

# 大规模 MIMO OFDMA 下行系统能效资源分配算法

胡莹<sup>1,2</sup>, 冀保峰<sup>3</sup>, 黄永明<sup>1</sup>, 俞菲<sup>1</sup>, 杨绿溪<sup>1</sup>

(1. 东南大学 信息科学与工程学院, 江苏 南京 210096;

2. 江苏科技大学 电子信息学院, 江苏 镇江 212003; 3. 河南科技大学 信息工程学院, 河南 洛阳 471023)

**摘要:** 针对大规模多输入多输出(MIMO)正交频分多址(OFDMA)下行移动通信系统, 提出了一种基于能效最优的资源分配算法。所提算法在采用迫零(ZF)预编码的情况下, 以最大化系统能效的下界为准则, 同时考虑每个用户的最低速率要求, 通过调整带宽分配、功率分配和基站天线数分配来优化能效函数。首先根据优化条件提出了一种迭代算法确定每个用户的带宽分配, 然后利用分数规划的性质并采用凸优化方法, 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, 所提算法在较少迭代次数的同时能够取得较好的系统能效性能和吞吐量性能。

**关键词:** 无线通信; 大规模多输入多输出; 正交频分多址; 资源分配; 下行系统; 能效

**中图分类号:** TP393.1

**文献标识码:** A

## Energy-efficient resource allocation algorithm for massive MIMO OFDMA downlink system

HU Ying<sup>1,2</sup>, JI Bao-feng<sup>3</sup>, HUANG Yong-ming<sup>1</sup>, YU Fei<sup>1</sup>, YANG Lv-xi<sup>1</sup>

(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;

3. College of Information Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

**Abstract:** An algorithm is proposed for energy-efficient resource allocation scheme in massive MIMO OFDMA downlink mobile communication system. A mathematical formulation of optimization issue is provided with the objective of maximizing system energy efficiency lower bound under the minimum data rate requirement of user, meanwhile the BS uses a zero-forcing(ZF) precoding. And then for optimizing energy efficiency function, the bandwidth allocation, power allocation and the number of antenna arrays at the BS are adjusted synchronously. First, an iterative algorithm derived from optimality condition for bandwidth assignment is proposed. Second, the properties of fractional programming and convex optimization are used to maximize the energy efficiency. Specifically, both the number of antenna arrays at the BS and the transmit data rate at the user are adjusted. Simulation results show that the proposed schemes not only have less iteration number but also have good perform for system energy efficiency and throughput.

**Key words:** wireless communication; massive MIMO; OFDMA; resource allocation; downlink system; energy-efficient

## 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<sup>[1~3]</sup>逐渐转向能效资源分配<sup>[4~15]</sup>。文献[5]

收稿日期: 2014-11-10; 修回日期: 2015-03-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61372101, 61271018, 612001176, 61201172); 国家科技重大专项基金资助项目(2011ZX03003-003-03, 2012ZX03004-005-003, 2013ZX03003006-002); 江苏省科技计划基金资助项目(BE2012167, BK2011019); 教育部博士点新教师基金资助项目(20100092110010)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China(61372101, 61271018, 612001176, 61201172); The National Science and Technology Major Project of China(2011ZX03003-003-03, 2012ZX03004-005-003, 2013ZX03003006-002); Research Project of Jiangsu Province (BE2012167, BK2011019); Ph.D. Programs Foundation of Ministry of Education of China (20100092110010)

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[7]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, 提出了一种基于注水算法的能效多用户功率分配 (EMMPA) 算法, 但该算法计算量较大。文献[13]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, 但在系统的功率消耗中没有考虑电路的功率消耗。文献[14]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最低速率要求。

基于以上分析, 本文研究了多用户大规模 MIMO OFDMA 下行系统能效资源分配问题。首先假设发射端完全已知信道状态信息 (CSI), 并采用迫零 (ZF) 预编码得到系统容量下界表达式, 进而得到能效下界表达式, 在满足每个用户的最低速率要求下, 通过适当的带宽分配、功率分配和基站天线数分配, 最大化系统的能效下界。由于目标函数是非凸的, 需要通过穷举方法获得最优解, 因此本文提出一种低复杂度的次优解, 首先根据用户的最低速率要求和目标函数确定每个用户的带宽分配, 进而在用户带宽分配的基础上联合优化用户发射功率和基站天线数。最后通过仿真验证了所提算法的有效性和优越性。

