



大规模 MIMO 系统中基于能效最大化的资源联合优化算法

曹海燕¹, 冯瑞瑞¹, 方昕¹, 王秀敏², 许方敏¹

(1. 杭州电子科技大学通信工程学院, 浙江 杭州 310018;

2. 中国计量大学信息工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 针对信道条件未知的多小区大规模多输入多输出 (MIMO) 系统, 提出一种对导频序列长度、导频符号功率以及数据符号功率进行联合优化的资源分配算法。采用最大比合并 (MRC) 接收, 考虑电功率和导频污染的影响, 并对最大传输功率进行约束从而建立起以能效 (EE) 最大化为目标的非凸函数模型。根据分数规划的性质, 首先将分数形式转化成减式形式, 进而分解成一系列凸函数之差 (DC) 的问题, 最后采用交替优化算法联合调整 3 个变量从而达到能效最大化的目标。仿真结果表明, 随着最大符号传输功率的增加, 所提方案仍然能保持良好系统能效性能。

关键词: 大规模 MIMO; 导频序列; 资源分配; 联合优化; DC 问题

中图分类号: TN911.22

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2017317

A joint optimization algorithm based on energy efficiency maximization for massive MIMO systems

CAO Haiyan¹, FENG Ruirui¹, FANG Xin¹, WANG Xiumin², XU Fangmin¹

1. Telecommunication Engineering School, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China

2. Information Engineering School, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China

Abstract: For the massive multi-cell multi-input multiple-output (MIMO) communication uplink system with unknown channel status information, a resource allocation algorithm which jointly optimizes the pilot sequence length, pilot symbol power and data symbol power was proposed. With the maximum ratio combining (MRC) receiver, the influence of circuit power was considered, pilot contamination and the constraint of maximum transmission power, and a nonconvex function modeled with the goal of maximizing energy efficiency (EE) was established. Firstly, the fractional form was transformed into an equivalent subtractive form by using the properties of fractional programming and then decomposed into a series of DC problems, finally, by using an iterative optimization algorithm, the three variables were alternately adjusted with maximizing the energy efficiency. Simulation results show that with the increasing of the maximum symbol transmission power, the proposed scheme can still have the great EE performance for the massive MIMO systems.

Key words: massive MIMO, pilot sequence, resource allocation, joint optimize, DC problem

收稿日期: 2017-08-07; 修回日期: 2017-09-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61501158, No.61379027); 浙江省教育厅科学基金资助项目 (No.LY14F010019, No.LQ15F01004)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(No.61501158, No.61379027), Education Department Foundation of Zhejiang Province of China (No.LY14F010019, No.LQ15F01004)

1 引言

近年来随着无线通信设备和多媒体业务要求的提高,无线通信网络中的业务量急剧增加,大规模多输入多输出(multi-input multiple-output, MIMO)技术由于其具有空间分集的特点,可以大幅度提高系统吞吐量和传输可靠性,因此受到学术界和工业界的广泛关注^[1-4]。然而,大规模 MIMO 系统随着天线数目的增加,能量消耗也随之增加,因此如何提高大规模 MIMO 系统的能量效率(energy efficiency, EE)成为研究的热点^[5-15]。参考文献[6]研究了单小区大规模 MIMO 系统上下行链路的能量效率模型,并且通过凸理论分析了系统参数之间的相互作用。参考文献[7]研究了大规模 MIMO 混合预编码下的能效优化问题,并通过迭代算法得出了最优的射频链路数。参考文献[8]针对大规模多输入多输出正交频分复用(MIMO-orthogonal frequency division multiplexing, MIMO-OFDM)系统,设计了包括功率分配、数据速率分配、天线分配和子载波分配的联合资源分配方案,但是这些研究都是在假设信道状态信息(channel status information, CSI)完全已知的情况下进行的。而实际的通信系统要想获知 CSI 需要利用导频序列进行信道估计。参考文献[10]针对迫零(zero forcing, ZF)预编码的分布式 MIMO 系统,研究了能效为目标的功率分配问题,并且考虑了信道估计。典型的大规模 MIMO 上行传输系统包含两个阶段:上行导频和数据传输。参考文献[11,12]在对大规模 MIMO 系统进行研究时,假设上行导频和数据传输两个阶段消耗相同的符号功率。然而这种等功率分配方案在低功率情况下会造成“平方效应”,当传输功率下降时,系统的容量会双倍地降低。参考文献[12,13]研究了大规模 MIMO 系统的能效资源分配问题,但是没有考虑实际的电功率消耗,而是将其直接忽略或者

