

引用本文: 杨立伟, 梁雪, 赵礼豪, 等. 一种改进的基于 OFDM 的 PLC-VLC 混合网络系统[J]. 光通信技术, 2023, 47(6): 1-5.

一种改进的基于 OFDM 的 PLC-VLC 混合网络系统

杨立伟¹, 梁雪¹, 赵礼豪², 王志立¹, 许文龙³

(1. 中国农业大学 信息与电气工程学院, 北京 100083;

2. 北京信息科技大学 机电工程学院, 北京 100083; 3. 北京邮电大学 信息与通信工程学院, 北京 100083)

摘要: 为了降低室内电力线通信和可见光通信(PLC-VLC)系统的复杂度并提高系统的稳定性, 提出一种改进的基于正交频分复用(OFDM)的 PLC-VLC 混合网络系统, 通过改进双 PLC 调制器和发光二极管(LED)结构, 降低传统混合网络系统的复杂度。搭建了 PLC-VLC 混合系统的仿真平台, 对系统中信号的频谱图、眼图和误码率性能进行仿真分析。仿真结果表明, 所提改进的基于 OFDM 的 PLC-VLC 混合网络系统中电信号与光信号转换基本不失真, 信号传输准确率较高, 系统性能良好。

关键词: 可见光通信; 电力线通信; 混合网络; 正交频分复用

中图分类号: TN929 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2023)06-0001-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.06.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Improved PLC-VLC hybrid network system based on OFDM

YANG Liwei¹, LIANG Xue¹, ZHAO Lihao², WANG Zhili¹, XU Wenlong³

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. College of mechanical and electrical Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100083, China

3. School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to reduce the complexity and improve the stability of indoor power line communication and visible light communication (PLC-VLC) systems, an improved PLC-VLC hybrid network system based on orthogonal frequency division multiplexing(OFDM) is proposed. By improving the structure of dual PLC modulator and light emitting diode (LED), the complexity of traditional hybrid network system is reduced. The simulation platform of PLC-VLC hybrid system is built, and the performance of signal spectrum, eye map and bit error rate are simulated and analyzed. The simulation results show that the proposed improved PLC-VLC hybrid network system based on OFDM has no distortion in the conversion of electrical signal and optical signal, high signal transmission accuracy and good system performance.

Key words: visible light communication, power line communication, hybrid network, orthogonal frequency division multiplexing

0 引言

可见光通信(VLC)技术是一种新型的无线光通信技术,具有频谱资源丰富、无电磁辐射干扰、安全性极

高的优点。电力线通信(PLC)技术指利用电力线作为介质实现数据信息和媒体信号传输的一种通信技术,它不仅可以利用高压输电线路进行高频信号的传输,也可以采用低压配电网进行载波通信,因此 PLC 技术在智能电网和智慧家庭中得到广泛的应用。由于发光二极管(LED)发光器件需要电流的驱动,为避免室内 VLC 成为“信息孤岛”,文献[1]将 PLC 和 VLC 级联,可以轻松地通过电力线连接互联网,实现“有电就有光,有光便能通信”,使两者相辅相成。

2003 年, KOMINE T 等人^[2-3] 使用 PLC 作为 VLC 的传输干线,构建 PLC 和 VLC 融合网络,解决了室内 VLC 通信的布线问题;2006 年,他们将正交频分复用(OFDM)技术应用到 PLC-VLC 系统中,并对系统性能

收稿日期: 2023-02-01。

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 61705260)资助;中国农业大学 2115 人才培养计划项目资助。

作者简介: 杨立伟(1981—),女,河北唐山人,博士,副教授,中国农机学会标准化分会委员、中国农业大学智慧农村能源高水平创新团队成员。主要研究方向是光/无线网络研究,包括接入网、光/无线融合网络、可见光通信、农业物联网、电力线通信等。承担各类国家、省部级课题以及自然科学基金课题多项;发表文章百余篇,其中 SCI/EI 检索文章 70 余篇;申请发明专利 6 项,其中授权专利 3 项。完成行业标准及团体标准十余项。



