

# 矿井下可见光模拟音频通信系统设计与实现

魏同成, 张迎翔, 蒋宗宏, 丁浩圆, 高浩冉, 杜勇\*

(新疆师范大学 物理与电子工程学院 新疆发光矿物与光功能材料研究重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830054)

**摘要:**目前,采矿业仍是危险的行业之一,传统无线电通信设备功率的提高使煤矿易发生粉尘爆炸事故,而可见光通信技术具有带宽高、无须频谱许可和高安全性等优点,在矿井、医院等敏感环境中具有较好的应用前景。文章利用 Altium Designer 软件设计了一款矿井下可见光模拟音频通信系统,该系统具有抗干扰能力强、结构简单、通信距离远等优点。测试结果表明该系统在有光环境下通信距离可达 11 m,无光环境下通信距离可达 17.8 m。

**关键词:**可见光通信;信道模型;光照度;信号处理

**中图分类号:**TN941.3

**文献标识码:**A

**文章编号:**1008-9659(2026)03-0076-07

室内照明正在经历深刻变革,一个世纪以来,白炽灯一直广泛应用于照明领域,但由于其发光效率较低,正逐渐被淘汰。20世纪90年代推出的紧凑型荧光灯在过去很受欢迎,因为该荧光粉提供了更高的能效<sup>[1-3]</sup>。目前,发光二极管(Light Emitting Diode, LED)在固态照明方面实现了更高效的电光转换和寿命,其发光效率可达 250 lm/W,LED 部署的快速增长及 PN 结(Positive-Negative junction)足够高的切换速度等优点使其可用于照明和通信。随着无线应用快速发展,传统的无线电频谱资源出现短缺,同时,无线电通信在煤矿、飞机和医院手术室等敏感场所存在电磁干扰<sup>[4-5]</sup>。可见光通信(Visible Light Communication, VLC)在 430~790 THz 频段运行,与射频信号相比,可见光通信具有高带宽和无须频谱许可等优点,将可见光通信技术应用于矿井下可解决因无线电设备功率增加而引发的煤矿粉尘爆炸等问题<sup>[6]</sup>。

王聪等人<sup>[7]</sup>利用蓝色发光二极管(Light Emitting Diode, LED)在水下实现模拟语音通信功能。该实验结果表明,发射端通过 3 颗 2N222A 三极管将电信号加载至蓝色 LED 芯片,经过 150 cm 水下光学信道传输,接收端将光信号转换成电信号进行放大后得到音频信号,加装聚光杯后,有效提升了通信信号的信噪比。杨海军等人<sup>[8]</sup>为了解决楼道、地下矿井、隧道、机场对电磁信号敏感等问题,设计了兼顾照明、通信和定位的电力线载波通信和可见光通信双向语音通信系统。经过实验室与隧道现场实测,传输干线峰值速率为 2 Mb/s,灯上速率达 250 kb/s,便携式智能终端接入时间小于 1 s,同时支持 5 个移动终端协同作业,系统达到项目预期。刘杰徽等人<sup>[9]</sup>针对射频信号在水中衰减严重,提出一种短距离光路介质的衰减系数测试方法。实验结果表明,在接收端采用 S6968 的 PIN 探测器,发送功率为 1 W 的情况下,系统能够在水下进行全双工通信,通信距离超过 5 m。目前,可见光通信系统仍存在以下问题:一是可见光语音通信系统主要应用于室内和水下等场所,针对矿井下的可见光通信研究较少;二是基于可见光语音通信电路仍存在结构复杂、成本较高、通信距离不足等缺陷。针对上述问题,文章设计了一款矿井下可见光模拟音频通信系统,该系统具有照明和语音通信的双重功能。测试结果表明,该系统在有光环境下最远通信距离可达 11 m,无光环境下最远通信

[收稿日期]2025-07-28

[修回日期]2025-09-24

[基金项目]新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2024D01B60);国家大学生创新创业训练计划项目(202410762006);省级大学生创新创业训练计划项目(S202410762025;S202410762026;S202510762001)。