用一个常数值来代替。参考文献[14,15]提出了实际的电功率消耗模型,其中,参考文献[14]研究了功率消耗参数对 EE 的影响,参考文献[15]则提出了针对 MIMO-OFDM 系统的能效资源分配算法。然而参考文献[12-15]都没有考虑实际情况中的导频复用问题,进而忽略了系统的导频污染。参考文献[16]针对采用下行导频的多小区 MIMO 系统,研究了导频污染对 EE 的影响,但是没有研究导频符号功率以及数据符号功率对 EE 的影响。参考文献[17]针对多小区 MIMO 系统的资源分配问题,考虑了不同的导频功率和数据功率分配,但是将功率约束的不等式条件简化成了等式,从而得出一个固定的导频长度。参考文献[18]针对导频复用的多小区 MIMO 系统,研究了包含基站天线数、导频符号和数据符号的资源分配,但同样忽略了导频长度对 EE 的影响。

基于以上分析,本文针对多小区大规模 MIMO 系统的能效资源分配问题进行研究。不同于已有研究中将导频和数据进行等功率分配,将导频长度设为定值的情况,本文提出了对导频符号功率、数据符号功率以及导频序列长度进行联合优化的迭代算法,并与传统资源分配算法进行了比较。仿真结果表明,所提方案相比于已有的等功率分配方案,在符号传输功率限制较大的情况下仍然能保持良好的能效性能。

2 系统模型与问题描述

考虑由 L 个小区组成的多小区大规模 MIMO 上行通信系统,小区基站(base station, BS)均配有 M 根天线,服务小区内的 $K(K \ll M)$ 个单天线用户。假设 L 个小区工作在同一个频段,CSI 未知,且认为信道状态在符号长度为 T_{symbol} 的连续时间间隔保持不变,如图 1 所示,其中 τ 表示导频序列长度, p_p 表示导频符号功率, p_d 表示数据符号功率。

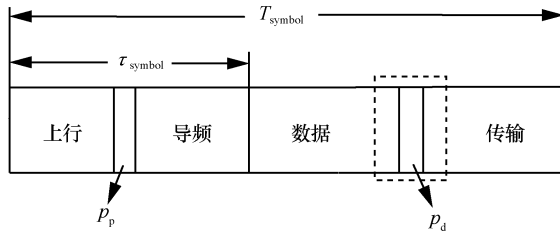


图1 连续时间间隔内的数据传输过程

2.1 上行导频

基站端通过接收用户发送的导频序列进行信道估计。小区内 K 个用户拥有 K 个相互正交符号长度为 $\tau (K \leq \tau \leq T)$ 的导频序列，由于 T 长度有限， L 个小区需要共用同一套导频序列，这就导致了导频污染的产生^[19]。

令 $\mathbf{G}_{li} \in \mathbb{C}^{M \times K}$ 表示第 l 个小区基站和第 i 个小区的 K 个用户之间的信道矩阵，则 $\mathbf{G}_{li}$ 的第 $(m \times k)$ 个元素可以表示成：

$$\mathbf{g}_{limk} = \mathbf{h}_{limk} \sqrt{\beta_{lik}} \quad (1)$$

其中， $\mathbf{h}_{limk} \sim CN(0,1)$ 表示第 l 个小区基站的第 m 个天线和第 i 个小区的第 k 个用户之间的小尺度衰落系数。 $\sqrt{\beta_{lik}}$ 代表大尺度衰落因子，假设在长度为 T 的连续时间间隔内 $\sqrt{\beta_{lik}}$ 保持恒定，且大小已知。

