



# 基于氧化镓探测器的日盲紫外光通信系统的设计与实现

马艳秀<sup>1a</sup>,王顺利<sup>1b,2</sup>,胡海争<sup>1b</sup>

(1. 浙江理工大学, a. 信息科学与工程学院; b. 理学院, 杭州 310018;

2. 浙江理工大学常山研究院有限公司, 浙江常山 324299)

**摘要:** 为克服传统光电探测器工作电压较高、硬件电路复杂与抗干扰能力差的问题,设计了一种基于新型氧化镓探测器的日盲紫外光通信系统。该系统在给定窗口大小的情况下,根据设计的数据处理算法对光强进行实时动态监测,通过将计算得到的阈值与光强作比较输出二值信号,结合 OOK 调制技术、驱动电路与非相干解调技术,实现了日盲紫外光通信系统。进一步从调制技术、驱动电路以及数据处理算法三个方面对通信系统进行仿真与实验测试,验证该系统的功能完整性、系统简洁性与可靠性。结果表明:该日盲紫外光通信系统在准确接收信号的情况下,可以直接实现将光强值转化为二值信号输出,且误码率小于  $10^{-3}$ ,能够达到简化接收端硬件电路以及提升硬件电路可靠性的目的。该系统编码简单可靠、易实现且抗干扰能力强,无需滤波装置、小巧便携、可靠性高,为日盲紫外光通信系统的优化与便携使用提供了新思路。

**关键词:** 日盲紫外光通信;氧化镓探测器;OOK 调制;非相干解调;便携

**中图分类号:** TN929.12

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-3851(2023)11-0745-10

**引文格式:** 马艳秀,王顺利,胡海争. 基于氧化镓探测器的日盲紫外光通信系统的设计与实现[J]. 浙江理工大学学报(自然科学),2023,49(6):745-754.

**Reference Format:** MA Yanxiu, WANG Shunli, HU Haizheng. Design and implementation of a solar-blind UV communication system based on  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  detector[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University,2023,49(6):745-754.

## Design and implementation of a solar-blind UV communication system based on $\text{Ga}_2\text{O}_3$ detector

MA Yanxiu<sup>1a</sup>, WANG Shunli<sup>1b,2</sup>, HU Haizheng<sup>1b</sup>

(1a. School of Information Science and Engineering; b. School of Science, Zhejiang Sci-Tech

University, Hangzhou 310018, China; 2. Zhejiang Sci-Tech University Changshan

Research Institute Co., Ltd., Changshan 324299, China)

**Abstract:** To solve the problems of high operating voltage, complex hardware circuit and poor anti-interference ability of traditional photoelectric detectors, we designed a new solar-blind UV communication system based on  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  photodetector. The system is based on the designed data processing algorithm to monitor the light intensity in real time with a given window size, and the binary signal is output by comparing the calculated threshold with the light intensity. We also combined OOK modulation technology, driver circuit and non-coherent demodulation technology to realize the solar-blind UV communication system. Furthermore, the simulation and experimental testing of the communication system were carried out in terms of modulation technology, driver circuit and data processing algorithm to verify the functional integrity, simplicity and reliability of the system. The results show that the system

收稿日期: 2023-03-14 网络出版日期: 2023-07-10

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(LY20F040005);浙江理工大学科研启动基金资助项目(20062224-Y)

作者简介: 马艳秀(1998—),女,河北唐山人,硕士研究生,主要从事光通信技术方面的研究。

通信作者: 王顺利, E-mail: slwang@zstu.edu.cn

can directly convert the light intensity value into binary signal output with accurate signal reception, and the bit error rate (BER) is less than  $10^{-3}$ , which simplifies the hardware circuit of the receiver and improves the reliability of the hardware circuit. The system is simple to encode, easy to implement and anti-jamming, freefiltering device, small and portable, and highly reliable. It provides a new solution for simple optimization and portable use of solar-blind UV communication systems.

