

基于格基约减的水下成像光 MIMO 预编码研究

张依涛^{1,2} 陈晓^{2,3*} 李燕龙^{1,2} 符杰林^{1,2}

¹(桂林电子科技大学信息与通信学院 广西 桂林 541004)

²(桂林电子科技大学认知无线电与信息处理教育部重点实验室 广西 桂林 541004)

³(桂林电子科技大学艺术与设计学院 广西 桂林 541004)

摘要 针对水下成像光 MIMO 系统子信道间相关性强的问题,提出一种基于格基约减最小均方误差预编码算法。通过将接收端的最小均方误差检测操作转化为发送端的预编码,解决了传统光 MIMO 线性检测算法对噪声的放大问题,并利用格基约减后正交性更好的信道矩阵求解预编码矩阵,降低了光 MIMO 系统子信道间的相关性。仿真结果表明,在误码率为 10^{-4} 数量级时,与传统光 MIMO 检测算法相比,采用格基约减预编码算法的系统获得了 5 dB 的信噪比增益。

关键词 水下光通信 成像多输入多输出系统 格基约减 预编码

中图分类号 TN929.1 TP3 文献标志码 A DOI:10.3969/j.issn.1000-386x.2024.08.017

PRECODING FOR UNDERWATER OPTICAL LIGHT MIMO SYSTEM BASED ON LATTICE REDUCTION

Zhang Yitao^{1,2} Chen Xiao^{2,3*} Li Yanlong^{1,2} Fu Jielin^{1,2}

¹(School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, Guangxi, China)

²(Ministry of Education Key Laboratory of Cognitive Radio and Information Processing, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, Guangxi, China)

³(School of Art and Design, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, Guangxi, China)

Abstract Aimed at the problem that the great spatial correlation between sub-channels of the underwater visible light MIMO system, a precoding algorithm based on lattice reduction is proposed. By transforming the MMSE detection operation at the receiving end into the precoding at the transmitter, the problem of noise amplifying of the traditional optical MIMO linear detection algorithm was solved, and the channel matrix with better orthogonality after the lattice reduction was used to obtain the precoding matrix, which reduced correlation between sub-channels of optical MIMO system. The simulation results show that, at the BER of 10^{-4} , compared with the traditional optical MIMO detection algorithm, the system using the lattice reduction precoding algorithm obtains an SNR gain of 5 dB.

Keywords Underwater optical communication Imaging MIMO system Lattice reduction Precoding

0 引言

近年来,水下可见光通信(Underwater Wireless Optical Communication, UWOC)以高速率、低延时、低成本等优势成为一种非常具有应用前景的水下无线通信

方案。UWOC 采用蓝绿光发光二极管(Light Emitting Diode, LED)作为光源,但由于 LED 的调制带宽有限且水下环境复杂,单个 LED 无法满足高速通信的需求,因此采用多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)技术来提升系统容量,实现高速数据传输。

由于水下可见光 MIMO 技术采用强度调制/直接

检测(Intensity Modulation/Direct Detection, IM/DD)的方式,并且随着 LED 数量的逐渐增加,可见光通信(Visible Light Communication, VLC)系统将具有很强的信道相关性,导致 MIMO 信道矩阵秩缺,造成信号间的干扰,使系统难以获得较高的复用增益。目前已有许多降低 MIMO 信道空间相关性的研究。文献[1]在检测器前放置一个成像透镜,可以分离来自不同 LED 的信号。但在接收端,当所成的像出现重叠时,信号间仍然存在干扰。还有一些研究采用角度分集^[2]、优化阵元法向量倾斜角度^[3]、设置链路阻塞^[4]等手段,通过改变收发机阵列物理结构以减小信道相关性。

