

基于功率控制的大规模 MIMO 系统能效优化算法^{*}

郭甜[†], 李国民, 李新民, 卜娜娜, 李萌, 乔帅克

(西安科技大学 通信与信息工程学院, 西安 710054)

摘要: 能效优化是 5G 通信领域的一个研究热点。首先针对单小区多用户上行大规模 MIMO 通信系统, 在满足用户 QoS(Quality of Service)需求和系统可容忍的信道有效噪声条件下, 建立关于发射功率, 导频序列长度, 基站天线数的能效优化模型; 其次, 不同于传统利用迭代算法求解使系统能效最佳的基站天线数, 提出了采用 Lambert W 函数分析得到最佳基站天线数的闭式表达式; 最后根据分式规划理论, 采用迭代优化算法联合优化系统导频序列长度, 发射功率, 基站天线数。仿真结果表明, 该算法较现有算法能效提高了 11.2%, 说明该算法能有效提高系统性能。

关键词: MIMO 系统; 能效; Lambert W 函数; 分式规划

中图分类号: TN929.5 doi: 10.19734/j.issn.1001-3695.2020.08.0245

Joint power control optimization algorithm on energy efficiency in massive MIMO systems

Guo Tian[†], Li Guomin, Li Xinmin, Bu Nana, Li Meng, Qiao Shuaike

(College of Communication & Information Engineering, Xi'an University of Science & Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Energy efficiency optimization is a research hot spot in the field of 5G communications. First, this paper established an energy efficiency optimization model with regard to transmit power, pilot sequence length, and number of base station (BS) antennas under user QoS requirements and the system's tolerable channel effective noise in a single-cell multi-user uplink massive MIMO system; then, different from the traditional iterative algorithm for solving the optimal number of BS antennas, the method used a closed-form expression to solve the optimal number of BS antennas using Lambert W function; finally, according to the fractional programming, this paper proposed an iterative optimization algorithm to jointly optimize the system pilot sequence length, transmit power, and number of BS antennas. The simulation results show that the energy efficiency of the algorithm is 11.2% higher than that of the existing algorithm, indicating that the algorithm can effectively improve the system performance.

Key words: massive MIMO system; energy efficiency; Lambert w function ; fractional programming

0 引言

随着无线通信的飞速发展,通信系统的功率消耗急速增加,排放的二氧化碳等温室气体也逐渐增加。为了响应绿色通信的需求,系统能效的研究成为 5G 关注的问题^[1-2]之一。大规模 MIMO 技术作为 5G 的关键技术之一,由于其在发射端配置大量的天线,从而使得通信系统的频谱效率增加。然而随着天线数目的增加,系统消耗的总能量也在增加,从而导致系统的总能效下降。因此,对大规模 MIMO 系统能效的研究成为了无线通信领域的重要研究内容^[3-6]。

文献[7]研究了多用户大规模 MIMO 系统上行链路的能效优化策略,考虑在用户速率和可容忍的干扰情况下,采用最大比合并(MRC)接收,通过联合优化基站端的发射天线数和用户的发射功率,从而达到系统能效最佳。文献[8]研究上行 MIMO 系统的能效优化问题,证明了最优功率分配和天线数的存在性及唯一性,进而提出一种迭代算法求解系统能效最优的功率和天线数。但是以上的通信系统能效优化的研究都是基于假设通信系统的信道状态信息(channel status information, CSI)在完全已知的情况下。然而,在实际通信中,如何准确获取 CSI 通常是一个广泛研究的问题。

通常估计信道状态信息采用两种方法,分别是基于导频信息的信道估计,盲信道估计。由于盲信道估计算法的估计

较基于导频信息的信道估计算法的性能差,因此,在实际通信系统中,大多数采用基于导频辅助的信道估计方法^[9]。由于现有的蜂窝系统有两种双工模式,即频分双工(FDD),时分双工(TDD),因此基于导频辅助的信道估计方法也相异。文献[10-12]研究了 FDD 模式下的导频估计策略。文献[10]在能效最佳的条件下,采用迭代优化算法求解最佳的导频长度。文献[11]则采用 Lambert W 函数求解得到最佳导频序列的闭式表达式。文献[12]提出一种基于信息理论求解导频长度的优化算法。以上算法只考虑了导频序列的长度对系统性能的影响,并没有同时考虑导频的功率和数据功率对系统性能的影响。又由于在 FDD 模式下,获取信道状态信息依靠反馈信息,由于反馈信息的长度与发射天线数目成正比,在大规模 MIMO 系统中,由于基站端的天线数往往成千上百个,所以 FDD 模式消耗的系统导频资源很大。因此,现如今 TDD 模式的导频设计成为研究热点方向之一。在 TDD 模式下,通过一次上行训练就可以获得信道状态信息,并且可以根据上下行信道的互惠性有效的估计下行信道。因此,在 TDD 系统中,导频序列长度取决于用户的数量,在大规模 MIMO 系统中,用户的数量往往远远小于基站天线的数目。文献[13]-[15]研究了 TDD 模式下的导频设计策略。文献[13]推导了大规模 MIMO 多用户上行链路基于迫零(ZF)预编码的容量下界,利用优化算法求解使系统频谱效率最佳的数据功率。文献[14]