**Key words:** solar-blind UV communication;  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  photodetector; OOK modulation; incoherent demodulation; portable

# 0 引言

随着光通信技术和电子技术的发展,人们越来越需要一种成本低、简单便携且信道传输稳定的通信系统。相较于传统的可见光通信技术,日盲紫外光通信技术(Solar blind UV communication technology)具有可靠性高、抗干扰能力强等特点,被研究人员关注。日盲紫外光通信是将数据信息搭载到紫外光线上进行信息传递的一种通信方式。由于大气会强烈吸收 200~280 nm 波长的紫外光,位于此波段的背景辐射难以到达近地面,从而形成日盲区,因此日盲紫外光通信具有极低的背景噪声<sup>[1]</sup>。此外,日盲紫外光通信技术可以利用大气散射效应进行非视距传输,具有保密性高、窃听率低以及全天候工作等优点,被广泛应用于舰载通信、紧急抢险、灾难救助等军事及民用领域<sup>[2]</sup>。

现有日盲紫外光通信系统一般由发送端和接收端组成。其中发送端通过发射光源将电信号转换为光信号,传送到自由空间;接收端通过光电探测器及其辅助器件收集光信号并将之转化为电信号,实现信息通信<sup>[3]</sup>。近年来,众多学者对日盲紫外光通信系统展开了系统研究,已取得初步成果。Wang 等<sup>[4]</sup>采用一个紫外激光器和多个滤光片、光电倍增管作为发射光源与光接收器进行实验,搭建了一套可进行高速长距离通信的非视距日盲紫外光通信系统。McKendry 等<sup>[5]</sup>将 285 nm 紫外 LED 阵列与滤光片、聚焦透镜、雪崩光电二极管等作为发射光源与光接收器,实现了日盲紫外光通信系统测试。Peng 等<sup>[6]</sup>提出了一种基于低密度奇偶校验码的直接扩频技术的紫外光通信系统,仿真实验表明,当信噪比为一 2 dB 时,该系统的误码率为  $10^{-2}$ 。虽然紫外光通信系统的研究越来越成熟,但由于传统紫外探测器在工作时需要使用滤波片滤除非日盲光的干扰并使用聚焦透镜增大光接收面积,导致现有的日盲紫外光通信系统依然存在硬件电路复杂、可靠性差等问题,这使得通信系统无法满足实际使用要求。

氧化镓是一种新型的宽禁带半导体材料,带隙

为 4.9 eV,对应光吸收边为 254 nm,具有极高的化学稳定性和热稳定性,是天然的日盲紫外探测材料<sup>[7]</sup>。上述氧化镓材料特性,使得应用氧化镓制成的紫外探测器具有不需外加滤波片、无需进行带隙调制以及抗干扰能力强等优点<sup>[8]</sup>。与传统紫外探测器相比,其应用于日盲紫外光通信系统时无需额外使用滤波片或聚焦透镜辅助工作,可以达到简化硬件系统、缩小设备体积以及提高系统可靠性的目的。此外,该探测器与传统紫外探测器相比价格便宜,因而可以降低系统成本。因此,氧化镓探测器在日盲紫外光通信中具有广阔的应用前景,可以广泛应用于高速无线通信、安全通信、智能交通等领域。

本文针对传统日盲紫外光通信系统存在硬件电路复杂、可靠性差的问题,设计了一种基于氧化镓探测器的日盲紫外光通信系统。该系统包括数字信号处理模块和紫外光通道模块。其中数字信号处理模块通过现场可编程逻辑门阵列(Field programmable gate array,FPGA)实现信号的 OOK 调制和非相干解调;紫外光通道模块采用 254 nm 紫外 LED 作为发射光源来发送信号,采用氧化镓探测器作为光接收器,并设计了一种数据处理算法进行光信号的收集、转换和处理。为了验证该通信系统的性能,对调制技术、驱动电路以及数据处理算法进行了仿真与实验测试。该系统具有硬件电路简单、可靠性高的优点,为日盲紫外光通信的优化设计提供新思路,在日盲紫外光通信领域具有一定的应用前景。

# 1 日盲紫外光通信系统设计

本文提出的日盲紫外光通信系统设计框架如图 1 所示。该系统由发送端、大气信道和接收端组成。在发送端,原始数据由发送端电脑通过串口的方式发送到 FPGA 板,并在 FPGA 板上经串口接收模块、并串转换模块、载波模块与数字键控模块处理后,生成 OOK 调制信号。该信号通过 FPGA 板的引脚输出到驱动电路,驱动 254 nm 紫外 LED 的关启,产生 OOK 调制后的光信号。

