

基于 FBMC 的可见光通信系统

陈俊霖, 赵黎, 范琳

(西安工业大学 电子信息工程学院, 西安 710021)

摘要: 正交频分复用(OFDM)系统应用于可见光通信(VLC)中时, 存在易受多径干扰、噪声频偏和较高的峰均比(PAPR)等因素影响的问题。提出一种基于滤波器组多载波(FBMC)的 VLC 系统。首先, 运用偏移正交幅度调制(OQAM)和由逆快速傅里叶变换(IFFT)和多相网络(PPN)组成的综合滤波器, 有效提升系统误码率性能, 并减少带外泄露。然后, 通过蒙特卡罗方法对其进行仿真验证。仿真与实验结果表明: 在子载波数量为 128、调制方式为 16QAM 且系统误码率为 10^{-3} 的情况下, 所提出的系统相较于 OFDM 系统所需的信噪比(SNR)改善了大约 5 dB; 同时, 在归一化频率为 0.1 时, 所提系统的带外泄漏功率相对于 OFDM 系统减少了 40 dB, 而系统的调制误差率(MER)达到了 19.6 dB。

关键词: 正交频分复用; 可见光通信; 滤波器组多载波; 原型滤波器; 误码率

中图分类号: TN91 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2025)01-0052-06

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.01.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Visible light communication system based on FBMC

CHEN Junlin, ZHAO Li, FAN Lin

(School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: When orthogonal frequency division multiplexing(OFDM) systems are applied to visible light communication(VLC), they are prone to issues such as multipath interference, frequency offset noise, and a high peak-to-average power ratio(PAPR). A filter bank multi-carrier (FBMC) based VLC system is proposed. Firstly, by employing offset quadrature amplitude modulation (OQAM) and a composite filter consisting of inverse fast fourier transform(IFFT) and polyphase network(PPN), the system effectively improves bit error rate performance and reduces out-of-band leakage. Then, it is validated through simulation using the Monte Carlo method. The simulation and experimental results show that under conditions where the number of subcarriers is 128, the modulation scheme is 16QAM, and the system bit error rate is 10^{-3} , the proposed system requires an improvement of approximately 5 dB in signal-to-noise ratio (SNR) compared to the OFDM system. Meanwhile, at a normalized frequency of 0.1, the out-of-band leakage power of the proposed system is reduced by 40 dB relative to the OFDM system, with the system's modulation error ratio(MER) reaching 19.6 dB.

Key words: orthogonal frequency division multiplexing, visible light communication, filter bank multi-carrier, prototype filter, bit error rate

0 引言

在当今可见光通信(VLC)领域, 随着数据传输速

率和容量需求的不断增长, 正交频分复用(OFDM)技术已成为一种广泛应用的解决方案^[1-4]。OFDM 作为第四代的移动信息系统(4G)和 5G 中的关键技术之一, 通过将信道分成多个正交子载波, 不仅提高了频谱效率, 还能够有效地减轻多径衰落的影响。然而, OFDM 也存在一些局限性, 例如显著的带外辐射、系统对载波频率偏移的高度敏感性^[5], 以及为了抑制符号间干扰(ISI)而引入的循环前缀(CP)。虽然 CP 有效地减少了 ISI, 但它增加了每个符号的持续时间, 从而在一定程度上降低了数据传输的有效速率^[1]。这些挑战限制了 OFDM 在满足未来无线通信系统多方面需求上的

收稿日期: 2024-07-22。

基金项目: 陕西省科技计划项目-重点研发计划一般项目(2024GX-YBXM-105)资助; 西安市科技局高校院所科技人员服务企业项目(4GXF0026)资助。

作者简介: 陈俊霖(1998—), 男, 浙江温州人, 硕士研究生, 现就读于西安工业大学电子信息工程学院电子信息专业, 主要从事室内可见光通信系统的研究工作, 目前已申请发明专利 1 项, 参加了第五届无线光通信理论与组网技术论坛, 并荣获优秀报告荣誉证书。



