

基于二级码本的迫零波束成型自适应预编码方案

张志禹¹, 李敏^{1,2*}

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 西安 710048)

(* 通信作者电子邮箱 winterbluesky@126.com)

摘要:为了克服基于有限反馈的多用户多输入多输出(MIMO)系统中迫零波束成型(ZFBF)预编码方案反馈量小时性能较差的缺陷,提出一种基于二级码本的ZFBF自适应预编码方案。该方案的码本设计结合了酉矩阵和随机矢量码本,首先在一级码本中搜索最佳的波束成形矢量;然后在扰动范围内计算最佳波束成形矢量对应的信干噪比(SINR),将其与系统设定的SINR门限值进行比较来决定用户的反馈信息;最后基站根据用户的反馈信息自适应地改变码本,对用户进行ZFBF预编码。从而简化了用户端的码本搜索过程,并且在用户数较多的情况下用较少的反馈比特数达到较好的性能。仿真结果表明,该方案能够显著降低每用户的平均反馈比特数,以较低的反馈速率获得较好的和容量性能。

关键词:多用户;多输入多输出;有限反馈;二级码本;迫零波束成型;自适应预编码

中图分类号: TN911.23 **文献标志码:** A

Zero forcing beamforming adaptive precoding scheme based on two-level codebook

ZHANG Zhiyu¹, LI Min^{1,2*}

(College of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an Shaanxi 710048, China)

Abstract: In this paper, a Zero Forcing Beamforming (ZFBF) precoding scheme based on two-level codebook was proposed. The defect, that the performance of ZFBF precoding scheme was worse with fewer feedback bits in the multi-user Multiple Input Multiple Output (MIMO) system upon limited feedback, was well overcome by this scheme. In the proposed scheme, unitary matrix was combined with random vector codebook. The best beamforming vector in the one-level codebook was searched firstly and then the Signal to Interference and Noise Ratio (SINR) corresponding with the best beamforming vector in the disturbance range of orthogonal vector was calculated. Finally, the user's feedback information was decided by comparing the SINR calculated with the SINR threshold value set by system. At last, the codebook was adaptively changed and ZFBF precoding was finished by the station, according to the user's feedback information. The simulation results show that every user's average number of feedback bits is significantly reduced and a better sum rate performance with a lower feedback rate is gained. The codebook searching process is simplified and the sum rate performance is improved by this scheme successfully.

Key words: multi-user; Multiple Input Multiple Output (MIMO); limited feedback; two-level codebook; Zero Forcing Beamforming (ZFBF); adaptive precoding

0 引言

在多用户多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)系统中,可以利用信道信息对发送信号进行预处理以消除多址干扰^[1-2]。一般采取有限反馈的方法将信道状态信息反馈给基站^[3-4]。反馈信息对于多用户MIMO系统的性能优劣具有重要的意义,如何获得准确的信道状态信息是多用户MIMO预编码技术的关键问题^[4]。

文献[5]迫零(Zero Forcing, ZF)方案将每根天线看作是一个独立的用户,在系统用户数较少或者信道秩亏时,会带来噪声增强。文献[6]提出的迫零波束成型(Zero Forcing Beamforming, ZFBF)预编码方法,需要在所有的用户组合中穷举寻找最优的用户调度算法,计算复杂度随用户数指数增长。文献[7]提出了一种上行多址接入信道的最小均方误差(Minimum Mean Square Error, MMSE)接收机^[8]的预处理方法,但没有把用户信道转化为并行正交子信道,功率不能采用

直接分配的方式。文献[9]提出了一种低复杂度的ZFBF方法,但在用户数较多时会导致接收端信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)降低。ZFBF对信道状态信息比较敏感,发送端需要获得比较准确的信道状态信息才能达到比较好的性能^[10-11]。

针对ZFBF反馈量小时性能较差的缺陷,本文提出一种将酉矩阵和随机矢量码本相结合的基于二级码本的ZFBF改进方案。并在此基础上提出一种基于二级码本ZFBF方案自适应预编码方案。通过对方案的和容量和反馈速率的仿真,该方案能够显著降低每用户的平均反馈比特数,获得较好的系统和容量性能。

1 系统模型

基于有限反馈的多用户MIMO系统模型如图1所示。考虑拥有一个基站、 K 个用户的下行多天线下多用户系统。基站配有 M 根发射天线,每个用户有一根接收天线,且 $K \geq M$ 。

