ 1, & j = m \end{cases} \quad j, m \in s(k,n)。 \end{aligned} (13)$$

一般而言,当发送天线数  $N$  和接收天线数  $|s(k,n)|$  相等时满足式(13)中约束的预编码矩阵唯一,而当发送天线数  $N$  和接收天线数  $|s(k,n)|$  不相等时,满足式(13)中约束的预编码矩阵理论上会有无穷多个。因此,对于  $N = |s(k,n)|$  情况,问题(13)不需要求解,从而仅仅需要考虑  $N \neq |s(k,n)|$  情况。

令  $W_{i,m}^k = a_{i,m}^k + b_{i,m}^k i, H_{m,i}^k = x_{m,i}^k + y_{m,i}^k i$ , 其中  $a_{i,m}^k, x_{m,i}^k$  和  $b_{i,m}^k, y_{m,i}^k$  分别为  $W_{i,m}^k, H_{m,i}^k$  的实部和虚部。对问题(13)中约束条件整理得

$$\begin{aligned} eH_{m,j}^k &= \sum_{c=1}^{c=N} x_{m,c}^k a_{c,j}^k + (x_{m,c}^k b_{c,j}^k + a_{c,j}^k y_{m,c}^k) i - y_{m,c}^k b_{c,j}^k = \\ &\begin{cases} 1, & \text{if } m=j \\ 0, & \text{if } m \neq j \end{cases} \end{aligned} (14)$$

观察式(14)可发现仅当  $m=j$  时,  $\text{real}(eH_{j,m}^k) = 1, \text{imag}(eH_{j,m}^k) = 0$ , 整理可得

$$\begin{aligned} \text{real}(eH_{j,m}^k) &= \sum_{c=1}^{c=N} (x_{j,c}^k a_{m,c}^k - y_{j,c}^k b_{m,c}^k) = \begin{cases} 1, & \text{if } m=j \\ 0, & \text{if } m \neq j \end{cases} \\ \text{imag}(eH_{j,m}^k) &= \sum_{c=1}^{c=N} (x_{j,c}^k b_{m,c}^k + y_{j,c}^k a_{m,c}^k) = 0, \forall m, j \in s(k,n)。 \end{aligned} (15)$$

从方程式求解角度可知,方程式(15)有  $2N$  个

变量、 $2|s(k,n)|$  个方程,当  $N = |s(k,n)|$  时,有唯一解;当  $N > |s(k,n)|$  时显然无解,而这也是 MIMO 中最大赋形流数不大于发射天线总数根源所在;当  $N < |s(k,n)|$  时,理论上式(15)有无穷解,利用线性代数相关知识,可轻松求出该无穷解的标准形式(特解+通解),无穷解中有  $v = 2(N - |s(k,n)|)$  个基变量,其余变量是多个基变量复合表达式。因此不妨设  $a_{1,m}^k, a_{2,m}^k, \dots, a_{v,m}^k$  和  $b_{1,m}^k, b_{2,m}^k, \dots, b_{v,m}^k$  为基变量,令其余变量

$$\begin{aligned} a_{u,m}^k &= \sum_{i=1}^{i=v/2} \bar{x}_{u,m,i}^k a_{i,m}^k + \sum_{i=1}^{i=v/2} \bar{y}_{u,m,i}^k b_{i,m}^k + \bar{z}_{u,m}^k, \\ b_{u,m}^k &= \sum_{i=1}^{i=v/2} \hat{x}_{u,m,i}^k a_{i,m}^k + \sum_{i=1}^{i=v/2} \hat{y}_{u,m,i}^k b_{i,m}^k + \hat{z}_{u,m}^k。 \end{aligned} (16)$$

