

多小区 MU-MIMO 系统中基于泄露干扰迫零的 分布式块对角化预编码设计

杨鼎成¹ 何 浩²

(1. 南昌大学信息工程学院, 江西, 南昌, 330031;
2. 江苏省邮电规划设计院有限责任公司, 江苏, 南京, 210006)

摘 要: 该文对多小区 MU-MIMO 中的预编码设计进行了研究。通过将单小区块对角化预编码进行扩展, 将泄漏到邻小区的干扰纳入考虑范围, 采用泄露干扰迫零的块对角化预编码, 利用发送端提供的额外自由度直接将泄露干扰进行子空间迫零, 消除泄露干扰, 并且小区内用户之间也进行子空间迫零, 消除用户间干扰; 从而降低小区间干扰对多用户 MIMO 系统的不利影响。并且对本文所提算法复杂度进行了定量分析, 表明该方案具有较低的计算复杂度。最后通过仿真全面分析了不同参数条件下的系统性能, 结果显示该方法能够提高系统的传输速率。

关键词: 预编码设计; 干扰协调; 多入多出技术; 协作通信; 小区间同信道干扰

中图分类号: TN929.5 文献标识码: A 文章编号: 1003-0530(2013)11-1575-09

Distributed Precoding Design in Multi-cell Multi-user MIMO Network based on Leakage Zero Forcing Block Diagonalization

YANG Ding-cheng¹ HE Hao²

(1. Information Engineering School, Nanchang University, Jiangxi, Nanchang, 330031;
2. Jiangsu Posts & Telecommunications Planning and Designing Institute Co., Ltd, Jiangsu, Nanjing, 210006)

Abstract: This paper considers an optimal precoding design for multi-cell multi-user multiple input multiple output (MIMO) networks. It is proposed to expand block diagonalization method of single cell into multi-cell scenario. Considering the interference leakage to the out-of-cell users, it is proposed to use Leakage Zero Forcing Block Diagonalization method to design the precoding, in which using the extra space freedom degree offered by transmitting side, subspaces spanned by interference channels and other intra-cell users channels are zero-forced. The interference leakage can be suppressed proactively and the intra-cell users interference can be eliminated by the base station (BS), so that the negative factors of the inter-cell interference for the multi-user MIMO system can be decreased. Moreover, the proposed algorithm complexity quantitative analysis shows that the scheme has low computational complexity. Finally, Numerical and simulation results show that this method can greatly improve the transmission rate through a comprehensive simulation analysis of the system performance under different conditions.

Key words: precoding design; interference alignment; multiple input multiple output; Cooperation communication; Inter-cell Co-channel Interference

1 引言

单小区 MIMO 技术经过长期的发展,其巨大的

性能潜力已经被理论和实际所证实,并且已经在新一代的移动通信系统(例如 Wimax, LTE)所采用,作为高速传输的主要手段。然而在蜂窝系统中,特别

收稿日期: 2013-05-17; 修回日期: 2013-08-16

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61250005); 江西省博士后择优资助项目(2013KY07); 江西省科技厅科学基金(20122BAB2111015, 20132BAB211035); 江西省教育厅基金(GJJ13007)

是全频带复用的蜂窝系统中,用户不仅要面对不同数据流间的干扰、多用户用户间干扰和噪声,还要面对邻小区的 MIMO 干扰。文献 [1] 中分析了已知和未知小区间干扰(Inter-Cell Interference, ICI) 信息的情况下的系统中断性能,研究发现收发天线数目越多,性能反而越差,空分复用与系统高负载要求存在严重冲突。因此研究多小区协作的 MIMO 技术,进行小区间的干扰协调成为提高系统吞吐量的关键,其成为了学界的研究热点。

多小区协作中,当基站通过网络彼此连接,并能够共享彼此的数据信息,此时蜂窝系统需要一个控制单元(BSC)来管理和控制各个相连的基站,当基站能够完全获知用户的干扰信息时,通过多小区联合编码能够有效的抑制 ICI。一种容量获得的联合编码即是联合脏纸编码(Joint Dirty Paper Coding, JDPC)^[2-4]。虽然 JDPC 能够获得多用户 MIMO 下行信道的容量,却具有极高的编译码复杂度,在实际系统中难以实现,主要是作为一种理论的性能上界。分块对角化(Block Diagonalization, BD)是一个更加实际的多用户 MIMO 线性预编码方法^[5]。然而传统单小区的 BD 预编码仅考虑消除小区内用户间的干扰,经典的多小区多用户联合编码方案将原有的单小区 MU-MIMO 的 BD 方案进行扩展,不考虑泄露信号对邻小区的干扰影响^[6-7],仅在多小区引入功率控制,一定程度上能够抑制小区间的干扰,但在天线数目不足时,系统性能急剧下降。本文通过将单小区 BD 预编码进行扩展,将泄露到邻小区的干扰纳入考虑范围,通过直接将泄露干扰迫零的干扰迫零分布式 BD 预编码(Leakage Zero Forcing BD, LZ F-BD)方法,利用发送端提供的额外自由度直接将泄露干扰进行子空间迫零,而且小区内用户之间也进行子空间迫零,消除用户间干扰;降低小区间干扰对多用户 MIMO 系统的不利影响,大大提高了系统的吞吐量性能。

2 系统模型

存在一个包含 M 个同频小区的蜂窝系统中,每个小区同时服务的用户数目为 K ,如图 1 所示,则第 m 个小区的第 k 个归属用户 MT_{mk} 的接收信号为

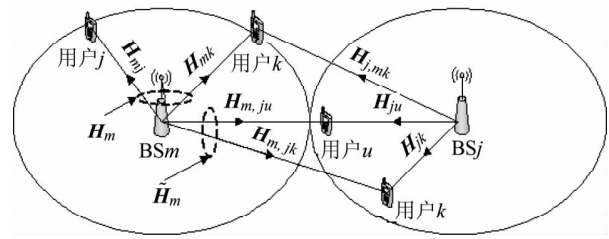


图 1 多小区多用户 MIMO 系统
Fig. 1 Multi-cell multi-user MIMO system

$$y_{mk} = H_{m, mk}x_m + \sum_{j=1, j \neq m}^M H_{j, mk}x_j + n_{mk} \quad (1)$$

