

多用户 MIMO 下行链路中基于 SLNR 的联合用户 - 天线功率分配算法

李膺东, 朱光喜

(华中科技大学电子与信息工程系, 武汉光电国家实验室 光通信与智能网络部, 湖北 武汉 430074)
E-mail: 197843-800731@163.com

摘要: 在多用户 MIMO 系统中, 在天线间或用户间进行发射功率分配, 可以显著提高系统总容量。本文针对多用户 MIMO 系统中的下行链路, 在多用户迭代注水算法的基础上, 提出一种联合用户 - 天线功率分配算法, 在进行多用户迭代注水之前, 首先基于信漏噪比(SLNR)进行用户间功率分配。仿真结果显示, 与多用户迭代注水算法及仅进行用户选择的多用户迭代注水算法相比, 本文提出的算法大大提高了系统总容量。

关键词: 多用户 MIMO 下行链路; 用户间功率分配; 多用户迭代注水; SLNR

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1000-1220(2010)09-1757-03

Joint User-antenna Power Allocation Algorithm Based on SLNR for Multi-user MIMO Downlink Channels

LI Ying-dong, ZHU Guang-xi

(Huazhong University of Electronic and Information Engineering, Wuhan National Laboratory for Optoelectronics and Optical Communications Intelligent Networks, Wuhan 430074, China)

Abstract: In multi-user MIMO downlink channels, power allocation between antennas or users can improve sum capacity. Based on iterative water-filling algorithm, a joint user - antenna power allocation algorithm is proposed for multi-user MIMO downlink channels. Before iterative water-filling, the proposed algorithm allocate power between users based on SLNR at first. The simulation result shows that sum capacity of the proposed algorithm is better than the iterative water-filling algorithm and the user selection based iterative water-filling algorithm.

Key words: multi-user MIMO downlink; power allocation between users; iterative water-filling; SLNR

1 前言

对于 MIMO 系统来说, 功率分配一直是一个重要的课题, 系统容量与功率分配紧密相关, 在各个时隙、各个频段、各个业务, 以及各个用户间合理的分配功率的课题的重要性不言而喻。在 B3G、4G 中与 OFDM 相结合的 MIMO - OFDM 技术中, 功率分配更是关键技术。当前, 已经有很多人做了这方面的工作, 并取得了很多很重要的结果, 如经典的“注水算法”(Water - Filling), “Beamforming”^[1]等, 但是大部分的工作都限于单用户系统。而实际应用当中都是多用户系统, 比如现行的 GSM、CDMA 等系统, 因此 MIMO 中的多用户功率分配正引起人们的极大关注。

对于多用户功率分配问题, 文献[2,3]中提出了一种多用户迭代注水算法, 对每个用户, 把其他用户的信号看成噪声, 对其运用单用户的注水算法得到最优解, 反复迭代, 直到得到问题的最优解。文献[4]中则分析了以容量最大化为优化目标的情况下, 最多可同时发射用户数的问题。多用户迭代注水算法给出了多用户 MIMO 系统中功率分配的一种解决

方案, 但是从该算法原理可以看出, 只针对各用户分别进行了注水, 并没有在用户间进行功率分配。对于这个问题, 文献[5]中给出了一种方案, 先根据信道矩阵的范数来进行用户选择, 然后再进行多用户迭代注水, 用户平均容量得到一定提高, 但是总容量与原迭代注水算法基本相同。

针对上述问题, 本文提出了一种基于信号泄漏噪声比(SLNR)的联合用户 - 天线功率分配算法, 首先基于 SLNR 进行用户间功率分配, 然后再进行多用户迭代注水算法。仿真结果表明, 无论是与多用户迭代注水算法还是与带用户选择的多用户迭代注水算法对比, 系统总容量均得到了较大的提高。

