

基于块对角算法的 MIMO 系统资源调度策略

李晓辉, 易克初, 刘乃安, 田 斌

(西安电子科技大学 综合业务网理论与关键技术国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘要: 提出一种基于块对角算法的多输入多输出系统空时二维资源调度策略. 通过空域注水算法对功率进行分配, 并通过时域各用户功率和比特的动态调整, 把资源分配从空间维扩展到空时二维. 在一定的周期内, 各用户的数据速率满足服务质量需要, 同时不再受块对角算法用户数必须小于基站天线数的限制. 仿真表明, 改进的块对角算法能够大大提高多用户多输入多输出系统的功率效率, 并且保证用户间的公平性.

关键词: 多入多出; 资源调度; 块对角算法; 服务质量

中图分类号: TN911 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2400(2006)05-0754-05

A resource scheduling strategy based on the BD algorithm for MIMO systems

LI Xiao-hui, YI Ke-chu, LIU Nai-an, TIAN Bin

(State Key Lab. of Integrated Service Networks, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

Abstract: A space-time resource scheduling strategy based on the Block Diagonal (BD) algorithm is presented for Multi-Input and Multi-Output systems. The transmission power is allocated by the water-filling algorithm in the space dimension and adjusted dynamically in the time domain, and then the resource allocation is expanded to space-time dimensions. The quality of service for each user is guaranteed, and the number of the users is no longer limited by the number of the transmission antennas. Simulation results show that the modified BD algorithm improves the power efficiency and maintains the fairness among users.

Key Words: Multi-Input and Multi-Output (MIMO); resource scheduling; Block Diagonal (BD); algorithm; Quality-of-Service(QoS)

多入多出(MIMO)系统能够充分利用空间资源,在不增加系统带宽和发送功率的情况下,成倍地提高频谱效率^[1,2].在多用户MIMO系统中,基站具有多天线、用户具有1天线或多天线的信道都被认为是MIMO信道.本文中研究无线蜂窝系统下行链路的资源调度,其中的一个关键问题是如何解决用户间的干扰.虽然可通过接收端的多用户检测(MUD)来抵消用户间干扰,但是这势必会增加接收机的计算开销.由于蜂窝环境的接收机往往是很小的移动设备,因此,常常采用发送端的干扰迫零(ZF)处理来减小接收机MUD的开销,而块对角(BD)算法是一种发送ZF处理的重要方法.

文献[3,4]中的发送ZF算法分别给出了用户具有单天线和多天线时,如何生成发送矩阵,没有考虑用户间的公平性.文[5]中给出了一种基于用户速率请求的功率分配算法,根据用户请求的速率和每个用户的对角元素分别注水,在一定程度上保证了用户的公平性,但是发送功率不是最优的,尤其是在某一用户信道非常恶劣时,可能会导致非常高的发送功率.针对这一问题,笔者提出了一种基于BD算法的自适应子信道、比特和功率分配方案,通过空域注水算法对功率进行分配,并且通过时域各用户功率和比特的动态调整,把

收稿日期:2006-04-28

基金项目:陕西省国际合作项目(2003KW08);华为基金资助项目(YJCB2004002WL);通信抗干扰技术国家重点实验室基金资助项目(51434140104DZ0105);西安电子科技大学研究生创新基金资助项目(创05014)

作者简介:李晓辉(1972-),女,副教授,西安电子科技大学博士研究生.

资源管理从空间维扩展到了空时二维,在一定的周期内,各用户的数据速率满足用户需求,同时不再受用户数必须小于基站天线数的限制。

1 多用户 MIMO 信道

假设系统中具有 K 个用户,在单基站的多用户下行链路中,基站具有 n_T 天线,用户 j 具有 n_{R_j} 接收天线,总接收天线 n_R 定义为 $n_R = \sum_{j=1}^K n_{R_j}$. 用 $\{n_{R1}, \dots, n_{RK}\} \times n_T$ 表示 MIMO 下行链路. 定义从基站到用户 j 的信道矩阵为 \mathbf{H}_j , \mathbf{M}_j 和 \mathbf{d}_j 分别表示发送矩阵和发送数据向量. 用户 j 的接收信号向量 \mathbf{x}_j 为

