

多小区多用户 TDD MIMO 下行链路干扰抑制预编码算法

刘祖军, 王杰令, 孙德春, 易克初

(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: 针对多小区多用户 TDD MIMO 下行链路, 提出了一种基于预编码的联合干扰抑制算法。首先, 利用广义 MMSE 信道逆的 QR 分解设计预编码矩阵抑制下行链路的多用户干扰(MUI)。然后, 从信号能量泄露的角度设计第二个预编码矩阵抑制小区间干扰(ICI)和残留的多用户干扰。该算法能够利用 TDD MIMO 信道的互易性, 不需要用户端的反馈。在市区微小区组成的多用户 TDD MIMO 系统中的仿真结果表明, 该算法能有效地提高系统容量和用户端平均信干噪比(SINR)。

关键词: TDD MIMO; 多用户干扰(MUI); 小区间干扰(ICI); 干扰抑制; 下行链路

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2013)04-0187-07

Linear precoding for interference suppression in multi-cell multi-user TDD MIMO downlink

LIU Zu-jun, WANG Jie-ling, SUN De-chun, YI Ke-chu

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

Abstract: To suppress multi-user interference (MUI) and inter-cell interference (ICI) existing in multi-cell multi-user TDD MIMO downlink, an interference suppression algorithm through designing precoder was proposed. Firstly, a precoding matrix was designed for MUI suppression, with the help of the QR decomposition of generalized MMSE channel inversion. And then the second precoding matrix was designed to suppress ICI and residual MUI, using a signal leakage criterion. The proposed algorithm could utilize TDD MIMO channel reciprocity, and thus did not require users' feedback information. The algorithm had been simulated in a multi-user TDD MIMO system composed of urban micro-cells. Simulation results show that, the proposed algorithm can effectively improve system capacity and user's average SINR.

Key words: TDD MIMO; multi-user interference (MUI); inter-cell interference (ICI); interference suppression; downlink

1 引言

在多用户多输入多输出(MIMO)系统下行链路中(也称为广播信道),多用户间干扰(MUI)是限制其性能的主要因素。预编码技术是抑制 MUI 的有效手段,用于抑制 MUI 的预编码方式可分为 2 类:非线性预编码和线性预编码。作为典型的非线性预编码,脏纸编码(DPC)在发送端预先确知期望信道和干扰信道时,可以达到 MIMO 广播信道的和容量^[1,2]。但是 DPC 复杂度太高,在实际中难以应用。其他一

些复杂度稍低的非线性预编码包括 Tomlinson-Harashima 预编码^[3,4]、Vector Perturbation(VP)技术^[5]等。

线性预编码技术因其复杂度低而受到越来越多的关注。用于抑制 MUI 的最简单线性预编码技术是迫零信道求逆(ZF-CI)和 MMSE 信道求逆(MMSE-CI)^[6]。作为 ZF-CI 算法的推广块对角化(BD)算法通过寻找干扰用户信道矩阵的零空间来抑制多用户 MIMO 下行链路中的 MUI^[7,8]。但是, ZF-CI 算法和 BD 算法对收发端的天线数有严格的限制,即发

收稿日期: 2012-02-22; 修回日期: 2012-07-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61101146); 国家科技重大专项基金资助项目(2011ZX03004-001-01, 2009ZX03003-001); 高等学校学科创新引智计划基金资助项目(“111”计划)(B08038)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(61101146); The National Significant Science and Technology Project (2011ZX03004-001-01, 2009ZX03003-001); 111 Project(B08038)

射端天线数不小于所有用户端天线数之和。

在此之后，人们提出了各种改进的 MUI 抑制算法。例如利用信干噪比(SINR)最大化准则和广义 MMSE 信道求逆设计预编码矩阵来抑制传统 MMSE-CI 算法中的剩余 MUI 干扰^[9]，以及发端利用干扰的 MMSE-CI 预编码算法可以最大化接收端的 SINR^[10]。Sadek 等^[11]则采用了一种基于用户信号泄露的准则来设计预编码矩阵，这一准则随后被推广到 MIMO-OFDM 系统中^[12,13]。另外，将线性预编码技术和非线性预编码技术相结合^[14,15]，也取得了良好的 MUI 抑制效果。

上述用于多用户 MIMO 下行链路的预编码技术都没有考虑小区间干扰(ICI)。然而，ICI 会极大地降低 MIMO 系统性能，尤其是小区边缘用户的性能。为此，文献[16]给出了一种改进的 BD 算法，用于存在 ICI 的多用户 MIMO 下行链路。此算法利用干扰的协方差矩阵给每一个用户构造预编码矩阵，在抑制多用户干扰的基础上抑制 ICI。然而此算法要求所有小区轮流优化，这样难以达到系统容量的最优。同时，基站还需要知道小区内所有用户的信道矩阵和干扰加噪声协方差矩阵，所以用户必须将干扰信息反馈给基站。而反馈环节对于采用时分双工(TDD)的 MIMO 系统而言是希望尽量避免的。

