

doi:10.13756/j.gtxyj.2026.250393.

专题:面向6G的无线光通信

蒋威,李文迪,尹慧萍,等. 面向6G的微型LED烟雾环境可见光通信研究[J]. 光通信研究, 2026(2): 250393.

Jiang W, Li W D, Yin H P, et al. Micro-LED based Visible Light Communication in Smoke Environment for 6G Applications [J]. Study on Optical Communications, 2026(2):250393.

面向6G的微型LED烟雾环境可见光通信研究(特邀)

蒋威,李文迪,尹慧萍,李欣

(南京邮电大学 通信与信息工程学院 江苏省氮化镓光子集成国际合作联合实验室,南京 210003)

摘要:【目的】为解决消防救援和矿井检测等场景下强散射烟雾环境对可见光通信(VLC)造成的严重性能退化问题,文章研究了一种基于微型发光二极管(LED)烟雾环境VLC系统,突破传统光源强散射环境下的通信瓶颈,为第六代移动通信技术(6G)网络的应急场景以及通信与感知的一体化应用提供了技术方案。【方法】文章研制了基于InGaN/GaN多量子阱(MQWs)结构的微型LED发射器并建立了适用于烟雾VLC的Beer-Lambert信道模型,完成了衰减特性仿真验证;利用可控烟雾实验平台结合双透镜光路系统优化了光束聚焦,将光的利用效率提高到85%,同时对比分析了清晰环境下及不同烟雾浓度下的吸光度差异,搭建了烟雾VLC系统通信性能测试平台,并对系统通信性能进行了测量。【结果】微型LED发射器实现了3.39 MHz调制带宽,最大传输速率为25 Mbit/s,功耗为10~50 mW。在轻度烟雾条件下(1.4 g烟饼)信号功率衰减70%,系统能够保持稳定通信,眼图开口度大于50%;重度烟雾下(2.6 g烟饼)信号功率衰减85%,仍然能正常通信,收发稳定可靠,实现了通信及环境感知功能的融合。【结论】文章将微型LED应用于烟雾环境VLC中,重度烟雾条件下信号功率衰减85%时依然可实现稳定传输,解决了一直以来存在的光源不易于在强散射环境中稳定传输的问题。文章建立了Beer-Lambert信道模型,可为烟雾VLC系统的硬件设计和优化提供参考,实验表明,通过接收信号来定量地反演烟雾浓度,验证了微型LED在6G通感一体化领域的优势,可运用于消防救援和矿井监测等应急场景。

关键词:可见光通信;微型发光二极管;第六代移动通信技术;烟雾环境;通信感知一体化

中图分类号: TN929.1 **文献标志码:** A

Micro-LED based Visible Light Communication in Smoke Environment for 6G Applications

JIANG Wei, LI Wendi, YIN Huiping, LI Xin

(GaN Optoelectronic Integration International Cooperation Joint Laboratory of Jiangsu Province, School of Communications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: 【Objective】To address the severe performance degradation caused by strongly scattering smoke environments on Visible Light Communication (VLC) in scenarios such as fire rescue and mine detection, this paper studies a smoke-environment VLC system based on micro-Light-Emitting Diode (LED). It aims to overcome the communication bottleneck of traditional light sources in strongly scattering environments. It also provides a technical solution for emergency scenarios in 6th Generation Mobile Communication Technology (6G) networks and integrated applications of communication and sensing. 【Methods】A Micro-LED transmitter based on an InGaN/GaN Multiple Quantum Well (MQWs) structure was developed. A Beer-Lambert channel model suitable for smoke VLC was established, and its attenuation characteristics were verified through simulation. Using a controllable smoke experimental platform combined with a dual-lens optical system to optimize beam focusing, the optical utilization efficiency was improved to 85%. Simultaneously, the absorbance differences under clear conditions and different smoke concentrations were compared and analyzed. A communication performance test platform for the smoke VLC system was built, and its performance was measured. 【Results】The Micro-LED transmitter achieved a 3.39 MHz modulation bandwidth, a maximum transmission rate of 25 Mbit/s, and a power consumption of 10~50 mW. Under light smoke conditions (1.4 g smoke cake), with a 70% signal power attenuation, the system maintained stable communication with an eye diagram opening greater than 50%. Under heavy smoke conditions (2.6 g smoke cake), with an 85% signal power attenuation, stable and reliable communication was still achieved, realizing the integration of communication and environmental sensing functions. 【Conclusion】This paper pioneers the application of Micro-LEDs in visible light communication within smoke environments. Under heavy smoke conditions, stable transmission is still achievable even with an 85% signal power attenuation, solving the long-standing problem of light sources struggling to maintain stable transmission in strongly scattering environments. The established Beer-Lambert channel model provides a reference for the hardware design and optimization of smoke VLC systems. The experiments demonstrate that smoke concentration can be quantitatively inferred by analyzing received signals, verifying the advantages of Micro-LEDs in the field of 6G integrated sensing and communication. This technology can be applied to emergency scenarios such as fire rescue and mine monitoring.

Key words: VLC; Micro-LED; 6G; smoke environment; integrated sensing and communication

收稿日期:2025-12-25; 修回日期:2026-01-15; 纸质出版日期:2026-04-10

基金项目:南京市重大科技专项资助项目(202512132);江苏省高等学校基础科学(自然科学)研究重大项目(22KJA510003)

作者简介:蒋威(2003-),男,江苏宿迁人。硕士,主要研究方向为可见光通信和氮化镓基光电子器件。

通信作者:李欣,副教授。E-mail:lixin1984@njupt.edu.cn

© Editorial Office of Study on Optical Communications. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

0 引言

第六代移动通信技术(6th Generation Mobile Communication Technology, 6G)已成为学术界和产业界的研究热点^[1-3],在6G环境中,极端环境下的可靠通信能力至关重要,消防救援、矿井监测和化工安全等特殊场景普遍存在烟雾和粉尘等复杂环境,传统射频通信易受干扰且存在电火花等安全隐患^[4-5]。可见光通信(Visible Light Communication, VLC)作为6G候选技术,为极端环境通信提供了新的解决方案^[6-7]。VLC避免了射频信号可能引发的电火花安全隐患,不受金属颗粒物和电磁干扰影响,为极端环境的安全通信提供了可靠方案^[8-10]。

