

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

曹颖鸿 陈 喆 殷福亮

(大连理工大学信息与通信工程学院, 辽宁 大连 116023)

摘 要: 针对多小区 MIMO 系统的多用户下行链路预编码设计是未来移动通信系统研究的重要内容之一。本文在蜂窝多小区 MIMO 通信环境下, 基于信漏噪声比 (Signal-to-Leakage-Noise Ratio, SLNR) 最大准则, 提出了改进的多用户下行链路线性预编码算法。通过在优化目标中考虑接收端白化滤波器的影响, 该预编码算法实现了对用户间干扰和小区间干扰 (OCI) 的同步抑制消除; 在求解预编码矩阵优化问题时, 本文基于 QR 分解提出了一种新的低复杂度求解算法, 该算法能以较低的计算复杂度实现系统性能的有效提升。仿真实验结果表明, 本文的改进 SLNR 线性预编码算法能有效抑制小区间干扰 (OCI) 的影响, 使多小区 MIMO 系统获得更高的和速率 (Sum Rate) 容量。

关键词: 多小区; 小区间干扰 (OCI); 多用户多输入多输出 (MIMO); 预编码; 信漏噪声比 (SLNR)

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2012)03-0315-07

A Novel Leakage-based Precoding Scheme for Multi-cell Multi-user MIMO System Downlink

CAO Ying-hong CHEN Zhe YIN Fu-liang

(School of Information and Communication Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract: In future wireless cellular system, full frequency reuse is beneficial for higher spectrum efficiency. However, the co-channel interference (CCI) between the cells constrains the system performance seriously. Therefore, precoder design for multi-cell multi-user MIMO system downlink becomes an important part of the research on future mobile communication systems. In this paper, an improved precoding scheme based on signal-to-Leakage-Noise Ratio (SLNR) maximization is proposed for the downlink of multi-cell multi-user MIMO system. In this scheme, whitening filter is used at each receiver for other-cell interference (OCI) suppression, and the influence of whitening filter is considered at the transmitter for precoder design. This proposed precoding scheme can therefore eliminate the multi-user interference (MUI) and the whitened other-cell interference (OCI) simultaneously. Furthermore, a novel QR-decomposition-based algorithm is derived to find the optimized precoding matrix for each user. Using this proposed SLNR precoding scheme, the system sum rate capacity is improved significantly with lower computational loads. Simulation results demonstrate that the proposed SLNR precoding scheme can suppress the impact of the other-cell interference (OCI) efficiently, and is more suitable for multi-cell MIMO communication systems.

Key words: Multi-cell; Other-cell interference (OCI); Multi-user Multi-input Multi-output (MIMO); precoding; Signal-to-leakage-noise ratio (SLNR)

1 前言

在蜂窝多小区通信环境下, 利用 MIMO 技术提升

性能已成为移动通信系统研究的重要内容之一^[1-4]。在多用户 MIMO 系统中, 下行链路预编码技术通过在发送端的预处理, 可有效地抑制用户间的同频干扰, 实

现系统性能的提升^[3,5]。然而已有的多用户 MIMO 系统下行链路预编码技术大多仅考虑同一小区内多个用户间的同频干扰,没有考虑来自邻近小区的同频干扰(Other-cell Interference, OCI)^[5-10],从而使得蜂窝多小区通信系统的性能显著下降^[11,12]。因此,需要针对蜂窝多小区 MIMO 系统,设计能有效抑制同频干扰的多用户下行链路预编码方案。

在多用户 MIMO 系统下行链路预编码技术中,线性预编码算法能以较低复杂度实现较高的系统性能,因而受到了广泛关注^[5,9]。在线性预编码算法中,基于迫零思想的预编码算法能完全消除系统各用户间的同频干扰^[5,6],但这类算法存在严重的噪声放大问题,使得系统功率效率降低,对系统天线数目也有一定约束(即要求系统总接收天线数不多于发送天线数),从而限制了其应用范围。为避免上述问题,人们提出了基于用户间干扰抑制的预编码算法^[7,9]。该类算法综合考虑了用户间干扰及有用信号的功率,因此比迫零类算法更为鲁棒。这类算法通常采用信干噪比(SINR)设计准则,其各用户的预编码矩阵需要联合优化,因此直接求解比较困难^[7]。为解决该问题,Tarighat 等提出了信号泄漏(Leakage)的概念^[9]和信漏噪声比(Signal-to-Leakage-Noise Ratio, SLNR)准则^[8],这样采用 SLNR 设计准则的预编码算法就可以给出各用户预编码矩阵的闭合表达式,且算法不受系统天线数目的约束,在单小区通信环境下,也能保证系统中各移动用户同时接收多个互不干扰的数据流,使系统传输率得到提高^[8,9]。

针对多小区多用户 MIMO 系统,近期的研究表明:当基站拥有小区内和小区外全部用户的准确信道状态信息(CSI)和用户数据时,通过小区间的协作来联合确定各用户的预编码矩阵,可以完全消除小区间干扰(OCI)的影响,显著提高系统性能^[13-15]。然而在实际系统中,受通信资源与系统复杂度的限制,这种利用小区间协作的联合优化很难实现,因此不需要小区间协作就能抑制消除 OCI 影响的次优解决方案近来受到关注^[16-18]。在这些非协作的预编码方案中,各用户在接收端通常要对 OCI 加噪声的协方差阵进行估计,并将该信息反馈给基站发送端用于设计预编码器。基于这一思想,文献[16]给出了改进的分块对角化(Block Diagonalization, BD)预编码算法。该算法在接收端使用白化滤波器来抑制 OCI 的影响,使多小区多用户 MIMO 系统的性能得到有效提升,但它并未在发送端对白化后的 OCI 进行有效抑制,且其本身也属于迫零类算法,因此仍存在噪声放大和天线配置受约束等问题。文献[17]提出了改进的 SLNR 线性预编码算法,该算