以上手段通过添加光学器件和优化阵列结构降低信道相关性,在器件尺寸以及普适性方面存在局限性。另一类方法则是通过信号处理的方法降低信道相关性。空间调制技术^[5-6]通过每次仅采用部分 LED 传输信息的方式来减少码间干扰,实现较为简单,但极大限制了系统容量的提升。格基约减(Lattice Reduction, LR)算法作为在多项式时间内有效减小信道相关性的信号处理手段,在 2002 年被提出并应用于 MIMO 系统信号检测^[7]。在接收端进行信号检测之前对信道矩阵进行格基约减操作以降低信道相关性,以提高信号检测性能。之后有很多关于基于格基约减的信号检测方法的研究^[8-9],但均是格基约减与线性检测算法结合在接收端的应用。传统的线性检测算法在收端利用信道矩阵求解检测矩阵,再通过对接收信号进行线性变换恢复发送信号^[10],虽然复杂度较低,但接收端线性检测矩阵放大了噪声,使得系统误码性能下降。

针对以上问题,本文基于发送端已知信道信息,将收端的线性检测操作转化为发端的预编码,进一步将线性预编码与格基约减过程进行结合,提出了适用于水下成像光 MIMO 系统的格基约减-最小均方误差(Lattice Reduction-Minimum Mean Square Error, LR-MMSE)预编码算法。首先在发送端对信道矩阵进行格基约减操作,改善等效信道矩阵的正交性,减小系统受水下光 MIMO 信道较强相关性的影响,再根据约减后的信道矩阵进行 MMSE 预编码,解决收端线性检测带来的噪声放大问题。本文仿真分析了不同信道相关性条件下系统的误码性能,并验证了格基约减预编码算法对于系统性能的改善。

1 水下成像光 MIMO 系统及信道模型

1.1 系统模型

本文采用的 2×2 水下成像光 MIMO 系统模型如

图 1 所示。

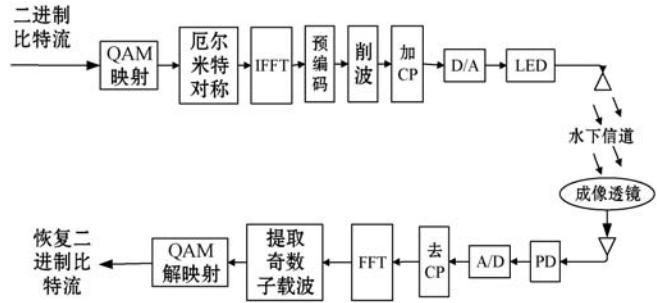


图 1 水下成像 MIMO 系统框图

本文采用非对称限幅-正交频分复用(Asymmetrically Clipped Optical-Orthogonal Frequency Division Multiplexing, ACO-OFDM)调制作作为光调制技术。在发送端二进制串行数据流转化为并行数据,并行数据流经过正交幅度调制(Quadrature Amplitude Modulation, QAM)映射到星座点上。因为光强信号有非负实数的限制,因此在快速傅里叶逆变换(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT)前,进行厄尔米特变换以保证 IFFT 后信号为实数,并且所有偶数子载波插入 0 值,即信号调制在奇数子载波上。IFFT 变换后进行削波以保证信号的非负性。随后根据信道条件对信号进行预编码以抵消信道对接收信号的干扰。用调制好的信号驱动 LED 发射光信号,经过海水信道传输到接收端。接收端信号经过成像透镜后成像到检测器上,光电探测器将检测到的光信号转换为电信号,经过 OFDM 解调后,根据信道估计得到的信道矩阵进行信号检测及解码操作,以恢复原数据信息。

