

ISSN 0254-6124

CN 11-1783/V

CHINESE JOURNAL OF
SPACE SCIENCE



空间科学学报

Vol. 35 No. 4 第35卷 第4期

4

2015



中国科学院空间科学与应用研究中心
中国空间科学学会
科学出版社

主办
出版

空间科学学报(KONGJIAN KEXUE XUEBAO)

目次 (第 35 卷 第 4 期 2015 年 7 月)

日球层物理和太阳系探测

- 太阳轨道运动的 2400 年周期与轨道周期..... 刘复刚 郑 一 王 建 罗金明 鲍银山 (381)
- AUSM 系列算法对比研究及背景太阳风初步应用..... 王 涛 李会超 张 曼 付华峰 (393)
- Determination of the Kelvin-Helmholtz Wave Parameters on the Magnetopause in Single-spacecraft Observations..... LIN Dong WANG Chi LI Wenya TANG Binbin (403)
- 磁尾等离子片中偶极化锋面的数值模拟研究..... 申井然 曹晋滨 吕浩宇 符慧山 (409)
- X 级以上耀斑与地磁效应关系研究..... 朱漪婷 宗位国 裴世鑫 (415)
- 高纬极区离子速度分布函数多项式解及非相干散射谱计算.....
..... 薛 昆 许正文 吴 健 张雅彬 (424)
- 非相干雷达探测低电离层的结果分析..... 马 欣 陈 罡 钟鼎坤 赵正予 (438)
- Nonlinear Interactions between the Quasi 5-day Wave and Tides Based on Meteor Radar Observations at Maui..... GU Jingxiao HUANG Chunming HUANG Kaiming (445)
- 北京地区重力波活动及其波谱的季节分布特性研究..... 邹 旭 杨国韬
王继红 龚少华 程学武 焦 菁 岳 川 付海川 王梓硕 杨 松 羊现长 傅 军 (453)
- 影响卫星故障的空间天气分析..... 张晓芳 刘松涛 吴耀平 (461)

微重力和空间生命科学

- LED 光谱对模拟空间培养箱中植物生长发育的影响..... 张 岳 潘 璟 孙卫宁 郑慧琼 (473)

空间探测技术

- 考虑相互碰撞影响的月壤颗粒运动轨迹计算方法研究.....
..... 郑 刚 崔玉红 于 伟 任德鹏 叶 青 耿动梁 (486)
- 非相干散射雷达的空间碎片参数统计分析..... 代连东 丁宗华 赵振维 许正文 金 旺 (495)
- Orbit Design for Twin-spacecraft Space VLBI.....
..... ZHANG Cheng WU Xia ZHENG Jianhua WU Ji (502)
- 空间科学任务协同设计过程优化..... 邓 丽 韩 潮 曹晋滨 (511)
- MIMO 空间通信格约简 TH 预编码分析与改进..... 姜 斌 包建荣 唐向宏 曾 嵘 (519)

CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE

CONTENTS (Vol. 35, No.4, July 2015)

Heliophysics and Solar System Exploration

- 2400 Years and Track Cycles of the Sun's Orbital Motion.....
..... *LIU Fugang ZHENG Yi WANG Jian LUO Jinming BAO Kunshan* (381)
- Comparative Study of Three AUSM Algorithms and Simulated Application on the Solar Wind..
..... *WANG Tao LI Huichao ZHANG Man FU Huazheng* (393)
- Determination of the Kelvin-Helmholtz Wave Parameters on the Magnetopause in Single-
spacecraft Observations..... *LIN Dong WANG Chi LI Wenya TANG Binbin* (403)
- Numerical Simulation of Dipolarization Fronts in the Plasma Sheet of Magnetotail.....
..... *SHEN Jingran CAO Jinbin LÜ Haoyu FU Huishan* (409)
- Relationship between X-class Flares and Geomagnetic Effects.....
..... *ZHU Yiting ZONG Weiguo PEI Shixin* (415)
- Polynomial Solutions of the Ion Velocity Distributions and the Calculation of Incoherent Scatter
Spectra in the High-latitude Auroral Ionosphere.....
..... *XUE Kun XU Zhengwen WU Jian ZHANG Yabin* (424)
- Analysis and Results from ISR Observations of Lower Ionosphere.....
..... *MA Xin CHEN Gang ZHONG Dingkun ZHAO Zhengyu* (438)
- Nonlinear Interactions between the Quasi 5-day Wave and Tides Based on Meteor Radar
Observations at Maui..... *GU Jingxiao HUANG Chunming HUANG Kaiming* (445)
- Gravity Wave Parameters and Their Seasonal Variations Derived from Na Lidar Observations at
Beijing..... *ZOU Xu*
YANG Guotao WANG Jihong GONG Shaohua CHENG Xuewu JIAO Jing
YUE Chuan FU Haichuan WANG Zishuo YANG Song YANG Xianchang FU Jun (453)
- Statistical Analysis of Space Weather Effects on Satellites Anomalies.....
..... *ZHANG Xiaofang LIU Songtao WU Yaoping* (461)