法在预编码设计中综合考虑了同频干扰和有用信号的功率,其性能优于改进的分块对角化算法,但由于在预编码矩阵求解时采用了次优方法,其性能优势在低信噪比情况下才能体现出来。

本文针对多小区多用户 MIMO 系统存在 OCI 的问题,提出一种新的改进 SLNR 线性预编码算法。该算法在预编码设计中考虑了接收端白化滤波器的影响,改进了优化目标函数,能在发送端对用户间干扰和小区间干扰(OCI)进行同步抑制消除。此外,为了简化 SLNR 预编码算法中优化问题的求解,本文提出了一种低复杂度的预编码矩阵优化求解算法,该算法利用 QR 分解来求取预编码矩阵,能以较低的计算复杂度实现系统性能的提升。文中给出了仿真实验结果。

2 多小区多用户 MIMO 系统下行链路的信号模型

考虑蜂窝多小区通信环境下的多用户 MIMO 系统下行链路,基站(BS)在同一频段同时与 K 个移动用户通信,其中移动用户 $k(k=1, \dots, K)$ 配有 M_k 个接收天线,用以接收来自基站的 $L_k(L_k \leq M_k)$ 个空间复用的子数据流,基站配有 N 个天线用于发送经预编码处理的信号。为便于分析,假设各用户接收天线数相同,为充分利用 MIMO 系统的优势来提高系统传输率,进一步假设 $L_k = M_k$ 。

假设信道为平坦衰落,系统各用户均受到来自邻近小区的同频干扰(OCI)。设基站与用户 i 间的 $M_i \times N$ 维信道状态矩阵为 \mathbf{H}_i ,其组成元素是统计独立的复高斯随机变量,且具有零均值和单位方差;用户 i 的 $M_i \times N_{i,i}$ 维 OCI 信道矩阵为 $\mathbf{H}_{i,i}$,其中 $N_{i,i}$ 表示用户 i 接收的等效 OCI 数。则用户 i 接收的信号为

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{H}_i \mathbf{x}_i + \mathbf{H}_i \sum_{j=1, j \neq i}^K \mathbf{x}_j + \mathbf{H}_{i,i} \mathbf{x}_{i,i} + \mathbf{n}_i \quad (1)$$

其中, \mathbf{x}_i 为用户 i 经预编码处理的 N 维发射信号矢量,当系统采用线性预编码时,发射信号矢量 $\mathbf{x}_i = \mathbf{W}_i \mathbf{s}_i$,其中 \mathbf{W}_i 为用户 i 的 $N \times L_i$ 维预编码矩阵,且满足 $\|\mathbf{W}_i\|_F^2 = L_i$,以保证发射功率不变,此处 $\|\cdot\|_F$ 表示矩阵的 Frobenius 范数; \mathbf{s}_i 为基站发送给用户 i 的 L_i 维数据矢量,记作 $\mathbf{s}_i = [s_{i,1}, s_{i,2}, \dots, s_{i,L_i}]^T$,其元素假设相互独立且方差为 σ_s^2 ,这里 $(\cdot)^T$ 表示转置操作; $\mathbf{x}_{i,i}$ 为用户 i 接收的 $N_{i,i}$ 维 OCI 信号矢量,其平均功率为 $P_{i,i}$,即满足 $E\{\|\mathbf{x}_{i,i}\|^2\} = P_{i,i}$,这里 $E\{\cdot\}$ 为期望操作; \mathbf{n}_i 为加性复高斯白噪声(AWGN)矢量,其均值为零、协方差阵为 $\sigma_n^2 \mathbf{I}_{M_i}$,此处 \mathbf{I}_{M_i} 表示 $M_i \times M_i$ 维单位阵。为使表达简洁,这里省去了时间序号。

将式(1)中用户 i 接收的 OCI 加噪声项表示为 $\mathbf{z}_{l,i}$
 $= \mathbf{H}_{l,i} \mathbf{x}_{l,i} + \mathbf{n}_i$, 则 $\mathbf{z}_{l,i}$ 的 $M_i \times M_i$ 维协方差矩阵为

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{l,i} &= \mathbf{E} \{ \mathbf{z}_{l,i} \mathbf{z}_{l,i}^H \} \\ &= \mathbf{H}_{l,i} \mathbf{E} \{ \mathbf{x}_{l,i} \mathbf{x}_{l,i}^H \} \mathbf{H}_{l,i}^H + \sigma_n^2 \mathbf{I}_{M_i} \\ &= \mathbf{H}_{l,i} \mathbf{O}_{l,i} \mathbf{H}_{l,i}^H + \sigma_n^2 \mathbf{I}_{M_i} \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $\mathbf{O}_{l,i}$ 为干扰信号 $\mathbf{x}_{l,i}$ 的协方差矩阵, 且满足 $Tr(\mathbf{O}_{l,i}) = P_{l,i}$, 此处 $Tr(\cdot)$ 表示矩阵求秩。

假设基站发送端已知各用户的 CSI 和 OCI 加噪声 $\mathbf{z}_{l,i}$ 的协方差矩阵 $\{\mathbf{R}_{l,i}\}_{i=1}^K$, 并利用这些信息进行预编码设计; 当基站给出发送预编码方案时, 邻近小区干扰基站的发送策略保持不变; 各用户的 CSI 和 OCI 加噪声 $\mathbf{z}_{l,i}$ 的协方差阵均可以在接收端进行估计并反馈给基站发送端。

