

## 日盲紫外 LED 实时视频传输系统设计

杨 宇,陈晓红,尤 波,韦 玮\*

(南京邮电大学 电子与光学工程学院,江苏 南京 210023)

**摘 要:** 针对当前紫外光通信中气体灯与激光光源调制速率慢、体积较大,光电倍增管工作电压过高等问题,提出了一种基于现场可编程门阵列技术的日盲紫外 LED 实时视频传输系统,其发射光源采用波长为 265 nm 的单紫外 LED,探测器采用紫外 PIN;通过电路和逻辑模块设计搭建了视频传输系统,研究了系统的光功率密度与通信距离之间的关系;基于二进制开关键控调制方式,实现日盲紫外 LED 实时视频传输系统最大传输速率为 2.88 Mbit/s,当通信距离为 4 m 时,传输速率达到 1.92 Mbit/s。

**关键词:** 日盲紫外光通信; 紫外 LED; 紫外 PIN; 视频传输; FPGA

**中图分类号:** TN23 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1022001

## Design of solar blind ultraviolet LED real-time video transmission system

Yang Yu, Chen Xiaohong, You Bo, Wei Wei\*

(College of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** Considering the slow modulation rate and large volume of the gas lamp and the laser, and the high working voltage of the photomultiplier tube (PMT) in UV communication, a solar blind ultraviolet LED real-time video transmission system based on Field Programmable Gate Array(FPGA) was proposed, which utilized single UV LED with wavelength of 265 nm at the transmitter and an UV PIN at the receiver. The video transmission system was established by designing the circuit and logic module. The relationship between the optical power density and the communication distance of the communication system was investigated. The experimental results show that the maximum transmission rate is 2.88 Mbit/s, when the communication distance is 4 m, the transmission rate can be up to 1.92 Mbit/s based on the mode of On-Off Keying (OOK) modulation for the system.

**Key words:** solar blind ultraviolet communication; UV LED; UV PIN; video transmission; FPGA

收稿日期:2018-05-10; 修订日期:2018-06-20

基金项目:国家自然科学基金(61601237);江苏省自然科学基金(BK20160901)

作者简介:杨宇(1992-),男,硕士生,主要从事紫外光通信技术方面的研究。Email: jingtingyu@163.com

导师简介:韦玮(1960-),女,教授,博士生导师,博士,主要从事光电信息功能材料与器件、紫外光通信发射源等方面的研究。

Email: weiwei@njupt.edu.cn

## 0 引言

日盲紫外光通信是指利用 200~280 nm 波段的紫外光作为传播信息载体的一种通信方式。由于大气中臭氧层对日盲紫外光的强烈吸收作用,使得利用日盲紫外光进行通信时,环境背景噪声几乎为零。此外,大气中微粒及气体分子对日盲紫外光强烈的散射作用,导致其在大气传输过程中呈指数衰减<sup>[1]</sup>,第三方设备无法对其进行干扰和侦测,因此在通信中具有有良好的保密性。另外,日盲紫外光通信还具有全天候、全方位、不占用射频频带资源等优点,在国防及军事领域具有广阔的应用前景<sup>[2-3]</sup>。

