

文章编号:1671-6833(2017)04-0065-04

大规模 MIMO 系统中功率分配算法的能效研究

陆彦辉, 苗盼盼, 杨守义

(郑州大学 信息工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 为了提高大规模 MIMO 下行链路系统的能效, 基站分配给用户的功率不再是平均分配, 通过对能效函数的分析, 得到能效函数是关于用户功率的拟凹函数, 进而提出了一种功率分配算法. 因为大规模 MIMO 的基站天线数比较多, 射频链的损耗不可忽略. 所以建立了同时考虑基站分配给用户的功率和电路功率的新的系统功耗模型, 并在该模型的基础上, 分析用户分配的功率对系统总功耗及能效的影响. 通过分析能效函数关于用户功率的拟凹特性, 提出了一种迭代的功率分配算法. 最后将所提的功率分配算法的能效与用户平均分配功率时的能效进行比较. 仿真结果表明, 所提算法能有效地提高系统的能效.

关键词: MIMO; 能效; 功耗; 功率分配算法

中图分类号: TN92

文献标志码: A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2017.01.022

0 引言

随着移动通信技术的发展, 能效引起了人们的重视, 提高能效不仅有益于减少共信道用户的干扰而且可以减少环境污染. MIMO 系统是提高谱效的重要技术之一^[1]. 大规模 MIMO 系统通过增加基站的天线数, 可以显著提高系统的能效和谱效^[2]. 文献[3]证明, 无论是基于完美信道状态信息, 还是不完美信道状态信息, MIMO 系统都可以在能效和谱效上提供很好的折中. 但是基站的天线越多, 系统的复杂度就越高, 射频链的损耗也越大. 所以在分析大规模 MIMO 系统能效时必须考虑射频链的损耗. 文献[4]模型系统功耗同时考虑了传输电路和射频链的功耗. 文献[5]说明了并不是射频链数越多系统的容量就越大.

近年来, 有很多关于 MIMO 系统的能效研究^[6-7], 例如在文献[6]中研究了基于 Alamouti 分集技术的 MIMO 系统中如何提高传感器的能效. 为了提高系统的能效, 无线资源功率分配是提高能效的有效途径之一^[8]. 文献[9]研究了 OFDMA 系统中最优能效功率分配算法. 文献[10]在分布式天线系统中研究了最优能效的功率分配算法. 文献[11]分析了上行多用户的能效, 证明了

能效函数是功率矩阵的拟凹函数, 并利用这一性质提出了迭代的功率分配算法.

基于前人的研究, 笔者为了提高大规模 MIMO 系统的能效, 建立了一种新的系统功耗模型, 分析了用户分配功率对系统总功耗的影响. 在推导出能效的表达式后, 利用文献[11]证明了能效函数的性质, 并根据能效函数的拟凹特性, 提出了迭代的功率分配算法. 仿真结果表明了所提算法的有效性.

1 系统模型

在单小区大规模 MIMO 下行链路系统中, 假设基站有 N 根天线, 接收端有 K 个单天线用户, 系统模型如图 1 所示.

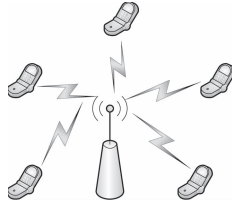


图 1 大规模多用户 MIMO 系统模型图
Fig. 1 System diagram of massive MIMO system

用户端的接收信号为:

收稿日期:2016-11-30; 修订日期:2016-12-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61271421, 52110295)

作者简介:陆彦辉(1972—), 女, 河南许昌人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事宽带无线通信理论的研究, E-mail: ieyhlu@zzu.edu.cn.

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

式中: \mathbf{y} 和 \mathbf{x} 分别是 $K \times 1$ 的接收和发射信号向量; \mathbf{H} 是 $K \times N$ 的瑞利衰落信道矩阵; \mathbf{Q} 是 $N \times K$ 的预编码矩阵; \mathbf{n} 是 $K \times 1$ 的噪声向量; $\mathbf{P} = \text{diag}\{\sqrt{p_1}, \sqrt{p_2}, \dots, \sqrt{p_K}\}$ 代表分配给每个用户的功率。

