

文章编号: 1001 - 893X(2012)11 - 1715 - 04

基于格规约辅助的 MIMO 系统 GMD - TH 预编码方案^{*}

芮国胜, 张海波, 李廷军, 林洪文, 朱四华

(海军航空工程学院 电子信息工程系, 山东 烟台 264001)

摘要: 现有的 GMD - TH (Geometric Mean Decomposition-Tomlison Harashima) 预编码方案在发射端未对获得 MIMO (Multiple-Input-Multiple-Output) 信道增益矩阵优化, 因而其误码率和分集增益无法获得令人满意的效果。为此, 在原有 MIMO 系统 GMD - TH 预编码的基础上, 提出一种基于格规约辅助的 GMD - TH 预编码方案。该方案采用基于格规约的算法对信道矩阵进行优化, 经过优化的信道矩阵其列向量之间具有更好的正交性并且向量的长度更短, 并且采用优化的信道矩阵提高了 GMD - TH 预编码 MIMO 系统的分集增益。仿真结果表明: 相比于传统的线性预编码方案, 该预编码方案有效地提高了 MIMO 分集增益, 相同误码率下, 信噪比降低 3 dB 以上, 具有实用价值。

关键词: 多输入多输出; 几何均值分解; TH 预编码; 格规约; 分集增益

中图分类号: TN929 **文献标志码:** A doi: 10.3969/j.issn.1001 - 893x.2012.11.002

A GMD - TH Precoding Scheme Based on Lattice Reduction for MIMO Systems

RUI Guo-sheng, ZHANG Hai-bo, LI Ting-jun, LIN Hong-wen, ZHU Si-hua

(Department of Electronic and Information Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: In the exiting GMD - TH (Geometric Mean Decomposition-Tomlison Harashima) precoding schemes, the obtained channel gain matrix is not optimized and so its bit error rate (BER) and diversity order are not satisfactory. In this paper, a new GMD - TH precoding scheme is proposed. The lattice reduction algorithm is applied in this scheme to optimize the channel at the transmitter to make the orthogonality of the sub-channels better and their length shorter. The diversity order of the MIMO system is also improved with optimized sub-channels. The simulation results show that the precoding scheme can effectively improve the diversity gain of MIMO system in comparison with the traditional linear precoding scheme, and at the same BER, the SNR is reduced more than 3 dB. So the proposed scheme is applicable.

Key words: MIMO; geometric mean decomposition; Tomlison Harashima precoding; lattice reduction; diversity gain

1 引言

格规约 (Lattice Reduction) 技术是将一组“基”根据一定的准则变换成另一组新的“基”。这组新的基具有更好的性质, 如基向量之间的正交性更好以及每个“基”欧几里得长度更短。A. K. Lenstra, H.

W. Lenstra and L. Lovász 提出的 LLL 算法, 显著地降低了格规约算法的复杂度^[1], 使得格规约在信息处理方面得到了广泛应用。

在无线通信领域, Huan Yao 等人将格规约中的 Size Reduction 算法应用于 2×2 的 MIMO 无线通信系统的检测中^[2], 相比未采用格规约算法的检测系

^{*} 收稿日期: 2012 - 04 - 25; 修回日期: 2012 - 09 - 11

统降低了误码率并提高了 MIMO 通信的分集增益。

MIMO 技术充分利用空间中独立并行的信道,同时传输多路数据,因而可以有效地提高系统的传输速率及频谱利用率。在 MIMO 无线通信系统的预编码技术中,文献[3]提出了在奇异值分解基础上,通过置换和双边变换,得出另一种形式的信道矩阵分解,称之为 GMD 分解。分解得到的各个子信道其增益相同。在 Tomlison Harashima 预编码基础上,结合 GMD 信道分解,就可以得到 GMD-THP 方案。根据收发端均衡矩阵的不同,可以得到多种 GMD-THP 方案,但其都有一个共同的特点是误码率较高以及分集增益较低。

针对传统的 GMD-THP 无法达到最大分集增益这一缺陷,本文在原有 GMD-THP 方案的基础,提出一种基于格规约算法的 GMD-THP MIMO 系统预编码方案。该方案对基于 GMD-THP 的联合收发预编码技术进行改进,在接收端对预编码矩阵进行优化处理,进一步降低系统的误码率并提高系统的分集增益。本文首先将信道矩阵转换为 LLL 算法要求的形式,然后给出基于 LLL 算法的 GMD-THP 方案,并对该方案的性能和复杂度进行分析。

