

一种分布式多点协同波束成形和用户调度算法

何世文* 黄永明 杨绿溪

(东南大学教育部水声信号处理重点实验室 南京 210096)

(东南大学信息科学与工程学院 南京 210096)

摘要: 为了高效实现多点协同下行链路的协同传输, 该文基于最大化最小信干噪比准则提出了一种单层迭代分布式协同波束成形算法, 并且证明了该算法的全局收敛性; 利用该算法中优化波束的特征, 进而提出了一种分布式协同用户调度算法。仿真结果表明, 所提分布式协同波束成形和用户调度算法可获得明显优于已有算法的最小信干噪比性能, 且只需要很少量的基站间信息交互。

关键词: 信号处理; 多点协同; 波束成形; 最大化最小信干噪比; 用户调度

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)05-1131-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00925

A Distributed Coordinated Multiple Point Beamforming and User Scheduling Algorithm

He Shi-wen Huang Yong-ming Yang Lu-xi

(Key Laboratory of Underwater Acoustic Signal Processing of Ministry of Education,

Southeast University, Nanjing 210096, China)

(School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In order to achieve efficient coordination multiple point downlink transmission, a single iteration of distributed collaborative beamforming algorithm is proposed based on the merit of maximizing the minimum SINR, and the global convergence of the proposed algorithm is proven. Furthermore, a distributed coordinated user scheduling algorithm is developed by using characteristics of optimum beam in the proposed algorithm. Simulation results show that the proposed distributed coordinated beamforming and user scheduling algorithm is superior to existing algorithms in term of the minimum user SINR performance, and only a small amount of information exchange between base stations.

Key words: Signal processing; Coordinated multiple point; Beamforming; Max-Min SINR; User scheduling

1 引言

众所周之, 在无线网络中, 干扰已成为抑制通信系统性能的主要因素之一, 如何抑制干扰也得到了广泛研究与探讨。比如, 人们公认的下一代无线通信技术中的正交频分多址技术可以很好地消除小区内用户间的干扰, 但这种技术不能很好地抑制小区间的干扰, 尤其是在相邻小区采用相同频带时, 这样, 小区间的干扰将严重影响通信系统性能。因此, 如何抑制小区间干扰成为提升通信系统性能的主要问题之一, 最近, 作为一种有效抑制小区间干

扰的多点协同技术得到了广泛研究^[1]。

多点协同波束成形和功率分配、用户调度算法设计的难点之一是协同基站之间需要交换大量信息。为了减少信息量的交换, 很多文献研究了不需要共享数据信息或部分信道信息的分布式多点协同波束成形和功率分配、用户调度算法。文献[2]研究表明协同基站之间只需要交换有限信息就足以实现多点协同的最优性能。文献[3]以基站和用户均为单天线的系统模型为研究对象、加权和速率最大化为优化目标函数研究了分布式多点协同用户调度和离散功率分配算法, 多点协同算法的每次迭代过程中基站间需要交换 3 个变量的实值变量信息。文献[4]研究了一种以加权效用函数为优化目标函数的半分布式多点协同二元功率控制多模复用算法, 首先要求各协同基站分别调度用户, 然后将调度用户信息

2011-09-16 收到, 2011-11-14 改回

国家自然科学基金(60902012, 61071113), 国家科技重大专项(2011ZX03003-001-02, 2011ZX03003-003-03), 教育部博士点新教师基金(20090092120013, 20100092110010)和江苏省自然科学基金(BK2011598, BK2011019)资助课题

*通信作者: 何世文 hesw01@seu.edu.cn

反馈到中央处理单元, 中央处理单元执行协同波束成形。文献[5]研究了一种基于梯度算法的最大化加权速率的分布式多点协同波束成形算法, 但是所提算法只是针对高信噪比而言。

多点协同波束成形和功率分配算法的难点之一是多点协同波束矢量或功率相互耦合, 这给多点协同上/下行链路优化问题的求解带来了一定的困难。利用多用户多输入多输出通信系统的上/下链路的对偶理论可以大大地减少多点协作波束成形和功率分配算法设计的难度。文献[6]提出不仅可以求解满足给定 SINR 约束条件的最小化发射功率优化问题, 而且也可以求解满足给定总功率约束条件下的最大化最小 SINR 优化问题的迭代算法, 而且, 文献[7]利用凸优化理论提出了定点算法求解前面两种优化问题。文献[8]通过拉格朗日原理把上/下链路的对偶理论扩展到满足每天线功率约束条件和 SINR 约束条件的下行链路的发射功率优化问题。文献[9]研究了多点协同下行链路的最大化和速率优化目标函数的上/下行链路对偶关系, 但是他们没有研究如何求解多点协同优化问题。文献[10]利用上/下行链路的对偶关系设计了一种以最大化最差用户速率为优化目标, 协同基站只需要交换数据信息的总功率约束条件下的两层迭代分布式多点协同波束成形设计算法。