为此，本文针对存在 ICI 和 MUI 的多小区多用户 TDD MIMO 下行链路，提出了一种基于预编码的干扰抑制算法。该算法分两步设计预编码矩阵抑制系统中的 MUI 和 ICI，预编码的设计不需要用户

的干扰加噪声协方差矩阵，同时可利用 TDD MIMO 信道的互易性获得预编码设计的用户信道和干扰信道，从而避免了反馈环节。

文中用到的一些符号说明如下：大写粗体字母代表矩阵，小写粗体字母代表向量； I_N 代表 $N \times N$ 的单位阵；对于任一矩阵 A ， A^H 、 A^{-1} 、 $\text{Tr}(A)$ 、 $\|A\|_F$ 和 $\det(A)$ 分别代表矩阵 A 的共轭转置、逆、迹、Frobenius 范数和行列式； $E(\cdot)$ 代表求数学期望。

2 系统模型

存在 ICI 的多用户 MIMO 下行链路模型如图 1 所示。假设当前小区广播信道中有 K 个用户，每个用户接收天线数为 N_R ，基站发射天线数为 N_T 。如图 1 所示， s_k ($k=1,2,\dots,K$) 代表当前小区基站发送给用户 k 的符号向量， $E(s_k s_k^H) = s_s^2 I$ 。 H_k 是基站和用户 k 之间的 $N_R \times N_T$ 信道矩阵， T_k 是用户 k 的预编码矩阵。假设当前小区周围存在 M 个其他小区对用户 k 产生干扰，即 ICI， $\hat{H}_{m,k}$ ($m=1,2,\dots,M$) 为第 m 个干扰小区基站到当前小区用户 k 的干扰信道。而当前小区基站到第 m 个相邻小区中用户 k 的干扰信道表示为 $\tilde{H}_{m,k}$ 。存在 ICI 时，当前小区用户 k 的接收信号可表示为

$$y_k = H_k x_0 + \sum_{m=1}^M \sqrt{I_{m,k}} \hat{H}_{m,k} x_m + n_k$$
$$= H_k T_k s_k + H_k \sum_{i=1, i \neq k}^K T_i s_i + \sum_{m=1}^M \sqrt{I_{m,k}} \hat{H}_{m,k} x_m + n_k \quad (1)$$

其中， x_0 是当前小区基站的发送信号， n_k 是加性复

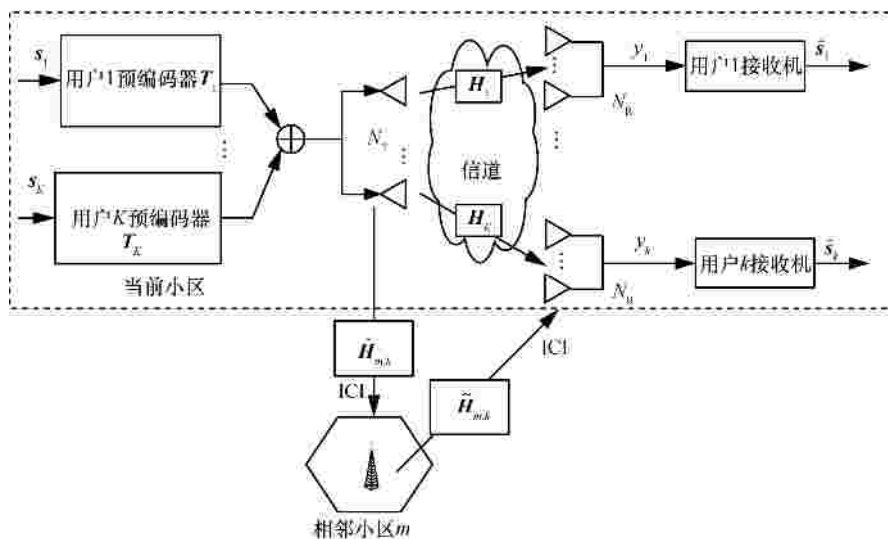


图 1 系统模型

高斯噪声向量 $XN(0, s^2 \mathbf{I}_{N_R})$, x_m 为第 m 个干扰小区基站的发送信号, 对于 TDD MIMO 系统而言, 下行链路的 ICI 由干扰小区的基站产生。

式(1)中右边第 1 项代表用户 k 的期望接收信号, 第 2 项代表当前小区内的多用户干扰(MUI), 第 3 项代表来自 M 个其他小区的共道干扰, 即 ICI。上式中矩阵 \mathbf{H}_k 、 $\hat{\mathbf{H}}_{m,k}$ 和 $\bar{\mathbf{H}}_{m,k}$ 只表征了小尺度衰落。而参数 $\sqrt{\gamma_{m,k}^?}$ 表征大尺度衰落对干扰信号的影响, 此参数由本小区基站到用户 k 所经历的大尺度衰落与干扰基站 m 到本小区用户 k 所经历的大尺度衰落之比决定^[17]。采用 OFDM 技术后, 可将此模型推广到频率选择性信道中^[8]。