$$\mathbf{x}_j = \sum_{i=1}^K \mathbf{H}_i \mathbf{M}_i \mathbf{d}_i + \mathbf{n}_j = \mathbf{H}_j \mathbf{M}_S \mathbf{d}_S + \mathbf{n}_j = \underbrace{\mathbf{H}_j \mathbf{M}_j \mathbf{d}_j}_{\text{signal}} + \underbrace{\mathbf{H}_j \widetilde{\mathbf{M}}_j \widetilde{\mathbf{d}}_j}_{\text{interference}} + \underbrace{\mathbf{n}_j}_{\text{noise}}, \quad (1)$$

其中 $\mathbf{M}_S = [\mathbf{M}_1 \quad \mathbf{M}_2 \quad \dots \quad \mathbf{M}_K]$, $\mathbf{d}_S = [d_1^T \quad d_2^T \quad \dots \quad d_K^T]^T$ ($[\cdot]^T$ 表示矩阵的转置), $\widetilde{\mathbf{M}}_j$ 表示从 \mathbf{M}_S 中除去 \mathbf{M}_j 的矩阵, $\widetilde{\mathbf{d}}_j$ 表示从 \mathbf{d}_S 中除去 \mathbf{d}_j 的向量, \mathbf{n}_j 表示用户 j 上的附加高斯白噪声向量.

如果发送机知道每个用户信道状态信息(CSI),于是就能够根据发往一个用户的信号,计算出对其他用户造成的干扰. 因此,发送机可通过设计 \mathbf{M}_j 来避免用户间干扰.

在后面的分析中, $\mathbf{H}_S = [\mathbf{H}_1^T \quad \mathbf{H}_2^T \quad \dots \quad \mathbf{H}_K^T]^T$ 表示下行链路的信道矩阵,而 $\widetilde{\mathbf{H}}_j$ 表示用户 j 外的其他用户信道矩阵.

2 干扰迫零发送及块对角算法

多用户 MIMO 系统下行链路的发送设计中,解决多用户干扰问题的方法可分为两类:一是使用编码技术^[6],二是线性处理方法. 线性处理方法又可进一步分为干扰迫零(ZF)和干扰平衡两种方式. 由于 ZF 方法实现简单,且易于与已有的通信协议结合,因此本文中采用基于干扰迫零的资源调度,而如果发送机无可用 CSI,或是用户间存在严重的空间干扰,就必须结合其他多址方法,使用不同的时域、频域或码字来分离不同用户的信号.

如果所有用户使用单天线,可使用信道矩阵的伪逆^[7]的方法来消除用户间干扰,此时信道矩阵可完全对角化. 当用户具有多天线时,可令 $\mathbf{H}_i \mathbf{M}_j = 0, \forall i \neq j$ 来抵消多用户干扰,即迫使 \mathbf{M}_j 位于 $\widetilde{\mathbf{H}}_j$ 的零空间,用 $\widetilde{\mathbf{V}}_j^{(0)}$ 表示 $\widetilde{\mathbf{H}}_j$ 零空间的正交基,用它的列作为用户 j 的发送矩阵 \mathbf{M}_j , \mathbf{H}_S 可转化为块对角形式

$$\mathbf{H}'_S = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_1 \widetilde{\mathbf{V}}_1^{(0)} & 0 \\ & \ddots \\ 0 & \mathbf{H}_K \widetilde{\mathbf{V}}_K^{(0)} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

通过注水算法进行功率分配^[1],块对角算法的容量可写为^[5]

$$C_{BD} = \max_{\mathbf{M}_S} \log_2 |\mathbf{I} + 1/\sigma_n^2 \mathbf{H}'_S \mathbf{M}'_S \mathbf{M}'_S{}^H \mathbf{H}'_S{}^H|, \quad (3)$$

\mathbf{M}'_S 是要找的最大化式(3)中的发送矩阵, $[\cdot]^H$ 表示共轭转置.