2 信道模型

考虑如图 1(见下页)中所示的多用户 MIMO 系统下行链路, 假设基站有 N_t 个发射天线, 每个用户的接收天线数均为 N_r , 总用户数为 K 。在某一采样时刻, 用启 k 的接收信号矢量可表示为:

$$\mathbf{Y}_k = \sqrt{\frac{E_s}{N_t}} \mathbf{H}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{Z}_k \quad (1)$$

收稿日期: 2009-06-24 基金项目: 国家自然科学基金项目(60496315, 60802009)资助; 国家“八六三”高技术研究发展计划项目(2008AA01Z204, 2009AA01Z205)资助; 国际科技合作计划项目(2008DFA11630)资助。作者简介: 李膺东, 男, 1978 年生, 博士研究生, 研究方向为分布式 MIMO 系统; 朱光喜, 男, 1946 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为宽带多媒体通信。

其中, \mathbf{Y}_k 为 $N_r \times 1$ 的接收信号向量; E_s 是总的平均发射功率, \mathbf{H}_k 为基站与用户 k 之间的 $N_r \times N_t$ 信道矩阵, 包含路径损耗、阴影衰落和小尺度快衰落, 本文假设信道为准静态信道, 从而信道状态信息可以及时反馈到发射端; \mathbf{X}_k 为 $N_t \times 1$ 的发射信号向量, 其协方差矩阵为 $\mathbf{S}_k = E(\mathbf{X}_k \mathbf{X}_k^H)$; \mathbf{Z}_k 是 $N_r \times 1$ 的零均值加性高斯白噪声向量。

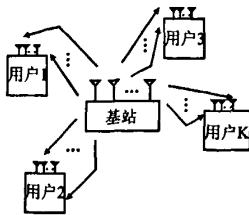


图1 多用户 MIMO 下行链路模型

Fig. 1 Multi-user MIMO downlink model

用户 k 的信道容量可以表示为:

$$C_k = \max_{\sigma(S_k) \leq P_k, k=1,2,\dots,K} \log_2 \det \left(\mathbf{I}_{N_r} + \frac{E_s}{N_r N_0} \mathbf{H}_k \mathbf{S}_k \mathbf{H}_k^H \right) \text{bps/s} \quad (2)$$

2.1 注水算法

众所周知, 单用户 MIMO 信道可以分解为多个相互独立的等效子信道, “注水算法”通过在各子信道上进行功率分配, 可使得上式中的容量达到最大值。假设用户 k 的信道可以分解为 r 个等效子信道, 则通过 Lagrangian 方式可以得到最优的功率分配方式, 即

$$\gamma_i^{opt} = \left(\mu - \frac{N_r N_0}{E_s \lambda_i} \right)_+, \quad i = 1, 2, \dots, r \quad (3)$$

其中, $(x)_+ = \max(x, 0)$, γ_i 为子信道 i 分配到的发射功率, λ_i 为子信道 i 对应的特征值, μ 为满足功率限制条件的常数, 也就是“水平线”。

实际上, 注水算法就是根据各个子信道的好坏来分配发射功率: 对于质量较好的子信道分配较大的发射功率, 对于较差的子信道则分配较小的发射功率, 如果某些子信道太差, 分配给它功率对容量的增加没有任何贡献, 那么就不分配功率。

2.2 多用户迭代注水算法

经典的注水算法只针对单用户 MIMO 系统中的功率分配问题, 对于多用户 MIMO 系统, 情况就比较复杂了, 随着用户数目的增加, 从整体来看, 总容量也相应的增加; 但是, 对于某一用户而言, 意味着它所分配到的功率要减少, 而且别的用户对它的干扰要增加, 导致 SNR 下降, 从而影响到它的通信质量, 当用户数目增加到某个临界点时, 就会导致现有用户不能正常通信, 也就意味着系统容量达到了饱和。

多用户迭代注水算法^[2,3]中, 对每个用户, 把其他用户的信号看成噪声, 对其运用单用户的注水算法得到最优解, 反复迭代, 直到得到问题的最优解。在每次循环中, 每个用户进行注水时均将其他用户的干扰信号当做干扰进行处理。该算法将很难求解的多用户优化问题转换为一系列容易求解的单用户优化问题, 效率明显高于传统优化算法。

