

引用本文: 陈超, 邵宇丰, 王安蓉, 等. 格基约减技术在可见光 MIMO 通信系统中的应用[J]. 光通信技术, 2025, 49(1): 6-11.

格基约减技术在可见光 MIMO 通信系统中的应用

陈超¹, 邵宇丰^{1,2*}, 王安蓉¹, 胡文光¹, 柳海楠¹, 李文臣¹, 杨林婕¹, 张颜鹭¹

(1. 重庆三峡学院 电子与信息工程学院, 重庆 404100; 2. 嘉兴大学 信息科学与工程学院, 浙江 嘉兴 314001)

摘要: 针对室内多输入多输出可见光通信系统中收发端密集化布局可能引发的信道间强相关性问题, 进而产生信道间干扰, 严重影响通信质量。为了应对这一挑战, 提出将格基约减技术应用于室内可见光通信系统中。通过实施对可见光信道的约减操作, 以降低信道间的相关性, 并应用该约减后的信道矩阵, 结合迫零准则和最小均方误差准则, 在发射端进行预编码设计。仿真实验结果表明: 应用格基约减技术可以有效改善室内可见光信道正交性, 且收发机数目越多, 信道相关性改善效果越明显; 而应用迫零准则和最小均方误差准则, 可以有效提升系统误码率性能。

关键词: 可见光通信; 信道; 格基约减; 预编码; 误码率

中图分类号: TN929.12 文献标志码: A 文章编号: 1002-5561(2025)01-0006-06

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.01.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Application of lattice basis reduction techniques in visible light MIMO communication system

CHEN Chao¹, SHAO Yufeng^{1,2*}, WANG Anrong¹,

HU Wenguang¹, LIU Hainan¹, LI Wenchen¹, YANG Linjie¹, ZHANG Yanlu¹

(1. College of Electronics and Information Engineering, Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404100, China;

2. College of Information Science and Engineering, Jiaxing University, Jiaxing Zhejiang 314001, China)

Abstract: Regarding the strong correlation between channels that may be caused by dense layouts of transmitters and receivers in indoor multiple-input multiple-output visible light communication systems, which can lead to inter-channel interference and significantly affect communication quality, a challenge that is addressed by proposing the application of lattice basis reduction techniques to indoor visible light communication systems. By implementing a reduction operation on the visible light channel to reduce the correlation between channels, and applying the reduced channel matrix, combined with the zero forcing criterion and the minimum mean square error criterion, precoding design is carried out at the transmitting end. The simulation experiment results show that the application of lattice reduction technology can effectively improve the orthogonality of indoor visible light channels, and the more transceivers there are, the more obvious the improvement effect on channel correlation. The application of zero forcing criterion and minimum mean square error criterion can effectively improve the system's error rate performance.

Key words: visible light communication, channel, lattice basis reduction, precoding, bit error rate

收稿日期: 2024-07-27。

基金项目: 国家自然科学基金项目(61107064)资助; 重庆市教委科学技术研究计划重大资助项目(KJZD-M201901201)资助; 重庆市三峡库区地质环境监测与灾害预警重点实验室开放基金重大项目(ZD2020A0104)资助。

作者简介: 陈超(1999—), 男, 江西抚州人, 硕士研究生, 主要研究方向为可见光通信技术, 参与了省部级项目“面向室内大数据接入的多色复用可见光信号收发机及传输技术研究”。

*** 通信作者:** 邵宇丰(1977—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为下一代宽带接入系统、光载无线通信、人工智能辅助高级信号处理。



0 引言

可见光通信(VLC)技术能够有效地将室内照明与无线通信功能相结合, 且易于与发光二极管(LED)集成, 具备大带宽、绿色安全等优点, 因此被认为是第六代(6G)无线通信系统中一项重要的补充技术^[1-2]。VLC系统常采用多输入多输出(MIMO)技术通过扩展物理信道的空间维度来增加信道容量, 从而提高数据传输速率。然而, 当采用LED阵列形式的光发射机时, 由于各发射单元之间的布局紧凑或辐射模式高度重叠, 容易导致信道间的强相关性。这不仅限制了MIMO技术

