

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2013.08.008

基于块对角化的格基规约 GMD 矢量预编码*

耿 烜**,孙作雷,刘 锋,刘 坤

(上海海事大学 信息工程学院,上海 201306)

摘要:研究了对多用户多输入多输出下行链路进行块对角化后,使用格基规约算法的几何均值分解矢量预编码的实现方法。根据块对角化思想将多用户多天线信道分解为等价并行子信道,基于等价子信道给出了单个用户的几何均值分解矢量预编码的传输方案,通过使用格基规约算法分别结合连续干扰消除和垂直分层空时编码两种方法,求解矢量预编码中的扰动矢量。仿真表明,提出的方法误码率性能优于块对角化矢量预编码算法 2 dB 以上,而且能在不降低系统性能的前提下降低计算复杂度。

关键词:多输入多输出;块对角化;几何均值分解;格基规约;矢量预编码

中图分类号:TN911.72 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2013)08-1012-06

Lattice Reduction GMD Vector Precoding Based on Block Diagonalization

GENG Xuan, SUN Zuo-lei, LIU Feng, LIU Kun

(Institute of Information Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Based on the block diagonalization (BD) for multiuser Multiple-input Multiple-output (MIMO) downlink channel, a vector precoding (VP) combined with geometric mean decomposition (GMD) based on lattice reduction (LR) algorithm is studied. The multi-user multi-antenna channel is decomposed into parallel effective sub-channels, and then a GMD VP transmission scheme for single user is presented based on the above effective sub-channel. The LR algorithm combined with successive interference cancellation (SIC) and Vertical Bell Laboratories Layered Space-Time (VBLAST) is exploited, so that the perturbation vector is obtained. Simulation results show that the bit error rate (BER) of proposed method outperforms that of block diagonalized vector precoding at least 2dB, and the LR algorithm can reduce the computation complexity with the same system performance.

Key words: MIMO; block diagonalization; geometric mean decomposition; lattice reduction; vector precoding

1 引言

多用户多输入多输出 (Multiple-input Multiple-output, MIMO) 下行链路系统在基站端能够同时向多个用户发射信号,实现空分多址复用,提高系统的容

量,因此是近年来的研究热点^[1]。理论分析表明,使用脏纸编码 (Dirty Paper Coding, DPC) 可以达到广播信道的容量边界,但是其实现复杂度过高,难以在实际中应用。为了降低 DPC 算法复杂度,并且适用于多用户 MIMO 下行链路系统,文献[2]首先提出了块对角化 (Block Diagonalization, BD) 的思想,将单用户

* 收稿日期:2013-01-23;修回日期:2013-04-26 Received date:2013-01-23;Revised date:2013-04-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61105097,61271283);交通部应用基础研究项目(2012319810190);上海市教委科研创新项目(13YZ081);上海海事大学基金项目(20120107)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China(No.61105097,61271283); Basic Research Projects of Ministry of Transport (No.2012319810190); Innovation Program of Shanghai Municipal Education Commission (13YZ081); Science & Technology Program of Shanghai Maritime University (No.20120107)

** 通讯作者: xuangeng@shmtu.edu.cn Corresponding author: xuangeng@shmtu.edu.cn

预编码矩阵置于其他用户信道矩阵的零空间中,使得多用户信道等价变为块对角化结构,形成独立并行的若干个等效子信道,从而达到多用户间干扰消除的目的。虽然 BD 方法能够降低预编码的复杂度,但是其可达容量界与 DPC 仍然存在较大的差距,因此需要将 BD 算法与其他预编码算法相结合,以提高信道容量,并且整体复杂度仍然低于 DPC 算法。

矢量预编码(Vector Precoding, VP)是一种通过加入扰动矢量而改变发送数据特性的编码方法^[3-5],它是传统汤姆林森-哈拉希玛预编码(Tomlinson-Harashima Precoding, THP)的扩展,其主要思想是在扩展星座图上求解扰动矢量,再把扰动矢量叠加到原有信号上,从而扩大发射信号的自由度,减小发射信号功率。在单用户系统中,如果将矢量预编码与几何均值分解(Geometric Mean Decomposition, GMD)相结合,能够使收发端处理矩阵协作优化,提高系统性能^[6]。几何均值分解能够将信道矩阵分解为具有相同对角元素值的上三角矩阵^[7],其对角元素值等于信道矩阵特征值的几何均值,因此对应的子信道可以获得相同的增益,而不需要灌水算法进行功率分配,与矢量预编码相结合可以提高预编码的分集增益。