3 干扰抑制算法描述

本文通过设计预编码矩阵 \mathbf{T}_k 来同时抑制 MUI 和 ICI, \mathbf{T}_k 的设计分为 2 步。首先, 设计预编码矩阵用于抑制小区内的 MUI。然后, 在此基础上设计预编码矩阵抑制残留 MUI 和 ICI。这里假设每个基站发射功率均相同, 并且发送功率平均分配。

定义当前小区的用户信道矩阵为

$$\mathbf{H}_S = [\mathbf{H}_1^T, \mathbf{H}_2^T, \mathbf{L}, \mathbf{H}_K^T]^T \quad (2)$$

利用广义 MMSE 信道求逆算法^[9], 求得信道矩阵 \mathbf{H}_S 的 MMSE 逆如下所示。

$$\bar{\mathbf{H}}_S = (\mathbf{H}_S^H \mathbf{H}_S + a\mathbf{I})^{-1} \mathbf{H}_S^H = [\bar{\mathbf{H}}_1, \bar{\mathbf{H}}_2, \mathbf{L}, \bar{\mathbf{H}}_K] \quad (3)$$

其中, $a = s_n^2 \sum_{k=1}^K N_R / P_T$, $\bar{\mathbf{H}}_k$ ($k=1,2,\dots,K$) 表示用户 k 期望信道的 MMSE 逆, 对 $\bar{\mathbf{H}}_k$ 做 QR 分解, 即

$$\bar{\mathbf{H}}_k = \bar{\mathbf{Q}}_k \bar{\mathbf{R}}_k \quad (k=1,2,\mathbf{L},K) \quad (4)$$

$\bar{\mathbf{Q}}_k$ 作为用户 k 的预编码矩阵, 用于抑制小区内的 MUI。与传统的 BD 和 ZF-CI 逆相比, 利用 $\bar{\mathbf{Q}}_k$ 抑

制 MUI 不存在收、发端天线数的限制, 而且可以克服噪声放大的问题。但是, 作为预编码矩阵, $\bar{\mathbf{Q}}_k$ 的引入会产生残余的用户间干扰。另外, $\bar{\mathbf{Q}}_k$ 无法抑制极大影响系统性能的 ICI。

因此, 本文中设计第 2 个预编码矩阵 \mathbf{M}_k , 用于抑制残余的用户间干扰和小区间干扰。此时用户 k 总的预编码矩阵为

$$\mathbf{T}_k = \bar{\mathbf{Q}}_k \mathbf{M}_k \quad (5)$$

此时接收信号可表示为

$$y_k = \mathbf{H}_k (\bar{\mathbf{Q}}_k \mathbf{M}_k s_k + \sum_{i=1, i \neq k}^K \bar{\mathbf{Q}}_i \mathbf{M}_i s_i) + \sum_{m=1}^M \sqrt{\gamma_{k,m}^?} \hat{\mathbf{H}}_{m,k} x_m + n_k \quad (6)$$

为了使接收到的干扰对用户的影响最小, 一般可以采用最大化接收信号的 SINR 来设计预编码矩阵^[9,10]。但是, 在利用 SINR 最大化原则设计预编码矩阵时, 基站端需要知道用户接收到的干扰加噪声协方差矩阵, 需要用户将此信息反馈给基站, 增加了系统开销。这一点对 TDD MIMO 系统而言是希望尽量避免的。

因此, 本文利用信号泄露的思想^[11~13], 定义如式(7)所示的用户 k 的期望信号功率与信号泄露的干扰加噪声功率之比。式(7)分母中第 1 项代表当前小区第 k 个用户泄露到当前小区其他用户的干扰。第 2 项代表泄露到相邻 M 个小区的干扰, 其中, $\hat{\mathbf{H}}_{m,i}$ 表示当前小区基站到第 m 个相邻小区中用户 i 的干扰信道, $\sqrt{\gamma_{m,i}^?}$ 表征了干扰信号的大尺度衰落。这里, 信号泄露指的是期望信号在其他用户上引起的干扰。最大化 SLNR 可看作是一种利他性优化, 而最大化 SINR 准则可看作是一种利己性优化。当发射端知道理想的 CSI 时, 最大化 SLNR 的方法要优于基于最大化 SINR 的方法^[18]。

$$SLNR_k = \frac{E \left(\left\| \mathbf{H}_k \bar{\mathbf{Q}}_k \mathbf{M}_k s_k \right\|_F^2 \right)}{E \left(\sum_{i=1, i \neq k}^K \left\| \mathbf{H}_i \bar{\mathbf{Q}}_k \mathbf{M}_k s_k \right\|_F^2 + \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^K \left\| \sqrt{\gamma_{m,i}^?} \hat{\mathbf{H}}_{m,i} \bar{\mathbf{Q}}_k \mathbf{M}_k s_k \right\|_F^2 \right)} + N_R s_n^2 \quad (7)$$