## 2 系统模型与问题描述

本文考虑一个典型的单小区下行多用户 MIMO-OFDMA 无线通信系统, 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。假设信道为块衰落模型, 设系统中有  $N$  个子载波分成  $V$  个频率块 (其中包含  $\frac{N}{V}$  个子载波) 作为资源调度的基本单元。根据信道的互易性, 由上行链路的信道矩阵  $\mathbf{G}_v = \mathbf{H}_v \mathbf{D}^{\frac{1}{2}}$  ( $\mathbf{H}_v$  表示在频率块  $v$  上用户到基站的  $M \times K$  块衰落矩阵,  $\mathbf{D}^{\frac{1}{2}} = \text{diag}\{\sqrt{\beta_1}, \dots, \sqrt{\beta_K}\}$  表示  $K \times K$  对角阵, 对角元素  $\sqrt{\beta_k}$  表示用户  $k$  到基站的慢衰落系数), 得到下行链路信道矩阵  $\mathbf{G}_v^T = \mathbf{D}^{\frac{1}{2}} \mathbf{H}_v^T$ 。因此, 第  $k$  个用户在第  $v$  个频率块上接收到的信号表达式为

$$\begin{aligned} y_{v,k} &= \mathbf{g}_{v,k}^T \sum_{k=1}^K \sqrt{p_{v,k}} \mathbf{f}_{v,k} x_{v,k} + z_{v,k} \\ &= \mathbf{g}_{v,k}^T \sqrt{p_{v,k}} \mathbf{f}_{v,k} x_{v,k} + \mathbf{g}_{v,k}^T \sum_{i=1, i \neq k}^K \sqrt{p_{v,i}} \mathbf{f}_{v,i} x_{v,i} + z_{v,k} \end{aligned} \quad (1)$$

其中,  $\mathbf{g}_{v,k}$  表示矩阵  $\mathbf{G}_v$  的第  $k$  列,  $\mathbf{f}_{v,k}$  表示用户  $k$  在频率块  $v$  上的预编码矩阵,  $x_{v,k}$  表示用户  $k$  在子载波频率块  $v$  上的发射信号。显然, 式 (1) 第 2 个等号后面的第 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, 最后一项为加性高斯白噪声。

为了消除不同用户间的相互干扰, 本文采用迫零预编码。令预编码矩阵  $\mathbf{F}_v = \mathbf{G}_v^* (\mathbf{G}_v^T \mathbf{G}_v^*)^{-1}$ , 即  $\mathbf{G}_v^T \mathbf{F}_v = \mathbf{I}_K$ 。其中,  $\mathbf{F}_v = [\mathbf{f}_{v,1}, \dots, \mathbf{f}_{v,K}]$ , 因此,  $\mathbf{g}_{v,k}^T \mathbf{f}_{v,i} = \delta_{ki}$ , 即

$$\delta_{ki} = \begin{cases} 1, & k = i \\ 0, & k \neq i \end{cases}$$

因此, 用户  $k$  在频率块  $v$  上的遍历可达速率表达式为

$$r_{v,k} = \mathbb{E} \left\{ \text{Wlb} \left[ 1 + \frac{P_{v,k}}{WN_0 \left[ (\mathbf{G}_v^T \mathbf{G}_v^*)^{-1} \right]_{kk}} \right] \right\} \quad (2)$$

由詹森不等式可以得到用户  $k$  在频率块  $v$  上的速率下界为

$$r_{v,k} \geq \text{Wlb} \left[ 1 + \frac{P_{v,k}}{WN_0 \mathbb{E} \left\{ \left[ (\mathbf{G}_v^T \mathbf{G}_v^*)^{-1} \right]_{kk} \right\}} \right] \quad (3)$$

其中,

$$\begin{aligned} E\left\{\left[\left(\mathbf{G}_v^T \mathbf{G}_v^*\right)^{-1}\right]_{kk}\right\} &= \frac{1}{\beta_k} E\left\{\left[\left(\mathbf{H}_v^T \mathbf{H}_v^*\right)^{-1}\right]_{kk}\right\} \\ &= \frac{1}{K\beta_k} E\left\{\text{tr}\left[\left(\mathbf{H}_v^T \mathbf{H}_v^*\right)^{-1}\right]\right\} \end{aligned} \quad (4)$$

由于  $E\{\text{tr}(\mathbf{W}^{-1})\} = \frac{m}{t-m}$ , 其中,  $\mathbf{W} \sim \mathcal{W}_m(t, I_t)$  是自由度为  $t(t > m)$  的中心复 Wishart 矩阵, 因此  $E\left\{\text{tr}\left[\left(\mathbf{H}_v^T \mathbf{H}_v^*\right)^{-1}\right]\right\} = \frac{K}{M-K}$ .