杨立伟,梁雪,赵礼豪,等:一种改进的基于 OFDM 的 PLC-VLC 混合网络系统

进行分析,提高了 VLC 频谱资源利用率。2009 年,ALAVI S E 等人^[4]在融合系统中加入阻抗匹配,提高了系统传输速率。2015 年,NDJIONGUE A R 等人^[5]将 OFDM 与正交相移键控(QPSK)技术相结合应用在 PLC 信道,并且在 VLC 信道中使用色移键控(CSK)进一步提高系统容量;同年,SONG J 等人^[6]利用 PLC 信道、VLC 信道和 LED 等效信道的串联形式建立了 PLC-VLC 混合系统的信道分析模型。2017 年,CHEN M 等人^[7]对基于 OFDM 的混合 PLC-VLC 通信模型进行了研究,采用奇异值分解(SVD)与线性插值相结合进行信道估计,但该算法在块结构下对导频空间不敏感,系统误码率性能较低。

为了进一步提高 PLC-VLC 混合网络系统的传输效率和降低系统的复杂性,本文提出一种改进的基于 OFDM 的 PLC-VLC 混合网络系统。

1 传统的 PLC-VLC 混合网络系统

传统的 PLC-VLC 混合网络系统是将数据源信号借助 PLC 调制解调器耦合到电力线上,数据源信号通过解调器转换为适合 PLC 传输调制方案和频谱范围的信号,而 LED 端则采用另一个解调器和解码转发模块,使得传输信号更适合 VLC 系统调制。

传统的 PLC-VLC 混合系统框图如图 1 所示。在该系统中,信号传输面临多径传输、电力线背景噪声、脉冲噪声等挑战,因此系统常常伴随着频率选择性衰落。为了解决这些问题,混合网络中采用了 OFDM 技术。系统工作原理如下:

在下行线路中,随机信号序列在 PLC 发射端首先经过正交调制、正交幅度调制(QAM)编码后送入 OFDM 调制器,将高速串行的数据流转换为并行的低

速数据流,并调制到不同的子载波上,经衰减器、耦合器先后调整信号的强度,隔离强电、弱电后接入到 VLC 系统的输入接口。VLC 发射端将接收到的数字信号通过光源组件转化为光信号,再经驱动电路控制光信号的强度后发射出去。在 VLC 接收端,光电探测器接收光信号并将其转换为电信号,前置放大器和主放大器负责将光电探测器输出的弱电信号放大。放大后的信号通过均衡器进行均衡处理,以消除信号在传输过程中引起的失真。判决器将均衡后的信号进行解调和判决,并将其转换为数字序列。其中,时钟提取电路用来使接收端时钟与发送端时钟同步,从而确保接收信号的准确还原。

在上行线路中,信号经耦合器将信号调制到电力线中,经过 PLC 接收端的调制后进行传输^[8]。通过这种方式,可以最大限度地减少由于多径效应造成的信号衰减和抗频率选择性衰落,从而保证电信号和光信号的转变基本不失真。

2 改进的 PLC-VLC 混合网络系统

传统的 PLC-VLC 混合网络系统在信号发射端使用了 2 个调制解调器^[8],这些调制解调器在系统中起到通信、接收、转换信号的作用。但是,使用 2 个调制解调器的系统在长期使用中容易出现故障,而且电源线布局复杂。针对此情况,本文提出了一种改进的 PLC-VLC 混合网络系统,其结构如图 2 所示。具体改进措施如下:

1)改进传统电力线的 PLC 发射端,将 2 个调制解调器改成 1 个调制器,即移去正交调制器,只保留 OFDM 调制器,将电力线信号直接耦合到 LED 中。在 PLC 发射端,OFDM 调制器通过在电力线中嵌入多个