在接收端,可使用最大似然估计得到用户 j 的估计数据 $\hat{\mathbf{d}}_j$:

$$\hat{\mathbf{d}}_j = \arg \min_d (\|\mathbf{x}_j - \mathbf{H}_j \mathbf{M}_j \mathbf{d}_j\|^2) \quad (4)$$

其中 \mathbf{d} 为发送向量的所有可能取值, $\|\cdot\|$ 表示欧几里德范数. 因为 \mathbf{M}_j 的取值范围受到了限制,所以 C_{BD} 不能达到文[7]中基于污纸编码的容量上限. 但是,由于其相对较低复杂度,所以在实际应用中具有重要的价值.

3 基于块对角算法的 MIMO 系统资源调度策略

基于注水功率分配的 BD 算法可能导致一个或多个信道质量好的用户占用大部分可用功率,而信道质量差的用户具有很少或根本没有吞吐量. 在实际通信系统中,满足用户的服务质量(QoS)需求同样有着重要的意义. 这里,在比例公平算法的基础上,研究基于 BD 算法的 MIMO 空时二维资源分配策略,目标是在按

比例满足用户需求的数据速率条件下,在一定的误比特率限制下,最小化发送总功率.为简化分析,公式推导过程假定 $n_{R_j} = 1$.

假定用户速率需求比例为 $R_1 : R_2 : \dots : R_K$,而用户实际速率的比例为 $r_1 : r_2 : \dots : r_K$,定义用户 j 的公平系数为

$$F_j = \left[\frac{r_j}{\sum_{k=1}^K r_k} \right] \left/ \left[\frac{R_j}{\sum_{k=1}^K R_k} \right] \right., \quad (5)$$

而整个系统的公平性因子可表示为

$$F = \frac{\left(\sum_{k=1}^K F_k \right)^2}{K \cdot \sum_{k=1}^K F_k^2}, \quad (6)$$

则整个优化的问题可表示为

$$\min_{\gamma_j, \mathbf{M}_j, F_j} \sum_{j=1}^K P_j = \sum_{j=1}^K \mathbf{M}_j^H \mathbf{M}_j. \quad (7)$$

限制条件:(A) $F \geq \phi$; (B) $P_j > 0$; (C) $\gamma_j \geq \text{SNR}_j$. (A)中的 ϕ 表示系统所需公平性因子,保证了用户在一定时间范围内的公平性;(B)保证所有用户的发送功率大于0;(C)中 SNR_j 表示用户 j 所需的信噪比,保证一定的误比特率.

对于 MQAM 调制,为了计算特定误比特率(BER)下的最大传输速率,常常引入 SNR Gap,用 Γ 表示^[3],

$$\Gamma = -\ln(5\text{BER})/1.6, \quad (8)$$

用户 j 能够传输的数据速率可表示为

$$r_j = \log_2(1 + \text{SNR}_j/\Gamma_j). \quad (9)$$

假定噪声功率归一化,各用户的最大发送数据速率可表示为:

$$C_j = \log_2 \left| \mathbf{I} + (\mathbf{H}_j \tilde{\mathbf{V}}_j^{(0)}) \mathbf{M}_j \mathbf{M}_j^H (\mathbf{H}_j \tilde{\mathbf{V}}_j^{(0)})^H / \Gamma_j \right|, \quad (10)$$

根据 $\det(\mathbf{I} + \mathbf{A}\mathbf{B}) = \det(\mathbf{I} + \mathbf{B}\mathbf{A})$,在 $n_{R_j} = 1$ 时有

$$C_j = \log_2 \left(\mathbf{I} + \mathbf{M}_j^H \mathbf{M}_j (\mathbf{H}_j \tilde{\mathbf{V}}_j^{(0)}) (\mathbf{H}_j \tilde{\mathbf{V}}_j^{(0)})^H / \Gamma_j \right), \quad (11)$$