利用最小均方误差 (minimum mean square error, MMSE) 对信道进行估计，则 $\mathbf{G}_{li}$ 的第 k 列可以表示为^[12]：

$$\tilde{\mathbf{g}}_{lik} = \beta_{lik} \left(\sum_{i=1}^L \beta_{lik} + \frac{1}{\tau p_p} \right)^{-1} \left(\sum_{i=1}^L \mathbf{g}_{lik} + \frac{\mathbf{w}_{lk}}{\sqrt{\tau p_p}} \right) \quad (2)$$

其中， $\mathbf{w}_{lk} \sim CN(0, \mathbf{I}_M)$ 为加性高斯白噪声。

2.2 数据传输

用户均以符号功率 p_d 向 BS 发送数据。令 $\sqrt{p_d} \mathbf{x}_i \in \mathbb{C}^{K \times 1}$ 表示第 i 个小区 K 个用户的发送信号向量，则第 l 个小区 BS 的接收信号可以表示为：

$$\mathbf{y}_l = \sqrt{p_d} \sum_{i=1}^L \mathbf{G}_{li} \mathbf{x}_i + \mathbf{n}_l \quad (3)$$

其中， $\mathbf{n}$ 表示 $M \times 1$ 维的加性高斯白噪声。假设信道估计准确，基站端采用 MRC 接收：

$$\tilde{\mathbf{g}}_{lik}^H \mathbf{y}_l = \sqrt{p_d} \tilde{\mathbf{g}}_{lik}^H \mathbf{g}_{lik} \mathbf{x}_{lk} + \sqrt{p_d} \sum_{j \neq k} \tilde{\mathbf{g}}_{lik}^H \mathbf{g}_{lij} \mathbf{x}_{lj} + \sqrt{p_d} \sum_{i \neq l} \tilde{\mathbf{g}}_{lik}^H \mathbf{G}_{li} \mathbf{x}_i + \tilde{\mathbf{g}}_{lik}^H \mathbf{n}_l \quad (4)$$

式 (4) 中 $\sqrt{p_d} \tilde{\mathbf{g}}_{lik}^H \mathbf{g}_{lik} \mathbf{x}_{lk}$ 为期望的有用信号， $\sqrt{p_d} \sum_{j \neq k} \tilde{\mathbf{g}}_{lik}^H \mathbf{g}_{lij} \mathbf{x}_{lj}$ 为小区内干扰， $\sqrt{p_d} \sum_{i \neq l} \tilde{\mathbf{g}}_{lik}^H \mathbf{G}_{li} \mathbf{x}_i$ 为小区间干扰。利用詹森不等式和随机矩阵理论^[12]，得到第 l 个小区第 k 个用户遍历可实现速率下界：

$$R_{lk}(\tau, p_p, p_d) = B \left(1 - \frac{\tau}{T} \right) \log \left(1 + \frac{a_k \tau p_p p_d}{b_k \tau p_p p_d + c_k p_d + d_k \tau p_p + 1} \right) \quad (5)$$

其中， $a_k \triangleq \beta_{lik}^2 (M-1)$ ， $b_k \triangleq (M-1) \sum_{i \neq l} \beta_{lik}^2 -$

$$\sum_{i=1}^L \beta_{lik}^2 + \left(\sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^K \beta_{lij} \right) \sum_{i=1}^L \beta_{lik} \quad , \quad c_k \triangleq \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^K \beta_{lij} \quad ,$$

$d_k \triangleq \sum_{i=1}^L \beta_{lik}$ 。由于本文主要研究 R_{lk} 和变量 τ 、 p_p 、 p_d 的关系，因此假设其他因子均为已知，并将式 (5) 中的已知项作为整体表示，方便后续的求解。