本文基于总功率约束条件下的多点协同上/下行链路最大化最小 SINR 优化问题间的对偶关系, 提出了一种协同基站只需交换少量信息的 Max-Min SINR 优化问题的单层迭代分布式多点协同波束成形和功率分配算法; 提出了一种协同基站只需交换少量信息的分布式协同用户调度算法。

2 系统模型

考虑 K 小区组成的多点协同下行链路系统, 每个小区由位于小区中心的基站 i 和 U_i 个随机、均匀分布在小区内的用户组成, 协同基站间通过回程链路互相连接, 每个基站只服务一个用户, 而且只向自己服务的用户发送数据, 即不考虑联合发送的情况。假设每个基站均有 M 根发射天线, 每个用户只有一根天线, 每个基站可以获得基站到所有用户的信道系数信息。假设小区 i 的调度用户为 u_i , 这样小区 i 调度用户 u_i 的接收信号表示为

$$y_{u_i} = \sqrt{p_i} \mathbf{h}_{u_i,i}^H \mathbf{w}_{u_i} x_{u_i} + \sum_{k=1, k \neq i}^K \sqrt{p_k} \mathbf{h}_{u_i,k}^H \mathbf{w}_{u_k} x_{u_k} + n_{u_i} \quad (1)$$

其中 y_{u_i} 表示调度用户 u_i 的接收信息; p_i 表示基站 i

的发射功率; $\mathbf{h}_{u_i,j}$ 表示基站 j 到基站 i 的调度用户 u_i 的准静态平衰落信道系数, 包含大尺度衰落、小尺度衰落和路径损失, 将其表示为 $\mathbf{h}_{u_i,j} \triangleq \gamma_{u_i,j} \tilde{\mathbf{h}}_{u_i,j}$, $\tilde{\mathbf{h}}_{u_i,j}$ 代表小尺度衰落信道系数; n_{u_i} 表示均值为 0、方差为 $\sigma_{u_i}^2$ 的复数加性高斯白噪声, 即 $n_{u_i} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_{u_i}^2)$; \mathbf{w}_{u_i} 为基站 i 的单位范数波束矢量。这样, 调度用户 u_i 的 SINR 为

$$\begin{aligned} \text{SINR}_{u_i} &= \frac{p_i \mathbf{w}_{u_i}^H \mathbf{h}_{u_i,i} \mathbf{h}_{u_i,i}^H \mathbf{w}_{u_i}}{\sum_{k=1, k \neq i}^K p_k \mathbf{w}_{u_k}^H \mathbf{h}_{u_i,k} \mathbf{h}_{u_i,k}^H \mathbf{w}_{u_k} + \sigma_{u_i}^2} \\ &= \frac{p_i \mathbf{w}_{u_i}^H \boldsymbol{\Omega}_{u_i,i} \mathbf{w}_{u_i}}{\sum_{k=1, k \neq i}^K p_k \mathbf{w}_{u_k}^H \boldsymbol{\Omega}_{u_i,k} \mathbf{w}_{u_k} + 1} \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $\boldsymbol{\Omega}_{u_i,j} \triangleq \frac{\mathbf{h}_{u_i,j} \mathbf{h}_{u_i,j}^H}{\sigma_{u_i}^2}, \forall i, j$ 。此时, 调度用户 u_i 的瞬时速率表示为

$$R_{u_i} = \log_2(1 + \text{SINR}_{u_i}) \quad (3)$$

基站在给自己的服务用户发射信号的时候, 同时也对其他基站的服务用户产生干扰信号, 定义调度用户 u_i 的 SLNR(有用信号功率与泄漏信号功率加噪声功率的比值称为信漏噪比)为

$$\begin{aligned} \text{SLNR}_{u_i} &= \frac{p_i \mathbf{w}_{u_i}^H \mathbf{h}_{u_i,i} \mathbf{h}_{u_i,i}^H \mathbf{w}_{u_i}}{\sum_{j=1, j \neq i}^K p_j \mathbf{w}_{u_j}^H \mathbf{h}_{u_i,j} \mathbf{h}_{u_i,j}^H \mathbf{w}_{u_j} + \sigma_{u_i}^2} \\ &= \frac{p_i \mathbf{w}_{u_i}^H \boldsymbol{\Omega}_{u_i,i} \mathbf{w}_{u_i}}{\sum_{j=1, j \neq i}^K p_j \mathbf{w}_{u_j}^H \boldsymbol{\Omega}_{u_i,j} \mathbf{w}_{u_j} + 1} \end{aligned} \quad (4)$$

