

菲涅尔变换正交啁啾调制非正交多址光通信系统

王莹 张峰 彭侠 孟祥艳

Fresnel transform orthogonal chirp modulation of non-orthogonal multiple access optical communication systems

WANG Ying, ZHANG Feng, PENG Xia, MENG Xiangyan

引用本文:

王莹, 张峰, 彭侠, 等. 菲涅尔变换正交啁啾调制非正交多址光通信系统[J]. 应用光学, 2025, 46(5): 1143–1152. DOI: 10.5768/JAO202546.0508003

WANG Ying, ZHANG Feng, PENG Xia, et al. Fresnel transform orthogonal chirp modulation of non-orthogonal multiple access optical communication systems[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(5): 1143–1152. DOI: 10.5768/JAO202546.0508003

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0508003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

非正交多址光通信系统信道均衡的虚拟时反方法

Virtual time reversal method for channel equalization in non-orthogonal multiple access optical communication systems

应用光学. 2024, 45(2): 475–484 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0208005>

信道复用技术在LED水下可见光通信中的应用

Application of channel multiplexing technology in LED underwater visible light communication

应用光学. 2023, 44(5): 1133–1141 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0508002>

基于MIMO的无人机斜程激光通信性能分析

Laser communication performance of UAV slant based on MIMO

应用光学. 2022, 43(5): 1030–1036 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0508006>

自适应功率分配可见光MIMO信道容量研究

Research on MIMO channel capacity for adaptive power allocation visible light

应用光学. 2020, 41(3): 626–630 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0308002>

基于高灵敏度探测器的水下光通信系统

Underwater optical communication system based on high sensitivity detector

应用光学. 2025, 46(4): 929–936 <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0408001>

基于正交非精确拉格朗日乘子法的鲁棒主成分分析

Robust principal component analysis based on orthogonal inexact Lagrange multiplier method

应用光学. 2025, 46(4): 813–818 <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0402004>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 05-1143-10

引用格式: 王莹, 张峰, 彭侠, 等. 菲涅尔变换正交啁啾调制非正交多址光通信系统 [J]. 应用光学, 2025, 46(5): 1143-1152.

WANG Ying, ZHANG Feng, PENG Xia, et al. Fresnel transform orthogonal chirp modulation of non-orthogonal multiple access optical communication systems[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(5): 1143-1152.



在线阅读

菲涅尔变换正交啁啾调制非正交多址光通信系统

王 莹¹, 张 峰¹, 彭 侠², 孟祥艳¹

(1. 西安工业大学 电子信息工程学院, 陕西 西安 710021;

2. 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

摘 要: 功率域非正交多址 (power-domain non-orthogonal multiple access, PD-NOMA) 与可见光通信 (visible light communications, VLC) 结合可有效提升频谱利用率。但在 NOMA-VLC 中, 正交频分调制 (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 易受室内多径效应影响, 导致系统可靠性和通信效率下降。为此, 提出了基于菲涅尔变换的啁啾调制技术, 通过抑制多径效应提升数据传输可靠性。分析了可见光信道下 PD-NOMA-VLC 系统模型, 设计了基于正交啁啾调制 (orthogonal chirp division multiplexing, OCDM) 的 PD-NOMA-VLC 系统, 根据用户信道增益采用固定功率分配方法, 在功率域实现 NOMA 多用户复用, 利用离散菲涅尔变换完成 OCDM 调制, 有效抑制多径效应。理论分析与实验结果表明, 经所提出方法调制后的 PD-NOMA-VLC 系统, 满足前向纠错码率阈值的同时, 用户 1 和用户 2 的通信性能分别提高了 3.3 dB 和 3.2 dB, 两用户的平均性能提高了 3.25 dB, 有效抑制了多径效应。此外, 在调制阶次分别为 16、32、64、128 和 256 时, 系统误码率性能分别提升 2.3 dB、2.4 dB、2.8 dB、6.1 dB 和 4.2 dB, 在保证通信可靠性的同时, 提高了通信效率。

关键词: 可见光通信; 正交啁啾调制; 非正交多址接入; 多径效应; 误码率

中图分类号: TN929.1

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0508003

Fresnel transform orthogonal chirp modulation of non-orthogonal multiple access optical communication systems

WANG Ying¹, ZHANG Feng¹, PENG Xia², MENG Xiangyan¹

(1. School of Electronic Information Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China;

2. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: The integration of power-domain non-orthogonal multiple access (PD-NOMA) with visible light communications (VLC) effectively improves spectrum utilization. However, in NOMA-VLC systems, orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) is susceptible to indoor multipath effects, which degrades system reliability and communication efficiency. To address this issue, this paper proposed a chirp modulation technique based on the fresnel transformation to enhances data transmission reliability by suppressing multipath effects. The PD-NOMA-VLC system model under the visible light channel was analyzed, and a PD-NOMA-VLC system based on orthogonal chirp division multiplexing (OCDM) was designed. A fixed power

收稿日期: 2025-04-28; 修回日期: 2025-06-30

基金项目: 国家自然科学基金 (12004292); 陕西省科技计划项目 (2024GX-YBXM-105); 西安市科技局高校院所科技人员服务企业项目 (24GXFW0034)

第一作者: 王莹, E-mail: 2455770990@qq.com

通信作者: 张峰, E-mail: zf_zx963@163.com

allocation method was employed according to the users' channel gains to achieve NOMA multi-user multiplexing in the power domain. The discrete fresnel transform was utilized to perform OCDM modulation, effectively mitigating multipath effects. Theoretical analysis and experimental results demonstrated that the PD-NOMA-VLC system modulated by the proposed method met the forward error correction bit error rate threshold. The communication performance for user 1 and user 2 improves by 3.3 dB and 3.2 dB, respectively, with an average improvement of 3.25 dB for both users, effectively suppressing multipath effects. Furthermore, at modulation orders of 16, 32, 64, 128, and 256, the system achieves bit error rate (BER) performance improvements of 2.3 dB, 2.4 dB, 2.8 dB, 6.1 dB, and 4.2 dB, respectively, thereby enhancing communication efficiency while ensuring reliability.