虽然几何均值分解矢量预编码能够获得较好的性能,但是以上文献^[3-7]提出的各类方法只适用于单用户场景,并不适用于多用户场景。因此,文献[8]和[9]分别提出了迫零准则下和最小均方误差准则(Minimum Mean Square Error, MMSE)下基于块对角化的矢量预编码方法,可以将矢量预编码扩展到多用户场景中。基于这种思想,本文提出了基于块对角化的几何均值矢量预编码实现方案,首先通过块对角化处理将多用户信道分解为块对角化结构的等价子信道,每个子信道对应一个单接收用户,然后对单用户实现几何均值矢量预编码方案。接着,为了降低求解扰动矢量的复杂度,进一步使用格基规约算法提高等价子信道的正交特性^[10],在格基规约的基础上分别通过连续干扰消除(Successive Interference Cancellation, SIC)和垂直分层空时编码(Vertical Bell Laboratories Layered Space-Time VBLAST)^[11]两种处理方法求解扰动矢量,使得计算复杂度降低到多项式级别。仿真表明,提出的基于块对角化的格基规约几何均值矢量预编码在不降低系统性能的前提下,能够显著降低计算复杂度,同时性能优于传统的块对角化矢量预编码算法。

2 多用户下行链路系统

2.1 系统模型

假设多用户 MIMO 下行链路系统中包含 K 个独立用户,每个用户有 $N_{r,k}$ 根接收天线,因此总接收天线数目为 $N_r = \sum_{k=1}^K N_{r,k}$ 。基站端配有 N_t 根发射天线,每个用户的发射码流数目为 $L_k (L_k \leq N_{r,k})$,则总码流数为 $L_t = \sum_{k=1}^K L_k (L_t \leq N_r)$,不失一般性,后文假设 $L_k = N_{r,k}$,并且使用符号 $\{N_{r,1}, \dots, N_{r,K}\} \times N_t$ 表示系统用户接收、基站发射天线的结构。信道模型假设为平坦衰落信道,其元素取自独立同分布的高斯分布 $N_c(0, 1)$ 。当发射信号经过信道之后,第 k 个用户的接收信号假设为 $\mathbf{y}_k[n]$,那么总的用户接收信号为 $\mathbf{y}[n] = [\mathbf{y}_1^H[n] \mathbf{y}_2^H[n] \dots \mathbf{y}_K^H[n]]^H$,并且表示为

$$\mathbf{y}[n] = \mathbf{H}\mathbf{F}\mathbf{x}[n] + \mathbf{w}[n], n = 1, 2, \dots, N_B \quad (1)$$

式中, $\mathbf{H} = [\mathbf{H}_1^H \mathbf{H}_2^H \dots \mathbf{H}_K^H]^H$ 表示发射天线到所有用户的信道矩阵,其中 $\mathbf{H}_k \in \mathcal{C}^{N_{r,k} \times N_t}$ 表示发射天线到第 k 个用户的信道矩阵,其元素满足独立同分布的高斯分布 $N_c(0, 1)$; $\mathbf{F} = [\mathbf{F}_1 \mathbf{F}_2 \dots \mathbf{F}_K]$ 和 $\mathbf{x}[n] = [\mathbf{x}_1^H[n] \mathbf{x}_2^H[n] \dots \mathbf{x}_K^H[n]]^H$ 分别表示预编码矩阵和发射信号向量,其中的元素 \mathbf{F}_k 和 $\mathbf{x}_k[n]$ 分别表示第 k 个用户的预编码矩阵和发射信号向量; $\mathbf{w}[n]$ 表示独立同分布的加性高斯白噪声,其均值为 0,方差为 σ_w^2 ; N_B 表示每次信道实现时传输的码块数目,可以假设每次信道实现时的矩阵不变,因此下文中可以省略下标 $[n]$ 。对于第 k 个用户,接收信号可以具体表示为

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{F}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{H}_k \sum_{l=1, l \neq k}^K \mathbf{F}_l \mathbf{x}_l + \mathbf{w}_k \quad (2)$$