将成像 MIMO 预编码系统模型简化为图 2。

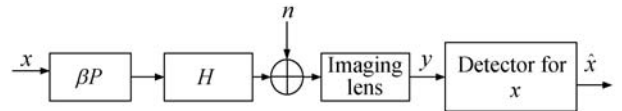


图 2 成像 MIMO 预编码系统模型

假设系统发送端已知信道状态信息,则接收端接收信号为:

$$y = \beta \cdot H \cdot P \cdot x + n \quad (1)$$

式中: P 为由预编码算法得出的预编码矩阵。 n 是均值为 0, 方差为 σ^2 的高斯噪声矢量。 β 为发送信号功率控制因子,以保证预编码前后发送信号功率相同,可由式计算得出:

$$\beta = \sqrt{E(\|x^2\|)/E(\|Px\|^2)} \quad (2)$$

1.2 水下成像光 MIMO 信道模型

根据广泛使用的比尔朗伯定律(Beer-Lambert Law)来描述光在水中的衰减效应。

$$I = I_0 e^{-c(\lambda)l} \quad (3)$$

式中: I 表示出射光的辐照度; I_0 表示原始入射光的辐

照度; $c(\lambda)$ 为光衰减系数; l 为通信链路距离。根据文献[11]中的水下成像 MIMO 信道直射链路模型,则水下可见光成像 MIMO 系统的信道增益可表示为:

$$h_{i,j} = a_{ij} h'_{ij} \quad (4)$$

式中: h'_{ij} 表示当检测器在成像透镜的位置时,第 j 个 LED 到第 i 个 PD 之间的非成像信道增益。 a_{ij} 为第 j 个 LED 在第 i 个 PD 上的成像面积占第 j 个 LED 总成像面积的比例。 h'_{ij} 可由式(5)给出。

$$h'_{ij} = \eta_i \eta_c \eta_r \frac{m+1}{2\pi} \exp(-c(\lambda)u) \cos^m(\phi_{ij}) A_{eff}(u, \psi_{ij}) \quad (5)$$

式中: u 为 LED 到成像透镜距离, m 为朗伯辐射系数, A_{eff} 为检测器的有效接收面积。

2 基于格基约减的预编码算法

2.1 格基约减算法

格基约减算法可以解决格理论中近似最短向量问题^[12],1982年 Lenstra 等^[13]提出了 LLL(Lenstra, Lenstra, Lovasz)格基约减算法,能够在多项式时间内找到格中一个近似最短向量。

在格理论中,格是由一系列有规律排列的离散点组成的,一个 m 维的格定义为:

$$L(\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2, \dots, \mathbf{b}_m) = \sum_{i=1}^m t_i \mathbf{b}_i \quad t_i \in \mathbf{Z} \quad (6)$$

式中: $(\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2, \dots, \mathbf{b}_m)$ 称为格 L 的一组基,基向量间两两独立,基向量间的整数线性组合构成了格。

格的基矩阵不是唯一的,即一个格可以用不同的基向量来表示。格基约减就是在不改变格的前提下,将原来的基变成一组长度更短、正交性更好的基向量。因此在 MIMO 系统中,将 MIMO 信道矩阵 \mathbf{H} 看作一组基向量,通过格基约减将 \mathbf{H} 约减为正交性更好的新信道矩阵 $\tilde{\mathbf{H}}$,降低等效信道的相关性,以提升系统性能,并且有 $\tilde{\mathbf{H}} = \mathbf{H}\mathbf{T}$,约减矩阵 \mathbf{T} 为幺模矩阵,即 \mathbf{T} 的行列式值为 ± 1 。

格基约减算法有 LLL 算法、Burn 算法、Seysen 算法等,本文中选用复杂度较低并且适用于实数信道矩阵的 LLL 格基约减算法。LLL 算法是通过矩阵的列向量进行一系列交换和约减操作,直到达到停止迭代的条件,完成矩阵的约减。

LLL 约减基的条件为:

$$|\mu_{i,j}| \leq \frac{1}{2} \quad 1 \leq j < i \leq m \quad (7)$$

$$\delta \|\mathbf{b}_{l-1}^*\|^2 \leq \|\mathbf{b}_l^*\|^2 + \mu_{l,l-1}^2 \|\mathbf{b}_{l-1}^*\|^2 \quad l=2,3,\dots,m \quad (8)$$

