

DOI:10.16136/j.joel.2022.05.0650

基于 GMD-BD 预编码的多用户 MIMO 可见光通信系统

关少义¹, 李正权^{1,2*}

(1. 江南大学 物联网工程学院, 江苏 无锡 214122; 2. 江苏省未来网络创新研究院, 江苏 南京 211111)

摘要: 在基于奇异值分解(singular value decomposition, SVD)的块对角(block diagonal, BD)预编码多用户多输入多输出(multiple input multiple output, MIMO)室内可见光通信(visible light communication, VLC)系统中, 同一用户终端的不同光接收机误码率性能有较大差别, 而用户终端误码率性能受限于最差性能的接收机。针对此问题, 本文利用决策反馈均衡(decision feedback equalization, DFE)非线性接收机, 提出了基于几何均值分解(geometric mean decomposition, GMD)的 BD 预编码多用户 MIMO 室内 VLC 系统, 并利用同一用户终端采用不同视场角(field of view, FOV)的接收机进一步提高用户终端误码率性能, 分析了用户终端位置对用户终端误码率性能的影响。最后通过仿真验证了本文提出的系统使同一用户终端的不同接收机获得相近的误码率性能, 提高了最差接收机的性能, 降低了用户终端误码率。当单个发光二极管(light emitting diode, LED)的发射功率为 10 mW 和系统传输速率为 100 Mbit/s 时, 在室内 95% 的区域内用户终端能够达到 10^{-6} 左右的误码率性能。

关键词: 可见光通信; 决策反馈均衡; 块对角化预编码; 几何均值分解

中图分类号: TN929.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2022)05-0529-07

Multi-user MIMO visible light communication system based on GMD-BD precoding

GUAN Shaoyi¹, LI Zhengquan^{1,2}

(1. School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China; 2. Jiangsu Future Networks Innovation Institute, Nanjing, Jiangsu 211111, China)

Abstract: In the block diagonal (BD) precoding multi-user multiple input multiple output (MIMO) indoor visible light communication (VLC) system based on singular value decomposition (SVD), the bit error rate performance of different receivers of the same user terminal is quite different, and the performance of the user terminal is limited to the worst-performing receiver. To solve above problem, this paper uses nonlinear receivers of decision feedback equalization (DFE), and proposes a BD precoding multi-user MIMO indoor VLC system based on geometric mean decomposition (GMD). For the same user terminal, different field of view (FOV) receivers to improve the bit error rate performance of user terminal, and analyze the impact of user terminal location on the bit error rate performance of user terminals. Finally, the simulation results show that the proposed system in this paper enables different receivers of the same user terminal to obtain similar bit error rate performance, improves the performance of the worst receiver and reduces the bit error rate of the user terminal. When the emission power of a single light emitting diode (LED) is 10 mW and the system transmission rate is 100 Mbit/s, user terminals can achieve the bit error rate performance of about 10^{-6} in 95% of the indoor area.

Key words: visible light communication; decision feedback equalization; block diagonal precoding; geo-

* E-mail: lzq722@jiangna.edu.cn

收稿日期: 2021-09-14 修订日期: 2021-09-28

基金项目: 国家自然科学基金(61571108)、无锡市科技发展资金(H20191001, G20192010)和未来网络科研基金(FNSRFP-2021-YB-11)资助项目

metric mean decomposition

1 引言

近年来,随着人们对高速无线数据传输的不断需求和频谱资源日益短缺的冲突,以及发光二极管(light emitting diode, LED)在室内照明的广泛运用,室内可见光通信(visible light communication, VLC)被认为是室内传统射频(radio frequency, RF)通信的有力补充。VLC在不影响LED照明功能的前提下,通过高频地调制LED光强来传输数据,将照明与信息传输技术相结合,具有成本低、保密性好、无需频谱许可、无电磁干扰等优点^[1-3]。然而,LED的有限带宽限制了VLC的高速传输,但对于典型室内环境而言,为了照明通常安装有多个LED,因此多输入多输出(multiple input multiple output, MIMO)技术自然成为了提高传输速率的有效方案^[4-7]。

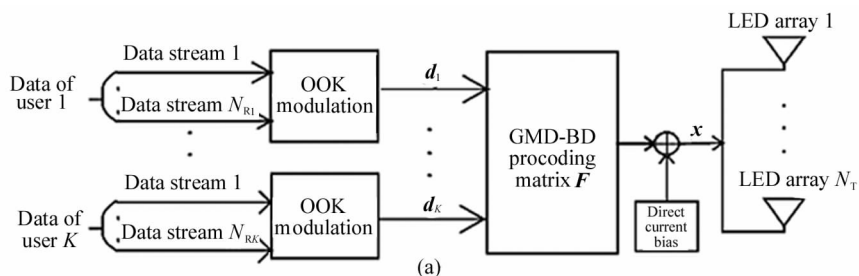
事实上,由于光信号的广播特性,VLC系统可以同时支持多个用户,但是多用户会导致用户间干扰的产生,从而降低用户误码率性能^[8]。所以,在VLC系统中利用预编码算法来消除多用户间干扰成为国内外学者的研究焦点。目前,国内外学者对VLC中预编码算法已有了一定研究^[9-13]。文献[9]中利用线性迫零(zero-force, ZF)预编码和迫零脏纸预编码来消除多用户干扰(multi-user interference, MUI),并且通过仿真表明当用户相距较近时,迫零脏纸预编码在系统容量性能上优于ZF预编码,但没有研究预编码的误码率性能。基于此,文献[10]和[11]分别提出了误码率性能更优的预编码方案,文献[10]提出依靠最小化用户发送和接收信号之间的最大均方误差为目标函数来设计最优的收发器,之后结合ZF预编码提出一种简化的收发器,通过仿真表明2种方案在误码率性能上都优于ZF预编码。文献[11]以最小化用户均方误差之和为目标函数来设计最优的收发器,并结合奇异值分解(singular value decomposition, SVD)预编码提出一种次优的收发器,通过仿真表明2种方案在误码率性能上也都优于ZF预编码。文献[12]从节能角度出发,提出一种将ZF预编码与VLC中的视场角(field of