优势的发挥,还可能引发信道间干扰,进而影响系统的整体性能^[3]。预编码技术在 VLC 系统中被用作一种有效的方法,以消除或减弱信道间的干扰,并且有助于简化系统硬件配置,降低复杂度^[4-5]。PHAM T V 等人^[6]在室内 VLC 通信场景下考虑所有用户最小速率最大化、最大-最小公平性原则和非负信号约束问题,设计了最佳迫零(ZF)预编码矩阵。KROHN A 等人^[7]提出将发射机侧的 ZF 预编码技术与接收机侧的液晶滤波器像素模式选择相结合,并利用遗传算法进行优化。该方法旨在通过混合迭代优化来提升所有用户的总速率。ALI Z 等人^[8]采用卡罗需-库恩-塔克(KKT)方法,将合速率最大化的问题转化为一个凸优化问题进行求解。所设计的最小均方误差(MMSE)预编码器,在性能上超越了最大比传输和正则化迫零预编码方案。上述研究主要依据不同的设计标准来设计预编码方案,并未从降低 VLC 相关性的角度来进行预编码设计。而在传统无线通信系统中,格基约减(LR)技术常与检测算法结合使用,以提高信号检测性能。该技术同样适用于 VLC 环境,能够通过减少信道相关性来改善系统的接入性能^[9]。

因此,本文从降低可见光信道相关性角度出发,研究 LR 技术在可见光 MIMO 通信系统中的应用。

1 系统模型

本文研究采用预编码技术的室内 MIMO-VLC 系统模型,具体结构如图 1 所示。假设有 N_t 个 LED 光发射机和 N_r 个光电二极管(PD)光接收机。其中, s 是用户发送的原始信号, d 是调制后信号, x 是经过预编码后的待发射信号, y 是接收端信号。 x 经过可见光信道矩阵 H_0 传输后到达接收端,接收端的 PD 将接收到的光信号转换成电信号,并且携带加性高斯白噪声 n 。最后,对接收到的信号进行解码、解调,以恢复原始发送信号。由于非视距链路的信道脉冲响应衰减大,可见光信道增益主要由视距链路的信道脉冲响应分量提

供^[10]。为了方便研究,本文采用视距链路模型。 H_0 中的每个元素对应每个子信道的 LOS 链路直流增益 $h_{i,j}$,可由式(1)表示。

$$H_0 = \begin{bmatrix} h_{1,1} & \cdots & h_{1,j} & \cdots & h_{1,N_t} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{i,1} & \cdots & h_{i,j} & \cdots & h_{i,N_t} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{N_r,1} & \cdots & h_{N_r,j} & \cdots & h_{N_r,N_t} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, $h_{i,j}$ 表示第 i 个 LED 到第 j 个 PD 之间的信道直流增益,可由式(2)表示

$$h_{ij} = \begin{cases} \frac{A_r(m+1)}{2\pi d_{ij}^2} g \psi_{i,j} \cos^m \varphi_{i,j} \cos \psi_{i,j}, & 0 \leq \psi_{i,j} \leq \Gamma_{FOV} \\ 0, & \psi_{i,j} > \Gamma_{FOV} \end{cases} \quad (2)$$

其中, $\varphi_{i,j}$ 表示第 i 个 LED 与第 j 个 PD 之间的发射角, $\psi_{i,j}$ 表示第 i 个 LED 与第 j 个 PD 之间的入射角, $d_{i,j}$ 表示第 i 个 LED 与第 j 个 PD 之间的距离, m 表示郎伯光源阶数, A_r 表示 PD 的有效接收面积, g 为非成像聚光器增益, Γ_{FOV} 为接收视场角。

接收端信号 y 可由式(3)表示。

$$y = H_0 F d + n \quad (3)$$

其中, F 为根据不同设计标准得到的预编码矩阵。

2 LR 技术在可见光 MIMO 通信系统中的应用

本文采用 LR 技术来提高室内 VLC 信道的正交性,从而获得具有更佳正交性和更低信道相关性的降秩矩阵。在此基础上,结合 ZF 和 MMSE 准则进行预编码设计,以进一步优化系统性能。

2.1 LR 技术

LR 技术在 MIMO 无线通信系统中得到了广泛应用,许多研究者将其与接收端检测算法或发射端预编码算法结合使用,以此来提高系统的通信质量。在室内 VLC 系统中,一旦光发射机和光接收机的位置固定,可见光信道的特性也就基本确定了。由于可见光信