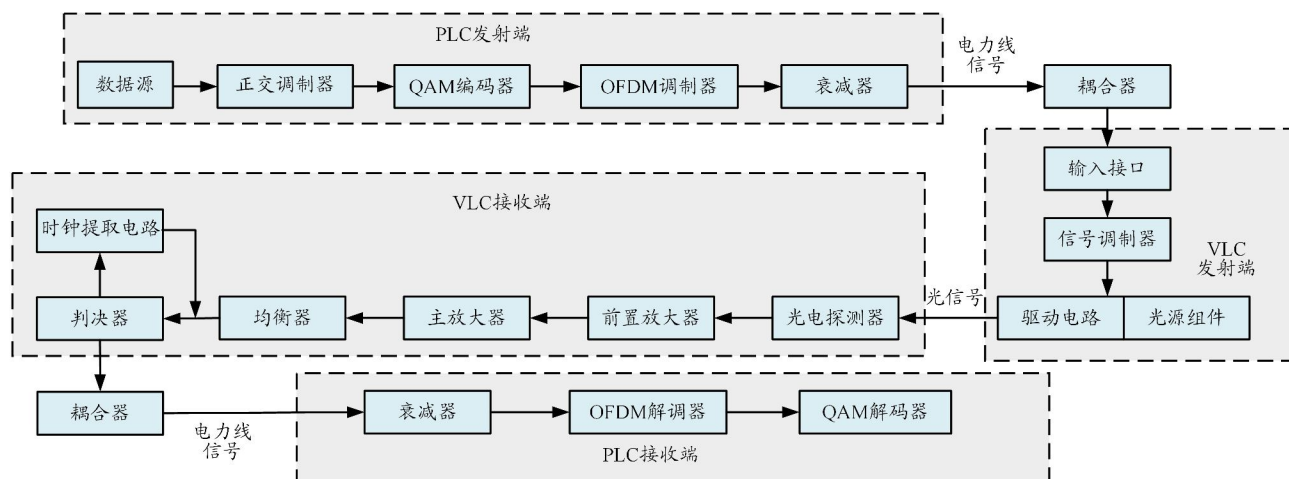


图 1 传统的 PLC-VLC 混合网络系统框图

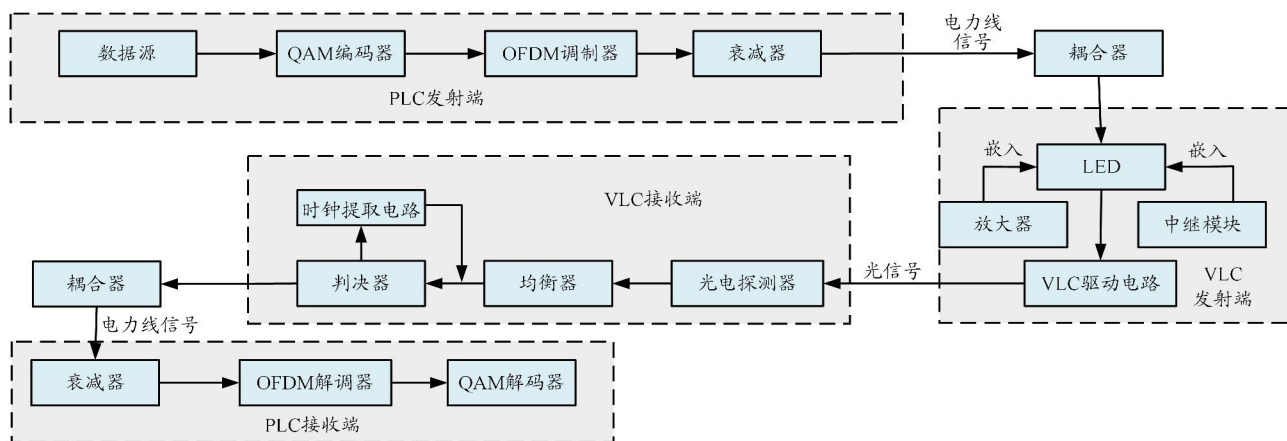


图 2 改进的 PLC-VLC 混合网络系统架构图

不同的子载波,可以在不同的频率上并行发送多个符号,从而达到提高信号质量和增加传输速率的目的。

2)改进 LED。由于 VLC 的信号传输范围受到诸多因素影响,例如光源功率、传输环境光衰减和障碍物等,这些因素会导致传输信号强度衰减和失真,从而降低信号可靠性和传输距离。为此,本文将放大器和中继模块电路集成到 LED 芯片中,以增强信号功率并扩大传输距离,减少解调及再调制过程,降低电力线布局复杂度,避免电力线间干扰,从而提高系统稳定性。

