

多小区 MIMO 系统中的迫零型预编码方法

周 雯¹ 张胜利²

(1. 汕头大学工学院, 汕头, 515063; 2. 深圳大学信息工程学院, 深圳, 518000)

摘要: 针对多小区下行链路中的多用户之间的同频干扰问题, 提出了一种新的迫零型预编码方法。该方法基于线性代数的正交投影原理, 构造联合干扰信道矩阵, 将目标用户的信道矩阵投影到联合干扰信道的零空间。由此构造的预编码矩阵可以使得目标用户不会对其他用户产生干扰。相比于传统的预编码方法, 此方法在低信噪比区域性能较优, 但是在高信噪比区域不如传统方法, 所以结合两种方法的特点, 本文进一步提出了一种自适应预编码方法, 并且分析对比了 3 种方法的计算复杂度。仿真结果表明: 自适应预编码方法在整个信噪比区域均优于传统方法, 而运算复杂度略高于传统方法。

关键词: 多输入多输出系统; 多小区; 预编码; 迫零型

中图分类号: TN929.5 **文献标志码:** A

Zero-Forcing Precoding Methods for Multi-Cell MIMO Systems

Zhou Wen¹, Zhang Shengli²

(1. Faculty of Engineering, Shantou University, Shantou, 515063, China; 2. Faculty of Information and Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, 518000, China)

Abstract: To suppress the co-channel interference in downlink multi-cell systems, a novel zero-forcing (ZF) precoding method is proposed based on the principle of orthogonal projection in linear algebra. A joint interference channel matrix is constructed, and then the channel matrix of the target user is projected onto the null space of the joint matrix. Hence, the precoding matrix of the target user lies in the null space of all interference users without interfering with others. Compared with the conventional ZF method, the projection-based method performs better at low signal to noise ratio (SNR). However, it is inferior to the conventional one at high SNR. Therefore, an adaptive ZF method is proposed combining the traits of both the conventional method and the projection-based one. The computational complexities of the proposed methods are analyzed and compared with the conventional one. Simulation results show that the proposed adaptive ZF method offers better performance than the conventional one over a whole SNR region, and the complexity of the proposed method is a little higher than that of the conventional one.

Key words: MIMO systems; multi-cell; precoding; zero-forcing (ZF)

引 言

多用户或者多小区之间的信号干扰将影响目标用户信号的接收质量, 显著地降低通信系统的吞吐

量。如何抑制或者消除小区间或用户间干扰已经成为目前的研究热点^[1-3]。与第三代移动通信系统相比,下一代移动通信系统的一个新要求是提高小区边缘用户的信号质量,因为小区边缘用户的信号往往经历深衰落和容易受到相邻小区用户的干扰。为了解决该问题,在 3.9 G 移动通信的协议设计中^[4,5],即 Long term evolution advanced (LTE-A)多小区协作技术应运而生。一般地,多小区协作方案分成两种:联合传输(Joint transmission, JP)^[6-8]和协同波束成形(Coordinated beamforming, CB)^[9-17]。联合传输方案需要在协作小区基站端完全共享数据信息和信道状态信息(Channel state information, CSI),此时的系统等价于一个超级单小区多天线系统。文献[6]设计了下行多小区联合传输方案的基本框架,在此框架下本文又提出了若干联合传输的具体方法,如联合 MMSE (Joint minimum mean square error, JT-MMSE)方法和联合零空间分解法(Joint transmitter null space decomposition, JT-DECOMP)等。协同波束成形方案仅需要 CSI 在协作小区间共享,而不需要用户数据共享,这将大大降低系统的回程线路因共享数据带来的负担。为了提高边缘小区用户的信号质量,同时考虑到用户的公平性,文献[11]首先将多小区波束成形问题用数学模型表述,进而发现它是一个 NP 难题(Non-deterministic polynomial hard, NP-hard),然后提出了循环的坐标下降算法近似求解,并用计算机仿真验证了所提出算法的有效性。