当前,国内外许多研究小组已对紫外光通信系统做了大量的研究工作。美国是最早开展紫外光通信系统研究的。1985年,美国海军海洋系统中心 M. Geller 团队采用汞灯光源和配有滤光片的 PMT 探测器,研制了通信速率为 1.2 Kbit/s 的紫外光通信系统,首次验证了紫外光通信的可行性。次年,通信速率提高到 2.4 Kbit/s,误码率小于  $10^{-5}$ <sup>[4]</sup>。2000年,美国 GTE 公司与美国军方合作研制了非视距紫外光通信系统,通信距离达 2 km,速率为 4.8 Kbit/s,误码率小于  $10^{-6}$ <sup>[5]</sup>。2006年,MIT 的 Lincoln 实验室采用波长为 274 nm,发光功率为 40 mW 的 LED 阵列光源,实现了传输距离为 11 m,通信速率为 2.4 Kbit/s 的通信系统。2008年,重庆大学与重庆通信学院合作采用低压汞蒸气灯在 200 m 范围内实现了通信速率为 9.6 Kbit/s 的数据传输系统,系统误码率小于  $10^{-5}$ <sup>[6]</sup>。2014年,中国科学院上海技术物理研究所汤心溢团队,基于紫外 LED 光源和 PMT 紫外探测器实现了通信距离为 10 m,通信速率为 2.4 Kbit/s 的紫外光语音通信系统<sup>[7]</sup>。2017年,南通大学电子信息学院邵佩旭等人采用 365 nm 紫外 LED 光源和 FPGA 技术设计了一套非日盲紫外光视频传输系统,系统传输速率最高可达 500 Kbit/s,最远通信距离为 15 m<sup>[8]</sup>。

目前紫外光通信存在的主要问题是:(1) 传输速率不高;(2) 传输距离短。且现有紫外光通信系统光源和探测器大多采用紫外气体灯以及 PMT 探测器。紫外气体灯体积较大、易碎且调制速率不

高;PMT 探测器虽然增益高达  $10^5 \sim 10^7$ ,但其需要 -300~-900 V 的工作电压,给紫外光通信电路系统提出了更高的硬件设计要求。因此,文中提出了一种基于 FPGA 的日盲紫外 LED 实时视频传输系统,其研究思路是通过 FPGA 的快速 OOK 调制解调,利用 LED 调制速度快的特点,以及 PIN 探测器体积小、工作电压低、响应速度快等优点,设计并构建了高速收、发端电路,为提高日盲紫外光通信的传输速率提供了一种有效的解决方案。

## 1 系统结构及原理

文中构建了基于 FPGA 调制解调的日盲紫外 LED 实时视频传输系统(以下简称日盲紫外 LED 视频传输系统),该系统主要由发射端、光学天线、大气信道以及接收端组成,其结构框图如图 1 所示。

在发射端,通过摄像头采集视频图像数据,并将图像数据送至 FPGA 进行 OOK 调制,再将调制信号送至 LED 驱动电路,通过相应的驱动电路控制 LED 光源,将电信号转化为光信号,通过大气信道传输至接收端。在接收端,利用紫外 PIN 探测器将光信号转化为电信号,经过前置放大电路,将 PIN 探测器产生的微弱电流进行放大处理。在 FPGA 中进行数据提取和解调,从而还原视频图像信息,并通过 VGA 接口实现视频显示功能。光学天线即在发射端和接收端各放置一个平凸透镜进行光束的汇聚。

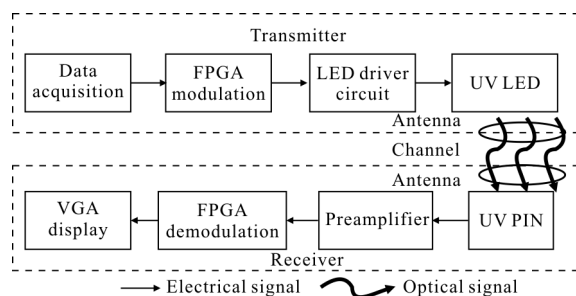


图 1 日盲紫外 LED 视频通信系统框图

Fig.1 Block diagram of solar blind UV LED video communication system

## 2 结果与讨论

### 2.1 发射端

日盲紫外 LED 视频传输系统发射端主要包括视频图像数据采集、FPGA 调制以及 LED 驱动电路

等模块。

系统摄像头采用 CMOS 型 OV7725 图像传感器。图像输出分辨率、像素时钟、图像输出格式和图像特性等可通过 OV7725 相应寄存器的值进行配置。该系统视频图像大小为 160 pixel×120 pixel, 满足系统最大传输速率条件时, 帧频为 15 fps, 图像输出格式为 RGB5:6:5。