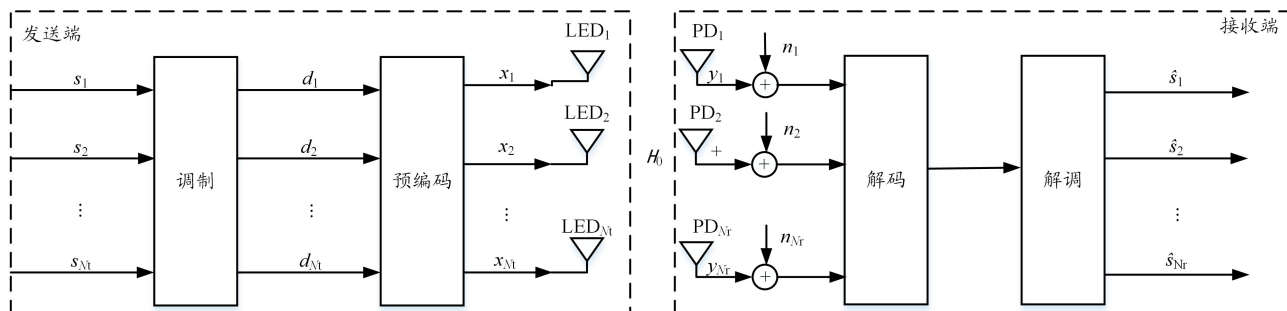


图 1 VLC 系统模型

陈超, 邵宇丰, 王安蓉, 等: 格基约减技术在可见光 MIMO 通信系统中的应用

道属于实数信道, 不包含频率选择性和相位变化等复杂成分, 并且 LED 光发射机通常采用阵列布局, 这使得可见光信道表现出显著的空间相关性。

LR 技术能够有效地增强可见光信道的正交性, 通过与预编码算法或次优检测算法结合使用, 可显著提升 VLC 系统的性能。本文采用 LR 技术中的 Lenstra-Lenstra-Lovász (LLL) 算法, 直接对实数型可见光信道执行约减处理。LLL 算法具体实施步骤如下: 首先, 对转置后的可见光信道矩阵 H_0^T 进行 QR 分解, 即 $H_0^T = QR$, Q 表示正交矩阵, R 表示上三角矩阵; 然后, 进行 LR 操作, 通过设置约减条件 δ 来规定目标输出矩阵的正交性情况; 最后, 对输入矩阵进行一定次数的列变换和约减操作, 直到该矩阵达到了约减条件, 输出目标矩阵 $\check{H}_0 = \check{Q}\check{R}$ 。 δ 的取值范围为 0.25~1, 约减条件数越大, 说明约减条件越严格, 输出的矩阵正交性就越好, 相应的迭代的次数也越多。LLL 算法需要满足以下 2 个条件:

$$|\bar{r}_{j,i}| \leq \frac{1}{2} |\bar{r}_{j,j}|, 1 \leq j < i \leq n \quad (4)$$

$$\delta |\bar{r}_{i+1,i+1}|^2 \leq |\bar{r}_{i,i}|^2 + |\bar{r}_{i+1,i}|^2 \quad (5)$$

其中, $|\bar{r}_{j,i}|$ 表示矩阵 $\check{R}$ 中第 j 行第 i 列的元素, $i=2, \dots, n_0$ 。如果 $\check{R}$ 中存在元素不满足第一个条件, 则进行列变换。需要将 $\check{R}$ 中的第 j 列的 $-u$ 倍加到第 i 列上, 而 $u = \text{round}(|\bar{r}_{j,i}|/|\bar{r}_{j,j}|)$, $\text{round}(\cdot)$ 表示取最大整数。当满足了第一个条件后, 继续对第二个条件进行判断。如果 $\check{R}$ 中存在元素不满足第二个条件, 则交换矩阵 $\check{R}$ 中的第 $i-1$ 列和第 i 列。