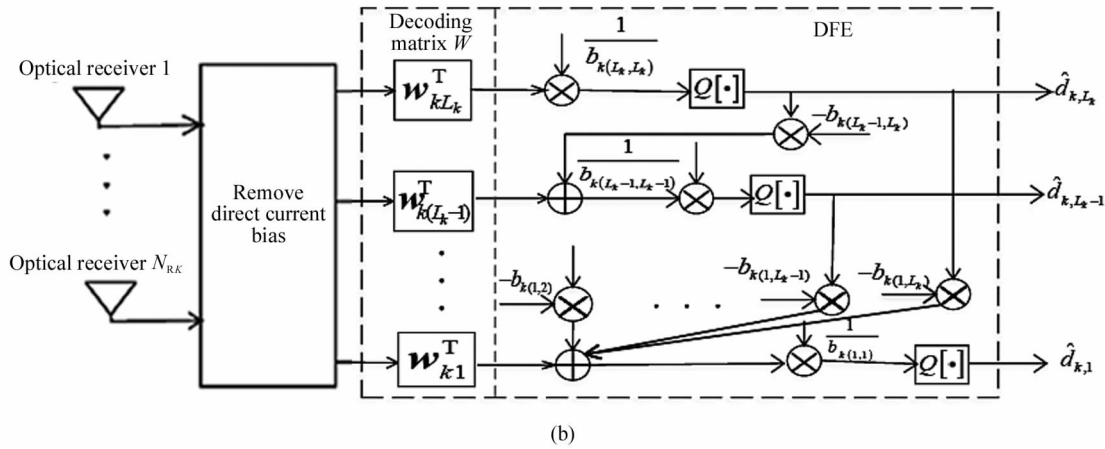
view, FOV)特性相结合的节能ZF预编码方案,此方案中执行ZF预编码的信道矩阵来自多个用户共享的LED阵列,而不是所有的LED阵列集合,可以避免在未提供服务的LED阵列传输数据导致的发射功率浪费并且降低计算复杂度。文献[13]采用决策反馈均衡(decision feedback equalization, DFE)非线性接收机,利用几何均值分解(geometric mean decomposition, GMD)预编码和均匀通道分解预编码2种方案消除MUI,仿真表明在误码率和系统容量性能上,2种方案均优于文献[11]中的最小化均方误差和SVD预编码方案。然而目前研究的许多系统中,多为多用户单接收机的情况,对于多用户多接收机的研究较少。对于多用户多接收机的情况,文献[14]提出了SVD-BD预编码多用户MIMO室内VLC系统,能够有效地消除MUI,但由于用户信道矩阵相关性强,用户等效信道矩阵经SVD后各子信道增益相差较大,导致同一用户终端的不同接收机误码率性能有较大差别。针对该问题,本文提出了同一用户终端采用不同FOV接收机的物理方案以改善用户终端的误码率性能,然而当用户终端位于LED阵列附近时,该方案对用户终端误码率性能改善有限。

本文利用DFE非线性接收机,提出了GMD-BD预编码多用户MIMO室内VLC系统,能够有效提升用户终端的误码率性能。其次,本文利用文献[14]中同一用户终端采用不同FOV接收机的物理方案进一步提高了用户终端的误码率性能。最后,基于本文提出的系统分析了用户终端位置对用户终端误码率性能的影响。

2 系统模型

假设一个多用户MIMO室内VLC系统,在房间天花板上共安装 N_T 个LED阵列作为发射源,每个LED阵列配备 N 个LED。在接收端,房间内共有 K 个用户终端,第 k ($1 \leq k \leq K$)个用户终端有 N_{Rk} 个光接收机,则总的光电二极管个数 $N_R = \sum_{k=1}^K N_{Rk}$ 。图1为基于GMD-BD预编码的多用户MIMO室内VLC



图1 GMD-BD 算法多用户 MIMO 室内 VLC 系统模型:(a) 系统发射端;(b) 第 k 个用户的接收端Fig. 1 Multi-user MIMO indoor VLC system model based on GMD-BD algorithm; (a) System transmitter; (b) The receiving end of the k th user