式中: $\mu_{ij} = \frac{\mathbf{b}_i^H \mathbf{b}_j^*}{\|\mathbf{b}_j^*\|^2}$ 为施密特正交化系数, \mathbf{b}_j^* 为基向量 \mathbf{b}_j

所对应的施密特正交化基向量, δ 为 LLL 算法约减系数,满足 $0.25 < \delta \leq 1$,考虑到约减效果与算法复杂度的折中,一般取 $\delta = 0.75$ 。

LLL 算法约减过程如图 3 所示。

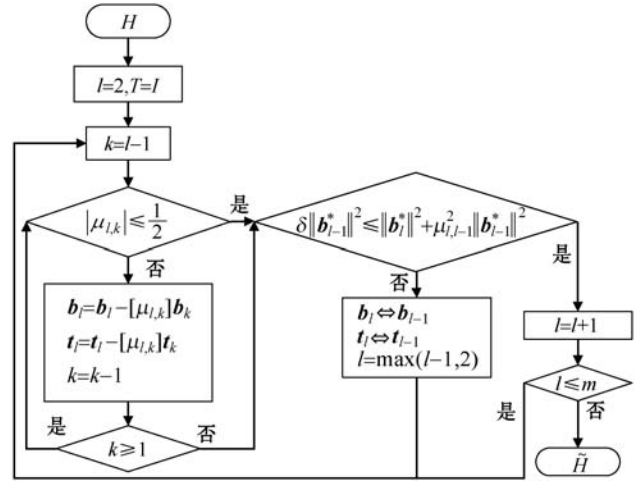


图 3 格基约减算法流程

2.2 LR-MMSE 预编码

假设系统发送端已知信道状态信息,与接收端 MMSE 信号检测算法类似,MMSE 预编码基于最小均方误差准则,使收发信号间的均方误差最小化。接收信号为:

$$\mathbf{y} = \beta_{\text{MMSE}} \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{P}_{\text{MMSE}} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (9)$$

则最小均方误差准则可表示为:

$$\min E[\|\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x}\|^2] = \min E[\|\mathbf{y}/\beta_{\text{MMSE}} - \mathbf{x}\|^2] = \min E[\|\mathbf{H}\mathbf{P}_{\text{MMSE}}\mathbf{x} + \mathbf{n}/\beta_{\text{MMSE}} - \mathbf{x}\|^2] \quad (10)$$

对 $E[\|\mathbf{H}\mathbf{P}_{\text{MMSE}}\mathbf{x} + \mathbf{n}/\beta_{\text{MMSE}} - \mathbf{x}\|^2]$ 进行展开,令其导数为 0,计算得到的预编码矩阵为:

$$\mathbf{P}_{\text{MMSE}} = \mathbf{H}^H (\mathbf{H}\mathbf{H}^H + \sigma^2 \mathbf{I})^{-1} \quad (11)$$

在传统 MMSE 预编码的基础上,本文进一步在发送端将格基约减与 MMSE 预编码算法结合,减小 MIMO 子信道空间相关性强的影响。

对 \mathbf{H} 的转置 \mathbf{H}^H 进行格基约减,得到新的信道矩阵 $\tilde{\mathbf{H}} = \mathbf{H}^H \mathbf{T}$,并改变最小均方误差预编码矩阵的形式,优化的 LR-MMSE 预编码矩阵为:

$$\tilde{\mathbf{P}}_{\text{LR-MMSE}} = \tilde{\mathbf{H}} (\tilde{\mathbf{H}}^H \tilde{\mathbf{H}} + \sigma^2 \mathbf{I})^{-1} \quad (12)$$

经过 LR-MMSE 预编码算法后的接收信号为:

$$\mathbf{y} = \beta_{\text{LR-MMSE}} \cdot \mathbf{H} \cdot \tilde{\mathbf{P}}_{\text{LR-MMSE}} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{n} = \beta_{\text{LR-MMSE}} \cdot \mathbf{H} \cdot \tilde{\mathbf{H}} (\tilde{\mathbf{H}}^H \tilde{\mathbf{H}} + \sigma^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (13)$$