收稿日期:2020-08-06;修回日期:2020-09-17 基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(61801371);陕西省教育厅专项计划资助项目(15JK1463)

作者简介: 郭甜(1995-),女(通信作者),陕西礼泉人,硕士研究生,主要研究方向为大规模 MIMO 通信技术(2109570554@qq.com);李国民(1965-),男,湖南新乡人,教授,硕导,博士,主要研究方向为通信信号处理、信息技术应用的教学和研究;李新民(1977-),男,陕西岐山人,讲师,博士,主要研究方向为宽带无线通信技术;卜娜娜(1995-),女,陕西定边人,硕士研究生,主要研究方向为无线通信技术;李萌(1995-),女,陕西宝鸡人,硕士研究生,主要研究方向为无线通信技术;乔帅克(1996-),男,陕西咸阳人,硕士研究生,主要研究方向为雷达信号处理。

采用波束训练(BT)算法推导出大规模 MIMO 系统上行链路基于最大比合并(MRC),迫零(ZF)检测时的系统容量下界,并且证明了最佳的导频序列长度为用户数。文献[15]提出了一种在用户总功率限制的情况下,导频功率和数据符号功率的最佳功率分配算法。但是以上算法是在系统总功率给定的情况下,使系统的发射功率达到最佳,由此确定系统的导频功率,并没有对导频和系统发射功率进行联合优化。

功率控制一直都是通信系统研究的热点问题之一。在大规模 MIMO 系统的能效研究中,通过控制导频和数据信号的功率,进而降低系统消耗的总功率,提高系统能效。文献[16]通过凸优化中的内点算法求解导频和数据符号的功率分配问题。文献[17]提出一种动态功率分配算法,并利用连续凸逼近算法求解,以使系统的能效达到最佳。文献[18]根据最大化最小系统频谱效率准则,通过凸优化理论求解最佳的数据功率。以上算法通过采用凸优化理论求解系统最佳的功率分配,虽然系统的性能提高,但是该算法的复杂度高,难以在实际中应用。文献[19]推导了大规模多用户 MIMO 系统单小区和多小区的频谱效率下界,并研究了能效和频谱效率之间的关系,但是该功率消耗模型没有考虑电路功率消耗。文献[20]通过联合功率分配和天线选择算法以提高系统能效,采用一种嵌套循环算法,求解得到系统最佳的功率分配值,但是该文献的功率分配算法是在系统已知信道状态信息的条件下,实际通信中信道状态信息很难获取。文献[21]提出了一种改进的注水功率分配算法,以实现系统能效最佳。文献[22]根据分式规划理论,提出一种功率分配算法,并利用 Dinkelbach 算法求解。其中一些智能优化算法也应用在系统的功率分配上。文献[23]采用增强灰狼优化算法对通信系统的功率分配进行优化。文献[24]引入粒子群优化算法对系统的功率分配进行优化。虽然采用智能优化算法的系统性能较高,但是智能优化算法复杂度也较高。以上算法的分析并未考虑系统的用户间干扰所带来的系统有效噪声的影响,在实际通信系统中,用户间干扰会对系统的性能会产生影响。

基于以上分析,本文主要研究单小区多用户大规模 MIMO 上行系统,系统采用 TDD 模式,在考虑用户 QoS 需求和系统有效噪声影响的情况下,首先分析求解系统在 ZF 检测的情况下,系统频谱效率的下界;其次以最大化系统能效为优化目标,利用 Lambert W 函数求解得到系统能效最佳的发射天线数目,并通过联合优化发射天线数目,导频序列长度,数据功率来优化系统能效;最后,与现有的能效优化算法对比系统的性能。

1 系统模型与问题描述

本文考虑一个典型的上行多用户大规模 MIMO 无线通信系统。基站端配置 M 根发射天线,接收端为 K 个单天线用户。假设系统工作在 TDD 模式,信道状态信息(CSI)未知,且认为 CSI 在相干时间 T_c 间隔内保持不变,基站端通过接收用户发送的导频信息进行信道估计,为了使相干时间内没有导频污染,导频波形需要相互正交,导频长度为 $\tau \geq K$,导频符号功率为 p_p , p_d 表示数据发射功率。设 \mathbf{G} 为信道矩阵,即:

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

其中, \mathbf{H} 表示 $M \times K$ 维的基站到用户端的小尺度衰落系数矩阵,假设小尺度衰落服从独立同分布的瑞利衰落,即 $\mathbf{H} \sim CN(0,1)$ 。 \mathbf{D} 表示 $K \times K$ 维的对角矩阵,且对角线元素 β_k ($i=1,2,\dots,K$)为用户 k 的大尺度衰落系数。利用最小均方误差(minimum mean square error, MMSE)对信道进行估计,则信道估计矩阵 $\hat{\mathbf{G}}$ 可以表示为

$$\hat{\mathbf{G}} = \mathbf{Z}\mathbf{Y}^{1/2} \quad (2)$$

其中, \mathbf{Z} 为 $M \times K$ 的矩阵,其元素服从独立同分布的瑞利衰

落。 \mathbf{Y} 的元素为信道估计的均方值,则第 k 个用户的信道估计均方值 y_k 可以表示为^[25]:

$$y_k = \frac{\tau p_p \beta_k^2}{1 + \tau p_p \beta_k} \quad (3)$$

基站通过上行链路的导频信息估计得到信道状态信息。 $\tilde{\mathbf{G}} = \hat{\mathbf{G}} - \mathbf{G}$ 表示信道估计误差矩阵,为了消除接收信号之间的干扰,基站端采用迫零接收,迫零接收矩阵可以写为 $\mathbf{A} = \mathbf{Z}(\mathbf{Z}^H \mathbf{Z})^{-1}$,则基站端收到的信号可以表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{r} &= \mathbf{A}^H (\sqrt{p_d} \mathbf{G} \mathbf{x} + \mathbf{n}) \\ &= (\mathbf{Z}^H \mathbf{Z})^{-1} \mathbf{Z}^H (\sqrt{p_d} (\hat{\mathbf{G}} - \tilde{\mathbf{G}}) \mathbf{x} + \mathbf{n}) \\ &= \sqrt{p_d} \mathbf{Y}^{1/2} \mathbf{x} + (\mathbf{Z}^H \mathbf{Z})^{-1} \mathbf{Z}^H (\mathbf{n} - \sqrt{p_d} \tilde{\mathbf{G}} \mathbf{x}) \end{aligned} \quad (4)$$

其中, \mathbf{n} 表示接收端的噪声。 r_k 和 x_k 分别表示向量 \mathbf{r} 和 \mathbf{x} 的第 k 个元素,则:

$$r_k = \sqrt{p_d} y_k x_k + [(\mathbf{Z}^H \mathbf{Z})^{-1} \mathbf{Z}^H (\mathbf{n} - \sqrt{p_d} \tilde{\mathbf{G}} \mathbf{x})]_k \quad (5)$$

其中:第一项表示用户 k 接收的有效信号,第二项可以看成是信道的有效噪声。由于接收端的噪声是相互独立的,信道估计值 $\hat{\mathbf{G}}$ 和信道估计误差 $\tilde{\mathbf{G}}$ 是相互独立的,因此,有效噪声与用户 k 接收的有效信号也是互不相关的。因此,系统的信干噪比为^[25]:

$$SINR_k = \frac{(M - K) p_d y_k}{1 + \sum_{k=1}^K p_d (\beta_k - y_k)} \quad (6)$$

因此,考虑信道估计导频开销的情况下,系统容量下界可以表示为

$$C(\tau, p_p, M) = \frac{T_c - \tau}{T_c} \sum_{k=1}^K B \log_2 \left(1 + \frac{\tau p_p^2 (M - K) \beta_k^2}{(1 + \tau p_p \beta_k) (1 + \sum_{k=1}^K \frac{p_d \beta_k}{1 + \tau p_p \beta_k})} \right) \quad (7)$$

其中: B 为系统的总带宽,其中 $\sum_{k=1}^K \frac{p_d \beta_k}{1 + \tau p_p \beta_k}$ 为用户间的干扰以及系统的噪声,可以看做为系统的有效噪声。

大规模 MIMO 系统的能效通常定义为系统的总容量除以系统的总功耗,其中,系统的功率消耗模型可以分为三个方面,分别为系统的导频和数据功率,射频链的功率以及发射机的静态功耗。因此,其系统总功耗定义为

$$P(\tau, p_p, M) = \frac{K}{\zeta T_c} (\tau p_p + (T_c - \tau) p_d) + M p_d + p_s \quad (8)$$

其中, P 表示系统的总功耗, ζ 表示功率放大器的系数,通常为常数,一般取值为 0.38,第一项表示导频和数据功率,第二项 p_d 代表系统中每个射频链的功耗,通常为定值,第三项 p_s 为发射机的静态功耗。因此,系统的能效可以表示为

$$\eta(\tau, p_p, M) = \frac{C(\tau, p_p, M)}{P(\tau, p_p, M)} \quad (9)$$

在实际通信系统中,本文往往会考虑用户的 QoS 需求。因此,本文在系统能量效率最大的准则下,考虑系统的每个用户的信干噪比需求以及系统最大发射功率限制,系统的能效优化表达式可以表示为

$$\begin{aligned} &\text{maximize } \eta(\tau, p_p, M) \\ &\text{s.t. } c1: SINR_k \geq a_k, \quad c2: K \leq \tau \leq T_c, \quad c3: p_p \leq p_{\max} \end{aligned} \quad (10)$$