式中,  $\bar{x}_{u,m,i}^k, \bar{y}_{u,m,i}^k, \hat{x}_{u,m,i}^k, \hat{y}_{u,m,i}^k$  是相关系数项,  $\bar{z}_{u,m}^k$  和  $\hat{z}_{u,m}^k$  是无关系数项,  $v/2 < u \leq N$ 。  $f(W^k)$  对  $a_{i,m}^k$  求一阶导得

$$\begin{aligned} \frac{\partial f(W^k)}{\partial a_{i,m}^k} &= \partial \sum_{u=1}^{u=N} \sum_{m \in s(k,n)} \lambda_2^u (a_{u,m}^k{}^2 + b_{u,m}^k{}^2) / \partial a_{i,m}^k = \\ &\sum_{u=1}^{u=N} 2\lambda_2^u (a_{u,m}^k \frac{\partial a_{u,m}^k}{\partial a_{i,m}^k} + b_{u,m}^k \frac{\partial b_{u,m}^k}{\partial a_{i,m}^k}) = \\ &\sum_{u=1}^{u=N} 2\lambda_2^u (a_{u,m}^k \bar{x}_{u,m,i}^k + b_{u,m}^k \hat{x}_{u,m,i}^k)。 \end{aligned} (17)$$

$f(W^k)$  对  $a_{i,m}^k$  求二阶导得

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 f(W^k)}{\partial^2 a_{i,m}^k} &= \sum_{u=1}^{u=N} 2\lambda_2^u \left( \frac{\partial a_{u,m}^k}{\partial a_{i,m}^k} \bar{x}_{u,m,i}^k + \frac{\partial b_{u,m}^k}{\partial a_{i,m}^k} \hat{x}_{u,m,i}^k \right) = \\ &\sum_{u=1}^{u=N} 2\lambda_2^u (\bar{x}_{u,m,i}^k{}^2 + \hat{x}_{u,m,i}^k{}^2) > 0。 \end{aligned} (18)$$

$f(W^k)$  对  $b_{i,m}^k$  求一阶导得

$$\begin{aligned} \frac{\partial f(W^k)}{\partial b_{i,m}^k} &= \partial \sum_{u=1}^{u=N} \sum_{m \in s(k,n)} \lambda_2^u (a_{u,m}^k{}^2 + b_{u,m}^k{}^2) / \partial b_{i,m}^k = \\ &\sum_{u=1}^{u=N} 2\lambda_2^u (a_{u,m}^k \frac{\partial a_{u,m}^k}{\partial b_{i,m}^k} + b_{u,m}^k \frac{\partial b_{u,m}^k}{\partial b_{i,m}^k}) = \\ &\sum_{u=1}^{u=N} 2\lambda_2^u (a_{u,m}^k \bar{y}_{u,m,i}^k + b_{u,m}^k \hat{y}_{u,m,i}^k)。 \end{aligned} (19)$$

$f(W^k)$  对  $b_{i,m}^k$  求二阶导得

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 f(W^k)}{\partial^2 b_{i,m}^k} &= \sum_{u=1}^{u=N} 2\lambda_2^u \left( \frac{\partial a_{u,m}^k}{\partial b_{i,m}^k} \bar{y}_{u,m,i}^k + \frac{\partial b_{u,m}^k}{\partial b_{i,m}^k} \hat{y}_{u,m,i}^k \right) = \\ &\sum_{u=1}^{u=N} 2\lambda_2^u (\bar{y}_{u,m,i}^k{}^2 + \hat{y}_{u,m,i}^k{}^2) > 0。 \end{aligned} (20)$$

由式(18)、(20)可得,  $f(W^k)$  是开口向上的凸函数。显然这是一个凸优化问题,因此当一阶导为零时取最优,即最优解中  $a_{i,m}^k$  和  $b_{i,m}^k$  应满足下式:

$$\begin{aligned} \partial f(W^k) / \partial a_{i,m}^k &= 0, \forall m \in s(k,n), \\ \partial f(W^k) / \partial b_{i,m}^k &= 0, \forall m \in s(k,n)。 \end{aligned} (21)$$