2 系统模型

对于 MIMO 无线通信系统,设发送的信号向量为 $\mathbf{x}$,接收信号向量为 $\mathbf{y}$,信道矩阵为 $\mathbf{H}$,噪声向量为 $\mathbf{n}$,则整个系统可表示为

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} \tag{1}$$

式中, $\mathbf{H}$ 为 $N_r \times N_t$ 的矩阵, N_r 是接收天线的个数, N_t 是发射天线的个数。本文将在典型的平坦衰落信道模型,以及 $N_r = N_t$ 下讨论。 $\mathbf{H}$ 和 $\mathbf{n}$ 的元素均满足独立同分布(Independent Identical Distribution),设方差为 σ_h^2 。 $\mathbf{n}$ 是高斯白噪声,其方差为 σ_w^2 。

为了应用格规约算法,需要将 $\mathbf{H}$ 变换为实数域,即:

$$\mathbf{H}_r = \begin{bmatrix} \Re(\mathbf{H}) & -\Im(\mathbf{H}) \\ \Im(\mathbf{H}) & \Re(\mathbf{H}) \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中, $\Re$ 和 $\Im$ 分别代表取实部和虚部。由此,式(1)可以表示为

$$\begin{bmatrix} \Re(\mathbf{y}) \\ \Im(\mathbf{y}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Re(\mathbf{H}) & -\Im(\mathbf{H}) \\ \Im(\mathbf{H}) & \Re(\mathbf{H}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Re(\mathbf{x}) \\ \Im(\mathbf{x}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Re(\mathbf{n}) \\ \Im(\mathbf{n}) \end{bmatrix} \tag{3}$$

简化表示为

$$\mathbf{y}_r = \mathbf{H}_r \mathbf{x}_r + \mathbf{n}_r \tag{4}$$

对于发送信号 $\mathbf{x}$,本文采用 M 点的正交幅度调制。取值范围为 $x \in \{\pm(2m-1) \pm (2m-1)i\}$,其中 $m \in \{1, 2, \dots, \sqrt{M}/2\}$ 。

3 预编码方案设计与分析

3.1 预编码方案设计

通常对信道矩阵 $\mathbf{H}$ 进行奇异值分解(SVD),以进行后续的处理。但是在某些情况下,奇异值分解会使得到的信噪比(SNR)非常大,降低了性能。针对以上问题,Y Jiang 等人提出了几何平均分解(GMD)算法[3]。GMD 把信道分解为多个 SNR 相同的子信道,与 SVD 相比各个信道 SNR 相同,提高了系统的性能;由于各个子信道相同,可以使用统一的调制方案,使接收端设计复杂度降低。

根据 GMD 分解,信道矩阵 $\mathbf{H}$ 分解为

$$\mathbf{H} = \mathbf{Q}\mathbf{R}\mathbf{P}^H \tag{5}$$

式中, $\mathbf{Q}$ 和 $\mathbf{P}$ 是列正交矩阵酉矩阵, $\mathbf{R}$ 是 $N_r \times N_t$ 的上三角矩阵。在本方案的设计中,在实数域内将信道矩阵 $\mathbf{H}_r$ 分解为

$$\mathbf{H}_r = \mathbf{Q}_r \mathbf{R}_r \mathbf{P}_r^T \tag{6}$$

此时, $\mathbf{Q}_r$ 和 $\mathbf{P}_r$ 是正交矩阵; $\mathbf{R}_r$ 是 $2N_r \times 2N_t$ 的上三角矩阵。对于 $\mathbf{Q}_r$ 的均衡在接收端处理[4-5]。在发射端,令 $\tilde{\mathbf{H}} = \mathbf{R}_r \mathbf{P}_r^T$,则对 $\tilde{\mathbf{H}}^T$ 应用 LLL 算法,约减 $\tilde{\mathbf{H}}^T$ 的基向量,使得 $\tilde{\mathbf{H}}^T$ 的基向量转变为性质更好的一组基,因此有

