

DOI: 10.3969/j.issn.1671-024x.2026.01.011

可见光通信系统发送端预均衡电路的设计

戈立军, 王 迈, 高天学, 景梦真, 王思维, 牛萍娟
(天津工业大学 电子信息与工程学院, 天津 300387)

摘要: 针对可见光通信(VLC)系统中发光二极管(LED)低调制带宽导致信号传输失真的问题,提出了一种基于射频(RF)晶体管的新型预均衡电路。以大功率白光LED作为系统光源,搭建了完整的VLC系统,通过扫频仪测量系统的频率响应曲线,并使用扫频仪分别发出80、100、135 MHz的正弦波信号,对比VLC系统加入预均衡电路前后的接收波形,以验证VLC系统的信号传输能力。实验结果表明:该预均衡电路将系统带宽从1.4 MHz拓展到了135 MHz,能够将失真信号恢复成原始信号,起到了高频补偿的功能,保证了信号传输的完整性。

关键词: 可见光通信;发光二极管;预均衡;调制带宽;射频晶体管

中图分类号: TN929.12

文献标志码: A

文章编号: 1671-024X(2026)01-0079-06

Design of pre-equalization circuit at transmitter end of visible light communication system

GE Lijun, WANG Mai, GAO Tianxue, JING Mengzhen, WANG Siwei, NIU Pingjuan
(School of Electronics and Information Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

Abstract: In order to solve the problem of signal transmission distortion caused by the low-modulation bandwidth of light-emitting diode (LED) in visible light communication (VLC) system, a new pre-equalization circuit based on RF transistor was proposed. A complete VLC system was built with high-power white LEDs as the system light source, the frequency response curve of the system was measured by the frequency scanner, the sine wave signals of 80, 100 and 135 MHz were sent out by the frequency scanner, the signal transmission capability of the VLC system was verified by comparing the received waveforms before and after the pre-equalization circuit was added to the VLC system. The experimental results show that the pre-equalization circuit expands the system bandwidth from 1.4 MHz to 135 MHz, which can restore the distorted signal to the original signal, play the function of high-frequency compensation, and ensure the integrity of signal transmission.

Key words: visible light communication(VLC); light emitting diode(LED); pre-equalization; modulation bandwidth; RF transistor

随着可见光通信(visible light communication, VLC)技术的发展,高速通信、多元场景应用成了可见光通信技术的未来发展趋势^[1-4]。可见光通信技术是通过调制发光二极管(light emitting diode, LED)发出的光的强度信息来实现数据通信。但由于目前商用LED的主要用途多为照明,并没有朝着大带宽、适用于通信的方向发展,因此使用LED器件作为可见光通信的光源,面临着LED器件本身调制带宽低、限制通信系统传输速率的问题^[5-6]。想要实现高速传输,可以从LED器件本身入手,例如使用具有大调制带宽的微型LED

(Micro LED)^[7-10]、使用高阶调制方式^[11-12]、添加硬件预均衡电路^[13-17]等方法。

Micro LED体积小、带宽大,是可见光通信的理想光源,但作为一种新兴技术,还没有做到市场化,因此制备较为困难,成本高,不适合日常研究应用。高阶调制技术可以有效提升系统的传输速率,但无法改进系统本身的调制带宽,且高阶调制较为复杂。相比于这2种方式,硬件预均衡电路有着成本低、提升带宽效果更好的优势,是近年来高速可见光通信的研究热点。文献[18]通过对T型偏置器(BIAS-Tee)电路的电容、

收稿日期: 2024-03-09

基金项目: 中央军委装备发展部“慧眼行动”技术培育项目(A134002023EL02/E9F22750)

通信作者: 戈立军(1984—),男,博士,教授,主要研究方向为无线通信与可穿戴物联网。E-mail: gelj@mail.nankai.edu.cn

电阻、电感等参数进行改进,将 VLC 系统调制带宽从 1 MHz 提升至 30 MHz。同时配合高阶调制,使最大传输速率达到了 190 Mbps。文献[19]设计三极管,和电容电阻组成预均衡电路,将 RGB 中的红光调制带宽从 6.2 MHz 扩展到了 91.0 MHz,同时实现了 477 Mbps 的数据传输速率。文献[20]同时使用预均衡、后均衡、蓝光滤光片,将 VLC 带宽扩展到 233 MHz,实现了 550 Mbps 的高速数据传输。