则有

$$\mathbf{M}_j^H \mathbf{M}_j = (2^{C_j} - 1) \cdot \Gamma_j / ((\mathbf{H}_j \tilde{\mathbf{V}}_j^{(0)}) (\mathbf{H}_j \tilde{\mathbf{V}}_j^{(0)})^H). \quad (12)$$

若在时间周期 T 内,用户 j 能使用 L_j 个子信道,用 l 表示空时子信道.于是问题(7)中的最小化功率可转化为

$$\min \sum_{j=1}^K \sum_{l=1}^{L_j} [(2^{C_{j,l}} - 1) \cdot \Gamma_j / ((\mathbf{H}_{j,l} \tilde{\mathbf{V}}_{j,l}^{(0)}) (\mathbf{H}_{j,l} \tilde{\mathbf{V}}_{j,l}^{(0)})^H)], \quad (13)$$

限制条件:(A)每时隙的数据速率 $\sum_{j=1}^K \sum_{l=1}^{L_j} C_{j,l}/T$ 保持不变;(B) Γ_j 与 BER 有关,通过式(8)计算;(C) $\mathbf{H}_{j,l} \tilde{\mathbf{V}}_{j,l}^{(0)}$ 与每一时隙的用户及天线选择有关.式(13)中的问题可通过拉格朗日乘法^[8]求解,但是从上面的分析可看出,最优化问题的变量很多,且受比特整数分配的限制,是一个具有很高复杂度的 NP-hard 问题^[8].因此,根据上面的分析,把算法推广到不受选择一个接收天线限制,提出一种次优的 MIMO 系统空时二维资源分配算法,具体描述为:

第 1 步 参数初始化,令 $\omega_j = R_j / \sum_{k=1}^K R_k$,并创建各用户的信道矩阵 \mathbf{H}_j ,采用准静态平坦衰落 MIMO 信道模型,即在时间周期 T 内信道保持不变,不同时间周期信道不同.

第 2 步 选择 $\omega_j \|\mathbf{H}_j\|_F^2/n_{R_j}$ 最大的 G 个用户, $G \leq n_r$,构成该时隙的 \mathbf{H}_S , $\|\cdot\|_F$ 表示矩阵的 Forbenius 范数.

第 3 步 计算 $\tilde{\mathbf{V}}_S^{(0)}$, \mathbf{H}'_S 等.

第 4 步 根据注水算法^[1,5]计算所需的功率分配

(a) 根据信道状态信息确定每用户及对应子信道的调制方式和比特数 $b_{j,i}$;

(b) 修改 BD 算法中的发送矩阵 $\mathbf{M}'_j = P_j^{1/2} \mathbf{M}_j$.

(c) 计算每用户的比特数 $r_j = \sum_{i=1}^N \sum_{i=1}^{m_j} b_{j,i}(t)$, t 表示周期内时间的不同时隙.

第 5 步 子信道、功率和比特的加权比例公平处理.

计算式(5)中的公平系数 F_j ,在下次发送中,将速率请求比例修正为 $\omega_j = \left[\frac{R_j}{\sum_{k=1}^K R_k} \right] \left/ \left(\frac{F_j}{F} \right) \right.$ (如果 F_j 为

0, 可令其为一个任意小的正数, 如 0.01)。重复 2~5 步, 直到发送周期结束。

4 性能分析

为了验证所提算法的性能, 在 MATLAB 下对算法进行了仿真。假设系统中基站有 4 天线, 8 用户每个用户具有 2 天线, 信道采用准静态平坦衰落信道。分别对下面 3 种算法进行仿真: 算法 1 中各用户采用固定的速率和调制方式来发送数据; 算法 2 是仅仅限制总的的数据速率, 对每个用户的速率不加限制, 根据最大信道增益选择用户, 通过注水算法来最小化发送总功率的自适应比特加载算法; 算法 3 为提出的改进算法。定义平均 CNR 为 $\|H_s\|_F^2/\sigma^2/H_s$ 元素个数, 仿真中归一化噪声功率, 平均 CNR 变化范围为 $[-10, 20]$ dB; SNR gap 取 5 dB, 对应的未编码误比特率为 10^{-3} 。