从广义特征值理论, 我们可以很容易地知道:

$$\begin{aligned} \text{SLNR}_{u_i} &= \frac{p_i \mathbf{w}_{u_i}^H \boldsymbol{\Omega}_{u_i,i} \mathbf{w}_{u_i}}{\sum_{j=1, j \neq i}^K p_j \mathbf{w}_{u_j}^H \boldsymbol{\Omega}_{u_i,j} \mathbf{w}_{u_j} + 1} \\ &\leq \varphi_{\max} \left(\left(\sum_{j=1, j \neq i}^K p_j \boldsymbol{\Omega}_{u_i,j} + \mathbf{I} \right)^\dagger p_i \boldsymbol{\Omega}_{u_i,i} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $\varphi_{\max}(\mathbf{A})$ 表示矩阵 \mathbf{A} 的最大特征值, $(\mathbf{A})^\dagger$ 表示矩阵的逆或伪逆。

为了合理设计各基站的波束矢量及分配各基站的发射功率, 本文采用最大化最小 SINR 作为系统优化目标函数, 其优化问题的数学描述为

$$\begin{aligned} Q: & \left. \begin{aligned} & \max_{\{\mathbf{w}_{u_i}, p_i\}_{i=1}^K} \min_i \text{SINR}_{u_i} \\ & \text{s.t. } p_i > 0, \sum_{i=1}^K p_i \leq P, \|\mathbf{w}_{u_i}\| = 1, \forall i \end{aligned} \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

其中 P 为多点协作系统的总功率约束。

3 多点协同上/下行链路优化问题间的对偶关系及波束成形算法

根据文献[6,7]的研究表明, 我们可以利用对偶理论把下行链路的优化问题转化为与之对偶的虚拟上行链路的优化问题, 通常, 只有各用户节点的发射功率相互耦合的虚拟上行链路的优化问题比较容易求解, 而且其最优解可以很容易地转换成下行链路的优化问题的最优解。

3.1 多点协同上/下行链路优化问题间的对偶关系

我们将文献[9]得出的每基站功率约束条件下的多点协同上/下行链路的最大化和速率优化问题的对偶关系扩展到总功率约束条件下的上/下行链路间的 Max-Min SINR 优化问题间的对偶关系, 其证明过程类似, 因此, 这里没有详细给出其证明过程。

定理 基站间总发射功率约束条件下多点协同下行链路系统的 Max-Min SINR 优化问题:

$$\tilde{Q}: \left. \begin{aligned} & \max_{\{w_{u_i}, p_i\}_{i=1}^K} \min_i \text{SINR}_{u_i} \\ & \text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^K p_i \leq P, \|w_{u_i}\| = 1, \forall i \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

的拉格朗日对偶问题是多点协同虚拟上行链路系统的 Max-Min SINR 优化问题:

$$\tilde{Q}: \left. \begin{aligned} & \max_{\{\lambda_{u_i}, \lambda_{u_i}\}_{i=1}^K} \min_i \frac{\lambda_{u_i} w_{u_i}^H \Omega_{u_i, i} w_{u_i}}{\sum_{k=1, k \neq i}^K \lambda_{u_k} w_{u_k}^H \Omega_{u_k, i} w_{u_i} + 1} \\ & \text{s.t.} \quad \lambda_{u_i} > 0, \|w_{u_i}\| = 1, \forall i, \sum_{i=1}^K \lambda_{u_i} = P \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

其中 $\{\lambda_{u_i}\}_{i=1}^K$ 解释为虚拟上行链路中各用户节点的发射功率; $\sum_{i=1}^K \lambda_{u_i} = P$ 解释为虚拟上行链路中各用户节点的发射功率之和等于基站间总发射功率约束。而且, 当最优解取得时, 所有用户均可实现相同的最优平衡 SINR 值。

从优化问题 \tilde{Q} 表示形式中, 我们可以看出虚拟上行链路的优化问题中只有上行链路用户节点的发射功率和各基站节点的噪声方差互相耦合; 与下行链路的优化问题相比, 虚拟上行链路的优化问题的求解方法比较容易获得, 而且很容易将获得的最优解转化为下行链路优化问题的最优解。