在烟雾环境中,白光发光二极管(Lighting Emitting Diode, LED)的透射率随着烟雾密度的增加显著降低,利用白光实现的VLC几乎无法正常进行^[11-12]。微型LED(尺寸 $<100\ \mu\text{m}$)相较传统LED在调制带宽、功耗和集成度等方面具有显著优势,成为下一代高速VLC的核心器件^[13-15]。同时,微型LED器件在VLC系统中具有极低功耗,适用于电池供电的便携式终端和应急通信场景^[16-18],为6G极端环境通信和通感一体化应用奠定了器件基础。

当前相关研究多从理想化VLC系统角度出发^[19-21],较少考虑极端散射环境中的通信特性。为了突破当前局限性,本文研制了基于InGaN/GaN多量子阱(Multiple Quantum Well, MQWs)结构的高效率微型LED发射器,并集成了布拉格反射器以提高光提取效率;建立了适用于烟雾VLC的Beer-Lambert信道模型,并确定了烟雾浓度与信号功率衰减的定量关系;搭建了可控量化的烟雾环境实验平台,测得了微型LED在不同浓度烟雾下的VLC性能,实现了通信和环境感知的结合。由此给出在极端环境下可靠的可见光通感一体路径和实现手段。

1 微型LED烟雾环境VLC发射端的设计与理论模型

本文研制的微型LED发射器使用金属有机化合物化学气相沉积(Metal-Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD)外延生长的蓝宝石衬底氮化物晶圆制备。InGaN/GaN MQWs结构为发光有源区,依次在蓝宝石衬底上沉积n-GaN层、5周期InGaN/GaN MQWs有源层及p-GaN层,如图1所

示。每一个周期的MQW由约3 nm的InGaN层和约12 nm的GaN势垒层组成,5周期的MQWs有源层总厚度约75 nm。通过调节In合金组分实现530 nm绿光发射。为提升光提取效率,器件底部集成了TiO₂/SiO₂分布式布拉格反射器(Distributed Bragg Reflector, DBR)薄膜,其高反射率特性增强了LED发射光的回反射能力,提高了整体光输出功率,满足高效VLC需求。

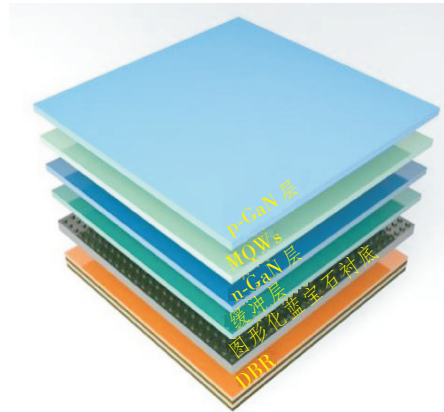


图1 InGaN/GaN MQWs材料分层结构三维示意图

Figure 1 Three-dimensional schematic diagram of the layered structure of InGaN/GaN MQWs

微型LED发射器电学特性包括电流电压(Current-Voltage, I-V)、电致发光(Electroluminescence, EL)及3 dB带宽,其中I-V特性利用AgilentB1500半导体参数分析仪在 $-4\sim+5\ \text{V}$ 电压范围内对器件的电流进行测试,测试结果如图2(a)所示,当正向电压 $>2.36\ \text{V}$ 时,器件进入正向导通区,电流随电压呈指数增长;正向电压增大至 $4.24\ \text{V}$ 驱动电压时,器件饱和电流达到100 mA,具有很强的电流承受能力,并且驱动余量大。微型LED在注入 $10\sim 90\ \mu\text{A}$ 电流时的发光情况如图2(b)所示,可通过增加注入电流值使器件在烟雾环境下获得更高的接收信号功率。使用OceanOpticsHR4000光谱仪做EL测试,注入电流为 $20\sim 100\ \mu\text{A}$,如图2(c)所示。微型LED器件发光峰集中在530 nm附近,随着注入电流的增加,发光峰强度也从2 000增强到14 000 a. u.。器件有稳定的光/电转换效率和良好的线性度,有利于更稳定可靠地传输高保真的光信号。图2(d)所示为微LED器件的3 dB带宽,驱动电压在 $2.3\sim 2.6\ \text{V}$ 范围内,3 dB带宽可从2.15增长到3.39 MHz,器件能在烟雾环境中具有较高的带宽、速率以及较强的抗干扰能力。

