

多用户大规模 MIMO 系统能效资源分配算法

胡莹^{①②} 黄永明^① 俞菲^① 杨绿溪^{*①}

^①(东南大学信息科学与工程学院 南京 210096)

^②(江苏科技大学电子信息学院 镇江 212003)

摘要: 该文针对多用户大规模多输入多输出(MIMO)移动通信上行系统,提出一种基于能效优化的资源分配算法。所提方法在采用最大比合并(MRC)接收情况下,满足用户数据速率和可容忍的干扰水平约束条件下,以最大化系统能效下界为准则建立优化模型。根据分数规划的性质,把原始的分数最优化问题转换成减式的形式,进而采用凸优化的方法,通过联合调整基站端的发射天线数和用户的发射功率来优化能效函数。仿真结果表明,所提算法与穷举算法在能效上的差距不足9%,并且有较好的系统频谱效率性能,同时算法复杂度得到了显著降低。

关键词: 无线通信; 大规模多输入多输出; 多用户; 资源分配; 上行系统; 能效

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2015)09-2198-06

DOI: 10.11999/JEIT150088

Energy-efficient Resource Allocation Based on Multi-user Massive MIMO System

Hu Ying^{①②} Huang Yong-ming^① Yu Fei^① Yang Lu-xi^①

^①(School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

^②(Institute of Electronics and Information, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: An energy-efficient resource allocation scheme is proposed for multi-user massive MIMO mobile communication uplink system. A mathematical formulation of optimization issue is provided with the objective of maximizing system energy efficiency lower bound under the data rate of user and tolerable interference level constraint, meanwhile the Base Station (BS) uses a Maximum-Ratio Combining (MRC) receiver. By transforming the originally fractional optimization problem into an equivalent subtractive form using the properties of fractional programming, then convex optimization is adopted to maximize the energy efficiency. Specifically, both the numbers of antenna arrays at the BS and the transmit data rate at the user are adjusted. Simulation results show that the energy-efficiency difference between the proposed algorithm and the exhaustive algorithm is less than 9%, at the same time, the performance of spectral-efficiency of the proposed algorithm is very well and the complexity is significantly reduced.

Key words: Wireless communication; Massive MIMO; Multi-user; Resource allocation; Uplink system; Energy-efficiency

1 引言

随着无线通信设备的能量消耗急剧增加和对全球变暖问题的高度关注,绿色通信逐渐成为一种趋势。因此,资源分配的研究热点从频谱效率资源分配^[1-3]逐渐转向能效资源分配^[4-15]。文献[5]研究了

多用户 OFDMA 移动通信下行系统的能效设计问题,在考虑每个用户的 QoS 要求下,提出了一种用户调度和速率分配策略。文献[6]研究了下行 OFDMA 移动通信系统的能效设计问题,在考虑最小数据速率要求的情况下,给出了一种子载波分配和功率分配算法。文献[10]研究了下行 SISO-OFDM 系统能效资源分配问题,首先证明 OFDMA 策略能够取得最好的能效,然后把非凸的问题转化成凸优化问题,进而得到一种有效的功率分配算法。

多输入多输出(MIMO)技术能够通过多天线发送与接收,充分利用空间资源提高信道容量和系统的可靠性,因此被认定为下一代多用户宽带无线通信系统中的关键技术之一。文献[12]研究了上行多用户 MIMO 系统的能效资源分配问题,提出了一种基

2015-01-15 收到, 2015-05-12 改回, 2015-06-29 网络优先出版
国家自然科学基金(61372101, 61271018, 612001176, 61201172, U1404615), 国家科技重大专项(2011ZX03003-003-03, 2012ZX03004-005-003, 2013ZX03003006-002), 江苏省科技计划项目(BE2012167, BK2011019), 教育部博士点新教师基金(20100092110010)和毫米波国家重点实验室开放课题基金(K201504)资助课题