本文提出了一种基于 RF NPN 晶体管的新型预均衡电路,通过均衡技术扩展了大功率白光 LED 的 VLC 系统的带宽。将所设计的均衡电路与 LED 驱动电路相结合,构建了一种新型的大功率白光 LED 的可见光通信系统发射端,以期提高 VLC 系统的带宽,使得支持实时数据传输的低成本、低功耗的室外可见光通信应用成为可能。

1 预均衡电路的基本原理

当 LED 输出的交流光功率下降到某一低频参考值的 1/2 时(-3 dB)的频带宽度就是 LED 的调制带宽^[21]。图 1 所示为 LED 调制带宽示意图。

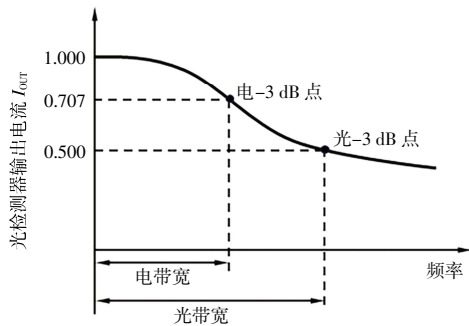


图 1 LED 调制带宽示意

Fig.1 Schematic of LED modulation bandwidth

调制带宽表征了 LED 的调制能力,是 LED 用于可见光通信的一个重要参数和衡量一个系统的重要指标。LED 的频率响应决定了可见光通信系统的调制带宽,直接关系到数据传输速率的大小。

预均衡电路的基本设计思路主要包括 2 种:一种是衰减低频的响应强度;另一种是通过抬升信号的高频部分,增加高频的响应强度。这 2 种方式都可以拓宽 VLC 系统的可用调制带宽。其主要过程一般在频域通过施加系统频率响应的逆函数实现:根据测得的响应函数为每个子载波添加权重,使得低频部分幅值减小,高频部分幅值增大,从而使得频率响应更加平坦,达到均衡的目的,解决了 LED 因在高频段响应强度不足、带宽较小的问题^[22]。

2 预均衡电路设计

常见的几种均衡电路主要包括基于串联谐振的预均衡^[23]、无源超前校正预均衡^[24]、基于桥 T 均衡^[15]电路等等。本文提出一种基于 RF NPN 晶体管的新型预均衡电路,其结构如图 2 所示。与上述几种方法相比,此电路在衰减低频响应的同时提高了高频部分的响应强度,均衡效果更为明显,且复杂度较小,适用于大功率 LED 的高速通信需求。

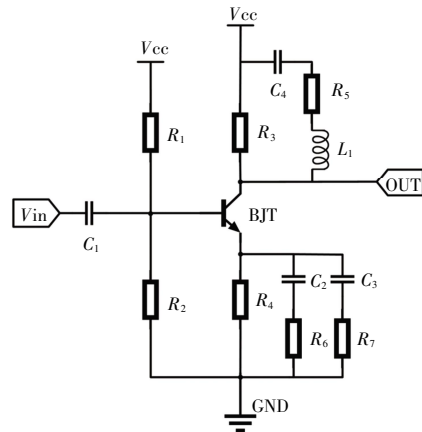


图 2 基于 RF NPN 晶体管的新型预均衡电路

Fig.2 New pre-equalization circuit based on RF NPN transistor

由图 2 可知,预均衡电路由 1 个射频三极管以及多个电阻、电容和电感等无源器件构成。电阻 R_1 、 R_2 为偏置电阻,能够为 NPN 晶体管设置适当的静态工作点;电感 L_1 与 R_5 、 C_4 构成均衡支路,与晶体管集电极相连,达到提升高频部分响应强度的效果;电容 C_2 、 C_3 与电阻 R_6 、 R_7 构成的均衡支路与晶体管发射极并联,起到了衰减低频分量响应强度的效果。为便于分析,本文采用等效电路法绘制了基于 RF NPN 晶体管的新型预均衡电路小信号模型,如图 3 所示。