$$SLNR_k = \frac{s^2 \text{Tr}(\mathbf{M}_k^H \bar{\mathbf{Q}}_k^H \mathbf{H}_k^H \mathbf{H}_k \bar{\mathbf{Q}}_k \mathbf{M}_k)}{\text{Tr} \left[s^2 \mathbf{M}_k^H \left(\left(\sum_{i=1, i \neq k}^K \mathbf{H}_i \bar{\mathbf{Q}}_k \right)^H \left(\sum_{i=1, i \neq k}^K \mathbf{H}_i \bar{\mathbf{Q}}_k \right) + \left(\sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^K \sqrt{\gamma_{m,i}^?} \hat{\mathbf{H}}_{m,i} \bar{\mathbf{Q}}_k \right)^H \left(\sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^K \sqrt{\gamma_{m,i}^?} \hat{\mathbf{H}}_{m,i} \bar{\mathbf{Q}}_k \right) \right) \mathbf{M}_k \right]} + N_R s_n^2$$

$$= \frac{s^2 \text{Tr}(\mathbf{M}_k^H \bar{\mathbf{Q}}_k^H \mathbf{H}_k^H \mathbf{H}_k \bar{\mathbf{Q}}_k \mathbf{M}_k)}{\text{Tr} \left[s^2 \mathbf{M}_k^H \left(\left(\sum_{i=1, i \neq k}^K \mathbf{H}_i \bar{\mathbf{Q}}_k \right)^H \left(\sum_{i=1, i \neq k}^K \mathbf{H}_i \bar{\mathbf{Q}}_k \right) + \left(\sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^K \sqrt{\gamma_{m,i}^?} \hat{\mathbf{H}}_{m,i} \bar{\mathbf{Q}}_k \right)^H \left(\sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^K \sqrt{\gamma_{m,i}^?} \hat{\mathbf{H}}_{m,i} \bar{\mathbf{Q}}_k \right) + \frac{N_R s_n^2}{s^2} \mathbf{I} \right) \mathbf{M}_k \right]} \quad (8)$$

式(7)可进一步写为式(8)的形式,设计当前小区第 k 个用户的预编码矩阵 M_k ,使得式(8)所示的 $SLNR$ 最大,即 M_k 求解问题可描述为

$$M_k = \arg \max_{M_k \in \mathbb{C}^{N_T \times L}} SLNR_k$$

$$\text{s.t. } \|M_{k,l}\|_2^2 = 1 \quad (l = 1, 2, \dots, N_R) \quad (9)$$

其中, $M_{k,l}$ 为 M_k 的第 l 个列向量。为简化问题,令

$$A = s_s^2 \bar{Q}_k^H H_k^H H_k \bar{Q}_k$$

$$B = s_s^2 \left(\left(\sum_{i=1, i \neq k}^K H_i \bar{Q}_k \right)^H \left(\sum_{i=1, i \neq k}^K H_i \bar{Q}_k \right) + \left(\sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^K \sqrt{\rho_{m,i}} \hat{H}_{m,i} \bar{Q}_k \right)^H \left(\sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^K \sqrt{\rho_{m,i}} \hat{H}_{m,i} \bar{Q}_k \right) + \frac{N_R s_n^2}{s_s} I \right) \quad (10)$$

于是,式(9)所述问题等价于

$$\arg \max_{M_k \in \mathbb{C}^{N_T \times N_R}} \frac{\text{Tr}(M_k^H A M_k)}{\text{Tr}(M_k^H B M_k)}$$

$$\text{s.t. } \|M_{k,l}\|_2^2 = 1 \quad (l = 1, 2, \dots, N_R) \quad (11)$$

矩阵 A 和 B 都是 $N_T \times N_T$ 的 Hermit 矩阵,且 B 是正定的。因此,式(11)是一个广义 Rayleigh 商问题。设矩阵束 (A, B) 的广义特征值及其广义特征向量为

$$\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_{N_R}, \dots, \rho_{N_T}$$

$$p_1, p_2, \dots, p_{N_R}, \dots, p_{N_T} \quad (12)$$

利用 Courant-Fisher 定理^[19],当前小区用户 k 的第 2 个预编码矩阵 M_k 由最大的 N_R 个广义特征值对应的特征向量组成,且按降序排列可表示为

$$M_k = \left[\frac{p_1}{\|p_1\|_2}, \frac{p_2}{\|p_2\|_2}, \dots, \frac{p_{N_R}}{\|p_{N_R}\|_2} \right] \quad (13)$$

在引入上述预编码矩阵进行处理后,当前用户 k 接收的期望信号的协方差矩阵为

$$\rho_k = H_k E(T_k s_k (T_k s_k)^H) H_k^H \stackrel{\text{dif}}{=} H_k F_k H_k^H \quad (14)$$