式中,右边的第一项表示第 k 个用户接收的有用信号,第二项表示其他 $K-1$ 个用户的干扰信号。

2.2 基于块对角化的等价信道

块对角化方法被认为是迫零信道求逆方法的扩展方法,其核心思想是确定第 k 个用户的预编码矩阵 \mathbf{F}_k ,使其列向量扩展的子空间处于其他用户信道矩阵 \mathbf{H}_l 的零空间中,从而消除多用户之间的干扰。为了达到这一目的,需要满足下式:

$$\mathbf{H}_l \mathbf{F}_k = 0, l = 1, \dots, k-1, k+1, \dots, K \quad (3)$$

如果定义 $\bar{\mathbf{H}}_k = [\bar{\mathbf{H}}_1^H \dots \bar{\mathbf{H}}_{k-1}^H \bar{\mathbf{H}}_{k+1}^H \dots \bar{\mathbf{H}}_K^H]^H$,显然 \mathbf{F}_k 可以从 $\bar{\mathbf{H}}_k$ 矩阵的零空间中求解。寻找 $\bar{\mathbf{H}}_k$ 的零

空间,可以使用广义迫零信道求逆的方法求解,能够比传统的 SVD 和 BD 的方法降低复杂度。定义信道矩阵的伪逆为

$$\tilde{\mathbf{H}} = \mathbf{H}^{\mathbf{H}}(\mathbf{H}\mathbf{H}^{\mathbf{H}})^{-1} = [\tilde{\mathbf{H}}_1 \tilde{\mathbf{H}}_2 \cdots \tilde{\mathbf{H}}_K] \quad (4)$$

对伪逆矩阵的每个子矩阵做 QR 分解为

$$\tilde{\mathbf{H}}_k = \tilde{\mathbf{Q}}_k \tilde{\mathbf{R}}_k \quad (5)$$

式中, $\tilde{\mathbf{R}}_k$ 是 $N_{r,k} \times N_{r,k}$ 的上三角矩阵, $\tilde{\mathbf{Q}}_k$ 是 $N_l \times N_{r,k}$ 的酉矩阵,其列向量构成了 $\tilde{\mathbf{H}}_k$ 的正交基。因为 $\tilde{\mathbf{R}}_k$ 是可逆的,因此对于所有 $l \neq k$, $\mathbf{H}_l \tilde{\mathbf{Q}}_k = \mathbf{0}$ 成立,所有预编码矩阵可以从 $\mathbf{F}_k = \tilde{\mathbf{Q}}_k$ 求得,那么对于用户 k 的等价信道为

$$\mathbf{H}_{\text{eff},k} = \mathbf{H}_k \mathbf{F}_k = \mathbf{H}_k \tilde{\mathbf{Q}}_k \quad (6)$$

用户 k 的等价信道处于其余用户信道的零空间中,因此多用户间的干扰可以被消除。依此类推,通过对 \mathbf{F} 中每个矩阵的求解,使得 $\mathbf{H}\mathbf{F}$ 矩阵成为块对角化结构。

3 基于块对角化的格基规约 GMD 矢量预编码

3.1 用户 k 的 GMD 矢量预编码

基于第 k 个用户的等价信道,矢量预编码的收发信号传输模型为

$$\mathbf{y}_k = \sqrt{\frac{P_{T,k}}{\beta_k}} \mathbf{H}_{\text{eff},k} \mathbf{P}_k (\mathbf{s}_k + \tau_k \mathbf{l}_k) + \mathbf{w}_k \quad (7)$$

其中,发射信号表示为 $\mathbf{x}_k = \sqrt{\frac{P_{T,k}}{\beta_k}} \mathbf{P}_k (\mathbf{s}_k + \tau_k \mathbf{l}_k)$, \mathbf{P}_k 为第 k 个用户的预编码矩阵,注意这里 \mathbf{P}_k 是基于 $\mathbf{H}_{\text{eff},k}$ 进行预编码的,与 \mathbf{F}_k 的含义不同; \mathbf{s}_k 是原始发射信号向量,其元素取自方形 M 进制正交幅度调制 (Quadrature Amplitude Modulation, QAM) 中的点,功率约束为 $P_{T,k}$; \mathbf{l}_k 表示在 $N_{r,k}$ 维的整数空间 $\mathbb{Z}^{N_{r,k}}$ 中定义的扰动矢量, τ_k 是正整数,一般取 $\tau_k = \sqrt{M}$ 。通过在 \mathbf{s}_k 上叠加扰动矢量,等价于以 τ_k 为间隔单位扩展了原始信号的星座图,从而扩大了发射信号的自由度,因此可以降低发射信号功率。最后,定义 $\beta_k = E(\|\mathbf{P}_k (\mathbf{s}_k + \tau_k \mathbf{l}_k)\|^2)$ 为功率约束因子。