式中: $y_{mk} \in C^{n_R \times 1}$ 是用户的接收信号向量; $H_{m, mk} \in C^{n_R \times n_T}$ 是小区 m 到用户 MT_{mk} 的随机信道矩阵,简化表示为 H_{mk} ; $H_{j, mk} \in C^{n_R \times n_T}, j \neq m$ 是小区 j 到用户 MT_{mk} 的随机干扰信道矩阵; $x_m = W_m s_m \in C^{n_T \times 1}$ 是小区 m 的总发射信号向量,当系统采用多用户 MIMO 预编码技术时,其表示 K 个用户的信号叠加,即 $W_m = [w_{m1} \cdots w_{mK}]$ 是小区 m 的 K 个用户总发送预编码矩阵 $s_m = [s_{m1}^T \cdots s_{mK}^T]^T$ 是小区 m 的 K 个归属用户的总的发送信号向量, $w_{mk} \in C^{n_T \times L_{mk}}, s_{mk} \in C^{L_{mk} \times 1}, k=1, \cdots, K$ 分别是小区 m 的归属用户 k 的预编码向量和发送信号向量, L_{mk} 是用户 MT_{mk} 的发送数据流的数目,基站 m 的平均总功率限制为 $E[\text{tr}(x_m x_m^H)] = P$; $n_{mk} \sim \text{CN}(0, \sigma^2 \mathbf{I}_{n_R})$ 是高斯白噪声向量, $n_{mk} \sim \text{CN}(0, \sigma^2 \mathbf{I})$ 是高斯白噪声,小区 m 的发送信号 x_m 是该小区 K 个用户的发送信号的叠加。进一步可以展开为用户独立数据的形式

$$\begin{aligned} y_{mk} &= H_{m, mk} W_m s_m + \underbrace{\sum_{j=1, j \neq m}^M H_{j, mk} W_j s_j}_{\text{ICI}} + n_{mk} \\ &= H_{m, mk} w_{mk} s_{mk} + \underbrace{\sum_{i=1, i \neq k}^K H_{m, mk} w_{mi} s_{mi}}_{\text{ICI}} \\ &\quad + \underbrace{\sum_{j=1, j \neq m}^M \sum_{i=1}^K H_{j, mk} w_{ji} s_{ji}}_{\text{ICI}} + n_{mk} \end{aligned} \quad (2)$$

小区 m 内所有 K 个用户的总接收信号为

$$y_m = H_m x_m + \bar{H}_m \bar{x}_m + n_m \quad (3)$$

式中: $y_m = [y_{m1}^T \ y_{m2}^T \ \cdots \ y_{mK}^T]^T \in C^{Kn_R}$ 是小区 m 的系统接收信号向量, $H_m = [H_{m1}^T \ H_{m2}^T \ \cdots \ H_{mK}^T]^T \in C^{Kn_R \times n_T}$ 是小区 m 到其归属服务用户的随机信道矩阵, $\bar{H}_m = [H_{1, m} \ \cdots \ H_{m-1, m} \ H_{m+1, m} \ \cdots \ H_{M, m}] \in C^{Kn_R \times (M-1)n_T}$ 是归

属于小区 m 的用户受到其他小区干扰的信道,其中 $\mathbf{H}_{j,m} = [\mathbf{H}_{j,m1}^T \cdots \mathbf{H}_{j,mK}^T]^T, j \neq m, j = 1, \dots, M$ 是其他小区到小区 m 的归属用户的干扰信道, $\bar{\mathbf{x}}_m = [\mathbf{x}_1^T \cdots \mathbf{x}_{m-1}^T \mathbf{x}_{m+1}^T \cdots \mathbf{x}_M^T]^T, \mathbf{n}_m \sim \text{CN}(0, \sigma^2 \mathbf{I}_{K n_R})$ 是小区 m 的系统高斯白噪声向量。

小区 m 之外潜在受到基站 m 干扰的用户数目为 \tilde{K} 。基站 m 到这些用户的干扰泄露信道表示为 $\tilde{\mathbf{H}}_m \in \mathbb{C}^{K n_R \times n_T}$ 。

3 干扰迫零分布式 BD 预编码

虽然 BD 多用户预编码有速率损失,但是与 DPC 相比,其编译码复杂度具有较大的优势。而且小区内用户间是正交的,即不存在用户间干扰。因此在多小区 MIMO 蜂窝系统中,BD 只需额外考虑 ICI 即可。

传统的单小区 BD 多用户预编码仅考虑对用户间干扰的抑制,而对邻小区干扰没有做任何处理。然而在多小区蜂窝系统中,用户除了受到噪声的影响,还受到小区间干扰的影响,而小区间干扰与邻小区预编码息息相关。由公式 (2) 可知小区 m 内用户 k 的接收信干噪比(SINR)为

$$\beta_{mk} = \frac{\|\mathbf{H}_{m,mk} \mathbf{w}_{mk} s_{mk}\|^2}{\sum_{i=1, i \neq k}^K \|\mathbf{H}_{m,mk} \mathbf{w}_{mi} s_{mi}\|^2 + \sum_{j=1, j \neq m}^M \sum_{i=1}^K \|\mathbf{H}_{j,mk} \mathbf{w}_{ji} s_{ji}\|^2 + n_R \sigma^2} \quad (4)$$

BD 预编码使得小区内用户间干扰为零, SINR 可以进一步表示为

$$\beta_{mk} = \frac{\|\mathbf{H}_{m,mk} \mathbf{w}_{mk} s_{mk}\|^2}{\sum_{j=1, j \neq m}^M \sum_{i=1}^K \|\mathbf{H}_{j,mk} \mathbf{w}_{ji} s_{ji}\|^2 + n_R \sigma^2} \quad (5)$$

