

一种多用户多中继 MIMO 通信系统迭代预编码方案

李汀 杨绿溪

(东南大学信息科学与工程学院 南京 210096)

摘要: 该文针对多中继 MIMO 通信系统多用户传输时的用户间干扰问题, 提出了一种可以有效抑制多用户干扰的发射端与中继端迭代预编码的方案。该方案首先在中继端进行多中继联合的迫零预编码, 然后将基站与多用户之间等效为一个点到多点的 MIMO 信道, 采用最大化信漏噪比的预编码方法, 在发射端进一步消除用户间的干扰, 同时避免了噪声放大的影响, 进而通过中继端预编码与发射端预编码的多次迭代, 更好地保持了多中继并行传输引入空间分集所带来的性能优势, 有效地抑制了用户间干扰, 获得了更高的系统和容量。

关键词: 无线通信; 预编码; 多中继; 多用户干扰

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)08-1914-05

Iterative Precoding for Multiuser Multi-Relay MIMO System

Li Ting Yang Lu-xi

(School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In this paper, an iterative precoding method is proposed, which successively in turn optimizes the precoding matrix at base station or relay station for suppressing the multiuser interference of multiuser multi-relay MIMO system. Firstly, the multi-relay joint zero forcing precoding is adopted at relay station. Secondly, the channel between the base station and multiple users is taken as an equivalent point-to-multipoint MIMO channel, then the signal-to-leakage ratio precoding method at base station is used to further cancel inter-user interference and avoid the Influence of noise amplification. Furthermore, Multiple iterative precoding at relay stations and base station can maintain better space diversity introduced by parallel transmission of multiple relays, also can achieve higher sum capacity of system.

Key words: Wireless communication; Precoding; Multi-relay; Multiuser interference

1 引言

近年, 蜂窝通信系统中固定中继的辅助通信受到越来越多的关注, 中继节点的引入扩大了蜂窝通信的覆盖范围, 是满足蜂窝边缘高数据率通信的一种低成本、低复杂性的解决方案。早期关于 MIMO 中继辅助通信的研究大多局限在点到点单中继情况的简单模型^[1-3], 而实际的蜂窝移动通信一个基站需要同时和多个移动台进行通信, 点到多点的多用户单中继辅助通信也就应运而生^[4-6]。在中继辅助通信系统中, 信号可以通过不同的中继节点到达移动台, 因此通过中继站之间的协作传输^[7], 可以达到宏分集的效果。同时, 信息论研究表明, 当有多个中继辅助网络通信系统时, 若中继和移动终端都已知信道的信息, 则系统的容量与中继的个数呈对数增长的关系。基于此, 本文的研究将针对较为复

杂的多用户多中继 MIMO 通信系统, 在这个复杂的多用户系统中, 用户间干扰的抑制, 相较于传统的多用户 MIMO 通信将更为复杂, 发射端与中继端的联合优化由于存在过多的待优化参数以及过高的计算复杂度而变得非常困难^[8], 本文扩展传统多用户 MIMO 通信中的一些发射预编码技术, 提出了一种次优的发射端与中继端迭代预编码的方案。该方案首先仅对中继端进行预编码处理, 当发射天线数、中继天线数以及用户数之间满足一定条件时, 采用多中继联合的迫零预编码方法, 就可以很好地抑制用户间的干扰, 当条件不满足时, 仅在中继端进行预编码处理将仍然存在较大的用户间干扰, 此时, 我们将基站到中继的信道、中继到用户的信道, 通过中继节点的预编码矩阵联合起来等效为一个基站到多用户的点到多点的 MIMO 信道, 进而采用最大化信漏噪比的预编码方法, 在中继端预编码抑制干扰的基础上, 进一步在发射端消除用户间的干扰, 同时还可以避免噪声放大的影响。通过中继端预编码与发射端预编码的多次迭代, 达到更好地抑制用户间干扰的目的, 获得更高的系统和容量。