3.2 多点协同波束成形算法设计

这里, 我们先引入一个松弛变量 γ , 把优化问题 \tilde{Q} 表述为如下形式:

$$\tilde{Q}: \left. \begin{aligned} & \max_{\{w_{u_i}, \lambda_{u_i}\}_{i=1}^K, \gamma} \gamma \\ & \text{s.t.} \quad \gamma \leq \frac{\lambda_{u_i} w_{u_i}^H \Omega_{u_i, i} w_{u_i}}{\sum_{k=1, k \neq i}^K \lambda_{u_k} w_{u_k}^H \Omega_{u_k, i} w_{u_i} + 1} \\ & \quad \lambda_{u_i} > 0, \|w_{u_i}\| = 1, \forall i, \sum_{i=1}^K \lambda_{u_i} = P \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

从上述定理可以知道优化问题 \tilde{Q} 的最优值 γ 取得的条件是不等式 SINR 约束条件的等号成立, 即

$$\frac{\lambda_{u_i} w_{u_i}^H \Omega_{u_i, i} w_{u_i}}{\sum_{k=1, k \neq i}^K \lambda_{u_k} w_{u_k}^H \Omega_{u_k, i} w_{u_i} + 1} = \gamma \quad (10)$$

3.2.1 优化虚拟上行链路功率和波束矢量 当给定优化变量 $\{\lambda_{u_i}\}_{i=1}^K$ 和最优平衡 SINR γ 的值时, 变量 λ_{u_i} 的值可以通过式(11)迭代更新。

$$\lambda_{u_i}^* = \frac{\gamma}{\varphi_{\max} \left(\left(\sum_{k=1, k \neq i}^K \lambda_{u_k} \Omega_{u_k, i} + I \right)^\dagger \Omega_{u_i, i} \right)} \quad (11)$$

其中

$$\begin{aligned} \varphi_{\max} \left(\left(\sum_{k=1, k \neq i}^K \lambda_{u_k} \Omega_{u_k, i} + I \right)^\dagger \Omega_{u_i, i} \right) &= \frac{w_{u_i}^H \Omega_{u_i, i} w_{u_i}}{w_{u_i}^H \left(\sum_{k=1, k \neq i}^K \lambda_{u_k} \Omega_{u_k, i} + I \right) w_{u_i}} \end{aligned} \quad (12)$$

当给定优化变量 $\{\lambda_{u_i}\}_{i=1}^K$ 时, 优化问题 \tilde{Q} 可以简化为 K 个并行子问题, 即

$$\left. \begin{aligned} & \max_{w_{u_i}} \frac{\lambda_{u_i} w_{u_i}^H \Omega_{u_i, i} w_{u_i}}{w_{u_i}^H \left(\sum_{k=1, k \neq i}^K \lambda_{u_k} \Omega_{u_k, i} + I \right) w_{u_i}} \\ & \text{s.t.} \quad \|w_{u_i}\| = 1 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

从文献[11]知道, 优化问题式(13)可化为广义特征值分解问题, 其最优解为相应的主特征向量, 即

$$w_{u_i}^* = \nu_{\max} \left(\left(\sum_{k=1, k \neq i}^K \lambda_{u_k} \Omega_{u_k, i} + I \right)^\dagger \lambda_{u_i} \Omega_{u_i, i} \right) \quad (14)$$

其中 $\nu_{\max}(\mathbf{A})$ 表示矩阵 \mathbf{A} 的最大特征值所对应的特征向量。

3.2.2 优化下行链路的发射功率 当给定最优波束矢量 $\{w_{u_i}^*\}_{i=1}^K$ 和最优平衡 SINR γ^* 的值时, 依据上/下行链路对偶关系和等式 $\text{SINR}_{u_i} = \gamma$, 可以计算下行链路的最优发射功率 $\{p_i\}_{i=1}^K$:

$$p^* = (D - G\gamma^*)^\dagger \gamma^* \quad (15)$$

其中 $\mathbf{p}^* = [p_1, \dots, p_k, \dots, p_K]^T$; $\boldsymbol{\gamma}^* = \gamma^* \mathbf{1}_K$, $\mathbf{1}_K$ 表示元素全为 1 的 K 维列向量;

$$[\mathbf{D}]_{i,k} = \begin{cases} \mathbf{w}_{u_i}^{*H} \boldsymbol{\Omega}_{u_i,k} \mathbf{w}_{u_i}^*, & i = k \\ 0, & i \neq k \end{cases} \quad (16)$$

$$[\mathbf{G}]_{i,k} = \begin{cases} \mathbf{w}_{u_k}^{*H} \boldsymbol{\Omega}_{u_i,k} \mathbf{w}_{u_k}^*, & i \neq k \\ 0, & i = k \end{cases} \quad (17)$$