基站做预编码增大用户的有用信号功率和降低对相邻小区的干扰,提高小区内用户的接收 SINR,因此预编码的选择需满足

$$\{\mathbf{W}_1, \dots, \mathbf{W}_M\} = \underset{\mathbf{W}_m \in \mathbb{U}(n_T, L_m)}{\operatorname{argmax}} \beta_{mk}, m = 1 \cdots M, k = 1 \cdots K \quad (6)$$

式中: $\mathbf{W}_m = [\mathbf{w}_{m1} \cdots \mathbf{w}_{mK}]$ 是小区 m 的多用户预编码。

显然每个用户的 SINR 不仅取决于归属小区基站预编码矩阵,还取决于邻小区基站预编码矩阵的

选择。要使得所有小区所有用户的 SINR 都最大化,需要所有小区的预编码矩阵进行联合优化选择。每个小区不能够独立的选择自己的预编码矩阵,其改变不仅会影响自己归属用户的 SINR,还会影响邻小区用户的 SINR。由于各个用户的 SINR 最大化的预编码矩阵集合是相互耦合的,其求解十分困难。通过预编码矩阵的选择降低泄露到邻小区的干扰,就可以将相互耦合的多小区预编码矩阵的选择关系转换为相互独立的关系。一种直观的方法是模仿 BD 预编码方法消除用户间干扰的原理,预编码不仅要消除本小区内用户间干扰,还要消除泄露到邻小区的干扰。小区 m 泄露到邻小区用户的多用户干扰为

$$\mathbf{Y}_m^{\text{Leak}} = \sum_{j=1, j \neq m}^M \sum_{k=1}^K \mathbf{H}_{m,jk} \mathbf{W}_m s_m \quad (7)$$

通过预编码选择将泄露干扰消除,即

$$\left(\sum_{j=1, j \neq m}^M \sum_{k=1}^K \mathbf{H}_{m,jk} \right) \mathbf{W}_m = \mathbf{0} \quad (8)$$

由矩阵理论和线性空间理论,预编码矩阵要满足上述条件,即需要预编码矩阵属于干扰泄露信道 $\sum_{j=1, j \neq m}^M \sum_{k=1}^K \mathbf{H}_{m,jk}$ 的零空间。通过子空间迫零可以消除泄露干扰。小区 m 的干扰泄露信道 $\tilde{\mathbf{H}}_m$ 的 SVD 分解为

$$\tilde{\mathbf{H}}_m = \tilde{\mathbf{U}}_m \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{S}}_m & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} [\tilde{\mathbf{V}}_m^{(1)} \quad \tilde{\mathbf{V}}_m^{(0)}]^H \quad (9)$$

式中: $\tilde{\mathbf{S}}_m$ 是有非零奇异值构成对角元素的对角矩阵; $\tilde{\mathbf{V}}_m^{(1)}$ 是非零奇异值对应的右奇异向量; $\tilde{\mathbf{V}}_m^{(0)}$ 是零奇异值对应的右奇异向量,即是干扰泄露信道的零空间。于是得到预编码矩阵为

$$\mathbf{W}_m = \tilde{\mathbf{V}}_m^{(0)} \quad (10)$$

同时在小区内,多用户预编码 $\mathbf{W}_m = [\mathbf{w}_{m1} \cdots \mathbf{w}_{mK}]$ 还要保证消除用户间干扰,即

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{H}}_m \mathbf{w}_{mk} &= \mathbf{0} \\ \mathbf{H}_{mj} \mathbf{w}_{mk} &= \mathbf{0}, j \neq k, 1 \leq j, k \leq K \end{aligned} \quad (11)$$

所以小区 m 的用户 k 的预编码除了要消除用户间干扰,也要消除泄露干扰,令 $\hat{\mathbf{H}}_{mk} = [\mathbf{H}_{m1}^T \cdots \mathbf{H}_{m(k-1)}^T \mathbf{H}_{m(k+1)}^T \cdots \mathbf{H}_{mK}^T]^T$ 表示小区 m 的归属用户 k 之外的其他归属用户的信道,称之为用户 k 的互补信道。

即需满足

$$\begin{aligned} \mathbf{w}_{mk} &\in U(n_T, L_{mk}) \\ \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{H}}_m \\ \hat{\mathbf{H}}_{mk} \end{bmatrix} \mathbf{w}_{mk} &= \mathbf{0} \quad 1 \leq k \leq K \end{aligned} \quad (12)$$

\mathbf{w}_{mk} 只需处于 $\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{H}}_m \\ \hat{\mathbf{H}}_{mk} \end{bmatrix}$ 的零空间即可, 显然零空间的存

在需要满足条件

$$n_T > \text{rank} \left(\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{H}}_m \\ \hat{\mathbf{H}}_{mk} \end{bmatrix} \right) \quad (13)$$

式中: $\text{rank}(\cdot)$ 表示矩阵的秩。

与单小区 BD 预编码相似, 将用户的预编码功能分为两个部分 $\mathbf{w}_{mk} = \mathbf{G}_{mk} \mathbf{v}_{mk}$, 则

$$\mathbf{G}_{mk} = \text{null} \left(\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{H}}_m \\ \hat{\mathbf{H}}_{mk} \end{bmatrix} \right) \quad (14)$$

式中: $\text{null}(\cdot)$ 表示矩阵的零空间, 这里可以取其零奇异值对应的右奇异向量作为零空间。如此, 则多小区多用户系统就会退化为单小区单用户系统

$$\mathbf{H}_S = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{m1} \mathbf{G}_{m1} & \cdots & \mathbf{0} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{H}_{mK} \mathbf{G}_{mK} \end{bmatrix} \quad (15)$$