2008-09-22 收到, 2009-03-30 改回

国家重点基础研究发展计划(2007CB310603), 国家自然科学基金(60672093, 60496310)和国家 863 计划项目(2007AA01Z262)资助课题

2 系统模型

2.1 系统框图

本文考虑一个多用户多中继的 MIMO 通信系统,如图 1 所示。多个用户通过多个固定的中继同时接受服务。另外,仅考虑一个两跳的中继网络,同时忽略基站与用户间的直接链路。中继的通信采用半时分双工的方式,每个下行帧分两个时隙,在第 1 个时隙,基站将多用户信号经过预编码矩阵 \mathbf{F} 的处理之后,通过基站与中继之间的 MIMO 信道 \mathbf{H}_k 传输给各个中继;在第 2 个时隙,中继接收的信号在经过中继预编码矩阵 \mathbf{W} 的处理之后,通过中继与用户之间的 MISO 信道 \mathbf{G}_{qk} 传输给各个用户。

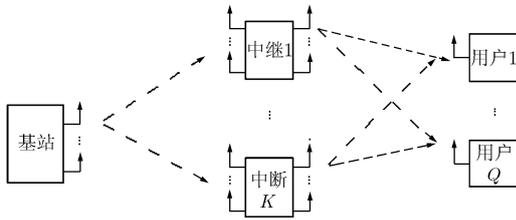


图 1 多用户多中继 MIMO 通信系统

2.2 下行链路信号模型

假设用户数为 Q , 中继数为 K , 基站配备 M 根天线, 每个中继节点配备 N 根天线, 用户端配备单根天线。基站端, 假设每个用户的数据相互独立, s_q , $q = 1, \dots, Q$ 是 Q 路相互独立的数据流, 每个数据流经过一个 M 维的波束形成向量 \mathbf{f}_q 后映射到 M 根发射天线上。基站天线上的发射信号向量可以表示为

$$\mathbf{X} = \mathbf{F}\mathbf{S} = \sum_{q=1}^Q \mathbf{f}_q s_q \quad (1)$$

其中, $\mathbf{S} = [s_1, s_2, \dots, s_Q]^T$ 为源信号向量, $\mathbf{F} = [\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2, \dots, \mathbf{f}_Q]$ 为基站端的多用户预编码矩阵。

假设发射信号经过 $N \times M$ 维准静态平坦瑞利衰落信道 \mathbf{H}_k , $k = 1, 2, \dots, K$, 传输到各个中继端, 那么在每个中继端, 接收到的信号可以表示为

$$\mathbf{r}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{X} + \mathbf{n}_{1k}, \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (2)$$

其中, \mathbf{n}_{1k} 为第 k 个中继节点 N 维的噪声向量, 其元素由独立同分布的高斯随机变量组成。

中继接收的信号经过中继预编码矩阵 \mathbf{W} 的处理之后, 通过中继与用户之间 N 维的 MISO 信道 \mathbf{G}_{qk} 传输给各个用户。此时, 第 q 个用户的接收信号可以表示为

$$Y_q = \sum_{k=1}^K \mathbf{G}_{qk} \mathbf{W}_k \mathbf{r}_k + \mathbf{n}_{2q} = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^Q \mathbf{G}_{qk} \mathbf{W}_k \mathbf{H}_l \mathbf{f}_l s_l + \sum_{k=1}^K \mathbf{G}_{qk} \mathbf{W}_k \mathbf{n}_{1k} + \mathbf{n}_{2q}, \quad q = 1, 2, \dots, Q \quad (3)$$

其中, \mathbf{G}_{qk} 为第 k 个中继与第 q 个用户之间的信道向量, \mathbf{n}_{2q} 是第 q 个用户端的噪声, 满足高斯分布。当各个中继节点间的噪声服从高斯分布且相互独立, 每个中继节点不同天线间的噪声也相互独立时, 很容易可以推出, $\sum_{k=1}^K \mathbf{G}_{qk} \mathbf{W}_k \mathbf{n}_{1k} + \mathbf{n}_{2q}$ 也是一个满足高斯分布的随机变量。

