

引用本文:李仁立,张家梁,周勋,等. 基于级联均衡的蓝绿光LED水下无线光通信研究[J]. 光通信技术,2025,49(6):25-29.

基于级联均衡的蓝绿光LED水下无线光通信研究

李仁立¹,张家梁¹,周勋²,高冠军^{1*}

(1.北京邮电大学 电子工程学院,北京 100876;2.中国船舶集团有限公司 第七二研究所,武汉 430205)

摘要:针对发光二极管(LED)的调制带宽小、电致发光效率低等问题,提出一种由T桥均衡与肖特基二极管-电容(SD-C)均衡电路级联驱动的水下无线光通信系统。该方案缩短了接收光信号波形的上升和下降时间,分别将基于蓝光LED和绿光LED的水下无线光通信系统-3 dB带宽分别提升至165 MHz和130 MHz。在1 m长的水下信道测试中,该系统成功实现了数据传输速率高达210 Mb/s的蓝光信号传输,以及175 Mb/s的绿光信号传输,测得的误码率分别为 1.8×10^{-3} 和 2.5×10^{-3} ,均小于前向纠错极限 3.8×10^{-3} 。

关键词:水下无线光通信;T型桥式均衡;肖特基二极管-电容均衡;发光二极管;级联均衡电路

中图分类号:TN929 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2025)06-0025-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.06.005

Research on underwater wireless optical communication using blue-green LED based on cascade equalization

LI Renli¹, ZHANG Jialiang¹, ZHOU Xun², GAO Guanjun^{1*}

(1. School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

2. The 722nd Research Institute, China State Shipbuilding Group, Wuhan 430205, China)

Abstract: A underwater wireless optical communication system is proposed to address the issues of small modulation bandwidth and low electroluminescence efficiency of light-emitting diode (LED). The system is driven by a cascaded T-bridge equalization and Schottky diode capacitor (SD-C) equalization circuit. This scheme shortens the rise and fall time of the received optical signal waveform, and increases the -3 dB bandwidth of underwater wireless optical communication systems based on blue LED and green LED to 165 MHz and 130 MHz, respectively. In a 1 meter long underwater channel test, the system successfully achieved blue light signal transmission with a data transmission rate of up to 210 Mb/s and green light signal transmission with a data transmission rate of 175 Mb/s. The measured bit error rates were 1.8×10^{-3} and 2.5×10^{-3} , respectively, both below the forward error correction limit of 3.8×10^{-3} .

Key words: underwater wireless optical communication, T-type bridge equalizer, Schottky diode capacitor equalizer, light-emitting diode, cascaded equalization circuit

0 引言

近年来,海洋丰富的自然资源吸引了越来越多的研究人员勘探与开发^[1],这离不开水下无线通信(UWC)

收稿日期:2025-01-03。

基金项目:国家自然科学基金项目(62371064)资助;北京市自然科学基金项目(4232050)资助。

作者简介:李仁立(2000—),男,重庆人,硕士研究生,现就读于北京邮电大学电子工程学院电子科学与技术专业,主要研究方向为水下可见光通信系统设计、高速信号调制与解调、电路仿真。

*通信作者:高冠军(1984—),男,博士,教授,主要研究方向为光纤及水下无线光通信系统与网络。



技术的支持。相比水声通信和射频通信,水下无线光通信(UWOC)以其高速率、低延迟、高效率和高安全性成为一种理想的通信方式^[2]。目前,UWOC系统主要采用蓝绿光发光二极管(LED)作为光源^[3]。然而,LED的结电容和寄生电阻较大,它的带宽被很大程度限制,极大地降低了UWOC系统的通信性能^[4]。为此,研究人员提出了诸多不同的调制技术和均衡方案^[5]。文献[6]采用四电平脉冲幅度调制在50 m的水下信道实现了300 Mb/s数据传输。文献[7]利用64阶正交幅度调制在2.5 m的水下信道实现了72.28 Mb/s的数据传输。由于LED的非线性问题,上述高阶调制技术的实