$$\tilde{\mathbf{H}}_{\text{red}} = \tilde{\mathbf{H}}^T \mathbf{T}$$

即

$$\tilde{\mathbf{H}}_{\text{red}}^T = \mathbf{T}^T \tilde{\mathbf{H}} \tag{7}$$

根据 LLL 算法[2],有 $\tilde{\mathbf{H}}^T = \tilde{\mathbf{Q}}\tilde{\mathbf{R}}$,则对于 $\tilde{\mathbf{H}}^T$ 进行化简,需满足以下条件:

$$|\tilde{r}_{k,l}| \leq \frac{1}{2} |\tilde{r}_{k,k}|, 1 \leq k \leq l \leq m \tag{8}$$

$$\delta |\tilde{r}_{l-1,l-1}|^2 \leq |\tilde{r}_{l,l}|^2 + |\tilde{r}_{l-1,l}|^2 \tag{9}$$

式中, $l = 2, \dots, m$,参数 δ 取值在 $[0.75, 1]$ 之间, δ 的取值越大,则约减后的 $\tilde{\mathbf{H}}^T$ 正交性更好,列向量长度更短,但此时计算量更大,需要消耗更多的计算资源,通常取 $\delta = 0.75$ 以取得较为均衡的结果。 $\mathbf{T}$ 是元素为整数、行列式的绝对值为 1 的矩阵,即 $|\det(\mathbf{T})| = 1$ 。

根据 THP 在 MIMO 系统中的结构[6-7],需要确定前馈矩阵 $\mathbf{F}$ 和反馈矩阵 $\mathbf{B}$ 。在对 $\tilde{\mathbf{H}}^T$ 进行格规约

时,可以得到 $\tilde{\mathbf{H}}_{\text{red}}$ 的 QR 分解形式,即

$$\mathbf{H}_{\text{red}} = \mathbf{Q}_L \mathbf{R}_L \quad (10)$$

根据 THP 的结构,以及式(10),可以得到向滤波器 $\mathbf{F} = \mathbf{Q}_L \mathbf{G}$ 以及 $\mathbf{B} = \mathbf{R}_L^T \mathbf{G}$,此处, $\mathbf{B}$ 的对角线元素为 1,增益矩阵 $\mathbf{G}$ 满足: $\mathbf{G} = \text{diag}(s_{11}^{-1}, \cdots, s_{N_r N_r}^{-1})$, 其中, s_{ii} 是 $\mathbf{R}_L^T$ 的对角线上的元素。

3.2 预编码的量化判决方法

本文采用的是 QAM 调制,因此,对于 QAM 星座,发送时的信号可以看作是整数集 Z^m 中的有限子集,同时经过复数域到实数域映射后,与检测时不同^[8],需要根据预编码的特点做如下处理:

$$A^{2N_r} = 2(D^{2N_r} + \alpha) \quad (11)$$

其中 $D = \left\{ -\frac{\sqrt{M}}{2}, \cdots, -1, 0, 1, \cdots, \frac{\sqrt{M}}{2} - 1 \right\}$, α 为一矢量常数 $\frac{1}{2}[1, 1, \cdots, 1]^T$ 。

由式(3)可知发送的符号 $\mathbf{a} \in A^{2N_r}$,在图 1 中的发送信号首先左乘 $\mathbf{T}^T$,有

$$\mathbf{s} = \mathbf{T}^T \mathbf{a} \quad (12)$$

对平移过的信号 $\mathbf{s}$ 进行归一化,即

$$\bar{\mathbf{s}} = \mathbf{a} \cdot \mathbf{s} = \mathbf{a} \cdot 2(\mathbf{T}^T D^{2N_r} + \mathbf{T}^T \alpha)$$

由于左乘 $\mathbf{T}^T$ 使得星座点的位置发生变化,因此在接收端,需要对接收到的信号进行平移变换以及量化,从而恢复到原始的 QAM 星座中进行检测^[8-9]。在接收端,设 $\mathbf{z} = \mathbf{Q}^T \mathbf{y}_r$,经过模操作后,有 $\bar{\mathbf{z}} = \text{mod}(\mathbf{z})$,则可得到最终的解调信号为

$$\tilde{\mathbf{x}}_r = 2 \cdot \mathbf{a} \cdot \mathbf{Q}(\bar{\mathbf{z}}/2\mathbf{a} - \alpha) + \mathbf{a} \cdot \alpha \quad (13)$$