虽然多用户迭代注水算法为解决多用户 MIMO 系统中

的功率分配问题提供了一种方法, 但是该算法也有不足之处: 只在天线间进行功率分配, 而没有考虑用户间进行功率分配, 如果某些用户信道质量很差, 仍然会分配到同样的发射功率, 不但对总容量贡献很小, 还会对其他用户造成较大的干扰。

针对以上不足, 文献[5]中提出了一种改进算法: 先对每个用户信道矩阵的行列式 $|\mathbf{H}_k|, \mathbf{H}_k^T|, k=1, 2, \dots, K$ 进行计算, 然后从中选取 $K' \in [N_r, \frac{1}{2}N_r(N_r+1)]$ 个较大的用户, 再对这些用户进行多用户迭代注水。根据该文献中的结论, 改进后的算法用户平均容易得到一定提高, 但是总容量与原迭代注水算法基本相同。

3 联合用户-天线功率分配算法

分析多用户迭代注水算法^[2,3]可以看出, 只在天线间进行功率分配, 而没有考虑用户间进行功率分配。而文献[5]的改进算法中, 虽然对用户进行了选择, 但是在选中的用户之间并没有进行功率分配。为此, 本文提出了一种改进算法: 基于 SLNR 的联合用户-天线功率分配算法, 首先基于 SLNR 进行用户间功率分配, 然后再进行多用户迭代注水算法。

多用户 MIMO 中, 同信道干扰(CCI)和噪声是影响下行链路性能的两个主要因素。对于每个用户, 我们希望其接收信号功率与接收机噪声功率之比越大越好, 同时也希望其接收信号功率与泄漏到其他所有用户的功率总和之比越大越好, 为此, 文献[6]中提出了 SLNR 并作为天线选择的度量, 在文献[7]中则用于信道预编码, 均取得了良好的效果。用户 k 的 SLNR 可以表示为:

$$SLNR_k = \frac{\|\mathbf{H}_k\|^2}{N_r \sigma_k^2 + \sum_{j=1, j \neq k}^K \|\mathbf{H}_j\|^2} \quad (4)$$

其中, σ_k^2 为用户 k 的接收噪声功率。

SLNR 同时考虑了 CCI 和噪声两方面的影响, 在两者之间取得了良好的折中。本文采用 SLNR 作为用户间功率分配的度量, 用户 k 分配到的功率为:

$$P_k = \frac{SLNR_k}{\sum_{k=1}^K SLNR_k} \times P_t, \quad k = 1, \dots, K \quad (5)$$

其中, P_t 为总发射平均功率。

基于 SLNR 的联合用户-天线功率分配算法伪代码如下:
 $S_k = 0, k = 1, 2, \dots, K$

$$P_k = \frac{SLNR_k}{\sum_{k=1}^K SLNR_k} \times P_t, \quad k = 1, \dots, K$$

repeat

for $k = 1 : K$

$$\mathbf{S}_k = \sum_{j=1, j \neq k}^K \mathbf{H}_j \mathbf{S}_j \mathbf{H}_j^T + \mathbf{S}_z$$

$$\mathbf{S}'_k = \arg \max_{\sigma(S_k) \leq P_k} \frac{1}{2} \log |\mathbf{H}_k \mathbf{S}_k \mathbf{H}_k^T + \mathbf{S}'_z|$$

end

until 系统总容量收敛

4 仿真结果

考虑多用户 MIMO 系统下行链路, 假设基站发射天线数

为8,总用户数为4个,每个用户有2个接收天线.假设各用户与基站之间的距离(单位为米)分别为(20,50,80,100),基站端阵元间距为 2λ ,用户端阵元间距为 0.5λ .基站端和用户端角度扩展分别为 20° 和 90° ,路径损耗因子为4,阴影衰落标准差为8.多用户迭代注水算法、带用户选择的多用户注水算法和本文算法的系统总容量与信噪比之间的关系曲线见图2.