对于用户 k 的等价信道,进行几何均值分解可以得到

$$\mathbf{H}_{\text{eff},k} = \mathbf{Q}_k \mathbf{R}_k \mathbf{U}_k^{\mathbf{H}} \quad (8)$$

式中, \mathbf{Q}_k 和 $\mathbf{U}_k^{\mathbf{H}}$ 均是酉矩阵, \mathbf{R}_k 是对角元素相等的上三角矩阵,对角元素值等于 $\mathbf{H}_{\text{eff},k}$ 的奇异值的几何均值。基于 GMD 和 MMSE 准则,根据文献[6]的思

想,可以推出用户 k 的预编码矩阵 \mathbf{P}_k 和均衡矩阵 \mathbf{E}_k 分别为

$$\mathbf{P}_k = \mathbf{U}_k \mathbf{R}_k^{\mathbf{H}} (\mathbf{R}_k \mathbf{R}_k^{\mathbf{H}} + \alpha \mathbf{I}_{N_{r,k}})^{-1}, \mathbf{E}_k = \mathbf{Q}_k^{\mathbf{H}} \quad (9)$$

式中定义了因子 $\alpha = N_{r,k} \sigma_w^2 / P_{T,k}$ 。使用 Cholesky 分解 $(\mathbf{R}_k \mathbf{R}_k^{\mathbf{H}} + \alpha \mathbf{I}_{N_{r,k}})^{-1} = \mathbf{T}_k^{\mathbf{H}} \mathbf{T}_k$, 可以通过下式求解扰动矢量:

$$\mathbf{l}_{k,\text{opt}} = \arg \min_l \|\mathbf{T}_k (\mathbf{s}_k + \tau_k \mathbf{l}_k)\|^2 \quad (10)$$

可以通过球形译码 (Sphere Decoder, SD) 求解式 (10) 中的最优扰动矢量,但是,其复杂度随天线数目的增加呈指数级上升。为了降低计算复杂度,本文对式 (10) 进一步进行格基规约处理,使其复杂度降低为多项式级别。

3.2 格基规约处理

对于 MIMO 系统,可以使用格基规约的方法提高信道矩阵的正交特性。首先,使用基于 LLL 算法的格基规约处理,对矩阵 \mathbf{T}_k 进行分解得到

$$\mathbf{T}_k = \mathbf{T}_{k,\text{red}} \mathbf{L}_k \quad (11)$$

式中, $\mathbf{T}_{k,\text{red}}$ 是格基规约处理后的矩阵,其列向量具有近似的正交特性, \mathbf{L}_k 取值整数值 $[-1, 0, 1]$ 的矩阵,其行列式满足 $\det[\mathbf{L}_k] = \pm 1$ 。

\mathbf{T}_k 进行格基规约处理之后,对 $\mathbf{T}_{k,\text{red}}$ 使用 QR 分解得到

$$\mathbf{T}_{k,\text{red}} = \bar{\mathbf{Q}}_k \bar{\mathbf{R}}_k \quad (12)$$

式中, $\bar{\mathbf{R}}_k$ 为上三角矩阵, $\bar{\mathbf{Q}}_k$ 为酉矩阵。定义对角矩阵 $\mathbf{G}_k = \text{diag}(1/\bar{r}_{1,1}, \dots, 1/\bar{r}_{N_{r,k},N_{r,k}})$, 其中 $1/\bar{r}_{1,1}, \dots, 1/\bar{r}_{N_{r,k},N_{r,k}}$ 为 $\bar{\mathbf{R}}_k$ 的对角元素。将 $\bar{\mathbf{R}}_k$ 对角线元素归一化,得到

$$\mathbf{B}_k = \mathbf{G}_k \bar{\mathbf{R}}_k \quad (13)$$

使用最近平面法,原始信号可以被处理为

$$\bar{\mathbf{s}}_k = -\mathbf{G}_k \bar{\mathbf{Q}}_k^{\mathbf{T}} \mathbf{T}_k \mathbf{s}_k \quad (14)$$