2.2 LR-ZF 预编码算法

室内 VLC 系统模型可以表示为

$$y_1 = H_0 x + n \quad (6)$$

经过线性预编码后, 式(6)变为

$$y_2 = \beta H_0 F x + n \quad (7)$$

其中, β 为功率放缩因子, 用于保证预编码前后的发射信号功率不变。

传统 ZF 预编码算法一般是直接对信道矩阵进行求伪逆运算 (部分矩阵不存在逆矩阵), 依据迫零准则来设计预编码矩阵。传统 ZF 预编码矩阵可表示为

$$F_{ZF} = H_0^H (H_0 H_0^H)^{-1} \quad (8)$$

功率放缩因子 β 可以表示为

$$\beta = \sqrt{\frac{N_t}{\text{trace}(F_{ZF} F_{ZF}^H)}} \quad (9)$$

与传统的基于 ZF 准则的预编码方案不同, LR-ZF 预编码在设计时采用了一种约减后的矩阵, 这种矩阵具有更高的信道正交性和更低的相关性。约减前后的信道矩阵存在下列转换关系:

$$\check{H}_0 = U H_0 \quad (10)$$

其中, U 为左乘矩阵。将式(10)代入式(8), 可以得到 LR-ZF 预编码矩阵为

$$F_{LR-ZF} = \check{H}_0^H (\check{H}_0 \check{H}_0^H)^{-1} \quad (11)$$

将式(11)代入式(9)可以得到 LR-ZF 预编码功率放缩因子为

$$\beta_{LR-ZF} = \sqrt{\frac{N_t}{\text{trace}(F_{LR-ZF} F_{LR-ZF}^H)}} \quad (12)$$

将式(11)和式(12)代入式(7), 得到接收信号为

$$\begin{aligned} y_{LR-ZF} &= \beta_{LR-ZF} H_0 F_{LR-ZF} x + n = \\ &= \beta_{LR-ZF} (U^H \check{H}_0^H) \check{H}_0^H (\check{H}_0 \check{H}_0^H)^{-1} x + n = \\ &= \beta_{LR-ZF} U^H \check{H}_0^H \check{H}_0^H (\check{H}_0 \check{H}_0^H)^{-1} (\check{H}_0)^{-1} x + n = \\ &= \beta_{LR-ZF} U^H x + n \end{aligned} \quad (13)$$

最后, 对接收到的信号进行线性变换, 即将信号进行 U 变换, 并除以 β_{LR-ZF} 后, 解调出原始发送数据。

2.3 LR-MMSE 预编码算法

传统 MMSE 预编码算法直接利用原始信道矩阵进行预编码设计。根据 MMSE 准则, 可得到 MMSE 预编码设计方案为

$$\min E(\| \beta^{-1} (\beta H_0 F d + n) - d \|^2) \quad (14)$$

其中, $E(\cdot)$ 表示均方误差函数。发射信号功率满足

$$\text{s.t. } E(\| F d \|^2) \leq P_t \quad (15)$$

将式(14)和式(15)联立拉格朗日函数, 可表示为

$$\begin{aligned} L(F, \beta, \lambda) &= E(\| \beta^{-1} (H_0 F d + n) - d \|^2) - \\ &\quad \lambda [E(\| F d \|^2) - P_t] \end{aligned} \quad (16)$$

其中, λ 是拉格朗日函数 L 设置的未知数, P_t 表示信号发射功率。对构建的拉格朗日函数, 化简求解后可得到 MMSE 预编码矩阵为

$$F_{MMSE} = H_0^H \left(H_0 H_0^H + \frac{\delta_n^2}{\delta_d^2} I \right)^{-1} \quad (17)$$

其中, I 为单位矩阵, δ_n^2 为噪声功率方差, δ_d^2 为信号发射功率方差。

基于 LR 技术的 MMSE 预编码也是利用约减后的矩阵进行预编码设计。将式(10)代入式(17)得到 LR-MMSE 预编码矩阵为

$$\mathbf{F}_{\text{LR-MMSE}} = \check{\mathbf{H}}_0^H \left(\check{\mathbf{H}}_0^H \check{\mathbf{H}}_0 + \frac{\delta_n^2}{\delta_d^2} \mathbf{I} \right)^{-1} \quad (18)$$

进而得到其功率放缩因子为

$$\beta_{\text{LR-MMSE}} = \sqrt{E(\|\mathbf{d}\|^2)/E(\|\mathbf{F}_{\text{LR-MMSE}}\mathbf{d}\|^2)} \quad (19)$$

