

多输入多输出系统下行链路发射与接收的 联合线性预编码

孟银阔, 殷勤业, 田红波, 邓科

(西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对多用户多输入多输出系统下行链路线性预编码中的迫零法及正交化法对接收端的噪声有较强放大作用的问题, 提出了一种发射与接收联合预编码的波束成形迭代法. 该方法把联合预编码直接转变为波束成形问题, 以惟一确定的最小范数解作为预编码矩阵, 通过迭代得到各用户的预编解码矩阵. 由于所得到的解码矩阵具有最小范数的特性, 在解码时产生的噪声能量最小, 从而有效地减少了对噪声的放大作用. 同时, 在基站总发射功率一定的条件下, 根据用户的信道质量动态地分配功率可以使信道质量较差的用户得到较多的发射功率. 仿真实验表明, 所提出的方法与迫零法相比, 在相同的仿真条件下, 在平均误比特率为 10^{-4} 时可以获得约 9 dB 的性能增益.

关键词: 波束成形; 多输入多输出; 下行链路; 多用户; 线性预编码

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)04-0475-04

Joint Linear Precoding of Transmit and Receive for Multiple-Input Multiple-Output Downlink System

Meng Yinkuo, Yin Qinye, Tian Hongbo, Deng Ke

(School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To solve the problem that zero forcing methods and orthogonalization methods cause severe noise amplifying at the receiver side in multiuser multiple-input multiple-output downlink system, an iterative beamforming method for joint precoding of transmit and receive is proposed. The proposed method directly converts joint precoding and decoding to beamforming problem, and utilizes the unique deterministic minimum norm solution as the precoding matrix, and then precoding and decoding matrix for every user can be got iteratively. The decoding matrix also has the character of minimum norm, and causes the least noise energy in decoding, therefore it efficiently declines the effect on noise amplifying. Under fixed sum transmitting power constraint and according to the channel quality of users, mere transmitting power is dynamically allocated to the user who has relatively poor channel quality. Simulation results prove that, compared to the zero forcing method, the proposed method achieves 9 dB gains under 10^{-4} of average bit error rate and similar simulation conditions.

Keywords: beamforming; multiple-input multiple-output; downlink; multiuser; linear precoding

为实现多用户多输入多输出(MIMO)系统下行链路的空分复用, 文献[1-3]中采用迫零法(ZF), 通过设置零点来实现对共信道干扰的抑制, 文献[4-5]

讨论了最小均方误差准则下, 最优的发射与接收的联合设计问题, 文献[6-7]采用的是对多用户联合信道的对角化及对多用户信号在正交子空间上投影的

正交空分复用方法,但是,置零和正交化过程会对接收端的噪声产生严重的放大作用.本文直接采用波束成形法进行联合线性预编码,通过迭代获得最优的预编解码矩阵.在每次的迭代过程中得到的预编解码矩阵是惟一确定的最小范数解,解码时对噪声的放大作用最小,有效地提高了系统的性能.同时,在基站总发射功率一定的条件下,根据用户的信道矩阵,提出了一种简单有效的动态功率分配方案.通过仿真表明,所提出的方法可以使系统的平均误比特率性能得到明显地改善.

1 系统模型

系统由一个基站和 K 个移动用户构成,其中基站端有 M 个天线,移动用户 k 的天线数为 N_k .设用户 $k(k=1, \dots, K)$ 的传输数据 $\mathbf{b}_k$ 为 $L_k \times 1$ 维向量,在传输过程中,数据先与 $M \times L_k$ 维的预编码矩阵 $\mathbf{T}_k$ 相乘,然后输出的数据依次传送至 M 个发射天线上.假设信道是平衰落和慢时变的,用户 k 的信道矩阵为 $\mathbf{H}_k$,维数为 $N_k \times M$, $\mathbf{H}_k$ 的第 (i, j) 个元为用户 k 的第 i 个接收天线到基站的第 j 个天线之间的复衰落系数.移动用户 k 接收到的数据与一个 $L_k \times N_k$ 的解码矩阵 $\mathbf{R}_k$ 相乘后得到 $L_k \times 1$ 的软解码输出向量

$$\hat{\mathbf{b}}_k = \mathbf{R}_k \mathbf{H}_k \sum_{i=1}^K \mathbf{T}_i \mathbf{b}_i + \mathbf{R}_k \mathbf{n}_k \quad (1)$$

式中: $\mathbf{n}_k$ 为 $N_k \times 1$ 维的噪声矢量,它的每个元都是均值为 0、方差为 N_0 的复高斯变量.系统的构成如图 1 所示.