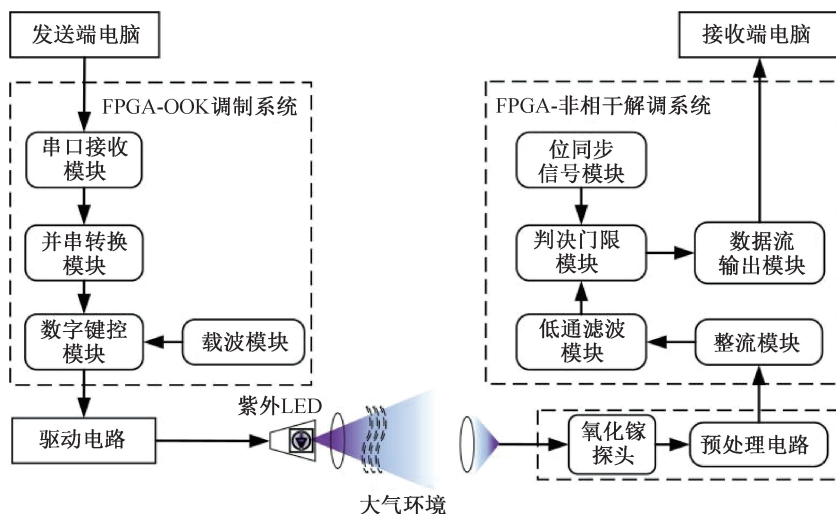


图 1 基于氧化镓探测器的日盲紫外光通信系统框架

经过一段距离的传输后,OOK 调制后的光信号从大气信道中到达接收端。在接收端,采用氧化镓探测器作为光接收器,该光信号经氧化镓探头接收后被转换为模拟脉冲信号,通过氧化镓探测器内部的数据处理算法,将模拟脉冲信号直接转换成数字信号。该数字信号经过整流模块、低通滤波模块、位同步信号模块、判决门限模块和数据流输出模块等数字处理步骤后,恢复成原始数据。原始数据通过串口发送到接收端电脑,完成信息的通信。

### 1.1 基于 FPGA 的 OOK 调制设计

OOK 调制技术具有传输容量大、简单易懂及易实现等优点。为了提高日盲紫外光通信系统的传输容量、降低系统实现的复杂程度,本文选择 OOK 调制技术进行信号调制。OOK 调制是载波幅度随二进制基带信号的变化而变化的一种数字调制方法<sup>[9]</sup>。设信息源发出的消息代码  $e_{\text{OOK}}$  是由二进制符号 1、0 组成的序列,假定符号“1”出现的概率为  $P$ ,符号“0”出现的概率为  $1-P$ ,则 OOK 调制信号<sup>[10]</sup>可表示为:

$$e_{\text{OOK}}(t) = \begin{cases} A \cos(\omega t + \theta), & \text{以概率 } P \text{ 发送 "1"}; \\ 0, & \text{以概率 } 1-P \text{ 发送 "0"} \end{cases} \quad (1)$$

其中: $A$  为载波幅度; $\omega$  为载波频率,Hz; $\theta$  为载波的初始相位。OOK 调制的原理是:在保持载波的相位和频率不变的前提下,使用基带信号来控制载波信号的开启与关闭<sup>[11]</sup>。当基带信号为“1”时,OOK 调制信号是载波信号;当基带信号为“0”时,OOK 调制信号是 0。根据 OOK 调制原理,使用 FPGA 实现 OOK 调制过程的示意图如图 2 所示。