3.2.3 分布式多点协同波束成形算法 基于上述分析, 分布式多点协同波束成形算法总结如下:

(1) 令 $\lambda_{u_i}^{(0)} = 0$, $i = 1, \dots, K$; $\gamma^{(0)} = 0$; $n = 0$;

(2) 令 $n = n + 1$, 依据关系 $\sum_{i=1}^K \lambda_{u_i} = P$, 更新虚拟上行链功率和最优平衡 SINR γ 的值:

$$\lambda_{u_i}^{(n)} = \frac{\gamma^{(n)}}{\varphi_{\max} \left(\left(\sum_{k=1, k \neq i}^K \lambda_{u_k}^{(n-1)} \boldsymbol{\Omega}_{u_k,i} + \mathbf{I} \right)^\dagger \boldsymbol{\Omega}_{u_i,i} \right)} \quad (18)$$

其中

$$\gamma^{(n)} = \frac{P}{\sum_{i=1}^K \frac{1}{\varphi_{\max} \left(\left(\sum_{k=1, k \neq i}^K \lambda_{u_k}^{(n-1)} \boldsymbol{\Omega}_{u_k,i} + \mathbf{I} \right)^\dagger \boldsymbol{\Omega}_{u_i,i} \right)}} \quad (19)$$

(3) 如果不等式 $\sum_{i=1}^K |\gamma^{(n)} - \gamma^{(n-1)}| \leq \delta$ (其中 δ 是给定的阈值) 成立, 则转步骤(4); 否则转步骤(2);

(4) 利用 $\{\lambda_{u_i}^{(n)}\}_{i=1}^K$ 和式(14)计算 $\{\mathbf{w}_{u_i}^*\}_{i=1}^K$; 利用 $\{\mathbf{w}_{u_i}^*\}_{i=1}^K$, $\gamma^{(n)}$ 和式(15)计算 \mathbf{p}^* ;

在每次更新上行链路的功率之后, 分布式实现上述算法需要基站间互相交换参数变量 $\left\{ \varphi_{\max} \left(\left(\sum_{k=1, k \neq i}^K \lambda_{u_k}^{(n-1)} \boldsymbol{\Omega}_{u_k,i} + \mathbf{I} \right)^\dagger \boldsymbol{\Omega}_{u_i,i} \right) \right\}_{i=1}^K$, 即基站 i

需要将 $\varphi_{\max} \left(\left(\sum_{k=1, k \neq i}^K \lambda_{u_k}^{(n-1)} \boldsymbol{\Omega}_{u_k,i} + \mathbf{I} \right)^\dagger \boldsymbol{\Omega}_{u_i,i} \right)$ 的值广播给其他所有协同基站。另外, 在算法最后一步计算最优下行链路发射功率 \mathbf{p}^* 时, 每个基站需要知道矩阵 \mathbf{D} 和 \mathbf{G} 的信息, 而这只需要在协同基站之间互相交换 \mathbf{D} 和 \mathbf{G} 的非负元素即可, 在矩阵 \mathbf{D} 和 \mathbf{G} 中只包括 K^2 个非零实数值, 实际系统中可以承受基站间所需要交换的信息量。当用 b 比特对实数值量化时, 基站间共享所有信道信息的多点协同算法所需要交换比特数为 $2MK(K-1)b$; 所提算法所需要交换比特数仅为 $NKb + K^2b$, 其中 N 为满足一定精度时算法所需要迭代的次数。

为了证明所提算法的收敛性, 我们只需证明下面这个函数的单调性, 即 γ 相对于虚拟上行链路发射功率 $\{\lambda_i\}_{i=1}^K$ 的单调性。令

$$f(\{\lambda_i\}_{i=1}^K) = \frac{1}{\gamma} = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^K \frac{1}{\varphi_{\max} \left(\left(\sum_{k=1, k \neq i}^K \lambda_k \boldsymbol{\Omega}_{k,i} + \mathbf{I} \right)^\dagger \boldsymbol{\Omega}_{i,i} \right)} \quad (20)$$

等价于证明下面这个函数的单调性。

$$f_i(\{\lambda_k\}_{k=1}^K) = \varphi_{\max} \left(\left(\sum_{k=1, k \neq i}^K \lambda_k \boldsymbol{\Omega}_{k,i} + \mathbf{I} \right)^\dagger \boldsymbol{\Omega}_{i,i} \right) \quad (21)$$