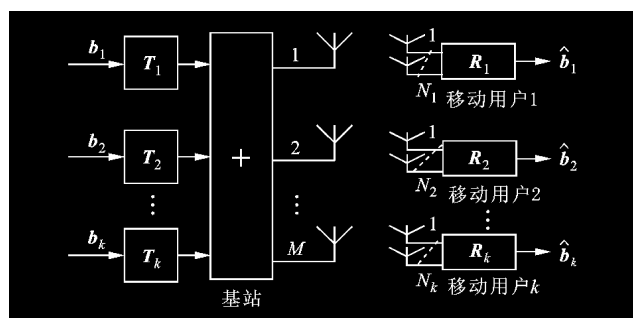


图1 多用户 MIMO 系统结构图

在本文中, $\text{trace}(\cdot)$ 表示求矩阵的迹, $\|\cdot\|$ 表示求矩阵或向量的 2 范数, $\text{rank}(\cdot)$ 为求矩阵的秩.

2 波束成形迭代法实现发射与接收的联合设计

2.1 预编码矩阵与解码矩阵的联合求解

定义预编码矩阵为 $\mathbf{T} = [\mathbf{T}_1, \mathbf{T}_2, \dots, \mathbf{T}_K]^T$, 相应

的解码矩阵为 $\mathbf{R} = [\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \dots, \mathbf{R}_K]$. 在多用户 MI-MO 系统中, 最优的编解码矩阵联合求解的优化问题可以表示为

$$\begin{aligned} (\mathbf{T}, \mathbf{R})_{\text{opt}} &= \arg \max_{\mathbf{T}, \mathbf{R}} \|\mathbf{R}_k \mathbf{H}_k \mathbf{T}_k\|^2, \quad k = 1, \dots, K \\ \|\mathbf{R}_k \mathbf{H}_k \mathbf{T}_i\|^2 &= 0, \quad i \neq k, \forall k, i \in \{1, \dots, K\} \end{aligned} \quad (2)$$

在最优的预编码矩阵及解码矩阵的条件下, 用户 k 的接收端存在以下关系

$$\mathbf{R}_k \mathbf{H}_k \mathbf{T} = [\mathbf{0}_1 \cdots \mathbf{0}_{k-1} \quad \mathbf{I}_k \quad \mathbf{0}_{k+1} \cdots \mathbf{0}_K]^T \quad (3)$$

式中: $\mathbf{0}_i$ 为 $L_k \times L_i$ 维矩阵; $\mathbf{I}_k$ 为 $L_k \times L_k$ 维单位矩阵.

定义结合了解码矩阵后的多用户等效信道矩阵

$$\tilde{\mathbf{H}} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_1 \mathbf{H}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{R}_K \mathbf{H}_K \end{bmatrix} \quad (4)$$

如果 $\mathbf{R}_1, \dots, \mathbf{R}_K$ 已经确定, 可以把 $\tilde{\mathbf{H}}$ 等效为波束成形中的阵列流形, 那么对用户 k 的预编码矩阵的求解就可以转化为经典的波束成形问题^[8-9], 则用户 k 的最优预编码矩阵可以用最小二乘形式表示为

$$\mathbf{T}_k = \arg \min_{\mathbf{T}_k} \|\tilde{\mathbf{H}} \mathbf{T}_k - [\mathbf{0}_1 \cdots \mathbf{0}_{k-1} \quad \mathbf{I}_k \quad \mathbf{0}_{k+1} \cdots \mathbf{0}_K]^T\|^2 \quad k = 1, \dots, K \quad (5)$$