综上可知, 用户  $k$  在频率块  $v$  上的速率下界可表示为

$$r_{v,k} = \text{Wlb}\left[1 + \frac{p_{v,k}(M-K)\beta_k}{WN_0}\right] \quad (5)$$

图 1 给出了式 (2) 和式 (5) 对用户数  $k$  和频率块数  $v$  求和的系统吞吐量, 这里假设用户数  $K=12$ , 其中, 理论值是对式 (2) 进行求和, 推导值是对式 (5) 进行求和。从图中可以看出推导的速率表达式的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。

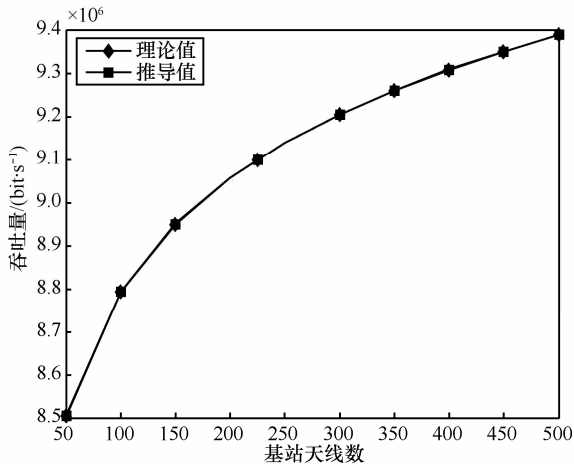


图 1 吞吐量比较

由式 (5) 可以看出, 用户在每个频率块上分配的速率仅和用户的大尺度衰落有关系, 因此, 用户  $k$  分配到的速率可以表示为

$$r_k = m_k \text{Wlb}\left[1 + \frac{p_k(M-K)\beta_k}{WN_0}\right] \quad (6)$$

其中,  $m_k$  表示用户  $k$  分配到的频率块数,  $p_k$  表示用户  $k$  的发射功率。因此系统能效函数下界可以表示为

$$U = \frac{\sum_{k=1}^K r_k}{\sum_{k=1}^K m_k p_k + Mp_C} = \frac{\sum_{k=1}^K m_k \text{Wlb}\left[1 + \frac{p_k(M-K)\beta_k}{WN_0}\right]}{\sum_{k=1}^K m_k p_k + Mp_C} \quad (7)$$

其中,  $p_C$  表示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<sup>[16]</sup>。

基于以上分析, 下行多用户大规模 MIMO OFDMA 系统中的能效资源分配所对应的约束最大化问题可以表述如下。

优化问题:  $\max_{\mathbf{P}, \mathbf{m}, M} U(\mathbf{P}, \mathbf{m}, M)$

约束条件:

$$\begin{cases} r_k \geq R_{\min} \\ \sum_{k=1}^K m_k = V \end{cases} \quad \text{即} \quad \begin{cases} m_k \text{Wlb}\left[1 + \frac{p_k(M-K)\beta_k}{WN_0}\right] \geq R_{\min} \\ \sum_{k=1}^K m_k = V \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $\mathbf{P} = [p_1, \dots, p_k, \dots, p_K]^T$  表示发射功率向量,  $\mathbf{m} = [m_1, \dots, m_k, \dots, m_K]^T$  表示用户分配到的频率块数向量,  $R_{\min}$  为用户的最低速率约束。

### 3 大规模 MIMO OFDMA 下行系统能效资源分配

由式 (8) 所描述的优化问题包括用户频率块数分配即带宽分配、功率分配和基站最优天线数分配几个部分, 采用穷举方法获得最优解的复杂度很高, 通常难以实现。因此本节采用次优的资源分配方法, 首先确定每个用户的带宽分配, 然后对用户进行功率分配和基站天线数的分配。