*通信作者: 杨绿溪 lxyang@seu.edu.cn

于注水算法的能效多用户功率分配(EMMPA)算法, 但该算法需要对于不同的用户计算不同的注水水平, 计算量比较大, 并且迭代次数较多, 收敛速度较慢。文献[13]分别推导了大规模多用户 MIMO 系统中上行链路分别采用最大比合并(MRC), 迫零(ZF)以及最小均方误差(MMSE)检测时的容量下界, 并研究了能效和频谱效率之间的关系, 但是系统的功率消耗没有考虑电路功率消耗。文献[15]研究了大规模 MIMO 下行 OFDMA 系统中能效资源分配问题, 并给出了迭代算法, 但此算法中仅考虑系统吞吐量的要求, 并没有考虑每个用户的速率要求。文献[16]指出, 尽管 MIMO 技术能够有效提高系统的吞吐量, 但天线数增加的同时能量消耗也增加了。

基于以上分析, 本文针对多用户大规模 MIMO 上行系统, 以最大化系统能效的下界为准则, 提出了一种新的资源分配方法。假设发射端完全已知信道状态信息(CSI), 与文献[11]采用迫零(ZF)接收并忽略大尺度衰落的影响不同, 本文采用最大比合并(MRC)接收并考虑大尺度衰落的影响, 同时在满足用户数据速率和可容忍的干扰水平约束的条件下, 以最大化系统能效下界为准则建立优化模型。根据分数规划的性质, 把原始的分式最优化问题转换成减式的形式, 通过联合调整基站端的发射天线数和用户的发射功率来优化能效函数。仿真结果表明, 所提算法与最优算法在能效上的差距不足 9%, 并且有较好的频谱效率性能, 同时能显著降低算法复杂度。

2 系统模型与问题描述

本文考虑一个典型的上行多用户 MIMO 无线通信系统, 如图 1 所示。其中基站端配置 M 根发射天线, 用以与 K 个地理位置分散的单天线移动用户进行通信。

基站接收到的信号可以表示为

$$\mathbf{y} = \mathbf{G} \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_M]^T$ 。 \mathbf{G} 表示 $M \times K$ 信道矩阵, $\mathbf{P} = \text{diag}\{p_1, p_2, \dots, p_K\}$ 表示发射功率矩阵, p_k 表示

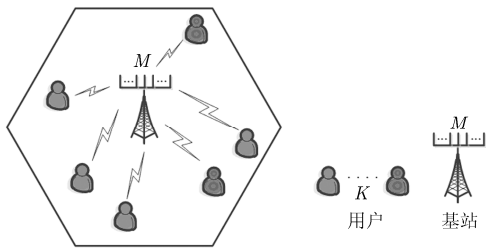


图 1 系统模型

用户 k 的发射功率, \mathbf{x} 表示 $K \times 1$ 维发射信号向量。 \mathbf{n} 表示 $M \times 1$ 维加性高斯白噪声(AWGN)。信道矩阵 \mathbf{G} 可以表示为

$$\mathbf{G} = \mathbf{H}\mathbf{D}^{1/2} \quad (2)$$

其中, \mathbf{H} 表示 $M \times K$ 快衰落系数矩阵, \mathbf{D} 表示 $K \times K$ 对角矩阵, 且 $[D]_{kk} = \beta_k$, β_k 表示用户 k 的大尺度衰落因子。

假设基站端完全已知信道信息并采用最大比合并(MRC)接收。则基站端接收到的信号向量可以表示为

$$\mathbf{Y} = \mathbf{G}^H \cdot \mathbf{G} \cdot \mathbf{P}^{1/2} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{G}^H \cdot \mathbf{n} \quad (3)$$

Y_k 和 x_k 分别表示向量 \mathbf{Y} 和 \mathbf{x} 的第 k 个元素, \mathbf{G}_k 表示矩阵 \mathbf{G} 的第 k 列, 则

$$\begin{aligned} Y_k &= \mathbf{G}_k^H \cdot \mathbf{G} \cdot \mathbf{P}^{1/2} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{G}_k^H \cdot \mathbf{n} \\ &= \sqrt{p_k} \mathbf{G}_k^H \mathbf{G}_k x_k + \sum_{i=1, i \neq k}^K \sqrt{p_i} \mathbf{G}_k^H \mathbf{G}_i x_i + \mathbf{G}_k^H \cdot \mathbf{n} \end{aligned} \quad (4)$$

