光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20250823001

基于自适应阈值的BPSK可见光通信系统设计

梁　哲[1]，兰志强[2*]，朱　坤[2]，何　剑[1]，穆继亮[1]，丑修建[1]

（1. 中北大学 极限环境光电动态测试技术与仪器全国重点实验室，太原 030051；
2. 苏州大学 未来科学与工程学院，江苏 苏州 215222）

摘　要： 针对环境光强突变引起的BPSK解调基线漂移问题，文章设计了一种基于自适应阈值的BPSK可见光通信系统。该系统利用FPGA的高速并行处理能力，动态跟踪信道状态并实时优化判决门限，有效克服固定阈值在动态光环境下的适应性缺陷。实验结果表明，在模拟光强突变的环境下，系统在1.75 m的距离和2.304 Mbps的速率条件下，自适应阈值方案将误码率从固定阈值方案的1.13×10^{-1}降低至4.2×10^{-2}，相对误码率改善达62.8%。此外，系统在黑暗环境下实现了1.5 m距离和2.304 Mbps速率的可靠传输。该研究为可见光通信在复杂光环境下的可靠传输提供了理论基础和技术方案。

关键词： 可见光通信；二进制相移键控；基线漂移；FPGA；自适应阈值

中图分类号： TN929.1　**文章编号：** 1001－5868(2025)06－1095－06

Design of BPSK Visible Light Communication System Based on Adaptive Thresholding

LIANG Zhe[1], LAN Zhiqiang[2], ZHU Kun[2], HE Jian[1], MU Jiliang[1], CHOU Xiujian[1]

(1. State key Laboratory of Extreme Environment Optoelectronic Dynamic Measurement Technology and Instrument, North University of China, Taiyuan 030051, CHN; 2. School of Future Science and Engineering, Soochow University, Suzhou 215222, CHN)

Abstract: To address the issue of BPSK demodulation baseline drift caused by sudden changes in ambient light intensity, in this study, a BPSK visible light communication system is proposed based on an adaptive threshold. The system leverages the high-speed parallel processing capabilities of an FPGA to dynamically track channel conditions and optimize decision thresholds in real time, effectively overcoming the adaptability limitations of fixed thresholds in dynamic light environments. Experimental results show that under simulated sudden changes in light intensity, at a distance of 1.75 m and a data rate of 2.304 Mbps, the adaptive threshold scheme reduces the bit error rate from 1.13×10^{-1} in the fixed threshold scheme to 4.2×10^{-2}, representing a relative improvement of 62.8%. Additionally, the system achieved reliable transmission at a distance of 1.5 m and a data rate of 2.304 Mbps in a dark environment. This research provides a theoretical foundation and technical solutions for the reliable transmission of visible light communication in complex optical environments.

Key words: visible light communication; binary phase-shift keying; baseline drift; FPGA; adaptive threshold

收稿日期：2025－08－23.

基金项目：极限环境光电动态测试技术与仪器全国重点实验室基金项目(2024-SYSJJ-05)；国家自然科学基金资助项目(62301349, 52375571, 62171414, 52175554, 52205608)；山西省基础研究计划项目(20210302123059, 20210302124610).

*通信作者：兰志强

0 引言

随着现代医疗技术的发展，无线通信系统在患者监护和远程医疗等医疗过程中发挥着关键作用。传统的无线通信技术如Wi-Fi和蓝牙虽被广泛应用，但容易受到电磁干扰，从而可能影响精密医疗设备的运行[1-3]。因此，亟需设计一种兼具高传输性能和无电磁干扰的新型通信方案。

可见光通信（VLC）利用白光LED实现照明与通信双重功能，具有频谱宽、速率高、无电磁辐射及低功耗等优势[4-6]，逐渐成为医疗电子领域的理想选择之一。当前，二进制开关键控（OOK）调制因其调制解调复杂度低、易实现等优势，在主流VLC系统中被广泛应用[7-9]。然而，现有研究表明，该调制存在显著局限。2016年，张玉燕等构建的OOK系统需依赖LED阵列才能实现音频的高质量传输[10]。2018年，陈文娟等设计的OOK图像传输装置有效距离仅为30 cm，数据速率限制于460.8 kbps[11]。2024年，曹明华等提出一种基于FPGA的超奈奎斯特系统，尽管理论速率提升20%，但实际数据速率也仅为1 Mbps，且通信距离仅为10 cm[12]。相比之下，二进制相移键控（BPSK）调制具有鲁棒性强、误码率低及恒包络输出等优势，更适用于复杂光环境。然而，其传统固定阈值解调方式难以适应医疗环境中光照的动态变化，限制了其解调性能。