#### 3.1 基于最低速率要求下能效最大化带宽分配算法 (BABEE)

本文提出了一种基于最低速率要求下能效最大化的带宽分配算法 (BABEE)。由优化目标函数可知带宽分配的目标函数可以表示为

$$m_k = \max_m \frac{\sum_{k=1}^K m_k \text{Wlb}\left[1 + \frac{p_k(M-K)\beta_k}{WN_0}\right]}{\sum_{k=1}^K m_k p_k + Mp_C} \quad (9)$$

BABEE 算法描述如下。

初始化 用户发射功率向量  $\mathbf{P}_0$ , 根据  $\mathbf{P}_0$  得到初始化的速率分配  $\mathbf{R}_0$

$$m_k \leftarrow \left\lceil \frac{R_{\min}}{R_0(k)} \right\rceil$$
 While  $\sum_{k=1}^K m_k > V$   
 do {  $k^* \leftarrow \arg \max_{1 \leq k \leq K} m_k$ ,  $m_{k^*} \leftarrow 0$  }  
 end While  
 While  $\sum_{k=1}^K m_k < V$   
 do {  $Q_k = \frac{(m_k + 1)W \text{lb} \left[ 1 + \frac{p_k(M-K)\beta_k}{WN_0} \right]}{(m_k + 1)p_k + Mp_c} - \frac{m_k W \text{lb} \left[ 1 + \frac{p_k(M-K)\beta_k}{WN_0} \right]}{m_k p_k + Mp_c}$   
 $l \leftarrow \arg \max_{1 \leq k \leq K} Q_k$   
 $m_l = m_l + 1$  }  
 end while

### 3.2 基于最低速率要求下能效最大化资源分配算法 (RABEE)

由于能效函数是一个分数形式，且是非凸的，因此本文考虑采用分数规划的性质把分数形式转化成减数形式，并证明该减数形式的目标函数关于  $(\mathbf{P}, M)$  是联合凹的，进而转化成凸优化的问题。

由文献[17]可知，根据分数规划的性质，分数形式的目标函数 (7) 可以转换成减数形式

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

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

因此，目标函数式可以转换为优化问题：

$$\begin{aligned}
 F(q) &= \max_{M, \mathbf{P}} R(\mathbf{P}, M) - q [P_T(\mathbf{P}) + P_C(M)] \\
 &= \max_{M, \mathbf{P}} \sum_{k=1}^K m_k W \text{lb} \left[ 1 + \frac{p_k(M-K)\beta_k}{WN_0} \right] - q \left( \sum_{k=1}^K m_k p_k + Mp_c \right) \\
 &\approx \max_{M, \mathbf{P}} \sum_{k=1}^K m_k W \text{lb} \left[ \frac{p_k(M-K)\beta_k}{WN_0} \right] - q \left( \sum_{k=1}^K m_k p_k + Mp_c \right)
 \end{aligned} \tag{10a}$$

约束条件：

$$m_k W \text{lb} \left[ \frac{p_k(M-K)\beta_k}{WN_0} \right] \geq R_{\min} \tag{10b}$$

假设

$$\begin{aligned}
 f &= R(\mathbf{P}, M) - q [P_T(\mathbf{P}) + P_C(M)] \\
 &= \sum_{k=1}^K m_k W \text{lb} \left[ \frac{p_k(M-K)\beta_k}{WN_0} \right] - q \left( \sum_{k=1}^K m_k p_k + Mp_c \right)
 \end{aligned}$$

函数  $f$  的海森矩阵为

$$\mathbf{H}(f) = \begin{bmatrix} -\frac{m_k W}{p_k^2 \ln 2} & 0 \\ 0 & -\sum_{k=1}^K \frac{m_k W}{(M-K)^2 \ln 2} \end{bmatrix}$$

很明显， $\mathbf{H}(f)$  是负定的矩阵，此时，函数  $f$  对于  $(\mathbf{P}, M)$  是联合凹的，从而能够利用凸优化的方法求解。因此，目标函数的拉格朗日函数可以表示为

$$\begin{aligned}
 L(\lambda, \mathbf{P}, M) &= \sum_{k=1}^K m_k W \text{lb} \left[ \frac{p_k(M-K)\beta_k}{WN_0} \right] - q \left[ \sum_{k=1}^K m_k p_k + Mp_c \right] + \\
 &\quad \sum_{k=1}^K \lambda_k \left\{ m_k W \text{lb} \left[ \frac{p_k(M-K)\beta_k}{WN_0} \right] - R_{\min} \right\}
 \end{aligned} \tag{11}$$