显然, 式(4)等号后面的第 1 项和第 2 项分别表示用户 k 的期望信号和来自其他用户的干扰。为了简化分析, 假设噪声方差为 1, 因此 p_k 表示发射信噪比(SNR)。进一步假设信道是遍历的, 则用户 k 可得到的上行速率为

$$r_k = \mathbb{E} \left[\log_2 \left(1 + \frac{p_k \|\mathbf{G}_k\|^4}{\sum_{i=1, i \neq k}^K p_i |\mathbf{G}_k^H \mathbf{G}_i|^2 + \|\mathbf{G}_k\|^2} \right) \right] \quad (5)$$

由詹森不等式可以得到上行速率的下界为

$$\begin{aligned} r_k &\geq \tilde{r}_k \triangleq \log_2 \left\{ 1 + \left[\frac{\mathbb{E} \left[\sum_{i=1, i \neq k}^K p_i |\mathbf{G}_k^H \mathbf{G}_i|^2 + \|\mathbf{G}_k\|^2 \right]}{p_k \|\mathbf{G}_k\|^4} \right]^{-1} \right\} \\ &= \log_2 \left\{ 1 + \left[\frac{\mathbb{E} \left[\sum_{i=1, i \neq k}^K p_i |\tilde{\mathbf{G}}_i|^2 + 1 \right]}{p_k \|\mathbf{G}_k\|^2} \right]^{-1} \right\} \\ &= \log_2 \left\{ 1 + \left[\left(\sum_{i=1, i \neq k}^K p_i \mathbb{E} [|\tilde{\mathbf{G}}_i|^2] + 1 \right) \mathbb{E} \left[\frac{1}{p_k \|\mathbf{G}_k\|^2} \right] \right]^{-1} \right\} \\ &= \log_2 \left\{ 1 + \left[\left(\sum_{i=1, i \neq k}^K p_i \beta_i + 1 \right) \frac{1}{p_k (M-1) \beta_k} \right]^{-1} \right\} \\ &= \log_2 \left(1 + \frac{p_k (M-1) \beta_k}{\sum_{i=1, i \neq k}^K p_i \beta_i + 1} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $\tilde{\mathbf{G}}_i \triangleq \frac{\mathbf{G}_k^H \mathbf{G}_i}{\|\mathbf{G}_k\|}$, $\tilde{\mathbf{G}}_i \sim \mathcal{CN}(0, \beta_i)$ 。由文献[13]中给出的随机矢量结论可以得到: $\mathbb{E}[\tilde{\mathbf{G}}_i]^2 = \beta_i$ 。

当 $\mathbf{W} \sim \mathcal{W}(n, \mathbf{I}_n)$ 是一个 $m \times m$ 中心 Wishart 矩阵分布时, 其中 n 表示自由度且 $n > m$, 则 $\mathbb{E}\{\text{tr}(\mathbf{W}^{-1})\} = m/(n-m)$, 因此 $\mathbb{E}\left[\frac{1}{p_k \|\mathbf{G}_k\|^2}\right] = \frac{1}{p_k (M-1)\beta_k}$, $M \geq 2$ 。

因此, 系统吞吐量的下界可以表示为

$$R(\mathbf{P}, M) = \sum_{k=1}^K r_k = \sum_{k=1}^K \log_2 \left[1 + \frac{p_k (M-1)\beta_k}{\sum_{i=1, i \neq k}^K p_i \beta_i + 1} \right] \quad (7)$$

图 2 给出了式(5)和式(7)对用户数求和的系统吞吐量比较图, 这里假设用户数 $K = 10$, 其中理论值是对式(5)求和, 推导值是式(7)的结果。从图中可以看出, 基站天线数在 20 到 500 之间变化时, 推导的速率表达式下界和理论值非常接近, 因此本文采用这个下界值代替理论值。