其中, a_k 表示第 k 个用户的最小信干噪比, p_{\max} 表示系统发射功率的最大值。

2 能效资源分配算法

本文采用可容忍干扰水平,解决式(7)中的系统有效噪声问题,即最差的情况,即:

$$\sum_{k=1}^K \frac{p_d \beta_k}{1 + \tau p_p \beta_k} \leq I \quad (11)$$

则式(7)可以表示为

$$C(\tau, p_i, M) = \frac{T_c - \tau}{T_c} \sum_{k=1}^K B \log_2 \left(1 + \frac{\tau p_i^2 (M - K) \beta_k^2}{(1 + \tau p_i \beta_k)(1 + \sum_{i=1}^K \frac{p_i \beta_i}{1 + \tau p_i \beta_i})} \right) \geq \frac{T_c - \tau}{T_c} \sum_{k=1}^K B \log_2 \left(1 + \frac{\tau p_i^2 (M - K) \beta_k^2}{(1 + \tau p_i \beta_k)(1 + I)} \right) \quad (12)$$

因此, 系统的能效优化表达式可以写为

$$\text{maximize } \eta(\tau, p_i, M) = \frac{\frac{T_c - \tau}{T_c} \sum_{k=1}^K B \log_2 \left(\frac{\tau p_i^2 (M - K) \beta_k^2}{(1 + \tau p_i \beta_k)(1 + I)} \right)}{\frac{K}{\zeta T_c} (\tau p_p + (T_c - \tau) p_i) + M p_d + p_s} \quad (13)$$

$$\text{s.t. } c1 \sim c3 \quad c4: \sum_{i=1}^K \frac{p_i \beta_i}{1 + \tau p_i \beta_i} \leq I$$

由式(13)可知, 系统的能效是导频信息长度, 发射功率和基站天线数的函数, 为了使系统的能效达到最佳, 应该采用穷举算法求解式(13), 但由于穷举算法的算法复杂度太高, 不利用在实际工作中应用, 因此, 本文提出一种次优的能效资源分配算法, 首先确定选择的基站天线数目, 进而采用迭代算法求解使系统能效最佳的导频信息长度和发射功率, 最后, 联合优化系统的基站天线数目, 导频信息长度和发射功率, 从而使系统能效最佳。

2.1 基站天线选择算法

由式(9)可知, 在给定系统导频信息长度, 发射功率的条件下, 系统的能效是发射天线数的拟凸函数^[26], 即存在最佳的天线数目, 使得系统的能效最优, 即 $\partial \eta(\tau, p_i, M) / \partial M = 0$ 。因此, 本文利用 Lambert W 函数求解最佳天线数 M 的闭式表达式。

引理 1^[26] 令参数 a, b, c, d , 为常数, 且 $a, c \geq 0$, $b, d, f > 0$, 则对于优化目标问题有:

$$\max_x \frac{f \log_2(a + bx)}{c + dx} \quad (14)$$

则函数式(14)为严格拟凹且存在唯一解:

$$x^* = \frac{e^{\frac{W(bc - ad) + 1}{d}} - a}{b} \quad (15)$$

其中: $W(x)$ 为 Lambert w 函数, 即 $x = W(x)e^{W(x)}$, 在大规模 MIMO 系统中, 根据引理 1, 可以证明基站最佳天线数目的存在性和唯一性。因此, 将式(13)改写为式(14), 其中,

$$f = \frac{T_c - \tau}{T_c} KB, \quad a = -\frac{\tau p_i^2 K \beta_k^2}{(1 + \tau p_i \beta_k)(1 + I)}, \quad b = \frac{\tau p_i^2 \beta_k^2}{(1 + \tau p_i \beta_k)(1 + I)},$$

$$c = \frac{K}{\zeta T_c} (\tau p_p + (T_c - \tau) p_i) + p_s, \quad d = p_d, \quad \text{令 } \varphi = \frac{bc - ad}{de} \text{ 可得:}$$

$$\varphi = \frac{(K p_d + \frac{K}{\zeta T_c} (\tau p_p + (T_c - \tau) p_i) + p_s)}{p p_d e} \quad (16)$$

此时, 最佳的天线数目 m 为

$$m = \frac{e^{W(\varphi) + 1} + pK}{p} \quad (17)$$

其中, $p = (\tau p_i^2 \beta_k^2) / [(1 + \tau p_i \beta_k)(1 + I)]$ 。因此, 根据式(17)可以求解得到使系统能效最佳的发射天线数。

式(17)中, 由于使系统能效最佳的天线数表达式中包含导频信息长度和发射功率, 无法直接求解, 因此, 本文下面提出一种迭代优化算法, 在满足能效, 导频信息长度, 发射功率最优的条件下, 选取最佳的天线数目 m 。