李仁立,张家梁,周勋,等:基于级联均衡的蓝绿光LED水下无线光通信研究

际应用十分困难。为提升LED的调制带宽并简化系统设计,可采纳硬件均衡方案。文献[8]提出了一种预均衡电路,实现了100 Mb/s非归零开关键控数据传输。文献[9]设计了一种基于三级级联的T桥均衡器和数字波形整形滤波器的实时UWOC,在1 m的水下信道实现了50 Mb/s的数据传输。文献[10]使用有源后均衡放大电路将系统电-光-电(EOE)带宽从4.2 MHz提升至82.1 MHz。与普通电阻-电容(RC)均衡电路和有源均衡器相比,基于电阻-电感-电容(RLC)的T桥无源均衡器具有恒定的特性阻抗和稳定的高频响应。为此,本文提出一种基于T桥均衡与肖特基二极管-电容(SD-C)均衡电路级联的UWOC系统。

1 UWOC系统

本文设计的UWOC系统框图如图1所示。在发射端,误码率测试仪(BERT, RESOO, RS1540B)TX端口输出的信号首先通过T桥均衡电路进行幅频特性调整,随后经放大器(AMP, ZHL-6A-S+)放大以增强LED调制深度,再通过SD-C电路加速LED结电容充放电过程,最后通过Bias-T结构将信号叠加至直流偏置后驱动LED发光。为保持信号传输阻抗连续,本设计将SD-C均衡电路、Bias-T及LED共同集成于同一印刷电路板,并在LED前端配置聚光角为 15° 的准直透镜用于光束整形。在接收端,光信号经水缸传输后由雪崩光电二极管(APD, 带宽为1 GHz, 响应时间 < 0.2 ns)完成光/电转换,产生的微弱电信号通过跨阻放大器(TIA)进行放大,最终将输出电压信号送回误码率测试仪RX端口完成误码率检测。

1.1 LED等效模型

LED是UWOC系统中的关键光源,其调制特性直接决定了系统的高速数据传输能力。LED的核心是一个PN结,因此在实际电路分析中,常通过等效模型来模拟其非线性电流-电压特性。LED等效电路模型如图2所示,主要由理想二极管 V_d 、等效内阻 r_o 、耗尽层

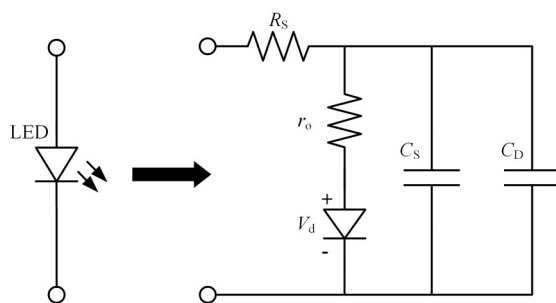


图2 LED等效电路模型

电容 C_s 、扩散电容 C_D 和串联电阻 R_s 组成。其中,二极管 V_d 主要用于模拟LED的单向导电性和正向导通压降。同时,LED的结电容 C_j 由 C_s 和 C_D 共同组成;该电容与电路中的等效内阻协同工作,形成一个RC电路,从而表现出低通滤波器特性。LED较大的结电容会降低RC电路的截止频率,导致高频调制信号严重衰减,从而直接制约了无线光通信系统的调制带宽与数据传输速率^[11]。同时,结电容在高频下会引入显著的阻抗变化,导致驱动电路与LED之间的阻抗匹配变差,影响高速信号的传输效率^[12]。因此,结电容 C_j 和等效内阻 r_o 限制了LED的频率响应、带宽和效率,是影响其高速调制能力的关键因素之一。因此,在高速UWOC系统中,LED的调制性能与驱动电路的设计密切相关。