系统总的发射功率可以表示为

$$P_T(\mathbf{P}) = \sum_{k=1}^K p_k \quad (8)$$

系统的功率消耗主要由电路功率消耗和发射功率消耗两部分组成。其中, 电路功率消耗记为

$$P_C(M) = Mp_C \quad (9)$$

p_C 表示基站端每根天线的电路功率消耗。这里的电路功率消耗包括信号传输路径上所有电路模块, 如 A/D 转换, D/A 转换, 频率合成器, 混频器, 功率放大等的电能消耗^[17]。

因此, 系统能效可以表示为

$$U(\mathbf{P}, M) = \frac{R(\mathbf{P}, M)}{P_T(\mathbf{P}) + P_C(M)} \quad (10)$$

在实际通信过程中, 除了能效, 我们通常还会考虑到用户的 QoS 要求。本文考虑每个用户的速率要求。基于以上分析, 多用户大规模多输入多输出

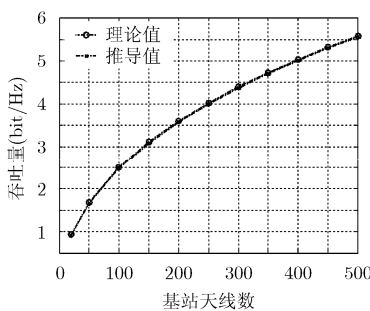


图2 吞吐量比较图

(MIMO)移动通信上行系统中基于能效优化的资源分配问题可以表述为如下约束的最大化问题:

$$\left. \begin{aligned} & \arg \max_{\mathbf{M}, \mathbf{P}} U(\mathbf{P}, M) \\ & \text{s.t. } r_k \geq \Gamma \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

3 能效资源分配算法

为了解决式(7)用户间干扰的问题, 本文采用可容忍的干扰水平, 即最差情况(worst case)^[18]。即

$$\sum_{i=1, i \neq k}^K p_i \beta_i \leq I \quad (12)$$

则式(7)可以表示为

$$\begin{aligned} R(\mathbf{P}, M) &= \sum_{k=1}^K r_k = \sum_{k=1}^K \log_2 \left[1 + \frac{p_k (M-1)\beta_k}{\sum_{i=1, i \neq k}^K p_i \beta_i + 1} \right] \\ &\geq \sum_{k=1}^K \log_2 \left[1 + \frac{p_k (M-1)\beta_k}{I + 1} \right] \\ &\approx \sum_{k=1}^K \log_2 \left[\frac{p_k (M-1)\beta_k}{I + 1} \right] \end{aligned} \quad (13)$$

此时, 约束优化问题可以描述式(14)的优化问题:

$$\left. \begin{aligned} & \arg \max_{\mathbf{M}, \mathbf{P}} U(\mathbf{P}, M) = \frac{R(\mathbf{P}, M)}{P_T(\mathbf{P}) + P_C(M)} \\ &= \frac{\sum_{k=1}^K \log_2 \left[\frac{p_k (M-1)\beta_k}{I + 1} \right]}{\sum_{k=1}^K p_k + Mp_C} \\ & \text{s.t. } C1: r_k \geq \Gamma, \quad C2: \sum_{i=1, i \neq k}^K p_i \beta_i \leq I \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式(14)中的目标函数是两个函数相除的形式, 因此, 本节根据分数规划的性质, 把原始的分式最优化问题转换成减式的形式, 进而提出一种新的迭代算法。

由文献[19]可知, 根据分数规划的性质, 分数形式的目标函数式(14)可以转换成减数形式:

$$R(\mathbf{P}, M) - q^* [P_T(\mathbf{P}) + P_C(M)] \quad (15)$$

$$\text{其中 } q^* = \frac{R(\mathbf{P}^*, M^*)}{P_T(\mathbf{P}^*) + P_C(M^*)} = \max_{\mathbf{M}, \mathbf{P}} \frac{R(\mathbf{P}, M)}{P_T(\mathbf{P}) + P_C(M)}$$