Microgravity Science and Space Life Science

- Effect of LED on Plant Growth and Development in Space Culture Chamber Simulator.....
..... *ZHANG Yue PAN Jing SUN Weiming ZHENG Huiqiong* (473)

Space Exploration Technology

- Method on Calculation of Lunar Soil Particles Trajectories Considering Collision Effect.....
..... *ZHENG Gang CUI Yuhong YU Wei REN Depeng YE Qing GENG Dongliang* (486)
- Statistical Analysis of Space Debris's Parameters Based on the Incoherent Scattering Radar....
..... *DAI Liandong DING Zonghua ZHAO Zhenwei XU Zhengwen JIN Wang* (495)
- Orbit Design for Twin-spacecraft Space VLBI.....
..... *ZHANG Cheng WU Xia ZHENG Jianhua WU Ji* (502)
- Process Optimization of Space Science Mission Concurrent Design.....
..... *DENG Li HAN Chao CAO Jinbin* (511)
- Analysis and Improvement of Lattice Reduction Based TH Precoding in MIMO Space
Communications..... *JIANG Bin BAO Jianrong TANG Xianghong ZENG Rong* (519)

Jiang Bin, Bao Jianrong, Tang Xianghong, Zeng Rong. Analysis and improvement of lattice reduction based TH precoding in MIMO space communications (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2015, **35**(4): 519-524, doi:10.11728/cjss2015.04.519

MIMO 空间通信格约简 TH 预编码分析与改进^{*}

姜 斌¹ 包建荣^{1,2} 唐向宏¹ 曾 嵘¹

1(杭州电子科技大学通信工程学院 杭州 310018)

2(东南大学移动通信国家重点实验室 南京 210096)

摘 要 为了评价现有 MIMO 空间通信预编码方案并改进, 分析与仿真了基于迫零和最小均方误差准则的联合 LLL 格约简非线性 TH 预编码算法. 在 TH 预编码基础上, 通过改善信道矩阵奇异性, 提出了改进的格约简 TH 预编码方法. 仿真表明, 采用最小均方准则的预编码 MIMO 系统性能优于采用迫零准则的系统; 所提格约简 TH 预编码算法相对现有的 TH 编码算法, 在采用 LLL 格约简而使复杂度下降时, 仍可获得相对较好的误码性能, 适合多天线 MIMO 空间传输预编码等应用.

关键词 空间通信, MIMO, 格约简, TH 预编码

中图分类号 V 443, TN 919.3

Analysis and Improvement of Lattice Reduction Based TH Precoding in MIMO Space Communications

JIANG Bin¹ BAO Jianrong^{1,2} TANG Xianghong¹ ZENG Rong¹

1(School of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018)

2(National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096)

Abstract In order to evaluate and improve present precoding scheme in MIMO space communications, Zero-Force (ZF) and Minimum Mean Square Error (MMSE) criterion based joint Lenstra, Lenstra, Lovász (LLL) Lattice Reduction (LR) nonlinear Tomlinson-Harashima (TH) precoding algorithm is simulated and analyzed. At the same time, according to the basis of TH precoding, an improved lattice reduction based TH precoding is proposed by improving the singularity of the channel matrix. Simulation results indicate that the performance of MIMO precoding with MMSE criterion is better than that with ZF criterion. In addition, the proposed LLL lattice reduction based TH precoding has still obtained much better performance gain than traditional ones while a little more complexity is reduced by the LLL LR method. Therefore, it can be used in the precoding applications and so on in the multiple antenna MIMO space transmission.

Key words Space communications, MIMO, Lattice reduction, TH precoding

^{*} 国家自然科学基金项目 (61001133, 61471152), 浙江省自然科学基金项目 (LZ14F010003, LY12F01006), 东南大学移动通信国家重点实验室开放研究基金项目 (2014D02), 中国博士后科学基金项目 (2014M561555) 和浙江省数据存储传输及应用技术研究重点实验室 (杭州电子科技大学) 项目 (2012E10020) 共同资助

2014-09-28 收到原稿, 2015-03-08 收到修定稿

E-mail: baojr@hdu.edu.cn

0 引言

多输入多输出 (Multiple Input Multiple Output, MIMO) 具有空间复用增益, 可降低误码率和提高可靠性, 成为新一代多天线空间无线通信的研究热点. 在不增加带宽和发射功率情况下, MIMO 通过多天线配置增加空间自由度, 可成倍提高无线信道容量及频谱利用率, 且具有较强的抗干扰和衰落能力. 因多路传输在空域无冗余, 可采用预编码有效抑制 MIMO 信道矩阵秩不足对性能的影响, 即在发端消除信道对信号的干扰影响^[1-2]. 现有 Tomlinson-Harashima (TH) 预编码未能在发端获得 MIMO 信道增益矩阵优化, 从而无法获得最佳分集增益性能. 而格约简 (Lattice Reduction, LR) 可对矩阵各列模值进行比较和约减迭代处理, 使变换后的矩阵各列尽可能正交等模, 用于 MIMO 预编码改进.