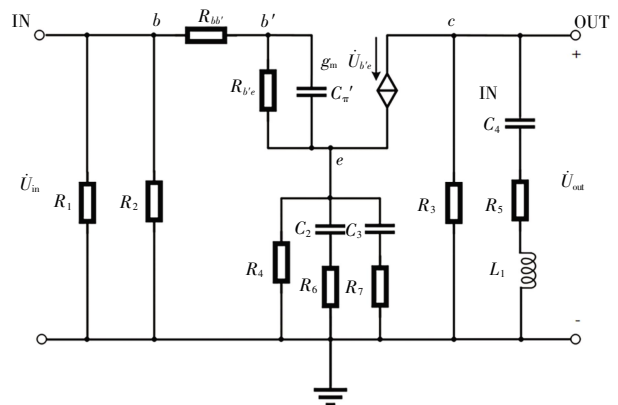


图 3 预均衡电路小信号等效模型

Fig.3 Diagram of small-signal equivalent model of pre-equalization circuit

图 3 中, C_{π}' 为集电极电容折合到 $b' - e$ 间的电容; g_m 为跨导, 描述 $\dot{U}_{b'e}$ 对 \dot{I}_c (集电极电流) 的控制关系。根据小信号等效模型, 可以得到该系统的传递函数:

$$H(s) = \frac{1(sL_1 + R_5) // R_3}{\left(R_6 + \frac{1}{sC_2}\right) // \left(R_7 + \frac{1}{sC_3}\right) // R_4} \quad (1)$$

其幅频响应函数为:

$$|H(j\omega)| = \frac{1(j\omega L_1 + R_5) // R_3}{\left(R_6 + \frac{1}{j\omega C_2}\right) // \left(R_7 + \frac{1}{j\omega C_3}\right) // R_4} \quad (2)$$

从式(2)中可以看出, 电感 L_1 使分子随着角频率 ω 的增加而增加, 电容 C_2, C_3 使分母随着角频率 ω 的增加而减少, 这使得幅频响应随着频率的增加而快速增加。同时, 通过优化 L_1, C_2, C_3 的值, 使得幅频响应在低频时小于 0 dB, 同时放大高频信号, 从而使得均衡电路达到抑制低频信号和放大高频信号的功能, 有效地扩展 VLC 系统的带宽。

3 可见光通信系统发射端设计

在 VLC 系统中, 严密的电路设计能够保证数据传输过程中信号的完整性。预均衡电路解决了 VLC 系统的带宽限制问题, LED 驱动电路则需确保 LED 在线性区域中工作, 并且能够将交流信号有效地加载到大功率 LED 上。为了验证均衡电路的效果, 本文设计了 VLC 系统的整体发射端电路, 如图 4 所示。

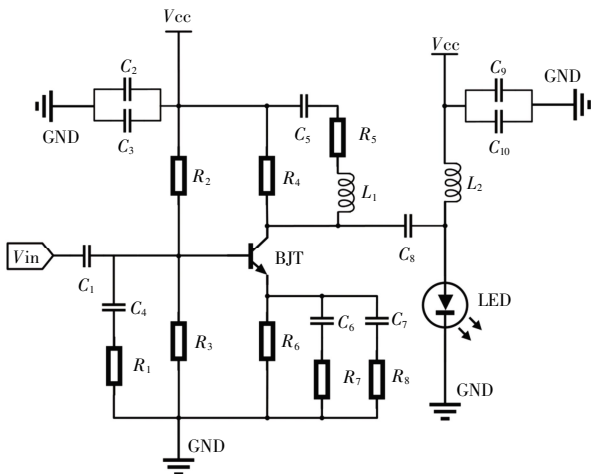


图 4 可见光通信系统发射端电路

Fig.4 Transmitter circuit of visible light communication system

图 4 中, LED 的驱动电路由电感 L_2 和电容 C_8 构成, 能够将交流信号 AC 和直流偏置 DC 耦合, 共同施加在 LED 上。偏置电流使 LED 稳定发光, 同时设置适当大小的直流确保了 VLC 系统的调制深度。电感 L_2