由于早期紫外光源发展条件的限制, 在紫外光通信中, 研究者多采用紫外气体灯或者激光器作为光源; 随着半导体技术的发展, 深紫外 LED 得到快速的发展, 目前单颗深紫外 LED 的发光功率虽然仅有 1~2 mW, 但因其调制速度快、体积小、功耗小、寿命长且价格便宜等优点<sup>[9]</sup>受到研究者的关注。因此, 文中选用 265 nm 紫外 LED 作为发射光源, 其调制速率可以达到兆级, 发光功率约 1 mW, 发散角为 10°~12°。

在紫外光通信系统中, 驱动电路作用是为 LED 提供所需的工作电流。电气和电子工程师协会 (IEEE) 成员吴亮、刘兆军等<sup>[10]</sup>以及西安邮电大学尚建荣<sup>[11]</sup>等人分别提出利用三极管的开关特性实现 LED 数字调制驱动电路。但是一方面三极管频率特性受生产工艺影响较大, 另一方面三极管导通时工作在深度饱和区, 晶体管基区电荷的存储效应使得晶体管在关闭的时候比较慢, 信号波形会出现严重的拖尾现象, 在对上述驱动电路进行实验的过程中发现, 当电路的调制速率为 500 kHz 时, 信号波形就开始出现了拖尾现象。考虑到运算放大器的频率响应较好, 因此, 文中采用运算放大器对发射端调制电路进行改进。图 2 是日盲紫外 LED 视频传输系统发射端驱动电路, 主要采用 AD8001AN 芯片构成电压比较器来驱动 LED。在设计驱动电路时, 需要重点考虑电路的输出带宽, AD8001 的带宽最高可达

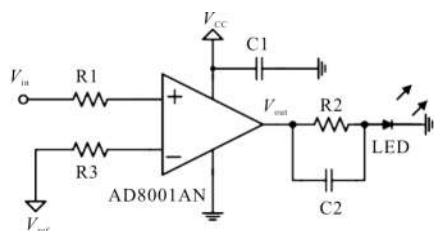


图 2 发射端 LED 驱动电路

Fig.2 LED driving circuit at the transmitter

800 MHz, 摆率 1 200 V/μs, 在 12 V 单电源供电条件下提供超过 70 mA 的负载电流。经测试, 该电路的调制带宽可达到 20 MHz, 可提高日盲紫外 LED 视频传输系统的通信速率。

## 2.2 接收端

接收端主要包括紫外 PIN 探测器、前置放大电路以及 FPGA 解码、VGA 显示模块。

理想的光电探测器应具有较大的光敏面积、极低的暗电流, 峰值响应波长应该尽可能接近光源辐射的波长。文中选用的 PIN 探测器其响应光谱范围为 210~280 nm, 响应度为 0.05 mA/mW。具体特点为: 响应速度快、可靠性高、工作电压低、暗电流低、峰值响应波长约为 267 nm, 因此无需在 PIN 管前面配置滤光片就可以避免可见光以及红外光对日盲紫外光检测的干扰, 极大地降低了背景光噪声。

接收端前置放大电路的主要功能是放大 PIN 探测器产生的微弱电流信号。文中接收端放大电路采用串联阻抗放大器结构, 运算放大器采用 AD8001AN 芯片。此芯片的基本特性在发射电路部分已经阐述, 但是 AD8001AN 芯片是一款视频电子芯片, 主要应用在高速摄像机、高速 AD 转换等方面, 具有非常好的带宽特性, 这是它不同于普通运算放大器之处, 因此采用此型号运算放大器来设计接收端放大电路, 如图 3 所示。该电路结构分为三个部分: (1) I/V 转换电路, 其功能是将微弱的电流信号转化为电压信号  $V_{in}$ , 其值大小为  $V_{in}=I_p \cdot R_1$ , 式中  $I_p$  为 PIN 探测器产生的微弱电流; (2) 和 (3) 分别为一级和二级反比例放大电路, 通过调节 R4 和 R9 的阻值, 可改变一级、二级放大电路的放大倍数。在一级放大电路中, 可调电阻 R6、电阻 R5 以及 ±5 V 电