系统容量就会和单小区容量具有一致性

$$C_{LZF-BD} = \max_{\mathbf{W}_S} \log_2 \det \left(\mathbf{I} + \frac{1}{\sigma^2} \mathbf{H}_S \mathbf{W}_S \mathbf{W}_S^H \mathbf{H}_S^H \right) \quad (16)$$

式中: $\mathbf{W}_S = \text{diag}(\mathbf{v}_{m1} \cdots \mathbf{v}_{mK})$ 。按照单用户 MIMO 方法可以得到优化预编码 \mathbf{v}_{mk} 为

$$\mathbf{v}_{mk} = \text{eigvec}(\mathbf{H}_{mk} \mathbf{G}_{mk}) \quad (17)$$

式中: $\text{eigvec}(\cdot)$ 表示矩阵的特征向量, 这里既是非零奇异值对应的右奇异向量。如此, 小区内用户间干扰和邻小区泄露干扰完全被消除, 用户 k 的接收信号为

$$\mathbf{y}_{mk} = \mathbf{H}_{m, mk} \mathbf{w}_{mk} s_{mk} + \mathbf{n}_{mk} \quad (18)$$

用户 k 的 SINR 变为

$$\beta_{mk} = \frac{\|\mathbf{H}_{m, mk} \mathbf{w}_{mk} s_{mk}\|^2}{n_R \sigma^2} \quad (19)$$

系统容量进一步表示为

$$C_{LZF-BD} = \max_{\mathbf{A}: \text{tr}(\mathbf{A}) \leq P} \log_2 \det \left(\mathbf{I} + \frac{1}{\sigma^2} \mathbf{S}^2 \mathbf{A} \right) \quad (20)$$

式中: $\mathbf{S} = \text{diag}(S_{m1} \cdots S_{mK})$, S_{mk} 是由等效信道 $\mathbf{H}_{mk} \mathbf{G}_{mk}$ 的奇异值组成的对角矩阵; \mathbf{A} 是多用户功率分配对角矩阵。在总功率 P 约束下, 通过在 \mathbf{S} 的对角元素上进行注水功率分配, 就可以得到优化的功率分配矩阵 \mathbf{A} 。若采用等功率分配, 则 \mathbf{A} 的对角元素相等, 且其总和为 P 。

显然要能够完全消除发送天线必须能够提供足够的自由度, 即在完全消除小区内用户间干扰之后, 剩余的自由度足够用于消除泄露邻小区干扰, 即要满足条件

$$n_T - \text{rank}(\mathbf{H}_m) \geq \text{rank}(\tilde{\mathbf{H}}_m) \quad (21)$$

由此可知, 要能够完全消除邻小区泄露干扰, 基站必须配置足够数量的天线, 以提供足够的干扰消除自由度。当剩余自由度不足时, 简单的方法是仅选择强干扰信道进行迫零, 或是仅对泄露干扰信道的主特征向量进行迫零。

4 复杂度分析

在进行复杂度比较之前, 先介绍经典的多小区 MU-MIMO 的预编码方案: 其主要思想是将单小区 BD 算法进行扩展, 并考虑每基站功率限制。其目标函数可以简写为:

$$\begin{aligned} C_{MC-BD}^{PBPC}(\bar{A}) &= \max_{\mathbf{Q}_i \geq \mathbf{0}, \text{tr}(\sum_{i \in \bar{A}} \mathbf{w}_i \mathbf{Q}_i \mathbf{w}_i^H) \leq P_m, m=1, \dots, M, i \in \bar{A}} \sum_{i \in \bar{A}} \log_2 \\ &\left| \mathbf{I} + \frac{1}{\sigma^2} \mathbf{H}_i \mathbf{W}_i \mathbf{Q}_i \mathbf{W}_i^H \mathbf{H}_i^H \right| \end{aligned} \quad (22)$$

其中 \bar{A} 是调度用户集合, $\mathbf{Q}_i = E[s_i s_i^H]$, P_m 是基站 m 的最大功率。为简单起见, 此处使用常用的等功率分配

$$\mathbf{Q}_i = q \mathbf{I}, q = \min_{m=1, \dots, M} \frac{P_m}{\|\mathbf{w}_{1m} \cdots \mathbf{w}_{\text{card}(\bar{A})M}\|^2} \quad (23)$$

其中 $\|\cdot\|_F$ 是 Frobenius norm。

在一个包含 M 个小区的蜂窝系统, 每个基站配置 n_T 个发送天线, 每个用户配置 n_R 个接收天线, 每个小区复用的用户数目为 K 。要使得 LZF-BD 满足维度条件, 即需要 $n_T \geq MKn_R$, 这里直接将系统总用户数目设为 $MK = \lceil n_T/n_R \rceil$ 。在某一个小区之外的用户数目为 $\bar{K} = (M-1)K$ 。

对于 LZF-BD 来说, 其关键点是要求得干扰信道的零空间。以小区 m 用户 k 为例, 小区 m 对小区外 \bar{K} 个用户的干扰信道 $\tilde{\mathbf{H}}_m \in \mathbb{C}^{\bar{K} \times n_R \times n_T}$, 小区内用户 k 的互补

信道 $\hat{H}_{mk} \in C^{(K-1)n_R \times n_T}$ 。通过将 $[\hat{H}_{mk}^H \hat{H}_m^H]^H \in C^{(\bar{K}+K-1)n_R \times n_T}$ 进行 SVD 分解求得零空间 $G_{mk} \in C^{n_T \times (n_T - (\bar{K}+K-1)n_R)}$ 。

对于经典多小区 MU-MIMO 预编码来说,其关键点与单小区 BD 预编码相同,即获得其他用户联合多小区信道的零空间。

对于一个复数矩阵 $H \in C^{m \times n}$,假定 $m \leq n$,其矩阵操作的复杂度如表 1 所示^[8-9]。因此 LZF-BD 及经典多小区 MU-MIMO 算法的复杂度可以由表 2 及表 3 计算得到。