显然,式(21)是  $v$  元一次线性方程,  $a_{i,m}^k$  和  $b_{i,m}^k$  可轻易求得。其中,  $v = 2(N - |s(k,n)|), 1 \leq i \leq v/2$ 。

然后将  $a_{i,m}^k$  和  $b_{i,m}^k$  代入公式 (16) 求解其余变量,再将所求预编码矩阵代入式 (12) 求解  $P_m^k$ ,最后代入公式 (11) 求解  $\rho_k^n$ 。

### 3.4 最终分配结果计算

当任意用户配对组合  $s(k,n) \in \mathcal{S}$  下的  $\rho_k^{n*}$ 、 $P_m^{k*}$  和  $W_{i,m}^{k*}$  确定之后,子问题  $n$  的最优  $s(k,n)^*$  应满足

$$s(k,n)^* = \arg \max_{s' \in s(k,n)} \rho_k^{n*} \left( \sum_{m \in s'} \alpha_m R_{m,n}^{k*} - \lambda_1^k \right) - \sum_{i=1}^N \lambda_2^i \sum_{m \in s'} |W_{i,m}^{k*}|^2 P_{m,n}^{k*} \quad (22)$$

最后更新拉格朗日系数  $\lambda_1^k$  和  $\lambda_2^i$ 。由于每一个子载波只能有一个非零的  $\rho_k^n$  或者成每一个子载波只能分配给一个子问题,所以式 (9) 相当于将子载波  $k$  分配给该子载波上具有最优速率的子问题,即

$$n^* = \arg \max_n g_n(\lambda) \quad (23)$$

对于变量  $\lambda_1^k$ ,令其介于子载波  $k$  上最优和次优之间任意值。对于变量  $\lambda_2^i$ ,可通过次梯度算法迭代求得,如下:

$$\lambda_2^i(l+1) = [\lambda_2^i(l) - \beta(l) (P_{\max}^i - \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \sum_{m \in s(k,n)^*} |W_{i,m}^{k*}|^2 P_{m,n}^{k*})]^+ \quad (24)$$

为求得问题的最优解,需要通过迭代搜索  $\lambda_1^k$ 、 $\lambda_2^i$  直至收敛,其具体流程如图 1 所示。

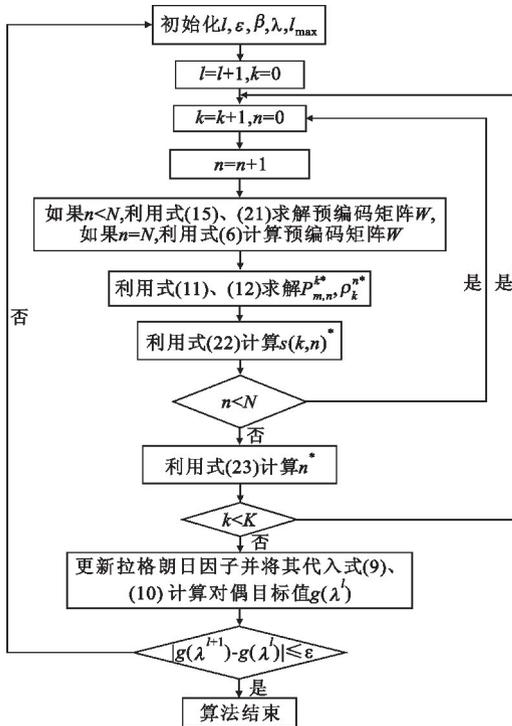


图 1 基于对偶分解的 MU-CoMP-JT 联合资源分配算法  
Fig. 1 Joint resource allocation algorithm based on dual decomposition for MU-CoMP-JT