[作者简介]魏同成(1995-),男,讲师,主要从事光通信方面研究,E-mail:107622022010021@xjnu.edu.cn。

\*[通讯作者]杜勇(1974-),男,副教授,主要从事光通信方面研究,E-mail:410916654@qq.com。

距离为 17 m,系统电路具有设计简单、通信距离远和稳定性高等优点。

## 1 矿井可见光通信系统信道模型

矿井下可见光模拟音频通信系统如图 1 所示。首先通过数字信号处理器将电信号编码并调制,然后将调制的电信号加载至驱动电路,产生光信号,光信号在传输过程中受到噪声的影响而失真,最后接收端二极管将光信号转换为电信号,进行滤波和功率放大后驱动喇叭输出<sup>[10]</sup>。

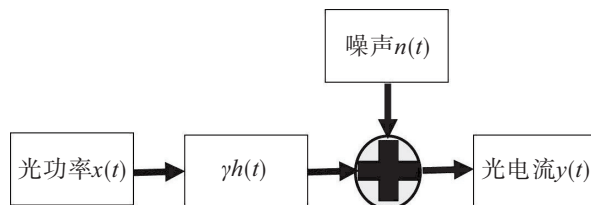


图 1 矿井可见光通信模型

在可见光通信系统中,信号传输的质量通常受散粒噪声影响,例如强烈的环境光照射到光电二极管上会导致散粒噪声,当环境光较少或没有环境光时,主要噪声来源是接收探测器前置的放大器噪声,通常为高斯白噪声,其信道模型数学表达式如下所示<sup>[11-12]</sup>

$$y(t) = \gamma x(t) \otimes h(t) + n(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \gamma x(\tau) h(t - \tau) d\tau + n(t) \quad (1)$$

其中, $\gamma$ 为接收端光电探测器响应效率(单位 A/W), $h(t)$ 为室内信道单位脉冲响应, $n(t)$ 为高斯信号白噪声, $\otimes$ 为卷积运算, $x(t)$ 为发射端信号, $y(t)$ 为输出端信号。

由于直射信号占据整个能量的大部分,视距链路(Line-Of-Sight, LOS)传输的光占据能量的大部分,非视距链路(NON-Line-Of-Sight, NLOS)传输占据整个发射光的小部分,整个系统的脉冲响应如下

$$h_E = \frac{(m+1)A_r g_a}{2\pi d^2} \cos^m(\phi) \cos(\psi) \text{rect}(\psi/\psi_{\text{FOV}}) \delta(t - \frac{d}{c}) \quad (2)$$

其中, $d$ 为 LED 到接收探测器之间的距离, $A_r$ 为探测器的面积, $g_a$ 为光电二极管前端的聚光器增益系数, $m$ 为朗伯辐射指数, $\phi$ 为 LED 的辐射角, $\psi$ 为光线入射角, $c$ 为光速, $\psi_{\text{FOV}}$ 为接收机视场角, $\delta$ 为狄拉克信号, $\text{rect}$ 为单位矩形函数。

$$\text{rect}(t) = \begin{cases} 1 & |t| \leq \frac{1}{2} \\ 0 & |t| > \frac{1}{2} \end{cases} \quad (3)$$

其中, $t$ 为时间,类比室内可见光通信系统光照度分布模型,矿井下不同 LED 照射到接收端平面的光电二极管,其光照度如下所示<sup>[13-14]</sup>

$$E_{\text{LOS}} = \sum_{i=1}^N \frac{I(0) \cos^m(\phi_i) \cos \theta_i}{r_i^2} \quad (4)$$

其中, $i$ 为 LED 的个数, $N$ 为 LED 的总个数, $\phi_i$ 为第  $i$  个 LED 发射信号的辐射角度, $m$ 为朗伯辐射指数, $\theta_i$ 为第  $i$  个 LED 到探测器的入射角, $r_i$ 为第  $i$  个 LED 到光电二极管的距离。