2.2 发射功率和导频长度分配算法

式(13)中的目标函数是两个函数相除的形式, 因此, 可以根据分式规划理论^[27], 将原始的分式转换为减数形式, 进而提出一种迭代分配发射功率和导频长度算法。即

$$f(\lambda) = C(\tau, p_i, M) - \lambda P(\tau, p_i, M) \quad (18)$$

其中, λ 是一个实数变量, 设(13)式最优解为 η^* , 则 $f(\lambda) = 0$ 时, $\lambda = \eta^*$ 。因此, 系统的能效优化表达式可写为

$$f(\lambda) = \max_{\tau, p_i} C(\tau, p_i, M) - \lambda P(\tau, p_i, M) \quad (19)$$

$$\text{s.t. } c1 \sim c4$$

由式(19)可知, 目标函数 $f(\lambda)$ 是一个复杂的非凸函数, 与变量 λ, τ, p_i, M 相关。为了解决该问题, 本文提出了一种迭代优化算法。通过交替迭代优化 τ, p_i , 从而使得系统的能效最佳, 当系统获得最佳的能效时, 式(19)应等于零。因此, 令式(19)趋于零为迭代终止的条件。因此, 本文提出的迭代优化算法步骤如下(算法的流程图如图 1 所示):

- a) 初始化 $\tau = K, p_i = p_0$, 阈值 $\varepsilon = 0.001$;
- b) 将 τ, p_i 的值代入式(17), 计算此时最佳的发射天线数 m ;
- c) 输入 (τ, p_i, m) , 以式(13)能效最佳为优化目标, 采用二分算法, 求解使能效最佳的 τ , 更新 τ 的值;
- d) 输入更新后的 τ 的值, 将 τ, p_i 的值代入式(17), 计算此时最佳的发射天线数 m , 更新 m 的值;
- e) 输入更新后的 (τ, p_i, m) 的值, 以式(13)能效最佳为优化目标, 采用二分算法, 求解使能效最佳的 p_i , 更新 p_i 的值;
- f) 输入更新后的 p_i 的值, 将 τ, p_i 的值代入式(17), 计算此时最佳的发射天线数 m , 更新 m 的值;
- g) 利用更新后的值 (τ, p_i, m) , 计算式(13)系统能效值 η , 令 $\lambda = \eta$, 代入式(19), 计算 $f(\lambda)$ 的值;
- h) 若 $f(\lambda) > \varepsilon$, 返回步骤 b), 重新迭代更新 (τ, p_i, m) 的值, 直至 $f(\lambda) < \varepsilon$ 为止;
- i) 返回 (τ, p_i, m) 的值。

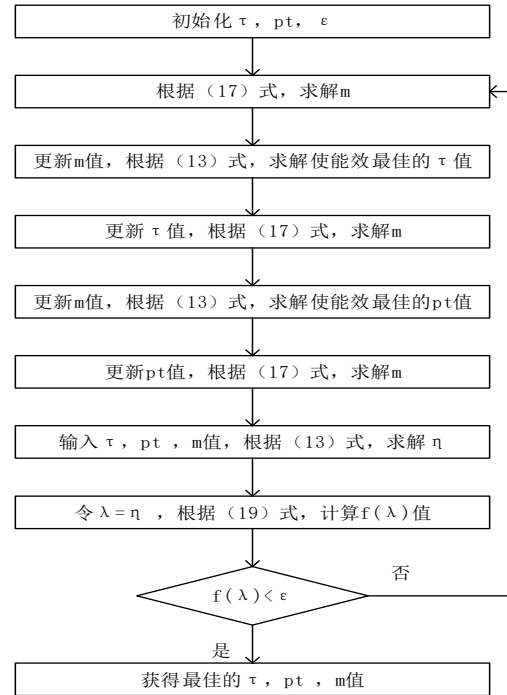


图 1 迭代优化算法流程图

Fig. 1 Iterative optimization algorithm flow chart

3 仿真结果与分析

考虑半径为 1000 米的六边形蜂窝小区构成的通信系统。根据用户与基站间的距离, 将大尺度衰落系数分成六类, 如下表 1 所示。假设发送信号采用 OFDM 调制, 信道服从瑞利衰落模型。系统仿真参数如表 1 所示。

图 2 给出了本文所提算法在不同用户数的情况下不同 I 值对应的能效性能。从图 2 中可以看出, 随着 I 值的增加, 系统能效逐渐降低。这是因为 I 值的增加, 导致系统的有效噪声增加, 因此导致系统能效的降低。同时, 随着用户数在一定范围内的增加, 系统的能效逐渐升高, 这是由于当用户

数增加时, 大规模 MIMO 系统的多用户分集特性更加显著, 从而使得能效增加。本文选取 $l=1.0$ 进行下面的仿真分析。

表 1 系统仿真参数值

Tab. 1 System simulation parameter values

参数	值
总带宽 B	5MHz
大尺度衰落系数 β	1.0,0.9,0.8,0.7,0.6,0.5
每个射频电路的电路功率 p_d	0.15W
发射机的静态功耗 p_s	0.1W
用户初始化发射功率 p_0	$[0.2,0.2,\dots,0.2]^T$ W
最大发射功率 p_{max}	20W
用户最小信干噪比 a_k	3.6×10^{-3}