本文提出了一种 LR 辅助的 TH 预编码算法, 可获得较好的分集增益和误码率性能. 仿真表明, 该算法较现有 TH 预编码算法在性能上有较大提高, 算法复杂度也较小, 具有较高应用价值.

1 MIMO 系统结构

典型的点对点 MIMO 系统如图 1 所示. 系统包含 N_t 根发射天线和 N_r 根接收天线. 每对收发天线间对应一个 MIMO 子信道, 在收发天线间形成 $N_r \times N_t$ 维信道矩阵 H . 发送端将传输信号经空时编码形成的 N_t 个信息子流 $x = (x_1, x_2, \dots, x_{N_t})^T$ 由不同发射天线同时发送; 经无线传播后, 接收端从接收的混合信号矢量 $y = (y_1, y_2, \dots, y_{N_r})^T$ 中分离并解码出原发送各路子码信息流. 另外该系统也可通过增加收发端数量扩展为多用户 MIMO 系统.

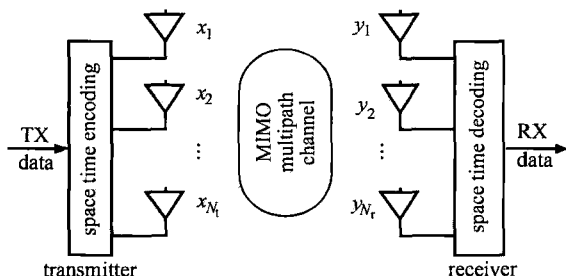


图 1 MIMO 系统结构

Fig. 1 Diagram of an MIMO system

2 MIMO 预编码准则

在点对多点广播信道中, 各用户因地理位置差异, 不能协同接收. 当接收信号存在干扰时, 也无法采用多用户检测等方法避免干扰, 因此解决无线 MIMO 广播信道多用户干扰问题主要采用预编码技术. 即通过发送端对信道矩阵的简单线性变形, 可将原来在接收端的处理搬到发送端, 从而简化接收机的复杂度. 该方法称为线性预编码技术^[3], 其在提高系统性能的同时, 极大降低了收端均衡器的复杂度. 迫零 (Zero Forcing, ZF)^[4] 和最小均方误差 (Minimum Mean Square Error, MMSE)^[5] 准则是预编码系统的两个基本准则. 其结构如图 2 所示.

信号 s 经预编码矩阵 W 处理, 发端预编码信号表示为

$$x = Ws. \quad (1)$$

因预编码矩阵 W 导致传输功率增大, 为了保持传输功率恒定, 将接收信号乘以缩放因子 β 的倒数作为功率补偿. 设 H 为信道矩阵, n 为噪声, 则在接收端, 接收数据为

$$y = (Hx + n)/\beta. \quad (2)$$

ZF 算法利用信道或其相关矩阵特性对矩阵分解, 将接收信号经 ZF 滤波矩阵恢复信号, 从而消除多天线相邻接收信号间的干扰. 设信道矩阵 H 列满秩, 则预编码矩阵 W_{ZF} 为

$$W_{ZF} = \beta_{ZF} \tilde{W}_{ZF} = \beta_{ZF} (H^H H)^{-1} H^H. \quad (3)$$

MMSE 算法则基于最大化输出信噪比 (信号与噪声及相邻时刻各组发射信号间干扰的比值) 考虑, 在抑制噪声和消除干扰之间寻找最佳平衡. 故该预编码矩阵经求解可得

$$W_{MMSE} = \beta_{MMSE} \tilde{W}_{MMSE} = \left(H^H H + \frac{\sigma^2}{P} I \right)^{-1} H^H. \quad (4)$$

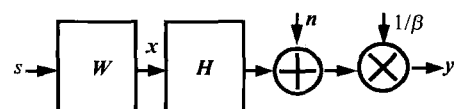


图 2 线性预编码结构

Fig. 2 Diagram of linear precoding

其中, 式 (3) 和式 (4) 中的缩放因子定义为

$$\beta = \sqrt{K/\text{trace}(\tilde{W}\tilde{W}^H)}. \quad (5)$$

式 (3)~(5) 中, β_{MMSE} 和 β_{ZF} 分别表示针对 MMSE 和 ZF 不同算法的缩放因子, $\text{trace}(\cdot)$ 为矩阵求迹, K 为发送端天线数, $\mathbf{I}$ 为标准单位矩阵, σ^2 为噪声方差, P 为发送信号功率.