2.3 功率消耗模型

大规模 MIMO 系统中的功率消耗可分为 3 个方面^[18]。

(1) 用户端的功率放大

如果 η 表示用户端的功率放大效率，则用于传输导频和数据的总功率可以表示为：

$$P_1 = \frac{K}{\eta T} (\tau p_p + (T - \tau) p_d) \quad (6)$$

(2) BS 和用户端电功率消耗

可以归类为 4 个主要的方面：信号的处理和收发、信道估计、线性检测和信道的编码和解码，即：

$$P_2 = MP_{tb} + K(P_{tu} + P_{cod} + P_{dec}) + \frac{2MKB}{F} \quad (7)$$

其中， P_{tb} 为 BS 端每根天线的传输链功率消耗， P_{tu} 为每个用户端传输链功率消耗， P_{cod} 为信

道编码功率, P_{dec} 为信道解码功率, F 为基站端计算效率, P_{site} 为其他特定的功率消耗。

(3) 其他特定功率消耗

如功率供给, 数模、模数转换, 回程操作等。这部分利用一个固定值 P_{site} 代替。利用式(6)、式(7)得到大规模 MIMO 系统总功率消耗的计算式:

$$P_{\text{tot}}(\tau, p_p, p_d) = \frac{K}{\eta T} (\tau p_p + (T - \tau) p_d) + MP_{\text{th}} + K(P_{\text{tu}} + P_{\text{cod}} + P_{\text{dec}}) + \frac{2MKB}{F} + P_{\text{site}} \quad (8)$$

3 最大化 EE 资源分配算法

3.1 目标问题

利用式(5)和式(10), 第 l 个小区上行传输系统的 EE 计算式为:

$$EE(\tau, p_p, p_d) = \frac{\sum_{k=1}^K R_{lk}(\tau, p_p, p_d)}{P_{\text{tot}}(\tau, p_p, p_d)} \quad (9)$$

实际通信系统中, 实现 EE 最大化目标的同时还需要考虑实际的功率限制和导频序列长度。基于以上分析, 最终的目标问题为:

$$Q_1 = \max_{\{\tau, p_p, p_d\}} \frac{\sum_{k=1}^K R_{lk}(\tau, p_p, p_d)}{P_{\text{tot}}(\tau, p_p, p_d)} \quad (10)$$

s.t. C1: $\tau p_p + (T - \tau) p_d \leq TP_{\text{max}}$
 C2: $K \leq \tau \leq T$
 C3: $p_p \geq 0, p_d \geq 0$

其中, C1 为传输功率限制, P_{max} 表示用户在一个连续时间间隔内的最大符号传输功率。C2 表示导频序列长度约束。

由式(10)可知, Q_1 中的目标函数为分数形式, 分子分母均为目标变量 (τ, p_p, p_d) 的非线性函数, 且三者相互联系, 是一个复杂的非凸优化问题。

基于分数规划的性质, 目标函数中的非线性分数规划问题可以转化成等价的减式形式^[20]:

$$Q_2 = \max_{\{\tau, p_p, p_d\}} \sum_{k=1}^K R_{lk} - q P_{\text{tot}} \quad (11)$$

s.t. C1 ~ C3

其中, q 是一个辅助的实数变量, 如果约束条件 C1~C3 为凸约束, 则最佳的资源分配组合 (τ^*, p_p^*, p_d^*) 满足定理 1^[20]。

定理 1 假设 q^* 为目标问题 Q_1 的解, 即最佳 EE 值:

$$q^* = \frac{\sum_{k=1}^K R_{lk}(\tau^*, p_p^*, p_d^*)}{P_{\text{tot}}(\tau^*, p_p^*, p_d^*)} \quad (12)$$

当且仅当等式 $Q_2(q^*) = 0$ 成立, 即:

$$\sum_{k=1}^K R_{lk}(\tau^*, p_p^*, p_d^*) - q^* P_{\text{tot}}(\tau^*, p_p^*, p_d^*) = 0 \quad (13)$$