用户 k 的干扰加噪声的协方差矩阵为

$$R_k = \sum_{i=1, i \neq k}^K E(H_k T_i s_i (H_k T_i s_i)^H) + \sum_{m=1}^M \rho_{m,k} E(\left(\frac{\rho_{m,k}}{s_s} T_{m,k} s_{m,k} \left(\frac{\rho_{m,k}}{s_s} T_{m,k} s_{m,k} \right)^H \right) + s_n^2 I_{N_R} \quad (15)$$

因此,当前小区用户 k 的归一化容量为

$$C_k = \text{lb det} \left[\left(I + \frac{H_k F_k H_k^H}{R_k} \right) \right] \quad (16)$$

系统中用户的平均容量为

$$C_{\text{AVG}} = \frac{1}{(M+1)K} \left\{ \sum_{k=1}^K C_k + \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^K C_{m,i} \right\} \quad (17)$$

其中, $C_{m,i}$ 是第 m 个邻小区中用户 i 的归一化容量,计算过程与式(16)相同。

4 算法复杂度分析

接下来笔者比较本文算法和考虑 ICI 的改进 BD 算法^[16]的计算复杂度,主要比较算法所需的浮点运算(FLOP)数目。

表 1 给出了 2 种算法所需的 FLOP,其中,诸如乘法、除法和开方等运算的 FLOP 设为 1。表 2 给出了在一些天线参数下 2 种算法所需 FLOP 的比较结果。从表 1 和表 2 给出的结果可以看出,本文算法的计算复杂度稍高。

在算法计算复杂度比较中,一些矩阵运算所需的 FLOP 如下所示^[19]:

- 1) $m \times n$ 矩阵和 $n \times p$ 矩阵相乘: $2mnp$;
- 2) $m \times n$ 矩阵($m > n$)的 SVD 分解,其中仅需要 L 和 V : $4n^2m + 13m^3$;
- 3) $n \times n$ 矩阵的 SVD 分解,其中,仅需要 L 和 V : $17n^3$;
- 4) $m \times n$ 矩阵的 QR 分解: $3n^2(m - n/3)$;
- 5) $n \times n$ 对称矩阵的 LU 分解: $n^3/3$;
- 6) $n \times n$ 矩阵的 Cholesky 分解: $n^3/3$;
- 7) 利用 Gauss-Jordan 消去法进行 $n \times n$ 矩阵求逆: $4n^3/3$ 。

但是在改进 BD 算法中,基站端需要知道各个用户的干扰加噪声协方差矩阵,因此该算法用于 TDD MIMO 系统时,基站无法利用 TDD 信道的互易性来获得这些信息,从而需要用户端的反馈。而在本文提出的算法中,基站只需要知道用户信道矩阵和干扰矩阵,不需要知道用户端的干扰加协方差矩阵。在 TDD MIMO 系统上行链路中,基站除了接收到本小区期望用户发来的信号外,还接收来自邻小区用户的干扰,假设基站可以准确估计本小区的用户信道和干扰信道。利用 TDD 信道的互易性,上行链路估计出的用户信道和干扰信道可用于下行链路。因此,采用本文算法进行干扰抑制时,不再需要用户向基站反馈任何信息。

表 1 本文算法和改进 BD 算法所需的 FLOP

算法	算法步骤	FLOP
	MMSE 信道逆	$\frac{4}{3}N_T^3 + 2KN_R N_T^2 + N_T$
本文算法	第一个预编码矩阵 \bar{Q}_k	$2KN_R^2(N_T - \frac{N_R}{3})$
	第一个预编码矩阵 M_k	$K[14N_T^3 + 10N_T^2N_R + (KM + K - 1)N_T^2]$
	总的 FLOP	$\frac{4}{3}N_T^3 + K[14N_T^3 + 12N_R N_T^2 + 2N_R^2N_T - \frac{2N_R^3}{3}(KM + K - 1)N_T^2]$
改进 BD 算法	计算 B_k	$K[4N_T^2(K - 1)N_R + 13((K - 1)N_R)^3]$
	计算预编码矩阵 D_k	$K(17N_R^3 + N_R^3 + N_R)$
	计算接收滤波器 W_k	$K[\frac{5N_R^3}{3} + 10N_T^2N_R + (KM + K - 1)N_T^2]$
	总的 FLOP	$K[\frac{59N_R^3}{3} + 13((K - 1)N_R)^3 + (4K + 6)N_T^2N_R + (KM + K - 1)N_T^2 + N_R]$

表 2 一些参数下 FLOP 的比较

参数	本文算法	改进 BD 算法
$N_R=2, N_T=4, K=2$	3 114	1 118
$N_R=2, N_T=6, K=3$	14 240	9 022
$N_R=2, N_T=8, K=4$	42 645	30 045