3 发射、中继迭代预编码

对于多用户多中继 MIMO 通信系统, 用户间干扰的抑制, 相比于传统的 MIMO 系统将变得更加复杂。从式(3)可以看出, 要使系统的和速率达到最大, 需要同时优化发射预编码矩阵 \mathbf{F} 与中继预编码矩阵 \mathbf{W} , 而 \mathbf{F} 和 \mathbf{W} 的联合优化由于存在过多的待优化参数及过高的计算复杂度而变得非常困难, 因此本文给出一种发射端与中继端迭代预编码的次优方案, 该方案可以有效抑制用户间的干扰, 从而获得理想的系统容量性能。

3.1 中继端预编码

假设通过中继间的协作通信, 中继已知全部信道信息。我们首先将发射预编码矩阵 \mathbf{F} 固定, 通过在中继端进行多中继联合的迫零预编码来抑制用户间的干扰。

式(3)可以简化为

$$Y_q = \sum_{k=1}^K \mathbf{G}_{qk} \mathbf{W}_k \mathbf{H}_k \mathbf{F} \mathbf{S} + \mathbf{n}_q \quad (4)$$

其中 $\mathbf{n}_q = \sum_{k=1}^K \mathbf{G}_{qk} \mathbf{W}_k \mathbf{n}_{1k} + \mathbf{n}_{2q}$ 。从式(4)可以看出, 要想在用户端完全抑制用户间的干扰必须要求

$$\sum_{k=1}^K \mathbf{G}_{qk} \mathbf{W}_k \mathbf{H}_k \mathbf{F} = [0, \dots, 0, \lambda_q, 0, \dots, 0]_{1 \times Q} \quad (5)$$

其中, λ_q 是第 q 个用户的等效信道增益。令: $[0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0]_{1 \times Q} = \mathbf{e}_q$, 则有

$$\sum_{k=1}^K \mathbf{G}_{qk} \mathbf{W}_k \mathbf{H}_k \mathbf{F} = \lambda_q \mathbf{e}_q \quad (6)$$

从式(6)可知, 当 \mathbf{F} 固定, 每个中继已知全部的信道信息 \mathbf{H}_k 和每个中继到用户端的信道信息 \mathbf{G}_{qk} 时, 只要设计出一组满足式(6)的中继预编码矩阵 \mathbf{W}_k , 即可完全消除用户间的干扰。

$$\text{令: } \tilde{\mathbf{G}} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_1 \\ \mathbf{G}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{G}_Q \end{bmatrix}, \quad \text{其中 } \mathbf{G}_q = [\mathbf{G}_{q1}, \mathbf{G}_{q2}, \dots, \mathbf{G}_{qK}],$$

$\mathbf{G}_{qk} = [G_{qk}(1), G_{qk}(2), \dots, G_{qk}(N)]$ 是第 k 个中继节点到第 q 个用户的信道响应, 是一个 N 维的行向量。令:

$$\tilde{\mathbf{P}} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_1 \\ \mathbf{P}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{P}_K \end{bmatrix}, \text{ 其中 } \mathbf{P}_k = \mathbf{W}_k \mathbf{H}_k \mathbf{F} \text{ 是 } N \times Q \text{ 维的矩阵.}$$

此时, 式(6)可以表示成矩阵相乘的形式:

$$\mathbf{G}_q \tilde{\mathbf{P}} = \lambda_q \mathbf{e}_q, \quad q = 1, 2, \dots, Q \quad (7)$$

即

$$\tilde{\mathbf{G}} \tilde{\mathbf{P}} = \mathbf{\Lambda} \mathbf{I}_Q \quad (8)$$

其中, $\mathbf{\Lambda} = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_Q)$ 是一个对角阵.