3 MIMO 格约简 TH 预编码

3.1 TH 预编码

TH 预编码是一种采用功率分配方法获得较高信道容量或较低误码率的非线性预编码 [3]. 其结合取模操作和串行干扰消除技术, 基本思想是在发送端已知信道状态信息 (Channel State Information, CSI) 情况下, 利用有限反馈滤波器, 结合模数加法器, 消除多天线间干扰, 实现多用户 MIMO 数据传输. TH 预编码结构如图 3 所示, 图 3 中 mod 为整数取模运算, 以保证发射信号的功率限制 [3]; $\mathbf{w}$, $\mathbf{u}$, $\mathbf{r}$ 分别为算法流程结构中的临时矢量; $\mathbf{n}$ 为噪声矢量.

在预编码过程中, 前馈矩阵和反馈矩阵可以通过信道矩阵 $\mathbf{H}$ 的 QR 分解得到, 即

$$\mathbf{H} = \mathbf{S}\mathbf{F}^H. \quad (6)$$

其中, $\mathbf{F}$ 为酉矩阵, $\mathbf{S}$ 为下三角矩阵. 定义增益矩阵 $\mathbf{G}$, 其对角线元素与 $\mathbf{S}$ 矩阵对角线元素的倒数对应, 设 $s_{11}, s_{22}, \dots, s_{MM}$ 分别为 $\mathbf{S}$ 的第 1~ M 个对角元素, 则有

$$\mathbf{G} = \text{diag}(1/s_{11}, 1/s_{22}, \dots, 1/s_{MM}). \quad (7)$$

要得到对角线元素均为 1 的实际传输矩阵, 还需满足以下条件:

$$\mathbf{B} = \mathbf{S}\mathbf{G} = \mathbf{F}\mathbf{H}\mathbf{G}. \quad (8)$$

结合串行干扰消除思路, 对 TH 预编码发射信号进行

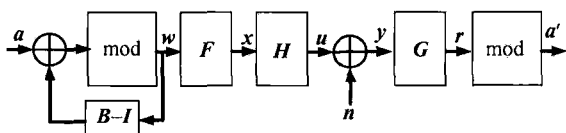


图 3 多用户系统 TH 预编码结构

Fig. 3 Diagram of TH precoding in the multiple user systems

干扰消除, 并利用取模运算限制信号幅值, 即

$$x_1 = a_1, \quad (9)$$

$$x_2 = (a_2 - b_{21}x_1) \bmod s_A, \quad (10)$$

...

$$x_K = \left(a_K - \sum_{j=1}^{K-1} b_{Kj}x_j\right) \bmod s_A. \quad (11)$$

其中, K 为发送端天线数; $\mathbf{a} = [a_1, a_2, \dots, a_K]^T$ 为信源信号矢量; $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_K]^T$ 为预编码信号矢量; b_{ij} 为矩阵 $\mathbf{B}$ 的元素; M 为调制信号阶数, 若 M 进制正交幅度调制 (QAM), 对于归一化功率的调制符号, 则 mod 操作数

$$s_A = 2\sqrt{2} \text{lb}M/(\sqrt{\text{lb}M} - 1). \quad (12)$$

取模运算目的是调整发射功率, 经 TH 预编码后, 信号不再位于星座点, 而是均匀分布于取点区域. 另经 TH 预编码后信号功率是未编码信号的 $M/(M-1)$ 倍.

此时接收端对应的接收信号

$$r_K = \sum_{k=1}^K b_{Kk}x_k + n_K = x_K + \sum_{k=1}^{K-1} b_{Kk}x_k + n_K. \quad (13)$$

取模运算后得到

$$a'_K = r_K \bmod s_A = (a_K + n_K) \bmod s_A. \quad (14)$$

式中, n_K 为接收符号 r_K 对应的附加噪声经增益矩阵 $\mathbf{G}$ 后的噪声. 故 TH 预编码也体现了功率分配思想.

3.2 TH 预编码的格约简改进

由于信道状态信息矩阵的非正交特性, 基于 ZF 和 MMSE 准则的预编码将干扰噪声放大, 增加了错误传播. 而 LR 辅助的预编码算法可以获得最大分集度 [6], 即利用 LR 算法对信道矩阵优化, 可使其列向量间具有更好的正交性且向量长度更短. 最近格点搜索分两个步骤实现. 第一步将已知格变换, 使其基矢量更短且更正交, 该过程即为 LR. 当格基矢量更正交时, 将加快格最近点的搜索速度. 第二步则在合理范围更正交的格中搜索最近点. LLL 算法 [7] 进一步降低了减格搜索的复杂度, 且无较大的性能损失 [8].