定理 1 说明, 使等式 $Q_2(q) = 0$ 成立的解即最大化 EE 的解。

3.2 求解 Q_2

对于给定的 q 值, Q_2 中的目标函数 $\sum_{k=1}^K R_{lk} - q P_{\text{tot}}$ 仍是一个复杂的非凸函数, 为了解决该问题, 本文提出了一个交替优化迭代算法(算法 1)。将目标函数分解成 3 个子问题, 依次固定 τ 、 p_p 、 p_d 三变量中的两者, 对剩余的单变量进行优化, 依次循环, 收敛性证明见参考文献[21], 算法 1 的具体描述如下。

步骤 1 给定 q , 初始化 $\tau = \tau_0$, $p_p = p_{p_0}$, $p_d = p_{d_0}$

步骤 2 输入 (p_{p_0}, p_{d_0}) , 以 Q_2 为目标函数优化 τ 从而更新 τ_0 :

$$\tau_0 \leftarrow \operatorname{argmax} \{Q_2(\tau, p_{p_0}, p_{d_0})\}$$

步骤 3 输入 (τ_0, p_{d_0}) , 以 Q_2 为目标函数优化 p_p 从而更新 p_{p_0} :

$$p_{p_0} \leftarrow \operatorname{argmax} \{Q_2(\tau_0, p_p, p_{d_0})\}$$

步骤 4 输入 (τ_0, p_{p_0}) , 以 Q_2 为目标函数优化 p_d 从而更新 p_{d_0} :

$$p_{d_0} \leftarrow \operatorname{argmax} \{Q_2(\tau_0, p_{p_0}, p_d)\}$$



步骤 5 循环至收敛

步骤 6 return $(\tau_0, p_{p_0}, p_{d_0})$

算法 1 中步骤 2~步骤 4 均为 DC 问题, 因此可利用标准 DC 规划算法^[22]来解决。以步骤 2 为例进行证明, 给定初始值 $p_p = p_{p_0}, p_d = p_{d_0}$, 以 Q_2 为目标函数优化 τ :

$$Q_3(\tau, p_{p_0}, p_{d_0}) = \max \sum_{k=1}^K R_{lk} - qP_{\text{tot}} \quad (14)$$

s.t. C2

将 $p_p = p_{p_0}, p_d = p_{d_0}$ 代入式 (5) 得:

$$R_{lk}(\tau, p_{p_0}, p_{d_0}) = B \left(1 - \frac{\tau}{T} \right) \text{lb} \left(1 + \frac{A_k \tau}{B_k \tau + C_k} \right) \quad (15)$$

其中, $A_k = a_k p_{p_0} p_{d_0}$, $B_k = b_k p_{p_0} p_{d_0} + d_k p_{p_0}$, $C_k = c_k p_{d_0} + 1$ 。

将式 (15) 进一步转化:

$$R_{lk}(\tau) = \left\{ \underbrace{-B \text{lb}(B_k \tau + C_k)}_{\text{凸函数}} + \underbrace{\frac{B}{T} \tau \text{lb}(B_k \tau + C_k)}_{\text{凸函数}} \right\} - \left\{ \underbrace{\frac{B}{T} \tau \text{lb}(A_k + B_k) \tau}_{\text{凸函数}} - \underbrace{B \text{lb}(A_k + B_k) \tau}_{\text{凸函数}} \right\} \quad (16)$$

因为凸函数之和仍为凸, 因此 $R_{lk}(\tau, p_{p_0}, p_{d_0})$ 为标准的 DC 问题。再将 $p_p = p_{p_0}, p_d = p_{d_0}$ 代入式 (8) 得:

$$P_{\text{tot}}(\tau, p_{p_0}, p_{d_0}) = D_1 \tau + D_2 \quad (17)$$

其中, $D_1 = \frac{K}{\eta T} (p_{p_0} - p_{d_0})$, $D_2 = \frac{K p_d}{\eta} + M P_{\text{tb}} + K(P_{\text{tu}} + P_{\text{cod}} + P_{\text{dec}}) + \frac{2MKB}{F} + P_{\text{site}}$ 。

由于 $R_{lk}(\tau, p_{p_0}, p_{d_0})$ 为标准 DC 问题, $P_{\text{tot}}(\tau, p_{p_0}, p_{d_0})$ 为仿射函数, 因此 $Q_3(\tau, p_{p_0}, p_{d_0})$ 属于 DC 规划问题。同理可证得步骤 3、步骤 4。