应用潜力。

为了解决上述问题,文献[6]提出了广义频分复用(GFDM)技术。GFDM将 N 个符号组成一帧信息,并在每一帧之前添加一个CP,从而减少了CP的数量,提高了系统的传输效率。然而,该系统在解调信号时厚在较高的复杂度。文献[7]提出了一种通用滤波多载波(UFMC)技术。UFMC系统利用精心设计的滤波器来防止带外泄露,这使得在时域上可以省略CP,提升了频谱效率。然而,UFMC系统存在大尺度时延扩散的问题,这增加了接收端处理的复杂性,提升了系统实现的难度。文献[8]提出了一种滤波器组多载波(FBMC)调制技术。与传统OFDM技术相比,FBMC去除了CP的数据结构,并放宽了子载波间的严格正交条件^[9],从而提高了传输效率。每个子载波通过一组原型滤波器进行处理,这使得频谱利用率更高,进而提升了系统性能^[10]。文献[11]针对FBMC在传输效率方面的不足,提出了一种改进方案:将每个正交幅度调制(QAM)符号的同相(I)和正交(Q)分量在时间上交错半个符号间隔。采用这种偏移正交幅度调制(OQAM)方法,可以提升系统的频谱效率,并增强其抗多径干扰的能力。文献[12]提出了一种基于逆快速傅里叶变换(FFT)的FBMC调制器和解调器的快速实现方案。该系统易于实现且灵活性强,但其计算复杂度较高,导致能耗增加,从而影响系统的整体性能。文献[13]设计了适用于FBMC系

统的原型滤波器,该设计减少了对滤波器参数手动调整的需求,并增强了系统抵抗载波间干扰(ICI)的能力。然而,该方案在实际实现时仍面临困难,并且其计算复杂度依然较高。除此之外,这些方案均未充分考虑信道特性、FBMC信号结构特点,以及传统滤波器设计方法中存在的问题,因此未能显著提升系统的整体性能。

鉴于此,本文提出一种基于FBMC的VLC系统(下文简称FBMC-VLC系统),旨在克服现有方案的局限性并提高系统性能。

1 系统建模

本文提出的FBMC-VLC系统模型如图1所示。该系统结构由OQAM映射、综合滤波器组(SFB)、分析滤波器组(AFB)和OQAM解映射这4个部分构成。在执行IFFT前,通过对输入数据施加厄米特对称处理,确保IFFT的输出为实数序列。FBMC-VLC作为一种多载波系统,在结构上沿用了OFDM系统的IFFT/快速傅里叶变换(FFT)结构,从而有效降低了系统的复杂度。然而,不同于OFDM通过添加CP来减轻ICI和ISI的方法,FBMC-VLC系统采用了OQAM技术,这不仅避免了对CP的依赖,还能有效提升频谱效率。