其中， $\lambda_k \geq 0$ ，为约束条件式 (10b) 对应的拉格朗日乘子。因此，式 (10) 的对偶问题可以表示为

$$\min_{\lambda \geq 0} \max_{\mathbf{P}, M} L(\lambda, \mathbf{P}, M) \tag{12}$$

给定  $\lambda$ ，采用 KKT 条件，最优的发射功率  $\mathbf{P}^*$  和基站天线数  $M^*$  可以表示为

$$\frac{\partial L}{\partial p_k} = \frac{m_k W}{\ln 2 \cdot p_k} - q m_k + \frac{\lambda_k m_k W}{\ln 2 \cdot p_k} = 0 \Rightarrow p_k^* = \frac{(1 + \lambda_k) W}{\ln 2 \cdot q} \tag{13}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial L}{\partial M} &= \frac{W \sum_{k=1}^K m_k}{\ln 2(M-K)} - q p_c + \frac{W \sum_{k=1}^K \lambda_k m_k}{\ln 2(M-K)} \\
 = 0 &\Rightarrow M^* = \left\lceil \frac{\left( V + \sum_{k=1}^K m_k \lambda_k \right) W}{\ln 2 \cdot q p_c} + K \right\rceil
 \end{aligned} \tag{14}$$

其中， $\lceil \cdot \rceil$  表示向上取整。

拉格朗日乘子  $\lambda$  则通过递推的方式得到

$$\lambda_k(j+1) = \left[ \lambda_k(j) - \delta \left[ m_k \text{Wlb} \left( \frac{p_k(M-K)\beta_k}{WN_0} \right) - R_{\min} \right] \right]^+ \quad (15)$$

其中,  $j$  表示迭代次数,  $\delta$  表示迭代步长。采用文献[17]中的 Dinkelbach 方法, 提出了一种迭代方法, 具体算法描述如下。

- 1) 初始化  $\mathbf{P}^* = \mathbf{P}_0, M^* = M_0, q^* = 0, \lambda = 0, \delta = \delta_0, \varepsilon = 0.01$
  - 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 (15) 更新拉格朗日乘子
  - 5) 采用式 (13) 得到功率分配
  - 6) 采用式(14) 得到基站天线数
  - Return  $q^*, \mathbf{P}^*, M^*$
- 算法收敛性的证明参见文献[11]。

## 4 仿真结果与算法复杂度分析

### 4.1 仿真结果与分析

仿真中设定小区半径为 1 000 m 的六边形, 用户随机分配在距离基站 100 m 以外的范围, 第  $k$  个用户到基站的大尺度衰落为  $\beta_k = z_k / (r_k / r_h)^u$ , 其中,  $z_k$  是标准差为  $\sigma_{\text{shadow}}$  的对数正态随机变量,  $r_k$  是用户到基站的距离,  $u$  是路径损耗指数。具体系统参数如表 1 所示。

表 1 系统参数值	
参数	值
总带宽	2.56 MHz
频率块数	128
噪声密度 $N_0$	-131 dBW/MHz
$\sigma_{\text{shadow}}$	8 dB
$u$	3.8
基站端每根天线的电路功率消耗 $P_c$	100 mW
用户初始化的发射功率 $\mathbf{P}_0$	$[0.1, \dots, 0.1]^T$ mW
基站天线数初始值 $M_0$	$K+1$ ( $K$ 表示用户数)
步长 $\delta$	$10^{-4}$
每个用户的速率要求 $R_{\min}$	$\frac{3.0 \times 10^7}{k}$ bit/s ( $K$ 表示用户数)

为了更好地进行算法的性能比较, BABS 算法

中带宽分配采用文献[18]中提出的基于信噪比的带宽分配算法 (BABS), 功率分配和基站天线分配数采用本文提出的 RABEE 算法; EMMPA 算法中带宽分配首先采用平均分配的方法, 剩余的频率块分配给信道条件较好的用户即大尺度衰落因子最大的用户, 功率分配和基站天线数分配则采用文献[12]提出的 EMMPA 算法, 该算法是在没有任何约束条件下通过调整用户发射功率来最大化系统能效的, 仿真中假设该算法基站天线数为  $K+1$ ,