LLL 算法具有多项式复杂度的优势,基本过程主要分两步实现。(1) 规约基长度. 通过基矢量映射和加重减短基矢量。(2) 基矢量交换. 因格约简目的是使所有基矢量长度乘积最小, 但仅处理基矢量长度的减短并不能使所有基矢量长度的乘积最小, 而且长度越小的基矢量越在产生矩阵的后端. 如将所得矩阵基矢量较均匀排序, 即可减小基矢量长度乘积. 故该过程实质为一排序过程, 比较前后基矢量长度, 若后面基矢量较短, 将其与前面基矢量交换, 否则不进行处理. 经排序, 可将较短基矢量排到产生矩阵之前. 如果排序后基矢量又影响其长度特性, 再次循环依次执行上述两步骤, 直到所有基矢量满足特定收敛条件, 得到最后格约简后的基矢量.

根据上述原理, 该算法结构如图 4 所示. 算法核心是将信道矩阵 H 作为格基进行 LLL 格约减^[7] 处理, 得到一个新格基矩阵, 即

$$H_{\text{new}} = ZH. \quad (15)$$

式中, Z 为经 LLL 格约减处理的单模整数矩阵, 其矩阵元素均为整数, 且有 $\det(Z) = \pm 1$, 即其行列式的绝对值为 1; H_{new} 为各列向量准正交矩阵, 且根据 Z 矩阵性质, 其能量相对原信道矩阵 H 有额外增益. 因此在具体实现中还需要采用一个整数取模的非线性函数削弱发射能量. 因矩阵 H_{new} 近似正交, 可对其转置实现正交三角分解, 则有

$$H_{\text{new}}^H = (ZH)^H = QR. \quad (16)$$

此时, 接收信号 y 可表示为

$$y = (Hx + n)/\beta = HFw + n/\beta. \quad (17)$$

式中, β 为增益因子, 用于控制总发送功率. 且有

$$w = B^{-1}(r + d) = B^{-1}(Zu + d). \quad (18)$$

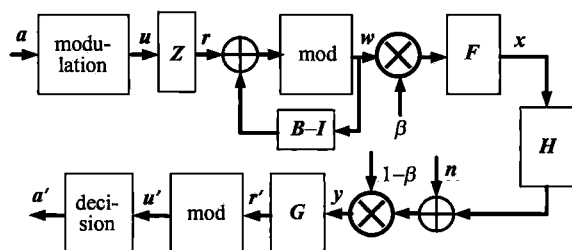


图 4 改进的 LLL 格约简 TH 预编码结构
Fig. 4 Diagram of improved LLL lattice reduction TH precoding

式中, $d = [d_1, d_2, \dots, d_K]^T$ 表示预编码矢量, $d_k \in \{2\sqrt{M}(d_I + id_Q) | d_I, d_Q \in \text{整数}\}$; 矩阵 B 待定. 由此, 接收信号又可表示为

$$y = HFB^{-1}(Zu + d) + n/\beta. \quad (19)$$

利用迫零方法, 使 $GHFB^{-1}Z = I$, 则可分别使矩阵 B 与矩阵 F 表示为

$$B = R^H H, \quad F = Q. \quad (20)$$

且其满足以下关系:

$$GHFB^{-1}Z = Z^{-1}R^H Q^H QH(R^H H)^{-1}Z = I. \quad (21)$$

综合上述关系, 接收后的矢量为

$$u' = \text{mod}(Gy) = \text{mod}[G(HFw + n/\beta)] = u + n'. \quad (22)$$

式中, Z 矩阵元素均为整数, 可通过整数取模运算消除预编码矢量 d 的影响, 进而通过对输出变量 u' 的判决, 可由解调恢复原输入数据. 另外对该信道矩阵的改进也将显著降低噪声放大, 即 n' 为 G/β 倍衰减后噪声. 同时由串行干扰消除环节排序, 优先消除较大干扰, 从而获得较高性能增益.

4 仿真与分析

在典型平坦衰落信道模型下, 仿真了典型 2 发 2 收 2×2 及 4 发 4 收 4×4 MIMO 预编码系统. 仿真参数如下: 信道矩阵随机产生, 满足高斯独立同分布条件, 均值为 0, 方差为 1; 噪声向量满足高斯分布, 均值为 0, 方差为 σ_n^2 ; 发送信号分别采用 QPSK 和 16QAM 调制. 以下分别仿真基于 ZF 和 MMSE 准则的非理想 MIMO 模型. 同时, 仿真采用 LLL 算法的 TH 预编码设计系统的 BER 性能, 并与基本 TH 预编码算法比较. 另外仿真图中的标号 ZF-TH, MMSE-TH, LLL-ZF-TH 和 LLL-MMSE-TH 分别表示基于 ZF 和 MMSE 准则的采用或不采用 LLL 的 TH 预编码算法. 4 种方法所得 2×2 和 4×4 MIMO 预编码系统的误比特率 (BER) 性能曲线分别如图 5 和图 6 所示.