将式(8)等号两边同时左乘 $\tilde{\mathbf{G}}^+$, 可得

$$\tilde{\mathbf{G}}^+ \tilde{\mathbf{G}} \tilde{\mathbf{P}} = \tilde{\mathbf{G}}^+ \mathbf{\Lambda} \mathbf{I}_Q \quad (9)$$

$\tilde{\mathbf{G}}$ 是一个 Q 行 $K \times N$ 列的矩阵, 其伪逆 $\tilde{\mathbf{G}}^+$ 是一个 $K \times N$ 行 Q 列的矩阵. 把它分割成 K 个 $N \times Q$ 维的小矩阵 $(\tilde{\mathbf{G}}^+)_{(k)}$, 由于 $\mathbf{\Lambda}$ 是一个对角阵, 所以

$$(\tilde{\mathbf{G}}^+)_{(k)} \tilde{\mathbf{G}} \mathbf{P}_k = (\tilde{\mathbf{G}}^+)_{(k)} \mathbf{\Lambda} \quad (10)$$

将 $\mathbf{P}_k = \mathbf{W}_k \mathbf{H}_k \mathbf{F}$ 代入式(10), 并且在等号两边同时右乘 $(\mathbf{H}_k \mathbf{F})^+$, 得

$$(\tilde{\mathbf{G}}^+)_{(k)} \tilde{\mathbf{G}} \mathbf{W}_k \mathbf{H}_k \mathbf{F} (\mathbf{H}_k \mathbf{F})^+ = (\tilde{\mathbf{G}}^+)_{(k)} \mathbf{\Lambda} (\mathbf{H}_k \mathbf{F})^+ \quad (11)$$

设计中继端的预编码矩阵为

$$\mathbf{W}_k = (\tilde{\mathbf{G}}^+)_{(k)} \mathbf{\Lambda} (\mathbf{H}_k \mathbf{F})^+ \quad (12)$$

从式(11)可以看出, 只有当 $N = M = Q$ 时, 我们设计的预编码矩阵 \mathbf{W}_k 才可能完全消除用户间的干扰, 而实际通信系统中, 这样的条件往往是不能满足的, 因此仅在中继端进行迫零预编码并不能完全抑制用户间干扰, 为了进一步消除中继端处理之后残余的用户间干扰, 我们考虑在发射端继续进行多用户预编码的设计.

3.2 发射端预编码

假设中继预编码矩阵 \mathbf{W} 固定, 通过中继预编码矩阵将基站到中继的信道、中继到用户的信道联合起来, 等效看作为一个点到多点的多用户 MISO 信道, 采用信漏噪比最大为准则来设计发射预编码矩阵 \mathbf{F} .

定义 1 $\tilde{\mathbf{H}}_q = \sum_{k=1}^K \mathbf{G}_{qk} \mathbf{W}_k \mathbf{H}_k$ 为等效的基站到用户 q 的 MISO 信道. 则式(3)可以写成下面的形式:

$$Y_q = \tilde{\mathbf{H}}_q \mathbf{f}_q s_q + \tilde{\mathbf{H}}_q \sum_{l \neq q} \mathbf{f}_l s_l + n_q \quad (13)$$

其中第二项为用户间的干扰, 用户端信干噪比为

$$\text{SINR}_q = \frac{\mathbf{f}_q^H \tilde{\mathbf{H}}_q^H \tilde{\mathbf{H}}_q \mathbf{f}_q}{\sum_{l \neq q} \mathbf{f}_l^H \tilde{\mathbf{H}}_q^H \tilde{\mathbf{H}}_q \mathbf{f}_l + \sigma_q^2} \quad (14)$$

其中, $\sigma_q^2 = \sigma_1^2 \sum_{k=1}^K \mathbf{G}_{qk} \mathbf{W}_k \mathbf{W}_k^H \mathbf{G}_{qk}^H + \sigma_2^2$, σ_1^2 和 σ_2^2 分别为中继端和用户端的噪声方差.