发送信号功率约束因子为:

$$\beta_{\text{LR-MMSE}} = \sqrt{E(\|\mathbf{x}\|^2) / E(\|\tilde{\mathbf{P}}_{\text{LR-MMSE}} \mathbf{x}\|^2)} \quad (14)$$

在接收端需要对接收信号除乘解码矩阵 $\mathbf{G}_{\text{LR-MMSE}}$ 来恢复发送信号:

$$\hat{\mathbf{x}}_{\text{LR-MMSE}} = \mathbf{G}_{\text{LR-MMSE}} \mathbf{y} = \mathbf{T}^H / \beta_{\text{LR-MMSE}} \cdot \mathbf{y} \quad (15)$$

3 仿真结果与性能分析

本文用 MATLAB 软件仿真分析了格基约减预编码算法对港口水环境下 2×2 成像光 MIMO 系统的误码率性能的改善效果,通过改变 LED 间距以获得具有不同相关性的信道矩阵。所采用的水下可见光成像 MIMO 系统各项参数如表 1 所示。

表 1 系统及信道参数

参数	数值
LED 半功率角/ $^\circ$	60
LED 直径/cm	20
PD 直径/cm	20
水中光衰减系数	2.17
通信链路距离/m	2
成像透镜焦距/m	0.1
发射机效率	0.128 9
接收机效率	0.950 0
海水信道效率	1

图 4 为采用 MMSE 预编码算法与采用基于格基约减的预编码算法的系统误码性能对比图。可以看出,LR-MMSE 预编码算法通过降低信道相关性减少了接收信号间的干扰,系统误码率低于仅采用 MMSE 预编码的系统。

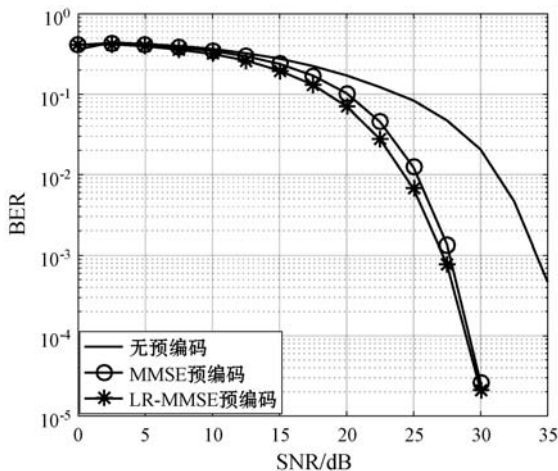


图 4 LR-MMSE 预编码与 MMSE 预编码系统误码率对比

图 5 为采用奇异值分解 (Singular Value Decomposition, SVD) 预编码算法、LR-MMSE 预编码算法、MMSE 预编码算法、LR-MMSE 检测算法与无预编码仅在收端采用 MMSE 检测的系统误码性能对比图。可以看出,由于检测矩阵对噪声的放大,在发送端采用线性预编码算法的系统误码率低于在接收端采用相应线性检测算法的系统误码率,在误码率为 10^{-4} 时,LR-

MMSE 线性预编码算法相比 LR-MMSE 线性信号检测算法约有 2 dB 的信噪比增益。并且在接收端加入格基约减,使得 MMSE 预编码算法性能进一步提升,系统误码率降低。