在烟雾环境中,可见光信号传播受颗粒物吸收

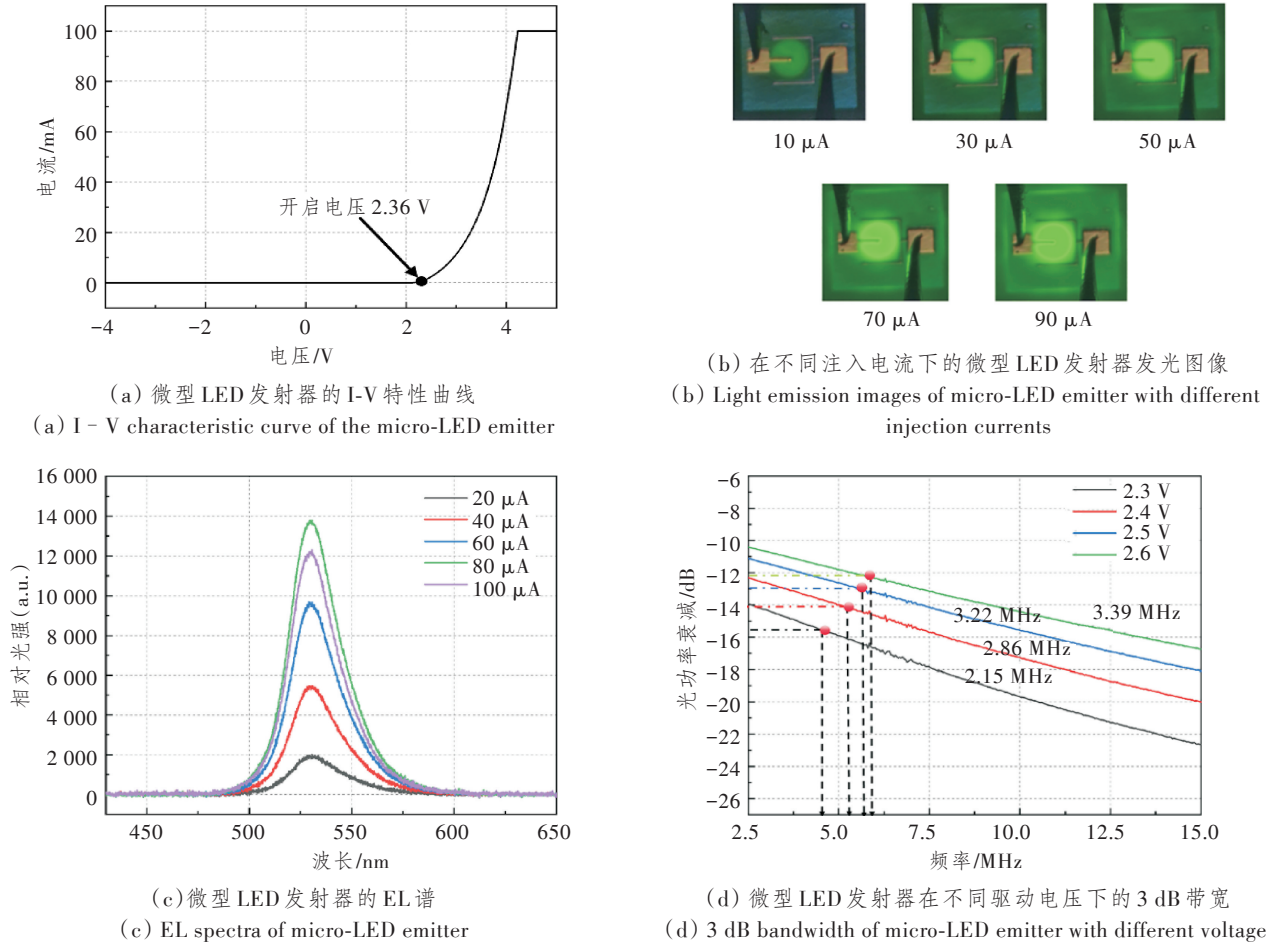


图 2 微型 LED 发射器的电学特性和发光图像

Figure 2 Electrical characteristics and light emission images of micro-LED emitter

和米氏散射的双重影响,导致强度沿路径呈指数衰减,与经典 Beer-Lambert 定律高度契合。该定律源于光在均匀介质中单向传播的物理原理,可表示为

$$I_x = I_0 \cdot e^{-\alpha x}, \quad (1)$$

式中: I_x 为接收端在距离发射端 x 处的接收光强; I_0 为信号源端发射光强; α 为总衰减系数。Beer-Lambert 定律的衰减系数 α 并不是常量,其数值与烟雾浓度密切相关,本文通过物理光学模型建立量化关联。假设烟雾为稀薄颗粒悬浮介质,烟雾环境下的可见光信号传播遵循吸收与散射的复合衰减机制,吸收主要源于颗粒对可见光的弱吸收,因此定律适用于本文使用的微型 LED 发射的 530 nm 绿光信号。

为适应 VLC 信道建模,本文将光强等效转换为驱动 LED 的电压信号形式:

$$V_x = V_0 \cdot e^{-\alpha d}, \quad (2)$$

式中: V_x 为接收端在距离发射端 x 处转化为光电探测器的输出电压; V_0 为发射端基准电压; d 为光路传输距离。利用 Matlab 软件进行烟雾环境下的可

见光信号传输仿真,分析不同衰减参数下的信号特性。以 10 Mbit/s 比特率的伪随机二进制序列 (Pseudo-Random Binary Sequence, PRBS) 作为基带信号,烟雾衰减建模采用 Beer-Lambert 定律,设置 $d=0.4$ m (实验烟雾箱长度),分析衰减系数对信号幅度的影响。仿真参数设定初始信号幅度 $V_0=2.698$ V (与后续实验中的初始光功率 $P_0=26.98$ μ W 对应),噪声幅度固定为 0.2。仿真结果如图 3 所示,清晰无烟环境时,设置衰减系数 $\alpha=0$ cm^{-1} ,接收信号与发射信号基本相同,作为参考基准;在轻度烟雾环境(烟饼质量差 $m=1.4$ g)情况下,由后续实验数据推算得出 $\alpha=4.0$ cm^{-1} ,接收信号幅值明显下降,波形轮廓仍保持完整;在重度烟雾环境($m=2.6$ g)情况下,由后续实验数据推算得出 $\alpha=7.5$ cm^{-1} ,接收信号幅值大幅衰减,信号畸变加剧但边界仍可辨认。仿真分析验证,随着 α 的增大(对应烟雾浓度提高),信号经历指数衰减且波形完整性下降,与 Beer-Lambert 定律预测一致,为后续实验参数设计和系统优化提供了理论指导。

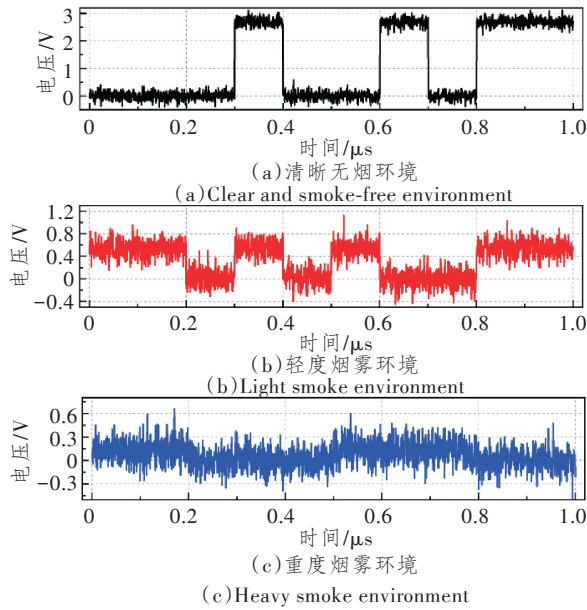


图3 不同工作环境下的接收信号幅度的仿真结果
 Figure 3 Simulation results of received signal amplitude under different situation