3 一种用于多小区多用户 MIMO 系统的 SLNR 线性预编码新算法

下面针对多小区多用户 MIMO 系统, 通过在预编码设计中考虑接收端白化滤波器的影响, 提出一种改进的 SLNR 线性预编码设计方案, 实现在发送端对用户间干扰和小区间干扰(OCI)的同步抑制消除。在此基础上, 提出一种预编码矩阵优化求解新算法, 以降低其计算复杂度。

在多小区多用户 MIMO 系统下行链路中, 由于用户的接收信号式(1)中存在小区间干扰, 首先要在用户接收端引入白化滤波器来抑制 OCI 的影响。由式(2), 用户 i 的 $M_i \times M_i$ 维白化滤波器定义为 $\mathbf{G}_i = \mathbf{R}_{l,i}^{(-1/2)}$, 则用户 i 的接收信号经白化滤波后可表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_i &= \mathbf{G}_i \mathbf{y}_i \\ &= \mathbf{G}_i \mathbf{H}_i \mathbf{x}_i + \mathbf{G}_i \mathbf{H}_i \sum_{j=1, j \neq i}^K \mathbf{x}_j + \mathbf{G}_i \mathbf{z}_{l,i} \\ &= \mathbf{H}_{r,i} \mathbf{x}_i + \mathbf{H}_{r,i} \sum_{j=1, j \neq i}^K \mathbf{x}_j + \mathbf{G}_i \mathbf{z}_{l,i} \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $\mathbf{H}_{r,i} = \mathbf{G}_i \mathbf{H}_i$, $\mathbf{x}_i = \mathbf{W}_i \mathbf{s}_i$ 。

在发送端, 为通过预编码设计实现对系统用户间同频干扰和噪声的抑制, 基站基于 SLNR 最大化准则来优化求解各用户的预编码矩阵 $\{\mathbf{W}_i\}_{i=1}^K$, 即

$$\begin{cases} \mathbf{W}_i^{opt} = \arg \max_{\mathbf{w}_i \in \mathbb{C}^{M_i}} \text{SLNR}_i \\ \text{s. t. } \|\mathbf{W}_i\|_F^2 = L_i \end{cases} \quad (4)$$

为了改进 SLNR 线性预编码算法在多小区系统中的性能, 本文在预编码矩阵设计中考虑接收端白化滤波器的影响, 以实现在发送端对 OCI 的抑制消除。以用户 i 经白化滤波后的接收信号 \mathbf{r}_i 为考查对象, 定义用户 i 的信漏噪声比(SLNR)为

$$\text{SLNR}_i = \frac{\mathbf{E} \{ \|\mathbf{H}_{r,i} \mathbf{W}_i \mathbf{s}_i\|_F^2 \}}{\sum_{j=1, j \neq i}^K \mathbf{E} \{ \|\mathbf{H}_{r,j} \mathbf{W}_j \mathbf{s}_j\|_F^2 \} + \mathbf{E} \{ \|\mathbf{G}_i \mathbf{z}_{l,i}\|_F^2 \}} \quad (5)$$

由式(2)和白化滤波器的定义可知, $\mathbf{E} \{ \|\mathbf{G}_i \mathbf{z}_{l,i}\|_F^2 \} = M_i$, 又由于 $\|\mathbf{W}_i\|_F^2 = L_i$, 则式(5)可表示为

$$\text{SLNR}_i = \frac{Tr(\mathbf{W}_i^H \mathbf{H}_{r,i}^H \mathbf{H}_{r,i} \mathbf{W}_i)}{Tr(\mathbf{W}_i^H \tilde{\mathbf{H}}_{r,i}^H \tilde{\mathbf{H}}_{r,i} \mathbf{W}_i)} \quad (6)$$

其中 $\tilde{\mathbf{H}}_{r,i} = [\mathbf{H}_{r,1}^H \cdots \mathbf{H}_{r,i-1}^H \mathbf{H}_{r,i+1}^H \cdots \mathbf{H}_{r,K}^H \xi \mathbf{I}_N]^H$, 此处 $\xi = 1/\sigma_s$ 。

将式(6)作为目标函数, 通过求解式(4)的优化问题, 就可得到各用户的预编码矩阵 $\{\mathbf{W}_i\}_{i=1}^K$ 。上述就是本文给出的改进 SLNR 预编码算法。由改进的目标函数式(6)不难看出, 本文算法在设计预编码矩阵时, 综合考虑了小区间的同频干扰和有用信号的功率, 能在发送端对白化后的 OCI 进一步进行抑制。

用 SLNR 最大化准则计算各用户的预编码矩阵 $\{\mathbf{W}_i\}_{i=1}^K$ 时, 求解优化问题(4)的已有算法是: 恰当选取 \mathbf{W}_i , 使其在保持 SLNR 分母不变的前提下, 使 SLNR 的分子最大, 从而得到用户 i 的 $N \times L_i$ 维预编码矩阵 \mathbf{W}_i 为^[8]

$$\mathbf{W}_i^{ori} = \rho_i \mathbf{T}_i \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{L_i} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中 ρ_i 为保持发射功率不变的尺度因子; \mathbf{T}_i 为矩阵对 $(\mathbf{H}_{r,i}^H \mathbf{H}_{r,i}, \tilde{\mathbf{H}}_{r,i}^H \tilde{\mathbf{H}}_{r,i})$ 的广义特征矩阵, 满足

$$\begin{cases} \mathbf{T}_i^H \mathbf{H}_{r,i}^H \mathbf{H}_{r,i} \mathbf{T}_i = \mathbf{\Lambda}_i = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_N) \\ \mathbf{T}_i^H \tilde{\mathbf{H}}_{r,i}^H \tilde{\mathbf{H}}_{r,i} \mathbf{T}_i = \mathbf{I}_N \end{cases} \quad (8)$$