系统模型,主要包括发射端、信道和接收端等3部分。在发射端用户信息要经过调制后再进行 GMD-BD 预编码处理,最后加入直流偏置驱动 LED 发射可见光信号。光信号经信道传输后,在接收端光接收机将接收到的光信号转换为电信号,之后通过 DFE 非线性接收机与 GMD-BD 解码矩阵联合解码消除码间干扰(inter symbol interference, ISI),最后经过判决恢复出用户需要的信息。

2.1 系统发射端

发射端传输用户信息时,首先通过串并转换将信息由串流信号转化成并流信号,然后对并流信号进行双极性开关键控(on-off keying, OOK)调制, $\mathbf{d} = [\mathbf{d}_1^T, \dots, \mathbf{d}_k^T, \dots, \mathbf{d}_K^T]^T$ 为用户信息经过 OOK 调制后的信号, $\mathbf{d}_k = [d_{k1}, \dots, d_{kN_{Rk}}]^T$ 表示第 k 个用户的信息经过调制后的信号,然后进行 GMD-BD 预编码处理, $\mathbf{F} = [\mathbf{F}_1, \dots, \mathbf{F}_k, \dots, \mathbf{F}_K] \in \mathcal{R}^{N_T \times N_R}$ 为 GMD-BD 预编码矩阵,其中 $\mathbf{F}_k \in \mathcal{R}^{N_T \times N_{Rk}}$ 为第 k 个用户对应的预编码矩阵,由于驱动 LED 的电流必须为正,因此需要对预编码处理后的信号加上直流偏置保证 LED 正常工作,最终 LED 阵列发射的信号 $\mathbf{x}$ 可表示为:

$$\mathbf{x} = \sum_{n=1}^N P_{\text{LED}} (\mathbf{1} + m_1 \mathbf{F} \mathbf{d}), \quad (1)$$

式中, P_{LED} 为单个 LED 的功率, m_1 为调制指数, $\mathbf{1} \in \mathcal{R}^{N_T \times 1}$ 是一个全为 1 的 N_T 维列向量。

2.2 系统信道

可见光通信中存在 2 种主要的链路模型:直射链路(line of sight, LOS)模型和非直射链路(non-line of sight, NLOS)模型。文献[15]研究表明,直射

链路占光接收机接收到光功率的 95%。因此,本文忽略室内墙壁、天花板等的反射作用,采用 LOS 模型。本文用 $\mathbf{H}_k \in \mathcal{R}^{N_{Rk} \times N_T}$ 表示 LED 阵列与第 k 个用户终端之间的信道矩阵,则整个多用户 MIMO 室内 VLC 系统的信道矩阵为 $\mathbf{H} = [\mathbf{H}_1^T, \dots, \mathbf{H}_k^T, \dots, \mathbf{H}_K^T]^T \in \mathcal{R}^{N_R \times N_T}$, 即:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & \dots & h_{1j} & \dots & h_{1N_T} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{i1} & \dots & h_{ij} & \dots & h_{iN_T} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{N_R1} & \dots & h_{N_Rj} & \dots & h_{N_RN_T} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中, h_{ij} 为第 j ($1 \leq j \leq N_T$) 个 LED 阵列和第 i ($1 \leq i \leq N_R$) 个光接收机之间的信道直流增益^[15], 其满足表达式为:

$$h_{ij} = \begin{cases} \sum_{n=1}^N \frac{A(m+1)}{2\pi d_{ijn}^2} \cos^m(\phi_{ijn}) T_s(\Psi_{ijn}) g(\Psi_{ijn}) \cos(\Psi_{ijn}), & 0 \leq \Psi_{ijn} \leq \Psi_c \\ 0, & \Psi_{ijn} > \Psi_c \end{cases} \quad (3)$$

式中, A 为光接收机面积, d_{ijn} 表示第 j 个 LED 阵列中第 n 个 LED 与第 i 个光接收机的距离, $m = \ln(1/2) \ln(\cos \varphi_{1/2})$ 为朗伯光源的阶数, 这里 $\ln(\cdot)$ 表示自然对数, m 仅与 LED 的半功率角 $\varphi_{1/2}$ 有关, Ψ_{ijn} 和 ϕ_{ijn} 分别为光接收机的入射角和 LED 灯的发射角, $T_s(\Psi_{ijn})$ 为光滤波器增益, $g(\Psi_{ijn})$ 为聚光器增益, Ψ_c 表示光接收机的 FOV。

2.3 GMD-BD 预编码方案

GMD-BD 预编码算法的主要思想是:首先,通过将多用户 MIMO 信道划分为多个等效的单用户子信道,消除 MUI;其次,对用户的等效单用户子信道进行 GMD 预编码处理,消除该用户等效子信道不同接收机间的 ISI。