对反射平面进行微元分割,LED 作用于分割的微元上,每个微元将光信号进行一次反射,其照度分布表达式如式(5)所示

$$dE_{\text{NLOS}} = \sum_{i=1}^N \frac{(m+1)\rho}{2\pi^2 d_i^2 d_2^2} \cos^m(\phi_i) \cos(\theta_i) \cos(\beta) \cos(\psi) dA_{\text{wall}} \quad (5)$$

其中, $d_1$ 、 $d_2$ 为 LED 到反射墙面的距离和从墙壁到接收端的距离, $N$ 为所有反射路径的总数, $\phi$ 为 LED 的出射角, $\theta_i$ 为入射到墙面的夹角, $\phi_i$ 为反射光线离开墙面的夹角, $\psi$ 为最后光线到探测器的入射角, $\rho$ 为墙面的反射系数。将 NLOS 和 LOS 光照度分布求和即为接收平面光照度的总和,其表达式如式(6)所示

$$E = \sum_{i=1}^N (E_{\text{LOS}} + \int_{\text{wall}} dE_{\text{NLOS}}) \quad (6)$$

其中,  $E_{\text{LOS}}$  为视距链路光照度,  $E_{\text{NLOS}}$  为非视距链路光照度。假设空间大小为  $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 3\text{ m}$ , 多个LED组合成矩阵形式, 用于解决单个LED部署后光照强度不符合国际照明标准的问题。探测器高度取值为  $0.85\text{ m}$ , 墙壁反射率为  $0.568$ , 四组LED灯具等间隔分布在房顶。该系统的具体仿真参数如表1所示。

表1 矿井可见光通信系统仿真参数

名称	取值范围	名称	取值范围
探测器高度	0.85 m	每个阵列LED数目	$11 \times 11$
煤矿墙壁反射率	0.568	每个LED间距	2 cm
LED工作电压	2.8~3.6 V	探测器视场角	$70^\circ$
LED工作电流	100 mA~1000 mA	探测器接收面积	$1\text{ cm}^2$
LED发射功率	3 W	聚光器折射率	1.5
LED功率半角	$60^\circ$	煤矿反射元大小	$0.1\text{ m} \times 0.1\text{ m}$
LED中心光强	25.2 cd	LED色温	5600 K

根据上述参数, 利用MATLAB软件对矿井信道的反射面和水平接收面进行微元划分, 将反射微元面积设置为  $0.1\text{ m} \times 0.1\text{ m}$ , 反射墙面为  $3\text{ m} \times 5\text{ m}$ , 因此反射墙面可划分出1500个微元, 在算法中通过多次for循环嵌套计算每个微元的光照度分布, 最后通过累加计算每个水平接收面的光照度分布(图2)。