Key words: visible light communication; orthogonal chirp division multiplexing; non-orthogonal multiple access; multipath effect; bit error rate

引言

在无线电频谱资源日益紧张背景下,可见光通信^[1-2](visible light communications, VLC)利用光频谱缓解频谱拥堵,可提供高速率、低延迟和高安全的通信^[3]。为提高频谱效率和用户容量,功率域非正交多址(power-domain non-orthogonal multiple access, PD-NOMA)采用功率分配策略使多个用户共享同一频谱资源^[4-5]。传统基于正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)的NOMA-VLC系统虽能应对频率选择性衰落,但在严重多径和多用户干扰等因素下性能受限且系统复杂度较高。

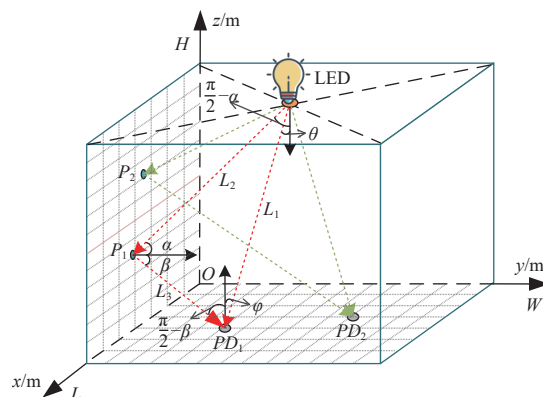
文献[6]提出可见光通信的混合自适应偏置光学方案以提高频谱效率和功率效率,但在复杂的室内环境中,系统的自适应偏置策略无法应对所有情况,导致系统性能波动。文献[7]提出的OFDM-NOMA能够有效支持多用户接入,提高系统容量和资源利用率,但在多径环境下,系统的误码率性能和计算负担相互制约,限制了其实用性和性能的进一步提升。文献[8]提出结合直流偏置OFDM的NOMA-VLC方案,并通过功率分配机制将LED的发射功率按用户信道状态进行分配,但需额外引入直流偏置或信号剪切处理,导致通信效率下降。文献[9]提出了无载波幅度和相位调制方法,能够在有限带宽下实现高频谱效率,但在高噪声、强干扰及多径效应显著的VLC系统中,该调制方法的性能可能受到显著影响。文献[10]提出了一种偏振OFDM技术与脉冲位置调制相结合的方案,旨在解决高速无线光水下通信的传输性能问题,但如何进一步提高信号传输距

离仍是一个挑战。文献[11]研究了正交啁啾调制(orthogonal chirp division multiplexing, OCDM)的原理及其在高速通信中的应用,验证了OCDM能有效利用多径分集。与传统的OFDM调制相比,OCDM^[12-13]通过其独特的时频分布特性,在抑制多径衰落、提高系统可靠性等方面表现出显著优势。

综上所述,OCDM能够最大化地利用系统的频谱资源,有效对抗VLC系统中由多径效应引起的通信可靠性问题。因此,本文将OCDM技术与NOMA-VLC系统相结合,可以实现更强的抗多径干扰能力,从而提升多用户通信系统的性能。

1 室内多用户场景下可见光通信的信道模型分析

由于PD-NOMA系统有多个用户同时进行通信,为此本文对多用户场景下的模型进行分析。以典型的两用户为例,单光源双用户室内可见光系统模型如图1所示。



(a) 室内多用户VLC模型

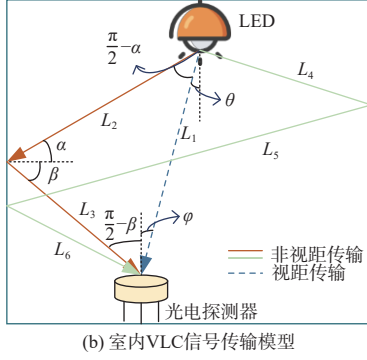


图1 室内多用户VLC模型及信号传输模型

Fig. 1 Indoor multi-user VLC model and signal transmission model

在VLC系统中,白光LED作为发射端光源生成信号 $x(t)$ 。接收端采用光电二极管(photodiode, PD)进行直接探测,接收到的光信号被转换为光电电流输出 $y(t)$,用于后续信号处理和解调。

$$y(t) = \eta x(t) \otimes h(t) + n(t) \quad (1)$$

式中: η 为光电转换率; $h(t)$ 为信道的冲激响应; $n(t)$ 为加性高斯白噪声。

由于光电探测器的尺寸及其接收信号的有效面积相较于LED与光电探测器之间的距离可以忽略不计,故可将LED近似视为朗伯光源,其朗伯参数表示为

$$m = -\frac{\ln 2}{\lg(\cos(\theta_{1/2}))} \quad (2)$$

式中 $\theta_{1/2}$ 为LED的半功率角。朗伯辐射模型通常用以表示VLC信道传输特性,辐射模型为

$$T(\theta) = [(m+1)/2\pi] \cos^m(\theta) \quad (3)$$

式中: θ 是发射光线相对于LED法线的辐射角度。设光源LED坐标为 (x_0, y_0, z_0) ,用户坐标为 (x, y, z) ,发射端与接收端视距距离 D 为

$$D = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2} \quad (4)$$

VLC系统发射端LED与接收端PD间的信道冲激响应计算表达式为

$$h(t; \mathbf{S}; \mathbf{R}) = h_L(t) + h_N(t) = \sum_{k=0}^{\infty} h^k(t; \mathbf{S}; \mathbf{R}) \quad (5)$$

式中: $\mathbf{S}$ 为发射端的位置信息; $\mathbf{R}$ 为接收端的位置信息; k 为光反射次数, $k=0$ 时代表LOS信道增益, $k \neq 0$ 时代表NLOS信道增益。LOS信道与NLOS信道的冲激响应分别为

$$h_L = \frac{(m+1) A_r \cdot \cos(\varphi)}{2\pi D^2} \cos^m(\theta) \delta\left(t - \frac{D}{c}\right) \quad (6)$$

$$h_N = \sum_{f=1}^F \frac{D_r \cdot \Delta C_f}{\pi \cdot L_2^2 \cdot L_3^2} \cos(\theta) \times \cos(\alpha) \cos(\beta) \cos(\varphi) \delta\left(t - \frac{L_2 + L_3}{c}\right) \quad (7)$$