原始数据从发送端电脑经串口传输到 FPGA

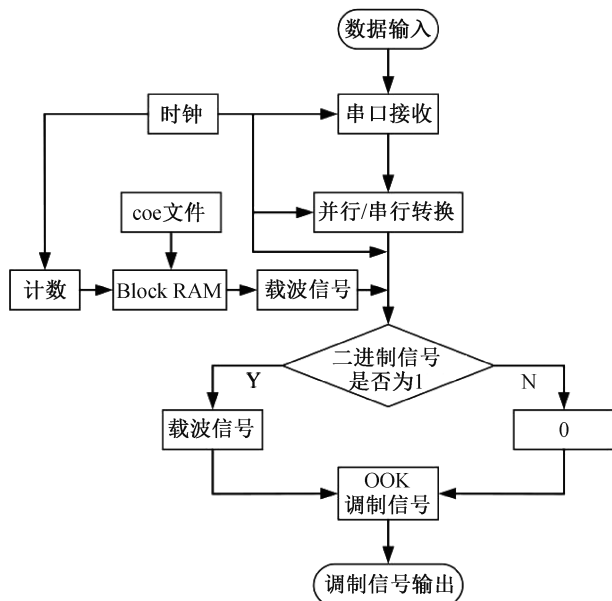


图 2 FPGA 实现信号调制过程示意图

板。在 FPGA 板中通过串口接收模块接收到并行的原始数据,并将其转换成串行原始数据,根据该数据进行 OOK 调制。由于 OOK 调制信号需要载波信号与原始数据通过数字键控的方法产生,因此首先需要生成载波信号。为此,本文采用直接数字频率合成(Direct digital frequency synthesizers, DDS)的方法生成载波信号,该方法通过对单周期的方波信号进行循环计数来产生多周期的方波载波信号。其次,基于数字键控的思想,在系统时钟的作用下,对每个时刻的原始数据进行判决输出。当原始数据为 1 时,输出载波信号;当原始数据为 0 时,输出 0,完成调制信号的产生和输出。

### 1.2 基于 FPGA 的非相干解调设计

OOK 信号的解调方法主要有相干解调法和非

相干解调法。相干解调法又称为同步检测法,由于相干解调法的实现需要一个与调制信号载波同频同相的相干载波<sup>[12]</sup>,否则容易造成解调后的基带信号频率失真,而相干载波的提取则需要复杂的过程与技术手段。非相干解调技术具有无需提取相干载波且较易实现等优势,因此本文选择使用非相干解调法进行信号的解调。非相干解调法又称作包络检波法,其原理是:将探测器传输过来的调制信号经过整流处理后,交流信号被转换成直流信号,而后通过低通滤波器滤出基带信号的包络,最后通过位同步信号判决输出,完成 OOK 调制的解调功能<sup>[13]</sup>。

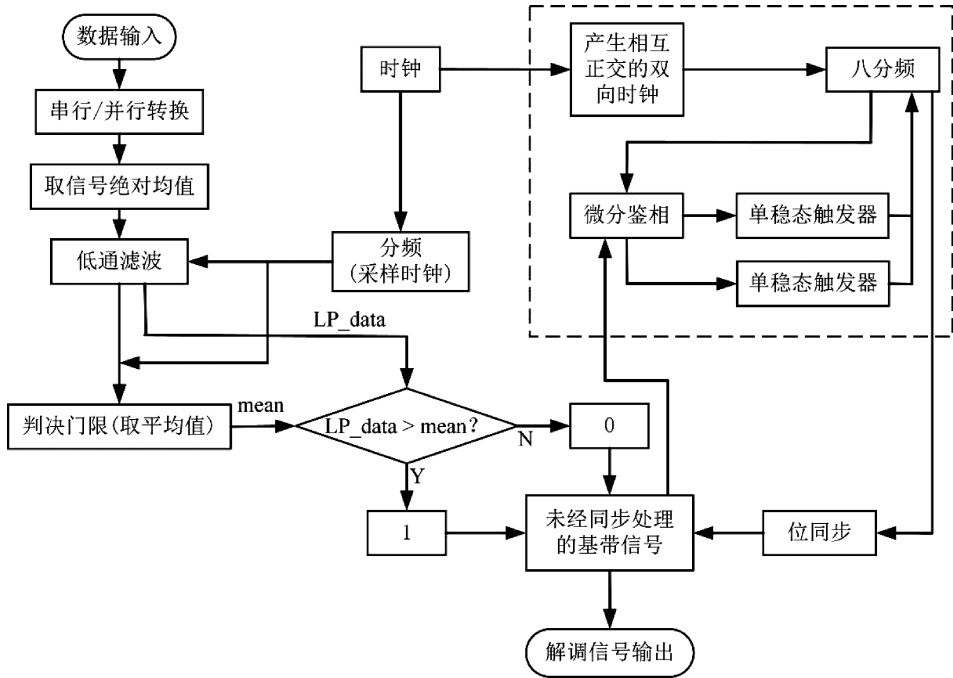


图 3 FPGA 实现信号解调过程示意图

首先,在对包络信号进行判决输出时需要选择最佳的判决门限,采用求取信号平均值的方法得到判决门限信号。由于乘法和除法会增加 FPGA 资源、降低系统运算速度,本文采用移位累加的方法求取包络信号的平均值,从而生成判决门限信号 mean。其次,在系统时钟的作用下,通过比较 LP\_data 与 mean 的大小,得到未经同步处理的基带信号。此时基带信号与发送端原始数据存在频率不一致的问题,需要引入与原始数据频率相同的位同步信号,将位同步信号作为解调所用的工作时钟解调出原始数据。本文采用数字锁相环(Digital phase locked loop,DPLL)的方法产生与输入数据速率相同的位同步信号。DPLL 主要由鉴相器、控制器、分频器和时钟变换电路组成,其原理是利用鉴相器将接收到的解调信号与本地产生的位同步信号相位进