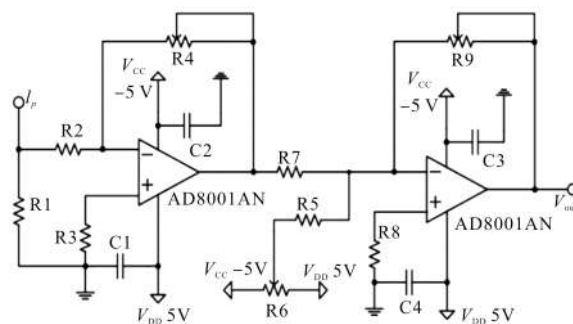


图 3 接收端前置放大电路

Fig.3 Preamplifier circuit at the receiver

压用来调节输出电压  $e_{o1}$  的偏置电压。同时,在所有的电源上并联了电容,以减小电源噪声对整个放大电路性能的影响。

### 2.3 基于 FPGA 的发射端/接收端模块设计

与单片机不同,FPGA 属于硬件编程,可以实现并行执行,适用于需要高速处理的工作,具有开发费用小、功耗低、设计周期短、运算速度快、风险小、可靠性高等优点<sup>[12-13]</sup>。文中构建的日盲紫外 LED 视频传输系统图像数据采集、存储、调制解调等处理均是基于 FPGA 开发平台实现的,主要从发射端和接收端模块两方面展开。

发射端 FPGA 设计模块主要完成摄像头视频图像数据采集、存储以及 OOK 调制等工作,主要包括 PLL、Peri\_Camera\_I2c、Peri\_Camera\_Data、RAM 和 trans 五个模块。

PLL 模块通过对系统时钟进行倍频或分频为不同的模块提供不同的工作时钟,该模块为 Peri\_Camera\_Data 模块提供 24 MHz 的工作时钟;Peri\_Camera\_I2c 模块的主要功能是采用 I<sup>2</sup>C 总线来配置 OV7725 的寄存器,并且为摄像头提供串行相机控制数据信号和串行相机控制时钟信号;文中 OV7725 采用 RGB 数据流格式,每个像素要输出两个八位数据,Peri\_Camera\_Data 模块的主要作用是输出 OV7725 的数据,并将输出的两个八位数据拼接成 16 位数据,并进行 RGB5:6:5 到 GRB3:3:2 格式的转换。RAM 模块的作用是对采集的帧数据进行缓存,在配置 RAM 核时采用了双端口 RAM 核,以解决 RAM 中数据写入速度和读取速度不同的问题;最后通过 trans 模块将要发送的图像数据进行 OOK 调制。通过 FPGA 输出端口将调制信号加载到 LED 驱动电路,将电信号转化为光信号,通过大气信道传输至接收端,从而实现视频图像的发送功能。

接收端 FPGA 设计模块主要完成视频图像数据的接收、判决以及 VGA 扩展显示功能。接收部分代码包括 PLL、Bps\_Module、Rx\_Module、RAM1、RAM2 以及 Vga\_Module 五个模块。

PLL 模块为 VGA 显示模块提供 40 MHz 的像素扫描时钟;Bps\_Module 模块生成比特率供 Rx\_Module 模块使用;Rx\_Module 模块的主要作用是接收串行输入的数据并进行串并转换。接收数据

时在每一位数据到来的中间时刻进行采样,以降低误判的概率;RAM 模块的作用是对 Rx\_Module 模块接收到的数据进行缓存,采用两个 RAM 模块对其进行乒乓操作,轮流接收、存储、处理发送端的数据,以解决 RAM 中数据存储和读取速度不一致的问题;Vga\_Module 模块交替读取 RAM1、RAM2 中缓存的数据实现 VGA 实时显示功能。