式中: A_r 为PD的接收面积; c 为光速; φ 为光电探测器接收光线的入射角; $\delta(\cdot)$ 为狄拉克函数; F 为反射单元的总数; D_r 为反射面的反射率; ΔC_f 为反射元面积; L_2 为从发射端LED到反射单元之间的距离; L_3 为反射单元到接收端的距离, α 和 β 分别为发射点到反射点的入射角和辐射角。多径信道可以表示为 Q 个路径信号的叠加:

$$h(t) = \sum_{q=1}^Q \rho_q \exp(j\phi_q) \quad (8)$$

式中: q 为室内可见光通信的第 q 条路径; ρ_q 为每条路径的幅度; ϕ_q 为每条路径的随机相位。信道增益矢量表示为 $\mathbf{h} = [h^0, h^1, \dots, h^{Q-1}]^T$ 。由此可得可见光信道增益为

$$H^{(q)}(t; \mathbf{S}; \mathbf{R}) = \begin{cases} \int_0^{T+T_0} \sum_{q=0}^{\infty} h^k(t; \mathbf{S}; \mathbf{R}) dt, & q=0 \\ \int_{T+T_0}^{(q+1)T+T_0} \sum_{q=0}^{\infty} h^k(t; \mathbf{S}; \mathbf{R}) dt, & q=1, 2, \dots, Q-1 \end{cases} \quad (9)$$

由于不同路径的传播时延和信号强度差异,多径效应会导致符号间干扰和频率选择性衰落等,降低解调性能并加剧用户间干扰。为提升系统传输的质量和可靠性,需对多径效应进行有效抑制。

2 建立基于OCDM的PD-NOMA-VLC系统模型

2.1 PD-NOMA-VLC系统原理

PD-NOMA技术通过在同一频带上为不同用户分配差异化功率^[14],支持多用户同时接入。在PD-NOMA-VLC系统中, N 个用户的信号在发射前经过Turbo编码和调制,并根据信道增益分配功率后进行叠加编码,随后,叠加信号经过快速傅里叶逆变换、添加循环前缀等调制步骤后传输。在接收端,光电探测器接收光信号并转换为电信号,随后进行解调并采用串行干扰消除技术区分用户信号,最终完成解调。发送端对不同用户调制后的叠加信号可表示为

$$x = \sum_{i=1}^K \sqrt{p_i} x_i \quad (i=1, 2, \dots, K) \quad (10)$$

式中: p_i 为第 i 个用户分配的功率, 满足 $\sum_{i=1}^k p_i = P$ (P 为总功率); x_i 为第 i 个用户的信号。经过可见光信道后用户接收信号可以表示为

$$y_i = h_i \otimes \sqrt{p_1} x_1 + \dots + h_i \otimes \sqrt{p_i} x_i + n \quad (11)$$

式中: $\otimes$ 表示卷积运算; h_i 为用户信号 x_i 的时域信道响应; n 为噪声。

PD-NOMA-VLC 系统在发射端由公式(9)计算出每个用户对应的信道增益 $H^i(q)(t; S; R)$, 根据信道增益对用户进行功率分配。本文选择使用固定功率分配 (fixed power allocation, FPA) 算法并对用户进行信道增益排序, 同时在接收端利用信道增益排序顺序依次进行解调。由图 1(b) 可以看出, 由于室内复杂环境产生的多径效应, 导致 PD-NOMA-VLC 系统信号传输质量较差。因此论文在 PD-NOMA-VLC 系统中引入 OCDM 调制, 提高通信系统抗多径效应能力, 显著提升通信质量。

2.2 离散菲涅尔变换的啁啾调制

正交啁啾复用通过在相同的频谱带宽内, 利用菲涅尔变换生成一组相互正交的线性啁啾信号, 并将信号加载到 N 组正交的啁啾子载波的幅度和相位上进行调制, 从而实现高效的数据传输和多载波复用^[15]。离散菲涅尔变换被用于生成和检测啁啾信号, 实现高效的多载波通信, 数字实现的 OCDM 信号如图 2 所示, 其中, Chirp 表示啁啾信号, B 为信号带宽, T 为一个符号周期。

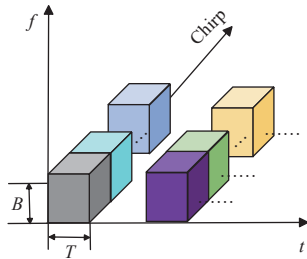


图2 数字实现的 OCDM 信号
Fig. 2 Digitally implemented OCDM signal

在 OCDM 系统中, 啁啾信号被设计为一组在时域和频域上互相正交的基函数, 每个啁啾信号的频率随时间线性变化^[16], 其数学表达式为

$$s(t) = \exp(j(2\pi f_0 t + \pi \gamma t^2)) = \cos(2\pi f_0 t + \pi \gamma t^2) + j \sin(2\pi f_0 t + \pi \gamma t^2), \quad t \in [0, T] \quad (12)$$

式中: f_0 为信号的起始频率; γ 为调频斜率。两个啁啾信号 $s_i(t)$ 和 $s_j(t)$ 在一个符号周期内满足正交条件 $\int_0^T s_i(t) s_j(t) dt = 0, i \neq j$ 。

如图 3 所示, 塔尔博特效应 (Talbot effect) 是典

型的近场衍射现象, 当平面波照射到周期性光栅时在自由空间传播, 在特定的距离会出现与光栅结构相似的图样重现, 这种周期性的自成像现象正是菲涅尔衍射在周期性结构下的结果。其中, 泰伯距离为 $Z_T = d^2/\lambda$, d 为周期光栅距离, λ 为入射光波长。菲涅尔变换通过对信号的二次相位调制实现信号频率的调整, 表达式如下:

$$\hat{U}(\tau) = F_\psi\{U(\xi)\}(\tau) = \frac{\exp(-j\frac{\pi}{4})}{\sqrt{a}} \int U(\xi) \exp(j\frac{\pi}{a}(\tau-\xi)^2) d\xi \quad (13)$$