为此，本文提出一种基于自适应阈值的BPSK-VLC系统。该自适应阈值方案通过动态跟踪信道状态并实时优化判决门限，提升系统在光强波动下的适应性与稳定性。仿真与实验验证了该方案在复杂干扰环境中的优越性能，为复杂光环境下传输提供了可靠的通信方案。

1 方案设计

所设计的基于BPSK调制的VLC通信系统框图如图1所示。该系统由上位机、发射端和接收端组成。

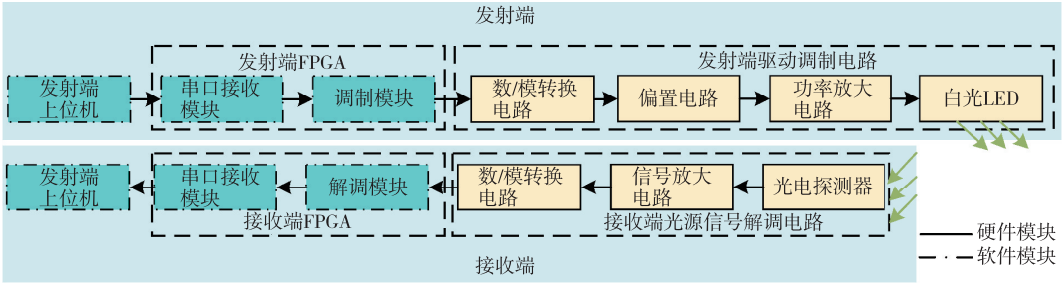


图1 基于BPSK调制的VLC无线传输系统框图

发射端以FPGA为核心，完成数据缓存与BPSK调制；调制信号经数/模（D/A）转换电路转换为模拟信号，再依次通过直流偏置电路和功率放大电路，添加所需的直流偏置并进行功率放大，最终驱动LED实现光信号发射。

接收端通过光电探测器将接收到的光信号转换为电信号，随后经信号放大电路放大，再由A/D转换电路转换为数字信号后，由FPGA完成BPSK解调。最终，数据通过串口回传至上位机，进行可视化展示与误码率分析。

2 系统实现

2.1 硬件电路部分

2.1.1 A/D与D/A转换电路

为满足系统对高速、高精度模拟信号输出与采集的需求，核心芯片分别选用AD9708与AD9280。

在发射端，D/A转换电路以AD9708为核心，该芯片具备8位分辨率及125 MSPS的转换速率，可满足系统对高速、高保真信号重建的需求。其差分电流输出首先经由低通滤波器滤除高频噪声，随后通过基于AD8065运放的电路完成差分至单端的转换，并将输出信号幅度精确调节至－1～1 V的范围。

在接收端，A/D转换电路以AD9280为核心，其32 MSPS采样率及模拟输入带宽能够满足16 MHz带宽内目标信号的采样需求。为适配芯片约0～2 V的单极性输入范围，前端采用两级运放进行幅度缩放与直流偏置，将双极性输入信号平移并映射至AD9280的量化范围，从而在16 MHz频段内获得较好的动态性能与采样精度。

2.1.2　功率放大电路

功率放大电路采用THS4631DR前置调理与ADA4870功率输出的两级架构。THS4631DR对输入信号进行线性放大与失真校正，保障信号质量；ADA4870提供1 A峰值电流与2 500 V/μs压摆率，满足LED对大电流与快速响应的需求。配合$R_6/R_7/R_8$电阻网络实现增益匹配与频响优化，使整个功率驱动电路具备高电流驱动能力、高压摆率及低输出阻抗特性，确保白光LED稳定地高亮度输出。功率放大电路原理图如图2所示。