收稿日期:2012-09-12;修回日期:2012-10-30。

作者简介:张志禹(1966-),男,山西朔州人,教授,博士,主要研究方向:通信信号处理、阵列信号处理、并行计算;李敏(1988-),女,陕西铜川人,硕士研究生,主要研究方向:通信信号处理、MIMO预编码。

假设信道为平坦瑞利衰落信道,则第 k 个用户的接收信号为:

$$y_k = \mathbf{H}_k \mathbf{x} + n_k; k = 1, 2, \dots, K \quad (1)$$

其中: $\mathbf{H}_k \in \mathbb{C}^{1 \times M}$ 表示基站到第 k 个用户的信道, n_k 表示第 k 个用户的加性高斯白噪声, $n_k \sim \mathcal{CN}(0, 1)$ 。通过用户调度,从 K 个用户中选出的用户集合为 S ($|S| \leq M$), s_i 表示用户 i 对应的原始信号,经过预编码后,基站发送的信号为 $\mathbf{x} = \sum_{i \in S} \mathbf{w}_i s_i$, 并且满足 $E\{\|\mathbf{x}\|^2\} = P$, P 为总发射功率。假设各用户平均信噪比相同,并且各个用户间信道相互独立,在每个时隙中,每个用户接收端能够获得准确的接收端信道状态信息(Channel State Information at the Receiver, CSIR) 并对其进行量化,将量化结果通过有限反馈比特发回基站,基站根据此信息决定传输的用户集合和每个用户的预编码矩阵。在等功率分配的条件下,有

$$y_k = \mathbf{H}_k \sum_{j \in S} \mathbf{w}_j s_j + n_k = \sqrt{P_k} \mathbf{H}_k \mathbf{w}_k s_k + \mathbf{H}_k \sum_{j \neq k} \sqrt{P_j} \mathbf{w}_j s_j + n_k \quad (2)$$

其中: s_k 为发送给第 k 个用户的数据, \mathbf{w}_k 为第 k 个用户的预编码矩阵, $k \in \{1, 2, \dots, K\}$ 。

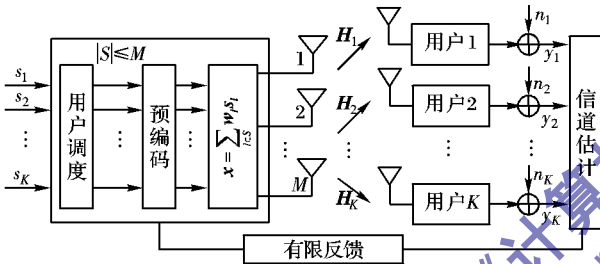


图1 基于有限反馈多用户 MIMO 系统模型

2 基于二级码本的 ZFBF 方案

2.1 码本设计

ZFBF 预编码方案的码本一般采用随机矢量码本或格拉斯曼码本^[11-13],在基于二级码本的 ZFBF 预编码方案中,采用酉矩阵和随机矢量码本相结合的方法设计码本,保证一定正交性的前提下对信道信息量化更准确。码本结构如图2所示。

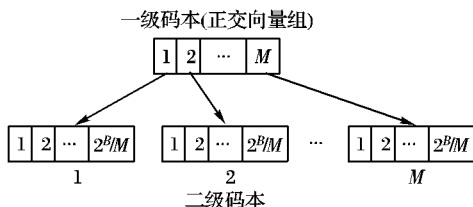


图2 基于二级码本 ZFBF 方案的码本结构

一级码本采用一个 $M \times M$ 维酉矩阵,也可以通过 Lloyd 算法根据信道统计特性搜索出酉矩阵^[13]。假设系统总的反馈比特数为 B ,一级码本中有 M 个相互正交的波束成型矢量,则一级码本反馈的比特数为 $B_1 = \log M$ 。二级码本的设计采用随机矢量量化的方法,反馈比特数为 $B_2 = B - B_1$,将二级码本表示为 $\mathbf{T}_i = \{\mathbf{T}_{i,1}, \mathbf{T}_{i,2}, \dots, \mathbf{T}_{i,L}\}$, $1 \leq i \leq M, L = 2^{B_2}$,其构造原则如下:

$$\sqrt{1 - |\mathbf{V}_j \mathbf{T}_{j,t}|^2} \leq \varepsilon \quad (3)$$

其中: \mathbf{V}_j 表示一级码本中西矩阵的第 j 个向量, $1 \leq t \leq L$,

$1 \leq j \leq M, 0 \leq \varepsilon \leq 1$ 。二级码本相当于对一级码本做一定的扰动,扰动的范围由 ε 决定。

2.2 用户端信道信息的反馈

1) 用户基于以下原则在一级码本中选择矢量:

$$\mathbf{i}^* = \arg \max_{1 \leq i \leq M} |\mathbf{H}_k^H \mathbf{v}_i| \quad (4)$$