因此,接收端信号可以表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_{\text{R-MMSE}} &= \beta_{\text{LR-MMSE}} \mathbf{H}_0 \mathbf{F}_{\text{LR-MMSE}} \mathbf{x} + \mathbf{n} = \\ &\beta_{\text{LR-MMSE}} (\mathbf{U}^H \check{\mathbf{H}}_0) \check{\mathbf{H}}_0^H \left(\check{\mathbf{H}}_0^H \check{\mathbf{H}}_0 + \frac{\delta_n^2}{\delta_d^2} \mathbf{I} \right)^{-1} \mathbf{x} + \mathbf{n} = \\ &\beta_{\text{LR-MMSE}} \mathbf{U}^H \check{\mathbf{H}}_0 \check{\mathbf{H}}_0^H \left((\check{\mathbf{H}}_0^H)^{-1} (\check{\mathbf{H}}_0)^{-1} + \frac{\delta_n^2}{\delta_d^2} \mathbf{I}^{-1} \right) \mathbf{x} + \mathbf{n} = \\ &\beta_{\text{LR-MMSE}} \mathbf{U}^H \left(\mathbf{I} + \check{\mathbf{H}}_0 \check{\mathbf{H}}_0^H \frac{\delta_n^2}{\delta_d^2} \mathbf{I}^{-1} \right) \mathbf{x} + \mathbf{n} \end{aligned} \quad (20)$$

与 LR-ZF 预编码算法类似, LR-MMSE 预编码算法同样需要对接收到的信号进行线性变换, 即将接收端信号进行 $\mathbf{U}$ 变换, 并除以 $\beta_{\text{LR-MMSE}}$ 后, 解调出原始发送数据。

3 仿真结果分析

3.1 信道相关性分析

基于上述理论框架, 本文选取了一个尺寸为 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 的室内房间作为仿真模型, 研究 LED 和 PD 的空间分布(如图 2 和图 3 所示), 并依据表 1 中列出的参数配置建立了仿真系统。通过该仿真平台, 分析 LR 技术对 VLC 信道相关性的影响。

当改变 LED 间距、PD 间距以及半功率角时, 不同空间分布系统采用 LR 技术前后的信道矩阵条件数的变化情况如图 4 所示。可以看出, 无论是 2×2 系统还是 4×4 系统, 信道矩阵条件数随着 LED 间距、PD 间距的增大而减小, 随着半功率角的增大而增大。采用 LR

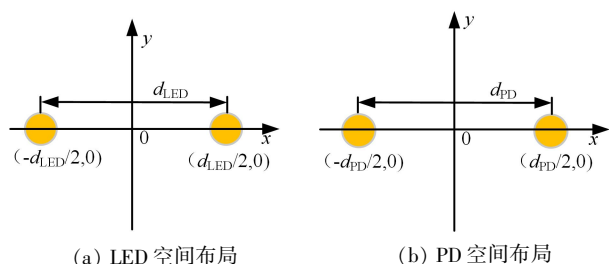


图 2 室内 MIMO VLC 系统 2×2 空间分布

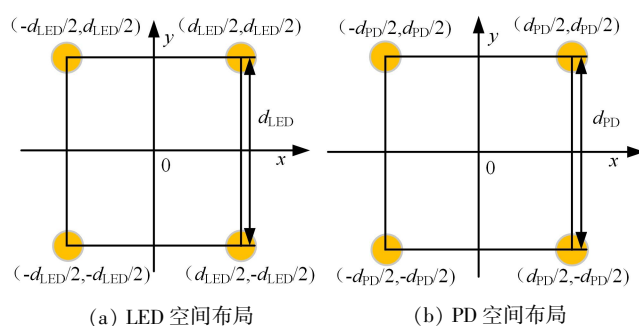
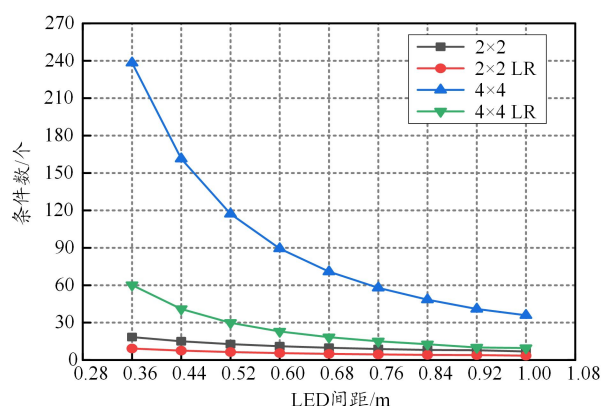