图 3 给出了不同基站天线数情况下能效的比较。从图 3 中可以看出, 随着基站天线数的增加, 系统的能效先增加后减少。这是由于在发射功率, 用户数, 导频序列长度给定的情况下, 系统的能效是基站天线数目的拟凸函数, 存在最优的基站天线数目。同时, 随着系统相干间隔符号的增加, 系统的能效逐渐升高。这是由于相干间隔符号的增加, 使得信道估计更加准确, 因此能效得以提高。

图 4 给出了本文算法在不同发射功率情况下能效的比较。由图 4 中可以看出, 随着发射功率的增加, 系统的能效先增加后逐渐减少。这是由于在基站天线数, 用户数, 导频序列长度给定的情况下, 系统的能效是发射功率的拟凸函数, 存在最佳的发射功率。同时, 随着用户数的增加, 系统的能效逐渐升高。

图 5 给出了不同相干间隔符号情况下系统的最佳发射天线数目。可以看出, 随着相干间隔符号长度在一定范围内的增加, 最佳的发射天线数目也逐渐增加。这是由于根据(17)式可知, 系统最佳的发射天线数目是相干间隔符号长度的增函数。

图 6 给出了在不同用户数情况下, 本文算法和其他算法的能效比较, 由图 6 可知, 本文能效优化算法的系统能效高于文献[13]和文献[23]的算法, 这是由于文献[13]的算法并没有优化基站天线数目, 文献[23]的算法并没有考虑有效噪声对系统能效的影响。

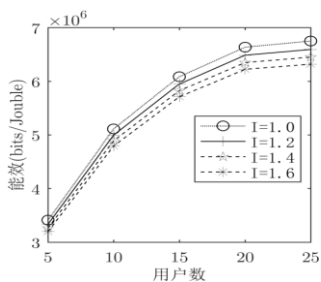


图 2 不同用户数情况下的 l 值对应的能效比较
Fig. 2 Comparison of energy efficiency corresponding to l values under different number of users

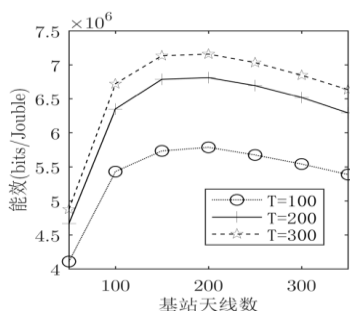


图 3 不同基站天线数情况下能效比较
Fig. 3 Comparison of energy efficiency under different base station antenna numbers

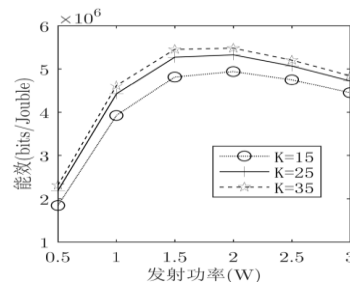


图 4 不同发射功率情况下能效比较
Fig. 4 Comparison of energy efficiency under different transmission power conditions

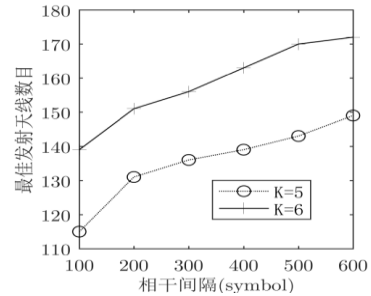


图 5 不同相干间隔情况下最佳发射天线数目比较
Fig. 5 Comparison of the optimal number of transmitting antennas under different coherence intervals

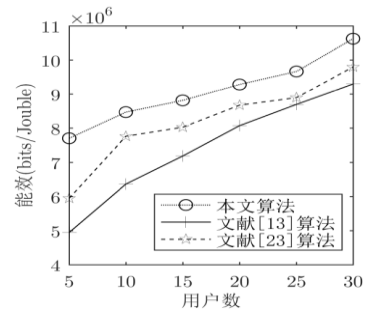


图 6 本文算法与其他算法能效比较
Fig. 6 Energy efficiency comparison between the algorithm in this paper and other algorithms

4 算法复杂度分析

本文所提算法假设基站天线数为 M , 用户数为 K 。本文算法首先利用 Lambert W 函数求解最佳 m 的值, 由于是采用数值分析方法求解最佳发射天线数值, 极大的降低了计算复杂度(传统的方法一般采用穷举法求解, 复杂度为 $O(M)$), 因此其复杂度可记为 $O(1)$; 其次求解 (τ, p_i) 采用二分算法求解, 其复杂度可记为 $O(\log(K^2))$; 最后, 算法的迭代次数与用户数 K 有关。因此, 本文算法的复杂度为 $O(K(\log(K^2)))$ 。文献[13]的功率控制算法采用 MATLAB 的优化工具箱中的 FMINCON 函数求解, 此函数是根据凸优化算法中的内点法进行求解的, 其复杂度可记为 $O(K \log M)$ 。文献[23]的功率分配算法采用增强灰狼优化算法, 其算法的复杂度约为 $O(K^2/2)$ 。