因此, 目标函数式可以转换为优化问题:

$$\begin{aligned} F(q) &= \max_{\mathbf{M}, \mathbf{P}} R(\mathbf{P}, M) - q [P_T(\mathbf{P}) + P_C(M)] \\ &= \max_{\mathbf{M}, \mathbf{P}} \sum_{k=1}^K \log_2 \left[\frac{p_k (M-1)\beta_k}{I + 1} \right] \\ &\quad - q \left(\sum_{k=1}^K p_k + Mp_C \right) \end{aligned} \quad (16a)$$

$$\text{C1: } r_k \geq \Gamma \quad (16b)$$

$$\text{C2: } \sum_{i=1, i \neq k}^K p_i \beta_i \leq I \quad (16c)$$

目标函数(16a)关于变量 \mathbf{P} 和 M 是联合凹的, 证明略。因此, 目标函数的拉格朗日函数可以表示为

$$\begin{aligned} L(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\theta}, \mathbf{P}, M) = & \sum_{k=1}^K \log_2 \left[\frac{p_k (M-1) \beta_k}{I+1} \right] \\ & - q \left(\sum_{k=1}^K p_k + M p_C \right) \\ & + \sum_{k=1}^K \lambda_k \left[\log_2 \frac{p_k (M-1) \beta_k}{I+1} - \Gamma \right] \\ & + \sum_{k=1}^K \theta_k \left(I - \sum_{i=1, i \neq k}^K p_i \beta_i \right) \end{aligned} \quad (17)$$

其中 $\lambda_k \geq 0, \theta_k \geq 0$ 分别为约束条件式(16b)和式(16c)对应的拉格朗日乘子。因此, 式(16)的对偶问题可以表示为

$$\min_{\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\theta} \geq 0} \max_{\mathbf{P}, M} L(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\theta}, \mathbf{P}, M) \quad (18)$$

给定 $\boldsymbol{\lambda}$ 和 $\boldsymbol{\theta}$, 最优的发射功率和基站天线数可以表示为

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial p_k} = & \frac{1}{\ln 2 \times p_k} - q + \frac{\lambda_k}{\ln 2 \times p_k} - \beta_k \sum_{i=1, i \neq k}^K \theta_i \\ = 0 \Rightarrow p_k = & \frac{1 + \lambda_k}{\ln 2 \times \left(q + \beta_k \sum_{i=1, i \neq k}^K \theta_i \right)} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial M} = & \frac{K}{\ln 2 \times (M-1)} - q p_C + \frac{\sum_{k=1}^K \lambda_k}{\ln 2 \times (M-1)} \\ = 0 \Rightarrow M = & \left\lceil \frac{K + \sum_{k=1}^K \lambda_k}{\ln 2 \times q p_C} + 1 \right\rceil \end{aligned} \quad (20)$$

其中 $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整。

拉格朗日乘子 $\boldsymbol{\lambda}$ 和 $\boldsymbol{\theta}$ 则通过递推的方式得到:

$$\begin{aligned} \lambda_k(j+1) = & \left[\lambda_k(j) - \delta 1 \times \left[\log_2 \left(\frac{p_k (M-1) \beta_k}{I+1} \right) - \Gamma \right] \right]^+ \end{aligned} \quad (21)$$

$$\theta_k(j+1) = \left[\theta_k(j) - \delta 2 \times \left(I - \sum_{i=1, i \neq k}^K p_i \beta_i \right) \right]^+ \quad (22)$$

其中 $[x]^+ = \max(0, x)$, j 表示迭代次数, $\delta 1$ 和 $\delta 2$ 表示迭代步长。采用文献[19]中的 Dinkelbach 方法, 本文提出一种迭代方法, 具体算法描述如下:

(1) 初始化 $\mathbf{P}^* = \mathbf{P}_0, M^* = M_0, q^* = 0, \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{0}, \boldsymbol{\theta} = \mathbf{0}, \delta 1 = 0.01, \delta 2 = 0.03, \varepsilon = 0.01$;