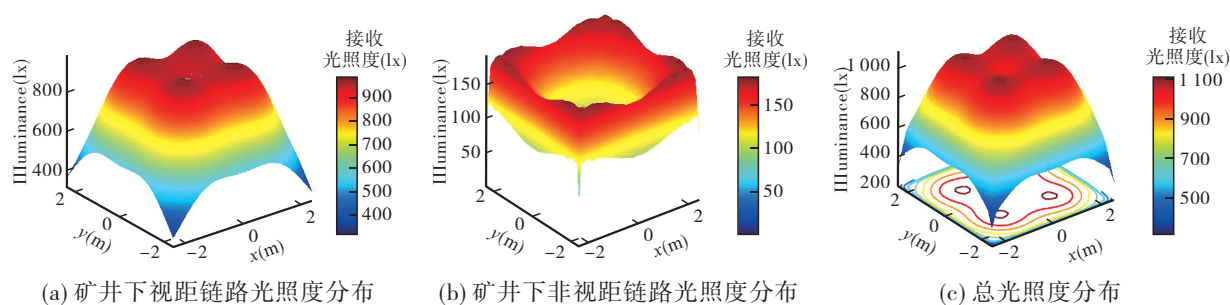


图2 各水平接收面的光照度分布

LOS照度分布如图2(a)所示, LOS链路光照度的最大值分布于房间的中央, 最大值为  $989.4\text{ lx}$ 、最小值为  $316.7\text{ lx}$ 、平均值为  $754.2\text{ lx}$ , 普通办公室标准为  $300\text{ lx}$ , 上述测试结果表明该LED布局满足室内照明要求。NLOS照度如图2(b)所示, NLOS链路光照度最大值分布于房间墙壁, 房间中央的反射照度较低, 最大值为  $136.7\text{ lx}$ 、最小值为  $0.4\text{ lx}$ 、平均值为  $95\text{ lx}$ 。总照度分布如图2(c), 整体分布与LOS分布相似, 最大值为  $1072.9\text{ lx}$ 、最小值为  $0.4\text{ lx}$ 、平均值为  $849.3\text{ lx}$ , 考虑一次反射的能量, 整体照度均值增加了  $95\text{ lx}$ 。

## 2 系统设计方案

可见光模拟音频通信系统共有三个部分, 分别为LED发射端、矿井信道和接收端。系统总体设计方案如图3所示。首先, 系统信源数据从个人计算机(Personal Computer, PC)经由MP3音频信号传输线加载到信号调理电路模块; 其次, 信号调理电路提供稳定的  $2.5\text{ V}$  直流电压, 将音频信号加载到  $2.5\text{ V}$  的直流电压上进行调制; 最后, 音频信号通过三极管放大电路驱动LED发光。

在接收端部分, 首先, 光电二极管将光信号转化为电信号; 其次, 通过放大滤波模块对接收电信号进行处理; 最后, 将恢复的音频信号通过音频功率放大器XPT8871芯片驱动喇叭进行发声。

## 3 系统硬件设计

可见光模拟音频通信系统的发射端如图4所示。发射端的电源模块将  $220\text{ V}$  市电转化为  $5\text{ V}$  的直流电,  $5\text{ V}$  直流信号作为发射端LED灯电源, 本系统的LM358P运算放大器需要双电源供电, 该电源由

E0512S-1WR3电源模块产生。发射端的信号可以由电脑、手机、MP3等设备产生,信号经过直流偏置电路产生的2.5 V直流信号抬高音频信号,将音频信号和2.5 V直流电加载至KSD882YS(NPN)三极管来驱动LED发光。由于直流电的存在,当没有音频信号时,LED也会发光,可以满足没有语音通信时的照明功能,通信系统的频率由发射端LED灯的闪烁决定,从而实现电信号到光信号的转变,该频率超过人眼极限速率,因此可避免频闪影响。