1.1 信号调制

FBMC-VLC系统的子载波总数为 M , $a_{m,n}$ 为第 m

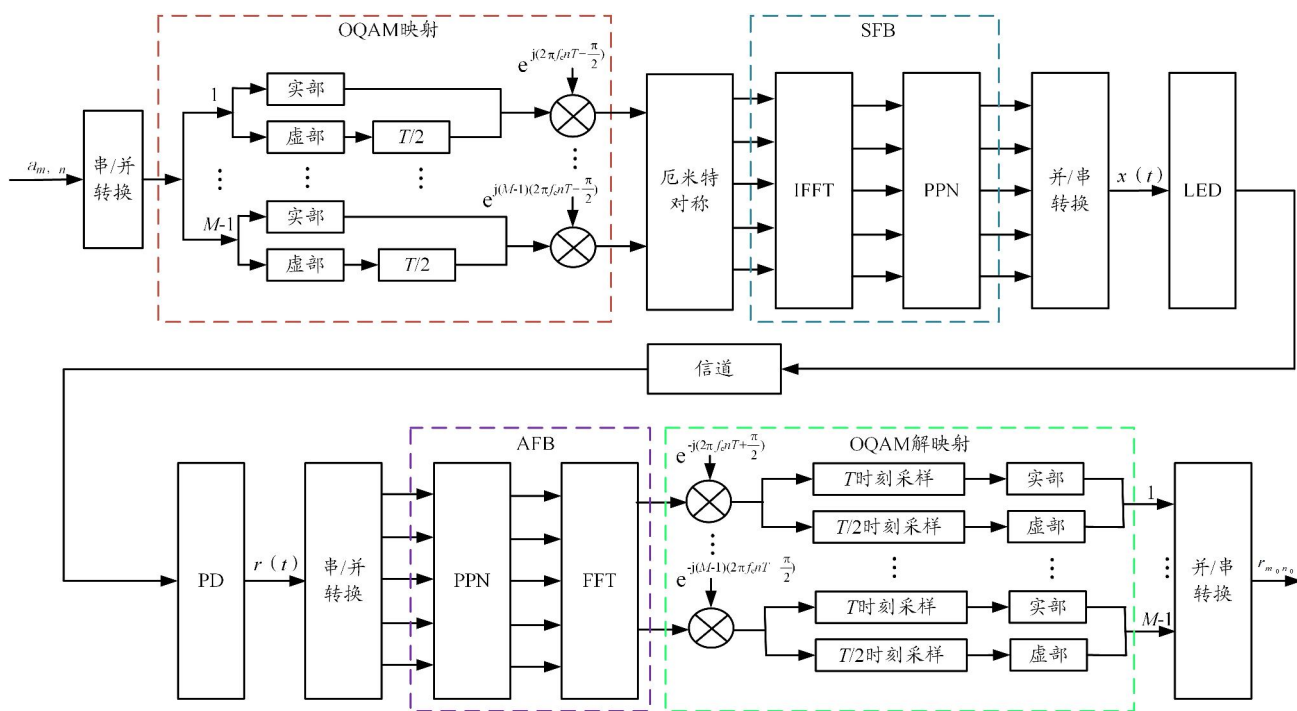


图1 FBMC-VLC系统模型

陈俊霖, 赵黎, 范琳: 基于 FBMC 的可见光通信系统

个子载波在第 n 个时隙上承载的 FBMC 数据符号。FBMC-VLC 系统发射信号的表达式为

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sum_{m=0}^{M-1} a_{m,n} g_{m,n}(t) \quad (1)$$

其中, (m, n) 为时频网格上的点, 可用来表示 FBMC-VLC 系统符号的位置。 $g_{m,n}(t)$ 为点 (m, n) 的滤波器函数。该函数是由 FBMC-VLC 系统的原型滤波器基函数经过相应的频移和时移后得到的, 用于在特定的时频位置上对信号进行调制或解调。 $g_{m,n}(t)$ 可以表示为

$$g_{m,n}(t) = e^{j\frac{\pi}{2}(m+n)} e^{j2\pi m \Delta f t} g(t - n\tau_0) \quad (2)$$

其中, Δf 表示 FBMC-VLC 系统中的子载波间隔, $\Delta f = 1/T$, t 为时域系数。因为采用了 OQAM, 所以要将 QAM 后输出数据的实部和虚部错开 τ_0 ($\tau_0 = T/2$) 个间隔进行传输, 虚实交错地发送复数符号的虚部和实部, 降低载波间的混叠干扰, 保证子载波在实数域是正交传输, 确保 FBMC 系统拥有不低于 OFDM 系统的传输效率。

为满足发光二极管(LED)对正输入信号的约束, 数据预处理阶段集成了调制与预编码技术, 确保与 VLC 系统的强度调制需求相兼容。在此基础上, FBMC-VLC 系统架构进一步引入了厄米特对称处理步骤, 具体实施细节如式(3)所示。

$$X_m = \begin{cases} X_{M-m}^*, m=1, \dots, M/2-1 \\ 0, m=0 \text{ or } m=M/2 \end{cases} \quad (3)$$