### 2.4 光功率密度与传输距离的关系

图 4 给出了接收端光功率密度与通信距离之间的关系,实验结果显示,当无透镜时,随着通信距离增加,光功率密度下降十分迅速、陡峭,在通信距离为 0.5 m 时,通过紫外辐照计测得光功率密度下降到  $8.4 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 。这主要是因为紫外 LED 光源本身具有一定的发散角,随着光传输距离的增加,光斑也在不断地扩大。此外,大气对紫外光强烈的散射作用也导致光强快速衰减。当加入透镜后,光功率密度衰减变缓,但是在通信距离 1.065 m 前后有不同的变化趋势。通过观察光斑尺寸,可以发现这是因为在通信距离小于 1.065 m 时,光斑尺寸小于接收透镜尺寸,透镜可以较多地汇聚光束,而当通信距离大于 1.065 m 时,光斑尺寸开始逐渐大于接收透镜尺寸,透镜汇聚的光束较少。

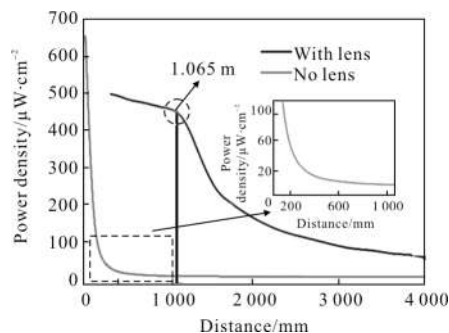


图 4 接收端光功率密度随收发距离的变化关系

Fig.4 Relationship between the optical power density and the transceiver distance

### 2.5 日盲紫外 LED 视频传输实现

文中搭建的基于 FPGA 的视距日盲紫外 LED 实时视频传输系统如图 5 所示。将收发端代码分别固化到两端的 FPGA 中,由于接收端 FPGA 在每一位数据到来的中间时刻进行采样,并且当信号电压高于 1.4 V 时,FPGA 会自动判决为 TTL 高电平;当信号电压低于 1.4 V 时,FPGA 会自动判决为 TTL

低电平,因此可以较好地恢复出原始信号。当通信距离小于 1.5 m 时,光功率密度较大,视频传输帧频为 15 fps,通信速率可达到 2.88 Mbit/s,大于 1.5 m 后,随着通信距离的增加,光功率密度损耗大于 3 dB,通信速率有所下降,当通信距离为 4 m 时,视频传输帧频为 10 fps,通信速率为 1.92 Mbit/s。将接收端 FPGA 输出数据送入显示器,观察显示屏上视频画面,如图 5(b)所示,画面有些颜色失真,但不是数据传输错误所导致的,而是由 VGA 的 RGB 3:3:2 显色方式决定的。

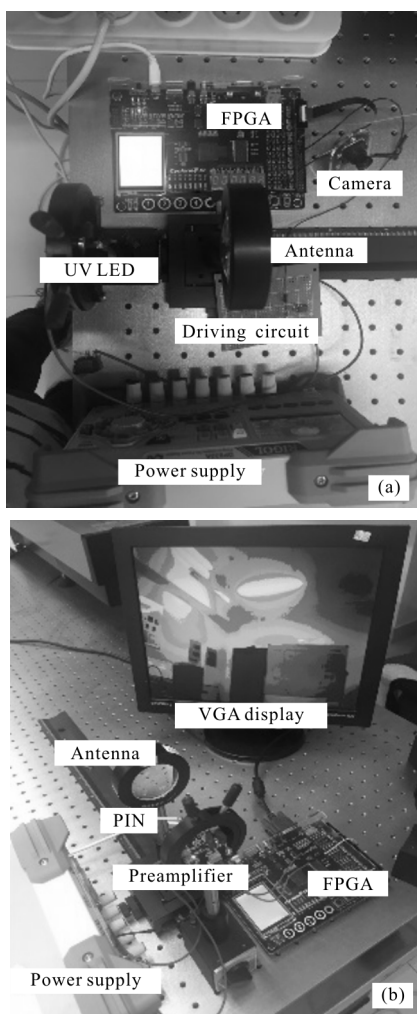


图 5 发射端系统实物图(a)及接收端系统实物图(b)