然后对 $\bar{\mathbf{s}}_k$ 进行连续干扰消除 (SIC), 即

$$\mathbf{d}_{k,N_{r,K}} = \mathcal{Q}_{\tau_k \mathbb{Z}}(\bar{\mathbf{s}}_{k,N_{r,K}}) \quad (15)$$

$$\mathbf{d}_{k,j} = \mathcal{Q}_{\tau_k \mathbb{Z}}(\bar{\mathbf{s}}_{k,j} - \sum_{i=j+1}^{N_{r,k}} \mathbf{B}_{k,j,i} \mathbf{d}_{k,i}), \quad j = N_{r,k} - 1, \dots, 1 \quad (16)$$

式中, $\mathcal{Q}_{\tau_k \mathbb{Z}}(\cdot)$ 表示对向量的每个元素根据整数格 $\tau_k \mathbb{Z}$ 进行四舍五入操作。经过式 (12) ~ (16) 的处理,最后扰动矢量可以求解为

$$\mathbf{l}_k = \mathbf{L}_k^{-1} \mathbf{d}_k \quad (17)$$

因此,经过格基规约和连续干扰消除处理,可以获得近似扰动矢量 \mathbf{l}_k , 而不需要复杂度较高的球形译码

算法。

在 SIC 的基础上,可以通过排序方法进一步提高系统性能。文献[11]提出的 VBLAST 算法可以用于本文中的排序,经过 VBLAST 算法对 $T_{k,red}$ 分解得到

$$T_{k,red} = W_k B_k^T D_k \quad (18)$$

其中, W_k 是具有正交列向量的矩阵, B_k 与式(13)的定义一致, D_k 表示排序矩阵。根据近似平面法得到

$$\bar{s}'_k = W_k^{-1} T_k s_k \quad (19)$$

和 SIC 处理相似,反馈环处理过程为

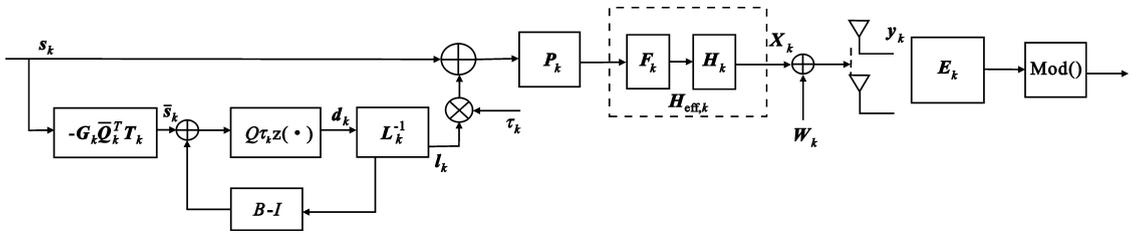
$$d'_{k,1} = Q_{\tau_k} z(\bar{s}'_{k,1}) \quad (20)$$

$$d'_{k,j} = Q_{\tau_k} z\left(\bar{s}'_{k,j} - \sum_{i=1}^{j-1} B_{k,j,i}^T d'_{k,i}\right), \quad j = 2, 3, \dots, N_{r,k} - 1 \quad (21)$$