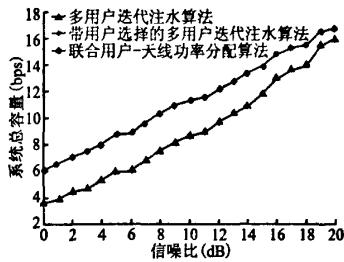


图2 三种算法的总容量-信噪比曲线

Fig. 2 Sum capacity with different SNR of three algorithms

由图2可以看出,本文提出的算法的系统总容量显然比其他两种算法有较大提高,特别是在低信噪比情况下.在高信噪比情况下,三种算法之间的容量差别较小,这是因为在信噪比较高的情况下,各用户信道质量差别较小,功率分配对总容量的影响变小,这种现象与单用户MIMO中的注水算法中的现象类似.

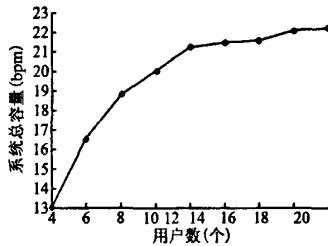


图3 系统总容量随着用户数的变化曲线(SNR = 20dB)

Fig. 3 Sum capacity with different number of users (SNR = 20dB)

图3中则给出了本文算法系统总容量随着用户数变化的趋势(假设信噪比为20dB),如图所示,随着同时通信的用户的增大,容量增加的幅度变小,最后几乎不变.当用户数为18个时,系统总容量基本达到最高点,正好证明了文献[4]中

的结论(同时通信的用户数最多为 $\frac{1}{2}N_r(N_r+1)$ 个).

5 结论

针对多用户MIMO系统中的下行链路,在多用户迭代注水算法的基础上,本文提出了一种联合用户-天线功率分配算法,在进行多用户迭代注水之前,首先基于信漏噪比(SLNR)进行用户间功率分配.仿真结果显示,与多用户迭代注水算法及仅进行用户选择的多用户迭代注水算法相比,本文提出的算法大大提高了系统总容量.

References:

- [1] Wonjong Rhee, Wei Yu, Cioffi J M. The optimality of beamforming in uplink multiuser wireless system wireless communications [J]. IEEE Transactions on, 2004, 3(1):86-96.
- [2] Pramod Viswanath, David N C Tse, Venkat Anantharam. Asymptotically optimal water-filling in vector multiple-access channels [J]. Information Theory, IEEE Transactions on, 2001, 47(1): 241-267.
- [3] Wei Yu, Rhee W, Boyd S, et al. Iterative water-filling for gaussian vector multiple access channels [C]. Information Theory, 2001 IEEE International Symposium on, 2001, 24-29, 322.
- [4] Wei Yu, Wonjong Rhee, Cioffi J M. Optimal power control in multiple access fading channels with multiple antennas. Communications, 2001. ICC 2001[C]. IEEE International Conference on, 2001, 2, 11-14;575-579.
- [5] Guo Zhi-bin, Cao Xue-hong. An improved power allocation algorithm for multi-user MIMO systems[J]. Guangdong Communication Technology, 2005, 25(2): 53-57.
- [6] Sadek M, Tarighat A, Sayed A H. Active antenna selection in multiuser MIMO communications, Signal Processing[J]. IEEE Transactions on, 2007, 55(4): 1498-1510.
- [7] Wang Jing-jing, Xie Xian-zhong, Zhang Qian. Dynamic power allocation based on SLNR precoding for multi-user MIMO downlink [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications(Natural Science Edition), 2008, 20(6): 631-633.

附中文参考文献:

- [5] 郭志滨,曹雪虹.一种改进的多用户MIMO系统的功率分配算法[J].广东通信技术,2005,25(2):53-57.
- [7] 王晶晶,谢显中,张倩.多用户MIMO中基于SLNR预编码的动态功率分配[J].重庆邮电大学学报,2008,20(6):631-633.

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>