1.2 均衡技术电路原理分析

1.2.1 T桥均衡电路基本原理与仿真结果

由于高频信号更容易受到趋肤效应和介质损耗的影响,其在传输过程中高频成分的衰减更为显著,这会导致信号失真、系统带宽受限以及码间干扰等问题^[13]。为了避免这些问题,本文引入T桥均衡电路来补偿传输过程中的高频信号衰减,其电路原理图如图3所示。均衡电路由 R 、 L 、 C 基本元件串并联构成。其中, R_1 和 C_1 共同决定了高频信号的通路; R_2 和 C_2 的并联支路则提供了对中频或特定频率点的控制作用; L_1 和 C_3 在串联支路中形成了谐振回路,可以对低频信号

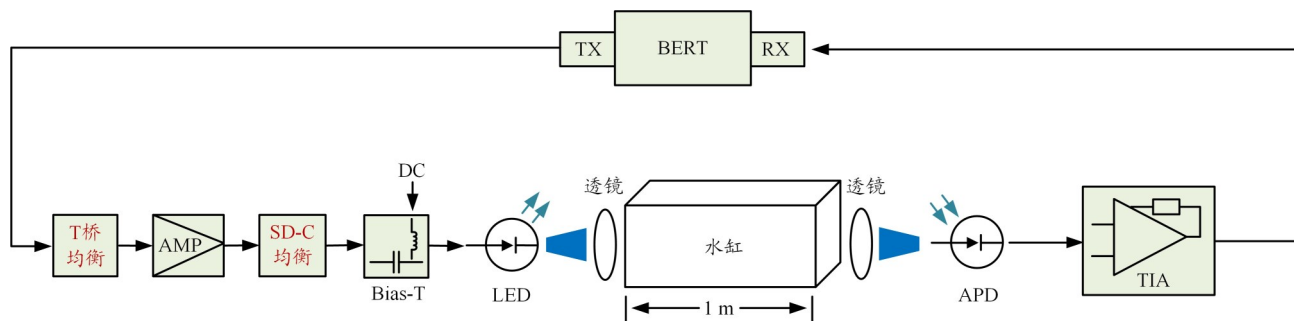


图1 UWOC实验系统框图

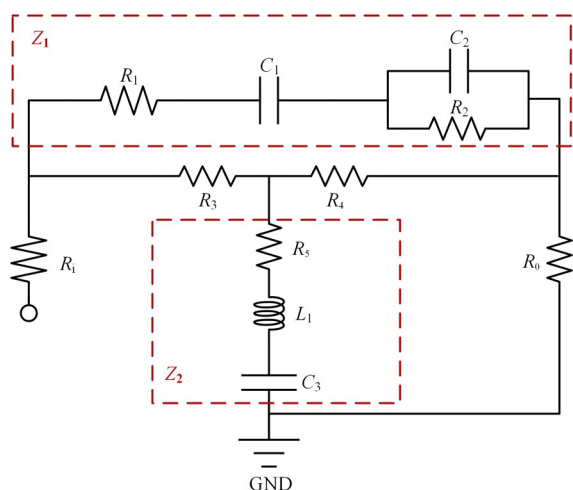


图3 T桥均衡电路原理图

进行选择或衰减; R_5 可调整支路阻抗特性,抑制谐振并优化频率响应的平坦度; R_3 和 R_4 在不同频率下起到分压和匹配阻抗的作用; R_1 和 R_0 分别是输入电阻和负载电阻; Z_1 和 Z_2 是虚线框内电路网络的等效电阻。基于所提出的T桥均衡电路通过其可调节的频率响应特性,能够对信号进行滤波、衰减与均衡,最终实现对高频分量的补偿。