用于隔离交流 (AC) 分量, 确保直流分量在高频下保持稳定。电容 C_8 隔离直流, 将交流信号 AC 加载到 LED 上。

为确保阻抗匹配, 本研究经过了 ADS 软件仿真, 确定了电路的具体参数, 如表 1 所示。

表 1 电路器件的具体参数

Tab.1 Specific parameters of circuit devices

| 器件名称 | 参数 | 具体型号或参数值 |
|------|-----------------------------|-------------------|
| 晶体管 | BJT | BFU550WF |
| 电容 | $C_1, C_8 / \mu\text{F}$ | 10.00 |
| | $C_2, C_9 / \mu\text{F}$ | 0.01 |
| | $C_3, C_{10} / \mu\text{F}$ | 0.10 |
| | $C_4 / \mu\text{F}$ | 0.47 |
| | $C_5 / \mu\text{F}$ | 1.00 |
| | $C_6, C_7 / \mu\text{F}$ | 0.10 |
| 电阻 | R_1 / Ω | 50 |
| | R_2 / Ω | 1 600 |
| | R_3 / Ω | 510 |
| | R_4 / Ω | 150 |
| | R_5 / Ω | 5.6 |
| | R_6 / Ω | 50 |
| | $R_7, R_8 / \Omega$ | 10 |
| | 电感 | L_1 / nH |
| | L_2 / nH | 22 000 |
| 光源 | LED | Cree 1507N |

4 实验结果与分析

为了测试预均衡电路的均衡效果, 本文基于所设计的发射端电路搭建了可见光通信系统, 如图 5 所示。

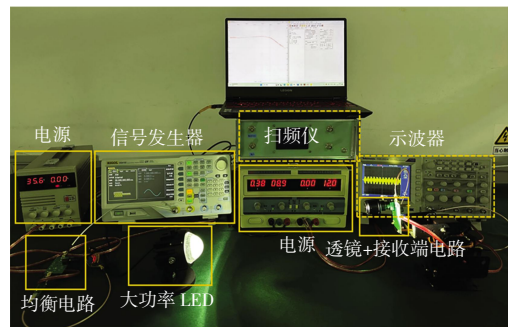


图 5 LED 可见光通信系统示意

Fig.5 Schematic of LED visible light communication system

预均衡电路采用的晶体管型号为 BFU550WF, 具有 11 GHz 的增益带宽。发射端采用大功率 LED 作为系统光源; 接收端采用日本滨松的高速 PIN(S10783) 探测器作为系统接收端, 并在探测器前端加入聚光透镜增大接收端接收的光功率。使用扫频仪可测量 VLC 系统的频率响应曲线, 其带宽测量示意图如图 6 所示。

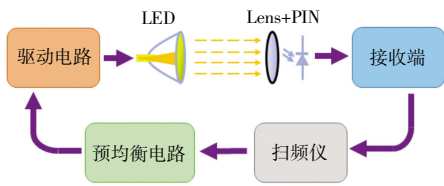


图 6 可见光通信系统带宽测量示意

Fig.6 Schematic of bandwidth measurement of visible light communication system

为了对比验证电路的均衡效果,分别测量了 LED 自身的频率响应曲线和预均衡电路的频率响应曲线。

4.1 调制带宽测量

本文所使用的大功率 LED 型号为 Cree 1507N, 最大功率可达 10 W。测量 LED 自身的-3 dB 调制带宽具体步骤为:将扫频仪输出的信号直接加载到 LED 驱动电路上, 调制光经过 LED 发射到接收端, PIN 接收后将光信号转化为电信号,再送进扫频仪接收端。LED 的频率响应曲线如图 7 所示。