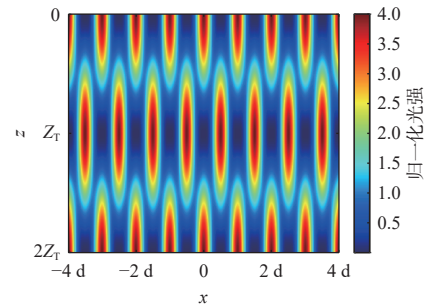


图3 塔尔博特效应光强分布

Fig. 3 Intensity distribution of Talbot effect

菲涅尔变换的本质是乘以一个二次相位调制核函数, 该核函数的形式为

$$\psi_n(t) = \exp(-j\frac{\pi}{a}t^2) \quad (14)$$

式(13)(14)中: $F_\psi\{\cdot\}$ 为菲涅尔变换, $U(\xi)$ 为光栅的复透射率; ξ 、 τ 分别为输入面和输出面的空间坐标; $a = \lambda z$ 为归一化 Talbot 传播距离。

离散菲涅尔变换 (discrete fresnel transform, DFnT) 可以通过相位调制和离散傅里叶变换实现:

$$\Phi = \Theta_1 W \Theta_2 \quad (15)$$

式中: 离散傅里叶变换核函数 W ; 二次相位组 Θ_1 、 Θ_2 在离散形式下分别表示为:

$$W(\mu, \nu) = \frac{1}{\sqrt{M}} \exp(j\frac{2\pi}{M}\mu\nu) \quad (16)$$

$$\Theta_1(\mu, \mu) = \begin{cases} \exp(-j\frac{\pi}{4}) \cdot \exp(j\frac{\pi}{M}\mu^2), & M \bmod 2 = 0 \\ \exp(-j\frac{\pi}{4}) \cdot \exp(j\frac{\pi}{M}(\mu^2 + \mu)), & M \bmod 2 = 1 \end{cases} \quad (17)$$

$$\Theta_2(\nu, \nu) = \begin{cases} \exp(j\frac{\pi}{M}\nu^2), & M \bmod 2 = 0 \\ \exp(j\frac{\pi}{M}(\nu^2 - \nu)), & M \bmod 2 = 1 \end{cases} \quad (18)$$

式中: μ 和 ν 代表频率域的索引, 用于区分频

率域中不同的分量; M 表示参与变换的序列长度。

在发送端, OCDM 的数字调制^[15]表示成矩阵的形式为

$$\mathbf{e} = \Phi^H \mathbf{u} = (\Theta_1^H \mathbf{W} \Theta_2)^H \mathbf{u} = \Theta_2^H \mathbf{W}^H \Theta_1^H \mathbf{u} \quad (19)$$

由式(19)可知, 调制信号向量 $\mathbf{u}$ 与矩阵 Θ_1^H 相乘后进行逆离散傅里叶变换, 然后与 Θ_2^H 相乘即可完成 OCDM 数字调制。同理, 在接收端 OCDM 数字解调可以表示为

$$\mathbf{u}' = \Phi \mathbf{e} = \Theta_1 \mathbf{W} \Theta_2 \mathbf{u} \quad (20)$$

为了进一步验证理论分析, 并直观对比 OCDM 与 OFDM 的频谱特性, 本文通过仿真实验绘制了如图 4 所示的 OFDM 和 OCDM 在频域中的归一化幅度分布。通过对比两者的频谱特性, 可以清晰地观察到, 相较于 OFDM 频谱特征, OCDM 的主瓣略宽, 旁瓣衰减更慢, 这表明其能量在频谱上分布更分散。由于这种频谱扩展特性, OCDM 能够更有效地对抗多径信道中的频率选择性衰落, 从而提升系统的鲁棒性。

2.3 基于 OCDM 的 NOMA-VLC 系统模型

根据 PD-NOMA-VLC 技术与 OCDM 技术的原理, 搭建基于 OCDM 的 PD-NOMA-VLC 系统, 系

统模型如图 5 所示。

与传统 OFDM 调制不同, OCDM 调制在发射端将叠加后的多用户信号完成串并转换后, 通过离散反菲涅尔变换 (inverse discrete fresnel transform, IDFnT) 将频域信号转换为时域 OCDM 基带信号, 并添加循环前缀以增强抗多径能力。接收端首先对接收信号进行光电转换及去循环前缀处理, 随后利用 DFnT 将信号还原为频域调制符号。