其中, X_m 表示第 m 个子载波上的数据, X_m^* 表示第 m 个子载波数据的共轭转置。

1.2 原型滤波器

FBMC-VLC 系统最大的优势在于其原型滤波器的设计。传统的矩形滤波器存在带外泄露高、频谱效率低以及容易受到 ISI 等问题。因此, FBMC-VLC 系统的原型滤波器采用非矩形滤波器来有效抑制多径干扰, 从而显著提升频谱效率。原型滤波器的优化设计策略主要包括时域窗口化调整和频域采样优化。这些措施有助于提升 FBMC-VLC 系统的整体性能。在频域采样的思想框架下, 本文利用 PHYDYAS 滤波器作为原型滤波器进行构建。若重叠因子设为 K , 则频域中的采样点数确定为 $2K-1$, 这些采样点均需遵守奈奎斯特的采样准则, 保证在其余符号的采样过程中不会产生混叠现象。其中, K 满足以下关系式:

$$\frac{1}{K} \sum_{k=-K+1}^{K-1} |H_k|^2 = 1 \quad (4)$$

其中, H_k 为频域抽头系数。由此可以得到滤波器的时频域响应为

$$h(t) = 1 + 2 \sum_{k=1}^{K-1} H_k \cos(2\pi \frac{kt}{NK}) \quad (5)$$

其中, N 为 IFFT 变化点数。

频域响应内容 $H(f)$ 如式(6)所示。

$$H(f) = \sum_{k=-(K-1)}^{K-1} H_k \frac{\sin\left[\pi\left(f - \frac{k}{NK}\right)NK\right]}{NK \sin\left[\pi\left(f - \frac{k}{NK}\right)\right]} \quad (6)$$

其中, f 为频域系数。

当 $K=2, 3, 4$ 时, 对应的频域抽头系数如表 1 所示。实验数据表明, 通过增加频域抽头系数 H_k 可以进一步抑制带外辐射, 时频特性也变得更加优越。经过比较, 本文选择了 $K=4$ 时的原型滤波器。

表 1 滤波器频域抽头系数

K	H_0	H_1	H_2	H_3
2	1	$\sqrt{2}/2$	-4	-4
3	1	0.911 438	0.411 438	-4
4	1	0.971 960	$\sqrt{2}/2$	0.235 148

1.3 信号恢复

当信号在信道状况良好、无失真的情况下进行传输时, 接收端进行解调得到的数据符号为

$$r_{n_0, n_0} = \int x(t) g_{n_0, n_0}^*(t) dt = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sum_{m=0}^{M-1} a_{m,n} \times \int g_{m,n}(t) g_{n_0, n_0}^*(t) dt \quad (7)$$

FBMC-VLC 系统的 PHYDYAS 原型滤波器必须满足实数域正交的特性。让 2 个不同时频点处的滤波器函数在实数域做内积可以得到

$$\text{Re}(\langle g_{m,n}(t), g_{m_0, n_0}(t) \rangle) = \text{Re}\left(\int g_{m,n}(t) g_{m_0, n_0}^*(t) dt\right) = \delta_{m, m_0} \delta_{n, n_0} \quad (8)$$

其中, δ 为系统冲击响应, 只有当 $m=m_0$ 时, $\delta_{m, m_0}=1$, 否则 $\delta_{m, m_0}=0$ 。当时频点不同时, 实部为 0, 滤波器之间存在着虚部干扰 u_{m_0, n_0} 。根据这个结论, 可以将式(7)改为

$$r_{n_0, n_0} = a_{m_0, n_0} + j u_{m_0, n_0} \quad (9)$$

经过解调处理, 式中第一项即为发送端所传递的实数信号, 第二项则是虚部干扰。因此, 通过提取解调结果的实部, 能够还原出原始的实数数据。

1.4 系统复杂度

在 FBMC-VLC 系统中, 由于运用到了多相网络

(PPN)结构法,需要进行 N 点的傅里叶运算和 KN 次乘法运算,复杂度为 $KN + M \log_2 N$,SFB 的乘法总数由 OQAM、 N 点 IFFT 和 N 分支的多相滤波器这 3 个部分组成,其复杂运算度为

$$O_{\text{SFB}} = 2 \{ 2N + [(\log_2 N - 3) + 4] + 2KN \} \quad (10)$$

式(10)中乘以 2,是为了将 QAM 符号的复数值拆分为 2 个实数值,以符合 OQAM 符号的构造要求。由于 AFB 和 SFB 使用了相似的处理模块,但顺序相反,因此它们的计算复杂度是相同的。FBMC-VLC 系统的总体复杂度为

$$O_{\text{FBMC}} = O_{\text{SFB}} + O_{\text{AFB}} = 4 \{ 2N + [(\log_2 N - 3) + 4] + 2KN \} \quad (11)$$