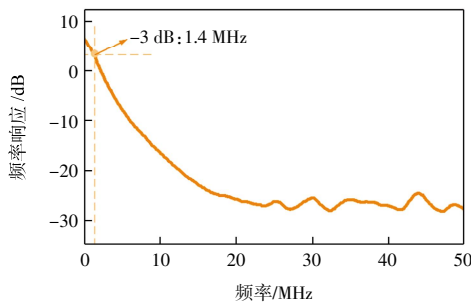


图 7 LED 频率响应曲线

Fig.7 Curve of LED frequency response

由图 7 可知, 大功率 LED 自身调制带宽只有 1.4 MHz, 并且随着频率的增加, 响应强度衰减剧烈, 24 MHz 以后近乎为噪声。

将扫频仪输出端连接预均衡电路, 测试预均衡电路的频率响应曲线, 其结果如图 8 所示。

由图 8 可以看出, 预均衡电路起到了衰减低频信号响应强度和提升高频信号响应强度的作用, 并提供了约 30 dB 的增益, 达到了预计的均衡效果。均衡电路

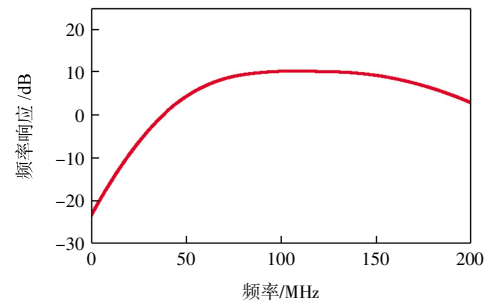


图 8 预均衡电路频率响应曲线

Fig.8 Frequency response curve of pre-equalization circuit

的响应强度在 150 MHz 左右开始下降, 这与晶体管的增益带宽积有关。

将预均衡电路与 LED 驱动电路串联, 测量 VLC 系统的整体调制带宽, 结果如图 9 所示。

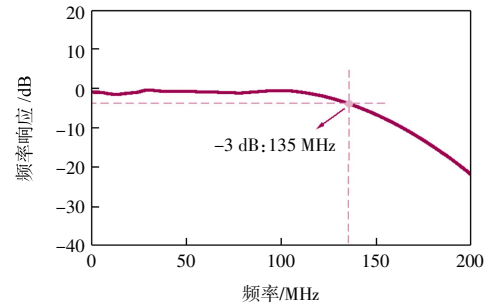


图 9 VLC 系统频率响应曲线

Fig.9 Frequency response curve of VLC system

由图 9 可知, 通过串联预均衡电路, 可将系统带宽从 1.4 MHz 提升到了 135 MHz, 并且提供了约 30 dB 的响应强度。

4.2 信号传输测试

利用本文所设计的 VLC 系统进行数据传输实验。使用扫频仪发射不同频率的正弦波信号输入均衡电路, 接收端将接收的光信号经过探测器转为电信号后输入示波器 (Tektronix TDS 2024C), 通过对比加入预均衡电路前后的接收波形, 进而验证预均衡电路的功能。图 10 所示为加入均衡电路前后不同频率下示波器接收的波形对比。

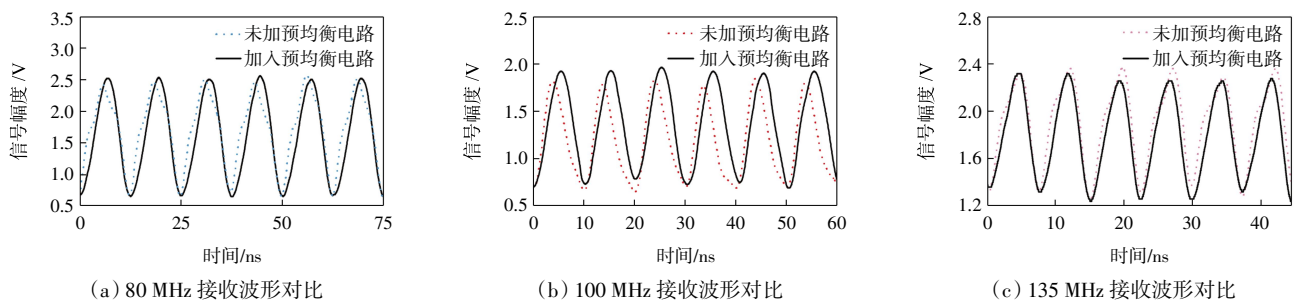


图 10 加入预均衡电路前后不同发射频率的接收波形

Fig.10 Receiving waveform of different transmit frequencies before and after adding pre-equalization circuit

由图10可知,在未加入预均衡电路前,示波器接收的3个不同频率的正弦波信号均存在失真现象;加入预均衡电路后,接收波形完整,有效地补偿了高频部分,能将失真信号恢复成原始正弦波信号。加入预均衡电路后,相比135 MHz,80 MHz时接收的波形更加完整,这与加入预均衡电路后系统的带宽限制有关。综上所述,本文所设计的基于晶体管的新型预均衡电路达到了预期的均衡效果,保证了VLC系统传输信息的完整性。

5 结 论

本文提出了一种基于晶体管的VLC系统新型预均衡电路,并设计了VLC系统的整体发射端电路,主要包括大功率白光LED、预均衡电路以及LED驱动电路,以验证均衡效果:

(1) 通过均衡电路的频率响应曲线可知,预均衡电路提供了将近30 dB的高频增益;与此同时,预均衡电路的加入,将VLC系统的-3 dB调制带宽从1.4 MHz拓展到了135 MHz。