本文算法与现有算法的复杂度比较如表 2 所示。由于在大规模 MIMO 系统中基站天线数目 $M > 10K$, 所以本文算法的复杂度与文献[13]算法复杂度略高, 比文献[23]的算法复杂度低, 但是本文算法系统的能效性能较文献[13]算法提高了 20%, 较文献[23]算法提高了 11.2%。因此, 本文提出的算法在复杂度稍微升高的同时, 提高了系统的能效性能。

5 结束语

该文对单小区多用户大规模 MIMO 上行链路的能效进行研究, 在系统未知 CSI 的情况下, 以系统能效最优为优化

目标, 在用户 QoS 和信道有效噪声的约束条件下, 建立了导频序列长度, 基站天线数和发射功率的能效优化模型。首先利用 Lambert W 函数求解得到系统最佳基站天线数的闭式表达式, 其次, 通过迭代算法联合优化导频序列长度, 基站天线数和发射功率。仿真结果表明, 所提出的能效优化方案能够使系统能效明显提高, 为单小区多用户大规模 MIMO 系统的能效优化问题提供了一种有效的解决方案。下一步考虑其他因素对能效的影响, 进一步降低算法的复杂度, 提升系统性能。

表 2 本文算法与现有算法的复杂度比较

Tab. 2 Complexity of algorithm in this paper and existing algorithm			
算法	本文算法	文献[13]	文献[23]
复杂度	$O(K(\log(K^2)))$	$O(K\log M)$	$O(\frac{K^3}{2})$
运行时间/s	0.40781	0.32276	0.77227

参考文献:

[1] Isabon J, Srivastava V M. Downlink massive MIMO systems: achievable sum rates and energy efficiency perspective for future 5G systems [J]. *Wireless Personal Communications*, 2017, 96 (2): 2779-2976.

[2] Azzam A, Sakran, H, Su. W. Energy and spectral efficiency of secure massive MIMO downlink systems [J]. *IET Communications*, 2019, 13 (10): 1364-1372.

[3] 王正强, 杨晓娜, 万晓榆, 等. 大规模 MIMO 系统能效优化算法研究综述 [J]. *重庆邮电大学学报*, 2019, 31 (6): 743-752. (Wang Zhengqiang, Yang Xiaona, Wang Xiaoyu, *et al.* Energy efficiency optimization algorithm in massive MIMO systems: a survey [J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications*, 2019, 31 (6): 743-752.)

[4] Saatlou O, Ahmad M. O., Swamy M. N. S. Spectral efficiency maximization of multiuser massive MIMO systems with finite-dimensional channel via control of users power [J]. *IEEE Trans and. Circuits Systems*, 2018, 65 (7): 883-887.

[5] Su P, Chen J and, Sun X. An energy efficiency maximization scheme for the wireless information and power transfer system with MU-MIMO uplink access [J]. *IEEE Access*, 2019, 6: 58754-58763.

[6] Emil B, Luca S, Jakob H, *et al.* Optimal design of energy-efficient multi-user MIMO systems: Is massive MIMO the answer? [J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2015, 14 (6): 3059-3075.

[7] 胡莹, 黄永明, 俞飞, 等. 多用户大规模 MIMO 系统能效资源分配算法 [J]. *电子与信息学报*, 2015, 37 (9): 2198-2203. (Hu Ying, Huang Yongming, Yu Fei, *et al.* Energy efficiency resource optimization algorithm for multi-user massive MIMO system [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37 (9): 2198-2203.)

[8] 胡莹, 冀保峰, 黄永明, 等. 基于上行多用户大规模 MIMO 系统能效优化算法 [J]. *通信学报*, 2015, 36 (1): 69-76. (Hu Ying, Ji Baofeng, and Huang Yongming, *et al.* Energy efficiency optimization algorithm based on uplink multi-user massive MIMO system [J]. *Journal on Communications*, 2015, 36 (1): 69-76.)

[9] 刘昊, 徐志康, 周春花. OFDM 系统的信道估计技术讨论 [J]. *中国新通信*, 2019, 21 (23): 64. (Liu Hao, Xu Zhikang, Zhou Chunhua. Discussion on channel estimation technology of OFDM system [J]. *China New Telecommunications*, 2019, 21 (23): 64.)

[10] Wang Y, Ma P, Zhao R. *et al.* Near-Optimal pilot signal design for FDD massive MIMO system: an energy-efficient perspective [J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 13275-13288.