2.3.1 GMD 分解

假设任意实矩阵 $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{m \times n}$ 的秩为 $L = \text{rank}(\mathbf{A})$, 其奇异值满足 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_L > 0$, 矩阵 $\mathbf{A}$ 的 GMD 分解可表示为^[16]:

$$\mathbf{A} = \mathbf{Q}\mathbf{R}\mathbf{P}^T, \quad (4)$$

式中, $\mathbf{Q} \in \mathbb{R}^{m \times L}$ 和 $\mathbf{P} \in \mathbb{R}^{L \times L}$ 是半正交矩阵, $\mathbf{R} \in \mathbb{R}^{L \times L}$ 是对角线元素相等的上三角矩阵, 对角线元素 r 满足:

$$r = \left(\prod_{l=1}^L \sigma_l \right)^{1/L}, \quad (5)$$

式中, 矩阵 $\mathbf{R}$ 对角线上的元素等于矩阵 $\mathbf{A}$ 非负奇异值的几何均值, 这种分解方式就是 GMD 分解。

2.3.2 GMD-BD 预编码

在 GMD-BD 多用户 MIMO 室内 VLC 系统中, 假设第 k 个用户对应的预编码矩阵由 2 部分构成 $\mathbf{F}_k = \mathbf{F}_k^a \mathbf{F}_k^b$ 。

记第 k 个用户的信道补矩阵为 $\tilde{\mathbf{H}}_k = [\mathbf{H}_k^T, \dots, \mathbf{H}_{k-1}^T, \mathbf{H}_{k+1}^T, \dots, \mathbf{H}_K^T]^T \in \mathbb{R}^{(N_R - N_{Rk}) \times N_T}$, 其秩为 $\tilde{L}_k = \text{rank}(\tilde{\mathbf{H}}_k) \leq N_R - N_{Rk}$, 对 $\tilde{\mathbf{H}}_k$ 进行 SVD 分解, 其表达式为:

$$\tilde{\mathbf{H}}_k = \tilde{\mathbf{U}}_k \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{D}}_k & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} [\tilde{\mathbf{V}}_k^{(1)} \quad \tilde{\mathbf{V}}_k^{(0)}]^T, \quad (6)$$

式中, $\tilde{\mathbf{U}}_k \in \mathbb{R}^{(N_R - N_{Rk}) \times (N_R - N_{Rk})}$ 由 $\tilde{\mathbf{H}}_k$ 的左奇异向量构成, $\tilde{\mathbf{D}}_k \in \mathbb{R}^{\tilde{L}_k \times \tilde{L}_k}$ 是 $\tilde{\mathbf{H}}_k$ 的奇异值构成的对角矩阵, $\tilde{\mathbf{V}}_k \in \mathbb{R}^{N_T \times \tilde{L}_k}$ 为补矩阵 $\tilde{\mathbf{H}}_k$ 的前 $\tilde{L}_k$ 个右奇异向量, $\tilde{\mathbf{V}}_k^{(0)} \in \mathbb{R}^{N_T \times (N_T - \tilde{L}_k)}$ 为剩下的 $(N_T - \tilde{L}_k)$ 个右奇异向量, 其构成 $\tilde{\mathbf{H}}_k$ 零空间的一组标准正交基, 记 $\mathbf{F}_k^a = \tilde{\mathbf{V}}_k^{(0)}$ 。

对第 k 个用户的等效信道矩阵 $\bar{\mathbf{H}}_k = \mathbf{H}_k \tilde{\mathbf{V}}_k^{(0)} \in \mathbb{R}^{N_{Rk} \times (N_T - \tilde{L}_k)}$ 进行 GMD 分解可表示为:

$$\bar{\mathbf{H}}_k = \mathbf{Q}_k \mathbf{R}_k \mathbf{P}_k^T, \quad (7)$$

式中, 如果 $\bar{\mathbf{H}}_k$ 的秩 $L_k = \text{rank}(\bar{\mathbf{H}}_k)$, 则 $\mathbf{Q}_k \in \mathbb{R}^{N_{Rk} \times L_k}$ 和 $\mathbf{P}_k \in \mathbb{R}^{(N_T - \tilde{L}_k) \times L_k}$ 是半正交矩阵, $\mathbf{R}_k \in \mathbb{R}^{L_k \times L_k}$ 是对角线元素相等的上三角矩阵, 记 $\mathbf{F}_k^b = \mathbf{P}_k$ 。

最终第 k 个用户的 GMD-BD 预编码矩阵为:

$$\mathbf{F}_k = \tilde{\mathbf{V}}_k^{(0)} \mathbf{P}_k, \quad (8)$$

则第 k 个用户的解码矩阵为:

$$\mathbf{W}_k = \mathbf{Q}_k. \quad (9)$$

2.4 系统接收端

在接收端, 经可见光信道传输后, 接收机将所接

收到的光信号转化为电信号, 滤除直流分量后, 第 k 个用户终端接收到的信号可以表示为:

$$\mathbf{y}_k = \gamma P_{\text{LED}} m_1 \mathbf{H}_k (\mathbf{F}_k \mathbf{d}_k + \sum_{j=1, j \neq k}^K \mathbf{F}_j \mathbf{d}_j) + \mathbf{n}_k, \quad (10)$$

式中, γ 为接收机光电转换因子, $\mathbf{n}_k \in \mathbb{R}^{N_{Rk} \times 1}$ 表示第 k 个用户终端的 N_{Rk} 个光接收机接收信号的噪声组成的 N_{Rk} 维向量。