\mathbf{v}_i 为酉矩阵中的预编码矢量,用户选择预编码矢量中与信道方向信息(Channel Direction Information, CDI) 距离最近的一个矢量,CDI 为 $\bar{\mathbf{H}}_k = \mathbf{H}_k / \|\mathbf{H}_k\|$ ($k = 1, 2, \dots, K$)。信道质量信息(Channel Quality Information, CQI) 为 $g_k = \|\mathbf{H}_k\|$ 。

2) 用户根据已经选定的一级码本预编码矢量,基于以下原则在二级码本中选择最终的预编码向量:

$$\mathbf{l}^* = \arg \max_{1 \leq l \leq L} |\mathbf{H}_k^H \mathbf{T}_{l,i^*}| \quad (5)$$

每个用户反馈给基站 \mathbf{i}^* 、 \mathbf{l}^* 和相应的 $SINR_{i^*,l^*,k}$ 。第 k 个用户的 SINR 由式(6) 计算^[12]:

$$SINR_{i^*,l^*,k} = \frac{\frac{P}{M} \|\mathbf{H}_k\|^2 \cos^2 \theta_k^2 (1 - \frac{M-1}{M} \varepsilon^2)}{1 + \frac{P}{M} \|\mathbf{H}_k\|^2 \sin^2 \theta_k^2} \quad (6)$$

其中:

$$\cos \theta_k = |\mathbf{H}_k^H \mathbf{T}_{l^*,i^*}| \quad (7)$$

2.3 基站端用户调度与预编码

基站端根据用户的反馈信息,在所选中的 \mathbf{v}_i 用户中选择一个 SINR 最大的用户。假设选中预编码向量 \mathbf{v}_i 的用户集合为 U ,则被选择的用户与对应的 SINR 为:

$$u_i = \arg \max_{k \in U_i} SINR_k \quad (8)$$

$$\gamma_i = \max_{k \in U_i} \gamma_k \quad (9)$$

如果 $U_i = \emptyset$,即没有用户选择矢量 \mathbf{v}_i ,则 γ_i 为零。对酉矩阵中每一个矢量选择最优的用户后,用户集合为 U ,根据 ZF 算法容量公式计算系统的和容量:

$$R = \sum_{i=1}^{|U|} \log \left(1 + \frac{M}{|U|} \gamma_i \right) \quad (10)$$

2.4 仿真结果分析

对基于二级码本的 ZFBF 方案进行仿真分析,仿真基于以下假设:基站端配有 4 根发射天线,用户只有 1 根接收天线,采用 QPSK 调制,码本扰动因子 ε 为 0.25。

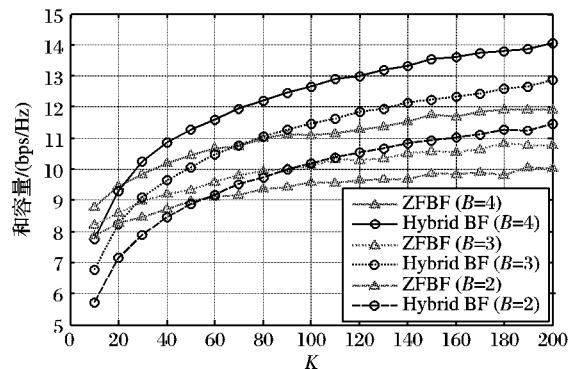


图3 ZFBF 及 Hybrid BF 系统和容量随用户数变化 ($SNR = 30$)

图3 是反馈速率 B 为 2,3,4 的情况下,对 ZFBF 方案和二级码本 ZFBF 方案的系统和容量随用户数的变化进行的仿真。为了图中标注方便,用 Hybrid BF 表示基于二级码本 ZFBF 方案(下同)。从仿真曲线可以看出, SNR 较高时,随着