Fig.5 Physical map of the transmitter(a) and physical map of the receiver(b)

### 3 结 论

文中提出了一种基于 FPGA 的日盲紫外 LED 实时视频传输方法,给出了系统发射端、接收端的设

计方案。对系统接收端的光功率密度与通信距离之间的关系进行了研究。结果表明,在光斑直径小于接收透镜尺寸时,接收端的光功率密度随通信距离的增加,衰减较慢。因此,发射端光学天线的准直性能决定了汇聚的效果。文中通过采用 LED 发射光源,保证了光源调制速率可以达到兆级;对发射端电路进行了改进以及接收端高速运放芯片的选择,保证了电路上的高速性;采用通信带宽利用率较高的 OOK 调制方式,最终提高了系统的通信速率。文中搭建的基于 FPGA 的日盲紫外 LED 实时视频传输系统,最大传输速率达到 2.88 Mbit/s,当通信距离为 4 m 时,通信速率达到 1.92 Mbit/s,明显高于目前的文献报道,为日盲紫外光通信系统提供了一种有效的解决方案。

### 参考文献:

- [1] Wang Xiaofang, Zhang Xin, Zhang Jizhen, et al. Ultraviolet light atmospheric scattering transmission model based on Monte Carlo method [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2017, 54(11): 110102. (in Chinese)
- [2] Fan Yanwei. The application of ultraviolet communication in the military communication system [J]. *Digital Communication World*, 2017, 28(11): 49. (in Chinese)
- [3] Yuan R, Ma J. Review of ultraviolet non-line-of-sight communication [J]. *China Communications*, 2016, 13(6): 63-75.
- [4] Geller M, Johnson G B, Yen J H, et al. Short-range UV communication links [C]//The Tactical Communication Conference, 1986: 1-50.
- [5] Xu G. Ultraviolet communications [J]. *Communications Today*, 2000, 4: 6-7.
- [6] Xiang Ping, Xiao Shali. Research on demodulation technology of ultraviolet communication system based on FPGA platform[J]. *Optoelectronic Technology*, 2008, 28(2): 86-89. (in Chinese)
- [7] Luo Yixue. Research on channel characteristics of ultraviolet communication and construction of voice communication platform [D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Technical Physics), 2014. (in Chinese)
- [8] Shao Peixu, Luo Xiangdong, Li Chunpei. Research on video transmission system based on ultraviolet communication [J]. *Optical Communication Technology*, 2017, 41(4): 24-26. (in Chinese)

- [9] Zhao Taifei, Wang Xiaorui, Ke Xizheng. Design and performance analysis of multi LED ultraviolet communication system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41 (6): 1544–1549. (in Chinese)
- [10] Li X, Wu L, Liu Z, et al. Design and characterization of active matrix LED microdisplays with embedded visible light communication transmitter [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(14): 3449–3457.
- [11] Shang Jianrong. Visible light communication system driver circuit design[J]. *Optical Communication Technology*, 2015, 39(7): 24–25. (in Chinese)
- [12] Jeff Dorsch. Field programmable gate array (FPGA ) chip and application[J]. *Application of IC*, 2018, 35(1): 77–79.
- [13] Chen Yuanyuan, Liu Youyao. Design and implementation of FIR filter based on FPGA [J]. *Electronic Design Engineering*, 2017, 25(24): 65–69. (in Chinese)