5 仿真结果

本文首先在两小区多用户系统中对本文算法和改进 BD 算法^[16]进行了仿真，每个小区中设置 2 个用户，如图 2 所示。2 个基站的发射功率相等。仿真中，信道矩阵参数由 3GPP 市区微小区环境的 SCM 信道模型^[20]产生，基站天线数为 4，用户的天线数为 2。

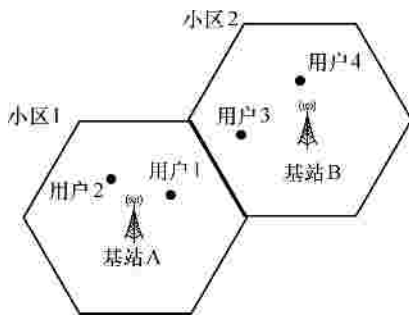


图 2 两小区多用户系统仿真模型

首先假设用户 1 在两基站连线上从小区中心到小区边缘移动，其他用户位置固定。图 3 给出了干扰抑制前用户 1 容量、本文算法和改进 BD 算法作

用后的用户 1 的容量。从图 3 中可以看出，用户 1 处于小区中心时，受到的 ICI 较小，新的联合抑制算法能有效地提高用户 1 的容量；在用户 1 逐渐趋向于小区边缘，即 ICI 增大时，新的干扰抑制算法性能仍优于改进的 BD 算法。

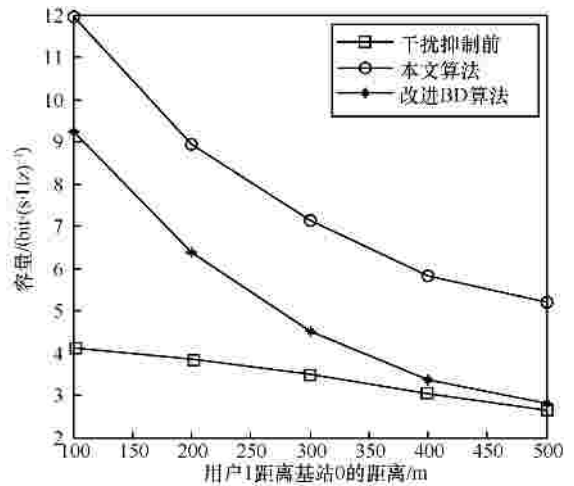


图 3 两小区仿真中干扰抑制前后用户 1 容量比较

2 种联合干扰抑制算法的用户平均容量如图 4 所示，其中，固定用户 1 距离基站 0 为 200m。从图 4 中可以看出，相比改进 BD 算法，本文算法能带来明显的系统容量改善。

图 5 比较了干扰抑制前与本文算法和改进的 BD 算法抑制后的用户端 SINR 的累积分布函数 (CDF)。从图 5 中可以看出采用本文算法后，相比改进的 BD 算法，用户端平均 SINR 提高了约 6dB。

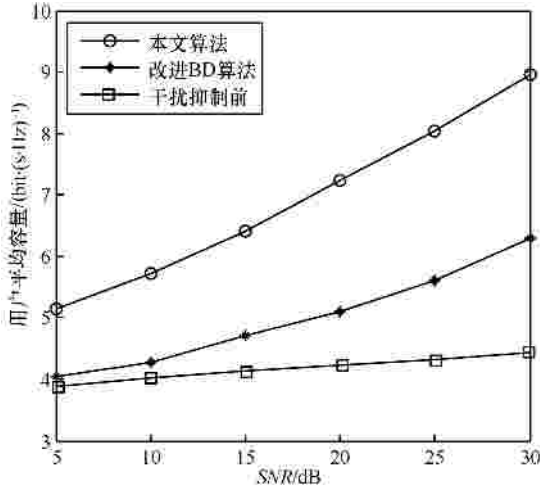


图 4 两小区仿真中用户平均容量比较

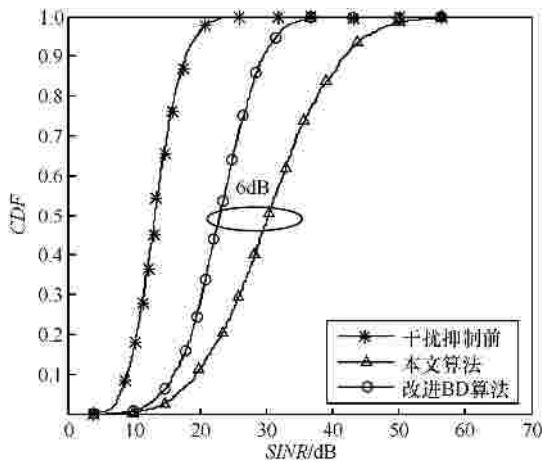


图 5 两小区仿真中用户端平均 SINR 的 CDF 比较

本文还在如图 6 所示的多小区多用户 TDD MIMO 系统中对 2 种算法进行了仿真，每个小区中设置 2 个用户，其他参数与前面两小区仿真中相同。用户 1 在基站 A 和 B 连线上从小区中心到小区边缘移动，其他用户位置固定，2 种算法作用后用户 1 的容量如图 7 所示。在多小区环境中，相比改进的 BD 算法，即使在小区边缘处，新算法依然能有效地抑制干扰，提升用户 1 的容量。