图 5 和图 6 所示仿真结果表明, 在 QPSK 调制且误码率为 10^{-2} 时, 采用或不采用 LLL 的 TH 算法, MMSE 准则方案优于 ZF 准则方案, 均约

为 1 dB (2×2 MIMO) 和 0.3 dB (4×4 MIMO); 采用 LLL 的 TH 算法相对不采用 LLL 的 TH 算法, 性能都提升约 2 dB. 16QAM 仿真结果也类似, 在误码率 6×10^{-2} 时, 采用或不采用 LLL 的 TH 算法, MMSE 准则方案优于 ZF 准则方案, 均约为 0.2 dB (2×2 MIMO) 和 0.5 dB (4×4 MIMO); 但采用 LLL 的 TH 算法相对不采用 LLL 的 TH 算法性能仅提升约 0.3 dB (2×2 MIMO) 和 0.6 dB (4×4 MIMO). 因此针对 QPSK 调制的 LLL 格约简算法误码率性能改善较大, 而对 16QAM 调制不明显.

由上述仿真结果可知, 基于 MMSE 准则的 TH 预编码性能优于同参数基于 ZF 准则的方案. 原因是 MMSE 准则考虑了基于最大化输出信干噪比原

则, 在抑制噪声和消除干扰间找到两者的最佳平衡. 而由式 (3) 和式 (4) 所示, ZF 算法未利用噪声影响, 信号检测精度不足. 另外相对基于 ZF 和 MMSE 准则的基本 TH 预编码方法, 采用 LLL 算法的包含格约简 (LR) 的 TH 预编码 (LR-THP) 方法, 可有效降低 BER, 分集度也有较大提高, 并提升了抗干扰效果, 改进了传输可靠性. 原因是 LR-THP 采用串行干扰消除环节排序, 能够优先消除干扰较大的用户对被测信号的干扰. 此外在多用户环境下, LR-THP 除了在发送时对不同用户数据解耦而使每个用户接收信号中的干扰被抑制或消除, 还可让每个用户发送波束与其信道矢量匹配, 从而增强了每个用户接收的有效信号功率. 线性预编码仅达到前者要求, 无法使波束

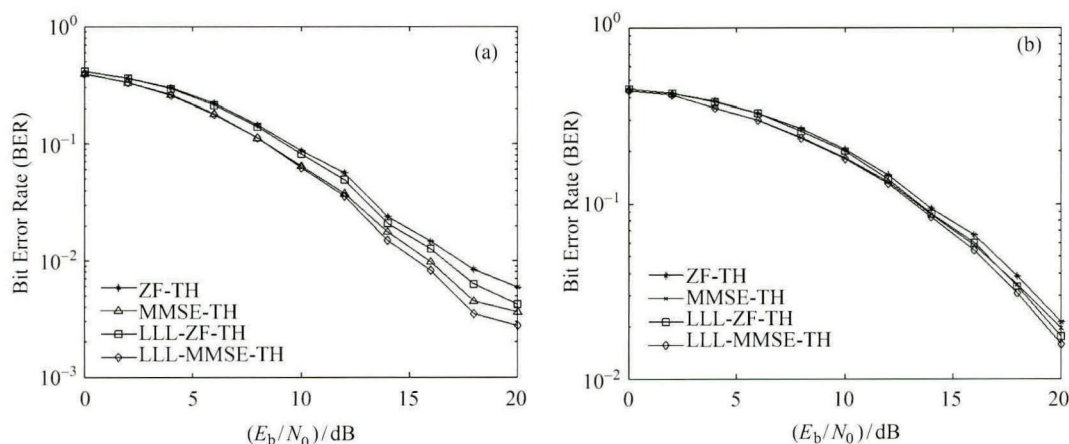


图 5 QPSK (a) 及 16QAM (b) 调制的 2×2 MIMO 预编码 BER 性能

Fig. 5 BER performance of the 2×2 MIMO precoding with QPSK (a) and 16QAM (b) modulation