使用 FPGA 实现非相干解调的过程示意图如图 3 所示。解调实质上是调制的逆过程,旨在将调制信号恢复为原始信号<sup>[14]</sup>。待解调数据通过探测器输入 FPGA 板时,被转换成并行数据,根据该并行数据进行解调。通过求取信号绝对值的方法,将交流信号转换为直流信号,实现 OOK 调制信号的整流处理。然后采用低通滤波器滤除高频信号,以过滤出调制信号的包络信号 LP\_data。但此时 LP\_data 无法满足接收端标准二进制比特数据的要求。根据非相干解调原理,为了得到准确的解调信号,需要对包络信号 LP\_data 进行位同步定时和判决输出。

行比较,若两者的相位出现超前或滞后,鉴相器会产生误差信号来调整位同步信号的相位,直至得到与输入信号频率一致的位同步信号<sup>[15]</sup>。在位同步信号出现上升沿时,对判决门限进行判决,进而完成解调信号的输出。

### 1.3 紫外光源选择与驱动电路设计

早期研究者们通常使用价格昂贵、工作环境复杂的器件,如氙灯、低压汞灯和紫外激光器等,作为紫外光通信系统的发射光源<sup>[16]</sup>。随着技术的不断进步,深紫外 LED 的出现解决了传统信号灯成本高、工作环境复杂等问题。紫外 LED 具有工作电压低、功耗小、稳定性高和可实现内调制等优点<sup>[17]</sup>。因此,本文采用型号为 DSXUV 254 nm 10 mW 的紫外 LED 作为发射光源来搭建系统。紫外 LED 的光电特性参数详见表 1,其中: $I_f$  为正向电流, $V_r$  为反向电压。



表 1 紫外 LED 的光电特性参数

参数	参数值			条件
	最小值	典型值	最大值	
正向电压 $V_f/V$	5		7	$I_f=100\text{ mA}$
发散角 $2\theta_{1/2}/(^{\circ})$	120		140	$I_f=100\text{ mA}$
峰值波长 $\lambda_p/nm$	250	255	260	$I_f=100\text{ mA}$
辐射通量 $\Phi_e/mW$	11		15	$I_f=100\text{ mA}$
反向电流 $I_r/\mu A$			10	$V_r=5\text{ V}$

该系统使用单个紫外 LED 作为发射光源,该紫外 LED 的峰值波长为 254 nm,正向电压为 6.121 V。因为单个紫外 LED 的光辐射强度相对较弱,无法满足远距离实验数据收集,所以本文将紫外 LED 与氧化镓探测器之间的实验距离设置为 2 cm,该位置的实际光强为  $28.9\text{ }\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 。

为使紫外 LED 能够进行 OOK 数字调制,需要

设计紫外 LED 驱动电路实现电信号与光信号的转换。为降低电路复杂性,尽可能提供高的调制速率,该系统发射端驱动电路选用型号为 AD8001AN 的运算放大器作为主芯片。该芯片的增益带宽积<sup>[18]</sup>最高可以达到 800 MHz,可以满足日盲紫外光通信的带宽需求。

设计驱动电路原理示意图如图 4 所示。该驱动电路的工作原理是:在电路中将运算放大器用作电压比较器,将 FPGA 引脚输出电压与阈值电压 2.1 V 作比较输出 VCC 或 GND,经过滑动变阻器的分压作用使紫外 LED 处于工作电压状态,实现紫外 LED 的关启。当输入电压大于阈值电压时,比较器输出 VCC,通过滑动变阻器分压后使紫外 LED 处于工作环境,此时紫外 LED 亮;当输入电压小于阈值电压时,比较器输出 GND,此时紫外 LED 灭,完成光信号的发送。