在接收端使用线性接收消除用户间的干扰, 因为接收端的设计不是本文的重点, 故笔者使用简单的迫零接收, 即

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{W} \cdot \mathbf{y} = \mathbf{W} \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{Q} \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{W} \cdot \mathbf{n}, \quad (2)$$

$$\mathbf{W} = (\mathbf{U}^H \mathbf{U})^{-1} \mathbf{U}^H. \quad (3)$$

使用奇异值分解将信道矩阵分解为:

$$\mathbf{H} = \mathbf{U} \Sigma \mathbf{V}^H, \quad (4)$$

其中, \mathbf{U} 和 \mathbf{V} 分别是 $K \times K$ 和 $N \times N$ 的西矩阵; Σ 是 $K \times N$ 的对角矩阵, 即:

$$\Sigma = \text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_K, 0, \dots, 0\}. \quad (5)$$

假设发射端已知信道状态信息, 执行模态分解, 在发射端用 \mathbf{V} 预处理发射信号, 即令 $\mathbf{Q} = \mathbf{V}$, 然后在接收端用 \mathbf{W} 后处理接收信号. 模态分解图如图 2 所示.

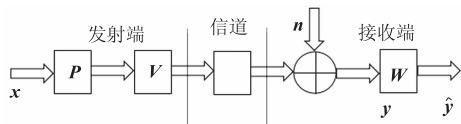


图 2 模态分解图

Fig. 2 Modal decomposition

这样接收信号化简为:

$$\hat{\mathbf{y}} = \Sigma \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{x} + \hat{\mathbf{n}}, \quad (6)$$

其中, $\hat{\mathbf{n}} = \mathbf{W} \cdot \mathbf{n} = (\mathbf{U}^H \mathbf{U})^{-1} \mathbf{U}^H \cdot \mathbf{n}$ 是均值为 0 方差为 σ^2 的高斯白噪声.

所以得到用户 k 的信噪比为:

$$\eta_k = \frac{\lambda_k^2 p_k}{\sigma^2}. \quad (7)$$

那么, 系统的总容量为:

$$C = \sum_{k=1}^K B \log_2 \left(1 + \frac{\lambda_k^2 p_k}{\sigma^2} \right). \quad (8)$$

2 功耗模型

总功耗定义为:

$$p_{\text{sum}} = \frac{p_{\text{out}}}{\alpha} + N \cdot p_c + K \cdot p_r, \quad (9)$$

其中, $\frac{p_{\text{out}}}{\alpha}$ 是功率放大器的功耗, 与发射端输出功率 p_{out} 和功率放大器的系数 α 有关; $N \cdot p_c$ 和 $K \cdot p_r$

是发射端和接收端的射频链的功耗, p_c 和 p_r 分别是发射和接收端每个射频链功耗, 且它们两个的值是独立于输出功率的. 输出功率为:

$$p_{\text{out}} = \sum_{k=1}^K p_k. \quad (10)$$

3 功率分配算法

能效定义为系统的总容量除以总功耗, 所以得到:

$$U = \frac{C}{p_{\text{sum}}} = \frac{\sum_{k=1}^K B \log_2 \left(1 + \frac{\lambda_k^2 p_k}{\sigma^2} \right)}{\frac{\sum_{k=1}^K p_k}{\alpha} + N \cdot p_c + K \cdot p_r}. \quad (11)$$

能效函数是关于 \mathbf{P} 的拟凹函数^[11], 故通过能效 U 对功率 p_k 求导, 即可以得到能效最大时用户分配的最优功率. 下面提出一种迭代的功率分配算法求解.

定义

$$f(p_k) = \sum_{k=1}^K B \log_2 \left(1 + \frac{\lambda_k^2 p_k}{\sigma^2} \right) - U \cdot \left(\frac{\sum_{k=1}^K p_k}{\alpha} + N \cdot p_c + K \cdot p_r \right), \quad (12)$$

对于给定的 U 初值, 上式是关于 p_k 的凸函数, 所以通过对上式求导就可得到此时最优的 p_k , $f(p_k)$ 接近于 0, 为迭代的终止条件. 功率分配算法具体的步骤如下.

步骤 1: 初始化, 对于不同的用户 K , 功率初始

化为 $p_k^0 = \frac{p_{\text{out}}}{K}$, 代入式 (11) 求出此时的 U^0 .

步骤 2: 令 $U = U^0$, 代入式 (12), 得到 $f(p_k)$,

然后令 $\frac{\partial f(p_k)}{\partial p_k} = 0$, 求出 p_k^1 , 代入 (11) 式, 求出此时的 U^1 .

步骤 n : 令 $U = U^{n-1}$, 重复步骤 2, 直到 $f(p_k) < 0.001$ 为止. 此时得到的 p_k 即为用户分配的最优功率.