由式(8)知 $\mathbf{F}_k$ 由 $\mathbf{H}_k$ 补矩阵的零空间向量组成, 因此编码矩阵满足:

$$\begin{cases} \mathbf{H}_k \mathbf{F}_j \neq 0, j = k \\ \mathbf{H}_k \mathbf{F}_j = 0, j \neq k \end{cases} \quad (11)$$

式(10)中, 干扰项 $\mathbf{H}_k \sum_{j=1, j \neq k}^K \mathbf{F}_j \mathbf{d}_j$ 可以被消除, 即可以完全消除 MUI, 因此, 接收到的信号 $\mathbf{y}_k$ 可表示为:

$$\mathbf{y}_k = \gamma P_{\text{LED}} m_1 \mathbf{H}_k \mathbf{F}_k \mathbf{d}_k + \mathbf{n}_k, \quad (12)$$

经过解码矩阵 $\mathbf{W}_k = [\mathbf{w}_{k1}, \mathbf{w}_{k2}, \dots, \mathbf{w}_{kL_k}]$ 进行解码, 由式(7)、(8)和(9)得到解码信号, 其表示为:

$$\begin{aligned} \mathbf{y}'_k &= \mathbf{W}_k^T \mathbf{y}_k \\ &= \gamma P_{\text{LED}} m_1 \mathbf{W}_k^T \mathbf{H}_k \mathbf{F}_k \mathbf{d}_k + \mathbf{W}_k^T \mathbf{n}_k \\ &= \gamma P_{\text{LED}} m_1 \mathbf{R}_k \mathbf{d}_k + \mathbf{Q}_k^T \mathbf{n}_k, \end{aligned} \quad (13)$$

式中, $\mathbf{R}_k = \mathbf{W}_k^T \mathbf{H}_k \mathbf{F}_k$ 是一个对角线元素相同的上三角矩阵而非对角矩阵, 因此通过 $\mathbf{W}_k$ 解码得到的信号存在 ISI。

如图 1 所示, 本文采用 DFE 非线性接收机和解码矩阵 $\mathbf{W}_k$ 联合从 $\mathbf{y}_k$ 中恢复出 $\mathbf{d}_k$ 。首先接收到第 k 个用户的 L_k 个数据流, 对每一个数据流用一个线性解码向量 $\mathbf{w}_{ku}^T$ 进行解码, 第 L_k 个数据流率先解码判决恢复出用户信息 $\hat{d}_{kL_k}$, 然后依次从解码后的符号中消除已恢复出来的用户信息 $\hat{d}_{k,v}$ 来减少 ISI, 因此, 恢复的用户信息可以表示为:

$$\begin{aligned} \hat{d}_{k,u} &= Q \left[(\mathbf{w}_{ku}^T \mathbf{y}_k - \sum_{v=u+1}^{L_k} b_{k(u,v)} \hat{d}_{k,v}) / b_{k(u,u)} \right], \\ 1 \leq k \leq K, 1 \leq u, v \leq L_k, \end{aligned} \quad (14)$$

式中, $b_{k(u,v)} = \gamma P_{\text{LED}} m_1 \mathbf{R}_{k(u,v)}$, 其中 $\mathbf{R}_{k(u,v)}$ 表示矩阵 $\mathbf{R}_k$ 的第 (u, v) 项, $Q[\cdot]$ 表示信号的判决。

3 分析与讨论

本文采用文献[14]的室内仿真模型, VLC 系统主要仿真参数如表 1 所示。假设在室内天花板上共安装有 4 个 LED 阵列作为发射机, 每个阵列包含 60 × 60 个 LED, 此时室内有 2 个用户终端, 每个用户终端配备有 2 个光接收机, 光接收机距离地面 0.85 m, 受用户终端微型化影响, 设同一用户终端的 2 个光接收机相距 0.1 m, 用户终端 1 位于 LED 阵列附近,

用户终端 2 位于室内边缘位置,与 4 个 LED 阵列构成了 $4 \times [2, 2]$ 的多用户 MIMO 室内 VLC 系统。本文以房间地面角落为原点建立笛卡尔坐标系,LED 阵列中心的位置坐标和用户终端 1 和终端 2 光接收机的位置坐标如表 2 所示。在 2 种情形下,通过仿真分析对比了本文所提 GMD-BD 系统与文献[14]所提 SVD-BD 系统的用户终端误码率性能。情形 1:同一用户终端的 2 个光接收机都采用相同的 $FOV = 70^\circ$;情形 2:同一用户终端的 2 个光接收机分别采用不同 FOV ,分别为 70° 和 50° (文献[14]中采用不同 FOV 的组合)。最后在情形 2 条件下,分析了本文提出系统的用户终端所处位置对用户终端误码率性能的影响。

表 1 VLC 系统参数
Tab. 1 VLC system parameters

Parameter	Value
Room size ($W \times L \times H$)/m	$5 \times 5 \times 3$
Area of a optical receiver/ m^2	10^{-4}
Responsivity of optical receiver/ $(\text{A} \cdot \text{W}^{-1})$	0.4
LED's semi-angle at half power/ $(^\circ)$	60
Modulation index	0.2
Filter gain	1.0
Data rate/(Mbit/s)	100