假设 $N=512, K=4$, 可以计算出 FBMC-VLC 系统的总体复杂度为 20 520。

2 仿真分析

为了验证 FBMC-VLC 系统应用于 VLC 中的性能,本文建立了室内 VLC 系统模型如图 2 所示。LED 安装在顶部中心位置,光电探测器(PD)放置于水平面上。

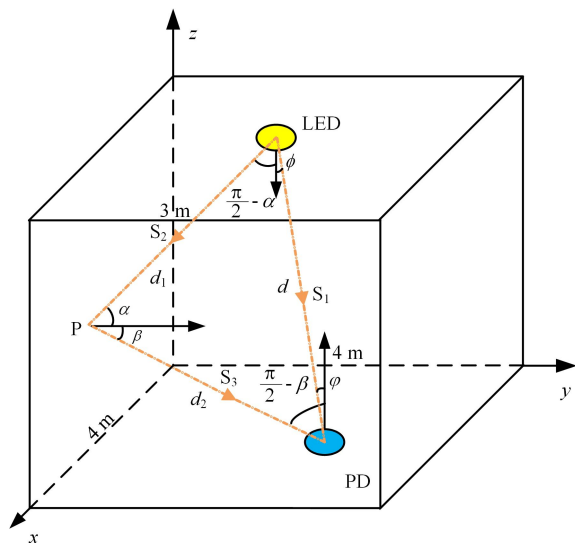


图2 室内 VLC 系统模型

图 2 中, S_1 表示 LED 直射向 PD 的光路, S_2 表示 LED 光源直射到墙壁上 P 点的光路, S_3 表示经反射到墙壁后再次反射到 PD 的光路, S_2, S_3 均为非视距链路(NLOS)。其中, $P(x_1, 0, z_1)$ 为反射点, 作为下一次的次级点光源。 φ 为入射角, ϕ 为点光源发射角, α 为反射面光入射角, β 为次级光源反射到 PD 的发射角, d 为 LED 与 PD 之间的距离, d_1 为 LED 与 P 点之间的距离, d_2 为 P 点与 PD 之间的距离。

本文利用蒙特卡罗方法对 FBMC-VLC 系统和

OFDM 系统的误码率(BER)性能进行分析,参数设置如表 2 所示。多子载波数量下,FBMC-VLC 系统与 OFDM 系统可靠性对比情况如图 3 所示。可以看出,在信噪比(SNR)为 15 dB 时,FBMC-VLC 系统的 BER 降低至 10^{-3} 。在相同的仿真参数设置下,该系统的可靠性明显优于 OFDM 系统。此外,添加 CP 可以改善 OFDM 系统的 BER 性能,但这种改进会在达到某个阈值后趋于平缓。当目标 BER 设定为 10^{-3} 且子载波数量为 128 时,与 OFDM 相比,FBMC-VLC 系统可以在相同 BER 下实现大约 4 dB 的 SNR 增益;而在低 SNR 条件下,2 种系统的可靠性差异不大。

表 2 FBMC-VLC 系统仿真参数

参数类型	值	参数类型	值
LED 型号	4.8 mm LISUNG	调制方法	OQAM
探测器型号	LSSAPD9-500	调制阶数	16QAM
传输功率/W	1	原型滤波器	PHYDYAS
光传输距离/cm	20	重叠因子	$K=4$