其中 $\mathbf{Q}(\cdot)$ 操作代表取最近整操作。最后有

$$\mathbf{x} = \tilde{\mathbf{x}}_r(1:N_r) + \tilde{\mathbf{x}}_r(i+N_r:2N_r)$$

其中, $i \in [1, 2, \cdots, N_r]$ 将实数域的数值重新映射到复数域以进行 QAM 的解调,恢复出原始的比特信息。

3.3 算法结构图

综合以上过程,本文算法的结构图可总结为图 1。图 1 中在进行虚线框内的预编码前,首先将发送信号通过 $\mathbf{T}^T$ 转换成一组新的信号,再进行预编码,之后发送出去到用户。

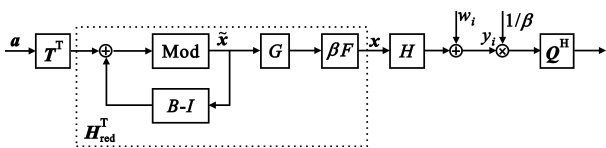


图 1 格规约辅助 GMD-TH 预编码原理图
Fig.1 The lattice reduction aided GMD-THP scheme

3.4 性能分析

Mahmoud Taherzadeh 等人从理论上证明了 LLL 约减算法在 MIMO 系统中可以达到全分集增益^[10],因此,本文提出了应用格规约算法改进 GMD-THP 预编码方案,以改进 MIMO 通信系统的误码率和分集增益。在提出的方案中,Mod 处理过程是一个非线性的调制操作,由于从理论上进行分析有较大的困难,因而常用的方式是采用数值仿真。

3.5 复杂度分析

本文将复杂度定义为计算时所需浮点数计算的次数。在天线数为 $N_r = N_t = n$ 的条件下,文献[1]中的 GMD 算法是从奇异值分解开始的,对于信道奇异值的分解运算需要 $O(n^3)$ 次浮点数计算,GMD 的后续算法,需要再增加额外的 $O(n^2)$ 次浮点数运算,因而 GMD 分解总的复杂度为 $O[n^2(n+1)]$ 。LLL 算法的复杂度为 $O(N_r \cdot N_t^3) = O(n^4)$ ^[11]。因此,基于格规约辅助的 GMD-THP 其复杂度增加了 $c = O(\max(n^2(n+1), n^4))$ 。由以上分析可知,复杂度的提高在可接受的范围内。

4 仿真结果及分析

通常 MIMO 系统的仿真以 4×4 、4QAM 的调制的 MIMO 系统为例进行。为体现本文预编码方案的优势,本文仿真条件设置为 6×6 的 4QAM 的调制的 MIMO 系统,并假设在接收端可以获得完整的信道知识。整个系统的性能以比特误码率和分集增益来衡量。作为对比,本文给出了基于 ZF(Zero Forcing)预编码、相应的 LLL 算法下的 ZF 预编码方案以及未采用格规约算法的 GMD-TH 预编码方案的误码性能曲线,仿真结果如图 2 所示。

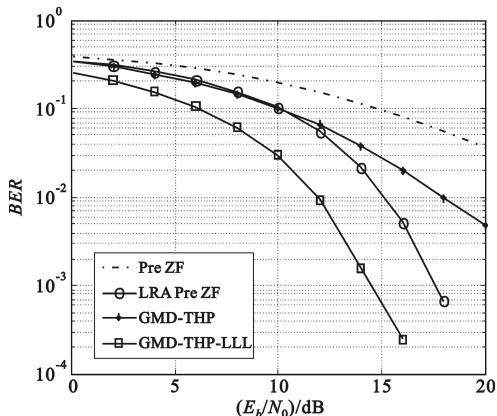


图 2 仿真结果(天线 6×6)
Fig.2 The simulation result for 6×6 antennas

在图 2 中,曲线的斜率代表了 MIMO 系统的分集增益。从仿真结果中可以得出,采用格规约算法显著地提高了 MIMO 系统的分集增益;在误码率 10^{-2} 时,相比传统的线性 ZF 预编码信噪比降低了接近 10 dB,并且随着信噪比的提高,误码性能提高得更大;误码率 10^{-3} 时,相比采用格归约的线性 ZF 预编,信噪比降低了 3 dB 以上。