以 CB 为基础的方案对于回程线路速率受限的多数场合比较适合,因此本文研究基于 CB 方案的预编码方法。多用户预编码方法设计准则有迫零准则^[9,15]、放松的迫零准则^[13]、最大信漏噪声比^[14]和最大信干比^[17]等。本文主要考虑基于迫零准则的多用户预编码方法。传统的迫零方法一般使用奇异值分解技术(Singular value decomposition, SVD),目标用户的预编码向量或矩阵位于干扰用户的零空间内,从而每一个用户的发送数据均不对其他用户产生干扰,也不会受到其他用户的干扰。采用传统方法在低信噪比区域系统的通信和速率较低,所以本文提出了两种预编码方法以克服该问题。首先,基于信号的正交投影原理,本文提出了一种新的多用户预编码方法,将多发单收系统的预编码方法^[12]推广到了多发多收系统。但是,虽然该方法在低信噪比区域优于传统方法,但是在高信噪比区域却不如传统方法。本文结合两种方法的特点,进一步提出了一种自适应的预编码方法,并采用计算机仿真对比了传统方法和提出方法的性能和计算复杂度。

1 系统模型

如图 1 所示,考虑 K 个协作小区构成的多小区多用户系统,基站(Base station, BS)端配有 M 根发送天线,每个用户配有 N 根接收天线。假设在同一频段、同时激活的用户仅一个,则同时激活的用户数等于协作小区数。基站间的协作采用 CB 为基础的设计方案,即基站间仅共享信道状态信息,不共享用

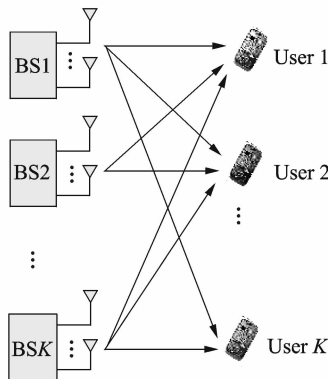


图 1 多小区多用户系统模型

Fig. 1 The multi-cell multi-user system model

户数据。用户 k 接收的信号可以写成

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}_{kk} \mathbf{W}_k \mathbf{x}_k + \sum_{i=1, i \neq k}^K \beta_{ik} \mathbf{H}_{ik} \mathbf{W}_i \mathbf{x}_i + \mathbf{N}_k \quad (1)$$

式中:右边的第 1 项为用户信号;第 2 项为其他用户干扰项; $N \times M$ 维矩阵 \mathbf{H}_{ij} 为基站 i 到用户 j 的信道响应; \mathbf{W}_i 为 $M \times L$ 的预编码矩阵; \mathbf{x}_i 为 $L \times 1$ 的列向量,代表用户 i 的数据,其中 L 为每个用户的数据子流数目; β_{ij} 为从基站 i 到用户 j 的相对衰落因子。每个数据子流的功率是 P/L , 并且 \mathbf{W}_i 的每一列的范数是 1, 故有

$$E(\|\mathbf{W}_i \mathbf{x}_i\|_F^2) = P/L \times L = P \quad (2)$$

式中:符号 $\|\cdot\|_F$ 代表 Frobenius 范数。可以发现,基站的发送功率是 P , $N \times 1$ 维列向量 \mathbf{N}_k 是高斯加性白噪声,其方差是 σ_k^2 。用户 k 的接收信噪比定义为

$$\text{SNR}_k = P/\sigma_k^2 \quad (3)$$

2 迫零型预编码方法

2.1 传统的预编码方法

首先回顾文献[9,15]描述的传统 ZF 预编码方法。构造联合干扰信道矩阵

$$\mathbf{H}'_k = [\beta_{k1} \mathbf{H}_{k1}^T \quad \cdots \quad \beta_{k(k-1)} \mathbf{H}_{k(k-1)}^T \quad \beta_{k(k+1)} \mathbf{H}_{k(k+1)}^T \quad \cdots \quad \beta_{kK} \mathbf{H}_{kK}^T] \quad (4)$$