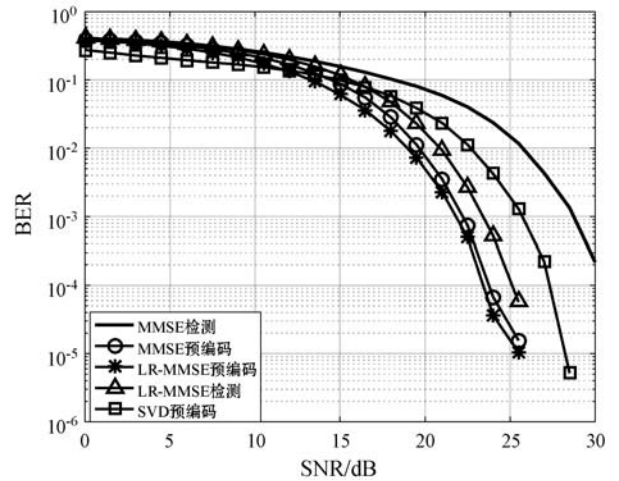


图 5 不同预编码算法与 LR-MMSE 检测误码率性能对比

进一步本文仿真了加入格基约减的预编码与检测算法的水下成像光 MIMO 系统在不同相关性信道下的误码率 (Bit Error Rate, BER) 随信噪比 (Signal Noise Ratio, SNR) 的变化,如图 6 所示。可以看到,格基约减预编码算法在相关性较大的信道条件下对系统误码性能的改善程度有所提升,并且当信道矩阵条件数为 1 时,由于此时信道相关性最小,格基约减算法无法进一步改善信道相关性,此时加入格基约减算法不能优化系统误码性能。因此当信道存在一定的相关性时,格基约减预编码算法可以有效减小信道相关性,提升系统误码性能。

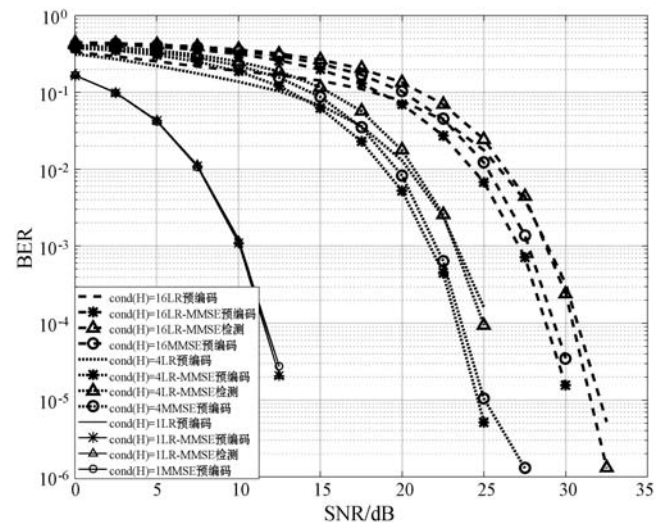


图 6 不同相关性信道下系统误码率性能对比

同时,LLL 算法复杂度取决于于矩阵列交换的次数,复杂度为 $O(N_i^4 \log B)$,其中 B 为信道矩阵最长向量长度^[14]。因此在二维情况下,格基约减算法具有很低的复杂度。在高维情况下,可以适当增大参数 δ 的值以

平衡系统复杂度与系统误码性能,并且采用排序 QR 分解能够有效减少列交换次数从而减小系统复杂度。

4 结 语

传统 MIMO 接收端线性检测算法受到噪声放大影响导致系统性能下降,因此本文将收端的信号检测操作转化为发端预编码以减小噪声放大效应。同时由于水下环境的复杂性以及光信号的强度调制/直接检测的调制方式,水下可见光 MIMO 信道存在较强相关性,如何减小信道相关性对 MIMO 系统至关重要。在 MIMO 预编码基础上,本文进一步采用格基约减算法,能够有效增强 MIMO 信道矩阵正交性,解决水下成像光 MIMO 信道间相关性强导致系统误码率高的问题。在 BER 为 10^{-4} 数量级时,与仅采用传统 MIMO 信号检测算法相比,在发射端采用格基约减预编码算法使得水下 2×2 成像光 MIMO 系统获得 5dB 的 SNR 增益。并且本文通过仿真不同信道相关性下格基约减预编码算法对系统误码率的影响,证明了格基约减算法在信道相关性较强的环境下可以有效提升系统误码性能。