(2) **while** $R(\mathbf{P}^*, M^*) - q^* [P_T(\mathbf{P}^*) + P_C(M^*)] > \varepsilon$;

(3) **do** $q^* \leftarrow \frac{R(\mathbf{P}^*, M^*)}{[P_T(\mathbf{P}^*) + P_C(M^*)]}$;

(4) 采用式(21), 式(22)更新拉格朗日乘子;

(5) 采用式(19)得到功率分配;

(6) 采用式(20)得到基站天线数;

Return q^*, \mathbf{P}^*, M^* 。

算法收敛性的证明可参见参考文献[11]。

由以上分析可知, 在大规模 MIMO 系统中, 基站端可以根据用户的大尺度信息, 对用户进行功率分配和基站端激活天线数进行自适应选择, 以达到系统的能效最优。

4 仿真结果与分析

4.1 仿真结果与分析

仿真中设定用户根据其与基站的距离, 平均分成 3 类, 即 $\beta = [1.0 \ 0.8 \ 0.5]$, 基站端每根天线的电路功率消耗 $p_C = 100$ mW, 用户初始化的发射速率功率 $\mathbf{P}_0 = [0.1 \ \dots \ 0.1]^T$ W, 基站天线数 $M_0 = 10$, 步长 $\delta 1 = 0.01, \delta 2 = 0.03$, 每个用户的速率要求为 $\Gamma = 1.2$ bit/(s·Hz)。为了进行性能比较, 仿真中采用了穷举算法, 文献[20]中基于上行多用户大规模 MIMO 系统, 在接收端采用 ZF 接收时提出了一种迭代算法。

图 3 给出了不同用户数情况下不同 I 值对应的能效性能。从图 3 中可以看出, 随着 I 值的增加, 系统能效性能先增大再减小, 只是因为 I 值的增加, 会导致用户发射功率的增加, 因此能效会增大, 同时用户间的干扰也会增加, 因而使得系统的能效性能会减小。从图 3 中还可以看出, 随着用户数的增加, 系统的能效性能逐渐增大。这里我们选取 $I = 2.0$ 进行以下的仿真分析。

图 4 给出了不同用户数情况下各算法的能效性能。从图 4 中可以看出, 随着用户数的增加, 系统

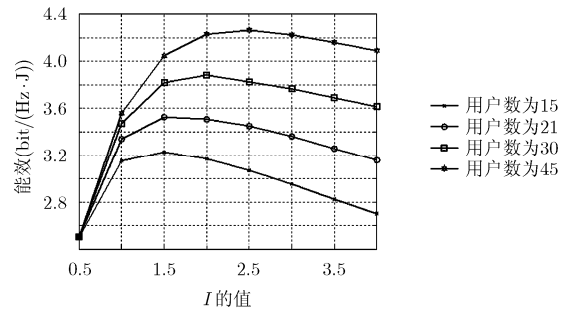


图 3 不同用户数情况下不同 I 值对应的能效性能

的能效性能明显得到提升。从图 4 中还可以看出, 本文算法的性能较接近穷举算法的性能。文献[20]中提出的算法能效性能很明显优于穷举算法, 这是因为此算法没有用户最低速率要求约束, 同时采用的 ZF 接收, 用户间不存在干扰。

图 5 给出了不同用户数情况下各算法的频谱效率性能。从图 5 中可以看出, 随着用户数的增加, 系统频谱效率性能明显得到提升。从图 5 中还可以看出, 本文算法的频谱效率性能明显优于穷举算法的吞吐量。文献[20]中提出的算法的频谱效率性能很明显优于本文算法的性能。由此可知, 本文算法不仅有较好的能效性能, 同时具有很好的频谱效率性能。

图 6 给出了用户数为 30 时, 不同迭代次数情况下本文算法与穷举算法的能效性能比较。从图中可以看出, 本文算法的能效在迭代次数为 10 的时候达到了穷举算法的 90% 以上。因此, 从图中可以看出在较少的迭代次数情况下能够实现最大化系统的能效。