它的奇异值分解可以表示为

$$\mathbf{H}'_k = [\mathbf{U}_k \quad \mathbf{U}'_k] \begin{bmatrix} \Sigma & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_k^H \\ \mathbf{V}'_k^H \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中:上标 H 为 Hermitian 转置, \mathbf{V}'_k 为所有零奇异值对应的特征向量组合。从式(5)可以看出, \mathbf{V}'_k 由 $[M - N(K-1)]$ 维列向量组成,而发送数据子流应该满足 $L \leq M - (K-1)N$ 。不失一般性,本文均假设 $L = M - (K-1)N$ 。所以用户 k 的预编码矩阵可以表示为

$$\mathbf{W}_k^{\text{conv}} = \mathbf{V}'_k \quad (6)$$

2.2 基于投影变换的预编码方法

对于多发单收多用户系统,文献[12]提出了一种“无私”的多用户预编码方法,该方法利用了线性代数中的正交投影变换原理。本文将该方法推广到多发多收系统中。首先,建立一个投影矩阵 $\mathbf{\Pi}_{(\mathbf{H}'_k)^{\perp}}$, 该矩阵使得任何向量均投影到 \mathbf{H}'_k 的零空间内;然后把目标用户 k 的信道矩阵 \mathbf{H}_s 投影到此零空间,因此目标用户将不对其他用户产生干扰。用户 k 对应的预编码矩阵为

$$\mathbf{B} = \mathbf{\Pi}_{(\mathbf{H}'_k)^{\perp}} \mathbf{H}_s^H \quad (7)$$

式中: $\mathbf{\Pi}_A^{\perp} = \mathbf{I} - \mathbf{A}(\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^H$, 代表到矩阵 \mathbf{A} 列向量构成的正交补空间的投影矩阵。考虑到预编码矩阵的列向量的范数归一化要求,用户 k 的预编码矩阵进一步写成

$$\mathbf{W}_k^{\text{proj}} = \left[\frac{\mathbf{B}_1}{\|\mathbf{B}_1\|_F} \quad \frac{\mathbf{B}_2}{\|\mathbf{B}_2\|_F} \quad \cdots \quad \frac{\mathbf{B}_L}{\|\mathbf{B}_L\|_F} \right] \quad (8)$$

式中 \mathbf{B}_i 为矩阵 \mathbf{B} 的第 i 列。容易验证, $\mathbf{H}_{kj} \mathbf{W}_k = 0, k \neq j$, 即式(1)的干扰项为零。

2.3 自适应预编码方法

在计算机仿真分析时发现 2.2 节提出的方法在低信噪比区域优于传统的 ZF 预编码方法,但是在高信噪比区域性能不如传统方法。因此,结合两者的特点,本文提出一种自适应多用户预编码方法。用户 k 对应的预编码矩阵可以写成

$$\mathbf{W}_k^{\text{mix}} = \begin{cases} \mathbf{W}_k^{\text{conv}} & f_k(\mathbf{W}_k^{\text{conv}}) > f_k(\mathbf{W}_k^{\text{proj}}) \\ \mathbf{W}_k^{\text{proj}} & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

其中

$$f_k(\mathbf{W}) = \det[\mathbf{I} + \mathbf{H}_{kk}\mathbf{W}(\mathbf{H}_{kk}\mathbf{W})^H \text{SNR}_k] \quad (10)$$

另外, $\mathbf{W}_k^{\text{conv}}$ 和 $\mathbf{W}_k^{\text{proj}}$ 分别由式(6)和式(8)给出。如前所述,采用传统 ZF 方法和基于投影的 ZF 方法在某个信噪比门限时系统和速率会相同,此信噪比门限定义为

$$\text{SNR}_{\text{th}} = \arg\text{Eq}(\text{SNR}(f(\mathbf{W}^{\text{conv}})) = f(\mathbf{W}^{\text{proj}})) \quad (11)$$

上式定义中用户的下标 k 被省略,因为此门限与用户索引无关。

3 多小区系统的和速率

基于 ZF 准则的预编码方法特点是基站端的预编码使得多小区间的干扰完全消除,所以第 k 个用户(位于第 k 个小区)的接收信号为

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}_{kk}\mathbf{W}_k x_k + \mathbf{N}_k, k = 1, 2, \dots, K \quad (12)$$