2 微型LED烟雾环境VLC实验研究

为进行微型LED烟雾环境VLC试验,本文设计了专用烟雾箱作为信道传输实验平台,如图4所示。烟雾箱由透明亚克力板构成,透光率为92%~93%,外界光源可以进入到箱体内,并且光反射损失较小。烟雾箱体内的尺寸为40 cm×40 cm×50 cm,长度为40 cm供信号传输,箱体顶部为开启式结构,并配有卡扣及密封圈,防止烟雾外泄,右侧开孔处有配硅胶塞的一个圆孔用于引入电线。在箱体底部开一个侧门,在该门内侧可放置烟饼,通过点燃烟饼形成浓烟,然后经风机吹散、排走。

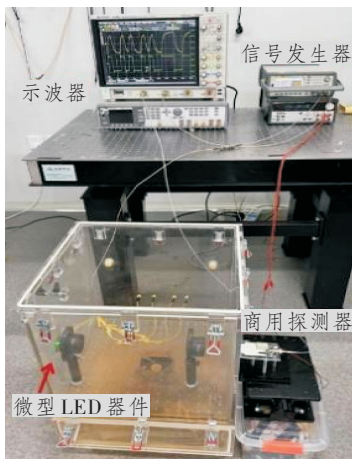
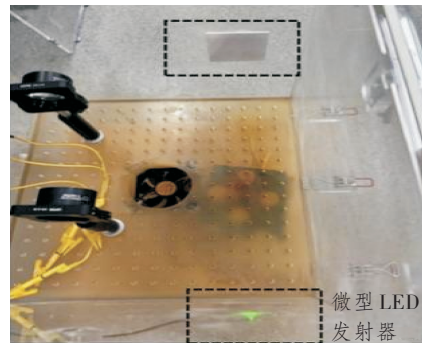
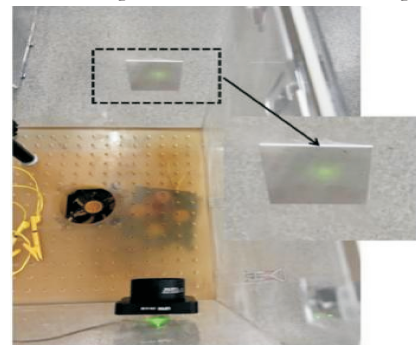


图4 微型LED烟雾环境VLC实验系统实物图
 Figure 4 Physical diagram of micro-LED VLC experimental system in smoke environment

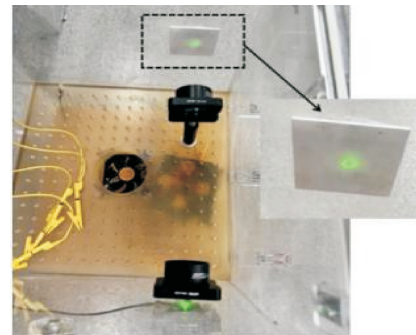
本文针对微型LED广角发光设计了双透镜方案,以改善烟雾环境中可见光信号的采集率。未加透镜时,如图5(a)所示,接收端光束发散严重,很难看见光斑信号;只使用单焦距40 mm的透镜时,如图5(b)所示,经过准直后光斑大(>5 mm²)且不够聚焦,其收集效率只有大约65%;使用双透镜时,第1个透镜距离发射器2 cm,把发散光准直成平行光,第2个透镜距离第1个透镜23 cm,如图5(c)所示,光束聚焦成<1 mm²的光斑,光斑准确落在探测器上,光收集效率提升至85%左右。双透镜可以大幅提高光束的利用效率,且双透镜经过调整后,在无延迟情况下校准光路可使光路衰减减小,示波器得到良好的波形显示。



(a) 未加透镜的接收端信号(光束发散)
 (a) Received signal without lens (beam divergence)



(b) 单透镜下接收端信号(聚焦不理想)
 (b) Received signal with a single lens (suboptimal focus)



(c) 双透镜下接收端信号(优化聚焦)
 (c) Received signal with dual lens (optimized focus)

图5 不同方案下的接收端信号

Figure 5 Received signal with different plan

3 实验结果分析与讨论

清晰无烟环境下的测试为微型 LED VLC 系统提供无干扰参考基准,信号采用 PRBS 调制,初值信号幅度为 2.5 V,传输距离为 40 cm。实验结果表明,最大传输速率为 25 Mbit/s;稳定性测试得到幅度波动量小于 5%,满足烟雾环境测试要求。由图 6 可知,传输速率从 10 增大到 25 Mbit/s 时,接收信号幅度比会从 3.2% 降到 1.8%,由高低电平信号分别为 10 和 25 Mbit/s 的眼图结果可知,眼图计算所得的信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)分别为 16.00 和 5.06 dB,说明高速传输主要受噪声的影响。由图 7 可知,眼图开眼情况保持良好,高速情况下虽然打开程度下降,但是依然可读,这主要归功于微型 LED 具有较高的响应速度(上升/下降时间少于 50 ns)。

烟雾环境下采用烟饼质量法控制烟雾浓度,接

收信号光功率使用 Thorlabs PM100A 光功率计进行测量,吸光度(optical density, OD)为无量纲的 OD,可通过接收光功率计算:

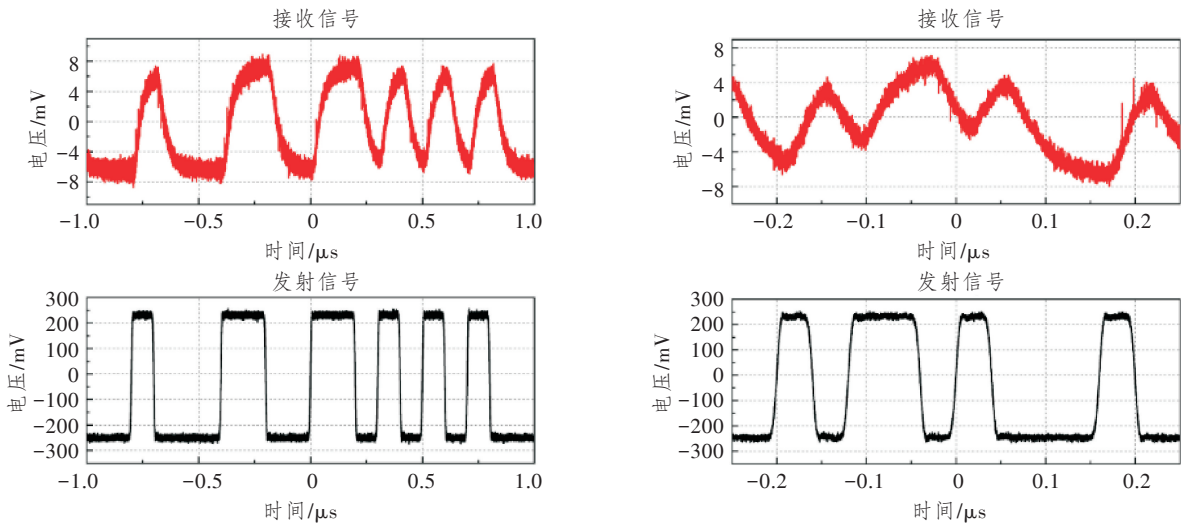
$$OD = -\ln(P_m/P_0), \quad (3)$$

式中: P_m 为不同质量差 m 的烟饼燃烧情况下,接收端的光功率; P_0 为无烟饼燃烧接收端的基准光功率。不同质量烟饼燃烧后的光功率 P_m 如图 8(a) 所示。

并且根据光功率衰减特性,遵循 Beer-Lambert 定律可得,设烟雾体积浓度为 $\rho = m/V$,单位为 g/cm^3 , V 为烟雾箱有效体积,单位为 cm^3 , $V = 36\ 000\ cm^3$; 则 OD 同时满足:

$$OD = \alpha \cdot d = \sigma \cdot \rho \cdot d = \sigma \cdot (m/V) \cdot d, \quad (4)$$

式中: σ 为烟饼材料的质量消光系数,单位为 cm^2/g ; m 为不同烟饼燃烧前后的质量差,单位为 g ; 衰减系数 $\alpha = OD/d$,单位为 cm^{-1} ; d 为光传输距离, $d = 40\ cm$ 。联立式(3)和式(4),根据本文实验测定值进

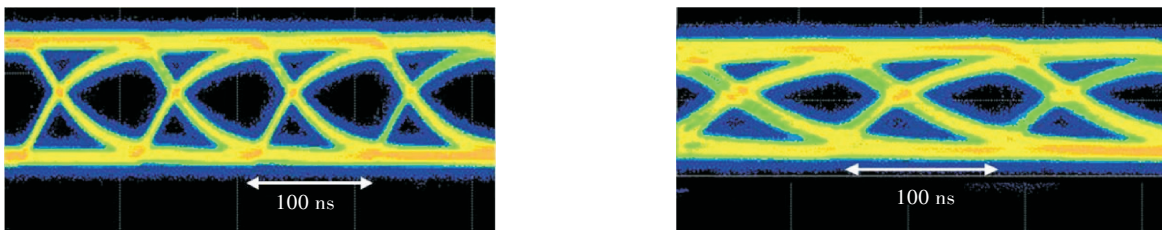


(a) 10 Mbit/s 速率的发射信号和接收信号波形
(a) Waveforms of transmitted and received signals at 10 Mbit/s

(b) 25 Mbit/s 速率的发射信号和接收信号波形
(b) Waveforms of transmitted and received signals at 25 Mbit/s

图 6 清晰无烟环境下不同传输速率下的发射信号和接收信号波形

Figure 6 Waveforms of transmitted and received signals at different speed in the clear and smoke-free environment

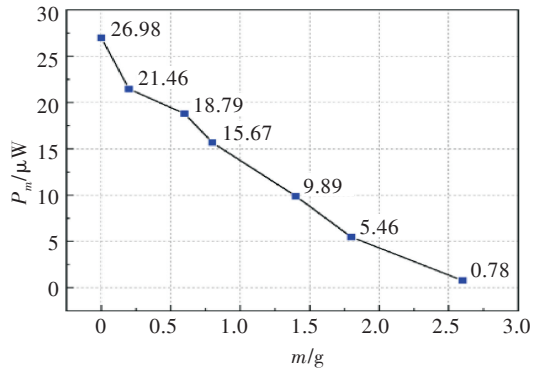


(a) 10 Mbit/s 速率的接收信号眼图
(a) Eye diagram of received signals at 10 Mbit/s

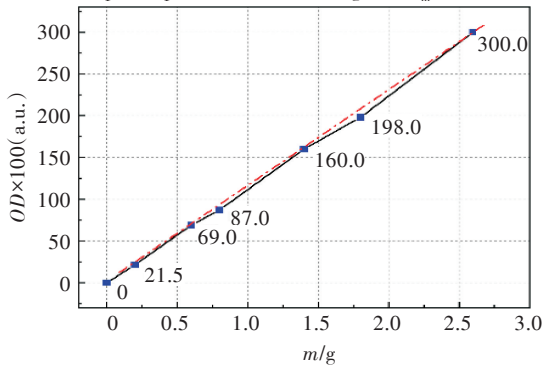
(b) 25 Mbit/s 速率的接收信号眼图
(b) Eye diagram of received signals at 25 Mbit/s

图 7 清晰无烟环境下不同传输速率下的接收信号眼图

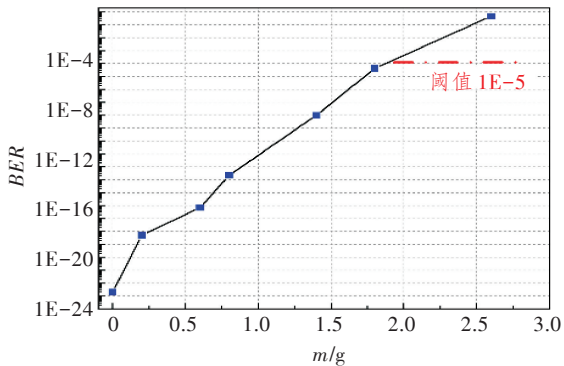
Figure 7 Eye diagrams of received signals at different speed in the clear and smoke-free environment