4 仿真结果

下面用仿真结果来证明算法的有效性. 假设基站带宽是 10 kHz, 发射和接收端每个射频链的功耗均为 100 mW. 噪声功率为 -114 dBW/MHz, 功率放大器的系数取 0.5. 这里定义平均功率分配就是基站输出的功率平均分配给每个用户, 即

$$p_k = \frac{p_{\text{out}}}{K}. \quad (14)$$

图 3 为功率注水算法和平均功率分配算法的功耗比较. 从图 3 可以看出,在基站天线数小于 150 时,注水算法的功耗随着基站天线数的增多而减少,在基站天线数大于 150 时,注水算法的功耗随着基站天线数的增多而增加,这是因为当 $N < 150$ 时,注水算法得到的功率比较小,基站天线数对总功耗的影响较小;当 $N > 150$ 时,基站天线数比较大,射频链的功耗比较大,对功耗的影响占主导地位. 另外当天线数小于 250 时,注水算法的功耗比平均分配的功耗大,但是当基站天线数增大到 250 后,注水算法的功耗比平均分配的功耗小,这表明在大规模 MIMO 中,笔者提出的功率注水算法功耗小,能效也较高.

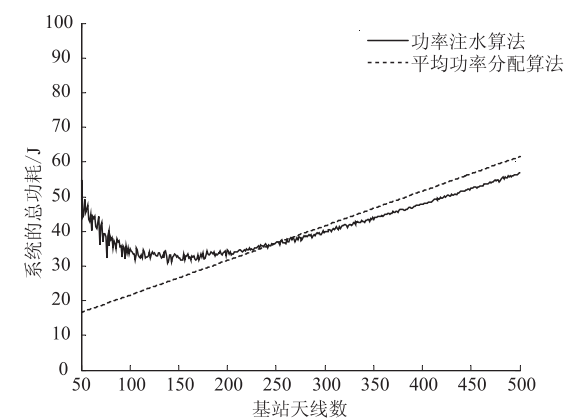


图 3 功率注水算法和平均功率分配的功耗比较
Fig.3 Total power consumption comparison between power water-filling algorithm and average power allocation

图 4 是当基站天线数为 128 时,功率分配算法和平均功率分配算法的能效比较. 可以看出功率注水算法得到的能效高于平均功率分配算法的能效. 注水算法得到的分配给每个用户的功率都是最优的,所以和基站输出功率无关,近似为一条直线.

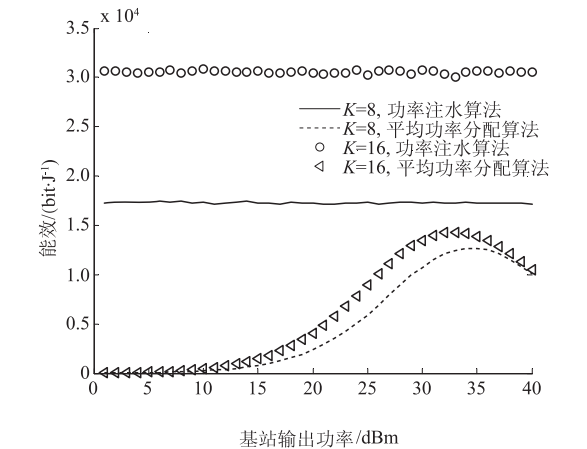


图 4 功率注水算法和平均功率分配算法的能效比较
Fig.4 Energy efficiency comparison between power water-filling algorithm and average power allocation

而用户平均分配输出功率时,能效先增大后减小,这是因为功耗是随着输出功率的增大而增大,但是当输出功率小于 32 dBm 时,系统容量增加的比功耗的增加快,所以能效增加,当输出功率大于 32 dBm 时,系统容量增加的比功耗的增加慢,所以能效减小. 同时可以看出同一种算法中用户数越多能效越大.

图 5 给出了基站天线数、用户数和能效的关系. 从图 5 中可以看出,能效随着基站天线数的增加先增大后减小,即存在最优的基站天线数使能效达到最大值. 这是因为基站天线数较小时,随着基站天线数的增大,射频链消耗的功耗较小,系统容量增加的多,所以能效增大. 但是当基站天线数较大时,射频链的损耗较大,容量增加的少,所以能效减小,且用户数越多系统的能效越大.