为保证信号在传输过程中的阻抗连续性,设置 $R_1=R_2$, $C_1=C_2$, R_3 、 R_4 的值均选取 $50\ \Omega$ ^[14]。等效电阻 Z_1 和 Z_2 的表达式如下:

$$Z_1 = R_1 + \frac{1}{j\omega C_1} + \frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C_2} \quad (1)$$

$$Z_2 = R_5 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_3} \quad (2)$$

其中, ω 是角频率。根据文献[15],T桥均衡电路的输入阻抗 Z_{in} 由 R_1 、 Z_1 和 Z_{out} 串联构成;其中,输出阻抗 Z_{out} 可表达为

$$Z_{out} = R_0 \parallel [Z_2(R_3 + R_4)] \quad (3)$$

则,输入阻抗 Z_{in} 为

$$Z_{in} = R_1 + Z_1 + Z_{out} \quad (4)$$

T桥均衡电路的频率响应 H 表达式为

$$H = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{Z_{out}}{R_1 + Z_1 + Z_{out}} \quad (5)$$

本文提出的T桥均衡电路中的 C_1 、 C_2 能控制不同频率信号的衰减实现频率选择性, R_1 、 R_2 能调整对信号的衰减程度。为确定电阻与电容的最优配置,本文在高级设计系统(ADS)软件中采用参数扫描方法:在保持其它元件值不变的前提下,分别改变 C_1 、 C_2 、 R_1 、 R_2 的值,并仿真得到均衡电路的S21参数(增益)曲线。首先,将电阻 R_1 、 R_2 固定为 $5\ \Omega$,然后改变电容 C_1 与 C_2 的

值进行仿真,结果如图4(a)所示。然后,将电容 C_1 、 C_2 固定为 $5\ \text{pF}$,改变 R_1 与 R_2 的值进行仿真,结果如图4(b)所示。可以看出,当设置 $C_1=C_2=5\ \text{pF}$, $R_1=R_2=5\ \Omega$ 时,低频段曲线斜率变化最明显,即高频补偿效果最好。本文后续选择该阻容配置来进行实验。

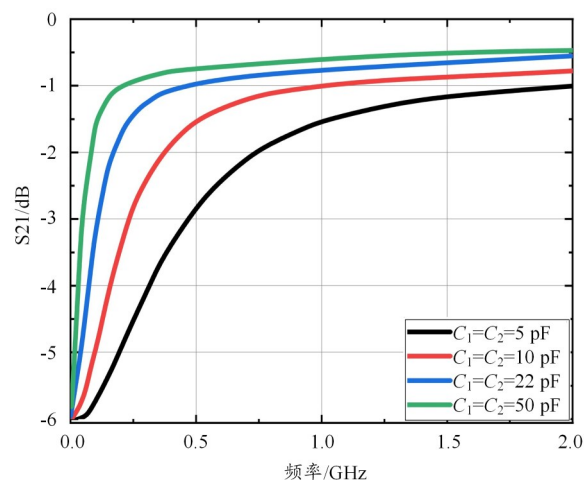
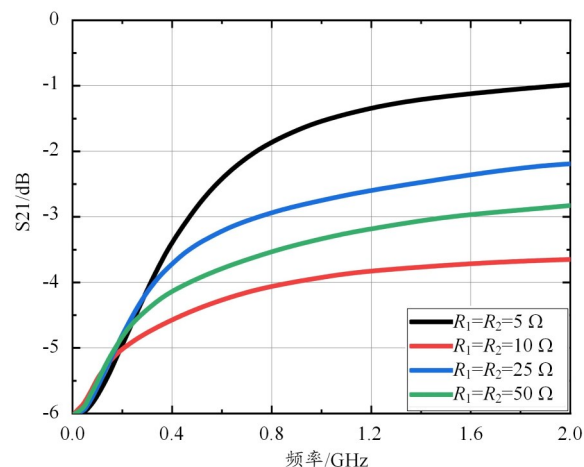
(a) 保持 $R_1=R_2=5\ \Omega$,改变 C_1 与 C_2 的值得到的仿真结果(b) 设置 $C_1=C_2=5\ \text{pF}$ 不变,改变 R_1 与 R_2 的值得到仿真结果