表 1 矩阵计算复杂度

Tab. 1 The complexity degree of matrix computation

矩阵计算	复杂度 (FLOP)
矩阵的 Frobenius 范数, $\ H\ _F^2$	$4mn$
Gram-Schmidt 正交化 (GSO), GSO(H)	$8m^2n - 2mn$
n 个特征模式上的 waterfilling	$2n^2 + 6n$
复数矩阵 SVD 分解 ($m \leq n$)	$24mn^2 + 48m^2n + 54m^3$
矩阵相乘 $T \in C^{n \times p}, HT$	$8mp$
复数矩阵 $A \in C^{n \times n}$ 求逆 A^{-1}	$16n^3 - 8n^2 + 2n$

表 2 LZF-BD 复杂度

Tab. 2 The complexity degree of LZF-BD

矩阵操作	复杂度 (FLOP)
$SVD\left(\begin{bmatrix} \hat{H}_m \\ \hat{H}_{mk} \end{bmatrix}\right)$	$24(\bar{K}+K-1)n_R n_T^2 + 48(\bar{K}+K-1)^2 n_R^2 n_T + 54(\bar{K}+K-1)^3 n_R^3$
$H_{mk} G_{mk} \in C^{n_R \times (n_T - (\bar{K}+K-1)n_R)}$	$8n_R n_T (n_T - (\bar{K}+K-1)n_R)$
$SVD(H_{mk} G_{mk})$	$24n_R (n_T - (\bar{K}+K-1)n_R)^2 + 48n_R^2 (n_T - (\bar{K}+K-1)n_R) + 54n_R^3$
注水功率分配	$2(Kn_R)^2 + 6Kn_R$

表 3 经典多小区 MU-MIMO 预编码方案复杂度

Tab. 3 The complexity degree of Classic solution of Multi-cell Multi-user MIMO Precoding

矩阵操作	复杂度 (FLOP)
$SVD(\hat{H}_k), \hat{H}_k \in C^{(MK-1)n_R \times Mn_T}$	$24(MK-1)n_R M^2 n_T^2 + 48(MK-1)^2 n_R^2 M n_T + 54(MK-1)^3 n_R^3$
$H_{mk} \hat{w}_{mk} \in C^{n_R \times n_R}$	$8n_R^2 n_T$
$SVD(H_{mk} \hat{w}_{mk})$	$126n_R^3$
等功率分配	$4M^2 Kn_R n_T$

得到包含 K 个用户的 LZF-BD 算法的复杂度为

$$\begin{aligned} \varphi_{LZF-BD} = & (8K+24K^2M)n_R n_T^2 \\ & + (48K^3M^2 - 152K^2M + 152K)n_R^2 n_T \\ & + (-138K^3M^2 + 54M^3K^4 + 66K^2M + 72K) \\ & n_R^3 + 2n_R^2K^2 + 6n_RK \end{aligned} \quad (24)$$

单小区 BD 算法可以视为 LZF-BD 的一种特例,即 $M=1$ 的情况,其复杂度为

$$\begin{aligned} \varphi_{BD} = & (8K+24K^2)n_R n_T^2 + (48K^3 - 152K^2 + 152K)n_R^2 n_T \\ & + (-138K^3 + 54K^4 + 66K^2 + 72K)n_R^3 + 2n_R^2K^2 + 6n_RK \end{aligned} \quad (25)$$

经典的多小区 MU-MIMO 预编码视为具有更多发射天线和用户的单小区 BD 算法,且其复杂度为

$$\begin{aligned} \varphi_{MC-BD} = & [24MK(MK-1)M^2]n_R n_T^2 \\ & + [48M^2K(MK-1)^2 + 8MK]n_R^2 n_T + 4M^2Kn_R n_T \\ & + 54MK(MK-1)^3 n_R^3 + 126MKn_R \end{aligned} \quad (26)$$

可以看出本文所题算法较经典的多小区 MU-MIMO 预编码方案有更低的计算复杂度,更易于实际的工程实现。

5 性能仿真与分析

首先通过建立一个简单的系统考察干扰对多用户系统的影响。虽然四小区线性环状维纳模型^[7]与传统的线性方式具有等价性^[10-11],但是每个小区的用户只受到相邻小区的干扰,系统模型可以进一步简化为包含两个小区相互干扰的线性维纳模型。每个基站配置 n_T 个发送天线,每个小区包含 K 个用户,每个用户配置 n_R 个接收天线,假设每个用户发送的数据流数目相同,都为 L 。小区 m 的归属用户的信道 H_m 的单元是均值为 0 方差为 1 的独立同分布循环对称复高斯随机变量,即使得大尺度衰落归一化使得 $H_m \sim CN(0, I)$ 。干扰信道 \bar{H}_m 的单元是均值为 0 方差为 ρ^2 的独立同分布循环对称复高斯随机变量,即使用小区 m 的大尺度衰落进行归一化使得 $\bar{H}_m \sim CN(0, \rho^2 I)$ 。 ρ 即表示干扰因子^[12-13]指示邻小区干扰的相对强弱。各个小区的发送总功率与用户的噪声之比即发送信噪比为 15dB。为简单起见,小区内用户之间采用等功率分配方法。

选取相邻小区间采用正交传输,非协作传输及经典的多小区 MU-MIMO 预编码方案作为性能的参考算法。正交传输通过降低频率复用因子,使得小区间无小区间干扰;非协作传输则是信号发送时不考虑邻小区干扰,基站按照单小区 MU-MIMO 计算预编码矩阵发送用户数据。