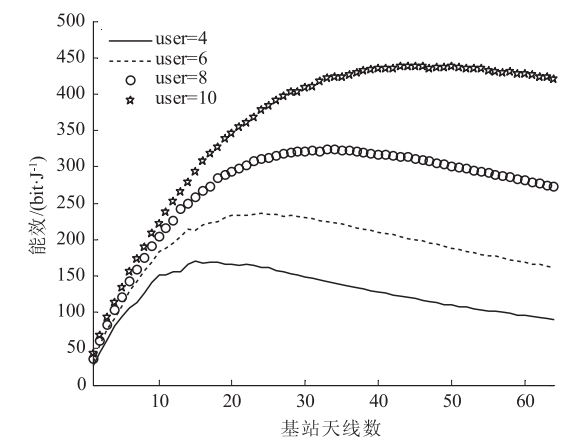


图 5 基站天线数、用户数和能效的关系
Fig.5 Relationship between energy efficiency, BS antennas and users

5 结论

笔者提出一种迭代的功率分配算法来提高大规模 MIMO 系统的能效. 首先建立了一个同时考虑基站输出端分配的用户功率和电路功率的新的功耗模型,并基于该模型,推导能效的表达式,且利用能效函数对用户分配功率的拟凹特性提出了功率分配算法. 然后分析了算法对系统的总功耗的影响. 笔者对提出的功率算法和平均功率分配的能效进行比较,仿真结果证明了所提的迭代功率分配算法能显著地提高系统的能效.

参考文献:

[1] LEE B M,CHOI J,BANG J,et al. An energy efficient antenna selection for large scale green MIMO systems [C]//2013 IEEE international symposium on circuits

- and systems(ISCAS2013). Beijing: IEEE press,2013: 950 – 953.
- [2] 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.
- [3] HAMDI R, AJIB W. Joint optimal number of RF chains and power allocation for downlink massive MIMO systems[C]//2015 IEEE 82nd vehicular technology conference. Boston: IEEE press, 2015: 1 – 5.
- [4] WANG A Y, CHAO S, SODINI C G, et al. Energy efficient modulation and MAC for asymmetric RF microsensor system[C]//Low power electronics and design, international symposium. Huntington Beach: IEEE press, 2001: 106 – 111.
- [5] PEI Y, PHAM T-H, LIANG YC. How many RF chains are optimal for large-scale MIMO systems when circuit power is considered[C]//2012, IEEE global communications conference. Anaheim: IEEE press, 2012: 3868 – 3873.
- [6] CUI S, GOLDSMITH A, BAHAI A. Energy-efficiency of MIMO and cooperative MIMO techniques in sensor networks [J]. IEEE J Sel Areas Commun, 2004, 22(6): 1089 – 1098.
- [7] KIM E P, SHANBHAG N R. An energy-efficient multiple-input multiple-output (MIMO) detector architecture[C]//2011 IEEE workshop on signal processing systems(siPs). Beirut: IEEE press, 2011: 239 – 244.
- [8] LI G Y, XU Z, XIONG C, et al. Energy-efficient wireless communications: tutorial, survey, and open issues [J]. IEEE wireless communications, 2011, 18(6): 28 – 35.
- [9] 毛玉明, 黄晓燕, 冷甦鹏. OFDMA 系统中最优能效功率分配[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(7): 1673 – 1679.
- [10] FENG W, CHEN Y, GE N, et al. Optimal energy-efficient power allocation for distributed antenna systems with Imperfect CSI[J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2016, 65(9): 7759 – 7763.
- [11] MIAO G. Energy-efficient uplink multi-user MIMO [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2013, 12(5): 2302 – 2313.

Optimal Energy Efficiency Power Allocation Alogrithm for Massive MIMO Systems

LU Yanhui, MIAO Panpan, YANG shouyi

(School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to improve the energy efficiency of massive multi-input multi-output (MU-MIMO) downlink systems, the power among users was not allocated equally. The pseudo-concavity of the energy efficiency function with respect to the power of the user allocation was derived through the analysis of energy efficiency function. An optimal power allocation alogrirhm was proposed. Because of the large number of base station antenna in MIMO, the power consumption of radio frequency chain could not be ignored. Thus a new power assumption model was put forward, while both the power of the user allocation and circuit power consumption were considered. Based on this model, the influence of the power of the user allocation on the total power consumption as well as energy efficiency was analysed. By exploiting the pseudo-concavity of the energy efficiency function with respect to the power of the user allocation, an optimal energy-efficiency power allocation algorithm was proposed. Finally, a detailed energy efficiency performance comparison was made between the proposed power allocation algorithm and the power allocation. The simulation results showed that the proposed algorithm could effectively improve the energy efficiency of the MIMO systems.

Key words: MIMO; energy efficiency; power assumption; power allocation algorithm