系统用户数不断增加,二级码本 ZFBF 方案得到的系统和容量相对于传统 ZFBF 方案有较好的性能增益。

3 基于二级码本的自适应预编码方案

为了减少系统的反馈比特数,提升系统性能,提出一种基于酉矩阵和随机矢量码本相结合的 ZFBF 自适应预编码方案。该方案的一级码本结构采用多组正交向量,二级码本采用式(3)来设计,对每一组的每一个正交向量在一定范围内进行扰动。该方案能够根据用户信道信息自适应改变初始酉矩阵的特征方向,使其与用户的信道方向尽量一致,选择出的用户集合在保持一定的正交性的同时在二级码本中选择出更准确的量化信道信息进行 ZFBF。

3.1 自适应预编码方案调度过程

自适应预编码方案的具体调度过程如下:

1) 用户基于初始码本的两级码本,根据式(4)在一级码本的 M 个向量中搜索最佳向量,然后根据式(5)在已选择的一级码本中的向量的扰动范围内,即二级码本中选择最优的波束成形矢量,按照式(6)计算 $SINR$,如果:

$$SINR_{i^*,l^*,k} = \frac{\frac{P}{M} \| \mathbf{H}_k \|^2 \cos^2 \theta_k^2 \left(1 - \frac{M-1}{M} \varepsilon^2 \right)}{1 + \frac{P}{M} \| \mathbf{H}_k \|^2 \sin^2 \theta_k^2} > SINR_{Th}$$

其中 $SINR_{Th}$ 为门限值。则:

$$\tilde{\mathbf{h}}_k = \mathbf{l}^*$$

$$\gamma_i = SINR_{i^*,l^*,k}$$

其中 $\tilde{\mathbf{h}}_k, \gamma_i$ 分别表示用户反馈给基站的最佳预编码向量的码字序号和相应的 $SINR$ 。

若 $SINR_{i^*,l^*,k} < SINR_{Th}$,则:在第二组码本中依据以上规则进行选择,若 $SINR$ 仍不满足要求,则该用户不反馈任何信息。

2) 基站根据反馈信息决定采用哪一组矢量进行预编码。若在反馈的信息中,对于初始码本能够完成资源分配,即在所有反馈了信息的用户中能够找到 M 个符合条件的近似正交的用户,则采用初始码本对选择的用户进行 ZF 预编码计算。如果不能完成资源分配,则将第二组矢量作为当前预编码码本。

3) 用户基于当前码组矢量按照步骤 1) 进行搜索并计算 $SINR$,若选择的最佳预编码向量的 $SINR$ 小于系统的 $SINR$ 门限值,则在下一组矢量中依照上述规则进行搜索,选择具有最大 $SINR$ 的量化 CDI 码字序号,如果此时最大的 $SINR$ 仍小于门限,则该用户将不反馈任何信息。

4) 基站按照 2) 进行资源分配和调整预编码矩阵并通知用户。

5) 如果经过一定次数的反复,直到变换到最后一组矢量后仍不能将 M 个向量完全分配出去,就将前面分配过程中,分配最多码本时的分配结果作为最佳结果,把相应的矢量组作为当前码本,将其中部分向量分配给对应的用户。

基于二级码本的自适应反馈方案流程如图 4 所示,其中 g 表示码本搜索次数, G 表示码组矢量总数。

3.2 仿真结果分析

对基于二级码本的自适应预编码方案进行仿真分析,仿真基于以下假设:基站端配有 4 根发射天线,每个用户配有 1 根接收天线,采用 QPSK 调制。自适应方案中的一级码本采

用 DFT 码本。

图 5~6 是发射功率 $P = 20$ dB,系统 $SINR$ 门限值 Th 分别为 0.5, 1, 1.5 时对基于二级码本的自适应反馈方案进行了仿真,同时与基于二级码本的 ZFBF 预编码方案进行了比较。为了图中标注方便,用 Adaptive Hybrid BF 表示基于二级码本自适应方案。由图 5 可以看出,当系统用户数达到一定值时,系统中每用户平均反馈速率在系统设置不同 $SINR$ 门限时都有不同幅度的下降。由图 6 可以看出,不同的 $SINR$ 门限下,自适应方案较二级码本 ZFBF 方案在和容量性能上均有所提升。