$$\text{功率分配为 } p_k = \left[ \mu - \frac{WN_0}{(M-K)\beta_k} \right]^+.$$

图 2 给出了不同用户数情况下各算法的能效性能。从图中可以看出本文算法的性能介于 EMMPA 算法和 BABS 算法之间, 这是因为 EMMPA 算法是在没有任何约束条件下最大化系统能效, 因此该算法的能效性能最好, 而 BABS 算法是基于信噪比的带宽分配算法, 因此该算法的能效性能比本文算法的能效性能差。从图中还可以看出, 随着用户数的增加, 系统能效性能逐渐降低, 这是因为随着用户数的增加, 每个用户能够分配到的带宽逐渐减小, 需要通过增加发射功率来满足用户的最低速率要求, 而对于 EMMPA 算法, 虽然没有速率要求, 但是带宽平均分配会导致信道条件较好的用户分配到的带宽逐渐减少, 从而降低了系统能效。同时随着用户数的增加, 由用户速率最低要求分配的带宽

$m_k \leftarrow \left\lceil \frac{R_{\min}}{R_0(k)} \right\rceil$  将会占据本文算法和 BABS 算法这 2 种带宽分配算法的主导地位, 从而导致它们的能效性能差距越来越小。

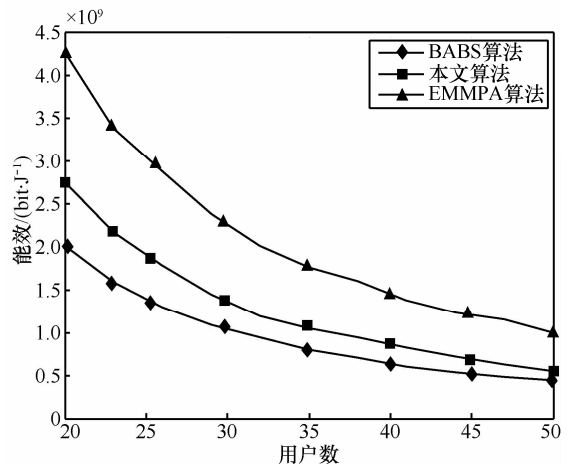


图 2 不同用户数情况下各算法的能效性能

图 3 给出了不同用户数情况下各算法的吞吐量性能。从图中可以看出，本文算法的吞吐量性能较好，这是因为 EMMPA 算法对用户没有速率要求，只是最大化系统能效，因此系统的吞吐量较低；而 BABS 算法采用的宽带分配方法是最大化发射功率的，因此系统的吞吐量性能较本文算法的低。从图中还可以看出，随着用户数的增加，系统吞吐量性能逐渐增加，这是因为随着用户数增加，系统多用户分集特性更加明显。因此，本文算法既有较好的系统能效性能，又有较好的系统吞吐量性能。

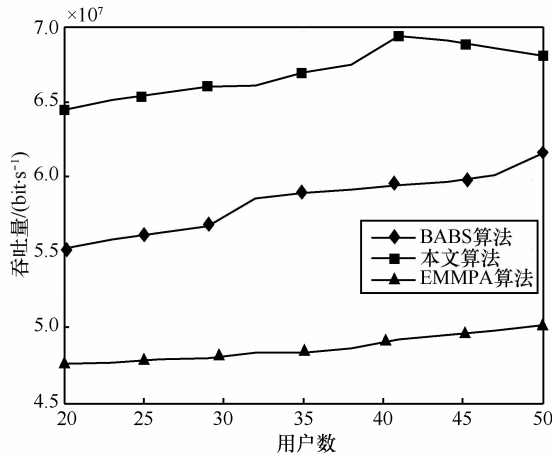


图 3 不同用户数情况下各算法的吞吐量性能

图 4 给出了不同用户数情况下各算法的最优基站天线数性能。从图中可以看出，随着用户数的增加，系统所需要的最优基站天线数逐渐增加。EMMPA 算法中并没有优化天线数，仅仅通过改变发射功率来最优化能效，因此基站天线数总是等于  $K + 1$ ，BABS 算法和本文算法的最优基站天线数很接近。