## 4 仿真结果及分析

本文考虑 3 小区协同传输的下行 OFDMA 蜂窝小区系统,每个子信道带宽为 180 kHz,小区半径为 500 m。路损模型是  $PL(d) = 128.1 + 37.6 \lg(d)$ ,单位为 dB。阴影衰落服从 log-norm(对数正态分布),均值为零,方差为 8。每个子信道的快衰落单独服从瑞利分布。高斯白噪声功率谱密度为 -174 dBm/Hz。令  $\gamma$  表示边缘用户 SNR 门限,用户随机分布在小区边缘区域,每个用户速率权重  $\alpha_m$  为 1。设联合资源分配算法在前后两次迭代的对偶目标值的差  $|g(\lambda^{l+1}) - g(\lambda^l)| \leq 10^{-4}$  或迭代次数  $l = 300$  时停止。仿真中  $3 \times 2$  天线协作模式时每个子信道上 有 2 个调度用户,而  $3 \times 3$  天线协作时每个子信道上 有 3 个调度用户。

图 2 和图 3 显示了多 CoMP 模式的联合预编码优化的资源分配算法(简称 MC-JPRA)的收敛性,对比了在不同边缘用户数和不同子信道数时的对偶目标值。对于单 CoMP 模式联合资源分配算法(简称 SC-JPRA)是 MC-JPRA 的特殊情况,因此本文可以通过观察 MC-JPRA 的收敛性获知 SC-JPRA 算法的收敛性。拉格朗日对偶变量  $\lambda = [1.5, 1.5, 1.5]$ ,迭代步长  $\beta = [0.05, 0.05, 0.05]$ 。为了验证联合资源分配算法所求解是否足够最优,图 2 和图 3 也显示了通过穷尽搜索每个子信道上不同用户配对时的穷尽最优解,可以看出所提 MC-JPRA 的对偶目标值呈现单调递减的趋势直到逼近穷尽最优解。对偶间隔随着边缘用户数和子信道数的增加而增加,这是因为计算复杂度会随着边缘用户数和子信道数的增加而增加从而使得对偶间隔增大。

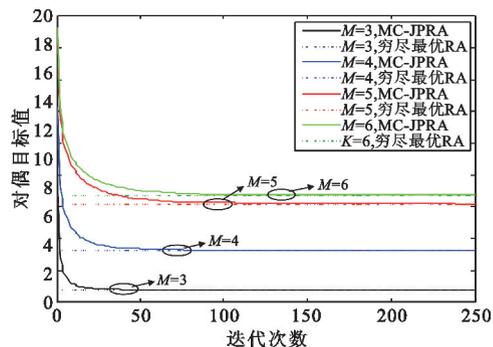


图 2 MC-JPRA 算法对偶目标值与迭代次数  
Fig. 2 The dual target versus number of iterations of MC-JPRA

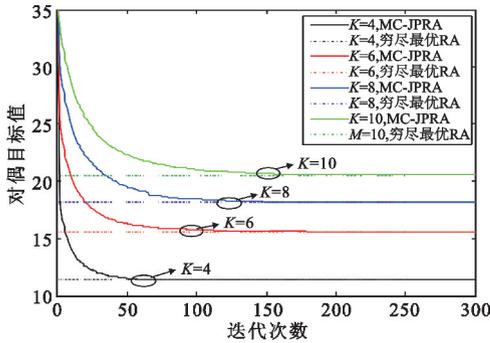


图3 MC-JPRA 算法对偶目标值与迭代次数

Fig.3 The dual target versus number of iterations of MC-JPRA

图4和图5比较了单CoMP模式(SC)和多CoMP模式(MC)在未考虑预编码优化(JRA)和考虑预编码优化(JPRA)的联合资源分配算法性能。与未考虑预编码优化时相比,不论是在单模CoMP方式(SC-JPRA)还是多模CoMP方式(MC-JPRA),本文所提算法通过联合优化预编码都带来了较大的频谱利用率提升和功率利用率的提升,尤其是当边缘用户SNR门限值低时,频谱利用率提升更明显,且随着边缘用户SNR门限的提升系统吞吐量提升比例逐渐降低。