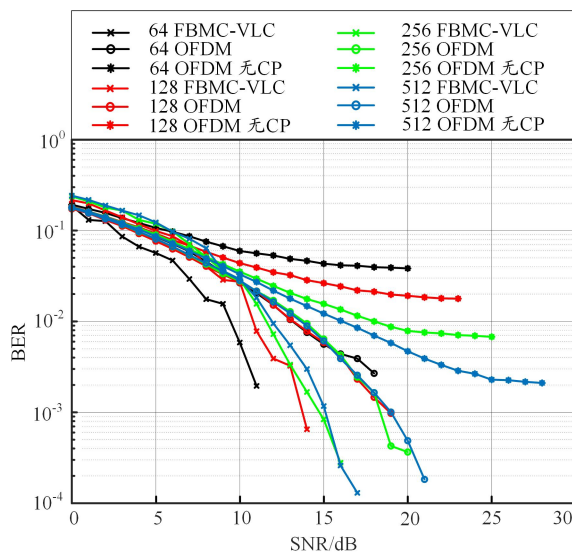


图3 多子载波数量下,2种系统的可靠性对比

FBMC-VLC 系统与 OFDM 系统的功率谱对比图如图 4 所示。可以看出,在归一化频率为 0.5 时,OFDM 信号的功率谱未能衰减至 -40 dB;相比之下,FBMC 信号在归一化频率仅为 0.1 时就已经衰减到 -40 dB,并且在更高的归一化频率(如 0.5)下,其功率谱更是衰减至约 -170 dB。这一实验结果表明,由于 FBMC-VLC 系统具有极低的带外能量泄露特性,能够在相邻频带间以更狭窄的频率间隔进行频谱资源利用,相较于 OFDM 系统显著提升了频谱效率。因此,FBMC-VLC 系统不

陈俊霖,赵黎,范琳: 基于 FBMC 的可见光通信系统

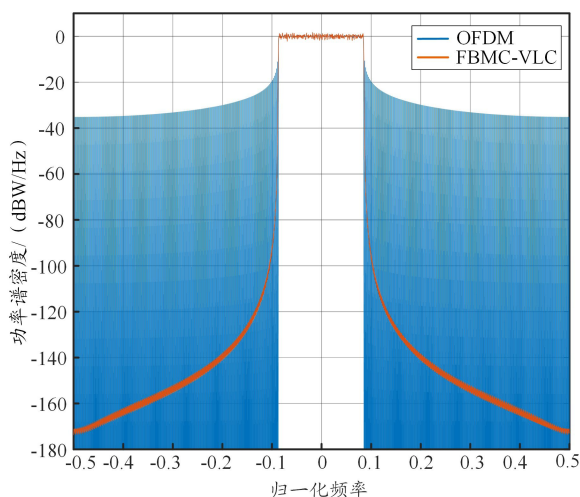


图 4 2 种系统的归一化频率对比

仅能够支持更多的子载波个数,承载更丰富的通信信息,还实现了对频谱资源的更加充分和高效的利用。

不同调制方式下,FBMC-VLC 系统的性能对比情况如图 5 所示。可以看出,在相同的参数配置下,当系统的 BER 达到 10^{-3} 时,采用 4QAM 的 FBMC-VLC 系统所需的 SNR 相较于 8QAM 降低了 5 dB,而与 16QAM 相比则降低了 7 dB。然而,较低的调制阶数虽然有助于降低 BER,但通常是以牺牲数据传输速率为代价的。因此,在确保满足信道通信质量的前提下,应根据具体需求权衡利弊,选择适当的调制阶数以优化数据传输效率。

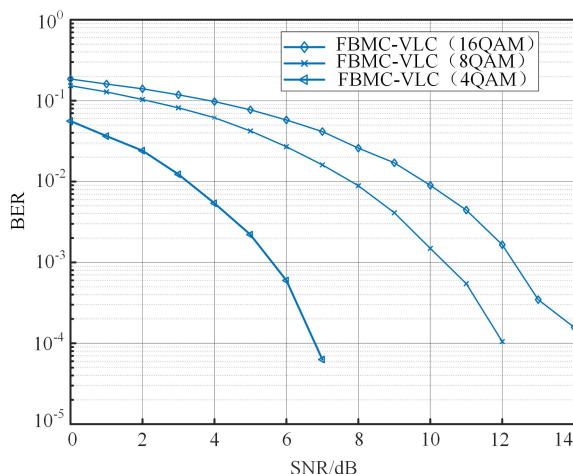


图 5 不同调制阶数下,FBMC-VLC 系统的可靠性对比

在同样的参数下,对 2 种系统的峰均功率比(PAPR)性能进行对比验证,结果如图 6 所示。可以看出,相较于 OFDM 系统,FBMC-VLC 系统的 PAPR 更低,展现出了优越的 PAPR 性能。这一优势主要是因为 OFDM 系统中对子载波间严格正交性的要求。虽然这