在信道参数相互独立的假设条件下, $\tilde{\mathbf{H}}$ 满足列满秩的条件, $\tilde{\mathbf{H}} \tilde{\mathbf{H}}^H$ 可逆. 用户 k 最优的预编码矩阵 $\mathbf{T}_k$ 有惟一确定的最小范数解

$$\mathbf{T}_k = \tilde{\mathbf{H}}^H (\tilde{\mathbf{H}} \tilde{\mathbf{H}}^H)^{-1} [\mathbf{0}_1 \cdots \mathbf{0}_{k-1} \quad \mathbf{I}_k \quad \mathbf{0}_{k+1} \cdots \mathbf{0}_K]^T \quad k = 1, \dots, K \quad (6)$$

在已知解码矩阵的情况下, 由式(6)就可以分别求得 K 个用户的预编码矩阵. 由此, 联合求解编解码矩阵的问题就可以用迭代的方法实现.

迭代求解的过程可以归结为以下步骤:

(1) 给 $\mathbf{R}_k (k=1, \dots, K)$ 赋以初值, 使 $\mathbf{R}_k$ 中的各元素初值均为 1;

(2) 由式(4)得 $\tilde{\mathbf{H}}$, 再由式(7)依次求得各个用户的预编码矩阵, 并同时使预编码矩阵的各列归一化;

(3) 在求得预编码矩阵的基础上, 对应地得到更新后的解码矩阵

$$\mathbf{R}_k = \frac{(\mathbf{H}_k \mathbf{T}_k)^H}{\|\mathbf{H}_k \mathbf{T}_k\|^2}, \quad k = 1, \dots, K \quad (7)$$

(4) 定义两次迭代间预编码矩阵的误差 ϵ 为

$$\epsilon = \sum_{k=1}^K \|\mathbf{T}_k^{(D)} - \mathbf{T}_k^{(L-1)}\|^2 \quad (8)$$

重复进行步骤(2)、(3), 直到两次迭代间的误差 ϵ 小于一个给定的阈值, 如 0.000 1. 为了避免过多的迭代, 设定一个最大迭代次数, 如 20 次. 在大多数

情况下,迭代在10次以内即可收敛。

需要说明的是,解码矩阵同样具有最小范数的特性.由式(1)可知,这使得在解码时对接收端噪声的放大作用降到最低.由于得到的预编码矩阵是唯一确定的最小范数解,因此保证了迭代能快速收敛.虽然迭代过程增加了基站端的计算量,但却使系统的性能显著提高,这个代价还是值得的。

2.2 对不同用户的动态功率分配

在上述迭代求取编解码矩阵的过程中,基站发射给各个用户相同的功率.但是,不同用户的信道质量并不完全相同,由式(1)可知,信道质量的好坏直接决定了接收端的信噪比.为了改善整个系统的平均误比特率,在基站总发射功率一定的条件下,系统内的移动用户同时传输时,基站对不同用户的功率分配可以描述为多维优化问题,需要进行多维搜索.为简化计算,考虑不同用户的信道矩阵的元素具有一致性,可以对相对较弱的信道分配较多的功率.由于信道矩阵的迹可以用来衡量信道的质量,因此根据不同用户的信道矩阵可以在用户间进行动态的功率分配。

定义用户 k 的信道矩阵的迹为

$$t_{tr,k} = \text{trace}(\mathbf{H}_k \mathbf{H}_k^H) \quad (9)$$

K 个用户信道矩阵迹的平均值为

$$\bar{t}_{tr} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K t_{tr,k} \quad (10)$$

假设基站对 K 个用户的总发射功率为 P ,则对用户 k 分配的发射功率为

$$p_k = \frac{P(\bar{t}_{tr}/t_{tr,k})}{\sum_{k=1}^K \bar{t}_{tr}/t_{tr,k}} \quad (11)$$