且 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_N \geq 0$ 。

由式(7)可以看出, 针对改进的目标函数(6)采用已有算法求解优化问题(4)时, 需应用矩阵的广义特征值分解(GEVD)来计算各用户的预编码矩阵 $\{\mathbf{W}_i\}_{i=1}^K$, 这种改进的 SLNR 预编码算法称为 SLNR_EVD 算法。在 SLNR_EVD 算法中, 由预编码矩阵的求解过程可知, 每计算一个用户的预编码矩阵, 基站都要计算一次 $\mathbf{H}_{r,i}^H \mathbf{H}_{r,i}$ 、一次 $\tilde{\mathbf{H}}_{r,i}^H \tilde{\mathbf{H}}_{r,i}$ 和一次 $N \times N$ 维矩阵对 $(\mathbf{H}_{r,i}^H \mathbf{H}_{r,i}, \tilde{\mathbf{H}}_{r,i}^H \tilde{\mathbf{H}}_{r,i})$ 的广义特征值分解, 因此其计算复杂度很高, 在实际中难以应用。

为了减少上述预编码算法的计算复杂度, 本文针对改进的优化目标函数(6), 提出一种低复杂度的 SLNR 预编码矩阵求解新算法。

设 $sum = \sum_{i=1}^K M_i + N$, $sum \times N$ 维矩阵 \mathbf{H}_r 定义为

$$\mathbf{H}_r = [\mathbf{H}_{r,1}^H \cdots \mathbf{H}_{r,K}^H \xi \mathbf{I}_N]^H \quad (9)$$

结合 $\tilde{\mathbf{H}}_{r,i}$ 的定义可知, 对任意用户 $i(i=1, \dots, K)$ 存在如

下关系式

$$\mathbf{H}_r^H \mathbf{H}_r = \mathbf{H}_{r,i}^H \mathbf{H}_{r,i} + \tilde{\mathbf{H}}_{r,i}^H \tilde{\mathbf{H}}_{r,i} \quad (10)$$

于是在式(6)定义的 SLNR 中,其分子与分母之和可表示为

$$\begin{aligned} \text{Tr}(\mathbf{W}_i^H \mathbf{H}_r^H \mathbf{H}_r \mathbf{W}_i) &= \text{Tr}(\mathbf{W}_i^H \mathbf{H}_{r,i}^H \mathbf{H}_{r,i} \mathbf{W}_i) + \\ &\text{Tr}(\mathbf{W}_i^H \tilde{\mathbf{H}}_{r,i}^H \tilde{\mathbf{H}}_{r,i} \mathbf{W}_i) \end{aligned} \quad (11)$$

这样,求解 SLNR 优化问题(4)的思路可转化为:恰当选取 \mathbf{W}_i ,使其在保持式(11)不变的条件下,使 SLNR 的分子 $\text{Tr}(\mathbf{W}_i^H \mathbf{H}_{r,i}^H \mathbf{H}_{r,i} \mathbf{W}_i)$ 最大化。下面给出具体的推导过程。

对 \mathbf{H}_r 进行 QR 分解,即

$$\mathbf{H}_r = \mathbf{Q}_r \mathbf{R}_r \quad (12)$$

其中 $\text{sum} \times N$ 维矩阵 \mathbf{Q}_r 的列正交,即满足 $\mathbf{Q}_r^H \mathbf{Q}_r = \mathbf{I}_N$; $N \times N$ 维上三角阵 \mathbf{R}_r 非奇异。

用 $\mathbf{Q}_{r,i}$ 表示 \mathbf{Q}_r 的第 $(\sum_{j=1}^{i-1} M_j + 1)$ 至 $\sum_{j=1}^i M_j$ 行,由式(9)和式(12),则有

$$\mathbf{H}_{r,i} = \mathbf{Q}_{r,i} \mathbf{R}_r \quad (13)$$

对 $M_i \times N$ 维矩阵 $\mathbf{Q}_{r,i}$ 进行奇异值分解(SVD),即

$$\mathbf{Q}_{r,i} = \mathbf{U}_i [\tilde{\Sigma}_i \quad \mathbf{0}] \mathbf{V}_i^H \quad (14)$$

其中 \mathbf{U}_i 和 \mathbf{V}_i 均为酉阵;对角阵 $\tilde{\Sigma}_i = \text{diag}(\sigma_{i,1}, \sigma_{i,2}, \dots, \sigma_{i,M_i})$ 非奇异,且满足 $\sigma_{i,1} \geq \dots \geq \sigma_{i,M_i}$ 。

由式(13)和(14)可知,对于用户 i 有

$$\mathbf{W}_i^H \mathbf{H}_{r,i}^H \mathbf{H}_{r,i} \mathbf{W}_i = \mathbf{W}_i^H \mathbf{R}_r^H \mathbf{V}_i \begin{bmatrix} \tilde{\Sigma}_i & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{V}_i^H \mathbf{R}_r \mathbf{W}_i \quad (15)$$