3.3 EE 最大化的资源分配算法

采用 Dinkelbach 方法^[20], 在算法 1 的基础上, 本文提出一种 EE 资源分配算法 (算法 2)。在迭代过程中调用算法 1 更新 (τ, p_p, p_d) , 计算

出新的 q 值后再带入算法 1, 依次循环, 算法 2 的具体描述如下。

步骤 1 初始化 $q=0, q_i = q_0, \tau = \tau_0, p_p = p_{p_0},$

$p_d = p_{d_0}$

步骤 2 while $q_i - q > \delta$

步骤 3 $q = q_i$

步骤 4 将 (q, τ, p_p, p_d) 代入算法 1, 进而更新 (τ, p_p, p_d)

步骤 5 利用更新后的 (τ, p_p, p_d) , 重新计算 q_i 的值:

$$q_i = \frac{\sum_{k=1}^K R_{lk}(\tau, p_p, p_d)}{P_{\text{tot}}(\tau, p_p, p_d)}$$

步骤 6 返回步骤 2

步骤 7 end while

步骤 8 return (τ, p_p, p_d)

4 仿真结果

研究 7 个六边形小区组成的蜂窝小区系统, 小区半径均为 500 m。连续时隙的长度 $T=180$ symbol。每个小区服务 10 个用户, 即 $K=10$, 均匀的分布在距离基站 $d_0=100$ m 的位置。大尺度衰落系数 $\beta_{lik} = z_{lik} / \|d_{lik} / d_0\|^v$, 其中 z_{lik} 是误差为 10 dB 服从对数正态分布的随机变量, d_{lik} 表示第 l 个小区的 BS 和第 i 个小区的第 k 个用户之间的距离, $v=3.8$ 为路径损耗因子, 循环阈值 δ 设为 0.1, 总功率 P_{tot} 中的主要参数见表 1。

表 1 系统参数值

参数	取值
功率放大效率因子 η	0.3
BS 端每根天线的传输链消耗功率 P_{tb}/W	1
每个用户端传输链消耗功率 P_{tu}/W	0.2
信道编码功率 P_{cod}/W	1
信道解码功率 P_{dec}/W	4
基站端计算效率 $F/(\text{flops} \cdot \text{W}^{-1})$	10
其他特定消耗功率 P_{site}/W	5
基站天线数 M	50

首先将导频长度 τ 设为定值, 对 (p_p, p_d) 进行优化, 并将仿真结果与参考文献[12]的等功率分配方案以及参考文献[17]中不考虑功率消耗的分配方案进行对比。如图 2 所示, 可以看出等功率分配方案为了实现最大的频谱效率, 导频符号和数据符号功率均采用了最大的传输符号功率。本文算法以最大化 EE 为目标, 当 $P_{\max}$ 较小时, 导频符号功率和数据符号功率均随着 $P_{\max}$ 的增大而增大, 且增长幅度和等功率分配十分接近。当 $P_{\max}$ 增加至某一固定值后, 数据符号功率开始趋向于一个定值, 而导频符号功率则继续随 $P_{\max}$ 的增大而增大, 而后同样趋于稳定, 这是由于当 $P_{\max}$ 较小时, 随着 $P_{\max}$ 的增大, $\sum_{k=1}^K R_{lk}$ 的增长速度快于 P_{tot} , 但随着 $P_{\max}$ 的继续增大, 用户间的干扰逐渐增加, $\sum_{k=1}^K R_{lk}$ 的增长速度开始低于 P_{tot} , 于是系统为导频符号分配更多的功率来提高信道估计的准确性从而抑制用户间干扰, 当信道估计的准确性不能再增强时, 导频符号功率则不再增加。