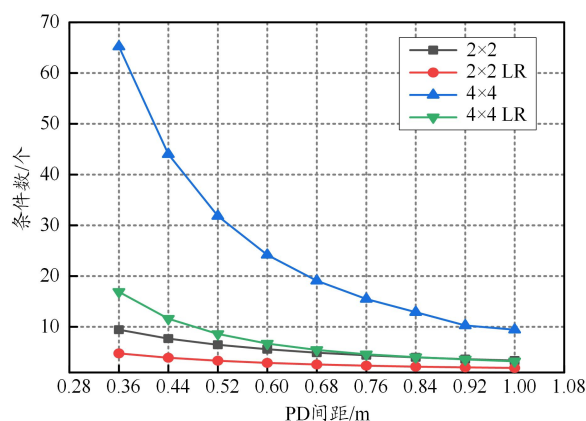
图 3 室内 MIMO VLC 系统 4×4 空间分布

表 1 VLC 系统信道参数设置

参数	数值
LED 半功率角/(°)	60
接收视场角/(°)	60
非成像聚光器增益	1.5
PD 面积/cm ²	1
发射机离地高度/m	2.75
接收机离地高度/m	1
传输速率/(Mb/s)	100

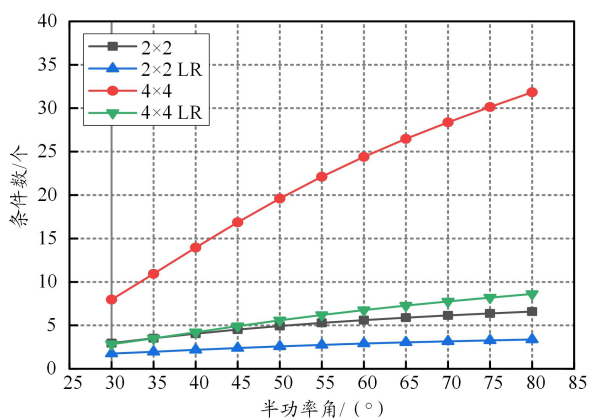


(a) LED 间距与条件数关系



(b) PD 间距与条件数关系

陈超, 邵宇丰, 王安蓉, 等: 格基约减技术在可见光 MIMO 通信系统中的应用



(c) 半功率角与条件数关系

图 4 不同情况下, 信道矩阵条件数的变化情况

技术系统的信道矩阵条件数均低于未采用 LR 技术系统。当 LED 间距为 0.36 m 时, 4×4 系统的信道矩阵条件数相比原始值减少了超过 3 倍; 而 2×2 系统的信道矩阵条件数则大约减少了 50%。这表明, 通过应用可见光信道的约减处理, 能够显著降低信道矩阵的条件数, 从而改善信道的正交性, 并有效减弱信道间的相关性。此外, 对于那些具有较高空间相关性和较低正交性的信道, 约减技术显示出了更为显著的改进效果, 可以大幅削减信道矩阵的条件数。

采用 LR 技术前后, 对数尺度条件下系统的信道矩阵条件数的累积分布函数(CDF)值, 如图 5 所示。可以看出, 采用 LR 技术后系统的信道矩阵条件数更小、更加集中。这表明了 LR 技术确实能够有效改善可见光信道的正交性。