表 2 LED 阵列中心与用户终端接收机的坐标
Tab. 2 Coordinates of the center of the LED array
and user terminal receivers

Parameter	Value
LED array 1&2/m	(1.5, 1.5), (1.5, 3.5)
LED array 3&4/m	(3.5, 1.5), (3.5, 3.5)
User terminal 1 receiver 1&2/m	(1.5, 1.5), (1.4, 1.5)
User terminal 2 receiver 1&2/m	(3.8, 4.8), (3.9, 4.8)

图 2 为在情形 1 条件下,用户信息分别经过文献[14]和本文提出系统处理后,单个 LED 发射功率与用户终端单个光接收机误码率和用户终端误码率的关系。由图可知,用户信息经过文献[14]提出系统处理后,同一用户终端光接收机 1 和 2 的误码率性能有较大差别。当单个 LED 功率为 1 mW 时,用户终端 1 和终端 2 的第 1 个光接收机的误码率都低于 10^{-6} 。而当单个 LED 功率为 10 mW 时,用户终端 1 和终端 2 的第 2 个光接收机的误码率都高达 10^{-1} 左右。由于用户终端误码率性能受限于最差的光接收机,因此当单个 LED 功率为 10 mW 时,此时 2 个用户终端无法准确接收信息。而用户信息经本文提出系统处理后,同一用户终端的光接收机 1 和 2 获得了

相近的误码率,改善了最差接收机的误码率性能,从而降低了用户终端的误码率。当单个 LED 功率大于 3 mW 时,用户终端 1 误码率及其单个光接收机的误码率均低于 10^{-6} 。当单个 LED 功率大于 7 mW 时,用户终端 2 误码率及其单个光接收机的误码率均低于 10^{-6} 。

图 3 为在情形 2 条件下,用户信息分别经过文献[14]和本文提出系统处理后,单个 LED 发射功率与用户终端单个光接收机误码率和用户终端误码率的关系。由图 3 和图 2 比较可知,相比于情形 1,用户信息分别经过 2 种系统处理后,用户终端 2 的误码率性能都显著提升,这种现象是因为用户终端 2 位于室内边缘,当用户终端 2 的光接收机分别采用不同 FOV 时,该方法使其光接收机所接收到的光信号有较大差别,能够有效降低他们信道之间的相关性。然而用户终端 1 的误码率性能有较小改善,因为用户终端 1 位于 LED 阵列附近,其光接收机分别采用不同 FOV 对光接收机所接收到的光信号影响较小。由图 3 可知,与文献[14]相比,本文提出系统使用户终端获得了更好的误码率性能,尤其当用户终端 1 位于 LED 阵列附近时,文献[14]提出系统中用户终端 1 的误码率性能较差,当单个 LED 功率为 10 mW 时,该终端的总误码率高达 10^{-2} 。本文提出系统中用户终端 1 的误码率性能得到显著提升,当单个 LED 功率大于 2 mW 时,该终端的误码率低于 10^{-6} 。因此,在用户终端误码率性能方面,本文提出系统优于文献[14]提出的系统。

在实际中,用户终端的位置随着用户移动而变化,因此在情形 2 的条件下,本文研究了用户终端所处位置对用户终端误码率性能的影响。图 4 为将室内 5×5 的平面均匀划分为 2 500 个不同的格子,当用户终端 1 位置固定不变,终端 2 在室内不同位置时对 2 个用户终端误码率性能的影响。由图可知,当单个 LED 的发射功率为 10 mW 和系统传输速率为 100 Mbit/s 时,在室内 95% 的区域内,用户终端 1 和终端 2 的误码率均低于 10^{-6} (图中不连续的空白部分)。当用户终端 2 移动到用户终端 1 附近时,导致不同用户终端的光接收机之间相关性增强,此时用户终端 1 和终端 2 的误码率(图中阴影部分)急剧上升,当 2 用户终端位置重合时其用户终端误码率达到最大。当用户终端 2 移动到室内角落位置时,其终端误码率性能稍差,达到 10^{-2} 左右,而用户终端 1 的误码率性能没有明显变化,这种现象是因为终端 2 光接收机接收到的光信号减弱。