在完成功率分配后,用户 k 的预编码矩阵乘以功率分配系数 $P_k^{1/2}$,并对接收矩阵进行相应的归一化。

2.3 联合编解码方案中基站与移动用户的天线数应满足的条件

(1)为了使接收到的信号能够有效地分离,用户 k 的接收天线数必须满足大于等于基站传给用户 k 的符号分组长度的条件,即

$$N_k \geq L_k \quad (12)$$

证明:由式(3)可知, $\text{rank}(\mathbf{R}_k \mathbf{H}_k \mathbf{T}_k) = L_k$,其中 $\mathbf{R}_k$ 的维数为 $L_k \times N_k$, $\mathbf{H}_k \mathbf{T}_k$ 的维数为 $N_k \times L_k$,可知 $\mathbf{R}_k$ 的秩为 L_k ,且存在关系 $L_k \leq \min\{L_k, N_k\}$,因此式(12)成立。

(2)满足基站天线数与系统中所有用户总的符

号长度间的关系。

为了使预编码后的符号能够在接收端可靠地解出,基站的天线数应满足条件

$$N_T \geq \sum_{k=1}^K L_k \quad (13)$$

证明:在假设的最优联合编解码的条件下,系统存在关系

$$\tilde{\mathbf{H}} \mathbf{T}^T = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_1 & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I}_2 & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{I}_K \end{bmatrix} \begin{matrix} \\ \\ \\ \sum_{k=1}^K L_k \times \sum_{k=1}^K L_k \end{matrix} \quad (14)$$

因此, $\sum_{k=1}^K L_k \times N_T$ 维的编码矩阵 $\mathbf{T}$ 的秩应该在如下关系

$$\text{rank}(\mathbf{T}) = \sum_{k=1}^K L_k = \min\left\{\sum_{k=1}^K L_k, N_T\right\} \quad (15)$$

从而,式(13)成立。

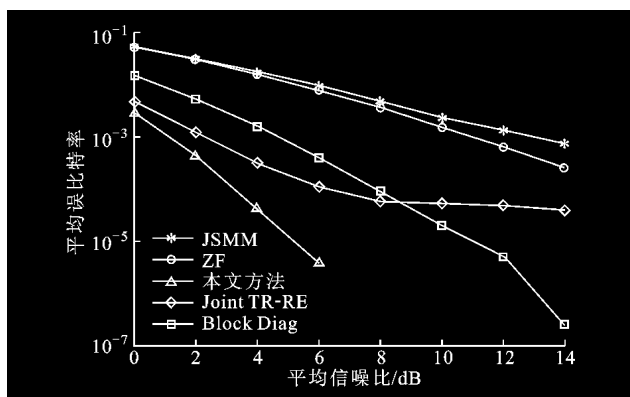
3 数据仿真与分析

在仿真中,多用户 MIMO 系统基站端的天线数为 M ,移动用户 k 的天线数为 N_k ,于是多用户 MIMO 系统可以表示为 $(M, N_1(L_1), N_2(L_2), \dots, N_K(L_K))$ 系统,其中的 L_k 为用户 k 的符号块的长度.基站端发送的符号均使用 QPSK 调制,并设定它的归一化符号能量为 1.假设信道信息已知,且多用户 MIMO 系统的信道是平衰落的,其中信道矩阵的各元素相互独立且服从均值为 0、方差为 1 的复高斯分布.在接收端,噪声项服从均值为 0 的复高斯分布,方差随信噪比而变化.假设信道是慢衰落或准静态的,仿真中每 100 个符号使用同一信道矩阵,用 30 000 次信道实现来获得误比特率。