3.2 系统误码率分析

当信噪比为 24 dB 时, 不同预编码的正交相移键控(QPSK)信号的星座图如图 6 所示。可以看出, 所提

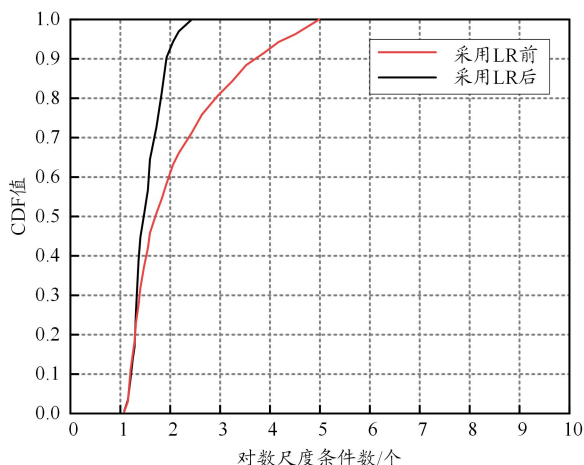


图 5 采用 LR 技术前后, 对数尺度下信道矩阵条件数的 CDF

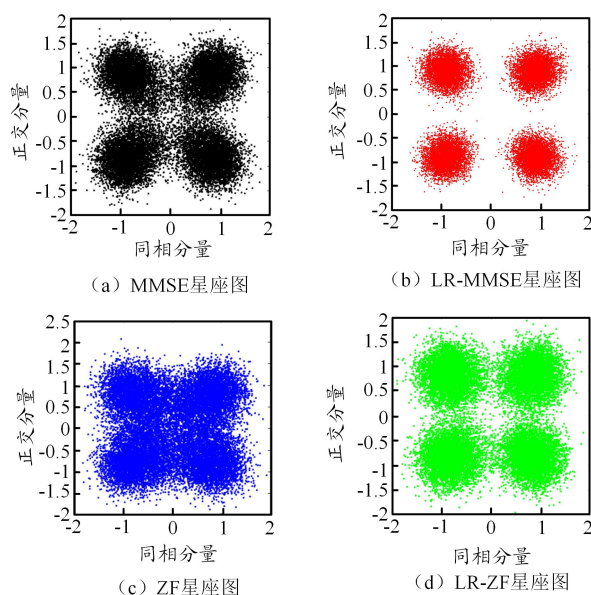


图 6 不同预编码信号星座图

出的 LR-MMSE 与 LR-ZF 预编码信号的星座图清晰度均优于传统 MMSE 与 ZF 预编码信号的星座图。从不同预编码信号星座图的离散程度来看, 可以预测所提出的 LR-MMSE 与 LR-ZF 算法的系统误码率性能优于传统 MMSE 与 ZF 算法的系统误码率性能, 其中 LR-MMSE 预编码的性能最佳, 而 ZF 预编码的性能相对较差。

在 MIMO-VLC 系统中, 不同预编码算法的误码率性能对比情况如图 7 所示。正如星座图的结果显示, ZF 预编码的误码率性能最差, 而 LR-MMSE 预编码的性能最佳。MMSE 预编码由于考虑了信道噪声的影响, 其误码率性能优于 ZF 预编码。基于 LR 技术的 LR-MMSE 和 LR-ZF 预编码的误码率性能优于 MMSE 和 ZF 预编码。即使在高信噪比条件下, LR-ZF 预编码算

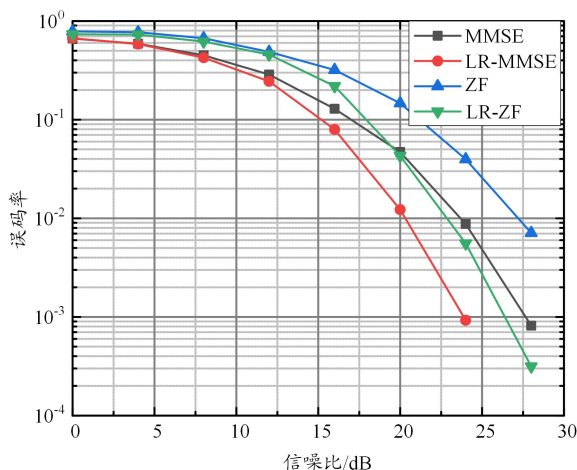
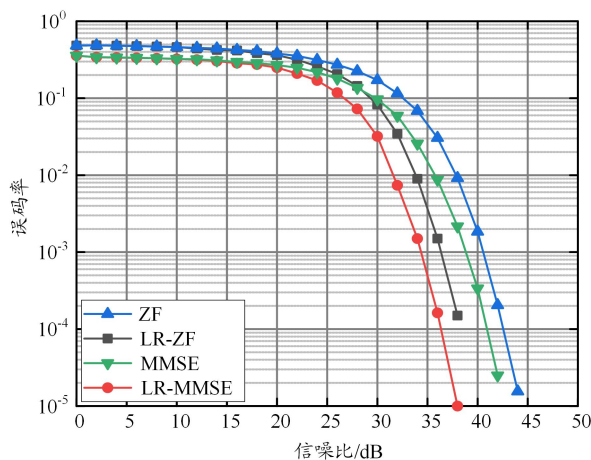