首先仿真不同发射天线数目下每个小区的平均和速率的性能。如图 2-a 用户配置单天线,图 2-b 用户配置双天线,它们具有相似的趋势。由仿真图可见,增加发射天线数目,LZF-BD 拥有更多的自由度用于干扰抑制。由于干扰得到有效的抑制,系统性能得到极大的提高。而对于非协作传输,增加天线数目能够提高更多的分集增益,提高信号有用功率,因此在天线数目较多时,其性能能够超过正交传输。当发送天线数目减少时,LZF-BD 没有足够的自由度用于干扰抑制,其性能恶化更加严重,甚至低于正交传输。在天线数目不足时,小区间干扰的影响更大,正交传输不存在 ICI,其性能会超过非协作传输。经典的多小区 MU-MIMO 预编码方案在天线数目不足时,由于无法较好的抑制干扰,其性能受到严重下降,当天线数目增加时,系统拥有足够的自由度区分不同用户,通过联合编码,其性能将显著提升,并在天线数目足够多时,其性能甚至超过本文所提算法。

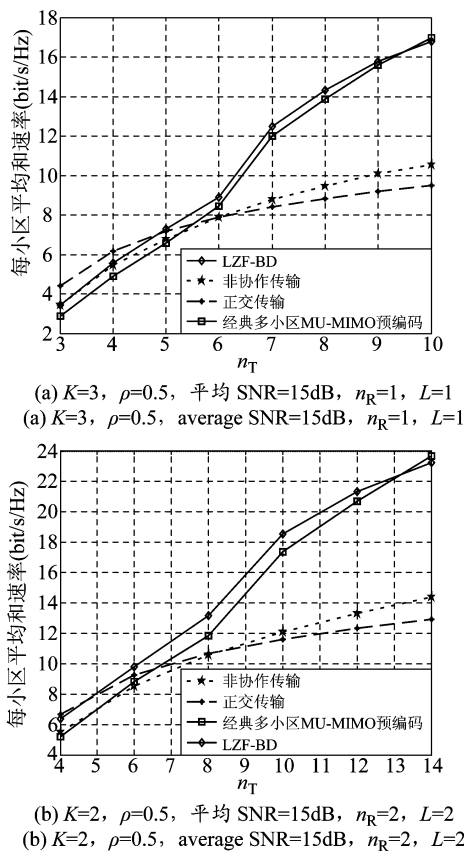


图 2 不同发射天线数目下小区平均和速率

Fig. 2 The average total rate of the cells under different number of transmit antennas

接着考察不同干扰大小下每个小区平均和速率的性能。如图 3 所示,由于正交传输不存在 ICI,因此其性能与干扰大小无关。LZF-BD 能够完全消除泄露干扰,因此其性能也与干扰大小无关。经典的多小区 MU-MIMO 预编码方案通过多天线的空间冗余度和小区间的功控来抑制小区间的干扰,可以看出具有一定的作用,由于未将泄漏邻小区的干扰进行迫零操作,其干扰抑制效果不如本文所提算法。而非协作传输受干扰大小的影响十分大,随着干扰的增大,其系统传输速率也随之下降。在干扰较小时,非协作传输将全部发送天线都用于传输目标用户的信号,其具有更高的功率增益和分集增益,因此其性能超过正交传输和 LZF-BD。在干扰较大时,非协作传输的性能恶化十分严重,此时接收端天线数目和检测方法至关重要。

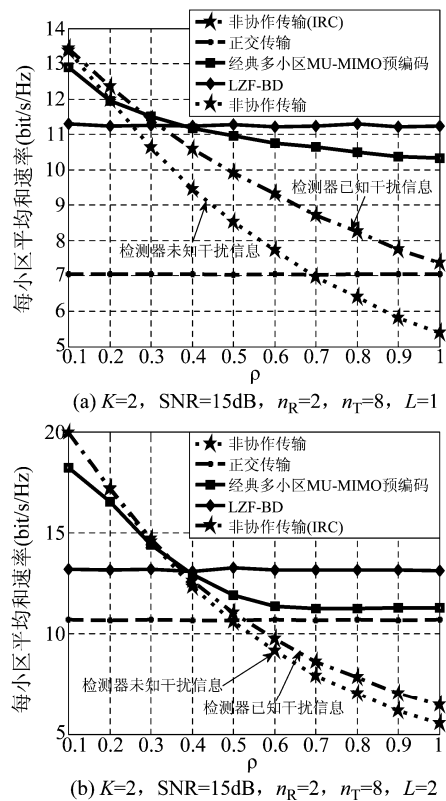


图 3 不同干扰强度下小区平均和速率

Fig. 3 The average total rate of the cells under different interference intensities

图 4 仿真了不同 SNR 下每个小区平均和速率的性能。当 SNR 较小时,噪声的影响要大于干扰的影响,此时将更多的空间自由度用于发送目标用户的信号,系统性能将更好。正交传输和 LZF-BD 基

本不受干扰的影响,随着 SNR 的提高,这两种方法的传输速率也随之提高。而且随着 SNR 的进一步提高,正交传输受限于频率复用,LZF-BD 带来的增益将会超过正交传输。当 SNR 较高时,噪声的影响要小于干扰的影响,非协作传输与经典的多小区 MU-MIMO 预编码方案的性能将不会进一步的提高,而会出现一个瓶颈。与此相反,其他传输方法不受干扰影响或是受干扰影响较小,随着 SNR 的提高,它们的性能会进一步提升。