我们很容易明白, 矩阵 $\left(\sum_{k=1, k \neq i}^K \lambda_k \boldsymbol{\Omega}_{k,i} + \mathbf{I} \right)^\dagger \boldsymbol{\Omega}_{i,i}$ 的特征值是变量 $\{\lambda_k\}_{k=1}^K$ 的元素单调递减函数。因此, 函数

$f(\{\lambda_i\}_{i=1}^K)$ 是变量 $\{\lambda_k\}_{k=1}^K$ 的元素单调递增函数。而且, 对所有的 $\alpha > 1$ 都有下面的不等式成立

$$\begin{aligned} \alpha f(\{\lambda_i\}_{i=1}^K) &= \frac{\alpha}{P} \sum_{i=1}^K \frac{1}{\varphi_{\max} \left(\left(\sum_{k=1, k \neq i}^K \lambda_k \boldsymbol{\Omega}_{k,i} + \mathbf{I} \right)^\dagger \boldsymbol{\Omega}_{i,i} \right)} \\ &= \frac{1}{P} \sum_{i=1}^K \frac{1}{\varphi_{\max} \left(\left(\sum_{k=1, k \neq i}^K \alpha \lambda_k \boldsymbol{\Omega}_{k,i} + \alpha \mathbf{I} \right)^\dagger \boldsymbol{\Omega}_{i,i} \right)} \\ &\geq \frac{1}{P} \sum_{i=1}^K \frac{1}{\varphi_{\max} \left(\left(\sum_{k=1, k \neq i}^K \alpha \lambda_k \boldsymbol{\Omega}_{k,i} + \mathbf{I} \right)^\dagger \boldsymbol{\Omega}_{i,i} \right)} \\ &= f(\{\alpha \lambda_i\}_{i=1}^K) \end{aligned} \quad (22)$$

从参考文献[12]的定点原理(非负性、单调递增性、标量性), 我们可以知道所提算法收敛到唯一的定点, 这也保证了所提算法的全局收敛性。

4 协同用户调度算法设计

从式(13)和式(14)可以看出多点协同波束成形表达式与式(5)所描述的表达式相似, 利用这一特性设计一种多点协同用户调度算法。令 $B^0 = \{1, 2, \dots, K\}$; $U_i^0 = \{1, \dots, U_i\}$ 分别为协同基站集和小区 i 的初始用户集合; B^s , U^s 分别为已调度的基站集和用户集。多点协同用户调度算法描述如下:

(1) 从初始协同基站集合 B^0 中任意选择一个基站作为首个用户调度基站, 不妨设为基站 i , 基站 i 依据下述准则调度用户:

$$u_i = \max_{v_i \in U_i^0} \|\mathbf{h}_{v_i,i}\| \quad (23)$$

其中 $\|\cdot\|$ 表示向量范数。令 $B^s = B^s \cup \{i\}$, 基站 i 将所调度用户 u_i 发送给其他基站;

(2) 从集合 $B^0 - B^s$ 中任意选择一个基站进行用

户调度，不妨设为基站 j ，基站 j 依据下述准则调度用户：

$$u_j = \max_{v_j \in U_j^s} \varphi_{\max} \left(\left(\sum_{i \in B^s} \Omega_{u_i, j} + I \right)^\dagger \Omega_{v_j, j} \right) \quad (24)$$

令 $B^s = B^s \cup \{j\}$ ，基站 j 将所调度用户 j 发送给其他基站；重复步骤(2)直到所有基站均已调度用户。

在上述分布式多点协同用户调度算法中，基站按一定顺序(任意规定)依次调度用户，并把所调度的用户广播给其他所有协同基站，直到所有协同基站均调度一个服务用户为止。

5 计算机数值仿真结果

仿真环境描述如下：考虑由多基站组成的多点协同下行链路系统，基站天线均为 4，用户天线数均为 1，基站间的距离为 1 km，信道带宽为 10 MHz，每个小区包含一定数量的用户且均匀分布在小区内，用户离基站最小距离为 35 m，基站到用户节点的信道模型为 3GPP 信道模型^[13]，多点协同下行链路系统的总发射功率为 P 。信道系数产生形式为 $h = \gamma h_w$ ，其中 γ 为大尺度衰落因子， h_w 的元素为均值为 0、方差为 1 的独立同分布的复高斯随机变量。大尺度衰落系数 γ 表示为 $\gamma = \beta \chi / d^\alpha$ ，其中 β 表示一个尺度因子， α 表示信道系数衰落指数(通常， $\alpha > 2$)， d 表示基站到用户的距离， χ 表示阴影衰落；特别地，大尺度衰落路径损失为 $38 \lg d + 34.5$ dB，阴影衰落的标准方差为 8 dB，小尺度衰落为均值为 0、方差为 1 的瑞利衰落，用户端噪声系数为 9 dB，仿真精度为 10^{-5} 。为了保证用户间的公平性，仿真过程中采用循环用户调度且用户调度过程中每基站每次只调度一个用户服务，同时用调度循环周期对小区用户的平均速率进行归一化处