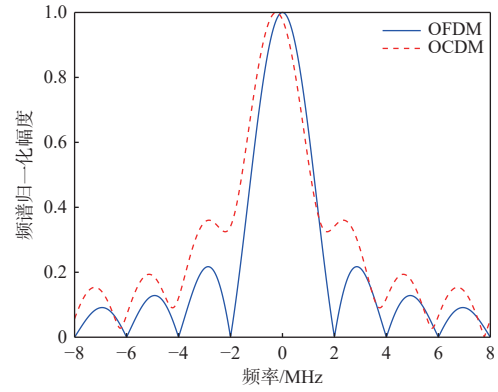


图 4 OFDM 与 OCDM 子载波频谱对比

Fig. 4 Comparison of subcarrier spectrum between OFDM and OCDM

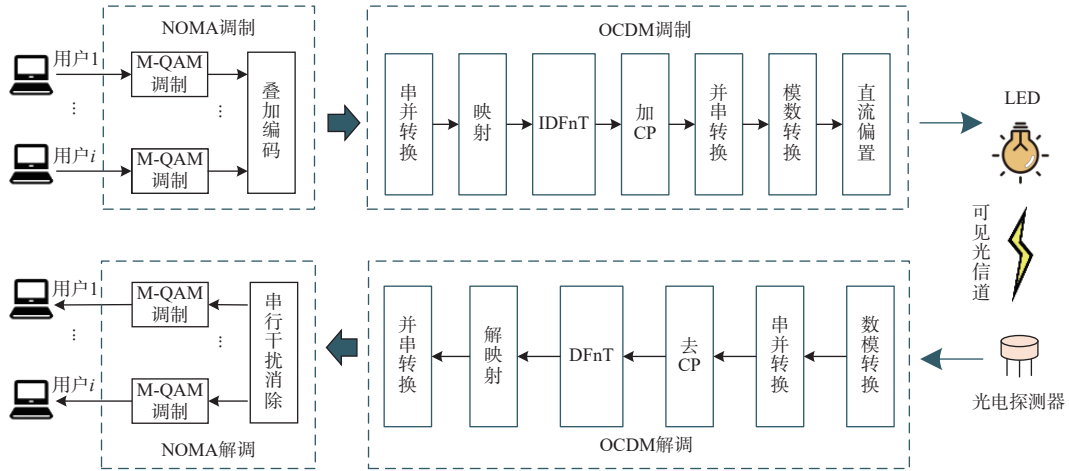


图 5 基于 OCDM 的 NOMA-VLC 系统模型

Fig. 5 NOMA-VLC system model based on OCDM

2.4 OCDM 技术复杂度分析

OCDM 虽在频率选择性信道中表现出较强的抗干扰能力, 但在结构上相较于传统的 OFDM 系统更为复杂^[17]。因此, 本文将从算术复杂度角度分析 OCDM 系统在发射端与接收端相对于 OFDM 系统的复杂度增量, 并量化其复数乘法运算次数。根据式(19)可知, 与传统 OFDM 相比, OCDM

在发送端主要增加了两次对角矩阵乘法, 即两次复数乘法操作, 附加运算量为

$$\Delta_{Tx} = 2 \quad (21)$$

其余部分与 OFDM 完全一致, 整体计算复杂度仍为 $O(N \log_2 N)$, 其中 N 为子载波数。

由式(20)可知, 接收端通过一次逆菲涅尔变换恢复原始符号, 不依赖传统均衡器设计, 也

不需要频域或时域卷积运算。总的附加运算量为

$$\Delta_{\text{Rx}} = 2 + 0.5\log_2 N$$

(22)

OCDM 系统在保持与 OFDM 系统相当频谱效率的前提下,通过引入离散菲涅尔变换增强了系统抗干扰能力,虽然在发送端和接收端分别增加了两次相位矩阵运算,但总体运算复杂度仍维持在 $O(N\log_2 N)$ 量级内,因此,在保证性能提升的同

时,系统复杂度的增加是可控的。

3 实验及性能分析

3.1 实验平台及参数设置

搭建的两用户基于 OCDM 的 PD-NOMA-VLC 通信系统测试平台如图 6 所示,方框 1~7 内分别为电脑端、信号采集模块、电源、LED 灯、聚光镜、探测器端集成电路和示波器。

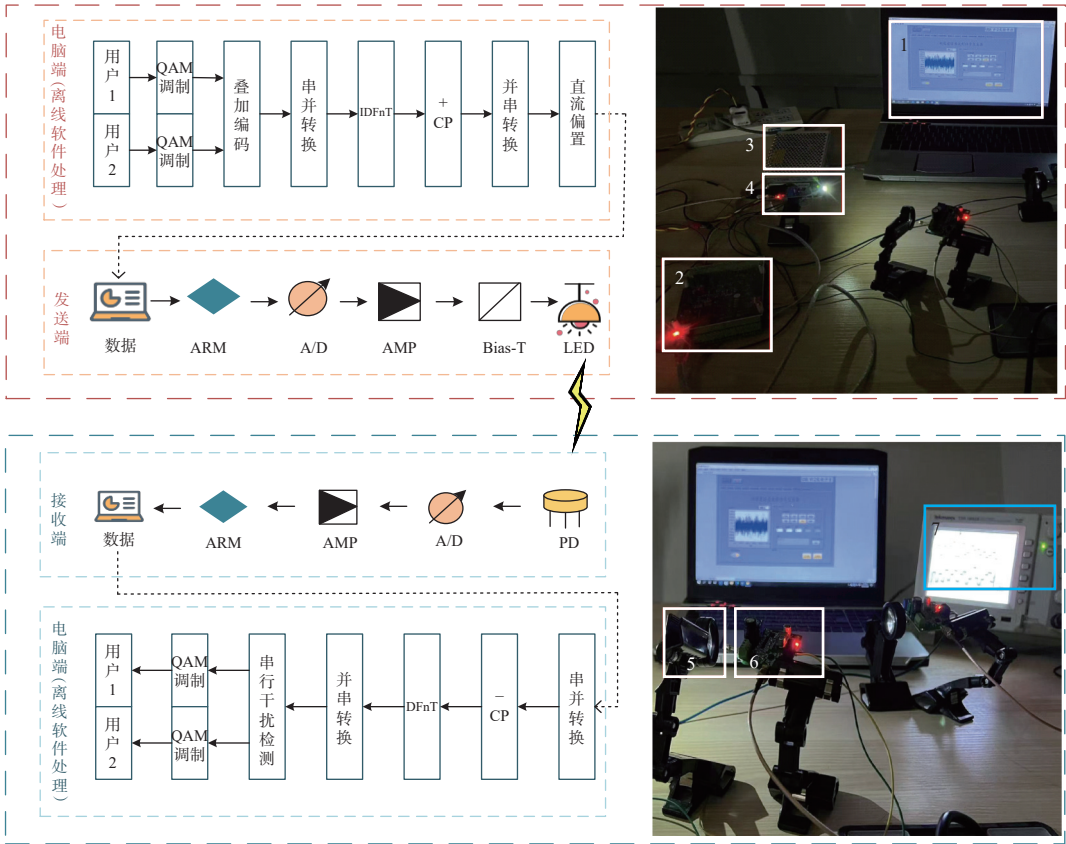


图 6 室内可见光通信的双用户实验平台

Fig. 6 Dual-user experimental platform for indoor visible light communication

图 6 所示的室内可见光通信实验中,探测器端集成电路由光电二极管、放大器、滤波器、模数转换器集成在一起的电路,用光电二极管实现光到电的转化,放大器将经变换后的弱电信号进行放大,提高信噪比和灵敏度,利用滤波器和模数转换器滤除信号中的杂波,并将电信号转换为数字信号。实验系统参数如表 1 所示。

3.2 基于星座图的 PD-NOMA-VLC 通信可靠性定性分析

OFDM 和 OCDM 采用 16QAM 调制,子载波数为 128,导频数为 16。基于 OCDM 和 OFDM 技术解调后 PD-NOMA-VLC 系统的两用户星座图如