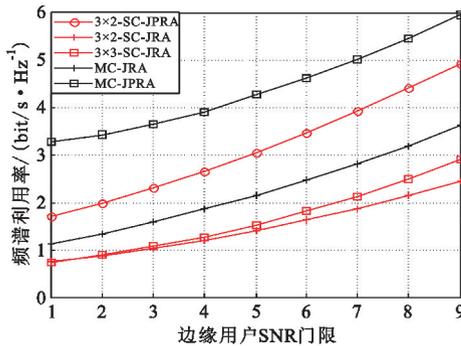


图4 不同模式下JRA和JPRA算法的频谱利用率与SNR变化关系

Fig.4 Spectrum utilization versus SNR between JRA and JPRA

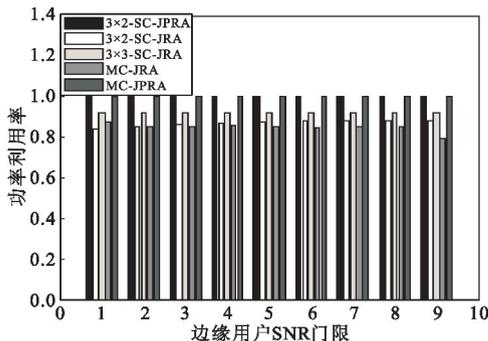


图5 不同模式下JRA和JPRA算法的功率利用率与SNR变化关系

Fig.5 Power utilization versus SNR between JRA and JPRA

图6和图7比较了多CoMP模式在未考虑预编码优化(MC-JRA)和考虑预编码优化(MC-JPRA)的联合资源分配算法性能。与MC-JRA相比,图6结果表明所提算法能较大地提升系统吞吐量,且性能增益随着子信道数的增加而增加,但频谱利用率提升速率逐渐降低,这是由于每个子信道的功率降低了。与MC-JRA相比,图7显示了所提算法能较大地提高频谱利用率,且性能增益随着边缘用户数的增加而增加,这是因为多用户分集增益随着边缘用户数的增加而增加。

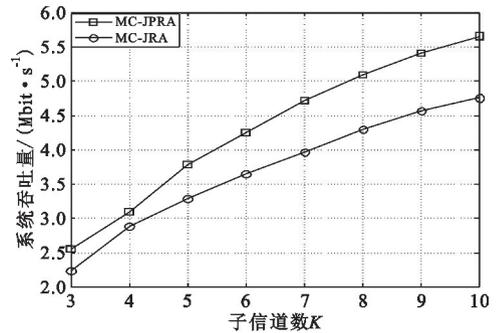


图6 MC-JRA与MC-JPRA算法的吞吐量与子信道数的变化关系

Fig.6 The throughput versus number of sub-channels between MC-JRA and MC-JPRA

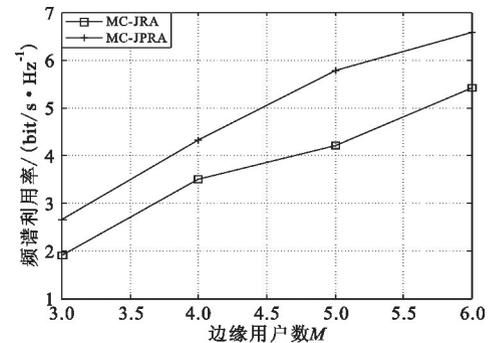


图7 MC-JRA与MC-JPRA算法的频谱利用率与边缘用户数的变化关系

Fig.7 Spectrum utilization versus edge users between MC-JRA and MC-JPRA

### 5 结束语

本文提出了一种在多小区OFDMA系统中的MU-CoMP-JT联合资源分配算法。采用了一种预编码迭代计算方法,基于对偶理论将复杂的原问题转化为若干个子问题,研究了在多个协作小区和多个子信道间联合优化波束成形流数、用户调度、预编