理。标记说明：CUBA 指本文所提的协同波束成形和用户调度算法；CUTA 指所提协同用户调度算法和协同波束成形算法^[10]；CUSA 指所提协同用户调度算法和广义信干噪比(GSINR)波束成形算法^[14]；RUBA 指随机用户调度算法和所提协同波束成形；RUTA 指随机用户调度算法和协同波束成形算法^[10]；RUSA 指随机用户调度算法和 GSINR 波束成形算法^[14]。

图 1 给出了 3 小区协同用户调度、波束成形和功率分配算法的最差用户平均速率曲线。这里，考虑非轮询用户方式，即每次调度都从小区用户中调度一个服务用户。仿真结果表明，随着小区用户数量的增加，CUBA，CUTA 和 CUSA 算法的性能随之改善，说明这 3 种算法均有多用户分集增益。然而，RUBA，RUTA 和 RUSA 算法的性能与用户数无关，即算法性能不因用户数变化而变化。

图 2 和图 3 分别给出了 3 小区协同波束成形和功率分配算法的最差用户平均速率和累积分布函数(Cumulative Distributed Function, CDF)，发射功率 46 dBm 的性能曲线。从仿真图中可以看出，CUTA 和 CUBA 两种算法所实现的性能相同，但两者的区别在于前者需要两层迭代实现；后者只是单层迭代实现，计算复杂度相对较低，而且基站间信息交换量也相对少一些；CUBA 和 CUTA 两种算法的性能均要优于 CUSA 算法的性能；协同用户调度算法与不同波束成形算法相结合的性能均要优于随机用户调度算法与相应波束成形算法相结合的性能；算法 RUBA，RUTA，RUSA 的性能比较跟前三者的性能比较相似，但均比前三者的性能差。由于采用轮询用户调度算法，这样小区用户调度的机遇随着用户数增加而降低，从而最差用户平均速率下降。

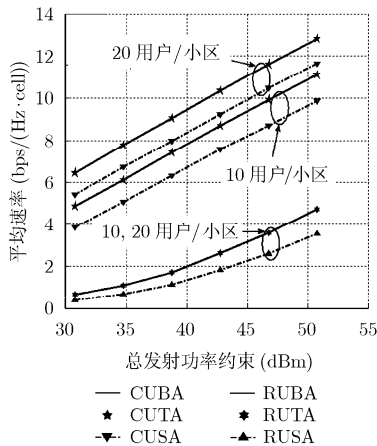


图 1 最差小区用户平均速率曲线(3 小区)

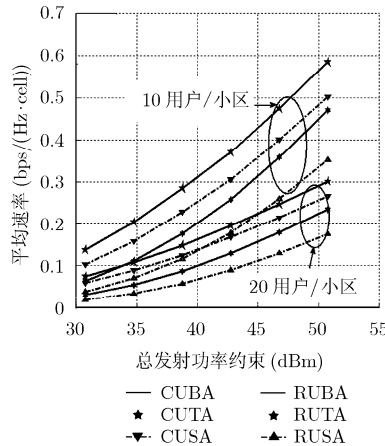


图 2 最差小区用户平均速率曲线(3 小区)

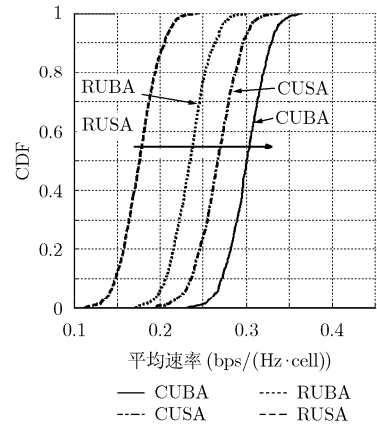


图 3 最差小区用户平均速率累积分布函数曲线(3 小区、20 用户/小区)