3 仿真结果分析

本文利用 OptiSystem 仿真软件对改进的 PLC-VLC 混合网络系统进行仿真,系统参数、LED 参数分别如表 1、表 2 所示。

首先,本文仿真了 OFDM 调制与解调后的信号频谱图,分别如图 3、图 4 所示。从图 3 可以看出,经过 OFDM 调制后的信号在频率小于 150 GHz 时功率变化相对稳定,平均功率稳定在 -20 dBm,但变化幅度相对较大;在频率为 150~240 GHz 时,信号的功率有所增

表 1 系统参数

参数	值
LED 带宽/MHz	<5
传输功率/W	1
光电探测器有效接收面积/cm ²	500
光电探测器视场角/(°)	70
调制方式	QPSK/16QAM
光传输距离/cm	20
电力线长度/m	5

表 2 LED 参数

LED 参数	值
照明颜色	白色
工作电压/V	3.0~3.2
发光强度/cand	5 000~6 000
半功率角度/(°)	120
反向电流/μA	5
输入电流/mA	20

大,这是因为随频率的提高,信号的脉冲干扰和衰落问题会增大,OFDM 调制时导致多个信号叠加的瞬时功率也会增大;当频率大于 250 GHz 时,信号的功率有所降低,稳定在 -30 dBm 左右,同时功率变化幅度变得非常小。这表明采用 OFDM 调制技术能够在一定程度上抵消多径效应,提高信号的抗干扰性能。从图 4