图 7 所示。

由图 7 可以看出, OCDM 调制在信号传输中的

表 1 参数配置

Table 1 Parameter configuration

NOMA-VLC 系统参数	参数值
墙面反射率	0.8
子载波数	128
快速傅里叶变换长度	128
保护间隔类型	循环前缀
循环前缀(CP)长	16
NOMA 功率分配	固定功率分配
NOMA 用户功率	用户 1:0.6; 用户 2:0.4
调制方式	QAM

表现优于 OFDM 调制。图 7(a) 和 (b) 中, 用户 1 和用户 2 的星座点分布较为稀疏且存在一定的散射, 表明 OFDM 系统受到多径干扰和噪声的显著影响, 对系统的可靠性构成了负面影响。图 7(c) 和 (d) 中两用户星座点分布更加集中且点簇更紧凑, 表明 OCDM 技术显著抑制了多径效应、噪声以及其他信道衰落因素对信号的影响, 通过图 7 可以得到不同调制方式星座图的调制误差比(modulation error ratio, MER), 如表 2 所示。

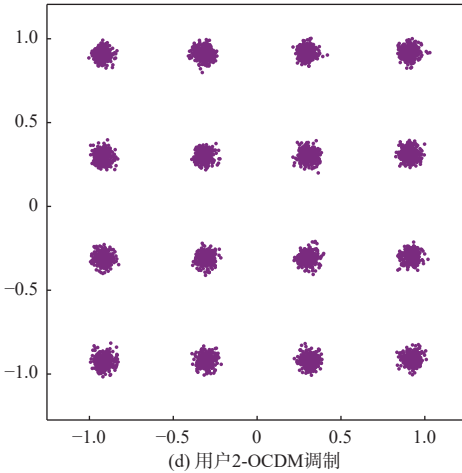
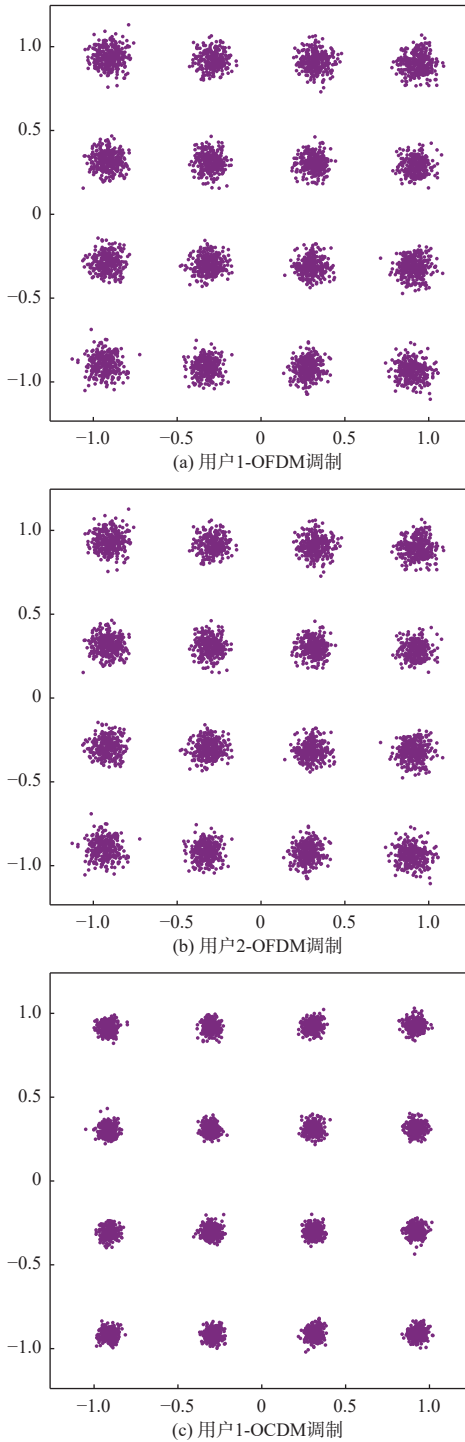


图 7 OFDM 与 OCDM 调制后的接收端星座图

Fig. 7 Constellation diagrams at the receiver after OFDM and OCDM modulation

表 2 星座图的 MER 对比

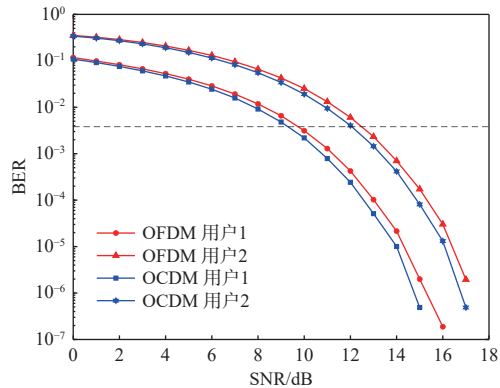
Table 2 Comparison of MER for constellation diagram		
星座图	MER/dB	SNR/dB
OFDM-用户1	22.46	20
OFDM-用户2	22.27	20
OCDM-用户1	23.39	20
OCDM-用户2	23.32	20

由表 2 可知, 与 OFDM-PD-NOMA 系统相比, OCDM-PD-NOMA 系统的 MER 值较高, 用户 1 与用户 2 分别提高了 0.93 dB 和 1.05 dB。OCDM-PD-NOMA 系统在相同的信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)条件下表现出了更强的抗干扰能力和抗多径能力, 星座点分布更加集中, 误差更小, 表明系统接收信号的质量得到了显著提升, 能够确保系统正确解调。