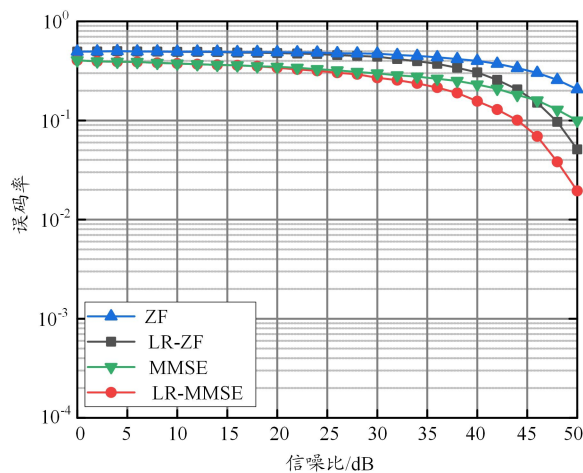
图 7 不同预编码算法误码率性能对比

法的误码率性能也优于 MMSE 预编码算法。这表明 LR 技术能够通过减少信道空间的相关性, 增强信道矩阵的正交性, 从而有效改善了预编码算法的误码率性能。

在不同 LED 与 PD 间距下, 不同预编码算法误码率性能对比情况如图 8 所示。可以看出, 线性预编码的效果受到信道相关性的影响。信道相关性越低, 系统的误码率性能越好。在相同的信道相关性条件下, 基于 LR 技术的预编码算法的误码率性能优于 ZF 与 MMSE 预编码算法。此外, 随着间距减小, 信道相关性增强, 这导致了系统误码率性能的下降。



(a) LED 与 PD 间距为 0.6 m 时



(b) LED 与 PD 间距为 0.3 m 时

图 8 不同 LED 与 PD 间距下, 不同预编码算法的误码率性能对比

4 结束语

本文探讨了 LR 技术在室内 VLC 系统中的应用,

通过仿真对比了不同条件下, 即改变 LED 间距、PD 间距以及半功率角时, LR 技术对于提升传输信道矩阵正交性的效果。研究结果显示, 对于那些具有较高相关性和较差正交性的可见光信道, LR 技术具有显著的改进作用, 能有效降低信道空间的相关性。此外, 本文还对比了 4 种预编码算法 (ZF、MMSE、LR-ZF 以及 LR-MMSE), 在误码率性能上的表现。仿真结果表明, LR-ZF 和 LR-MMSE 预编码算法在误码率方面明显优于传统的 ZF 和 MMSE 线性预编码算法。综上所述, 在 MIMO 室内 VLC 系统中, 结合使用 LR 技术和预编码技术可以有效改善信道的正交性, 降低子信道间的相关性, 最终达到提升通信质量的目的。

参考文献:

- [1] 梁静远, 徐亚欣, 韩美苗, 等. 室内可见光通信异构融合系统研究进展[J]. 光通信技术, 2023, 47(1): 46-50.
- [2] 秦欢欢, 程欣欣, 柯熙政. 可见光 LED 通信研究进展[J]. 照明工程学报, 2024, 35(1): 50-69.
- [3] 郭心悦, 李双双. 室内可见光通信 MIMO 信道相关性研究[J]. 半导体光电, 2018, 39(1): 124-128.
- [4] 郭心悦, 张可儿. 基于预编码的 STBC MIMO 可见光通信系统研究[J]. 光学技术, 2019, 45(4): 436-442.
- [5] 刘晓叶. 速率最大化可见光多用户预编码及图书馆应用[J]. 无线电工程, 2024, 54(3): 535-542.
- [6] PHAM T V, PHAM A T. Max-min fairness and sumrate maximization of MU-VLC local networks[C]//2015 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), December 6-10, 2015, San Diego, USA. Piscataway: IEEE, 2015: 1-6.
- [7] KROHN A, PACHNICKE S, HOEHER P A. Genetic optimization of liquid crystal matrix based interference suppression for VLC MIMO transmissions[J]. IEEE Photonics Journal, 2021, 14(1): 1-5.
- [8] ALI Z, FURQAN M, JAN Q. Enhancing the Sum rate in massive MIMO optical wireless communication system by using MMSE precoding[C]//2023 International Conference on Communication, Computing and Digital Systems (C-CODE), May 17-18, 2023, Islamabad, Pakistan. Piscataway: IEEE, 2023: 1-5.
- [9] ZHANG Y, LI Y, FU J. Lattice reduction precoding for underwater optical imaging MIMO system[C]//SPIE. Proceedings of Optics Frontiers Online 2020: Optical Communications and Networks. Bellingham: SPIE, 2020: 86-97.
- [10] ZENG L, O'BRIEN D C, LE MINH H, et al. High data rate multiple input multiple output (MIMO) optical wireless communications using white LED lighting[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2009, 27(9): 1654-1662.