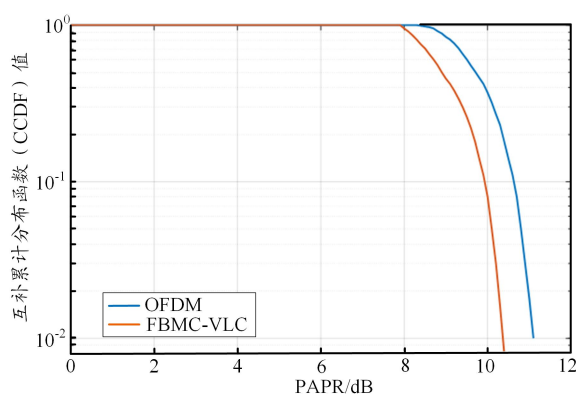


图 6 2 种系统的 PAPR 特性对比

种正交性有效地避免了子载波间的干扰,但它也限制了信号波形设计的灵活性,导致频谱能量较为集中,进而提高了系统的 PAPR。相比之下,FBMC-VLC 系统不要求子载波之间必须保持严格的正交性,通过优化滤波器来更均匀地分布频谱能量,从而实现了更低的 PAPR 性能。

3 实验验证

本文集成软硬件设计,构建了一个基于 1 W LED 灯的点对点 FBMC-VLC 系统实测平台。该平台的核心在于可见光信号的发射与接收模块稳固地安装在光学导轨上,其实验环境如图 7 所示。实验中,LED 和 PD 被放置在同一水平面上,两者之间的传输距离设定为 15 cm。为了增强光信号的传输效率,在光传输路径中引入了凸透镜作为聚光元件,以优化光信号的聚焦和传输性能。通过这种方式,不仅提高了信号强度,还改善了系统的整体通信质量。

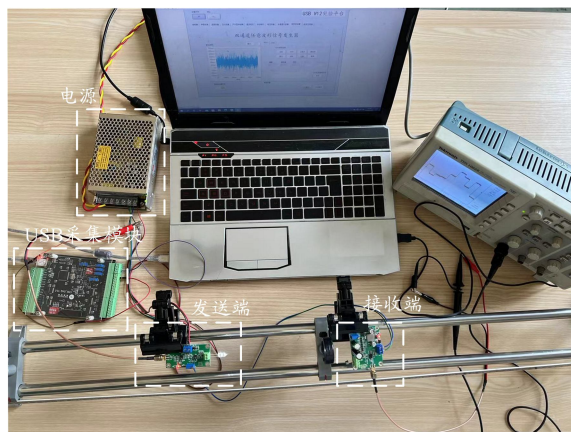


图 7 FBMC-VLC 实验环境

系统发射端采用了 16QAM 方案。发送端(以红色表示)与经过信道传输后接收端(以橙色表示)的星座图如图 8 所示。可以看出,外圈星座点分散,说明系统

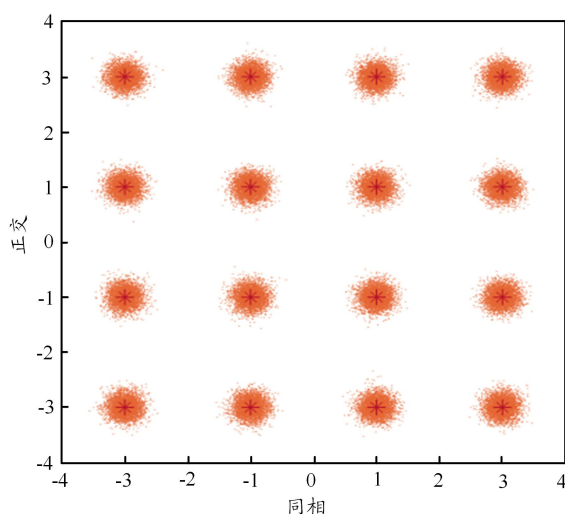


图8 16QAM 方案下, 系统的星座图

受信道噪声干扰较少。通过使用调制误差率(MER)作为性能评估指标, 本文对所接收到的 16QAM 星座图进行了分析, 计算得出系统的 MER 值为 19.6 dB。这一结果确保了数据解调准确率高达 99.98%, 验证了系统的有效性。