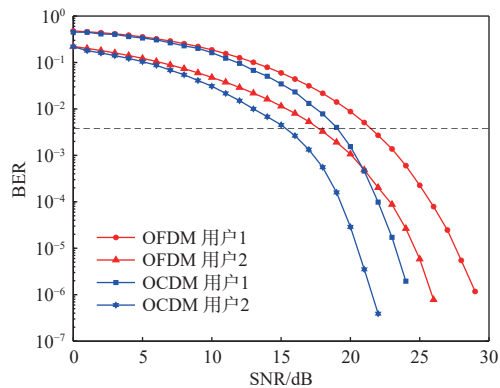
3.3 基于误码率的可靠性分析

为研究 OFDM 与 OCDM 在系统性能上的差异和对系统抗噪声干扰能力的影响, 本文在高斯信道与多径信道的条件下对比 OFDM-PD-NOMA 和 OCDM-PD-NOMA 系统的误码率(bit error ratio, BER)。图 8 分别展示了在两种信道环境中, 当调制方式为 16 QAM, 信道数量为 4 径时, 两个系统中用户 BER 随 SNR 变化的趋势。图 8(a) 中 OCDM-PD-NOMA 系统的误码率略低于 OFDM-PD-NOMA 系统, 表明其在理想化信道条件下具有一定的性能优势。图 8(b) 中, OCDM 展现了更显著的抗干扰与抗噪声能力。在满足误码率阈值(3.8×10^{-3})时, 相较于 OFDM-PD-NOMA 系统, OCDM-PD-NOMA

系统的用户1和用户2分别获得约3.3 dB和3.2 dB的信噪比增益。此外,在相同的SNR下,OCDM-PD-NOMA系统的两个用户的误码率均显著低于OFDM-PD-NOMA系统。上述结果表明,OCDM调制充分利用了信号的时频特性并对多径效应有明显的抑制能力,显著提升了复杂信道条件下的系统性能。



(a) 高斯信道下误码率对比



(b) 多径信道下误码率对比

图8 不同信道条件下的误码率对比

Fig. 8 BER comparison under different channel conditions

为研究不同多径数目对基于OCDM和OFDM调制的PD-NOMA-VLC系统性能的影响,本文在多径信道数分别为1, 2, 3, 4, 5, 9时进行实验验证,结果如图9所示。

可以看到,OCDM-PD-NOMA系统用户平均BER性能优于OFDM-PD-NOMA系统,随着多径信道的增加,两系统的性能差距越来越大。当BER达到 10^{-3} 量级时,在单径信道条件下,OCDM-PD-NOMA系统仅实现约0.2 dB的性能增益,但随着信道多径数目的增加,系统性能显著提升。在2径、3径、4径和5径信道环境中,性能增益分别达到约1.6 dB、2.0 dB、2.3 dB和3.2 dB。当信道多径数目增至9径时,尽管整体系统性能相较低阶多

径情况下有所下降,但所提出的OCDM-PD-NOMA系统相较于传统的OFDM-PD-NOMA系统仍表现出约10 dB左右的性能优势,验证了其在复杂多径环境下的鲁棒性和有效性,表明OCDM调制在多径信道环境下具有更强的抗干扰能力和更优的误码率表现。

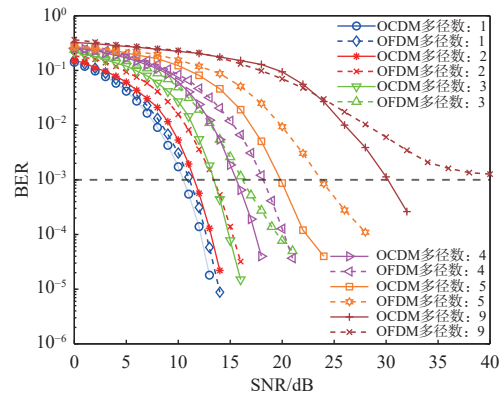


图9 不同多径数下的平均误码率对比

Fig. 9 Comparison of average BER under different multipath conditions

3.4 前置调制阶次对系统性能影响

在前置调制阶次分别为4, 16, 32, 64, 128和256的情况下,对OFDM-PD-NOMA系统与OCDM-PD-NOMA系统的误码率进行了对比分析,实验结果如图10所示。

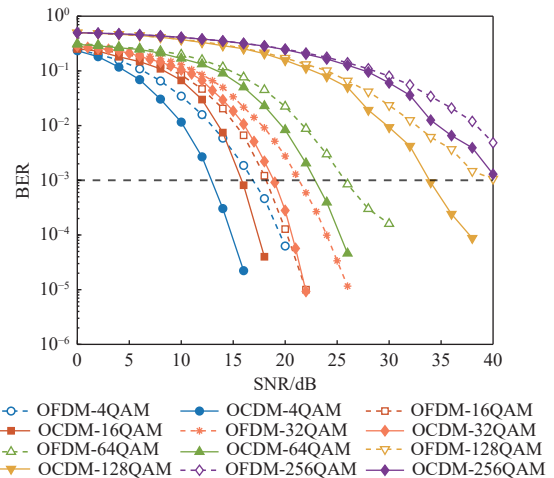


图10 不同调制阶次对误码率的影响

Fig. 10 Effect of modulation orders on BER

由图10可知,在6种调制阶次下,与OFDM相比,OCDM呈现出不同程度的性能优化。两系统的BER达到 10^{-3} 时所对应的具体性能对比见表3。对比表3中的数据可以看出,在所有调制阶

次下, OCDM 方法的 BER 性能均优于 OFDM 方法。在调制阶次为 4 时, OCDM 方法相较于 OFDM 方法的系统整体平均性能增益达到 3.4 dB, 表明 OCDM 能够有效降低系统对噪声和干扰的敏感性, 具有更好的误码率性能。随着调制阶次增大, 当调制阶次为 16、32、64、128 和 256 时, OCDM 方法的系统整体平均性能增益分别为 2.3 dB、2.4 dB、2.8 dB、6.1 dB 和 4.2 dB, 表明其高阶调制下依然具有一定的性能优势。因此, OCDM 不仅能够提升通信质量, 还能显著提高系统的通信效率, 尤其是在多用户和高需求的通信场景下具有较强的应用潜力。

表 3 不同调制阶次时的误码率对比
Table 3 BER comparison for different modulation orders

调制阶次	调制方法	平均SNR/dB
4	OFDM	16.9
	OCDM	13.5
16	OFDM	18.2
	OCDM	15.9
32	OFDM	21.2
	OCDM	18.8
64	OFDM	25.8
	OCDM	23.0
128	OFDM	40.0
	OCDM	33.9
256	OFDM	44.0
	OCDM	39.8

4 结论

本文在 PD-NOMA-VLC 系统中引入 OCDM 调制, 旨在通过多载波技术提高系统的频谱效率, 并利用 OCDM 调制的优势来克服多径效应和频率选择性衰落问题, 提高系统的抗干扰能力和通信性能。理论分析和实验结果表明:

1) OCDM-PD-NOMA 系统相较于 OFDM-PD-NOMA 系统具有更好的抗多径效应能力。相较于 OFDM-PD-NOMA 系统, 在多径信道环境下两个用户的信噪比增益分别提高了约 3.3 dB 和 3.2 dB, 验证了 OCDM 调制抗多径效应的有效性。

2) 随着多径数目的增加, OCDM 调制对 PD-NOMA-VLC 系统的性能提升更为显著。在 3 径和 5 径信道条件下, OCDM 调制相较于传统 OFDM 调制分别实现了约 2.0 dB 和 3.2 dB 的性能增益。

特别是在 9 径信道环境中, 尽管整体系统误码率有所上升, 但 OCDM-PD-NOMA 系统较 OFDM-PD-NOMA 系统仍实现了约 10 dB 的性能提升, 验证了 OCDM 调制在复杂多径环境中具有更强的抗多径衰落能力, 能有效提高多用户系统的稳定性和可靠性。

3) OCDM-PD-NOMA 系统在高阶调制下的性能优于 OFDM-PD-NOMA 系统。在前置调制阶次为 16、32、64、128 和 256 时, 系统性能分别提升了 2.3 dB、2.4 dB、2.8 dB、6.1 dB 和 4.2 dB, 表明 OCDM 调制不仅有效降低了系统对噪声和干扰的敏感性, 还显著提升了多用户通信的质量和效率。

综上所述, 本文验证了 OCDM-PD-NOMA 系统在多径衰落环境、高阶调制条件下的性能优势。该研究不仅为可见光通信系统在复杂信道环境下的抗干扰与高效传输提供了新的思路, 也验证了 NOMA 技术与新型多载波调制技术深度融合的可行性。

参考文献:

[1] 欧阳兴, 陈高华, Paul Townsend. 光通信网络关键技术及其发展趋势[J]. 控制与信息技术, 2019(1): 12-17.
OUYANG Xing, CHEN Gaohua, TOWNSEND Paul. Key technologies and development trends of optical communication networks[J]. Control and Information Technology, 2019(1): 12-17.

[2] 彭嘉驰, 郭建中, 李燕龙, 等. 信道复用技术在 LED 水下可见光通信中的应用[J]. 应用光学, 2023, 44(5): 1133-1141.
PENG Jiachi, GUO Jianzhong, LI Yanlong, et al. Application of channel multiplexing technology in LED underwater visible light communication[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(5): 1133-1141.

[3] IBHAZE A E, ORUKPE P E, EDEKO F O. High capacity data rate system: review of visible light communications technology[J]. Journal of Electronic Science and Technology, 2020, 18(3): 100055.

[4] 周围, 徐锐, 李倩倩, 等. 基于 NOMA 的室内可见光通信最优功率分配方案[J]. 数据采集与处理, 2024, 39(5): 1297-1308.
ZHOU Wei, XU Rui, LI Qianqian, et al. Optimal power allocation scheme for indoor visible light communication based on NOMA[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2024, 39(5): 1297-1308.

- [5] 顾霜凌, 张峰, 彭侠, 等. 非正交多址光通信系统信道均衡的虚拟时反方法[J]. *应用光学*, 2024, 45(2): 475-484.
GU Shuangling, ZHANG Feng, PENG Xia, et al. Virtual time reversal method for channel equalization in non-orthogonal multiple access optical communication systems[J]. *Journal of Applied Optics*, 2024, 45(2): 475-484.
- [6] HONG H D, LI Z Q. Hybrid adaptive bias OFDM-based IM/DD visible light communication system[J]. *Photonics*, 2021, 8(7): 257.
- [7] UDAY T, KUMAR A, NATARAJAN L. NOMA for multiple access channel and broadcast channel in indoor VLC[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2021, 10(3): 609-613.
- [8] HUSSEIN A A, BOUALLEGUE A. Performance analysis of OMA/NOMA for VLC communication systems[C]//2023 22nd Mediterranean Microwave Symposium (MMS), Sousse, Tunisia: IEEE, 2023: 1-7.
- [9] YANG Y, ZENG Z M, CHENG J L, et al. An enhanced DCO-OFDM scheme for dimming control in visible light communication systems[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(3): 7904813.
- [10] CHIN, ZHOU Y J, LIANG S Y, et al. Enabling technologies for high-speed visible light communication employing CAP modulation[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(2): 510-518.
- [11] QI Z R, ZHAO X Y, POMPILI D. Polarized OFDM-based pulse position modulation for high-speed wireless optical underwater communications[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2023, 71(12): 7163-7173.
- [12] OUYANG X, ZHAO J. Orthogonal chirp division multiplexing[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2016, 64(9): 3946-3957.
- [13] 詹涛, 雷霞. OCDM 系统抗衰落性能分析[J]. *无线电通信技术*, 2023, 49(1): 157-162.
ZHAN Tao, LEI Xia. Anti-fading performance analysis of OCDM system[J]. *Radio Communications Technology*, 2023, 49(1): 157-162.
- [14] OUYANG X, ANTONY C, ZHAO J, et al. Intensity-modulation direct-detection OCDM system based on digital up-conversion[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, San Jose, CA, USA: IEEE, 2018: 1-2.
- [15] TIAN F Y, CHEN X M. Multiple-antenna techniques in nonorthogonal multiple access: a review[J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2019, 20(12): 1665-1697.
- [16] 王晶琦, 曾欢, 陶詹, 等. 一种基于 OCDM 的新型雷达通信一体化系统[J]. *微波学报*, 2022, 38(6): 14-18.
WANG Jingqi, ZENG Huan, TAO Zhan, et al. A new radar-communication integrated system based on OCDM[J]. *Journal of Microwaves*, 2022, 38(6): 14-18.
- [17] 宁晓燕, 宋禹良, 孙志国, 等. 双选信道下 OCDM 系统低复杂度均衡[J]. *电子与信息学报*, 2023, 45(2): 516-523.
NING Xiaoyan, SONG Yuliang, SUN Zhiguo, et al. Low complexity equalization algorithm of OCDM systems in doubly-selective channels[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2023, 45(2): 516-523.