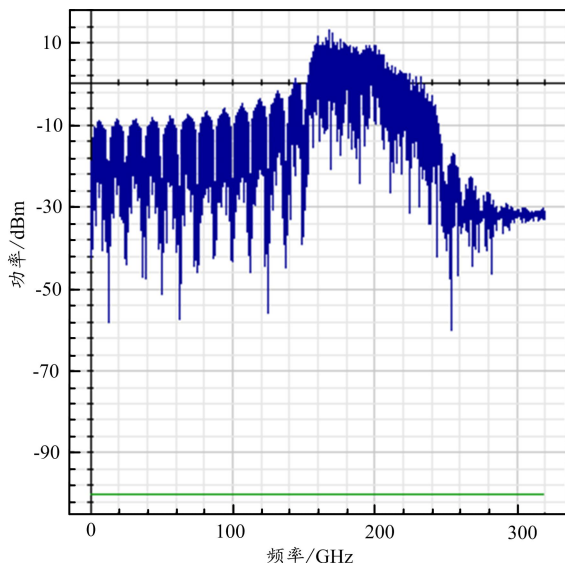


图 3 OFDM 调制后的信号

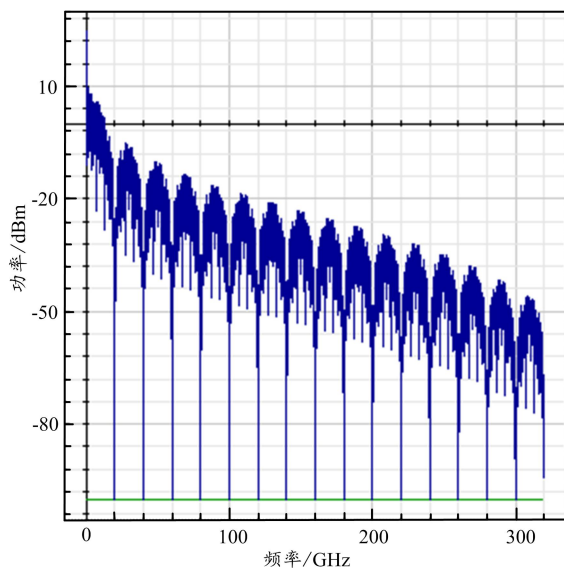


图4 OFDM 解调后的信号

可以看出,解调后的信号功率随频率的提高以一定的规律降低,这是因为对接收信号进行 OFDM 解调处理时,会通过频率补偿技术来校正信号在传输过程中所产生的频率偏移。这表明 OFDM 解调技术能够在保证各个子载波相互正交的同时使其正确地对应原始数据,以便进行后续处理和解码。

然后,对光接收机接收到的 VLC 的光脉冲信号进行了仿真,得到其眼图、品质因子 Q 值随时间的变化曲线、误码率情况分别如图 5~ 图 7 所示。从图 5 可以看出,该系统的眼图张开很大且端正,表明系统的码间串扰小、噪声低。对比图 6、图 7 与眼图可以发现,越靠近眼图张开最大的地方(例如时间为 0.6 比特周期附近),品质因子 Q 值越大,信号误码率值越小,因此信号的传输准确率越高。