则协作小区的用户和速率为

$$R = \sum_{i=1}^K \log_2 \det[\mathbf{I} + \mathbf{H}_i \mathbf{W}_i (\mathbf{H}_i \mathbf{W}_i)^H P / \sigma_i^2] \quad \text{bit/s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1} \quad (13)$$

式中 $\mathbf{W}_i = \mathbf{W}_i^{\text{conv}}$, $\mathbf{W}_i^{\text{proj}}$ 或 $\mathbf{W}_i^{\text{mix}}$ 分别对应传统方法、基于投影的方法和自适应方法。

4 算法复杂度

假设一次浮点运算的复杂度是 $O(1)$,并把一次浮点运算记为一次运算。传统的方法中的关键步骤是 SVD 分解,一般地,矩阵的 SVD 分解采用 Orthogonal-triangular (QR) 运算^[18],则需要 $O\{M[N(K-1)]^2\}$ 浮点运算,即采用传统方法求解预编码矩阵的计算复杂度是 $O\{M[N(K-1)]^2\}$ 。

基于投影变换的方法主要涉及到矩阵求逆运算。考虑到一个 $n \times n$ 的矩阵求逆复杂度是 $O(n^3)$,则基于投影变换算法计算复杂度是 $O\{M^2 N(K-1)\}$ 。自适应方法的关键步骤是矩阵行列式和矩阵乘积的运算。一个 $n \times n$ 的矩阵的行列式的计算复杂度是 $O(n^3)$,且一个 $m \times k$ 的矩阵和 $k \times n$ 的矩阵之积的运算复杂度是 $O(mkn)$ 。因此,自适应的方法计算复杂度是 $O(NML + N^2 L) + O(N^3) + O\{M^2 N(K-1)\} + O[M^2 N(K-1)]$ 。一般地, $M > N(K-1)$, $M > N$ 且 L 通常较小,所以相比 $O[M^2 N(K-1)]$, $O(NML + N^2 L) + O(N^3) + O\{M^2 N(K-1)\}$ 可以忽略。即自适应算法的复杂度是 $O[M^2 N(K-1)]$,它同基于投影变换算法复杂度一致。需说明的是,本文所提出的两种方法计算复杂度略高于传统方法。

5 仿真结果

本节将对分析传统的 ZF 方法和提出的方法的性能,包括系统和速率和运行时间两个指标。设定用户数据发送子流 $L = M - (K-1)N$,这里 M, N, K 分别是发送天线数、接收天线数和用户数。对 $i \neq k$,设定衰落系数 $\beta_k = 0.8$ 。

图 2 对比了传统方法和基于投影方法的单用户速率。考虑两种场景:2 用户 8×4 系统和 2 用户 6×3 系统。用户数据子流数 L 为 4。可以看到,单用户速率随着信噪比增加而增加。在某个固定的信噪比, 8×4 系统的单用户速率大于 6×3 系统的速率。在低信噪比区域,提出的基于投影的方法优于传统方法,但是当 SNR 超过某个门限,情况则相反。例如 8×4 系统的信噪比门限约为 10.3 dB。

图 3 对比了传统方法和自适应方法的和速率。考虑两种场景:2 用户 6×3 系统和 4 用户 8×2 系统。对这两种场景,在仿真中分别设定数据子流数目 $L=3$ 和 $L=2$ 。对于 2 用户 6×3 系统,用户 2 的信噪比设为 0 dB,仅用户 1 的信噪比变化。同样,对于 4 用户 8×2 系统,用户 2,3,4 的信噪比分别设为 0, 0.6 dB,也只有用户 1 的信噪比变化。所以图 3 的横坐标均表示用户 1 的信噪比。在 2 用户系统,当

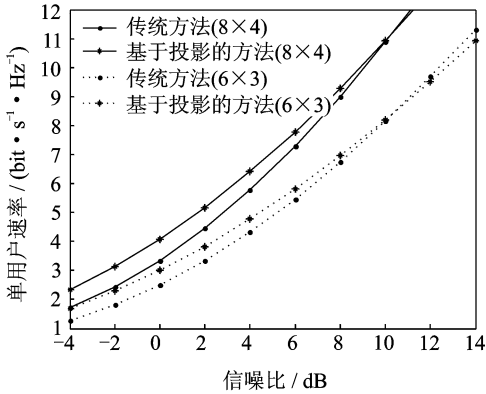


图 2 传统方法和基于投影方法的单用户速率对比

Fig. 2 Single-user rate comparison between traditional method and projection-based method