4 结束语

在 VLC 系统中, 传统的 OFDM 技术面临 PAPR、相位噪声敏感度和载波频率偏移等挑战。为解决这些问题, 本文提出了 FBMC-VLC 系统。该系统利用非矩形原型滤波器组, 在时频域内提供更好的聚焦性和更强的抗干扰能力。在室内多径信道环境下, 当子载波数量设定为 128 且采用 16QAM 时, 系统的仿真结果表明: 在 BER 达到 10^{-3} 的情况下, FBMC-VLC 系统相较于 OFDM 系统能够实现约 4 dB 的 SNR 增益。此外, FBMC-VLC 系统还展示了更优的 PAPR 特性。最后, 在实验室条件下构建了一个点到点的 FBMC-VLC 实验平台。实验结果表明: 在调制方式为 16QAM 时, 该系统通信稳定, 确保了 99.98% 的符号能被准确解调, 从而保障了信号传输的质量与效率。本文提出的 FBMC-VLC 系统不仅提高了 BER 性能, 还增强了该技术未来发展的可能性和应用范围。

参考文献:

- [1] KAUSHAL K K, YADAV V, JAIN D. Enabling VLC data centers with DCO-OFDM technology[EB/OL]. (2024-07-09)[2024-07-22]. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12596-024-01967-y>.
- [2] ZHANG Y Y, WANG J K, ZHANG W H, et al. LED-based visible light communication for color image and audio transmission utilizing orbital angular momentum superposition modes[J]. Optics Express, 2018, 26(13): 17300–17311.
- [3] ALRAKHAH H, HIJAZI M, SINANOVIC S, et al. Clipping noise in visible light communication systems with OFDM and PAPR reduction[J]. Photonics, 2024, 11(7): 643–1–643–12.
- [4] 柯熙政, 雷妍, 张颖. Hartley 变换 OFDM 调制的可见光通信研究[J]. 信号处理, 2019, 35(2): 266–274.
- [5] SANTHANAM S, KRISHNA M S. MIMO-OFDM based optical millimeter wave generation for radio over fiber wireless communication systems[EB/OL]. (2024-07-12)[2024-07-22]. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12596-024-01945-4>
- [6] TOWLIAT M, RAJABZADEH M, TABATABAEE S M J A. On the noise enhancement of GFDM[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(8): 1160–1163.
- [7] KUMAR M, PATIDAR M, SINGH N. Filtered ofdm system model for papr reduction in the growth of 5G[J]. Journal of Electrical Systems, 2024, 20(3s): 1437–1452.
- [8] NISSEL R, SCHWARZ S, RUPP M. Filter bank multicarrier modulation schemes for future mobile communication[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(8): 1768–1782.
- [9] KATAKSHAM V S, SIDDIAIAH P. Optimized intelligent framework for peak-to-average power ratio reduction in filter bank multicarrier[J]. International Journal of Information Technology, 2023, 15(6): 2917–2927.
- [10] JAMAL H, MATOLAK D W. Dual-polarization FBMC for improved performance in wireless communication systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 68(1): 349–358.
- [11] CHISAB R F. The powerful activity for FBMC-OQAM wireless communication system relies on slantlet transform[J]. International Journal of Intelligent Engineering & Systems, 2023, 16(6): 992–1005.
- [12] HAMDAR F, GUSSEN C M G, NADAL J. FBMC/OQAM transceiver for future wireless communication systems: inherent potentials, recent advances, research challenges[J]. IEEE Open Journal of Vehicular Technology, 2023, 4: 652–666.
- [13] NADAL J, NOUR C A, BAGHDADI A. Design and evaluation of a novel short prototype filter for FBMC/OQAM modulation[J]. IEEE Access, 2018, 6: 19610–19625.