图4 不同电容和不同电阻的T桥式均衡电路S21参数仿真曲线

1.2.2 SD-C均衡电路基本原理

LED的调制带宽主要受到其结电容和电子空穴复合时间的限制。尽管传统RC电路可以通过电流成型来改善响应,但依然面临阻抗匹配困难、功率损耗较大以及调制带宽提升受限等问题^[16]。针对这些限制,本文提出基于SD-C均衡电路,该电路能够利用峰值效应和电子空穴扫出效应优化电流脉冲形状,提升LED的调制速率。

SD-C均衡电路的原理图如图5(a)所示。在该电路中,SD作为高速方向开关使用。本文选用SD是因

李仁立,张家梁,周勋,等: 基于级联均衡的蓝绿光LED水下无线光通信研究

其具备低阈值电压(典型值为 $0.1\sim 0.4\text{ V}$)、快速开关特性以及低寄生电容等优势,这些特性使其非常适合于本均衡电路的应用场景。SD-C电路的波形示意图如图5(b)所示。该电路能够增加信号中的高频分量来克服LED的带宽限制。其工作机理如下:在电流脉冲上升沿,LED的快速响应引发电流过冲,加速结电容充电,从而缩短LED上升沿时间;在下降沿,LED迅速截止产生的反向电压能快速清除有源区载流子,进而缩短扩散电容的放电时间^[9]。与之并联的电容进一步优化了充放电动力学,共同显著缩短了LED光信号的上升/下降时间,最终有效提升了调制带宽与光响应速度。