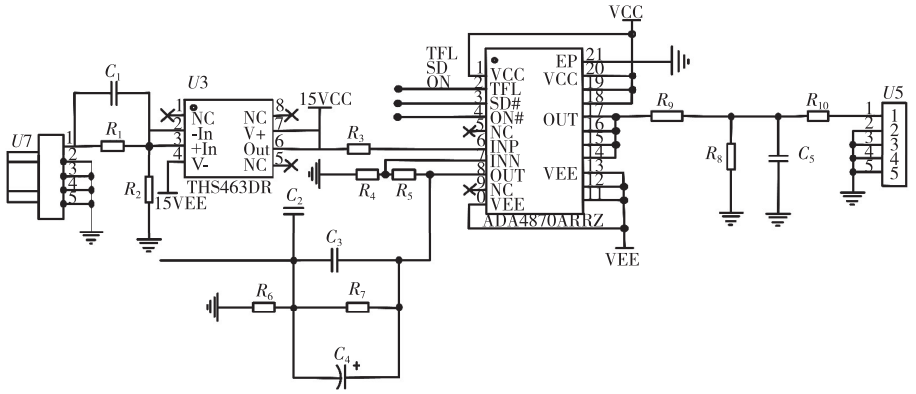


图2　功率放大电路原理图

2.1.3　光电探测器

光电探测器作为光信号转换为电信号的核心器件，其选型需综合考虑响应波长范围、响应速率、光电转换效率和器件可靠性等关键指标，须确保在380～780 nm波长的可见光范围内具备良好的光谱响应特性。

系统采用PDA10A2型光电探测器，该器件具有200～1 100 nm的宽光谱响应范围及150 MHz的带宽，能够有效检测高速调制光信号。同时，其内部集成了高增益、低噪声放大器，在确保高灵敏度的同时，维持了优异的带宽性能，满足系统对高速、宽动态范围的光信号检测需求。

2.2　自适应阈值算法设计

在系统实现中，判决门限的选择直接影响解调性能。理论上，BPSK调制在理想静态信道下可采用固定阈值判决方式，但实际信道的动态特性和高速率波形失真会显著提升系统误码率。为此，本文提出一种自适应阈值算法，流程图如图3所示。

该算法通过实时追踪信号统计特征并动态调整判决门限，核心采用递归平均法实现直流分量（DC）跟踪，其数学模型为：

$$\widehat{DC}(n+1)=\widehat{DC}(n)+\frac{1}{2^{\alpha}}\cdot[x(n)-\widehat{DC}(n)] \quad (1)$$

式中，$\widehat{DC}(n)$为第n次DC估计值，$x(n)$为输入信号，α为平滑因子。为防止异常信号导致DC漂移，算法引入范围限制机制：

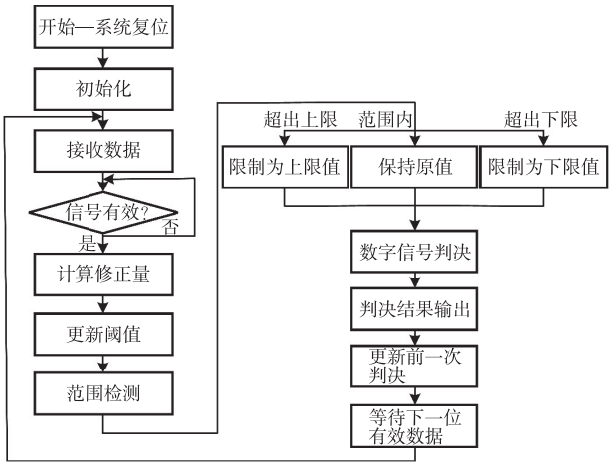


图3　自适应阈值判决流程图

$$\widehat{DC}_{\text{limited}}(n)=\begin{cases}DC_{\max}, & \widehat{DC}(n)>DC_{\max}\\ DC_{\min}, & \widehat{DC}(n)<DC_{\min}\\ \widehat{DC}(n), & \text{otherwise}\end{cases} \quad (2)$$

式中，$\widehat{DC}_{\text{limited}}(n)$为第$n$时刻经过范围限制后的DC估计值。判决过程采用滞回机制避免阈值附近的频繁跳变，其判决逻辑为：

$$y(n)=\begin{cases}1, & x(n)>\widehat{DC}_{\text{limited}}(n)+H \text{ and } y(n-1)=0\\ 1, & x(n)>\widehat{DC}_{\text{limited}}(n)-H \text{ and } y(n-1)=1\\ 0, & \text{otherwise}\end{cases} \quad (3)$$

式中，H为滞回窗口，$y(n)$为判决输出。该双阈值设计能够有效抑制噪声引起的误判决，从而显著提升

系统的鲁棒性。

为验证自适应阈值算法的有效性，基于MATLAB构建了一个旨在高度模拟实际硬件运行条件的BPSK链路仿真模型。该模型采用2.304 Mbps的符号速率和50 MHz的采样率，并在加性高斯白噪声信道的基础上，引入速率为0.1 V/s、动态范围为±0.5 V的线性直流偏置漂移，以模拟实际硬件系统中的关键损伤。在仿真过程中，信噪比从－10 dB至10 dB，以2 dB为步进进行扫描；在每个信噪比点下，通过传输1×10^6个符号并进行100次独立的蒙特卡罗实验并取平均，以获得可靠的误码率性能。作为对比，固定阈值判决门限设置为0 V，而自适应阈值方案的关键参数则设置为：平滑因子α=0.01，滞回窗口H=0.1 V。