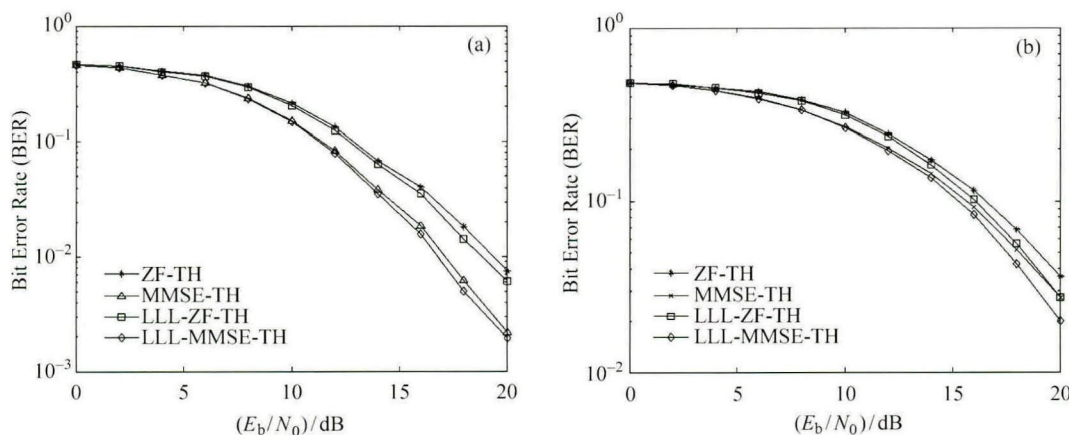


图 6 QPSK (a) 及 16QAM (b) 调制的 4×4 MIMO 预编码 BER 性能

Fig. 6 BER performance of the 4×4 MIMO precoding with QPSK (a) and 16QAM (b) modulation

与信道匹配, 导致其无法充分利用信道能量, 从而性能较差. 因此 LR-THP 性能明显优于无 LR 的 TH 预编码.

另外文献 [8] 已详细分析了 LLL 算法相对原算法的复杂度改进. 将格约简应用于 MIMO 检测时, 信道矩阵 H 可视为传输矩阵 B , 发送信号 x 可视为格系数矢量. 在接收端收到信号 y 可认为是 Hx 生成格点且加噪后的结果. 检测问题也转变为由格点 y 和矩阵 H 推算矩阵系数 x 的过程. 一个格可通过多个不同基表示. 例如将格生成矩阵 H 通过格约减, 得到一正交性更好矩阵 W' . 由其生成格点相对原 H 格点, 分布也更均匀, 可准确判决区域也更大, 误码率将显著下降, 且所需判决迭代次数也更少, 即可在有限计算复杂度下, 获得较好的格基约简. 另由文献 [8] 基于迭代次数 K 的复杂度分析可知, LLL 算法仅与传输矩阵 B 的基成多项式复杂度相关, 易于实现. 相应的数值仿真也表明了算法复杂度相对较低的优异结果 [8]. 由上可知, 本改进算法通过格约简处理, 复杂度有较大降低, 且性能略优于原 THP 算法, 因此在 MIMO 检测等方面非常实用.

5 结论

本文分析了 MIMO 系统中基于不同准则的预编码算法, 提出了改进的格约简 LR-TH 预编码, 且对所提方案误码性能进行了仿真与分析. 仿真表明了基于 MMSE 的预编码较基于 ZF 的预编码性能更优, 而基于 LLL-LR 的 TH 预编码可进一步提高系统性能并简化计算, 具有较好的应用价值. 另外,

MIMO 预编码的未来发展趋势也逐渐向降低反馈信息量, 适应非理想传输信道等方向发展, 故可进一步降低复杂度, 从而提高空间通信多天线空时 MIMO 信号检测性能.

参考文献

- [1] Kuo C C J, Tsai S H, Tadjpour L, *et al.* Precoding Technologies for Digital Communication System [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013:1-83. In Chinese (Kuo C C J, Tsai S H, Tadjpour L, *et al.* 数字通信系统预编码技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2013:1-83)
- [2] Sampath H, Paulraj A. Linear precoding for space-time coded systems with known fading correlations [J]. *IEEE Commun. Lett.*, 2002, 1(6):239-241
- [3] Windpassinger C, Fischer R F H, Vencel T, *et al.* Precoding in multi-antenna and multi-user communications [J]. *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 2004, 3(4):1305-1316
- [4] Andrea A N D, Mengali U, Reggiannini R. The modified Cramer Rao bound and its application to synchronization problems [J]. *IEEE Trans. Commun.*, 1994, 42(2):1391-1399
- [5] Liu J, Zhang J K, Wong K M. On the design of minimum BER linear space-time block codes for MIMO systems equipped with MMSE receivers [J]. *IEEE Trans. Signal Proc.*, 2006, 54(8):3147-3158
- [6] Christoph W, Robert F H, Johannes B H. Lattice reduction aided broadcast precoding [J]. *IEEE Trans. Commun.*, 2004, 52(12):2057-2060
- [7] Lenstra A K, Lenstra H W, Lovász L. H Factoring polynomials with rational coefficients [J]. *Math. Ann.*, 1982, 261(4):515-534
- [8] Wübben D, Seethaler D, Jaldén J, *et al.* Lattice reduction—A survey with applications in wireless communications [J]. *IEEE Signal Proc. Mag.*, 2011, 50(5):70-91

《空间科学学报》第七届编辑委员会

Editorial Committee of Chinese Journal of Space Science

主 编 (Editor in Chief) 刘振兴 (LIU Zhenxing)

顾 问 (Advisors) A Nishida G Haerendel M G Kivelson Winghuen Ip (叶永焯) Shitsan WU (吴式灿)