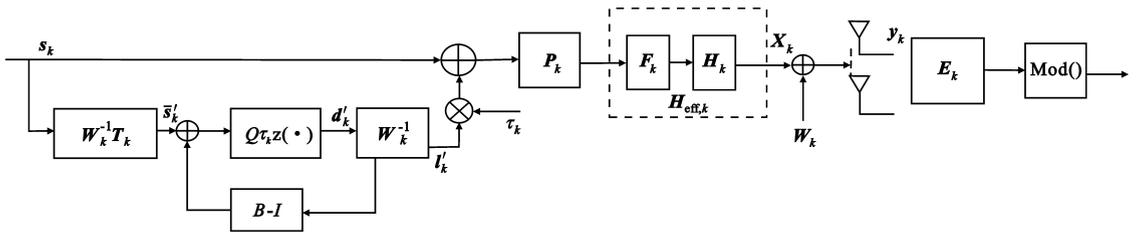
最后得到的扰动矢量为

$$l'_k = W_k^{-1} d'_k \quad (22)$$

总结以上方法,图 1(a)和(b)分别给出了对于用户 k ,分别采用基于格基规约的 SIC 处理和 VBLAST 处理的方法框图。



(a) 基于格基规约的 SIC 系统流程图



(b) 基于格基规约的 VBLAST 系统流程图

图 1 基于格基规约的两种扰动矢量求解流程图

Fig. 1 Two diagrams for solving perturbation vector based on lattice reduction

3.3 复杂度分析

对于一个 $m \times n$ 的矩阵,格基规约的 LLL 算法的复杂度为 $O(mn^3)$ 。如果假设 $m \times n$ 矩阵的秩为 r ,那么 SIC 处理和 VBLAST 处理的复杂度分别为 $O(m^2n)$ 和 $O(m^2nk)$ 。对于用户 k ,其信道矩阵的维数为 $N_{r,k} \times N_{r,k}$,因此基于格基规约的 SIC 方法和 VBLAST 方法的复杂度比较见表 1。

表 1 两种方法的计算复杂度比较

Table 1 Computation complexity of two methods

方法	复杂度
基于格基规约的 SIC 方法	$O(\max(N_{r,k}^2 N_B, N_{r,k}^3) + N_{r,k}^4)$
基于格基规约的 VBLAST 方法	$O(\max(N_{r,k}^2 N_B, N_{r,k}^4) + N_{r,k}^4)$

当考虑全部用户时,在表 1 复杂度的基础上乘以 K 即可。观察表 1 可以发现,由于 VBLAST 算法进行了排序处理,其复杂度略高于 SIC 方法,但是包

含了格基规约处理之后的两种方法,复杂度仍然是多项式级别的,远远低于球形译码算法的指数级别复杂度。此外需要指出的是,在进行格基规约处理之前,块对角化和几何均值分解的复杂度与奇异值分解的复杂度相当。

4 仿真结果

本文通过 matlab 软件对提出的方法进行仿真,仿真系统采用多用户 MIMO 下行链路系统。不考虑信道编码,当每次信道实现时,信源按平均分布生成二进制比特流,并将二进制比特流映射到 4QAM 的方形星座图上。MIMO 信道模型采用平衰落信道,平衰落元素取自均值为 0、方差为 1 的复高斯分布,通过误比特率曲线进行性能比较。本文算法的基本方法是几何均值分解矢量预编码,在仿真中包含了 3 条曲线,分别为球形译码(SD)、基于格基规约的连续干扰消除(LR-SIC)、基于格基规约的垂直分层空

时编码(LR-VBLAST),使用这3种方法求解扰动矢量。同时,将本文的3种算法与文献[11]的基于MMSE准则的块对角化矢量预编码算法(BD-VP)算法进行比较。图2~4分别给出了 $\{2,2\} \times 4$ 、 $\{2,4\} \times 6$ 、 $\{2,2,4\} \times 8$ 3种天线结构的仿真结果,代表了不同用户接收天线相等、不同用户接收天线不相等、接收用户数目大于2的3种情况。