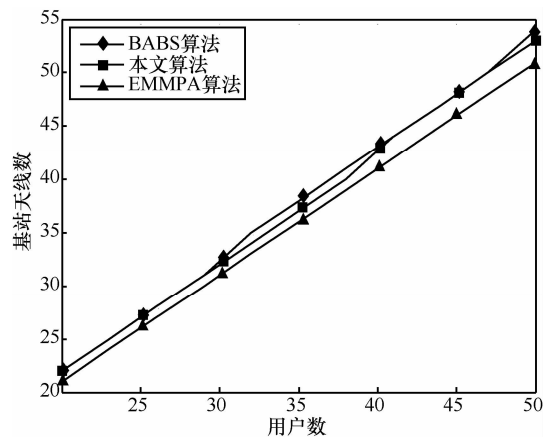


图 4 不同用户数情况下各算法的最优基站天线数性能

图 5 给出了不同用户数情况下各算法的发射功率性能。从图中可以看出，随着用户数的增加，BABS 算法和本文算法所需要的发射功率随用户数的增加较快。这是因为 BABS 算法和本文算法考虑用户最低速率要求，而 EMMPA 算法无任何约束条件。

图 6 给出了不同频率块数情况下各算法的能效性能。从图中可以看出，本文算法的能效性能随频率块数的增加较快，而 BABS 算法和 EMMPA 算法的能效性能随频率块数的增加较慢。这是因为本文算法中采用了 BABEE 带宽分配算法，该算法使能效性能随频率块数的增加而大大增加，而 BABS 算法和 EMMPA 算法中带宽分配算法的性能随频率块数的增加变化不明显。从图中还可以看出，随着频率块数的增加，本文算法的性能较接近 EMMPA 算法的性能，这是因为本文算法中采用的 BABEE 带宽分配算法能够较好地实现系统的多用户分集增益。