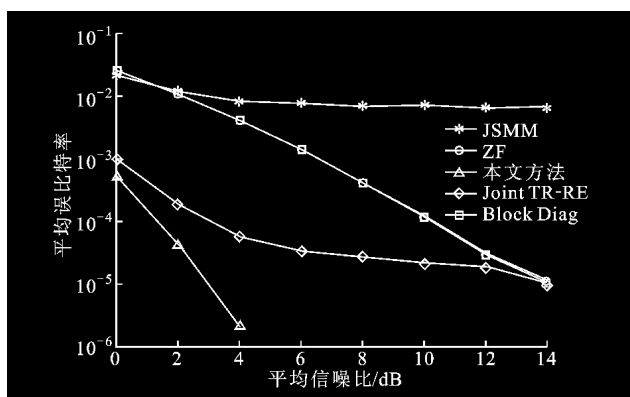
分别对比了 $(4, 2(1), 2(1))$ 系统和 $(4, 3(1), 3(1))$ 系统的平均误比特率性能,结果如图 2 所示.其中,对比了文献[1]中的 ZF 法,文献[3]中的 Block Diag 法,文献[4]中的 Joint-TR-RE 法,以及文献[6]中的 JSMM 法.从仿真结果可以看出,本文所提出的方法取得了良好的性能。

采用 $(4, 2(1), 2(1))$, $(4, 2(1), 2(1), 2(1))$ 和 $(4, 2(1), 2(1), 2(1), 2(1))$ 系统对比了随着移动用户数的增加和用户间的共信道干扰增强,系统的平均误比特率逐渐变差的情况,如图 3 所示。

采用 $(2, 2(1), 2(1))$, $(3, 2(1), 2(1))$, $(4, 2(1), 2(1))$, $(5, 2(1), 2(1))$ 和 $(6, 2(1), 2(1))$ 系统对比了随着基站天线数的增加,发射分集对系统性能的改变



(a) (4, 2(1), 2(1))系统



(b) (4, 3(1), 3(1))系统

图2 系统平均误比特率性能的比较

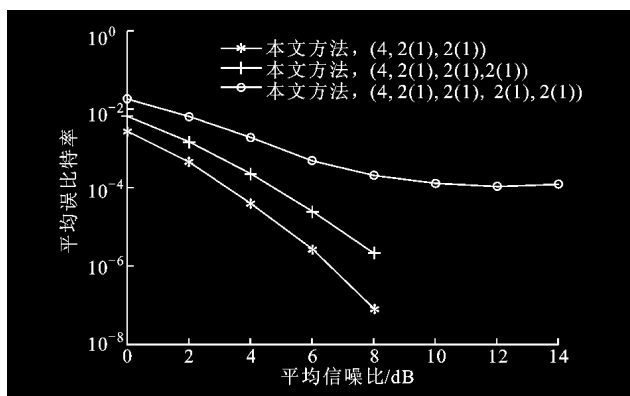


图3 移动用户数增加时系统平均误比特率性能的变化情况

善情况,如图4所示。

分别用(4, 2(1), 2(1)), (4, 3(1), 3(1))和(4, 4(1), 4(1))系统对比了移动用户天线数增加时,系统的误比特率性能随着接收分集增加的改善情况,结果如图5所示。在图5中还仿真对比了本文中所提出的功率分配方案对系统误比特率性能的改善情况。