设用户 i 的 $N \times L_i$ 维预编码矩阵为

$$\mathbf{W}_i = \mathbf{R}_r^{-1} \mathbf{V}_i \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{L_i} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (16)$$

表1 多小区 MIMO 系统下改进的 SLNR 线性预编码算法 (SLNR_QR 算法)

Tab.1 The improved SLNR linear precoding algorithm for multi-cell MIMO system downlink (SLNR_QR algorithm)

- (1) 设 $\mathbf{H}_r = [\mathbf{H}_{r,1}^H \dots \mathbf{H}_{r,K}^H \xi \mathbf{I}_N]^H \in \mathbb{C}^{\text{sum} \times N}$, 当 $M_i = L_i$ 时, $\xi = 1/\sigma_s$;
- (2) 计算 \mathbf{H}_r 的 QR 分解: $\mathbf{H}_r = \mathbf{Q}_r \mathbf{R}_r$, 其中 $\mathbf{Q}_r \in \mathbb{C}^{\text{sum} \times N}$ 为列正交矩阵, $\mathbf{R}_r \in \mathbb{C}^{N \times N}$ 为非奇异上三角阵;
- (3) for $i=1:K$
 - 1) 设 $\mathbf{Q}_{r,i} = \mathbf{Q}_r \left((\sum_{j=1}^{i-1} M_j + 1) : \sum_{j=1}^i M_j, : \right) \in \mathbb{C}^{M_i \times N}$, 对 $\mathbf{Q}_{r,i}$ 进行奇异值分解, 即 $\mathbf{Q}_{r,i} = \mathbf{U}_i \begin{bmatrix} \tilde{\Sigma}_i & \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{V}_i^H$;
 - 2) 构造用户 i 的 $N \times L_i$ 维预编码矩阵 $\mathbf{W}_i = \alpha_i \mathbf{R}_r^{-1} \mathbf{V}_i \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{L_i} \\ \mathbf{0}_{(N-L_i) \times L_i} \end{bmatrix}$

由表1可以看出,在 SLNR_QR 算法中,基站先进行一次 $\text{sum} \times N$ 维的 QR 分解,再分别对每个用户进行一次 $M_i \times N$ 维的奇异值分解(SVD),即可求得优化后

利用 \mathbf{V}_i 的酉性质,由式(12)和(15),可分别得到

$$\mathbf{W}_i^H \mathbf{H}_r^H \mathbf{H}_r \mathbf{W}_i = \mathbf{I}_{L_i} \quad (17)$$

$$\mathbf{W}_i^H \mathbf{H}_{r,i}^H \mathbf{H}_{r,i} \mathbf{W}_i = \tilde{\Sigma}_i^2(1:L_i, 1:L_i) \quad (18)$$

由式(17)可知,此时用户 i 的 SLNR 分子与分母之和(11)为一个固定值。由式(18)可知,用户 i 的 SLNR 的分子可表示为 $\mathbf{Q}_{r,i}$ 的前 L_i 个奇异值的平方和,即

$$\text{Tr}(\mathbf{W}_i^H \mathbf{H}_{r,i}^H \mathbf{H}_{r,i} \mathbf{W}_i) = \text{Tr}(\tilde{\Sigma}_i^2(1:L_i, 1:L_i)) = \sum_{l=1}^{L_i} \sigma_{i,l}^2 \quad (19)$$

结合式(11)、(17)和(18),用户 i 的 SLNR 的分母可写为

$$\begin{aligned} \text{Tr}(\mathbf{W}_i^H \tilde{\mathbf{H}}_{r,i}^H \tilde{\mathbf{H}}_{r,i} \mathbf{W}_i) &= \text{Tr}(\mathbf{I}_{L_i} - \tilde{\Sigma}_i^2(1:L_i, 1:L_i)) \\ &= \sum_{l=1}^{L_i} (1 - \sigma_{i,l}^2) \end{aligned} \quad (20)$$

于是用户 i 的 SLNR 为

$$\text{SLNR}_i = \frac{\sum_{l=1}^{L_i} \sigma_{i,l}^2}{\sum_{l=1}^{L_i} (1 - \sigma_{i,l}^2)} \quad (21)$$

由式(21)可以看出,在对角阵 $\tilde{\Sigma}_i$ 中,若 $\mathbf{Q}_{r,i}$ 的奇异值按由大到小的顺序排列,此时用户 i 的 SLNR 的分子(19)最大,同时其分母(20)最小,从而使得式(21)的 SLNR 最大。因此,在上述求解 SLNR 预编码矩阵新算法中,用户 i 的预编码矩阵为

$$\mathbf{W}_i^{\text{prop}} = \alpha_i \mathbf{R}_r^{-1} \mathbf{V}_i \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{L_i} \\ \mathbf{0}_{(N-L_i) \times L_i} \end{bmatrix} \quad (22)$$

其中 α_i 为保持发射功率不变的尺度因子。

上述改进 SLNR 线性预编码新算法称为 SLNR_QR 算法,它基于改进的目标函数(6),采用新算法来求解优化问题(4),从而得到系统各用户的预编码矩阵 $\{\mathbf{W}_i\}_{i=1}^K$,其具体步骤见表1。

的预编码矩阵。SLNR_QR 算法和 SLNR_EVD 算法的计算复杂度如表2所示。在 $K=3, L_k=M_k=2$ 的系统配置下,SLNR_QR 与 SLNR_EVD 这两种算法的计算复杂

度与发送天线数 N 的关系曲线如图 1 所示。由表 2 和图 1 曲线可以看出,随着发送天线数的增加,本文的 SLNR_QR 算法可有效地降低优化问题(4)的计算复杂度。