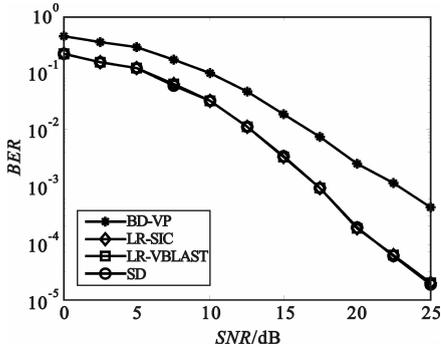


图2 $\{2,2\} \times 4$ 系统中不同算法误码率比较

Fig.2 BER comparison of different algorithms for $\{2,2\} \times 4$ system

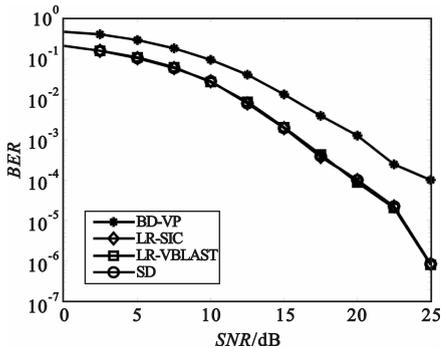


图3 $\{2,4\} \times 6$ 系统中不同算法误码率比较

Fig.3 BER comparison of different algorithms for $\{2,4\} \times 6$ system

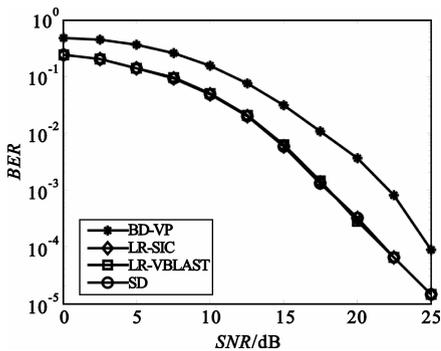


图4 $\{2,2,4\} \times 8$ 系统中不同算法误码率比较

Fig.4 BER comparison of different algorithms for $\{2,2,4\} \times 8$ system

从图2至图4可以看出,在不同的天线结构场景下,本文提出的块对角化几何均值分解矢量预编码算法分集增益较大,在天线结构较好时(如

$\{2,4\} \times 6$),当信噪比为25 dB时,误码率性能可达 10^{-6} ,满足实际通信的需求;如果将本文提出的算法与块对角化矢量预编码算法横向比较,其性能优于后者2.5~5 dB之间,这是因为几何均值分解能够平衡不同子信道的增益,降低了较低子信道增益对系统性能降低的影响,与预编码相结合能够提高分集增益。同时,本文根据格基规约的思想,分别采用SIC和VBLAST方法求解扰动矢量,误码率性能与SD方法几乎一致,说明在保持性能不变的前提下,本文的方法能够进一步降低计算复杂度。仿真表明,采用复杂度最低的SIC算法,即可达到复杂度稍高的VBLAST算法和复杂度最高的SD算法的性能。

通常,在实际的MIMO系统中存在发射天线相关,因此本文也对发射机天线相关的场景进行了仿真比较。图5表示 $\{2,4\} \times 6$ 天线结构中发射天线空间相关的情况,相关矩阵模型假设为托普利兹矩阵,定义为 $(\mathbf{R}_{tx})_{m,n} = \rho_{tx}^{|m-n|}$ ($m, n \in \{1, 2, \dots, N_t\}$),其中 ρ_{tx} ($0 \leq \rho_{tx} < 1$)为发射相关系数,在图5中设置为0.5。

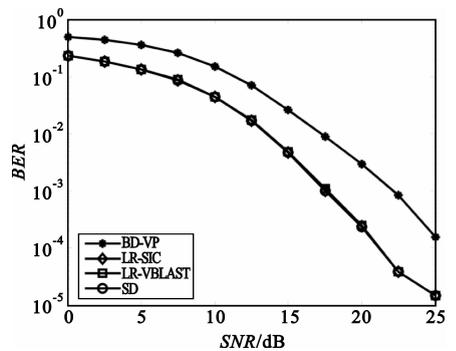


图5 发射空间相关时 $\{2,4\} \times 6$ 系统中不同算法误码率比较($\rho_{tx} = 0.5$)

Fig.5 BER comparison of different algorithms for $\{2,4\} \times 6$ system with transmit spatial correlation($\rho_{tx} = 0.5$)

图5表明,存在发射相关时,不同算法的整体性能下降,但是性能变化的趋势没有显著变化,本文的3条曲线性能仍然优于文献[11]的方法,当信噪比为25 dB时,本文算法的误码率可接近 10^{-5} ,说明当实际系统基站天线存在空间相关情况时,本文算法仍然适用,而算法整体性能的下落可以通过调制、编码等方法进行补偿。

5 结论

几何均值矢量预编码能够同时发挥几何均值和矢量预编码两种技术的优势,为了使其适合在多用

户 MIMO 链路系统中应用,本文提出了将多用户 MIMO 信道进行块对角化处理之后,几何均值矢量预编码的实现方法。同时,为了进一步降低求解扰动矢量的计算复杂度,给出了基于格基规约的连续干扰消除和垂直分层空时编码两种近似求解扰动矢量的方法。仿真表明,在不同的天线结构下,以及包含空间相关性的信道下,提出的方法误码率性能均优于传统的块对角化矢量预编码算法,并且分集增益较大,在基站多天线空间相关条件下仍然适用。同时,在不降低系统性能的前提下,基于格基规约的连续干扰消除方法能够将计算复杂度显著降低。