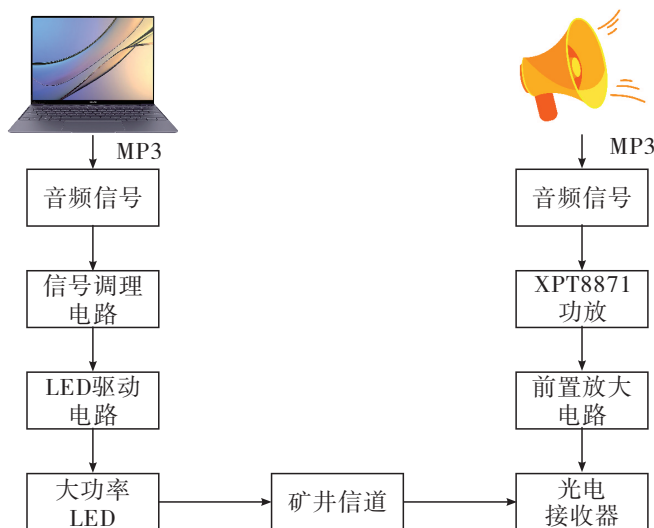


图3 可见光模拟音频通信系统框图

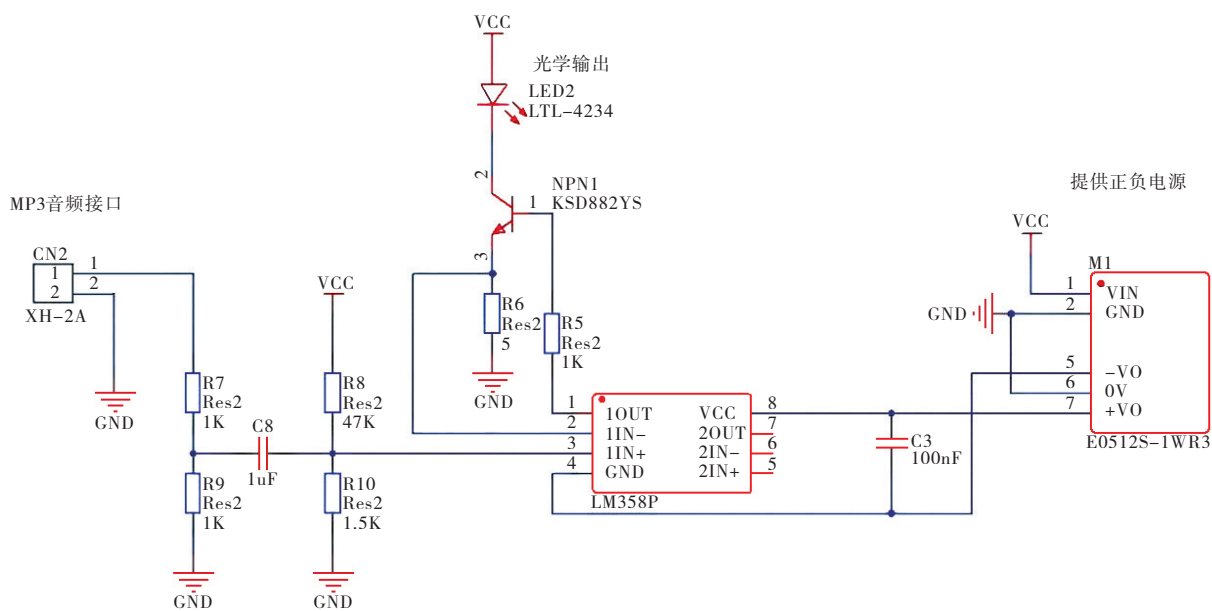


图4 可见光模拟音频通信系统发射端原理图

可见光模拟音频通信系统的接收端电路如图5所示。首先,接收端通过红外光电接收管SDP8406将光信号转换为电信号,该晶体管在以下条件可以工作: $-40\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、最小光电流为12 mA、角响应度为 $20^{\circ}$ ,可有效接收LED发射的20 Hz~20 kHz音频信号。其次,电信号通过LM358运算放大器进行放大,通过滑动变阻器W1可以调节放大倍数,根据通信距离的不同需要设置不同的放大倍数,使得接收信号维持在较好的电压范围内。随后通过滤波器滤除干扰信号,将信号和噪声分离提高系统的抗干扰能力,最后将放大的信号通过XPT8871音频功率放大器驱动喇叭发声。