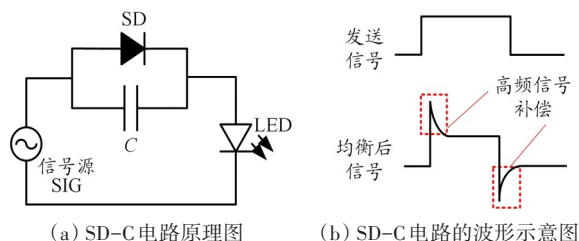


图5 SD-C电路原理图与其发送信号、均衡后信号波形示意图

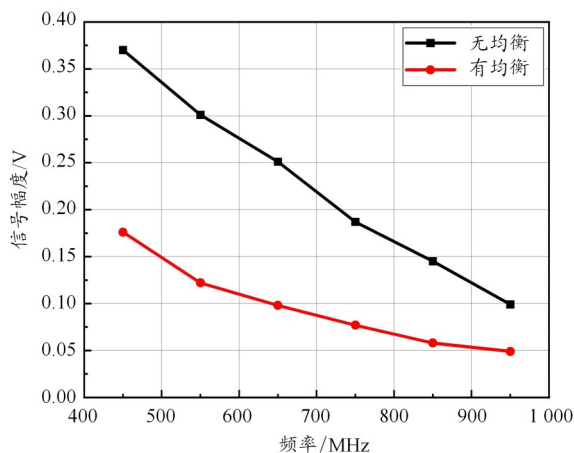
2 实验测试与结论

本文实验装置图如图6所示。实验采用水缸来模拟水下环境。水缸(长 1 m ,宽 0.2 m)采用亚克力材质并注满自来水。

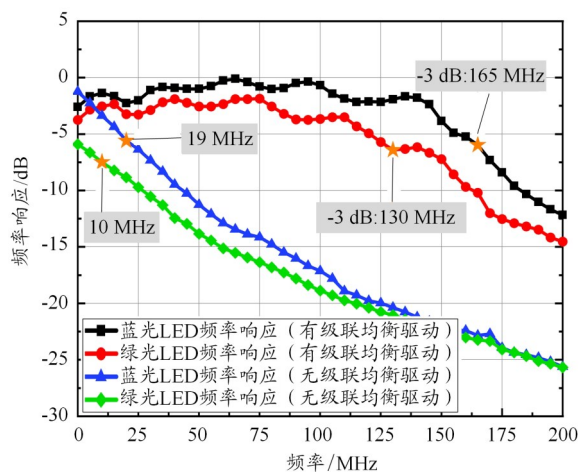


图6 UWOC系统实验装置图

为评估均衡电路性能并对比蓝光与绿光通信链路特性差异,本文分别测量了系统在接入与未接入均衡电路条件下的交流信号幅频特性及频率响应,结果如图7所示。从图7(a)可以看出,引入均衡技术后,信号在低频段的幅度相较于传统直接耦合驱动方式(无均衡)显著降低,而高频段的衰减得以减缓。这一结果验证了所提均衡电路对信号幅频响应的有效调节作用。本文以 1 MHz 频率点的响应值为低频参考,并将频率响应功率下降 3 dB 处对应的频点定义为系统的 -3 dB 带宽。基于此定义,对比不同驱动方式下蓝、绿光LED的频率响应,结果如图7(b)所示。可以看出,在传统交直流耦合驱动下,受限于LED结电容,



(a) 幅频响应对比



(b) 蓝、绿光LED频率响应对比

图7 有无均衡电路时的幅频响应对比和蓝、绿光LED频率响应对比

蓝光与绿光LED的 -3 dB 带宽分别仅为 19 MHz 和 10 MHz 。在引入均衡电路后,系统频率响应显著改善:蓝光LED在 1 MHz 处响应为 -2.63 dB ,其 -3 dB 点(-5.63 dB)对应频率提升至 165 MHz ;绿光LED在 1 MHz 处响应为 -3.75 dB ,其 -3 dB 点(-6.75 dB)对应频率提升至 130 MHz 。上述结果表明,所提均衡方案有效拓展了系统带宽,且蓝光LED在同等条件下展现出比绿光LED更宽的调制带宽。

为全面评估系统通信性能,本文对不同数据速率下的误码率(BER)进行了测试。测试中,BERT生成基于伪随机二进制序列(PRBS)的不归零-开关键控(NRZ-OOK)数据流,经所提出的T桥与SD-C级联均衡电路处理后,驱动蓝、绿光LED发射信号。接收端将APD转换并经TIA放大后的电信号返回BERT的RX端口,以计算BER。

蓝、绿光LED系统在各数据速率下的BER性能

如图8所示。可以看出,随着速率从10 Mb/s提升至220 Mb/s,2种系统的BER逐渐升高。在1 m水缸信道中,采用均衡驱动蓝光LED在210 Mb/s速率下BER为 1.8×10^{-3} ,绿光LED在175 Mb/s速率下BER为 2.5×10^{-3} ,两者均低于前向纠错(FEC)门限 3.8×10^{-3} ,说明蓝光LED在同等条件下支持更高数据传输速率。