4.2 算法复杂度分析

假设本文所提算法中更新拉格朗日因子的计算

复杂度分别为 $\mathcal{O}(I_\lambda)$ 和 $\mathcal{O}(I_\theta)$, 进行基站天线数和功率分配的计算复杂度为 $\mathcal{O}(I_{AP})$, 因此本文所提算法复杂度为 $\mathcal{O}(KI_{AP} \cdot (I_\lambda + I_\theta))$ 。穷举算法中, 假设基站天线数和发射功率分配的步长分别为 α_1 和 α_2 , 则穷举算法复杂度为 $\mathcal{O}((P/\alpha_2)^K \cdot M/\alpha_1)$ 。假设文献[20]所提算法中进行基站天线数和功率分配的计算复杂度为 $\mathcal{O}(\tilde{I}_{AP})$, 则文献[20]中所提算法的计算复杂度即为 $\mathcal{O}(\tilde{I}_{AP})$ 。

5 结束语

本文针对上行多用户大规模 MIMO 系统, 在发射端完全已知 CSI 并采用最大比合并 (MRC) 接收的情况下, 同时在满足用户数据速率和可容忍的干扰水平约束的条件下, 以最大化系统能效的下界为准则, 对多用户 MIMO 系统中功率分配和天线数选择进行了研究。文中根据分数规划的性质, 把原始的分式最优化问题转换成减式的形式, 进而提出一种更有效的迭代算法。仿真结果表明, 所提算法能够以较低的计算复杂度获得接近穷举算法能效资源分配的性能。

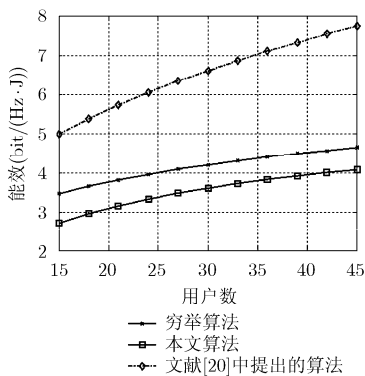


图 4 不同用户数情况下各算法的能效性能

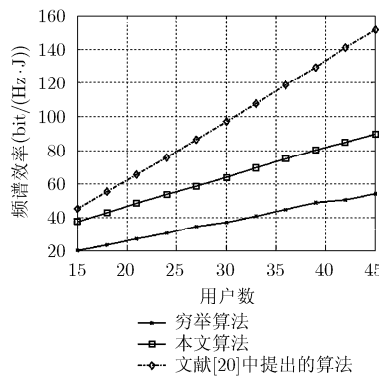


图 5 不同用户数情况下各算法的频谱效率性能

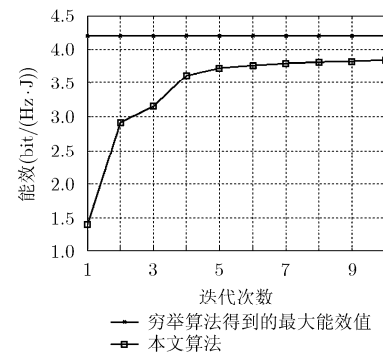


图 6 不同迭代次数情况下本文算法与最优算法的能效性能比较

参考文献

- [1] 仲崇显, 杨绿溪. 下行多用户 MIMO-OFDMA/SDMA 系统动态资源分配[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(12): 2972-2975. Zhong Chong-xian and Yang Lu-xi. Dynamic resource allocation for downlink multiuser MIMO-OFDMA/SDMA systems[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(12): 2972-2975.
- [2] Huang Y, Zheng G, Bengtsson M, et al. Distributed multicell beamforming design with limited intercell coordination[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011, 59(2): 728-738.
- [3] He S W, Huang Y M, Yang L X, et al. A multi-cell

- beamforming design by uplink-downlink max-min SINR duality[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2012, 11(8): 2858-2867.