参考文献:

- [1] Spencer Q H, Swindlehurst A L. An introduction to the multi-user MIMO downlink[J]. IEEE Communications Magazine, 2004, 42(10): 60 – 67.
- [2] Spencer Q H, Swindlehurst A L, Haardt M. Zero-forcing methods for downlink spatial multiplexing in multiuser MIMO channels[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2004, 52(2): 461 – 471.
- [3] Hochwald B M, Peel C B, Swindlehurst A L. A vector perturbation technique for near capacity multiantenna multiuser communication part II: perturbation[J]. IEEE Transactions on Communications, 2005, 53(3): 537 – 544.
- [4] Yao W, Chen S, Hanzo L. Generalized MBER-based vector precoding design for multiuser transmission[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(2): 739 – 745.
- [5] Vesna G, Ralfr M, Benjamin M Z, et al. On the spectral efficiency of MMSE vector precoding[C]//Proceedings of 2011 IEEE Wireless Communications & Networking Conference. Cancun: IEEE, 2011: 1805 – 1810.
- [6] Liu F, Jiang L G, He C. Joint MMSE vector precoding based on GMD method for MIMO systems[J]. IEICE Transactions on Communications, 2007, E90 – B(9): 2617 – 2620.
- [7] Jiang Y, William W H. The geometric mean decomposition [J]. ELSEVIER Linear Algebra and its Applications, 2005, 396(1): 374 – 383.
- [8] Chae C B, Shim S, Robert W H. Block diagonalized vector perturbation for multiuser MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2008, 7(11): 4051 – 4057.
- [9] Park J Y, Lee B, Shim B. A MMSE vector precoding with block diagonalization for multiuser MIMO downlink[J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2012, 60(2): 569 – 577.

- [10] Windpassinger C, Fischer R F H, Huber J B. Lattice-reduction-aided broadcast precoding [J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2004, 52(12): 2057 – 2060.
- [11] Foschini G J. Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas [J]. Bell Labs Technical Journal, 1996, 1(2): 41 – 59.

作者简介:



耿焯(1979—),女,河北石家庄人,2005年于华北电力大学获硕士学位,2011年于上海交通大学获博士学位,现为讲师,主要研究方向为MIMO系统的预编码和检测;

GENG Xuan was born in Shijiazhuang, Hebei Province, in 1979. She received the M. S. degree from North China Electric Power University and the Ph. D. degree from Shanghai Jiaotong University in 2005 and 2011, respectively. She is now a lecturer. Her research concerns precoding and detection for MIMO system.

Email: xuangeng@shmtu.edu.cn

孙作雷(1982—),男,山东人,2010年于上海交通大学获工学博士学位,现为讲师,主要研究方向为机器学习、机器视觉和移动通信;

SUN Zuo-lei was born in Shandong Province, in 1982. He received the Ph. D. degree from Shanghai Jiaotong University in 2010. He is now a lecturer. His research interests include machine learning, computer vision and mobile communication.

刘锋(1976—),男,四川宜宾人,2001年于哈尔滨工业大学获通信与信息系统专业硕士学位,2009年于上海交通大学获通信与信息系统专业博士学位,2009–2010在香港中文大学从事博士后研究,现为讲师,主要从事无线通信相关的教学与科研工作;

LIU Feng was born in Yibin, Sichuan Province, in 1976. He received the M. S. degree from Harbin Institute of Technology and the Ph. D. degree from Shanghai Jiaotong University in 2001 and 2009, respectively. He had been making post-doc research at The Chinese University of Hong Kong from 2009 to 2010. He is now a lecturer. His research concerns wireless communication.

刘坤(1982—),女,陕西西安人,2007年和2009年分别获西北工业大学模式识别与智能系统专业工学硕士学位和工学博士学位,现为副教授,主要从事信息处理、数字图像处理的教学与科研工作。

LIU Kun was born in Xi'an, Shaanxi Province, in 1982. She received the M. S. degree and the Ph. D. degree from Northwestern Polytechnical University in 2007 and 2009, respectively. She is now an associate professor. Her research concerns information processing and digital image processing.