常务副主编 (Executive Deputy Editor in Chief) 吴 季 (WU Ji)

副主编 (Deputy Editor in Chief)

顾逸东 (GU Yidong)

Joe KAN (甘如石)

刘秋生 (LIU Qiusheng)

欧阳自远 (OUYANG Ziyuan)

濮祖荫 (PU Zuyin)

孙辉先 (SUN Huixian)

王 赤 (WANG Chi)

肖 佐 (XIAO Zuo)

编 委 (Members of Editorial Committee)

曹晋滨 (CAO Jinbin)

常 进 (CHANG Jin)

陈洪滨 (CHEN Hongbin)

陈 耀 (CHEN Yao)

代树武 (DAI Shuwu)

邓晓华 (DENG Xiaohua)

董晓龙 (DONG Xiaolong)

窦贤康 (DOU Xiankang)

丰美福 (FENG Meifu)

冯学尚 (FENG Xueshang)

龚建村 (GONG Jiancun)

韩建伟 (HAN Jianwei)

胡红桥 (HU Hongqiao)

胡小平 (HU Xiaoping)

胡友秋 (HU Youqiu)

荆武兴 (JING Wuxing)

李春来 (LI Chunlai)

李俊峰 (LI Junfeng)

李海涛 (LI Haitao)

李莹辉 (LI Yinghui)

林宝军 (LIN Baojun)

刘立波 (LIU Libo)

陆全明 (LU Quanming)

罗 俊 (LUO Jun)

吕达仁 (LÜ Daren)

孟 新 (MENG Xin)

史建魁 (SHI Jiankui)

涂传治 (TU Chuanyi)

万卫星 (WAN Weixing)

汪卫华 (WANG Weihua)

王 超 (WANG Chao)

王焕玉 (WANG Huanyu)

王劲松 (WANG Jingsong)

王世金 (WANG Shijin)

王志刚 (WANG Zhigang)

魏奉思 (WEI Fengsi)

吴 健 (WU Jian)

解京昌 (XIE Jingchang)

熊华钢 (XIONG Huagang)

徐寄遥 (XU Jiyao)

徐文耀 (XU Wenyao)

颜毅华 (YAN Yihua)

杨惠根 (YANG Huigen)

易 帆 (YI Fan)

袁 洪 (YUAN Hong)

张东和 (ZHANG Donghe)

张绍东 (ZHANG Shaodong)

张效信 (ZHANG Xiaoxin)

赵光恒 (ZHAO Guangheng)

赵和平 (ZHAO Heping)

赵建福 (ZHAO Jianfu)

周国成 (ZHOU Guocheng)

宗秋刚 (ZONG Qiugang)

Xinlin LI (李忻璘)

Yunchow WHANG (黄云潮)

Paul SONG (宋 普)

Leung TSANG (曾 亮)

Tielong ZHANG (张铁龙)

Jihkwin CHAO (赵寄昆)

空 间 科 学 学 报

(双月刊, 1981 年创刊)

第 35 卷 第 4 期 2015 年 7 月出版

Chinese Journal of Space Science

(Bimonthly, Started in 1981)

Vol.35

No.4

July 2015

编 辑 ©《空间科学学报》编委会

地址: 北京 8701 信箱 邮政编码: 100190

电话: 010-62582788

网址: <http://www.cjss.ac.cn>

E-mail: cjss@nssc.ac.cn

主 编 刘振兴

主管单位 中国科学院

主 办 中国科学院空间科学与应用研究中心

中国空间科学学会

出 版 科 学 出 版 社

印刷装订 北京中科印刷有限公司

总 发 行 科 学 出 版 社

地址: 北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717 电话: 010-64017032

E-mail: sales_journal@mail.sciencep.com

国外发行 中国国际图书贸易总公司

地址: 北京 399 信箱 邮政编码: 100044

广告经营许可证 京东工商广字 0034 号

Edited by

Editorial Board of Chinese Journal of Space Science

Add: P.O. Box 8701, Beijing 100190, China

Tel: 010-62582788

Web: <http://www.cjss.ac.cn>

E-mail: cjss@nssc.ac.cn

Editor-in-Chief

LIU Zhenxing

Superintended by

Chinese Academy of Sciences

Sponsored by

Center for Space Science and Applied Research,

Chinese Academy of Sciences

Chinese Society of Space Research

Published by

Science Press

Printed by

Beijing Zhongke Printing Limited Company

Distributed by

Science Press

Add: 16 Donghuangchenggen North Street,

Beijing 100717, China Tel: 010-6403456

E-mail: journal@cspg.net

Foreign

China International Book Trading Corporation

Add: P.O. Box 399, Beijing 100044, China

国内统一刊号: CN 11-1783/V

国内邮发代号: 2-562

国外发行代号: BM608

定价: 50.00 元

国内外公开发刊

ISSN 0254-6124



9 770254 612151