表 2 SLNR_QR 算法和 SLNR_EVD 算法的

计算复杂度比较($M = \sum_{k=1}^K M_k$)

Tab. 2 Computational complexity comparison between

SLNR_QR and SLNR_EVD ($M = \sum_{k=1}^K M_k$)

算法	计算复杂度 (flops)
SLNR_EVD 算法	$O(14KN^3 + 2KMN^2 + KN)$
SLNR_QR 算法	$O((8K+2+\frac{1}{6})N^3 + 8MN^2)$

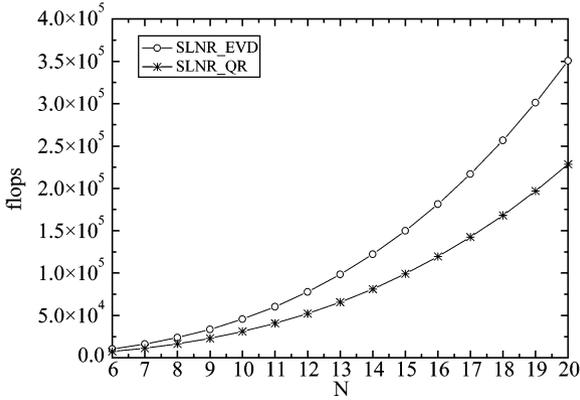


图 1 $K=3, L_k=M_k=2$ 时, SLNR_EVD 算法和 SLNR_QR 算法的计算复杂度随发送天线数变化的曲线

Fig. 1. Computational complexities of SLNR_EVD and SLNR_QR for different numbers of transmit antennas, when $K=3$ and $L_k=M_k=2$

4 计算机仿真与实验结果

为验证本文算法的有效性,在不同信噪比和小区间干扰(OCI)参数配置下,考查预编码算法在蜂窝多小区通信系统中的和速率(Sum Rate)容量。假设预编码后用户接收信号中残余的共道干扰接近高斯分布,且与用户的信息符号相互独立,则系统的和速率(Sum Rate)容量可近似为^[19]

$$R = \sum_{i=1}^K \sum_{l=1}^{L_i} \log_2(1 + \text{SINR}_{i,l})$$

设 (N, M_1, \dots, M_K) 表示有 K 个移动用户的多用户 MIMO 系统,其中基站配有 N 个发射天线,用户 k 配有 M_k 个接收天线。本文各仿真实验均基于(6,2,2,2)的系统配置。

为生成 OCI,假设各用户的 OCI 信道 $\{\mathbf{H}_{l,i}\}_{i=1}^K$ 为不相关的 MIMO 平坦衰落信道。于是用户 i 的小区间干扰噪声比(INR)定义为

$$\text{INR}_i = \frac{P_{l,i}}{\sigma_n^2}$$

将系统各用户的小区间干扰噪声比用矢量 $\mathbf{INR} = [\text{INR}_1, \dots, \text{INR}_K]$ 表示,各用户的 OCI 等效干扰个数记作矢量 $\mathbf{N}_l = [N_{l,1}, \dots, N_{l,K}]$ 。假设系统各用户信噪比相同,于是用户信噪比(SNR)定义为

$$\text{SNR}_i = \frac{\mathbb{E}\{\|\mathbf{x}_i\|^2\}}{M_i \sigma_n^2}$$

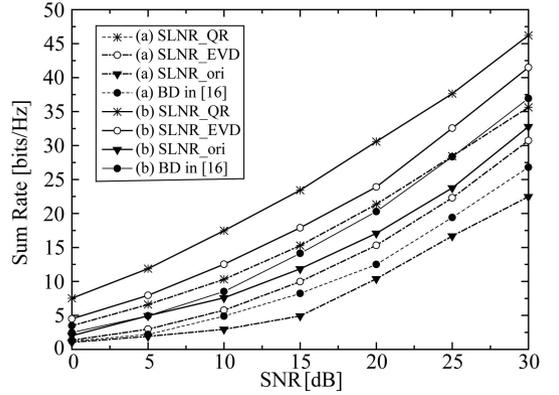


图 2 (6,2,2,2)多用户 MIMO 系统中,不同 OCI 参数配置下预编码算法和速率容量随信噪比(SNR)变化的曲线,其中 (a) $\mathbf{INR} = [10, 10, 10], \mathbf{N}_l = [2, 4, 6]$; (b) $\mathbf{INR} = [10, 0, -10], \mathbf{N}_l = [2, 2, 2]$

Fig. 2 Sum rate versus SNR curves for (6,2,2,2) multiuser MIMO system in the presence of OCI: (a) $\mathbf{INR} = [10, 10, 10], \mathbf{N}_l = [2, 4, 6]$ or (b) $\mathbf{INR} = [10, 0, -10], \mathbf{N}_l = [2, 2, 2]$

在(6,2,2,2)多用户 MIMO 系统中,分别采用了干扰噪声比 $\mathbf{INR} = [10, 10, 10]$ 、等效干扰数 $\mathbf{N}_l = [2, 4, 6]$ 和干扰噪声比 $\mathbf{INR} = [10, 0, -10]$ 、等效干扰数 $\mathbf{N}_l = [2, 2, 2]$ 两种 OCI 参数配置,信噪比变化范围为 0dB ~ 30dB。于是,SLNR_QR 算法、SLNR_EVD 算法、单小区 SLNR 预编码(SLNR_ori)算法^[8]和文献[16]中的分块对角化(BD)算法的系统 and 速率(Sum Rate)容量随信噪比变化曲线如图 2 所示。