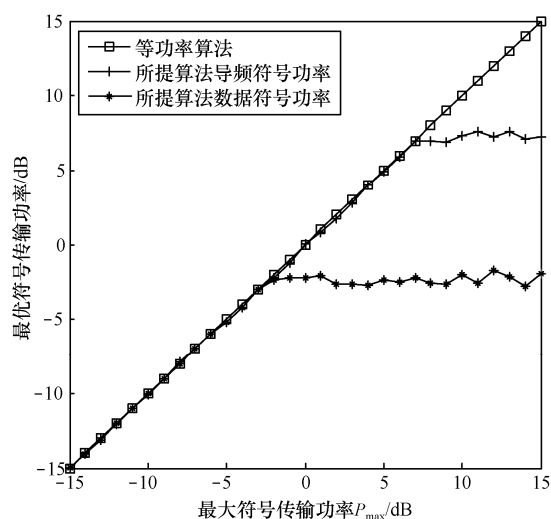


图2 导频、数据符号功率随 $P_{\max}$ 的变化情况

图3描述了系统EE性能随最大符号传输功率的变化情况。从图3中可以看出, 由于等功率分配方案一直选择最大符号功率进行信道估计和数据传输, 随着 $P_{\max}$ 的不断增大, $\sum_{k=1}^K R_{lk}$ 的增长速度

开始低于 P_{tot} , 因此其系统 EE 开始下降。参考文献[17]由于将问题 Q_1 中的不等式约束条件 C1 简化为等式约束, 且认为导频长度为定值, 因此随着 $P_{\max}$ 的增大, 其 EE 性能开始降低。而本文算法根据 $P_{\max}$ 的取值不同, 对系统资源进行动态分配, 降低了功率的消耗, 保证了系统 EE 一直处于一个较高的水平。

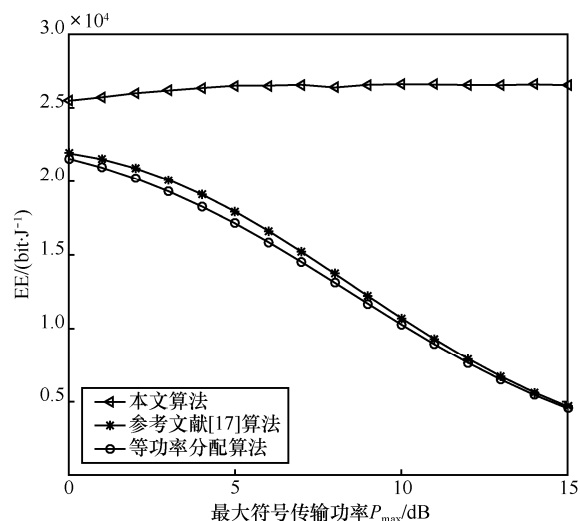


图3 EE 随 $P_{\max}$ 的变化情况

5 结束语

本文研究了多小区大规模 MIMO 系统能效资源分配问题, 提出了一种对导频符号和数据符号功率以及导频长度进行联合优化的迭代算法。其主要思想是将变量进行交替优化, 实现未知 CSI 下的导频和功率分配, 相比于大多数已知 CSI 下的研究, 本文的研究内容更接近现实环境。后续的研究将进一步考虑其他因素对 EE 的综合影响。

参考文献:

- [1] ALKHATEEB A, NAM Y H, ZHANG J, et al. Massive MIMO combining with switches[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2016, 5(3):232-235.
- [2] SHINJO S, NAKATANI K, KAMIOKA J, et al. Highly integrated RF frontend module for high SHF wide-band massive MIMO in 5G, and switching-mode amplifiers beyond 4G[C]// 2017 International Symposium on VLSI Design, Automation