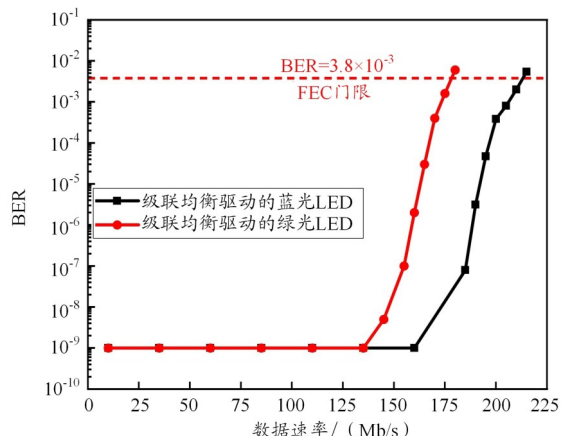


图8 基于蓝、绿光LED的UWOC系统在不同数据速率下的BER

3 结束语

本文提出了一种T型桥式电路与SD-C电路级联的LED均衡方案,并在1 m水缸模拟水下环境中进行了实验验证。结果表明,该方案显著拓展了LED的调制带宽:蓝光LED通信链路的-3 dB带宽从19 MHz提升至165 MHz,系统在210 Mb/s传输速率下的BER为 1.8×10^{-3} ;绿光LED链路的-3 dB带宽从10 MHz提升至130 MHz,在175 Mb/s速率下的BER为 2.5×10^{-3} ,两者均低于前向纠错门限(3.8×10^{-3})。所提均衡电路结构简洁、均衡效果显著,且易于集成,适用于短距离高速水下无线光通信系统。然而,实验中也发现接收端雪崩LED所接收的光信号幅度较低,易受信道噪声影响,导致系统信噪比下降与BER升高。在后续研究中,本文作者计划选用高增益放大器与大功率LED以提升发射光功率;在接收端引入窄带滤光片抑制背景光干扰;通过增大接收孔径来提升光通量,从而全面提高系统的信噪比与通信质量。

参考文献:

- [1] WOODRUFF S D, SLUTZ R J, JENNE R L, et al. A comprehensive ocean-atmosphere data set[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1987, 68(10): 1239-1250.
- [2] ZENG Z Q, FU S, ZHANG H H, et al. A survey of underwater optical wireless communications[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2017, 19(1): 204-238.
- [3] ZHANG Z Y, LAI Y J, LV J L, et al. Over 700 MHz-3dB bandwidth UWOC system based on blue HV-LED with T-Bridge pre-equalizer[J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(3): 1-12.
- [4] SCHUBERT E F, HUNT N E J, MALIK R J, et al. Temperature and modulation characteristics of resonant-cavity light-emitting diodes[J]. Journal of Lightwave Technology, 1996, 14(7): 1721-1729.
- [5] 梁静远,王醒醒,李征,等. 水下无线光通信中关键技术与进展[J]. 数字海洋与水下攻防, 2023, 6(2): 215-240.
- [6] YANG X Q, ZHANG Y F, HUA Y, et al. 50-M/300-Mbps underwater wireless optical communication using incoherent light source[J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 41(22): 6939-6948.
- [7] KRISHNA G, MATHEW J, GUPTA S. Nonlinearity mitigation in bandwidth limited blue LED-based OFDM-UOWC systems using differential pre-emphasis[J]. Applied Optics, 2024, 63(34): 8857-8868.
- [8] MINH L 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.
- [9] LI X, GUI L Q, XIA Y, et al. Demonstration of a real-time UWOC system using a bandwidth limited LED based on hardware and software equalization[J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 41(15): 4979-4988.
- [10] 樊庭冰,涂俊轩,庄济舟,等. 基于OOK调制的可见光通信视频传输系统[J]. 光通信技术, 2024, 48(3): 84-88.
- [11] LEE T P. Effect of junction capacitance on the rise time of LED's and on the turn-on delay of injection lasers[J]. The Bell System Technical Journal, 1975, 54(1): 53-68.
- [12] 王桂发,郭梦月,顾佳美,等. 基于双电平脉冲宽度调制的低功耗可见光通信技术[J]. 光子学报, 2021, 50(5): 147-158.
- [13] 张肃文. 高频电子线路[M]. 第六版. 北京: 高等教育出版社, 2023.
- [14] HUANG X X, WANG Z X, SHI J Y, et al. 1.6 Gbit/s phosphorescent white LED based VLC transmission using a cascaded pre-equalization circuit and a differential outputs PIN receiver[J]. Optics Express, 2015, 23(17): 22034-22042.
- [15] 胡薇薇. 电路分析原理[M]. 第三版. 北京: 清华大学出版社, 2022.
- [16] YEH C H, CHOW C W, CHEN H Y, et al. Adaptive 84.44-190 Mbit/s phosphor-LED wireless communication utilizing no blue filter at practical transmission distance[J]. Optical Express, 2014, 22(8): 9783-9788.