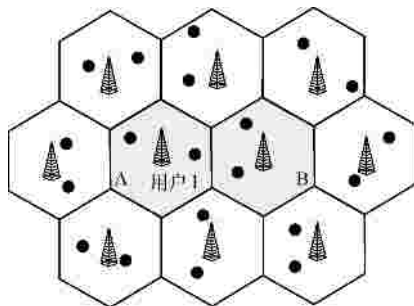


图 6 多小区多用户系统仿真模型

多小区仿真中基站 A 和 B 的所有用户的平均容量如图 8 所示，其中，固定用户 1 距离基站 A 为 200m。比较图 4 和图 8 可以看出在多小区环境中，2 种算法的用户平均容量都有所下降，即使在 SNR 较高的区域，改进 BD 算法的用户平均容量下降亦十分明显，而本文算法在多小区环境中仍能带来明显的系统容量改善。

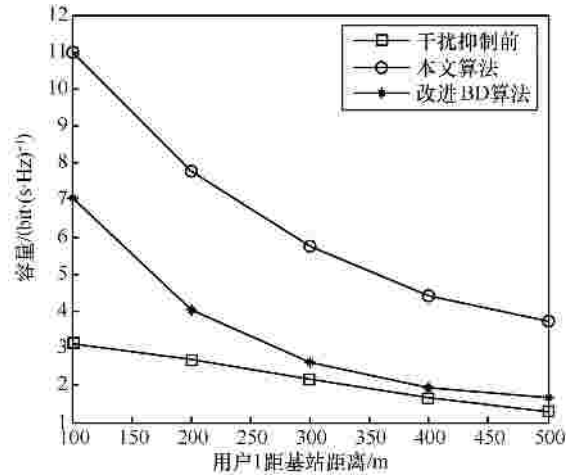


图 7 多小区仿真中干扰抑制前后用户 1 容量比较

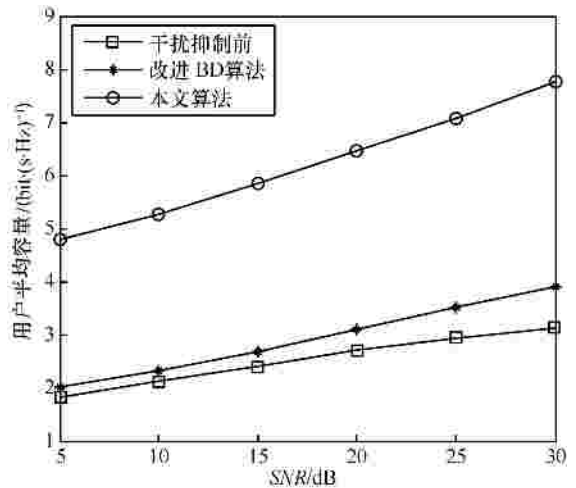


图 8 多小区仿真中用户平均容量比较

2 种算法抑制后的用户端平均 SINR 的 CDF 如图 9 所示。相比在两小区中的仿真结果（如图 5 所示），虽然 2 种算法在多小区环境中平均 SINR 都有所降低，但改进 BD 算法性能下降更明显。而相比改进 BD 算法，本文算法的用户端平均 SINR 提高约 10dB，高于两小区仿真中 6dB 的平均 SINR 性能改善。因此，通过比较两小区和多小区的仿真可以发现，本文算法更加适合多小区环境。

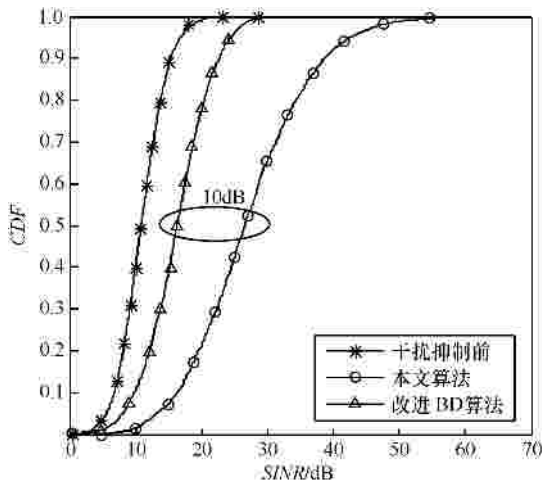


图9 多小区仿真中用户端平均 SINR 的 CDF 比较

6 结束语

本文提出了一种基于预编码的干扰抑制算法用于抑制多小区多用户 TDD MIMO 下行链路的 MUI 和 ICI。该算法分两步设计预编码矩阵。首先,利用广义 MMSE 信道逆设计预编码矩阵抑制多用户干扰。第二步通过最大化用户期望信号功率与泄露出的干扰加噪声功率之比来设计预编码矩阵,抑制 ICI 和第一步中残留的 MUI。该算法能够利用 TDD MIMO 信道的互易性获得信道信息,且不需要用户端的干扰加噪声协方差矩阵,从而避免了用户端的反馈环节。仿真结果证明了所提算法能有效地抑制 MUI 和 ICI,提高了用户端 SINR 和系统容量。