由图 2 曲线可以看出:(1)在不同 OCI 参数配置下的全部 SNR 范围内,本文的 SLNR_QR 算法和 SLNR_EVD 算法的性能均优于针对单小区系统的 SLNR_ori 算法^[8],且随着 SNR 的增加,其性能的提升更加明显。由此可见,本文的改进 SLNR 预编码算法能有效抑制小区间干扰(OCI)的影响,使蜂窝多小区通信系统性能得到明显提升。(2)在不同 OCI 参数配置下的全部 SNR 范围内,本文的 SLNR_QR 算法和 SLNR_EVD 算法的性能均优于文献[16]中的 BD 算法。这是因为 BD 算法仅通过接收端的白化滤波器来抑制 OCI 干扰,而本文算法在发送端对白化后的 OCI 进一步进行抑

制,且在预编码设计中综合考虑了同频干扰和有用信号的功率,因此与属于迫零类算法的BD算法相比,本文算法具有更好的鲁棒性。(3)在不同OCI参数配置下的全部SNR范围内,本文SLNR_QR算法的性能优于SLNR_EVD算法。因此,本文SLNR_QR算法在降低计算复杂度的同时,能使系统各用户获得更高的信干噪比(SINR),实现系统性能进一步提升。

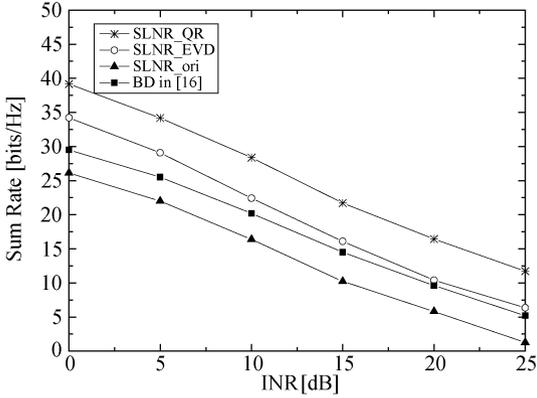


图3 (6,2,2,2)多用户MIMO系统中, $SNR=25\text{dB}$, $N_f=[2,2,2]$ 时,预编码算法和速率容量随干扰噪声比(INR)变化的曲线

Fig.3 Sum rate versus INR curves for (6,2,2,2) multiuser MIMO system, when $SNR=25\text{dB}$ and $N_f=[2,2,2]$

在(6,2,2,2)多用户MIMO系统中,系统信噪比 $SNR=25\text{dB}$,等效干扰数 $N_f=[2,2,2]$,且假定各用户干扰噪声比(INR)相同,INR变化范围为 $0\text{dB} \sim 25\text{dB}$ 。SLNR_QR算法、SLNR_EVD算法、单小区SLNR预编码(SLNR_ori)算法^[8]和文献[16]中的分块对角化(BD)算法的系统速率(Sum Rate)容量随干扰噪声比(INR)变化曲线如图3所示。由图3曲线可以看出,四种预编码算法的和速率容量均随OCI干扰的增加而降低,但本文的SLNR_QR算法和SLNR_EVD算法在全部INR范围内均优于文献[16]中的BD算法和单小区的SLNR_ori算法,其中本文的SLNR_QR算法性能最优。

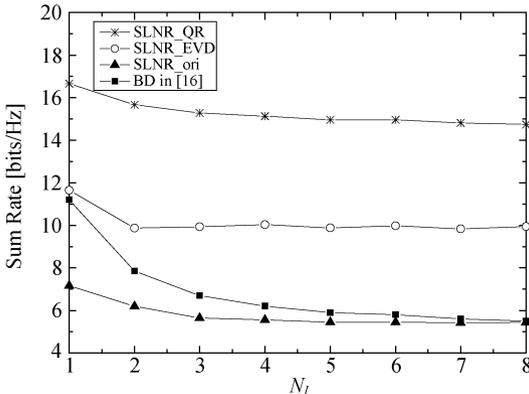


图4 (6,2,2,2)多用户MIMO系统中, $SNR=15\text{dB}$, $INR=[10,10,10]$ 时,预编码算法和速率容量随小区间干扰数 N_f 变化的曲线

Fig.4 Sum rate versus N_f curves for (6,2,2,2) multiuser MIMO system, when $SNR=15\text{dB}$ and $INR=[10,10,10]$

在(6,2,2,2)多用户MIMO系统中,假设各用户的等效干扰个数 $N_{i,k}(k=1, \dots, K)$ 相同,系统信噪比 $SNR=15\text{dB}$,干扰噪声比 $INR=[10,10,10]$ 。小区间干扰个数 N_f 对SLNR_QR算法、SLNR_EVD算法、单小区SLNR预编码(SLNR_ori)算法^[8]和文献[16]中的分块对角化(BD)算法的和速率(Sum Rate)容量的影响如图4所示。由图4曲线可见,随着小区间干扰数 N_f 的增加,四种预编码算法的和速率容量均有所下降,其中分块对角化(BD)算法的和速率容量下降迅速,并且在 N_f 大时其性能与单小区的SLNR_ori预编码算法接近。这是由于分块对角化(BD)算法仅在各用户接收端采用白化滤波器对OCI进行去相关处理,并没有通过预编码对OCI给出进一步的抑制,因此当小区间干扰个数增加、各OCI干扰趋于互不相关时,该算法的性能显著下降。本文的SLNR_QR算法和SLNR_EVD算法由于在预编码矩阵设计中考虑了OCI的影响,在发送端通过预编码设计实现了对用户间干扰和小区间干扰OCI的同步抑制,因此在大 N_f 时本文算法仍可获得良好的性能,并且本文SLNR_QR算法的性能明显优于其他算法。