图4为两种判决方法在DC偏置漂移下的误码率性能对比。在低信噪比区域（SNR<－4 dB），两种算法的误码率（BER）均维持在较高水平且差异较小，表明噪声为主导误码因素。在中等信噪比区域（－4 dB ≤SNR≤ 4 dB），性能差异逐步放大。在高信噪比区域（SNR>4 dB），自适应阈值优势显著。当SNR=10 dB时，自适应阈值方案BER为0.1，较固定阈值方案的BER为0.3有显著改善。

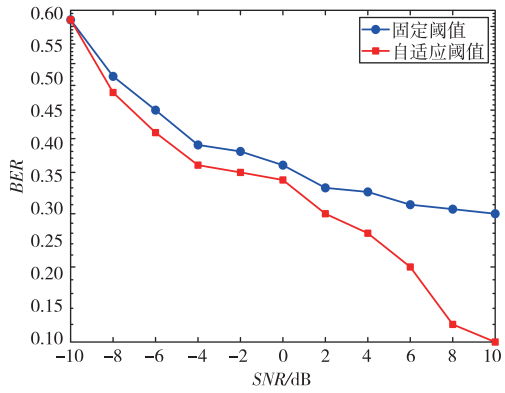


图4 两种阈值误码率结果图

经研究分析发现，固定阈值方案在SNR超过4 dB后误码率下降趋势明显放缓，表明DC偏置漂移逐渐成为性能瓶颈。而自适应阈值方案在全信噪比范围内保持稳定改善，验证了该算法对DC偏置补偿的有效性。

3 实验结果

3.1 测试平台搭建

测试平台采用2 m直线导轨系统，通过双滑轨机构实现收发端精确定位。LED聚光透镜及接收端PD固定装置采用Solidworks设计，并通过标准螺栓安装于滑轨上。

发射端透镜与接收端透镜保持等高对准以优化光功率耦合，导轨表面标有精确刻度，便于实时监测收发端的间距变化。当系统调试时，使用示波器监测收发信号，通过调节透镜与PD的间距使接收信号的峰峰值最大化。在验证信号质量后，接入测试系统进行性能测试。测试平台如图5所示。

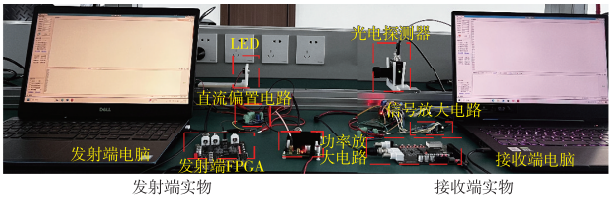


图5 测试平台实物图

3.2 结果分析

测试系统由发送端、接收端及上位机监控平台构成。为评估系统性能，发送端生成1～10 000连续数字序列作为标准测试数据，并重复传输100组数据以确保统计有效性。

初步测试表明，在4.608 Mbps的速率下，系统误码率超过0.1，无法满足通信要求。经分析，本系统采用的商用照明LED（调制带宽约为3～5 MHz）无法支持该速率，导致严重的码间串扰。虽然国际上已有高速LED通信报道，但这些系统通常均采用专用高速LED器件或复杂的信道均衡技术，而本系统基于低成本商用器件设计。将速率降至2.304 Mbps后，误码率降至可接受范围内，故将该速率确认为最高工作速率。综合考虑LED带宽限制和实际应用需求，选择0.96 Mbps（低速）、1.152 Mbps（中速）和2.304 Mbps（高速）三种速率进行测试，以全面评估系统在不同传输速率下的性能表现。

受平台限制，测试距离设在1～1.75 m范围内，步长为0.25 m。动态光干扰测试采用相同型号白光LED光源，光谱范围为400～700 nm，光源位于接收器西南方向50 cm处，与收发端保持同一水平高度，以0.5 m/s恒定速率扫过接收区域±25 cm范围，形成渐变-突变-渐变的动态变化模式。每个测试条件重复测量20次，并取误码率的平均值。