参考文献：

- [1] CAIRE G, SHAMAI S. On the achievable throughput of a multi-antenna Gaussian broadcast channel[J]. IEEE Trans on Information Theory, 2003, 43(7):1691-1706.
- [2] WEINGARTEN H, STEINBERG Y, SHAMAI S. The capacity region of the Gaussian MIMO broadcast channel[J]. IEEE Trans on Information Theory, 2006, 52(9):3936-3964.
- [3] WINDPASSINGER C, FISHCR R F, VENCEL T, *et al.* Precoding in multi-antenna and multiuser communications[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2004, 3(4):1305-1315.
- [4] SANGUINETTI L, MORELLI M. Non-linear pre-coding for multiple-antenna multi-user downlink transmissions with different QoS requirements[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2007, 6(3):852-856.
- [5] HOCHWALD B M, PEEL C B, SWINDLEHURST A L. A vector-perturbation technique for near capacity multiantenna multiuser communication-part II: perturbation[J]. IEEE Trans on Communications, 2005, 53(3):537-544.
- [6] PEEL C B, HOCHWALD B M, SWINDLEHURST A L. A vector-perturbation technique for near capacity multiantenna multiuser communication-part I: channel inversion and regularization[J]. IEEE Trans on Communications, 2005, 53(1):195-202.

- [7] CHOI L U, MURCH R D. A transmit preprocessing technique for multiuser MIMO systems using a decomposition approach[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2004, 3(1):20-24.
- [8] SPENCER Q H, SWINDLEHURST A L, HAARDT M. Zero-forcing methods for downlink spatial multiplexing in multiuser MIMO channels[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2004, 52(2):461-471.
- [9] SUNG H, LEE S R, LEE I. Generalized channel inversion methods for multiuser MIMO systems[J]. IEEE Trans on Communications, 2009, 57(11):3489-3499.
- [10] MASOUIROS C, ALSUSA E. Dynamic linear precoding for the exploitation of known interference in MIMO broadcast systems[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2009, 8(3):1396-1404.
- [11] SADEK M, TARIGHAT A, SAYED A H. A leakage-based precoding scheme for downlink multi-user MIMO channels[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2007, 6(5):1711-1721.
- [12] SADEK M, AISSA S. Leakage based precoding for multi-user MIMO-OFDM systems[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2011, 10(8):2428-2433.
- [13] CHENG P, TAO M, ZHANG W. A new SLNR-based linear precoding for downlink multi-user multi-stream MIMO systems[J]. IEEE Communications Letters, 2010, 14(11):1008-1010.
- [14] STANKOVIC V, HAARDT M. Generalized design of multi-user MIMO precoding matrices[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2008, 7(3):953-961.
- [15] CHAE C B, SHIM S S, HEATH R W. Block diagonalized vector perturbation for multiuser MIMO systems[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2008, 7(11):4051-4057.
- [16] SHIM S, KWAK J S, HEATH R W, *et al.* Block diagonalization for multi-user MIMO with other-cell interference[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2008, 7(7):2671-2881.
- [17] TOLLI A, CODREANU M, JUNTTI M. Compensation of non-reciprocal interference in adaptive MIMO-OFDM cellular systems[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2007, 6(2):545-555.
- [18] XIA X, WU G, FANG S, *et al.* SINR or SLNR: in successive user scheduling in MU-MIMO broadcast channel with finite rate feedback[A]. 2010 International Conference on Communications and Mobile Computing[C]. Shenzhen, China, 2010. 383-387.
- [19] GOLUB G H, LOAN C F V. Matrix Computations[M]. The Johns Hopkins University Press, 1996.
- [20] 3GPP TR 25.996 V8.0.0. Spatial Channel Model for Multiple Input Multiple Output (MIMO) Simulations[S]. 2008.

作者简介：



刘祖军(1976-),男,湖北孝感人,博士,西安电子科技大学副教授,主要研究方向为通信信号处理、无线通信。

王杰令(1981-),男,山东威海人,博士,西安电子科技大学副教授,主要研究方向为通信信号处理、MIMO 和 OFDM 等。

孙德春(1982-),男,河南南阳人,博士,西安电子科技大学讲师,主要研究方向为通信信号处理、无线通信。

易克初(1943-),男,湖南涟源人,博士,西安电子科技大学教授、博士生导师,主要研究方向为卫星通信和通信信号处理。