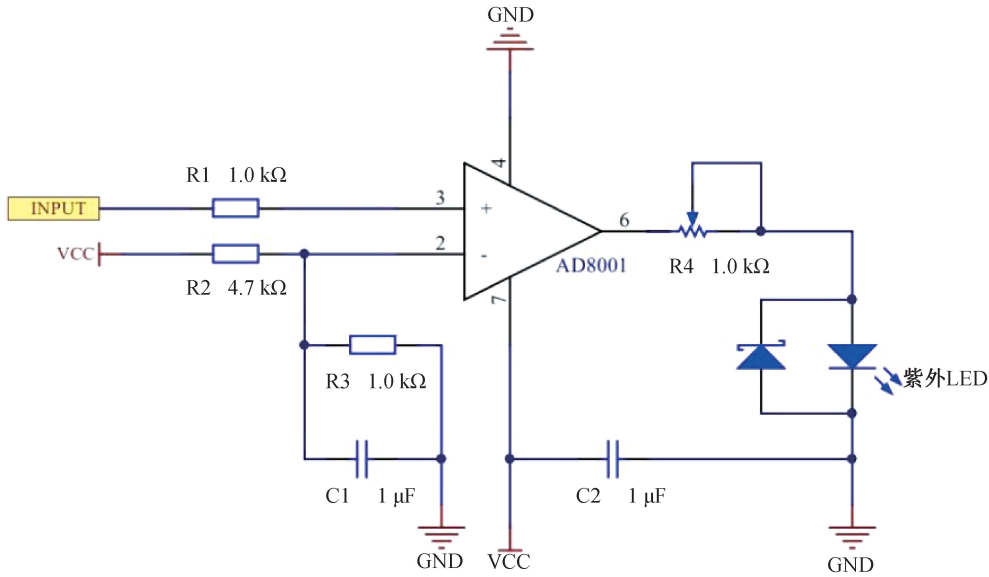


图 4 驱动电路原理示意图

1.4 基于氧化镓探测器的二值化阈值算法设计

本文采用可编程的氧化镓探测器作为光接收器,该探测器的工作电压是 5 V,使用 Type-C 接口进行供电,具有工作环境简单的优点;该探测器内部设计有一个可编程的嵌入式系统,包括光电转换模块、信号放大模块、信号处理模块与信号响应模块,使探测器具有集成度高、硬件体积小的优点。氧化镓探测器的工作原理是:通过光电转换模块接收大气中的光信号,并将其转化为模拟电信号,即光强信息。当探测器有紫外光线照射时,其内部电压升高,接收到较强的光强;无紫外光线照射时,不产生或产生较微弱电压,接收到较弱的光强。该光强信号通过信号放大模块实现电信号的放大,进一步通过信

号处理等模块将模拟电信号转换为数字电信号,并传输至解调系统。为了在探测器内部实现信号的模数转换,因此需要设计一种数据处理算法,将光强值转换为二值化的数字信号,以便进行后续解调处理。

当紫外 LED 发送光脉冲时表示信号“1”,探测器可以探测到较高的光强值;紫外 LED 不发送光脉冲时表示信号“0”,探测器不能探测到光强值。依据以上思路,本文设计了一种基于氧化镓探测器的二值化阈值算法,其原理是:通过设定窗口 A 的大小,对光强进行实时监测(每探测到一个新的光强值,进入窗口尾部,丢掉窗口头部的值,依次循环),采用计算窗口内所有光强值的加权平均数的方法得到阈值 T,将窗口内每个时刻的光强值与阈值进行比较后

输出二值信号。当光强值大于  $T$  时,输出信号“1”;当光强值小于  $T$  时,输出信号“0”。最终得到二值信息并保存到矩阵  $\mathbf{M}$  中,实现信号的模数转换。

设计的二值化阈值算法流程为:首先将  $J$  个光强值  $a_i$  保存到动态窗口矩阵  $\mathbf{A}$  中,动态窗口  $\mathbf{A}_k = [a_{k-J+1}, a_{k-J+2}, a_{k-J+3}, \dots, a_k]$ 。其次通过加权平均数的方法计算得到动态窗口  $\mathbf{A}_k$  的阈值  $T$ ,其中  $T$  表示为:

$$T = \left| \sum_{i=k-J+1}^k a_i / J \right| \quad (2)$$

然后,将动态窗口  $\mathbf{A}_k$  内的所有光强值与阈值  $T$  作比较:若  $\mathbf{A}_k$  小于  $T$ ,输出低电平;若  $\mathbf{A}_k$  大于  $T$ ,输出高电平。最后将结果输出到二值信号矩阵  $\mathbf{M}$  中,完成信号的模数转换。