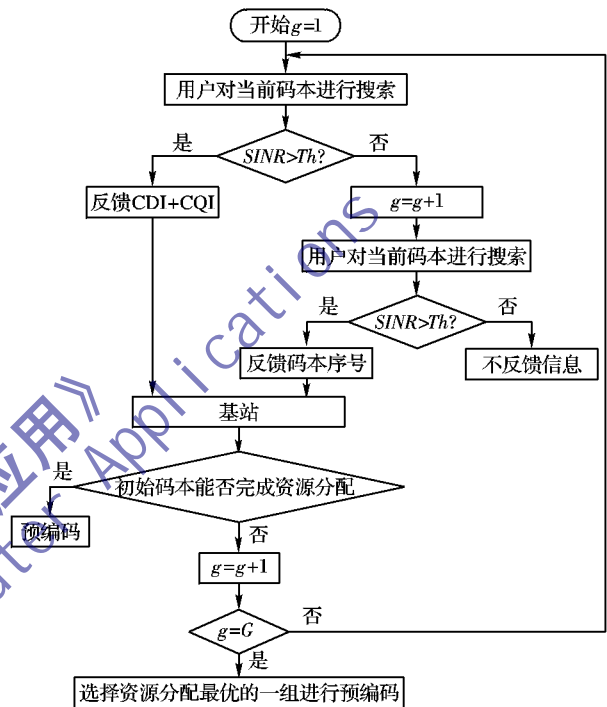


图4 基于二级码本的自适应反馈方案流程

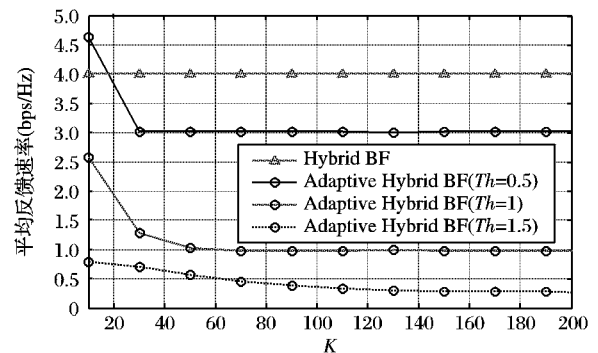


图5 两种方案每用户平均反馈速率随用户数变化

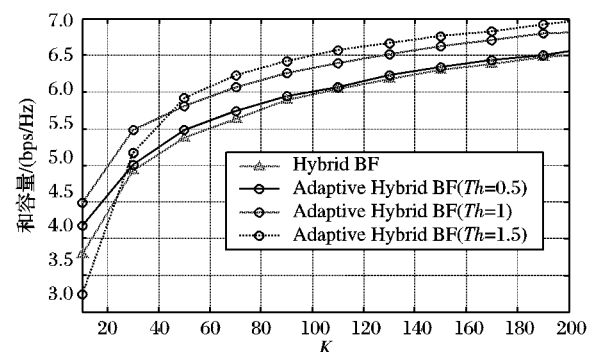


图6 两种方案系统和容量随用户数变化

(下转第634页)

是随机变化的,所以,对特定载波信号与附加信号进行互相关性分析,筛选出满足互相关性能要求的附加信号是保证本文算法应用效果的基础性工作。

参考文献:

- [1] LOTFIZAD M, YAZDI H S. Modified clipped LMS algorithm[J]. EURASIP Journal on Applied Signal Processing, 2005, 8(1): 1229 - 1234.
- [2] 杨东, 王建设. DLMS 高速自适应滤波器的 FPGA 实现[J]. 电声技术, 2010, 34(5): 41 - 43.
- [3] CHAKRABORTY M, SHAIK R, LEE M H. A block-floating-point-based realization of the block LMS algorithm[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2006, 53(9): 812 - 816.
- [4] 付学志, 刘忠, 胡生亮, 等. 低信噪比下的变步长最小均方自适应算法及其在时延估计中的应用[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(3): 1010 - 1019.
- [5] 付学志, 刘忠, 李朝旭. Sigmoid 函数变步长 LMS 自适应算法的抗干扰性能改进[J]. 北京邮电大学学报, 2011, 34(6): 112 - 120.
- [6] 徐定杰, 贺瑞, 沈锋, 等. 基于新息协方差的自适应渐消卡尔曼滤波器[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(12): 2695 - 2699.
- [7] 王秀芳, 刘凯, 马赛. 基于改进 LMS 算法的自适应滤波器[J]. 大庆石油学院学报, 2009, 33(6): 94 - 97.
- [8] 袁江南, 石江宏, 陈辉煌. 基于复数 ICA 的无线直放站反馈干扰抵消算法[J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2011, 12(3): 211 - 216.
- [9] 王竹毅, 杨建坡, 尹永超, 等. 基于盲信号分离的回波抵消技术[J]. 计算机应用, 2012, 32(10): 2707 - 2710.
- [10] 郝禄国, 李学易, 余嘉池. 一种移动电视直放站回波抵消的实现方法[J]. 电视技术, 2009, 33(8): 4 - 6.
- [11] DANDAWATE A V, GIANNAKIS G B. Statistical tests for presence of cyclostationarity[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1994, 42(9): 2355 - 2369.
- [12] CLEMENT J C, KRISHNAN K V, BAGUBALI A. Cognitive radio: spectrum sensing problems in signal processing[J]. International Journal of Computer Applications, 2012, 40(16): 37 - 40.
- [13] OLIVIER J C, KLEYNHANS W, MITEFF S. Teaching the theory of estimation and detection via a GSM radio interface simulation[J]. IEEE Transactions on Education, 2006, 49(1): 61 - 66.
- [14] PHELAN B R, LENZING E H, NARAYANAN R M. Source localization using unique characterizations of multipath propagation in an urban environment[C]// Proceedings of the 7th IEEE Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM). Piscataway, NJ: IEEE Press, 2012: 189 - 192.
- [15] 魏文斌, 江晶. 一种有效的阈值反卷积算法[J]. 电子学报, 2005, 33(12A): 2531 - 2534.
- [16] 高尚, 张绍彪, 梅亮. 基于相对误差的线性组合预测研究[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(3): 481 - 484.
- [17] MOLISCH A F, MAMMELA A, TAYLOR D P. 宽带无线数字通信[M]. 许希斌, 译. 北京: 电子工业出版社, 2002.
- [18] 何剑, 王永生, 张岳彤. 基于 Akaike 信息论准则的无人机 OFDM 信道估计算法[J]. 电路与系统学报, 2009, 14(1): 77 - 81.