#### 4 系统测试

为验证矿井可见光模拟音频通信系统通信性能,发射端LED光源采用欧司朗P60601,其功率为5 W、电

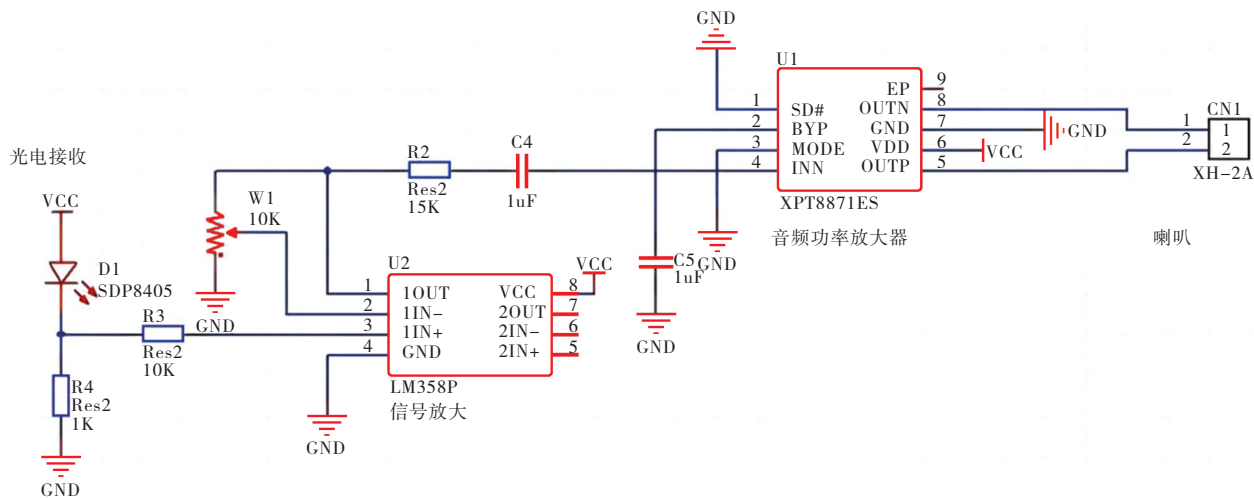
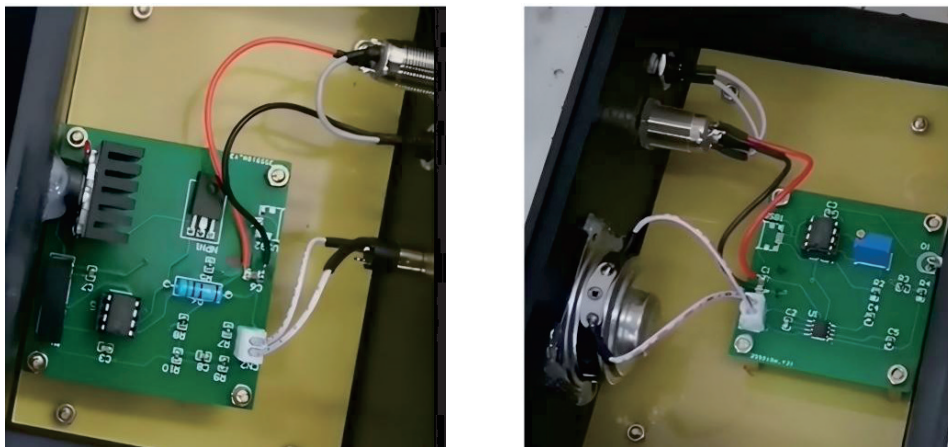


图5 可见光模拟音频通信系统接收端原理图

压为 3.7 V、电流为 1.35 A,同时采用口径为 9.45 cm、深度为 65 mm 的聚光杯,该光杯具有深度深、射程更远和聚光特性好等优点。接收端采用霍尼韦尔公司生产的白色红外接收管 SDP8406-001,该光电接收管接收波长为 935 nm、接收角度为 50°、功耗为 100 mW,实验装置如图 6 所示。