定义 2 $\sum_{l \neq q} \mathbf{f}_l^H \tilde{\mathbf{H}}_q^H \tilde{\mathbf{H}}_q \mathbf{f}_l$ 为从用户 q 泄漏到其他

所有用户的总功率. 在接收端, 我们希望对于每个用户 q , 信号功率远大于噪声功率; 同时, 也希望用户 q 的接收信号功率相对于泄露到其他用户的功率尽可能的大. 从这个出发点, 可以定义用户端的信漏噪比:

$$\text{SLNR}_q = \frac{\mathbf{f}_q^H \tilde{\mathbf{H}}_q^H \tilde{\mathbf{H}}_q \mathbf{f}_q}{\sum_{l \neq q} \mathbf{f}_l^H \tilde{\mathbf{H}}_q^H \tilde{\mathbf{H}}_q \mathbf{f}_l + \sigma_q^2} \quad (15)$$

基于信漏噪比准则的最优发射波束形成向量 \mathbf{f}_q 设计的优化问题可以表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_q^0 = \operatorname{argmax}_{\mathbf{f}_q \in \mathcal{C}^M} & \frac{\mathbf{f}_q^H \tilde{\mathbf{H}}_q^H \tilde{\mathbf{H}}_q \mathbf{f}_q}{\mathbf{f}_q^H \left(\sum_{l \neq q} \tilde{\mathbf{H}}_q^H \tilde{\mathbf{H}}_q + \sigma_q^2 \right) \mathbf{f}_q}, \\ \text{s. t. } & \mathbf{f}_q^H \mathbf{f}_q = 1 \end{aligned} \quad (16)$$

由 Rayleigh-Ritz 定理的结论可知,

$$\begin{aligned} & \frac{\mathbf{f}_q^H \tilde{\mathbf{H}}_q^H \tilde{\mathbf{H}}_q \mathbf{f}_q}{\mathbf{f}_q^H \left(\sum_{l \neq q} \tilde{\mathbf{H}}_q^H \tilde{\mathbf{H}}_q + \sigma_q^2 \right) \mathbf{f}_q} \\ & \leq \lambda_{\max} \left(\tilde{\mathbf{H}}_q^H \tilde{\mathbf{H}}_q, \sum_{l \neq q} \tilde{\mathbf{H}}_q^H \tilde{\mathbf{H}}_q + \sigma_q^2 \right) \end{aligned} \quad (17)$$

其中, λ_{\max} 是矩阵对 $\tilde{\mathbf{H}}_q^H \tilde{\mathbf{H}}_q$ 和 $\sum_{l \neq q} \tilde{\mathbf{H}}_q^H \tilde{\mathbf{H}}_q + \sigma_q^2$ 的最

大广义特征值. 当 \mathbf{f}_q 正比于相应于最大广义特征值的广义特征向量时等号成立, 即

$$\mathbf{f}_q^0 \propto \max \operatorname{gen.eigenvector} \left(\tilde{\mathbf{H}}_q^H \tilde{\mathbf{H}}_q, \sum_{l \neq q} \tilde{\mathbf{H}}_q^H \tilde{\mathbf{H}}_q + \sigma_q^2 \right) \quad (18)$$

通过比例常数的选择使得 $\mathbf{f}_q^H \mathbf{f}_q = 1$.

3.3 迭代算法

通过在发射端和中继端多次迭代预编码, 系统和容量可以逐步收敛, 具体迭代算法描述如下:

初始化: $\mathbf{F}(0) = [\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \dots, \mathbf{e}_Q]$, $\mathbf{W}_k(0) = (\tilde{\mathbf{G}}^+)_{(k)} \cdot \mathbf{\Lambda} (\mathbf{H}_k \mathbf{F}(0))^+$.