(上接第 630 页)

4 结语

本文对基于有限反馈的多用户 MIMO 系统中 ZFBF 预编码方案进行了研究,提出一种基于二级码本的自适应反馈预编码方案。该方案简化了用户端的码本搜索过程,选择出的用户集合能够在保证一定正交性的前提下获得更准确的量化信道信息。仿真证明,自适应预编码方案能够在系统用户数较多时使每用户的平均反馈比特数大幅度下降,通过设置合理的系统参数,能够获得较好的和容量性能。

参考文献:

- [1] LOVE D J, HEATH R W, LAU V K N, *et al.* An overview of limited of feedback in wireless communication systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(8): 1341 - 1365.
- [2] ANNAPUREDDY V S, VEERAVALLI V V. Sum capacity of MIMO interference channels in the low interference regime[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2011, 57(5): 2565 - 2581.
- [3] WINDPASSINGER C, FISCHER R F H, VENCEL T, *et al.* Precoding in multiantenna and multiuser communications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2004, 3(4): 1305 - 1316.
- [4] CHEN C J, WANG L C. Enhancing coverage and capacity for multi-user MIMO systems by utilizing scheduling[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006, 5(5): 1148 - 1157.
- [5] CAIRE G, SHAMAI S. On the achievable throughput of a multi-antenna Gaussian broadcast channel[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2003, 49(7): 1691 - 1706.
- [6] COSTA M. Writing on dirty paper[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1983, IT-29(3): 439 - 441.
- [7] PEEL C, HOCHWALD B, SWINDLEHURST L. A vector-perturbation technique for near-capacity multi-antenna multi-user communication, part I: channel inversion and regularization[J]. IEEE Transactions on Communications, 2005, 53(1): 195 - 202.
- [8] YOO T, GOLDSMITH A. Capacity and power allocation for fading MIMO channels with channel estimation error[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(5): 2203 - 2214.
- [9] 黄森华, 邱玲, 朱近康. 信道估计误差对下行多用户迫零波束成型系统吞吐量的影响[J]. 应用科学学报, 2006, 24(5): 441 - 446.
- [10] YOO T, GOLDSMITH A. On the optimality of multiantenna broadcast scheduling using zero-forcing beamforming[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24(3): 528 - 541.
- [11] SPENCER Q H, SWINDLEHURST A L, HAARDT M. Zero-forcing methods for downlink spatial multiplexing in multiuser MIMO channels[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2004, 53(2): 461 - 471.
- [12] JUNG S, KO K, LEE J. Performance of hybrid codebook techniques for MISO downlink channels with limited feedback[C]// Proceedings of 2011 IEEE International Symposium on Information Theory. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2011: 1302 - 1306.
- [13] 方舒, 李立华, 张平. 基于码本的有限反馈非酉矩阵预编码多用户 MIMO 系统[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(10): 2419 - 2422.