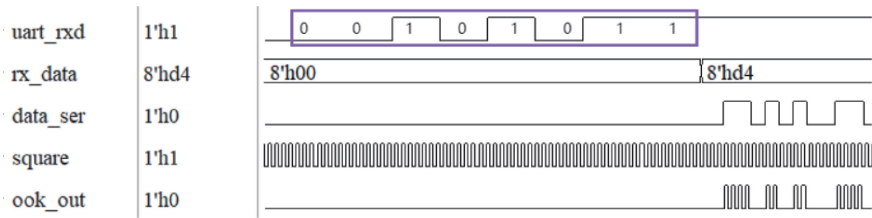


图 5 OOK 调制系统的 Modelsim 仿真波形示例

1101 0100。通过 DDS 法生成系统所需载波信号,经数字键控调制后,得到了 OOK 调制信号 ook\_out。仿真实验得到的输出结果与 OOK 调制的原理结果一致,表明该系统发射端设计正确。

为测试解调模块设计的合理性,将上述调制信号作为激励信号对接收端解调模块进行仿真测试,仿真结果如图 6 所示,其中 din 为经过并串转换后 OOK 调制信号,dout 为低通滤波器滤波后的包络

2 系统仿真与实验验证

2.1 系统软件仿真测试

本文使用 Vivado 与 Modelsim 软件对日盲紫外光通信系统的发送端和接收端进行仿真测试,发送端仿真波形示例如图 5 所示。其中 uart\_rxd 为串口输入数据,rx\_data 为 FPGA 串口接收到的并行数据,data\_ser 为并串转换后的串行数据,square 为载波,ook\_out 为 OOK 调制信号。当输入基带信号 1101 0100 时,由于串口协议在接收数据时从低位到高位显示,因此仿真得到的结果显示 uart\_rxd 为 0010 1011;FPGA 串口接收到 8 位并行数据 d4,通过并串转换模块后,得到串行的基带信号

信号,sync 为通过 DPLL 法产生的位同步信号,dataout 为解调出来的基带信号。从图 6 可以看出,当输入发射端的调制信号后,低通滤波器滤除了高频分量,正确滤出原始信号的包络,经判决门限模块输出信号后,通过与基带信号频率一致的位定时信号的作用,恢复出原始的基带信号,此时接收端正确解调出基带信号 1101 0100。表明该系统接收端设计正确。

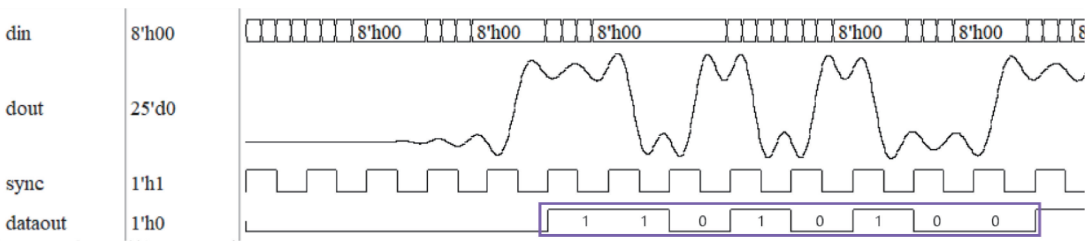


图 6 非相干解调系统的 Modelsim 仿真波形示例

2.2 系统硬件性能测试

2.2.1 氧化镓探测器光响应测试

氧化镓作为新兴的第四代半导体材料,目前正处于初步研发阶段。最近,Zhou 等<sup>[19]</sup>采用铝锌氧化锌作为电极,以氧化镓薄膜为基础,研制出一种金属—半导体—金属(MSM)型全透明光电探测器阵列,光响应时间为 70/200 ms。本文采用一款自主研发的氧化镓探测器作为光接收器,通过将探头放置在 254 nm 紫外光下、持续照

射 15 s 的实验方案,测得探测器的  $I-t$  特性曲线(图 7),并对探测器的响应时间进行了拟合,拟合公式为:

$$I = I_0 + C_1 e^{-t/\tau_r} + C_2 e^{-t/\tau_d} \quad (3)$$

其中: $I_0$  为稳定光电流; $t$  为时间; $C_1$  和  $C_2$  为常数; $\tau_r$  与  $\tau_d$  分别为上升弛豫时间常数和下降弛豫时间常数。使用式(3)计算得到探测器的光响应时间为 3/181 ms,其中上升时间为 3 ms,下降时间为 181 ms,可以满足通信需求。与传统光电探测器相