对于 $n > 0$, 完成下面的两步计算:

(1) 固定 $\mathbf{W}_k(n)$, $\mathbf{F}(n) = [\mathbf{f}_1(n), \mathbf{f}_2(n), \dots, \mathbf{f}_Q(n)]$, 其中

$$\mathbf{f}_q(n) \propto \max \text{ gen.eigenvector} \left(\tilde{\mathbf{H}}_q^H \tilde{\mathbf{H}}_q, \left(\sum_{l \neq q}^Q \tilde{\mathbf{H}}_l^H \tilde{\mathbf{H}}_l + \sigma_q^2 \right) \right)$$

(2) 固定 $\mathbf{F}(n)$, $\mathbf{W}_k(n) = (\tilde{\mathbf{G}}^+)^{(k)} \mathbf{\Lambda} (\mathbf{H}_k \mathbf{F}(n))^+$.

4 仿真结果

在多用户多中继 MIMO 通信系统的仿真中, 采用平坦瑞利衰落信道, 并假设所有输入输出之间相互独立, 具有相同的统计特性。定义参数 SNR_{user} 为用户端的平均信噪比。图 2 给出了本文提出的发射、中继 3 次迭代预编码(ZF+SLNR 3 Iterations), 发射、中继不迭代联合预编码(ZF+SLNR)以及中继迫零预编码(Relay ZF)3 种情况下, 系统和容量随用户端平均信噪比变化的曲线。仿真中假设: 一个时隙内有 4 个用户, 基站配备 4 根天线, 每个中继配备 2 根天线, 用户配备单根天线, 4 个并行的中继节点辅助通信。从图中可以看出, 发射端与中继端联合的预编码明显改善了仅在中继端迫零预编码的性能, 通过多次的迭代系统性能还可以得到进一步的提高。由于中继迫零预编码在发射天线数与中继天线数不相等时, 无法完全消除用户间干扰, 从而导致系统性能的降级。发射、中继的迭代预编码实现了仅中继预编码时残余多用户干扰的进一步抑制, 因而带来了系统和容量的大大提高。

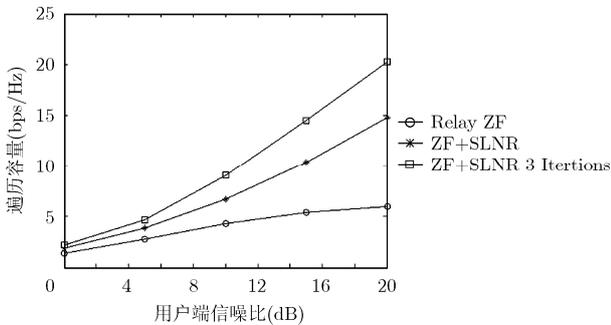


图 2 3 种预编码方案的系统容量比较

图 3 给出了发射、中继迭代预编码算法在不同天线数与不同中继数配置情况下的系统容量比较。仿真中分别给出了 8 个用户、8 根发射天线、8 个中继与 4 个中继情况的容量曲线, 以及 4 个用户、4 根发射天线、4 个中继与 2 个中继情况的容量曲线。从图中可以看出, 多用户多中继 MIMO 通信系统在本文所提预编码方案的处理下, 系统和容量随天线数的增加依然成倍数增长关系, 同时随着中继数的增加系统和容量也得到一定的提升, 说明本文的预编码方案对于多用户多天线多中继通信系统用户干扰的抑制有着很好的鲁棒性能。