5 结 论

本文提出了一种基于格规约辅助的 GMD-TH 预编码方案,着重改善在接收端获得的 MIMO 信道增益矩阵的正交性,在优化后的信道基础上对发射信号进行预编码。相比传统的线性预编码和未采用格归约算法的 GMD-TH 预编码方案,本文方案提高了分集增益,相同误码率条件下信噪比降低了 3 dB 以上,而复杂度增加有限,具有工程实用价值。

参考文献:

- [1] Wübben D, Seethaler D, Jaldén J, et al. Lattice Reduction[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2011, 50(5): 70-91.
 - [2] Yao H, Wornell G W. Lattice-Reduction Aided Detectors for MIMO Communication Systems [C]//Proceedings of 2002 IEEE Conference on Global Communication. Taipei: IEEE, 2002: 424-428.
 - [3] Jiang Y, Li J, William W. Joint transceiver design for MIMO communications using geometric mean decomposition [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(10): 3791-3803.
 - [4] Liu F, Jiang L, He C. Advanced Joint Transceiver Design for Block Diagonal Geometric Mean Decomposition Based Multiuser MIMO Systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(2): 692-703.
 - [5] Fischer R F H, Windpassinger C, Lampe A, et al. Space-Time Transmission using Tomlinson Harashima Precoding [C]//Proceedings of the 4th International ITG Conference on Source and Channel Coding. Berlin: [s.n.], 2002: 139-147.
 - [6] Huang M, Zhou S, Wang J. Analysis of Tomlinson-Harashima Precoding in Multiuser MIMO Systems With Imperfect Chann[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57(5): 2856-2867.
 - [7] 史林,邱玲. 采用 Tomlinson-Harashima 预编码的多天线多用户系统的低复杂度用户选择算法[J]. 高技术通讯, 2009, 19(8): 790-794.
- SHI Lin, QIU Ling. A low complexity user selection algo-

rithm for multi-antenna multi-user systems with tomlinson-harashima precoding [J]. Chinese High Technology Letters, 2009, 19(8): 790-794. (in Chinese)

- [8] Aubert S, Mohaisen M. From Linear Equalization to Lattice-Reduction-Aided Sphere-Detector as an Answer to the MIMO Detection Problematic in Spatial Multiplexing Systems [M]//Vehicular Technologies: Increasing Connectivity. Rijeca, Croatia; InTech-Open Access Publisher, 2011: 71-96.
- [9] Wubben D, Bohnke R, Kuhn V, et al. MMSE-Based Lattice-Reduction for Near-ML Detection of MIMO Systems [C]//Proceedings of 2004 IEEE ITG Workshop on Smart Antennas. Munich, Germany: IEEE, 2004: 106-113.
- [10] Taherzadeh M, Mobasher A, Khandani A K. LLL reduction achieves the receive diversity in MIMO decoding [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2007, 53(12): 4801-4805.
- [11] Mow W H. Universal Lattice Decoding Principle and Recent Advances [J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2003, 3(8): 553-569.

作者简介:

芮国胜(1968—),男,山东烟台人,2000年获博士学位,现为教授、博士生导师,主要研究方向为信息与通信系统及小波理论与应用;

RUI Guo-sheng was born in Yantai, Shandong Province, in 1968. He received the Ph.D. degree in 2000. He is now a professor and also the Ph.D. supervisor. His research interests include information communication system, wavelet theory and its applications.

张海波(1983—),男,河北保定人,博士研究生,主要研究方向为格归约理论及其在 MIMO 无线通信系统的应用;

ZHANG Hai-bo was born in Baoding, Hebei Province, in 1983. He is currently working toward the Ph.D. degree. His research concerns lattice reduction theory and its application in MIMO communication systems.

Email: zhbemail@126.com

李廷军(1962—),男,山东烟台人,2010年获博士学位,现为教授、博士生导师,主要研究方向为数字通信;

LI Ting-jun was born in Yantai, Shandong Province, in 1962. He received the Ph.D. degree in 2010. He is now a professor and also the Ph.D. supervisor. His research direction is digital communication.

Email: litingjun99@126.com

林洪文(1966—),男,山东烟台人,副教授,主要研究方向为数字通信;

LIN Hong-wen was born in Yantai, Shandong Province, in 1966. He is now an associate professor. His research direction is digital communication.

朱四华(1979—),男,山东烟台人,讲师,主要研究方向为数字通信。

ZHU Si-hua was born in Yantai, Shandong Province, in 1979. He is now a lecturer. His research direction is digital communication.