针对(4, 2(1), 2(1), 2(1))和(4, 2(1), 2(1))系统,仿真对比了本文所提出方法随迭代次数增加的

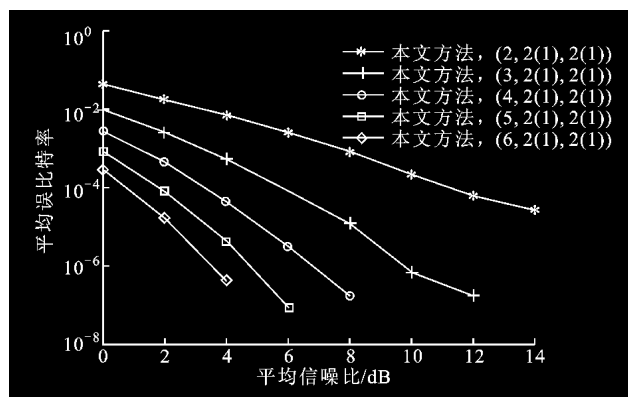


图4 发射分集对系统平均误比特率性能的影响

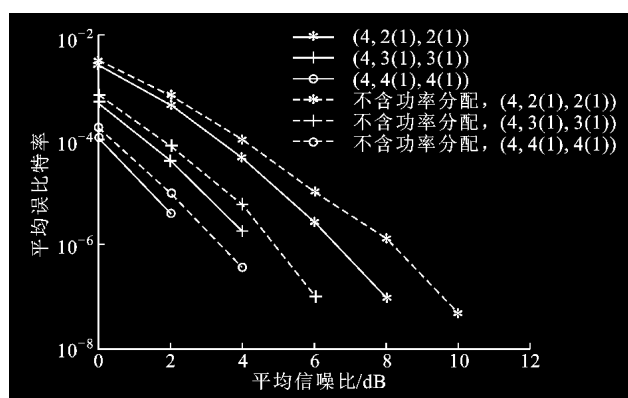


图5 随移动用户天线数的增加系统的平均误比特率性能变化情况

收敛情况,结果如图6所示,其中系统的平均信噪比(E_b/N_0)设定为4 dB。

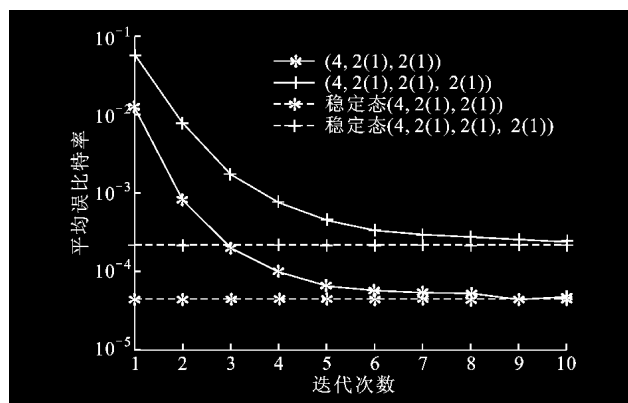


图6 本文方法随迭代次数增加的收敛情况

4 结束语

本文针对于多用户 MIMO 系统下行链路的发射与接收的联合预编码和解码问题,提出了一种联合预编解码的波束成形迭代方法,并对所提出方法应满足的条件进行了讨论。根据各用户的信道矩阵信息,提出了一种简单有效的动态功率分配方案。仿

真的结果证实了所提出方法的有效性.

参考文献:

- [1] Choi L U, Murch R D. A transmit preprocessing for multiuser MIMO system using a decomposition approach [J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2004, 3(1):20-24.
- [2] Spencer Q H, Swindlehurst A L, Haardt M. Zero forcing methods for downlink spatial multiplexing in multiuser MIMO channels [J]. IEEE Trans Signal Process, 2004, 52(2): 461-471.
- [3] Rim M. Multi-user downlink beamforming with multiple transmit and receive antennas [J]. Electron Lett, 2002, 38(25): 1725-1726.
- [4] Tenenbaum A J, Paulraj A. Joint multiuser transmit-receive optimization using linear processing [C]//Proc 2004 IEEE International Communications Conference, Piscataway, USA:IEEE, 2004:588-592.
- [5] Sampath H, Stoica P, Paulraj A. Generalized linear precoder and decoder design for MIMO channels using the weighted MMSE criterion [J]. IEEE Trans on Commu, 2001, 49(12):2198-2206.
- [6] Wong K K, Murch R D. A Joint-channel diagonalization for multiuser MIMO antenna systems [J]. IEEE Trans on Wireless Commu, 2003, 2(4): 773-786.
- [7] Pan Z G, Wong K K, Ng T S. Generalized multiuser orthogonal space division multiplexing [J]. IEEE Trans on Wireless Commun, 2004, 3(6):1969-1973.
- [8] van Veen B D, Buckley K M. Beamforming: a versatile approach to spatial filtering [J]. IEEE ASSP Magazine, 1988, 5(2):4-24.
- [9] Haykin S. Adaptive filter theory [M]. 4th ed. Upper Saddle River, USA: Prentice Hall, 2002.

(编辑 刘杨)