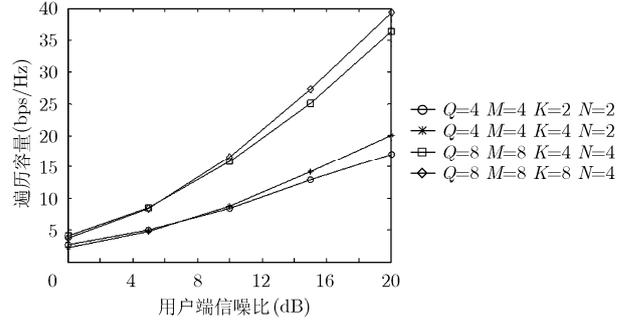


图 3 新算法在不同天线数与不同中继数配置情况下的系统容量比较

图 4 给出了发射、中继迭代预编码方案在不同迭代次数下的系统容量曲线。假设一个时隙内有 8 个用户, 基站配备 8 根天线, 每个中继配备 4 根天线, 用户配备单根天线, 8 个并行的中继节点辅助通信。从图中可以看出 3 次迭代的情况下, 系统容量就基本上收敛了, 说明本文提出的迭代算法在不多的迭代次数下就可以达到系统性能的一个优值。

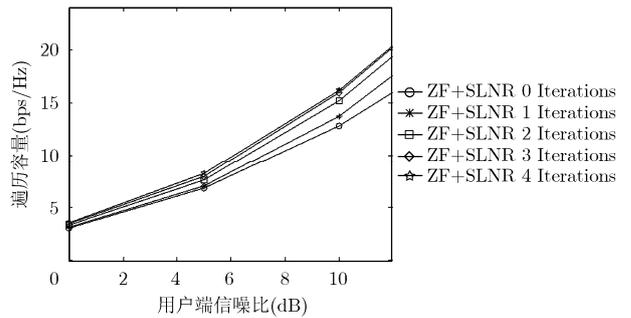


图 4 不同迭代次数下的系统容量比较

5 结论

本文提出了一种适用于多用户多中继 MIMO 通信系统的发射端与中继端迭代预编码的方案, 该方案从抑制多用户干扰的角度出发, 相比于仅在中继端进行多中继联合迫零预编码的方案, 获得了较大的系统和容量的提高, 同时仿真结果表明, 只需要通过较少的迭代次数就可以实现系统性能的提升。

参考文献

- [1] Wang B, Zhang J, and Host-Madsen A. On the capacity of MIMO relay channels[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2005, 51(1): 29-43.
- [2] Khoshnevis B, Yu W, and Adve R. Grassmannian beamforming for MIMO amplify-and-forward relaying[C]. *Proc. Information Sciences and Systems*, Princeton, NJ, March 19-21, 2008: 161-166.
- [3] Tang Xiao-jun and Hua Ying-bo. Optimal design of

- non-regenerative MIMO wireless relays[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2007, 6(4): 1398-1407.
- [4] Chae Chan-Byoung, Tang Tai-wen, Heath R W Jr, and Cho Sunghyun. MIMO relaying with linear processing for multiuser transmission in fixed Rrelay networks[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, 56(2): 727-738.
- [5] Zhang Xing, Wang Wen-bo, and Ji Xiao-dong. Multiuser diversity in multiuser two-hop cooperative relay wireless networks (TCRN): system model and performance analysis[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2009, 58(2): 1031-1036.
- [6] Yu Jiang, Liu Dan-pu, Yin Chang-chuan, and Yue Guang-xin. Relay-assisted MIMO multiuser precoding in fixed relay networks[C]. Proc. Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, Shanghai, Sept 21-25, 2007: 881-884.
- [7] Yilmaz E and Sunay M O. Amplify-and-forward capacity with transmit beamforming for mimo multiple-relay channels[C]. Proc. Global Telecommunications Conference, Washington, DC, Nov 26-30, 2007: 3873-3877.
- [8] Zhang Rui, Chai Rui, Liang Chin-choy, and Liang Ying-chang. Joint beamforming and power control for mimo relay broadcast channel with qos constraints. Proc. Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, CA , Nov 4-7, 2007: 453-457.
- 李汀: 男, 1979年生, 博士生, 研究MIMO通信信号处理、多用户信号处理.
- 杨绿溪: 男, 1964年生, 教授, 博士生导师, 主要研究通信信号处理、MIMO通信系统盲信号处理和自适应信号处理.