在黑暗环境基准测试条件下，固定阈值与自适应阈值方案在1～1.5 m范围内的不同速率下均实现零误码率传输，验证了系统基础设计的可靠性。性能差

异出现在 1.75 m 极限距离：在 1.152 Mbps 速率下，固定阈值方案和自适应阈值方案的 *BER* 分别为 1.3×10^{-2} 和 1.2×10^{-2}（差异仅 8%）；在 2.304 Mbps 速率下，*BER* 分别为 2.3×10^{-2} 和 2.1×10^{-2}（差异 9%）。测试结果如图 6 所示，这一微小差异证明了在无干扰情况下 DC 补偿作用有限，验证了算法设计的针对性。

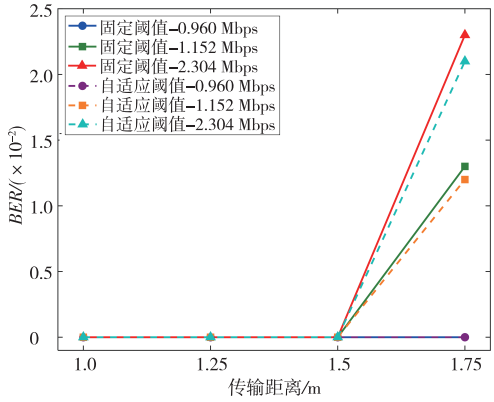


图 6　黑暗环境下系统性能测试结果

在动态光干扰环境下，图 7 显示了相同条件下自适应阈值方案在所有测试点均优于固定阈值方案。在 2.304 Mbps 速率下，*BER* 改善率达 49%～71%；其中，在 1.75 m 极限距离处，*BER* 从 1.13×10^{-1} 降至 4.2×10^{-2}，改善达到 62.8%。在 0.96 Mbps 和 1.152 Mbps 速率下，改善率介于 21%～75% 间，波动主要源于信噪比、干扰强度和传输距离的交互影响。尽管改善程度存在波动，但自适应阈值在所有条件下均显著降低了误码率。

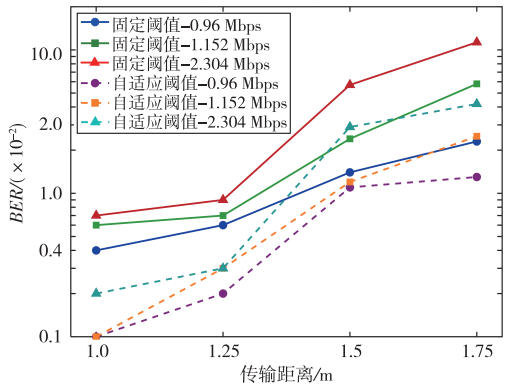


图 7　动态光干扰环境下的系统性能测试结果

若以 1×10^{-2} 为通信质量门限，在 2.304 Mbps 速率下，自适应阈值方案将有效通信距离从固定阈值方案的 1 m 提升至 1.25 m，覆盖范围提升 25%；在 1.152 Mbps 速率下，两种方案均可支持 1.25 m 传输，但自适应阈值方案的误码率更低，提供了更优性能裕度。即使在超过 1.25 m 距离后系统无法满足该门限，但自适应阈值始终保持更低的误码率，显著改善了系统在干扰条件下的通信质量。

综上所述，实验数据充分证明自适应阈值方案在动态光干扰下具有显著优势，特别在高速率、远距离等挑战条件下，既提升了系统的环境适应能力，又拓展了其在复杂光环境下的应用范围。

4　结论

针对动态光环境下 BPSK-VLC 系统的基线漂移问题，文章提出一种基于自适应阈值的实时解调方案。研究证实，该方案能通过动态跟踪信道状态，有效缓解固定阈值在光强突变时的性能劣化问题。在 1.75 m 的距离、2.304 Mbps 的极限条件下，系统误码率从固定阈值的 1.13×10^{-1} 降低至 4.2×10^{-2}，改善率达到 62.8%；当通信质量门限为 1×10^{-2} 时，系统有效传输距离延伸了 25%，充分证明了算法在复杂光环境下的强鲁棒性。

本研究成功将判决门限从一个静态预设值转变为随信道动态优化的关键参数，为实现环境感知的自适应 VLC 系统提供了新的设计范式。同时，基于 FPGA 构建的实时处理平台验证了该算法在 2.304 Mbps 速率下的稳定运行，并通过了工程可行性验证。

综上所述，本研究不仅为解决 VLC 系统在动态光干扰下的可靠传输提供了高效方案，所提出的动态判决门限理论与 FPGA 硬件实现更为其在医疗电子、航空客舱等电磁敏感场景的实际应用奠定了坚实基础。

参考文献：

[1] Iyama T, Ishioka R, Higashiyama J, et al. Dependency of waveforms in intermittent transmission at mobile phone frequencies on electromagnetic interference with medical devices[J]. IEEE Access, 2024, 12: 21165-21173.