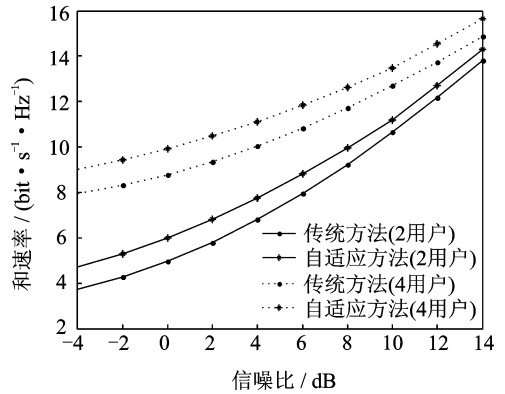


图 3 传统方法和本文提出的自适应方法的和速率对比

Fig. 3 Sum-rate comparison between traditional method and proposed adaptive method

信噪比小于 10.5 dB 时,提出的自适应方法采用式(6)的 $\mathbf{W}_1^{\text{proj}}$ 作为预编码矩阵,反之采用式(8)的 $\mathbf{W}_1^{\text{conv}}$ 作为预编码矩阵;而在 4 用户系统,切换信噪比门限约为 9.7 dB。可以发现,在两种场景下和整个信噪比区域,提出的自适应方法均显著优于传统方法。

表格 1 对比了传统奇异值分解方法、基于投影的方法和自适应方法的运行时间。采用 Matlab 软件搭建仿真系统,在每一个信噪比,均运行 5 000 次循环并按照式(13)求出系统和速率,然后取平均值。从表格 1 可以看到,传统的奇异值分解方法运行时间最少,而基于投影的算法运行时间略高于传统方法。自适应方法运行时间稍长些,这是因为,虽然它和基于投影的方法计算复杂度相同,但是此方法需要先进行奇异值分解和矩阵投影运算,得到前两种方法的预编码矩阵,然后计算式(10)做判决,所以整个操作时间便显著增加。表格 2 列出了不同天线对下的信噪比门限值,此门限 SNR_{th} 在式(11)中定义。可以发现所有的信噪比门限均在 10 dB 左右,即于投影的方法在 $\text{SNR} < 10$ dB 时优于传统方法,反之相反。这表明在基站端可以根据信道的信噪比信息来选择合适的预编码方法,而不用计算式(10)。

表 1 3 种方法的运行时间对比
Table 1 Running time comparison of three methods

传统奇异值分解方法	基于投影的方法	自适应方法
0.31	0.34	0.83

6 结束语

在 CB 为基础的多小区协作框架下,本文提出了两种迫零型多用户预编码方法,即基于正交投影的预编码方法和自适应方法。基于投影的方法在低信噪比区域优于传统方法,具有更高的系统和速率,但是当信噪比较高时,该方法却不如传统方法。因此结合两者的特点,本文进一步提出了自适应方法,并分析了提出的两种方法和传统方法的计算复杂度。仿真结果表明:在若干系统配置下,基于投影的预编码方法与传统方法性能相同时的信噪比门限均为 10 dB 左右,自适应方法在整个信噪比区域均优于传统方法。

表 2 不同天线对下的信噪比门限值 dB
Table 2 SNR thresholds with different antenna pairs

用户数 K	天线对 (M, N)	信噪比门限 SNR_{th}
2	(4, 2)	10.2
	(6, 3)	10.5
	(8, 4)	10.3
	(10, 5)	10.2
	(12, 6)	10.1
3	(6, 2)	9.9
	(9, 3)	10.3
4	(8, 2)	9.7
	(12, 3)	10.3

参考文献:

- [1] Huang Y, Zheng G, Bengtsson M, et al. Distributed multicell beamforming design with limited intercell coordination [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011, 59(2): 728-738.
- [2] Lee S H, Kim H S, Lee Y H. Complexity reduced space ML detection for other-cell interference mitigation in SIMO cellular systems [J]. *European Transactions on Telecommunications*, 2011, 22(1): 51-60.
- [3] Andrews J, Choi W, Heath R. Overcoming interference in spatial multiplexing MIMO cellular networks [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2007, 14(6): 95-104.
- [4] Ghosh A, Ratasuk R, Mondal B, et al. LTE-advanced: Next generation wireless broadband technology [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2010, 17(3): 10-22.
- [5] Chen L, Chen W W, Wang B, et al. System-level simulation methodology and platform for mobile cellular systems [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2011, 49(7): 148-155.
- [6] Karakayali M K, Foschini G J, Valenzuela R A. Network coordination for spectrally efficient communications in cellular systems [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2006, 13(4): 56-61.
- [7] Zhang J, Chen R, Andrews J G. Networked MIMO with clustered linear precoding [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(4): 1910-1921.
- [8] Zhang H, Dai H. Co-channel interference mitigation and cooperative processing in downlink multicell multiuser MIMO networks [J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2004, 2004(2): 222-235.
- [9] Kin H, Yu H, Sung Y, et al. An efficient algorithm for zero-forcing coordinated beamforming [J]. *IEEE Communications Letters*, 2012, 16(7): 994-997.
- [10] Venturino L, Prasad N, Wang X. Coordinated linear beamforming in downlink multicell wireless networks [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, 9(4): 1451-1461.
- [11] Liu Y F, Dai Y H, Luo Z Q. Coordinated beamforming for MISO interference channel: Complexity analysis and efficient algorithms [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011, 59(3): 1142-1157.
- [12] Zakhour R, Ho Z K M, Gesbert D. Distributed beamforming coordination in multicell MIMO channels[C]//*IEEE Vehicular Technology Conference*. Anchorage, USA: IEEE Press, 2009: 1-5.
- [13] Lee G, Park J, Sung Y, et al. Coordinated beamforming with relaxed zero forcing [C]//*IEEE International Conference on Wireless Communications and Signal Processing*. Nanjing, China: IEEE Press, 2011: 1-5.
- [14] 曹颖鸿, 陈喆, 殷福亮. 多小区 MIMO 系统中基于泄漏的多用户下行链路预编码新算法[J]. *信号处理*, 2012(3): 315-321.
Cao Yinghong, Chen Zhe, Yin Fuliang. A novel leakage-based precoding scheme for multi-cell multi-user MIMO system downlink[J]. *Signal Processing*, 2012(3): 315-321.
- [15] 刘乃金, 邱玲, 朱近康. 多小区 MIMO 系统中的一种主动式干扰抑制方案[J]. *数据采集与处理*, 2008, 26(3): 718-723.

Liu Nanjin, Qiu Ling, Zhu Jinkang. Proactive interference suppression scheme for multi-cell MIMO systems[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2008, 26(3): 718-723.

[16] 张才华, 许道峰, 许威. 基于 PU^2RC 的下行多用户 MIMO 系统多模发送方案[J]. 数据采集与处理, 2013, 28(1): 1-6.

Zhang Caihua, Xu Daofeng, Xu Wei. PU^2RC based multi-mode transmission for multi-user MIMO downlink systems[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2013, 28(1): 1-6.

[17] 于斌, 胡捍英. 单小区功率约束下的多小区协同波束成形[J]. 数据采集与处理, 2013, 28(1): 87-91.

Yu Bin, Hu Hanying. Coordinated beamforming for multi-cell systems with per-cell power constraints [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2013, 28(1): 87-91.

[18] Golub G H, Van Loan C F. Matrix computation. [M]. 2nd ed. Baltimore: The John Hopkins University Press, 1989.

作者简介:



周雯 (1981-), 男, 副教授, 研究方向: 移动通信中的信号处理等, E-mail: wzhou@stu.edu.cn。



张胜利 (1978-), 男, 副教授, 研究方向: 物理层网络编码技术等, E-mail: slzhang.szu@gmail.com。