(2) 通过扫频仪发射3个不同频率的正弦波信号,经过新型预均衡电路对系统高频部分的补偿后,接收端能够接收完整信号,证明了该预均衡电路在低复杂度和低成本的基础上,同时具备很好的均衡效果,为提升VLC系统的性能和可靠性提供了有效的解决方案。

(3) 与现有的模拟均衡技术相比,该电路结构简单,成本低,同时具备了更好的均衡效果。

参考文献:

- [1] CHUN H, CHIANG C J, MONKMAN A, et al. A study of illumination and communication using organic light emitting diodes[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(22): 3511-3517.
- [2] ZHANG Z, ZHANG J H, ZHANG Y X, et al. AI-based time-, frequency-, and space-domain channel extrapolation for 6G: Opportunities and challenges[J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2023, 18(1): 29-39.
- [3] SONG X Q, ZHAO Z X, CHEN K W, et al. Visible light communication: Potential applications and challenges[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(8): 080004.
- [4] HU K, QI K L, GUAN Q F, et al. A scientometric visualization analysis for night-time light remote sensing research from 1991 to 2016[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(8): 802.
- [5] ABUELLA H, ELAMASSIE M, UYSAL M, et al. Hybrid RF/VLC systems: A comprehensive survey on network topologies, performance analyses, applications, and future directions[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 160402-160436.
- [6] 夏中金, 凌六一, 黄家伟, 等. 可见光通信LED高速驱动电路研究与设计[J]. *光通信技术*, 2019, 43(2): 22-26.
XIA Z J, LING L Y, HUANG J W, et al. Research and design of high speed driving circuit of LED for visible light communication[J]. *Optical Communication Technology*, 2019, 43(2): 22-26(in Chinese).
- [7] HAIGH P A, GHASSEMLOOY Z, RAJBHANDARI S, et al. Visible light communications using organic light emitting diodes[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2013, 51(8): 148-154.
- [8] LAN H Y, TSENG I C, KAO H Y, et al. 752 MHz modulation bandwidth of high-speed blue micro light-emitting diodes[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2018, 54(5): 1-6.
- [9] QIAN H, ZHAO S, CAI S Z, et al. Digitally controlled micro-LED array for linear visible light communication systems[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(3): 1-8.
- [10] LIAO C L, CHANG Y F, HO C L, et al. High-speed GaN-based blue light-emitting diodes with gallium-doped ZnO current spreading layer[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2013, 34(5): 611-613.
- [11] TIAN C W, LI Y T, YE W L, et al. Performance study of an OFDM visible light communication system based on white LED array[J]. *Optoelectronics Letters*, 2011, 7(6): 454-457.
- [12] GRUBOR J, LANGER K D. Efficient signal processing in OFDM-based indoor optical wireless links[J]. *Journal of Networks*, 2010, 5(2): 197-211.
- [13] 迟楠, 周盈君, 赵嘉琦, 等. 基于硬件预均衡电路的高速可见光通信系统[J]. *科技导报*, 2016, 34(16): 144-149.
CHI N, ZHOU Y J, ZHAO J Q, et al. High speed visible light communication system based on hardware preequalization circuit[J]. *Science & Technology Review*, 2016, 34(16): 144-149(in Chinese).
- [14] LE MINH H, O'BRIEN D, FAULKNER G, et al. 100 mb/s NRZ visible light communications using a postequalized white LED[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, 21(15): 1063-1065. [LinkOut]
- [15] HUANG X X, SHI J Y, LI J H, et al. 750 Mbit/s visible light communications employing 64QAM-OFDM based on amplitude equalization circuit [C]//2015 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). Los Angeles: IEEE, 2015: 1-3.
- [16] SUNG J Y, CHOW C W, YEH C H. Dimming-discrete-multi-tone (DMT) for simultaneous color control and high speed visible light communication[J]. *Optics Express*, 2014, 22(7): 7538-7543.
- [17] HUANG X X, WANG Z X, SHI J Y, et al. 16 Gbit/s phosphorescent white LED based VLC transmission using a cascaded