[2] Hwata C, Gatera O, Ritsch N, et al. Evaluation of the awareness of electromagnetic compatibility and interference for improved medical device management observed in selected Rwanda district hospitals [J]. Medicine, 2024, 103(52): e41179.

[3] 郑沁春，吴晓东，才　辉，等. 医院电磁兼容现状探讨[J]. 中国医疗器械信息，2021，27(1)：54-56，62.
Zheng Qinchun, Wu Xiaodong, Cai Hui, et al. Discussion on current situation of electromagnetic compatibility in hospital [J]. China Medical Device Information, 2021,

27(1): 54-56, 62.

[4] 余礼苏, 吕欣欣, 钟 润, 等. 液晶智能超表面辅助的室内可见光通信系统优化设计[J]. 工程科学学报, 2025, 47(2): 307-314.
Yu Lisu, Lü Xinxin, Zhong Run, et al. Optimization design of liquid crystal-based reconfigurable intelligent surface-assisted indoor visible light communication systems[J]. Chinese Journal of Engineering, 2025, 47(2): 307-314.

[5] 陈 超, 邵宇丰, 王安蓉, 等. 多输入多输出可见光通信系统中预编码技术的研究进展[J]. 激光杂志, 2024, 45(6): 21-27.
Chen Chao, Shao Yufeng, Wang Anrong, et al. Research progress on precoding technology in MIMO-VLC system[J]. Laser Journal, 2024, 45(6): 21-27.

[6] 迟 楠, 徐增熠, 施剑阳, 等. 面向6G的可见光通信: 关键技术与未来展望[J]. 光学学报, 2025, 45(13): 56-74.
Chi Nan, Xu Zengyi, Shi Jianyang, et al. 6G oriented visible light communication: key technologies and prospectives[J]. Acta Optica Sinica, 2025, 45(13): 56-74.

[7] 董德壮, 万生鹏, 尹 玺, 等. 基于双路发送的可见光语音视频混合传输[J]. 光通信技术, 2020, 44(12): 25-28.
Dong Dezhuang, Wan Shengpeng, Yin Xi, et al. Visible light audio-video hybrid transmission based on two-way transmission [J]. Optical Communication Technology, 2020, 44(12): 25-28.

[8] 龚从安, 胡芳仁, 赵晓燕, 等. 基于OOK调制的水下高速激光通信系统设计与实现[J]. 光通信技术, 2023, 47(1): 13-16.
Gong Congan, Hu Fangren, Zhao Xiaoyan, et al. Design and implementation of underwater high-speed laser communication system based on OOK modulation[J]. Optical Communication Technology, 2023, 47(1): 13-16.

[9] Wang Y, Chen X, Xu Y. Transmitter for 1.9 Gbps phosphor white light visible light communication without a blue filter based on OOK-NRZ modulation[J]. Optics Express, 2023, 31(5): 7933-7946.

[10] 张玉燕, 渠文涵, 刘事超, 等. 基于白光LED的音乐信号传输系统[J]. 传感器与微系统, 2016, 35(8): 101-104.
Zhang Yuyan, Qu Wenhan, Liu Shichao, et al. Music signal transmission system based on white LED[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2016, 35(8): 101-104.

[11] 陈文娟, 刘树钰, 迟克浩, 等. 基于可见光通信的数字图像传输装置研制[J]. 光通信技术, 2018, 42(11): 13-17.
Chen Wenjuan, Liu Shuyu, Chi Kehao, et al. Development of digital image transmission device based on visible light communication [J]. Optical Communication Technology, 2018, 42(11): 13-17.

[12] 曹明华, 张家玮, 王效兵, 等. 超奈奎斯特可见光通信系统的设计与实现[J]. 兰州理工大学学报, 2024, 50(3): 98-103.
Cao Minghua, Zhang Jiawei, Wang Xiaobing, et al. Design and implementation of faster-than-Nyquist visible light communication system[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2024, 50(3): 98-103.

作者简介:

梁 哲(2000—),男,四川省成都市人,硕士研究生,主要研究方向为可见光通信;

兰志强(1993—),男,博士,副教授,主要研究方向为微弱声信号处理及其系统集成、光通信技术。