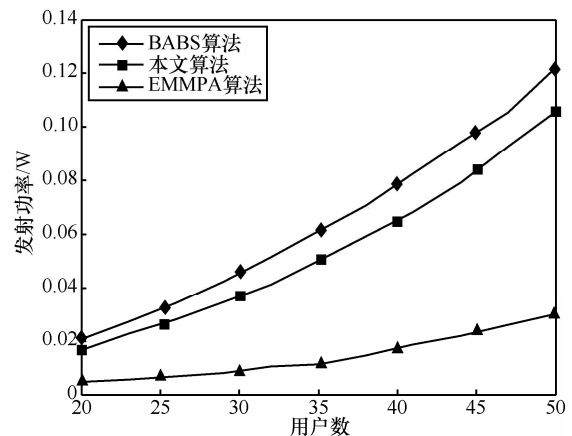


图 5 不同用户数情况下各算法的发射功率性能

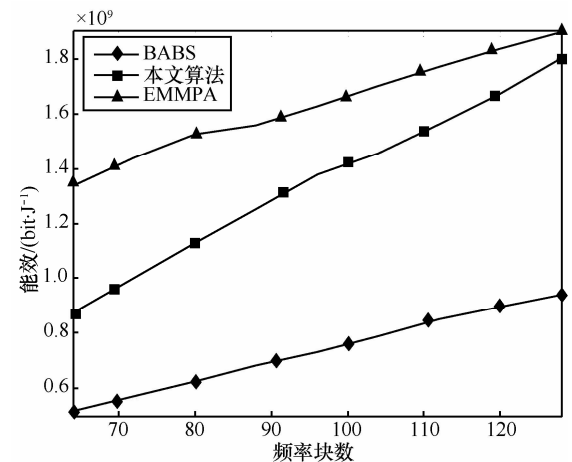


图 6 不同频率块数情况下各算法的能效性能

### 4.2 算法复杂度分析

BABS 算法是基于信噪比的带宽分配算法，带宽分配时  $K$  个用户迭代  $V$  次，因此带宽分配计算复杂度为  $O(KV)$ ，本文算法中带宽分配的计算复杂度为  $O\left(1+K\left[V-\sum_{k=1}^K\left[\frac{R_{\min}}{R_0(k)}\right]\right]\right)$ ；假设 RABEE 算法中更新拉格朗日因子的计算复杂度为  $O(I_\lambda)$ ，进行基站天线数和功率分配的计算复杂度为  $O(I_{AP})$ ，因此 RABEE 算法复杂度为  $O(KI_{AP}I_\lambda)$ 。EMMPA 算法中带宽分配计算复杂度为  $O\left(1+K\left(\text{mod}\left(\frac{V}{K}\right)\right)\right)$ ，其中， $\text{mod}$  表示除式取余；功率分配中假设步长因子为  $\alpha$ ，得到全局最优的  $\mu^*$ ，至少需要  $\left\lceil \text{lb}\left(\frac{(\alpha-1)\mu^*}{\varepsilon}-1\right)\right\rceil$  次迭代，其中， $|\mu-\mu^*|<\varepsilon$ ，因此该功率分配的计算复杂度为  $O\left(K\left\lceil \text{lb}\left(\frac{(\alpha-1)\mu^*}{\varepsilon}-1\right)\right\rceil\right)$ 。综上可知，BABS 算法计算复杂度为  $O(KV+KI_{AP}I_\lambda)$ ，本文算法计算复杂度为  $O\left(1+K\left[V-\sum_{k=1}^K\left[\frac{R_{\min}}{R_0(k)}\right]\right]+KI_{AP}I_\lambda\right)$ ，EMMPA 算法计算复杂度为  $O\left(1+K\left(\text{mod}\left(\frac{V}{K}\right)\right)+K\left\lceil \text{lb}\left(\frac{(\alpha-1)\mu^*}{\varepsilon}-1\right)\right\rceil\right)$ 。

### 5 结束语

本文对多用户大规模 MIMO OFDMA 下行系统中能效资源分配问题进行了研究。在满足每个用户的最低速率要求下，以最大化系统能效下界为目标建立了相应的优化数学模型。由于全局最优解需要通过穷举获得，复杂度较高，因此将整个优化过程分成 2 步来完成。首先根据每个用户的最低速率要求和最大化系统能效的目标函数确定每个用户的带宽分配，进而在用户带宽分配的基础上联合优化用户发射功率和基站天线数。所提算法在满足用户 QoS 要求的前提下，获得了较好的能效性能和吞吐量性能。

### 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 C X, YANG L X. 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, BENGTTSSON 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 B, FANG X M, CHEN X. 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 Y, HUANG Y M, YU F, *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 and Li S Q. Energy-efficient resource allocation for downlink OFDMA systems[A]. IEEE International Conference on Communications (ICC) [C]. Budapest, Hungary, 2013. 391-395.  
[7] 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.  
[8] HO C Y, 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: 673-688.  
[9] ZARAKOVITIS C C, NI Q. Energy-efficient design for communication systems: resolutions on inverse resource allocation principles[J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(12): 2264-2267.  
[10] ZHANG G P, LIU P, 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.  
[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): 1-10.  
[12] MIAO G W. Energy-efficient uplink multi-user MIMO[J]. IEEE Transaction on Wireless Communications, 2013, 12(5): 2302-2313.  
[13] NGO H Q, LARSSON E G, MARZETTA T L. Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO systems[J]. IEEE Transaction on Communications, 2013, 61(4): 1436-1449.  
[14] NG D W K, LO E S, SCHÖBER 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.  
[15] NG D W K, LO E S, SCHÖBER R. Energy-efficient resource allocation for secure OFDMA systems[J]. IEEE Transaction on Vehicle Technology, 2012, 61(6): 2572-2585.  
[16] CUI S G, GOLDSMITH A, 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.

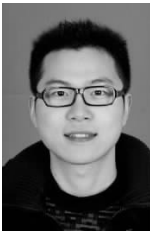
[17] DINKELBACH W. On nonlinear fractional programming[J]. Management Science, 1967, 13(7): 492-498.

[18] KIVANC D, LI G Q, LIU H. Computationally efficient bandwidth allocation and power control for OFDMA[J]. IEEE Transaction on Wireless Communications, 2003, 2(6): 1150-1158.

#### 作者简介:



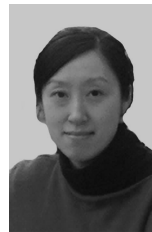
**胡莹** (1981-), 女, 江苏金坛人, 东南大学博士生, 江苏科技大学讲师, 主要研究方向为 MIMO 通信信号处理、多用户信号处理、绿色通信和动态资源分配。



**冀保峰** (1985-), 男, 河南洛阳人, 河南科技大学讲师, 主要研究方向为无线局域网、无线通信中的中继技术、协作通信等。



**黄永明** (1977-), 男, 江苏吴江人, 东南大学副教授, 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** (1980-), 女, 江苏南京人, 东南大学讲师, 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** (1964-), 男, 安徽桐城人, 东南大学教授、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。