[11] 王毅, 马鹏阁, 黄开支, 等. 导频序列长度对多用户大规模 MIMO FDD 系统速率的性能影响及优化 [J]. *通信学报*, 2018, 39 (7): 92-102. (Wang Yi, Ma Pengge, Huang Shili, *et al.* The effect of pilot sequence length on the rate performance and optimization of multi-user massive MIMO FDD system [J]. *Journal on Communications*, 2018, 39 (7): 92-102.)

[12] Gu Y, Zhang Y. Information-theoretic pilot design for downlink channel estimation in FDD massive MIMO systems [J]. *IEEE Trans on Signal Processing*, 2019, 67 (9): 2334-2346.

[13] Saatlou O, Ahmad M O, Swamy M N S. Spectral Efficiency Maximization of Single Cell Massive Multiuser MIMO Systems via Optimal Power Control with ZF Receiver [C]// the 28th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2017: 1-5.

[14] Saatlou O, Ahmad M O, Swamy M N S. Spectral Efficiency Maximization of a Single Cell Massive MU-MIMO Down-Link TDD System by Appropriate Resource Allocation [J] *IEEE Access*, 2019, 7: 182758-182771

[15] Saatlou O, Ahmad M O, Swamy M N S. Joint Data and Pilot Power Allocation for Massive MU-MIMO Downlink TDD Systems [J]. *IEEE Trans on Circuits and Systems II: Express Briefs*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2019, 66 (3): 512-516.

[16] Liu G, Deng G H, Qian X W, *et al.* Joint pilot allocation and power control to enhance max-min spectral efficiency in TDD massive MIMO systems [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 149191-149201.

[17] Yang R Z, Liu B, Yu F, *et. al.* A dynamic pilot and date power allocation for TDD massive MIMO systems [C]// 2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM) . Piscataway, NJ: IEEE Press, 2018: 1-6

[18] Cheng H V, Emil B, Eric G L. Uplink pilot and date power control for single cell massive MIMO systems with MRC [C]// 2015 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS) . Piscataway, NJ: IEEE Press, 2015: 396-400.

[19] Hien Q N, Erik G L, Thomas L M. Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO systems [J] *IEEE Trans on Communications*, 2013, 61 (4): 1436-1449

[20] 杨静, 张丽萍, 吕倬凯. 基于天线选择和功率分配的联合迭代优化算法 [J]. *电讯技术*, 2020, 60 (06): 673-677. (Yang Jing, Zhang Liping, Lu Zhuokai. A Joint Iterative Optimization Algorithm Based on Antenna Selection and Power Allocation [J]. *Telecommunications Technology*, 2020, 60 (06): 673-677.)

[21] 张瑞清, 李晖, 宋逸安, 等. 大规模 MIMO 系统中能效优化设计 [J]. *现代电子技术*, 2020, 43 (07): 1-5. (Zhang Ruiqing, Li Hui, Song Xuanan, *et al.* Energy efficiency optimization design in massive MIMO system [J]. *Modern Electronic Technology*, 2020, 43 (07): 1-5.)

[22] Amare K, Dereje H, Michael F, *et al.* Fractional Programming for Energy Efficient Power Control in Uplink Massive MIMO Systems [C]// 2019 the 27th European Signal Processing Conference (EUSIPCO) . Piscataway, NJ: IEEE Press, 2019: 1-5.

[23] 徐凌伟. 移动多用户通信系统的功率分配智能优化 [J]. *聊城大学学报 (自然科学版)*, 2020, 33 (04): 33-38 (Xu Lingwei. Intelligent optimization of power allocation for mobile multi-user communication systems [J]. *Journal of Liaocheng University: Natural Science*, 2020, 33 (04): 33-38)

[24] Juttu R, V S. An alternate optimal power allocation method in MIMO systems based on PSO [C]// 2019 TEQIP III Sponsored International Conference on Microwave Integrated Circuits, Photonics and Wireless Networks (IMICPW) . Piscataway, NJ: IEEE Press, 2019: 328-332.

[25] Kamil S, Emil B, Erik G L. Joint transmit and circuit power minimization in massive MIMO with downlink SINR constraints: when to turn on massive MIMO? [J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2019, 18 (3): 1834-1846.

[26] 刘紫燕, 刘世美, 唐虎, 等. 多用户 massive MIMO 系统能效资源分

配方案 [J]. 中国科技论文, 2018, 13 (14): 1658-1663. (Liu Ziyan, Liu Shimei, Tang Hu, *et al.* Energy efficiency resource allocation scheme for multi-user massive MIMO system [J]. Chinese Science and Technology Paper, 2018, 13 (14): 1658-1663.)

[27] 李宁. 具有能量采集的 Massive MIMO 系统功率分配算法研究 [D]. 陕西: 西安科技大学, 2019. (Li Ning. Research on Power Allocation Algorithm of Massive MIMO System with Energy Harvesting [D]. Shannxi: Xi'an University of Science and Technology, 2019.)