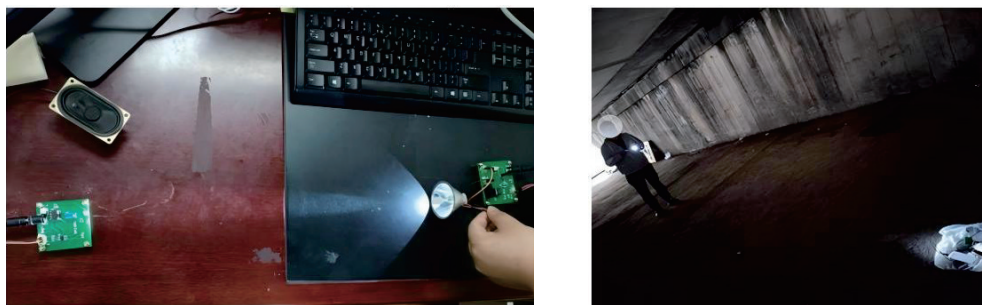
(a) 发射端实物图

(b) 接收端实物图

图6 实验装置图

测试时发射端设置为最大音量(100%),通过实验发现,随着通信距离的增加,接收端音量逐渐降低并出现微弱杂音。通过示波器观察接收端音频信号,接收端音频信号基本完整,在远距离通信中引入了部分噪声,噪声主要来源于信号传输过程中环境光干扰。

为了探究该系统的性能,发射端利用电脑 USB 口进行供电,音频信号来源于电脑端(MP3 接口),声音测试采用麦克斯公司生产的 K-656A 数字噪音计,系统测试如图 7 所示,主要测试结果如表 2 所示。



(a) 室内测试实物图

(b) 室外测试实物图

图7 系统测试实物图

表2 可见光语音通信系统测试结果

距离(m)	无光环境(dBA)	有光环境(dBA)
0.8	114.9	115.4
1.6	106.3	107.5
2.4	96.5	103.0
3.2	94.2	94.9
4.0	86.7	92.0
4.8	83.7	91.7
5.6	82.5	85.7
6.4	79.2	82.7
7.2	73.5	78.8
8.0	70.1	72.8
8.8	68.9	71.0
9.6	65.7	70.4
11.2	61.5	68.5
17.8	50.2	/

由表2可知,该系统在2~3.6 m时,声音信号较强,信噪比高,声音清晰响亮。在白天,通信距离超过11.2 m,接收端会出现失真现象。产生此现象主要有两方面的原因:一是随着通信距离的增加,音频信号变弱,接收端放大倍数有限,接收端信噪比较低;二是由于其他环境光的干扰使得信号和噪声叠加到接收端,该系统无法对环境光噪声进行有效抑制。该系统在无光环境下最远通信距离可达17.8 m,有光环境下可达11.2 m,基本可满足矿井可见光语音通信系统的设计需求。

## 5 结论

文章分析了矿井可见光信道模型,考虑一次反射后光照度平均增加95 lx,证明其影响不可忽略。基于Altium Designer电路设计软件调试矿井可见光语音通信系统,分别在有光和无光环境下测试通信系统性能,该系统在无光环境下最远距离为17.8 m,响度为50.2 dBA,有光环境下为11.2 m,响度为68.5 dBA。经实际测试,该通信系统具有抗干扰能力强、结构简单、通信距离远等优点,可用于解决矿井下无线电设备功率过大而引起粉尘和瓦斯爆炸等问题,具有一定的工程应用价值。

## 参考文献:

- [1] 马仲甜,张隆康,刘付刚,等.基于射线追踪法的矿井可见光通信信道特性分析[J].通信技术,2024,57(08):769-774.
- [2] LIN X,ZHANG L. Intelligent and Practical Deep Learning Aided Positioning Design for Visible Light Communication Receiver[J]. IEEE Communications Letters, 2020, 24(03):577-580.
- [3] MA S,YANG R X,DU C, et al. Robust Power Allocation for Integrated Visible Light Positioning and Communication Networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2023, 71:4164-4777.
- [4] LI Z,SHI T,SHAN B, et al. Color-shift Keying Code Design in Visible Light Communications Using Finite-state Machines[J]. IEEE Communications Letters, 2022, 26(06):1333-1337.
- [5] 叶欢.新疆准东红沙泉1号露天煤矿铁路专用线接轨方案研究[J].工程建设与设计,2023,497(03):119-121.
- [6] 孙东玲,梁运培,黄旭超,等.新疆大倾角多煤组煤矿区煤层气开发利用进展与前景[J].煤炭科学技术,2023,51(03):1-11.
- [7] 王聪,黄媛婕,苗鹏,等.水下蓝光LED可见光语音通信系统设计[J].湖北理工学院学报,2018,34(04):10-14.
- [8] 杨海军,阳辉,宋健.电力线可见光双向语音通信系统工程应用[J].实验技术与管理,2021,38(11):1-4.
- [9] 刘杰徽,何英,胡锋,等.基于PIN的水下可见光双向语音通信试验研究[J].光通信研究,2022,(03):65-71.
- [10] 繆成波,于萌,卢刚,等.干旱区露天煤矿降尘重金属分布特征及来源分析[J].江苏农业科学,2020,48(22):295-300.
- [11] 张心怡,马国阳,竹心雨,等.基于可见光通信的井下巡检机器人研究[J].电子元件与信息技术,2024,8(09):191-194.