(a) m 对应的接收信号光功率 P_m
(a) Optical power of received signals P_m with m



(b) m 对应的 OD 及对应的理论拟合曲线 (红色点划线)
(b) OD with m and the corresponding theoretical fitting curve (red dotted line)



(c) BER with different mass differences of smoke cake m
注: BER 为误码率。

图 8 不同烟饼燃烧前后质量差 m 对应的关键参数
Figure 8 Key parameters with different mass differences of smoke cake m

行反演推算可得, $\sigma = 1\ 029.96\ \text{cm}^2/\text{g}$ 。通过测量 m 对应的光功率衰减, 建立 OD 与 m 的定量关系, 如图 8(b) 中的黑色点线图所示。同时, 由仿真分析和理论模型可得烟雾环境下的理论信道模型曲线, m 与 OD 符合线性规律下的光滑衰减曲线, 该理论拟合曲线为图 8(b) 中的红色点划线。图 8(b) 中的实际测量曲线和理论信道模型曲线之间的拟合决定系数 $R^2 = 0.9989$, 验证了模型的准确性和完整性。

为评估系统在不同烟雾浓度下的通信可靠性,

基于实验测量的接收光功率数据, 推演系统 BER 性能曲线, 如图 8(c) 所示。考虑到 VLC 系统中接收端噪声主要由散粒噪声 (与接收光功率相关) 和热噪声组成, 建立与接收光功率 P_m 相关的噪声模型

$$\sigma_n = k\sqrt{P_m}, \quad (5)$$

式中: σ_n 为接收端总噪声电压的标准差, 是式 (6) 中用于计算 SNR 的分母; 模型系数 k 根据实验系统中所用光电探测模块的噪声及跨阻增益等综合参数确定, 该参数的设定确保了在轻度烟雾工况下, 计算所得的低 BER 与实验观测到的清晰眼图相吻合。进而, 可得接收 SNR 为

$$\text{SNR} = (V_m/\sigma_n)^2, \quad (6)$$

式中, V_m 为根据接收光功率 P_m 设置的接收信号电压。可推算开关键控 (On-Off Keying, OOK) 调制的 BER 为

$$\text{BER} = 0.5 \times \text{erfc}(\sqrt{\text{SNR}/2}), \quad (7)$$

式中, erfc 为互补误差函数, 用于计算高斯白噪声下的 BER。

图 8(c) 所示为 BER 随烟饼燃烧质量差 m (代表烟雾浓度) 的变化曲线。图中红色虚线标示了通信系统的可靠性阈值 ($\text{BER} = 1 \times 10^{-5}$)。当 $m \leq 1.8\ \text{g}$ 时, 系统 BER 始终低于 1×10^{-5} 阈值。特别是在轻度烟雾 ($m = 1.4\ \text{g}$) 下, BER 低至 10^{-9} 量级, 表明系统在此范围内无需纠错编码就可实现可靠传输。当 $m > 2.0\ \text{g}$ 时, 随着烟雾浓度的增加, 光信号衰减加剧, BER 上升并突破阈值。在重度烟雾 ($m = 2.6\ \text{g}$) 下, BER 恶化至 10^{-2} 量级, 此时系统须引入纠错编码以维持通信可靠性。该分析与图 9 和图 10 的实验观测结果相吻合, 定量验证了系统在轻度至中度烟雾环境下的鲁棒性。

选取 1.4 (轻度和模拟火灾初期) 和 2.6 g (重度和发展期) 的烟饼为典型场景, 初始信号幅度为 2.5 V、传输速率为 25 Mbit/s, 开展 VLC 测试, 对应的信号传输情况如图 9 所示, 眼图保持情况如图 10 所示。轻度烟雾 (1.4 g) 中, 信号衰减率 70%, 接收信号幅度降至 30%, 波形轮廓完整、眼图开口度较大、通信性能稳定、信号未失真且散射/吸收影响较小, 适用于实时监测。重度烟雾 (2.6 g) 中, 衰减率为 85%, 幅度下降至与清晰环境相比 15%, 波形畸变加剧, 眼图开口度闭合较大但边界可辨认, 依然能满足基本通信要求。烟雾环境下接收信号幅度降低, 但是接收波形的轮廓能保持完整, 在轻度烟雾条件下, 信号边沿清晰锐利, 重度烟雾下会出现一定模糊, 但是