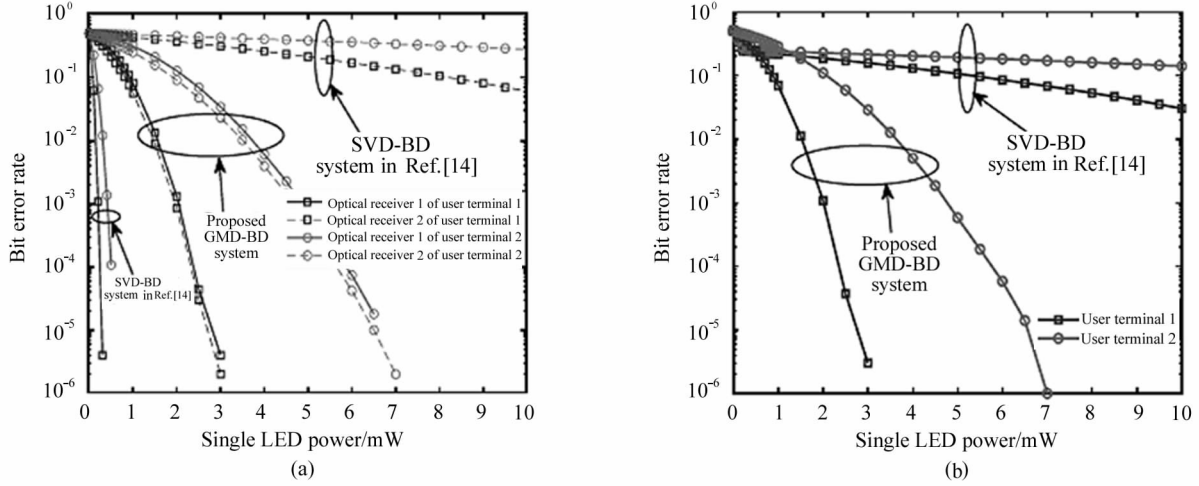


图2 情形1条件下VLC系统的误码率性能:(a) 单个LED功率与单个光接收机误码率的关系;
(b) 单个LED功率与用户终端误码率的关系

Fig. 2 The bit error rate performance of VLC system under case 1: (a) The relations between single LED power and the bit error rate of the single optical receiver; (b) The relations between the single LED power and the bit error rate of the user terminals

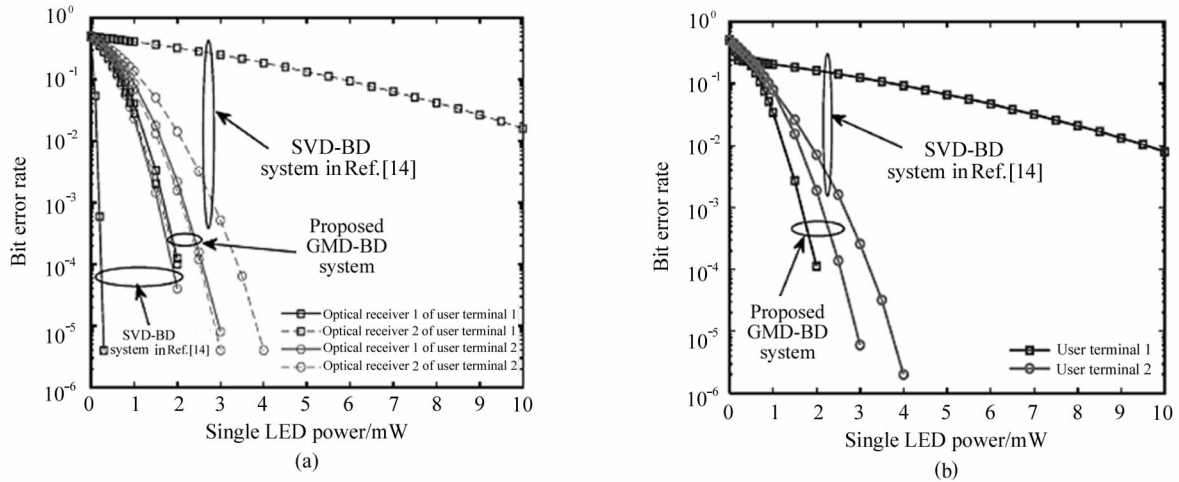


图3 情形2条件下VLC系统的误码率性能:(a) 单个LED功率与单个光接收机误码率的关系;
(b) 单个LED功率与用户终端误码率的关系

Fig. 3 The bit error rate performance of VLC system under case 2: (a) The relations between single LED power and the bit error rate of the single optical receiver; (b) The relations between the single LED power and the bit error rate of the user terminals

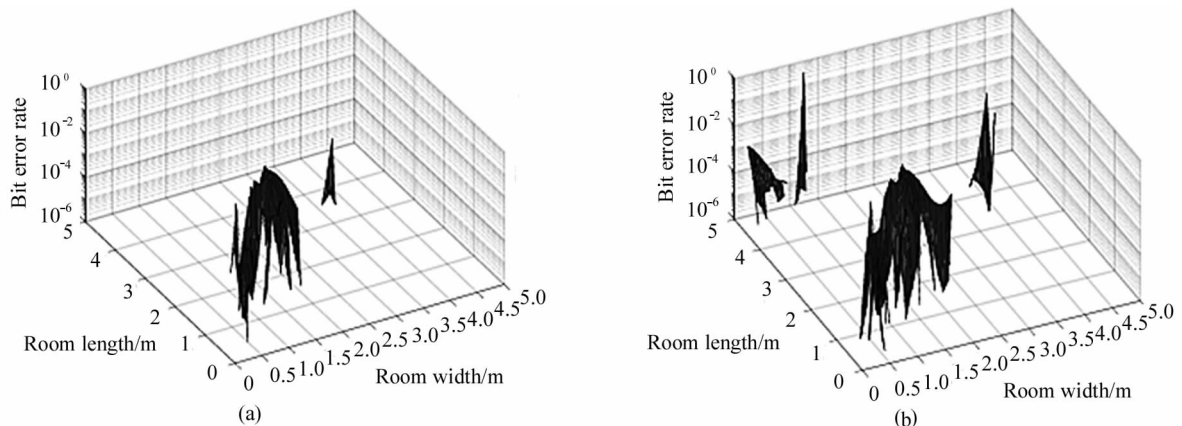


图4 用户终端1固定用户终端2移动对用户终端误码率的影响:(a) 用户终端1的误码率;(b) 用户终端2的误码率

Fig. 4 The impact of user terminal 2 mobility to terminals' the bit error rate when user terminal 1 is fixed;
(a) The bit error rate of the user terminal 1; (b) The bit error rate of the user terminal 2