- and Test (VLSI-DAT), April 16, 2017, Taiwan, China. New Jersey: IEEE Press, 2017.
- [3] YAZDAN A, PARK J, PARK S, et al. Energy-efficient massive MIMO: wireless-powered communication, multiuser MIMO with hybrid precoding, and cloud radio access network with variable-resolution ADC[J]. IEEE Microwave Magazine, 2017, 18(5):18-30.
- [4] ZAPPONE A, ALFANO G, BUZZI S, et al. Energy-efficient non-cooperative resource allocation in multi-cell OFDMA systems with multiple base station antennas[C]//Online Conference on Green Communications, Sept 26-29, 2011, New York, USA. New Jersey: IEEE Press, 2011:82-87.
- [5] XU W, LI S, WANG S, et al. Joint parameter selection for massive MIMO: an energy-efficient perspective[J]. IEEE Access, 2016(4): 3719-3731.
- [6] BJÖRNSON E, SANGUINETTI L, HOYDIS J, et al. Optimal design of energy-efficient multi-user MIMO systems: is massive MIMO the answer[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 14(6):3059-3075.
- [7] ZI R, GE X, THOMPSON J, et al. Energy efficiency optimization of 5G radio frequency chain systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(4):758-771.
- [8] 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.
- [9] MIAO G. Energy-efficient uplink multi-user MIMO[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 12(5): 2302-2313.
- [10] LONG D N, DUONG T Q, NGO H Q, et al. Energy efficiency in cell-free massive MIMO with zero-forcing precoding design[J]. IEEE Communications Letters, 2017, PP(99):1.
- [11] MARZETTA T L. Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(11):3590-3600.
- [12] NGO H Q, LARSSON E G, MARZETTA T L. Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(4): 1436-1449.
- [13] HU Y, JI B, HUANG Y, et al. Energy-efficient resource allocation in uplink multiuser massive MIMO systems[J]. International Journal of Antennas & Propagation, 2015, 2015(4):1-9.
- [14] MOHAMMED S K. Impact of transceiver power consumption on the energy efficiency of zero-forcing detector in massive MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(11):3874-3890.
- [15] ZHANG J, JIANG Y, LI P, et al. Energy efficient power allocation in massive MIMO systems based on standard interference function[C]// IEEE VTC-Spring, May 15, 2016, Nanjing, China. New Jersey: IEEE Press, 2016.
- [16] NGO H Q, LARSSON E G, MARZETTA T L. Massive MU-MIMO downlink TDD systems with linear precoding and downlink pilots[J]. Communication, Control & Computing, 2013:293-298.
- [17] NGO H Q, MATTHAIU M, LARSSON E G. Massive MIMO with optimal power and training duration allocation[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2014, 3(6):605-608.
- [18] PRASAD K N R S V, BHARGAVA V K. Resource optimization for energy efficiency in multi-cell massive MIMO with MRC detectors[C]//2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW), April 3-6, 2016, Doha, Qatar. New Jersey: IEEE Press, 2016: 121-126.
- [19] Ericsson. Ericsson energy and Carbon report [R/OL]. (2013-06-19) [2017-04-06]. <http://www.ericsson.com>.
- [20] DINKELBACH W. On nonlinear fractional programming[J]. Management Science, 1967, 13(7):492-498.
- [21] BEZDEK J C, HATHAWAY R J. Convergence of alternating optimization[J]. Neural Parallel & Scientific Computations, 2003, 11(4):351-368.
- [22] AN L T H, TAO P D. The DC (difference of convex functions) programming and DCA revisited with DC models of real world nonconvex optimization problems[J]. Annals of Operations Research, 2005, 133(1-4):23-46.

[作者简介]



曹海燕 (1975-), 女, 博士, 杭州电子科技大学通信工程学院副教授、硕士生导师, 主要研究方向为无线通信系统的信道编码、信号检测和 LTE 物理层标准等。



冯瑞瑞 (1993-), 女, 杭州电子科技大学通信工程学院硕士生, 主要研究方向为无线通信、大规模 MIMO 系统的能效资源分配。

方昕 (1975-), 女, 博士, 杭州电子科技大学通信工程学院副教授、硕士生导师, 主要研究方向为 4G/5G 物理层算法。

王秀敏 (1963-), 女, 中国计量大学信息工程学院教授、硕士生导师, 主要研究方向为电路与系统、信号处理。

许方敏 (1980-), 女, 博士, 杭州电子科技大学通信工程学院讲师, 主要研究方向为先进移动通信系统及其关键技术。