参 考 文 献

- [1] Wang T Q, Sekercioglu Y A, Armstrong J. Analysis of an optical wireless receiver using a hemispherical lens with application in MIMO visible light communications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(11): 1744 – 1754.
- [2] Wang T Q, He C, Armstrong J. Performance analysis of aperture-based receivers for MIMO IM/DD visible light communications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 35(9): 1513 – 1523.
- [3] Nuwanpriya A, Ho S W, Chen C S. Indoor MIMO visible light communications: Novel angle diversity receivers for mobile users[J]. IEEE Journal on selected areas in communications, 2015, 33(9): 1780 – 1792.
- [4] Fath T, Haas H. Performance comparison of MIMO techniques for optical wireless communications in indoor environments[J]. IEEE Transactions on Communications, 2012, 61(2): 733 – 742.
- [5] Özkoç M F, Koca M, Sari H. Spatial modulation with signature constellations for increased robustness to antenna and channel correlations[J]. Physical Communication, 2020, 39: 100984.
- [6] Bhowal A, Kshetrimayum R S. Optical improved quadrature spatial modulation for cooperative underwater wireless communication under weak oceanic turbulence conditions[J]. IET Optoelectronics, 2020, 14(6): 434 – 439.
- [7] Yao H, Wornell G W. Lattice-reduction-aided detectors for MIMO communication systems[C]//Global Telecommunications Conference. IEEE, 2002: 424 – 428.
- [8] Ghodhbane J, Boujnah N, Bouallegue R. Performance of lattice reduction aided equalization for MIMO and phased array FBMC system[C]//2020 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC). IEEE, 2020: 2033 – 2038.
- [9] Li L, Zhang T, Hu G J. Complex lattice reduction aided detection for mode-division multiplexing systems with mode dependent loss and differential mode group delay[J]. Optics Communications, 2019, 442: 65 – 70.
- [10] Wang Z. Massive MIMO detection algorithms based on MMSE-SIC, ZF-MIC, Neumann Series Expansion, Gauss-Seidel, and Jacobi Method[C]//Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2020, 1438(1): 012006.
- [11] Li Y, Qiu H, Chen X, et al. Spatial correlation analysis of imaging MIMO for underwater visible light communication[J]. Optics Communications, 2019, 443: 221 – 229.
- [12] Yasuda M. Self-dual DeepBKZ for finding short lattice vectors[J]. Journal of Mathematical Cryptology, 2020, 14(1): 84 – 94.
- [13] Lenstra A K, Lenstra H W, Lovász L. Factoring polynomials with rational coefficients[J]. Mathematische Annalen, 1982, 261: 515 – 534.
- [14] Lee H, Cho M, Oh K, et al. Low-Latency lattice reduction based on dual-basis updates for high-dimensional MIMO streams[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2020, 67(12): 2993 – 2997.

(上接第 100 页)

- [17] 韦盛斌,王少卿,周常河,等.用于三维重建的点云单源性迭代最近点配准算法[J].光学学报,2015,35(5):244 – 250.
- [18] 黄建.基于迁移学习的脑电信号分类算法研究[D].广州:华南理工大学,2018.
- [19] 娄晓光,陈兰岚,宋振振.基于多源域迁移学习的脑电情感识别[J].计算机工程与设计,2020,41(7):2011 – 2018.
- [20] 卢官明,丛文康,魏金生,等.基于 CNN 和 LSTM 的脑电信号情感识别[J].南京邮电大学学报(自然科学版),2021,41(1):58 – 64.
- [21] 黄泽滨.基于深度学习的脑电信号情绪识别方法研究[D].广州:华南理工大学,2020.
- [22] Wu X, Zheng W L, Lu B L. Identifying functional brain connectivity patterns for EEG-based emotion recognition[C]//9th International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering,2019:235 – 238.
- [23] Yang Y M, Wu Q M, Zheng W L. EEG-based emotion recognition using hierarchical network with subnetwork nodes[J]. IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems,2018,10(2):408 – 419.