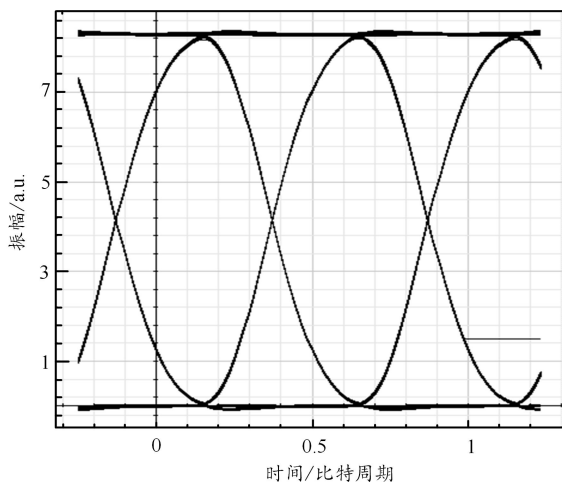


图5 光接收机接收到的信号眼图

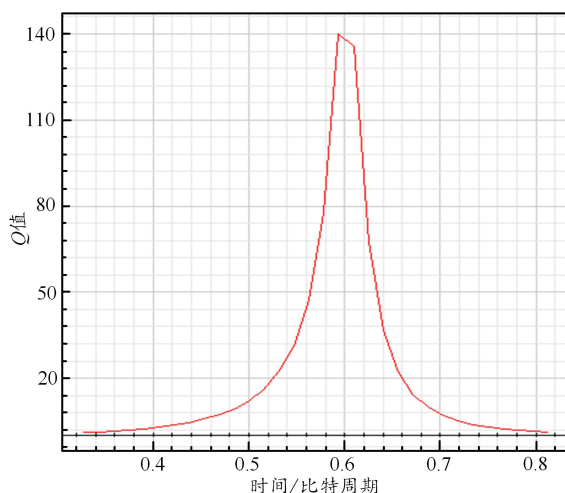


图6 品质因子 Q 值随时间的变化曲线

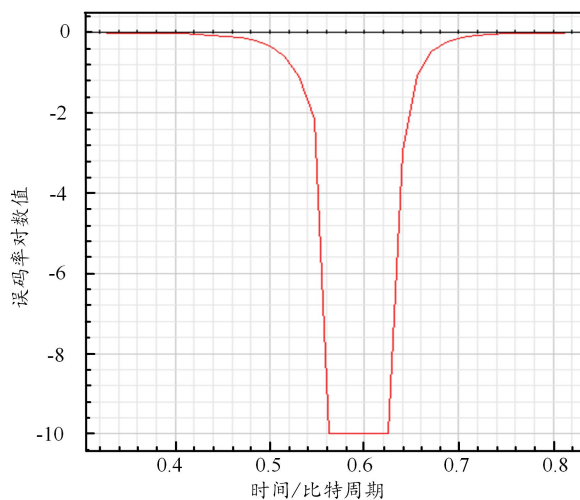


图7 光接收机接收到的信号误码率情况

4 结束语

本文提出了一种改进的基于 OFDM 的 PLC-VLC 混合网络系统,将传统电力线的双调制器(正交调制器、OFDM 调制器)改成单个 OFDM 调制器,并对 LED 结构进行了改进。仿真结果表明:改进的混合网络系统能满足接入网的要求,且系统复杂度低、稳定性高,为 PLC-VLC 技术应用在未来智能电网和智慧家庭中应用提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 崔冰琪,周省邦,陈睿,等. 室内可见光通信异构组网关键技术研究进展[J]. 激光杂志,2023,44(5):6-12.
- [2] KOMINE T, NAKAGAWA M. Integrated system of white LED visible-light communication and power-line communication [J]. IEEE transactions on Consumer Electronics, 2003, 49(1): 71-79.

- [3] KOMINE T, HARUYAMA S, NAKAGAWA M. Performance evaluation of narrowband OFDM on integrated system of power line communication and visible light wireless communication [C]//2006 1st International Symposium on Wireless Pervasive Computing, January 16–18, 2006, Phuket, Thailand. Phuket: IEEE, 2006: 1–6.
- [4] ALAVI S E, SUPAAT S M, IDRUS S M. Integrated system of visible free space optic with PLC [C]//2009 IEEE 9th Malaysia International Conference on Communications (MICC). December 15–17, 2009, Kuala Lumpur, Malaysia. Kuala Lumpur: IEEE, 2009: 271–275.
- [5] NDJONGUE A R, SHONGWE T, FERREIRA H C, et al. Cascaded PLC-VLC channel using OFDM and CSK techniques[C]// 2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), December 6–10, 2015, San Diego, USA. San Diego: IEEE, 2015: 1–6.
- [6] SONG J, DING W, YANG F, et al. An indoor broadband broadcasting system based on PLC and VLC [J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2015, 61(2): 299–308.
- [7] CHEN M, YOU S, WANG Y, et al. Performance analysis of pilot-based OFDM channel estimation for hybrid PLC&VLC system[C]//2016 15th International Conference on Optical Communications and Networks (IC-OCN), September 24–27, 2016, Hangzhou, China. Hangzhou: IEEE, 2016: 1–3.
- [8] YU L, WANG L, HAO Z, et al. High-speed micro-LEDs for visible light communication: challenges and progresses [J]. Semiconductor Science and Technology, 2021, 37(2): 023001-1–023001-14.
- [9] FAHMI W, FARAHAT A, HUSSEIN K, et al. Performance analysis of indoor visible light communication system with multiple LED-sources[C]//2022 39th National Radio Science Conference (NRSC), November 29–December 1, 2022, Cairo, Egypt. Cairo: IEEE, 2022: 308–317.
- [10] FARKAS T D, KIRALY T, PARDY T, et al. Application of power line communication technology in street lighting control [J]. International Journal of Design & Nature & Ecodynamics, 2018, 13(2): 176–186.
- [11] COSSU G, CORSINI R, CIARAMELLA E. Indoor high-speed optical wireless communications: recent developments[C]//2014 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), July 6–10, 2014, Graz, Austria. Graz: IEEE, 2014: 1–4.
- [12] DING W, YANG F, YANG H, et al. A hybrid power line and visible light communication system for indoor hospital applications[J]. Computers in industry, 2015, 68: 170–178.
- [13] ZHANG Z, SUN Y, WANG D, et al. Modeling and research of noise characteristics for low voltage power line channel in OFDM communication system [C]//2017 9th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics(IHMSC), August 26–27, 2017, Hangzhou, China. Hangzhou: IEEE, 2017: 116–120.
- [14] GUO X, ZHU L. A survey of design and implementation of phase noise optimization based on OFDM system [J]. Academic Journal of Computing & Information Science, 2021, 4(8): 58–62.