图4给出了3小区、7小区协同波束成形和功率分配算法的最差用户平均速率性能曲线,其中每个小区均有20个用户。从仿真结果可以看出,相对于其他几种算法而言,CUBA和CUTA两种算法的性能损失相对较小,说明这两种算法能够较好地抑制因协同小区数量增加而产生的小区间干扰;而CUSA,RUBA,RUTA,RUSA算法的性能损失比较明显,说明这些算法抑制因协同小区数量增加而产生的小区间干扰的能力比CUBA和CUTA算法抑制小区间干扰的能力弱一些。

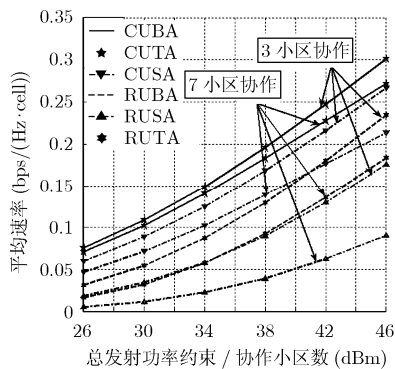


图4 最差小区用户平均速率曲线(3小区, 7小区, 20用户/小区)

6 结束语

本文提出了一种总功率约束条件下的多点协同虚拟上行链路的Max-Min SINR优化问题的分布式单层迭代协同波束成形和功率分配算法,还提出了一种分布式协同用户调度算法。计算机数值仿真验证了所提算法的可行性,而且相比于随机用户调度算法来说,所提出的分布式协同用户调度算法所实现的性能要优于前者所实现的性能;相比于现有多点协同波束成形和功率分配算法,所提算法只需基站间交换少量信息,计算复杂度低;数值仿真也验证所提出算法的有效性。

参考文献

- [1] Karakayali M, Foschini G, and Valenzuela R. Network coordination for spectrally efficient communications in cellular systems [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2006, 13(4): 56-61.
- [2] Tajer A and Wang X. Information exchange limits in cooperative MIMO networks [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011, 59(6): 2927-2942.
- [3] Zhang H, Venturino L, Prasad N, et al. Weighted sum-rate maximization in multi-cell networks via coordinated scheduling and discrete power control [J]. *IEEE Journal on Selected Areas Communications*, 2011, 29(6): 1214-1224.
- [4] Son K, Yi Y, and Chong S. Utility-optimal multi-pattern reuse in multi-cell networks [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(1): 142-153.
- [5] Park S, Park H, and Lee I. Distributed beamforming techniques for weighted sum-rate maximization in miso interference channels [J]. *IEEE Communications Letters*, 2010, 14(12): 1131-1133.
- [6] Schubert M and Boche H. Solution of the multiuser downlink beamforming problem with individual SINR constraints [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2004, 53(1): 18-28.
- [7] Wiesel A, Eldar Y, and Shamai S. Linear precoding via conic optimization for fixed MIMO receivers [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2006, 54(1): 161-176.
- [8] Yu W and Lan T. Transmitter optimization for the multi-antenna downlink with per-antenna power constraints [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2007, 55(6): 2646-2660.
- [9] Yang J and Kim D. Multi-cell uplink-downlink beamforming throughput duality based on lagrangian duality with per-base station power constraints [J]. *IEEE Communications Letters*, 2008, 12(4): 277-279.
- [10] Huang Y, Zheng G, Bengtsson M, et al. Distributed multi-cell beamforming with limited intercell coordination [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011, 59(2): 728-738.
- [11] Sadek M, Tarighat A, and Sayed A. A leakage-based precoding scheme for downlink multi-user MIMO channels [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2007, 6(5): 1711-1721.
- [12] Yates R. A framework for uplink power control in cellular radio systems [J]. *IEEE Journal on Selected Areas Communications*, 1995, 13(7): 1341-1347.
- [13] 3GPP TR25.996 v.8.0.0 Release 8, Spatial channel model for multiple input multiple output (MIMO) simulations [R]. 3GPP, Tech. Rep., Jan. 2009.
- [14] Lee B, Sohn H, Shin O, et al. Interference-aware decentralized precoding for multicell MIMO TDD systems [C]. *IEEE Global Commun.*, New Orleans, LA, 2008: 1-5.

何世文: 男, 1978年生, 博士生, 研究方向为多点协作、中继协作通信和网络编码。

黄永明: 男, 1977年生, 博士, 副教授, 研究方向为MIMO通信信号处理、多用户通信信号处理和协作通信。

杨绿溪: 男, 1964年生, 教授、博士生导师, 主要研究方向为移动通信空时信号处理、协作通信和网络编码。