仿真中, 同时发送数据的速率为每时隙发送 8 bit, 每个时间周期每天线发送 100 个数据符号。图 1 和图 2 中, 算法 1 的各子信道对应的固定比特分配算法, 采用 QPSK 调制方式; 算法 2 在块对角算法的基础上根据注水功率进行比特加载; 算法 3 根据速率公平加权对用户资源分配进行调整后再进行功率分配和比特加载的算法。图 1 是不同算法在不同平均 CNR 下所需的发送总功率比较; 图 2 是用户在不同算法下的归一化速率分配, 即 $r_j / (\sum_{k=1}^K r_k)$, 以用户 1 为例进行研究, 每一组表示特定平均 CNR 下不同算法用户 1 的速率与总数据速率的比值。

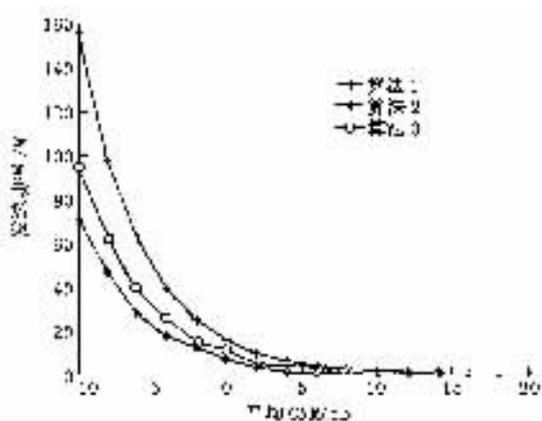


图 1 功率效率比较

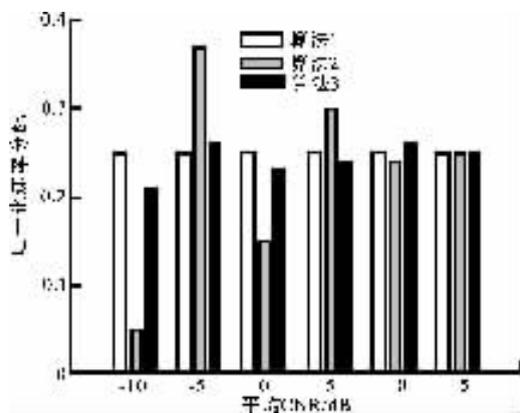


图 2 归一化速率分配

从图 1 和图 2 的仿真数值结果, 可得出:

- (1) 在高 CNR 区域, 固定用户比特分配算法(算法 1)、块对角注水算法(算法 2)和所提算法(算法 3)具有基本相同的功率效率, 因为功率在高 CNR 区域, 各信道都具有较好的性能, 可分配几乎相同的功率。
- (2) 在低 CNR 区域, 为保证相同的总数据速率, 固定用户比特算法所需的发送功率远远大于注水算法和所提算法, 这是因为在信道质量很差的情况下, 为保证特定的误码率, 不得不提高系统的发送功率; 注水算法虽然具有较高的容量, 但是从不同用户的速率分配来看, 由于部分用户的功率很低, 所以只能得到很低或者不能得到所需的数据速率。
- (3) 从图 1 中, 所提算法所需的发送功率略大于注水算法, 但从图 2 中可看出, 使用基于注水的块对角算法的用户速率变化很大, 可能使用户具有很小的数据速率, 也可能一个用户占有大多数资源; 而所提算法保证了在一定时间周期内用户数据速率的公平性, 因此更能满足实际无线通信系统的需要。

5 结 论

在研究 MIMO 系统信道模型的基础上, 重点分析了多用户 MIMO 系统中块对角算法的原理, 提出一种在用户 QoS 需求限制下, 在时域对用户速率进行调整的块对角算法, 使得在特定时间周期内, 在优化功率效率的同时, 满足用户数据速率的需求。仿真结果证明, 在高 CNR 区域, 固定用户比特分配算法、注水算法和所提算法具有基本相同的功率效率; 但是在低 CNR 区域, 为保证相同的数据速率, 固定用户比特算法所需

的发送功率远远大于注水算法和所提算法.这是因为在信道质量很差的情况下,为保证特定的误码率,不得不提高系统的发送功率;所提算法所需的发送功率略大于注水算法,但却保证了时间周期内用户数据速率的公平性,因此更能满足实际无线通信系统的需要.