- [12] FORTES M, GONZÁLEZ O. Testbed for Experimental Characterization of Indoor Visible Light Communication Channels [J]. *Electronics*, 2021, 10(11):90–100.
- [13] KACHAVE D, SENGUPTA A. Fault-tolerant DSP Core Datapath against Omnidirectional Spatial Impact of SET [J]. *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2020, 43(02):102–107.
- [14] LEE K, PARK H, BARRY J R, et al. Indoor Channel Characteristics for Visible Light Communications [J]. *IEEE Communications Letters*, 2011, 15(02):217–219.

## Design and Implementation of Visible Light Analog Audio Communication System in Mine

WEI Tong-cheng, ZHANG Ying-xiang, JIANG Zong-hong, DING Hao-yuan, GAO Hao-ran, DU Yong\*  
(Xinjiang Key Laboratory for Luminous Minerals and Optical Functional Materials, School of Physics and Electronic Engineering, Xinjiang Normal University, Urumqi, Xinjiang, 830054, China)

**Abstract:** Currently, mining industry remains one of the more hazardous sectors. Traditional wireless radio communication equipment, with increased power, is prone to causing coal mine dust explosions. Visible light communication technology, has the advantages such as high bandwidth, no need for spectrum licensing, and high safety, making it promising for applications in sensitive environments like mines and hospitals. This paper utilizes Altium Designer software to design a visible light analog audio communication system for use underground in mines. This system possesses advantages such as strong anti-interference capability, simple structure, and long communication distance. Test results indicate that the system can achieve a communication distance of up to 11 meters in a lighted environment and up to 17.8 meters in a non-lighted environment.

**Keywords:** Visible light communication; Channel model; Illuminance; Signal processing

---

(上接第 75 页)

## Quantum Generative Adversarial Networks for Human Activity Recognition : Data Augmentation and Classification Optimization

LI Wen-hui, RUAN Yue, XUE Xi-ling

(School of Computer Science and Technology, Anhui University of Technology, Ma'anshan, Anhui, 243002, China)

**Abstract:** To address the problem of classifier performance degradation caused by data imbalance in human activity recognition, traditional methods such as oversampling and cost-sensitive learning can alleviate the class bias, but they have drawbacks such as overfitting, information loss, and poor adaptability to extreme imbalance scenarios. This paper combines quantum computing and generative adversarial networks to design a joint optimization framework. Its generator uses a Variational Quantum Circuit (VQC), which implements implicit modeling of high-dimensional sensor data through parameterized quantum gate stacking with low parameter quantity; The discriminator uses a classical neural network and introduces the Quantum Wasserstein Generative Adversarial Network-Gradient Penalty (WGAN-GP) to constrain the discriminator, in order to enhance the diversity of generated samples and the stability of training. Experimental results based on the CASAS household activity recognition dataset show that the quantum hybrid generator only requires about 13% of the parameters of the classical model to achieve better generation effects. The improved quantum generative adversarial network not only improves the convergence speed but also enhances the accuracy of the final results.

**Keywords:** Quantum generator; Classical discriminator; Variational Quantum Circuit; WGAN-GP