- [4] 黄博, 方旭明, 陈煜. OFDMA 中继网络变时域节能资源分配策略[J]. 电子与信息学报, 2014, 35(5): 1023-1030. Huang Bo, Fang Xu-ming, and Chen Yu. Variable time-domain energy saving resource allocation for OFDMA relay networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 35(5): 1023-1030.
- [5] 胡莹, 黄永明, 俞菲, 等. 基于能效优化的用户调度与资源分配算法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(8): 1950-1955. Hu Ying, Huang Yong-ming, Yu Fei, et al. Energy-efficient

- optimization based user schedule and resource allocation algorithm[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(8): 1950–1955.
- [6] Zheng Z G, Dan L L, Gong S D, *et al.*. Energy-efficient resource allocation for downlink OFDMA systems[C]. IEEE International Conference on Communications (ICC), Budapest, Hungary, 2013: 391–395.
- [7] Zhang G P, Liu P, and Ding E J. Energy efficient resource allocation in non-cooperative multi-cell OFDMA systems[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2011, 22(1): 175–182.
- [8] Ho C Y and Huang C Y. Single-and multi-user uplink energy-efficient resource allocation algorithms with users' power and minimum rate constraint in OFDMA cellular networks[J]. *Wireless Networks*, 2013, 19(5): 673–688.
- [9] Zarakovitis C C and Ni Q. Energy-efficient design for communication systems: resolutions on inverse resource allocation principles[J]. *IEEE Communications Letters*, 2013, 17(12): 2264–2267.
- [10] Shi Q J, Xu W Q, Li D P, *et al.*. On the energy-efficient optimality of OFDMA for SISO-OFDM downlink system[J]. *IEEE Communications Letters*, 2013, 17(3): 541–544.
- [11] Hu Y, Ji B F, Huang Y M, *et al.*. Energy-efficient resource allocation of very large multi-user MIMO systems[J]. *Wireless Networks*, 2014, 20(6): 1421–1430.
- [12] Miao G W. Energy-efficient uplink multi-user MIMO[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12(5): 2302–2313.
- [13] Ngo H Q, Larsson E G, and Marzetta T L. Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2013, 61(4): 1436–1449.
- [14] Ng D W K, Lo E S, and Schober R. Energy-efficient resource allocation for secure OFDMA systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicle Technology*, 2012, 61(6): 2572–2585.
- [15] Ng D W K, Lo E S, and Schober R. Energy-efficient resource allocation in OFDMA systems with large numbers of base station antennas[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2012, 11(9): 3292–3304.
- [16] Li G Y, Xu Z K, Xiong C, *et al.*. Energy-efficient wireless communications: tutorial, survey, and open issues[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2011, 18(6): 28–35.
- [17] Cui S G, Goldsmith A J, and Bahai A. Energy-efficiency of MIMO and cooperative MIMO techniques in sensor networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2004, 22(6): 1086–1098.
- [18] Report of the Spectrum Efficiency Working[R]. FCC Spectrum Policy Task Force, 2002.
- [19] Dinkelbach W. On nonlinear fractional programming[J]. *Management Science*, 1967, 13(7): 492–498.
- [20] 胡莹, 冀保峰, 黄永明, 等. 上行多用户大规模 MIMO 系统能效优化算法[J]. *通信学报*, 2015, 36(1): 69–76.
- Hu Ying, Ji Bao-feng, Huang Yong-ming, *et al.*. Energy-efficient optimal algorithm based uplink multi-user very large MIMO system[J]. *Journal of Communications*, 2015, 36(1): 69–76.
- 胡莹: 女, 1981 年生, 讲师, 博士生, 研究方向为 MIMO 通信信号处理、多用户信号处理和动态资源分配.
- 黄永明: 男, 1977 年生, 副教授, 主要研究方向为 MIMO 通信信号处理、多用户通信信号处理和协作通信.
- 俞菲: 女, 1980 年生, 讲师, 主要研究方向为下一代移动通信系统中的关键技术.
- 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.