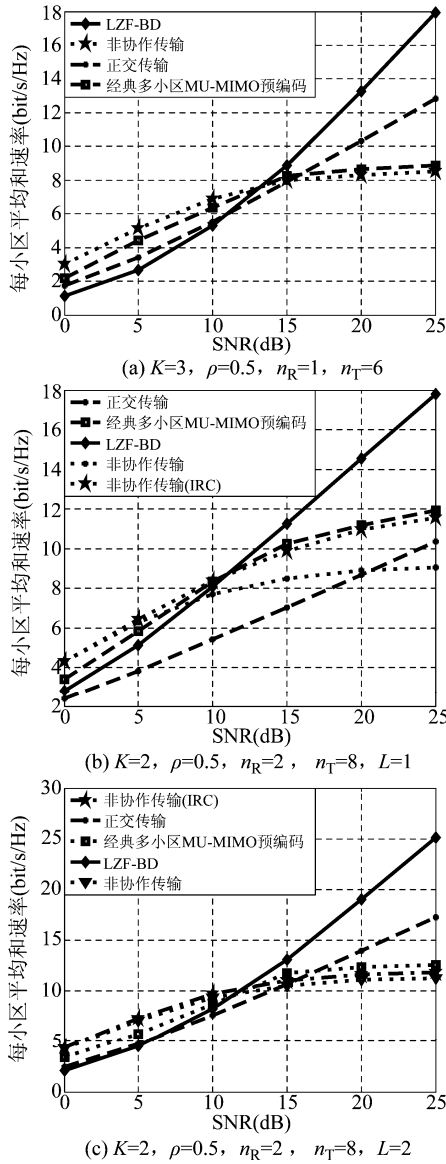


图 4 不同 SNR 下小区平均和速率

Fig. 4 The average total rate of the cells under different SNR

以上仿真评估了不同参数对算法性能的影响。然而在蜂窝系统中,传播环境更为复杂。用户的位置不同,其平均 SNR 也不同,所受到的 ICI 大小也不同。接下来我们对这些因素进行综合仿真考察,评估系统速率累计分布曲线。

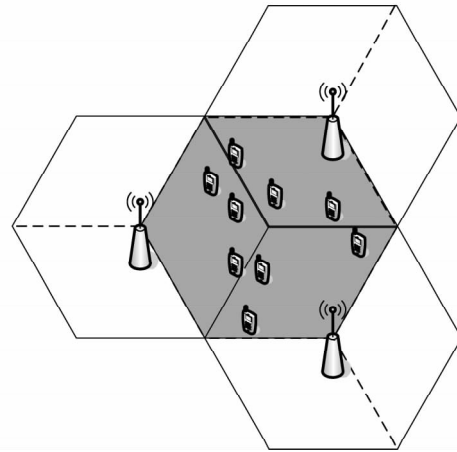


图 5 三小区拓扑结构

Fig. 5 Topology of three cells

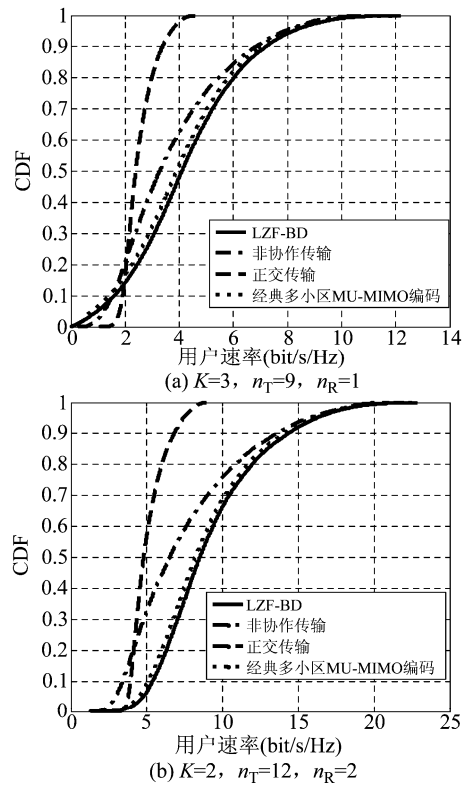


图 6 用户速率分布 (无阴影衰落)

Fig. 6 The cumulative distribution figure of users' rates (Excluding shadow fading)

假设用户均匀散落于小区内,如图 5 所示。损耗模型采用文献 [14] 中的模型,损耗随距离变化的关系 $g(d) = \beta_0 d^{-\eta}$, 其中 $\beta_0 = 1.35 \times 10^7$, $\eta = 3$, 相邻基

站的距离为 500 米。对数阴影衰落 y 为均值为零, 方差为 8dB。总发送总功率与噪声之比为 15dB, 用户间等功率分配, 用户配置 n_R 个接收天线, 基站配置 n_T 个发送天线, 每个小区 K 个用户复用在相同的时频资源上。

图 6 仿真了路损大尺度衰落下, 用户均匀分布于小区内, 不同用户位置的速率累计分布 (CDF)。由图可见, 以图 6-a 用户配置单天线为例, 在 50% 速率点, LZF-BD 相对于正交传输和非协作传输及经典的多小区 MU-MIMO 预编码方案分别有 70%, 25% 及 8% 的性能增益, 而在 90% 速率点, 用户所受干扰较小, 可以认为这些用户处于小区中心, 因此非协作传输及经典多小区 MU-MIMO 预编码方案的性能接近 LZF-BD 的性能, 而此时对于正交传输, 由于频率重用降低了可用带宽, 用户速率下降较大。

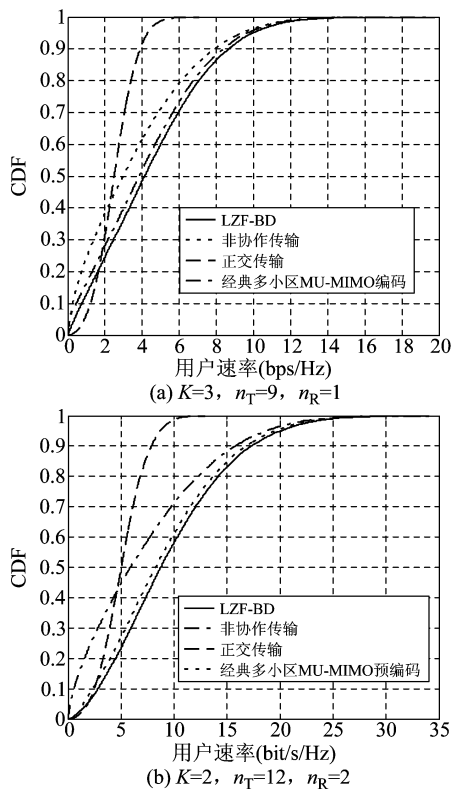


图 7 用户速率分布(包含阴影衰落)