5 结论

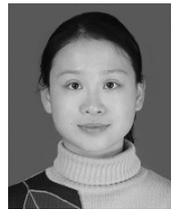
本文针对多小区MIMO无线通信系统,提出了改进的SLNR下行链路预编码算法。该算法在优化目标函数中考虑了白化滤波器的影响,从而实现了预编码算法对用户间干扰和小区间干扰(OCI)的同步抑制消除,有效地降低了小区间干扰(OCI)对系统性能的影响。此外,针对基于SLNR最大化准则的预编码矩阵优化问题,本文基于QR分解提出一种新的低复杂度求解算法,该算法能以较低的优化求解复杂度实现系统性能的进一步提升。仿真实验结果表明,本文方法可有效提高多小区MIMO通信系统性能。

参考文献

- [1] Li, Q., Li, G., Lee, W., Lee, M.-i., D., M., B., C., and Li, Z., MIMO techniques in WiMAX and LTE: a feature overview [J]. IEEE Communications Magazine, 2010. 48(5): 86-92.
- [2] Lee, J., Han, J.-K., and Zhang, J., MIMO technologies in 3GPP LTE and LTE-Advanced [J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2009. 2009(1): 1-10.
- [3] Gesbert, D., Shafi, M., Da-shan, S., Smith, P. J., and Nagnuib, A., From theory to practice: an overview of MIMO space-time coded wireless systems [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2003. 21

- (3): 281-302.
- [4] 肖小潮, 郑宝玉, 许晓荣, 协作 MIMO 中分布式空时编码技术的研究 [J]. 信号处理, 2011. 27 (3): 340-345.
Xiao X., Zheng B., Xu X., Research of distributed space-time coding techniques in Co-MIMO system [J]. Signal Processing, 2011. 27(3):340-345. (in Chinese)
- [5] Spencer, Q. H., Peel, C. B., Swindlehurst, A. L., and Haardt, M., An introduction to the multi-user MIMO downlink [J]. IEEE Communications Magazine, 2004. 42(10): 60-67.
- [6] Spencer, Q. H., Swindlehurst, A. L., and Haardt, M., Zero-forcing methods for downlink spatial multiplexing in multiuser MIMO channels [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2004. 52(2):461-471.
- [7] Schubert, M. and Boche, H., Solution of the multiuser downlink beamforming problem with individual SINR constraints [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2004. 53(1):18-28.
- [8] Sadek, M., Tarighat, A., and Sayed, A. H., A leakage-based precoding scheme for downlink multi-user MIMO channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007. 6(5):1711-1721.
- [9] Tarighat, A., Sadek, M., and Sayed, A. H. A multi user beamforming scheme for downlink MIMO channels based on maximizing signal-to-leakage ratios [C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Pennsylvania, USA, 2005. 1129-1132.
- [10] Windpassinger, C., Fischer, R. F. H., Vencel, T., and Huber, J. B., Precoding in multiantenna and multi-user communications [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2004. 3(4):1305-1316.
- [11] Catreux, S., Driessen, P. F., and Greenstein, L. J., Data throughputs using multiple-input multiple-output (MIMO) techniques in a noise-limited cellular environment [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002. 1(2):226-235.
- [12] Wang, D. and You, X., Data throughputs of noise-limited MIMO cellular systems [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008. 56(5):2165-2170.
- [13] Shamai, S., Somekh, O., and Zaidel, B. M. Multi-cell communications: An information theoretic perspective [C]. Joint Workshop on Communications and Coding. Florence, Italy, 2004.
- [14] Somekh, O., Zaidel, B. M., and Shamai, S., Sum rate characterization of joint multiple cell-site processing [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2007. 53(12): 4473-4497.
- [15] Gesbert, D., Hanly, S., Huang, H., Shamai Shitz, S., Simeone, O., and Wei, Y., Multi-cell MIMO cooperative networks; a new look at interference [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2010. 28 (9):1380-1408.
- [16] Seijoon, S., Jin, K., Heath, R., and Andrews, J., Block diagonalization for multi-user MIMO with other-cell interference [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008. 7(7):2671-2681.
- [17] Jai-Hoon, L., Seokwon, K., Seung-Ri, J., and Dong-Jo, P. A multi-user beamforming scheme in MIMO downlink channels for multi-cell networks [C]. IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE). Las Vegas USA, 2011. 587-588.
- [18] Andrews, J. G., Wan, C., and Heath, R. W., Overcoming interference in spatial multiplexing MIMO cellular networks [J]. IEEE Wireless Communications Magazine, 2007. 14(6): 95-104.
- [19] Wu, Y., Zhang, J., Xu, M., Zhou, S., and Xu, X. Multiuser MIMO downlink precoder design based on the maximal SJNR criterion [C]. IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM'05). St. Louis, Missouri, USA, 2005. 2694-2698.

作者简介



曹颖鸿(1979-),女,博士生,研究方向为通信信号处理、语音处理。
E-mail:cao_yinghong@163.com



陈喆(1975-),男,博士,副教授,主要研究方向为语音处理、阵列信号处理和宽带无线通信技术。
E-mail:eeyin@dlut.edu.cn



殷福亮(1962-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为语音处理、图像处理、阵列信号处理和宽带无线通信技术。
E-mail:flyin@dlut.edu.cn