- ed pre-equalization circuit and a differential outputs PIN receiver[J]. *Optics Express*, 2015, 23(17): 22034.
- [18] YE H C H, CHOW C W, CHEN H Y, et al. Adaptive 8444 - 190 Mbit/s phosphor-LED wireless communication utilizing no blue filter at practical transmission distance [J]. *Optics Express*, 2014, 22(8): 9783.
- [19] FUJIMOTO N, MOCHIZUKI H. 477 Mbit/s visible light transmission based on OOK-NRZ modulation using a single commercially available visible LED and a practical LED driver with a pre-emphasis circuit[C]//National Fiber Optic Engineers Conference. Anaheim: Optical Society of America, 2013:73-76.
- [20] LI H L, CHEN X B, GUO J Q, et al. A 550 Mbit/s real-time visible light communication system based on phosphorescent white light LED for practical high-speed low-complexity application[J]. *Optics Express*, 2014, 22(22): 27203.
- [21] 何凌燕. 可见光通信系统自适应均衡电路设计[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
- HE L Y. Adaptive equalization circuit design for visible light communication systems [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023(in Chinese).
- [22] XU F F, JIN Z X, TAO T, et al. C-plane blue micro-LED with 1.53 GHz bandwidth for high-speed visible light communication[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2022, 43(6): 910-913.
- [23] LE MINH H, O'BRIEN D, FAULKNER G, et al. High-speed visible light communications using multiple-resonant equalization[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(14): 1243-1245.
- [24] LI H L, CHEN X B, GUO J Q, et al. 200 Mb/s visible optical wireless transmission based on NRZ-OOK modulation of phosphorescent white LED and a pre-emphasis circuit[J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(10): 100604.
- 本文引文格式:**
戈立军, 王迈, 高天学, 等. 可见光通信系统发送端预均衡电路的设计[J]. *天津工业大学学报*, 2026, 45(1): 79-84.
- GE L J, WANG M, GAO T X, et al. Design of pre-equalization circuit at transmitter end of visible light communication system[J]. *Journal of Tiangong University*, 2026, 45(1): 79-84(in Chinese).
- (责任编辑: 孙广宇)
-
- (上接第 78 页)
- [30] 袁祎铭, 韩婷婷, 丁佳骏, 等. 基于高效通道注意力机制的龙格库塔去雨网络[J]. *计算机应用*, 2022, 42(S1): 305-309.
- YUAN W M, HAN T T, DING J J, et al. Runge Kutta network based on efficient channel attention mechanism for image de-raining[J]. *Journal of Computer Applications*, 2022, 42(S1): 305-309(in Chinese).
- [31] 马敏, 吴环. 基于并联自适应残差网络与 CBAM 的 ECT 图像重建[J]. *计量学报*, 2024, 45(2): 1-8.
- MA M, WU H. ECT image reconstruction based on parallel adaptive residual network and CBAM[J]. *Journal of Metrology*, 2024, 45(2): 1-8(in Chinese).
- [32] LIU R, LEHMAN J, MOLINO P, et al. An intriguing failing of convolutional neural networks and the coordconv solution[C]//Proceedings of the 32nd International Conference on Neural Information Processing Systems. New York, USA: Curran Associates Inc, 2018: 9628-9639.
- [33] QIAO S Y, CHEN L C, YUILLE A. DetectoRS: Detecting objects with recursive feature pyramid and switchable atrous convolution[C]//2021 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Nashville, TN, USA: IEEE, 2021: 10208-10219.
- [34] 苗长云, 孙丹丹. 基于改进 YOLOv5s 的带式输送机滚筒故障检测研究[J]. *工矿自动化*, 2023, 49(7): 41-48.
- MIAO C Y, SUN D D, Research on fault detection of belt conveyor drum based on improved YOLOv5s[J]. *Industry and Mine Automation*, 2023, 49(7): 41-48(in Chinese).
- [35] LIU S G, WANG Y J, YU Q G, et al. CEAM-YOLOv7: Improved YOLOv7 based on channel expansion and attention mechanism for driver distraction behavior detection[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 129116-129124.
- [36] KANG M, TING C M, TING F F, et al. CST-yolo: A novel method for blood cell detection based on improved YOLOv7 and CNN-swin transformer[C]//2024 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). Abu Dhabi, United Arab Emirates: IEEE, 2024: 14590.
- 本文引文格式:**
李杰, 庄子悦, 苗长云, 等. 基于改进 YOLOv7 的带式输送机输送带破损检测[J]. *天津工业大学学报*, 2026, 45(1): 70-78, 84.
- LI J, ZHUANG Z Y, MIAO C Y, et al. Conveyor belt damage detection for belt conveyor based on improved YOLOv7[J]. *Journal of Tiangong University*, 2026, 45(1): 70-78, 84(in Chinese).
- (责任编辑: 程晓英)