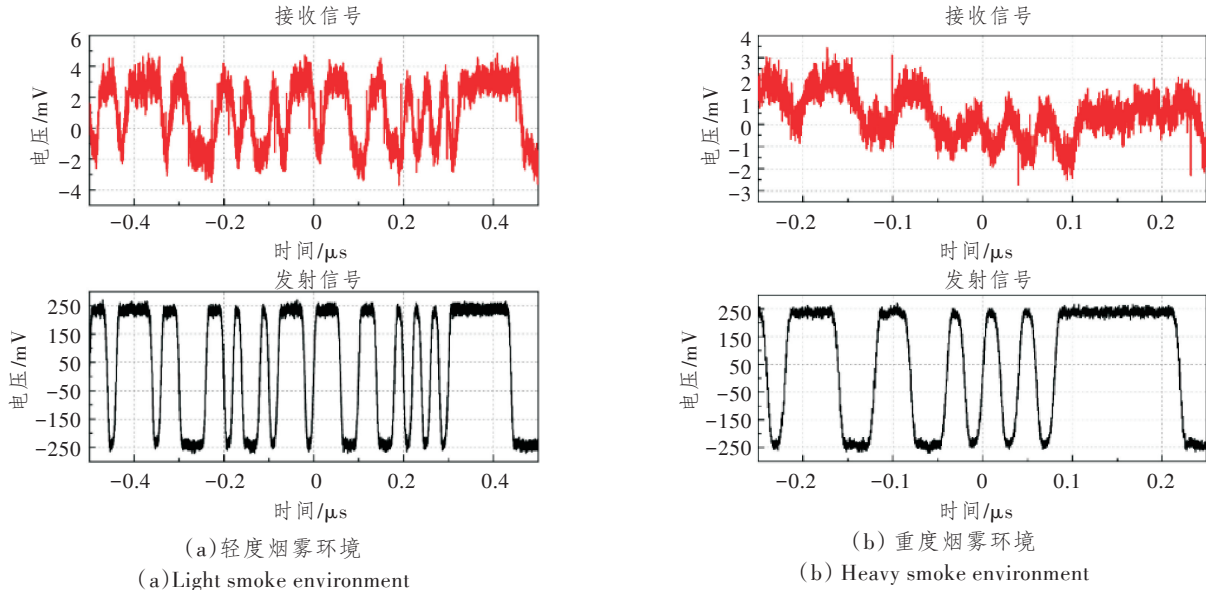


图 9 不同烟雾浓度的发射信号和接收信号波形

Figure 9 Waveforms of transmitted and received signals in different smoke environment

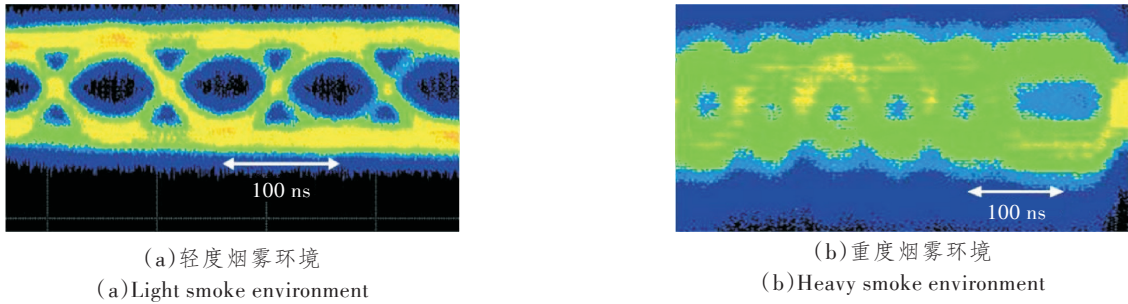


图 10 不同烟雾浓度的眼图

Figure 10 Eye diagrams of received signals in different smoke environment

边沿依旧可识别。虽然烟雾颗粒造成的米氏散射带来的相干干扰作用较强,但由于微型 LED 载流子复合起到抑制干扰叠加的作用,即使在重度烟雾下眼图开口度依然达到 25% 以上,可以保证准确识别,系统不需要纠错编码也可以得到可靠传输。

为全面评估本文研究的微型 LED 发射器在烟雾环境 VLC 下的技术优势,表 1 对比了不同光源在关键性能指标上的表现。其中,微型 LED 具有多项突出优势,如低功耗、宽发光角度和出色的抗干扰特性。虽然微型 LED 的传输距离(~ 10 m)在清晰环境下不如激光二极管,但在高干扰环境(如烟雾和粉尘)中,其广角发光和高抗干扰能力使其成为最适合的光源选择。本文利用微型 LED 的优势,通过 40 cm 传输距离的烟雾环境实验,展示了微型 LED 在高干扰环境下的可靠通信能力。在后续研究中,微型 LED 可采用高功率阵列化设计并配合

光学准直元件,提升发射光功率密度与方向性。同时,在接收端通过大孔径透镜或光电探测器阵列增加光收集面积,并结合低噪声前置放大电路提升灵敏度,补偿长距离传输的几何损耗。在该优化配置下,微型 LED 可实现 10 m 及以上的有效通信距离。

表 1 不同光源性能指标对比

Table 1 Comparison of performance indicators of different light sources

性能指标	氙灯	激光二极管	传统 LED	微型 LED
传输距离/m	50~100	100~300	5~15	~10
功耗/mW	50~2 000	300~1 000	50~200	10~50
发光角度/ $^{\circ}$	120	15	60	120~150
抗干扰特性	较低	一般	中等	较高
适用场景	户外应急	长距离通信	室内常规	高干扰环境

4 结束语

本文以消防救援和矿井监测等极端场景中烟雾对 VLC 造成的巨大影响为切入点,采用微型 LED 为发射器开展烟雾环境下的 VLC 研究。使用 In-GaN/GaN MQWs 微型 LED 发射器,构建了基于微型 LED 的烟雾环境 VLC 系统,实现了最大数据传输速率 25 Mbit/s,建立了适用烟雾环境 VLC 的 Beer-Lambert 信道模型。经烟雾环境测试表明,轻度烟雾(1.4 g 烟饼)下信号功率衰减到 70% 左右时,系统可以实现稳定通信,眼图开口度 $\geq 50\%$, SNR > 10 dB;重度烟雾(2.6 g 烟饼)条件下,信号功率衰减约 85% 时,眼图开口度依然有 25%,且可完成稳定数据传输。根据收到的信号电压实现烟雾浓度反演所得到的拟合决定系数达 0.95,实现了烟雾环境下 VLC 与环境感知一体的双重功能。本文提供了一种可靠的烟雾环境下 VLC 的新技术路线,可用于消防救援、矿井监测和化工安全等应急场景,未来工作计划从器件优化角度提高微型 LED 的 3 dB 带宽到 GHz 量级,并且长期开展矿井/隧道等真实场景应用测试,为进一步完善构建 6G 极端环境通信网络奠定了基础。

参考文献:

- [1] 未来移动通信论坛,紫金山实验室. ICDT融合的6G网络4.0白皮书[R/OL]. (2024-04-30)[2025-12-25]. <http://www.fxbaogao.com/detail/4286943>. Future Mobile Communication Forum, Purple Mountain Laboratories. White Paper on ICDT - Converged 6G Network 4.0[R/OL]. (2024-04-30)[2025-12-25]. <http://www.fxbaogao.com/detail/4286943>.
- [2] 朱一鸣,林显浩,迟楠,等. 面向5G/6G移动前传网络的关键技术[J]. 光通信研究, 2025(3): 240078. Zhu Y M, Lin X H, Chi N, et al. Key Technologies for 5G/6G Mobile Fronthaul Network[J]. Study on Optical Communications, 2025(3): 240078.
- [3] 闫红强,江明. 跨水面VLC链路对准与信号检测技术研究[J]. 光通信研究, 2025(4): 250001. Yan H Q, Jiang M. Research on Link Alignment and Signal Detection Technologies for Cross-Water Visible Light Communication[J]. Study on Optical Communications, 2025(4): 250001.
- [4] Meng J, Guo Z, Zhang Y, et al. Analysis of Electromagnetic Wave Ignition Mechanism and Calculation of Power Threshold in Underground Coal Mine[J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2024, 38(2): 234-249.
- [5] 孟积渐. 井下MIMO天线电磁环境建模与防爆分析[J]. 煤矿安全, 2025, 56(9): 250-256. Meng J J. Electromagnetic Environment Modeling and Explosion-Proof Analysis for Underground MIMO Antennas[J]. Safety in Coal Mines, 2025, 56(9): 250-256.
- [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): 1306003. Chi N, Xu Z Y, Shi J Y, et al. 6G Oriented Visible Light Communication: Key Technologies and Perspectives(Invited)[J]. Acta Optica Sinica, 2025, 45(13): 1306003.
- [7] 王国庆,闵锐,李兴泉,等. 双通道加密自由空间光通信系统[J]. 光电工程, 2024, 51(9): 240106. Wang G Q, Min R, Li X Q, et al. Dual Channel Encrypted Free-Space Optical Communication System[J]. Opto-Electronic Engineering, 2024, 51(9): 240106.
- [8] 贾科军,南钰桐,杨博然,等. 可见光通信预编码O-OFDM自适应符号分解技术研究[J]. 光通信研究, 2024(4): 230017. Jia K J, Nan Y T, Yang B R, et al. Research on Adaptive Symbol Decomposition Technology of Precoding O-OFDM in Visible Light Communication[J]. Study on Optical Communications, 2024(4): 230017.
- [9] 陈习锋,丁举鹏,张心云,等. 基于无线光通信智慧矿井研究现状[J]. 光通信研究, 2020(6): 70-76. Chen X F, Ding J P, Zhang X Y, et al. Research Status of Intelligent Mine based on Wireless Optical Communications[J]. Study on Optical Communications, 2020(6): 70-76.
- [10] 朱佳伟,漆宝梁,王行健,等. 面向水下可见光通信的新型硫化锑探测器研究[J]. 光通信研究, 2023(4): 73-78. Zhu J W, Qi B L, Wang X J, et al. Research on Novel Antimony Sulfide Detectors for Underwater Visible Light Communication[J]. Study on Optical Communications, 2023(4): 73-78.
- [11] Xie R, Li Z, Gu E, et al. Signal Attenuation of Visible Light Communication in Smoke Environment[J]. Optical Engineering, 2019, 58(11): 114102.
- [12] Liu X, Zhao G, Xu Z, et al. Channel Analysis and Performance Enhancement for VLC under Smoke Conditions[C]//2024 2nd International Conference on Signal Processing and Intelligent Computing (SPIC). Guangzhou, China:IEEE, 2024: 10691440.
- [13] 严梓峻,刘众,杨晓,等. 钙钛矿量子点色转换Micro-

- LEDs: 稳定性与图案化研究进展[J]. 光电工程, 2024, 51(7): 240088.
- Yan Z J, Liu Z, Yang X, et al. Perovskite Quantum Dot Color Conversion Micro-LEDs: Progress in Stability and Patterning [J]. Opto - Electronic Engineering, 2024, 51(7): 240088.
- [14] Anon. 跨越“黄绿鸿沟”: 三维量子阱V形PN结构助力 GaN基LED实现高速波分复用可见光通信[J]. 光电工程, 2024, 51(4): 241004.
- Anon. Bridging the “Yellow-Green Gap” -GaN-based LED Achieves High Rate Wavelength Division Multiplexing Visible Light Communication System with Three-Dimensional Quantum Well Structure[J]. Opto-Electronic Engineering, 2024, 51(4): 241004.
- [15] 施政, 谢天龙, 谢明远, 等. 基于 μ -LED圆形阵列的双功能可见光通信芯片[J]. 光学学报, 2025, 45(17): 1720025.
- Shi Z, Xie T L, Xie M Y, et al. Dual-Function Visible Light Communication Chip based on μ -LED Circular Array [J]. Acta Optica Sinica, 2025, 45 (17) : 1720025.
- [16] 张俊, 张为国. Micro-LED蓝宝石衬底AlN上GaN激光剥离研究[J]. 激光技术, 2023, 47(1): 25-31.
- Zhang J, Zhang W G. Micro-LED Laser Lift-Off Research of GaN on AlN of Sapphire Substrate[J]. Laser Technology, 2023, 47(1): 25-31.
- [17] James S K, Huang Y M, Ahmed T, et al. Micro-LED as a Promising Candidate for High-Speed Visible Light Communication[J]. Applied Sciences, 2020, 10(20): 7384.
- [18] Absen. Analysis of the Mini/Micro LED Displays Power Consumption [EB/OL]. (2024-03-16)[2025-12-25]. <https://www.absen.com/analysis-of-the-mini-micro-led-displays-power-consumption/>.
- [19] 李宗艳, 雷小茜, 高寒, 等. 可见光通信中多级PLD-PC与迭代译码设计[J]. 光通信研究, 2025(2): 240054.
- Li Z Y, Lei X Q, Gao H, et al. Design of Multilevel PLDPC and Iterative Decoding in Visible Light Communications [J]. Study on Optical Communications, 2025(2): 240054.
- [20] 贺锋涛, 王乐莹, 王晓波, 等. 基于改进的AdaBoost无线光通信信号检测算法[J]. 激光技术, 2023, 47(5): 659-665.
- He F T, Wang L Y, Wang X B, et al. Signal Detection Algorithm of Wireless Optical Communication based on the Improved AdaBoost[J]. Laser Technology, 2023, 47(5): 659-665.
- [21] Lu T, Lin X, Guo W, et al. High-Speed Visible Light Communication based on Micro-LED: a Technology with Wide Applications in Next Generation Communication [J]. Opto - Electronic Science, 2022, 1 (12) : 220020.