Fig. 7 The cumulative distribution figure of users' rates (Including shadow fading)

图 7 仿真了带有阴影衰落和路径损耗的大尺度衰落, 其性能也具有相似的结果。增加阴影衰落, 信道的波动更加剧烈, 干扰的波动也更加剧烈。由图 7-a 中可见, 在 50% 速率点, LZF-BD 相对于正

交传输、非协作传输及经典多小区 MU-MIMO 预编码方案分别有 65%、38%、7% 的性能增益。在 10% 速率点, 正交传输的性能要好于非协作传输, LZF-BD 及经典的多小区联合编码方案, 这主要是因为正交传输不受干扰的影响, 而其他方案均受天线数目及 ICI 的影响。当用户配置双天线时, 情况与单天线的情况类似, 如图 6-b 和图 7-b, 只是此时 LZF-BD 的增益更为明显。

6 结论

本文针对多小区 MU-MIMO 的预编码矩阵设计进行了研究。采用分布式设计思想, 通过将单小区多用户 BD 预编码进行扩展, 将泄漏到邻小区的干扰纳入考虑范围, 采用泄露干扰迫零的分布式 BD 预编码 (Leakage Zero Forcing BD, LZF-BD) 方法, 利用发送端提供的额外自由度设计块对角化预编码, 直接将泄露干扰进行子空间迫零, 消除泄露干扰, 达到消除 ICI 的目的。而且小区内用户之间也进行块对角化的子空间迫零, 消除用户间干扰, 接着对本文所提算法进行了复杂度分析, 显示该算法能够降低移动终端的复杂度。最后通过仿真全面分析了不同参数条件下的系统性能, 仿真曲线显示该方法在典型应用场景下能够极大的提高系统的传输速率。

参考文献

- [1] J. G. Andrews, W. Choi and R. W. Heath, Overcoming interference in spatial multiplexing MIMO cellular networks [J]. IEEE Wireless Communications, 2007, 14 (6): 95-104.
- [2] A. Goldsmith, S. A. Jafar, N. Jindal, S. Vishwanath, Capacity limits of MIMO channels [J]. IEEE Journal on selected areas in communications, 2003, 21(5): 684-702.
- [3] T. Le-Nam, M. Juntti, M. Bengtsson, etc, Weighted Sum Rate Maximization for MIMO Broadcast Channels Using Dirty Paper coding and Zero-forcing Methods [J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61 (6): 2362-2373.
- [4] T. Le-Nam, M. Juntti, M. Bengtsson, etc, Beamformer Designs for MISO Broadcast Channels with Zero-Forcing Dirty Paper coding [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(3): 1173-1185.
- [5] S. Shim, J. S. Kwak, R. W. Heath and J. G. Andrews,

Block Diagonalization for Multi-User MIMO with Other-cell interference [J]. IEEE Transactions on wireless communications ,2008 ,7(7) :2671-2681.

[6] N. Ravindran ,N. Jindal. Limited feedback-based block diagonalization for the MIMO broadcast channel [J]. IEEE Journal of selected area of communications ,2008 ,26(8) :1473-1482.

[7] W. Ho ,Q. S. Tony ,S. Sun and R. W. Heath ,Decentralized precoding for multicell MIMO Downlink [J]. IEEE Transactions on wireless communications ,2011 ,10(6) :1798-1809.

[8] Z. Shen ,R. Chen ,J. G. Andres ,R. W. Heath and B. L. Evans , Low complexity user selection algorithm for multiuser MIMO systems with block diagonalization [J]. IEEE Transactions on Signal Processing ,2006 ,54(9) :3658-3663.

[9] C. D Meyer , Matrix Analysis and applied Linear Algebra [M]. Philadelphia: SIAM ,2000.

[10] S. Jing , D. N. C. Tse , J. B. Soriaga , J. Hou , J. E. Smeed and R. Padovani , Multicell downlink capacity with coordinated processing [J]. EURASIP J. wireless Commun. Netw. ,2008 8(2) :1-19.

[11] O. Somekh , O. Simeone , Y. Bar-Ness , A. M. Haimovich and S. Shamai , Cooperative multicell zero-forcing beamforming in cellular downlink channels [J]. IEEE Trans. Inf. Theory ,2009 ,55(7) :3206-3219.

[12] B. L. Ng ,J. S. Evans ,S. V. Hanly and D. Aktas , Dis-

tributed downlink beamforming with cooperative base stations [J]. IEEE Trans. Inf. Theory ,2008 ,54(12) :5491-5499.

[13] 曹颖鸿,陈喆,殷福亮,多小区 MIMO 系统中基于泄露的多用户下行链路预编码新算法 [J]. 信号处理 ,2012 28(3) :315-321.
Y. H. Cao ,Z. Chen ,F. L. Yin , A Novel Leakage-based precoding scheme for Multi-cell Multi-user MIMO system downlink [J]. Signal Processing ,2012 ,28(3) :315-321. (in chinese)

[14] T. S. Rappaport , Wireless communications: principles and practice [M]. Englewood Cliffs ,Prentice-Hall ,1996

作者简介



杨鼎成 男,1985 年 9 月生,江西宜春人,毕业于武汉大学获理学博士学位,现任南昌大学信息工程学院副教授,主要研究方向为协作通信,多天线技术,多用户 MIMO,无线资源管理等。

E-mail: yangdingcheng@ncu.edu.cn



何浩 男,1984 年 12 月生,湖北武汉人,毕业于武汉大学获工学博士学位,现任江苏省邮电规划设计院高级项目主办,主要研究方向为无线通信,多天线技术,多用户 MIMO,干扰管理等。

E-mail: haohe@whu.edu.cn