码以及功率分配。仿真结果表明所提算法能够逼近穷尽最优解。与未考虑预编码优化的联合资源分配算法相比,通过联合优化预编码克服了功率利用率不足的优点,进一步提升了系统吞吐量,有效提高了系统性能,但是算法需要更高的复杂度,因此下一步的工作是研究更低复杂度的联合资源分配算法。

### 参考文献:

- [1] 3GPP TR 36.814-900, 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Further Advancements for E-UTRA Physical Layer Aspects (Release 9) [S].
- [2] 卢宪祺,周文安,朱超平. 一种基于 CoMP 的随机接入方案[J]. 电讯技术, 2012, 52(5): 619-623.  
LU Xianqi, ZHOU Wenan, ZHU Chaoping. A Random Access Scheme Based on CoMP[J]. Telecommunication Engineering, 2012, 52(5): 619-623. (in Chinese)
- [3] Zhang R. Cooperative multi-cell block diagonalization with per-base-station power constraints[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2010, 28(9): 1435-1445.
- [4] Armada A G, Sánchez-Fernández M, Corvaja R. Constrained power allocation schemes for coordinated base station transmission using block diagonalization [J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2011(1): 1-14.
- [5] Tolli A, Codreanu M, Juntti M. Cooperative MIMO-OFDM cellular system with soft handover between distributed base station antennas[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(4): 1428-1440.
- [6] Luo B, Cui Q, Tao X. Constant-Power Joint-Waterfilling for Coordinated Transmission [C]//Proceedings of 2011 IEEE Global Telecommunications Conference. Houston, TX, USA; IEEE, 2011: 1-6.
- [7] Li J, Svensson T, Botella C, et al. Joint scheduling and power control in coordinated multi-point clusters [C]//Proceedings of 2011 IEEE Vehicular Technology Conference. San Francisco, CA; IEEE, 2011: 1-5.

- [8] Lakshmana T R, Botella C, Svensson T. Partial joint processing for frequency selective channels [C] // Proceedings of 2010 IEEE 72nd Vehicular Technology Conference Fall. Ottawa, ON; IEEE, 2010: 1-5.
- [9] Li J, Chen X, Botella C, et al. Resource allocation for OFDMA systems with multi-cell joint transmission [C] // Proceedings of 2012 IEEE 13th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications. Cesme; IEEE, 2012: 179-183.
- [10] 金慈航. OFDM 系统中基于对偶分解理论的资源分配算法 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2008.  
JIN Cihang. Resource Allocation Algorithms based on Dual decomposition in OFDM systems [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2008. (in Chinese)
- [11] Yu W, Lui R, Cendrillon R. Dual optimization methods for multiuser orthogonal frequency division multiplex systems [C] // Proceedings of 2004 IEEE Global Telecommunications Conference. Dallas, TX, USA; IEEE, 2004: 225-229.

### 作者简介:



李校林(1968—),男,江西赣州人,1998年获硕士学位,现为正高级工程师、硕士生导师,主要研究方向为第三代移动通信、通信新技术、网络优化;

LI Xiaolin was born in Ganzhou, Jiangxi Province, in 1968. He received the M. S. degree in 1998. He is now senior engineer of professor

and also the instructor of graduate students. His research concerns 3G, new communication technology and network optimization.

周冰(1990—),男,江西九江人,2012年获学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向为 LTE-A CoMP 技术;

ZHOU Bing was born in Jiujiang, Jiangxi Province, in 1990. He received the B. S. degree in 2012. He is now a graduate student. His research direction is LTE-A CoMP.

Email: 454148593@qq.com

卢清(1988—),男,江西抚州人,硕士研究生,主要研究方向为 LTE-A 关键技术。

LU Qing was born in Fuzhou, Jiangxi Province, in 1988. He is now a graduate student. His research direction is LTE-A key technology.