参考文献:

- [1] (澳)Vucetic B, Yuan Jinhong. 空时编码技术[M]. 王晓海译. 北京:机械工业出版社,2004.
- [2] Li Yongzhao, Liao guisheng, Wang Feng. Application of DSSS Based Layered Space-time Architecture to Downlink Correlated Fading MIMO Systems[J]. Journal of Xidian University, 2005, 32(3): 357-361.
- [3] Wong K K. Adaptive Space-Division Multiplexing for Multiuser MIMO Antenna Systems in Downlink[A]. 2005 Asia-Pacific Conference on Communications[C]. Westems, Australia;, IEEE, 2005. 334-338.
- [4] Zhang Jinfan, Wu Yongle, Zhou Shidong, et al. Low Complexity Transmitter Zero Forcing Algorithm for Downlink Multiuser MIMO Antenna Systems[A]. IEEE 62th Vehicular Technology Conference VTC-2005-fall[C]. Dallas: IEEE, 2005. 608-611.
- [5] Spencer Q H. Transmission Strategies for Wireless Multi-user Multiple-Input Multiple-Output Communication Channels [D]. Hawaii: Brigham Yong University, 2004.
- [6] Peel C B. On Dirty-Paper Coding[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2003, 20(3): 112-113.
- [7] Haustein T, von Helmolt C, Jorswieck E, et al. Performance of MIMO Systems with Channel Inversion[A]. Proceedings of IEEE 55th Vehicular Technology Conference[C]. Vancouver; IEEE, 2002. 35-39.
- [8] 袁亚湘,孙文瑜. 最优化理论与方法[M]. 北京:科学出版社,1997.

(编辑:李维东)

(上接第 747 页)

3 结束语

蚁群算法在组合优化领域已得到越来越多的应用,但对于连续空间优化问题的研究则很少.文中提出的求解连续空间问题的蚁群混合算法,在蚁群算法进化思想的基础上定义了新的蚁群信息素更新规则和蚁群在解空间的寻优方式,并且结合改进的 Alopex 算法以加强搜索能力,避免了因单一搜索机制引起的停滞现象,提高了搜索效率,仿真结果也佐证了这一点.对算法的收敛性给予理论上的证明是进一步研究的问题.

参考文献:

- [1] Dorigo M, Stutzle T. Ant Colony Optimization[M]. Cambridge: The MIT Press, 2004 .
- [2] Yang Shuyuan, Liu Fang, Jiao Licheng. A Novel Genetic Algorithm Based on the Quantum Chromosome[J]. Journal of Xidian University, 2004, 31(1): 76-81.
- [3] Dorigo M, Maniezzo V, Coloni A. The Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents[J]. IEEE Trans on Systems, Man & Cybernetics B, 1996, 26(2): 29-41.
- [4] Stutzl T, Hoos H H. The Max-Min Ant System and Local Search for the Traveling Salesman Problem[A]. Proc IEEE International Conference on Evolutionary Computation(ICEC'97)[C]. Indianapolis: IEEE, 1997. 309-314.
- [5] 汪 镭,吴启迪. 蚁群算法在连续空间寻优问题中的应用[J]. 控制与决策,2003, 18(1): 45-48.
- [6] Pandya A S. A Stochastic Parallel Optimization Algorithm[D]. New York: Syracuse University, 1988.
- [7] 弥丽娜,陈治飞,孙昌志. 一种随机并行算法——Alopex 算法的改进[J]. 沈阳工业大学学报,2000, 22(4): 296-299.

(编辑:齐淑娟)