4 结 论

本文使用DFE非线性接收机,提出了GMD-BD预编码多用户MIMO室内VLC系统,然后结合同一用户终端采用不同FOV接收机的方法,进一步提高了用户终端误码率性能,最后分析了用户终端所处位置不同对用户终端误码率性能的影响。通过仿真验证,本文提出系统使同一用户终端的不同光接收机获得了相近的误码率性能,降低了用户终端误码率。总之,当单个LED的发射功率为10 mW和系统传输速率为100 Mbit/s时,在室内95%的区域用户终端能够达到 10^{-6} 左右的误码率性能。

参考文献:

- [1] XUE X M, LI B L, LI Z Q. Research on hybrid visible light communication system based on MPPM dimming control [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2020, 31(6): 648-653.
薛晓妹, 李宝龙, 李正权. 基于MPPM调光控制的混合可见光通信系统研究[J]. 光电子 • 激光, 2020, 31(6): 648-653.
- [2] HUANG Z B, YANG G W, FAN B, et al. VLC indoor positioning optimization algorithm based on lambertian model parameter estimation [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2020, 31(6): 641-647.
黄兆标, 杨国伟, 樊冰, 等. 基于朗伯模型参数估计的VLC室内定位优化算法[J]. 光电子 • 激光, 2020, 31(6): 641-647.
- [3] ZHOU Y, LI B L, LI Z Q. Research on hybrid ACO-OFDM visible light communication technology integrating VOOK [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2020, 31(5): 556-562.
周颖, 李宝龙, 李正权. 融合VOOK的混合ACO-OFDM可见光通信技术研究[J]. 光电子 • 激光, 2020, 31(5): 556-562.
- [4] SIFAOU H, PARK K, KAMMOUN A, et al. Optimal linear precoding for indoor visible light communication system [C]//IEEE International Conference on Communications, May 21-25, 2017, Paris, France. New York: IEEE, 2017: 1-5.
- [5] GUO X Y, ZHANG K E. Research on STBC MIMO visible light communication system based on precoding [J]. Optical Technology, 2019, 45(4): 436-442.
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.
- [6] ZHANG Y, GAO Y, KE X Z. Analysis of spatial correlation of precoding indoor MIMO visible light communication system [J]. Optoelectronic Engineering, 2020, 47(3): 18-24.
- 张颖, 高悦, 柯熙政. 预编码室内MIMO可见光通信系统空间相关性分析[J]. 光电工程, 2020, 47(3): 18-24.
- [7] FAN Y Y, ZHAO Q, KANG B C, et al. Equivalent ZF precoding scheme for downlink indoor MU-MIMO VLC systems [J]. Optics Communications, 2018, 407: 402-409.
- [8] YING K, QIAN H, BAXLEY R J, et al. Joint optimization of precoder and equalizer in MIMO VLC systems [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 33(9): 1949-1958.
- [9] YU Z, BAXLEY R J, ZHOU G T. Multi-user MISO broadcasting for indoor visible light communication [C]//IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Vancouver, May 26-31, 2013, BC, Canada. New York: IEEE, 2013: 4849-4853.
- [10] LI B, WANG J, ZHANG R, et al. Multiuser MISO transceiver design for indoor downlink visible light communication under per-led optical power constraints [J]. IEEE Photonics, 2015, 7(4): 1-15.
- [11] WANG R, GAO Q, YOU J Y, et al. Linear Transceiver Designs for MIMO indoor visible light communication under lighting constraints [J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(6): 2494-2508.
- [12] ZHAO Q, FAN Y Y, DENG L J, et al. A power-efficient ZF precoding scheme for multi-user indoor visible light communication systems [J]. Optics Communications, 2017, 384: 101-106.
- [13] ZHAI Y, TONG J, XI J. Precoder design for MIMO visible light communication with decision-feedback receivers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(7): 521-524.
- [14] HONG Y, CHEN J, WANG Z X. Multi-user MIMO indoor visible light communication system based on BD precoding [J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(11): 1277-1282.
洪阳, 陈健, 王子雄. 基于BD预编码的多用户MIMO室内可见光通信系统[J]. 光子学报, 2013, 42(11): 1277-1282.
- [15] KOMINE T, NAKAGAWA M. Fundamental analysis for visible-light communication system using led lights [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2004, 50(1): 100-107.
- [16] JIANG Y, LI J, HAGER W W. Joint transceiver design for MIMO communications using geometric mean decomposition [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(10): 3791-3803.

作者简介:

李正权 (1976—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事空时编码和空时自适应信号处理的研究。