比,该探测器虽然会牺牲部分通信系统的通信速率,但其工作环境简单、便于携带、不受其他波段光的干扰,因而在短距离、极端复杂环境下的军事通信领域具有重要的研究意义。

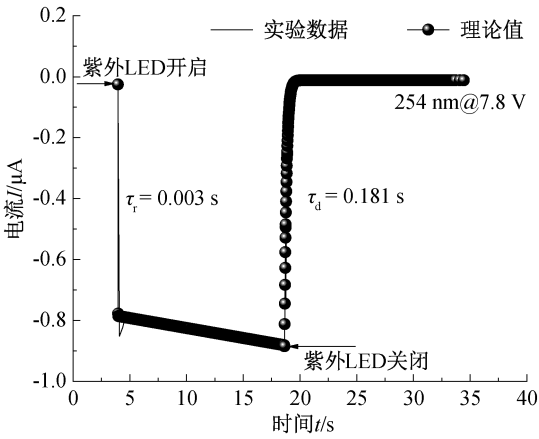
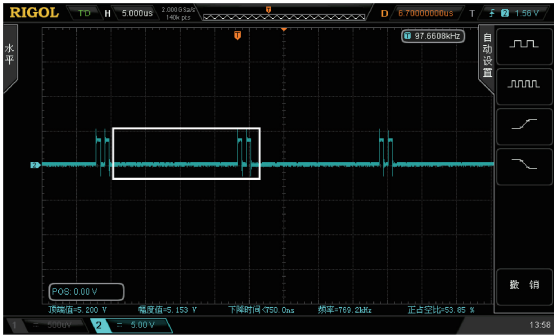
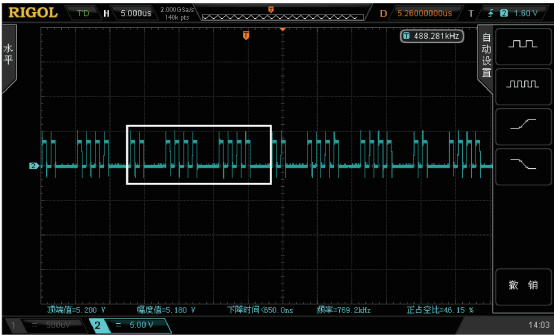


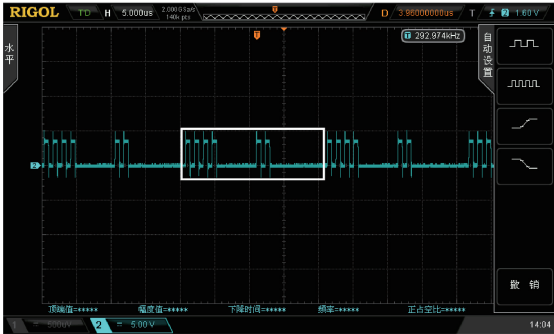
图 7 氧化镓探测器的光响应曲线



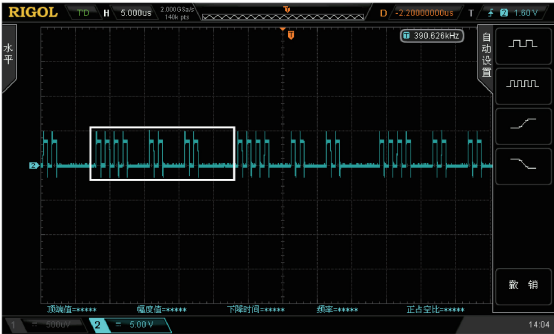
(a) 十六进制数01的调制信号



(b) 十六进制数b6的调制信号



(c) 十六进制数c8的调制信号



(d) 十六进制数d4的调制信号

图 8 FPGA 调制信号的输出波形图

2.2.3 驱动电路性能测试

为验证驱动电路性能,将 12 V 直流电压加载到驱动电路上使其工作,并将发送端 FPGA 与驱动电路连接,通过示波器测试紫外 LED 灯两端输出,得到如图 9(a)—(d)所示的波形信号。图 9 中高电平信号电压为 6.2 V,满足 LED 工作条件。通过观察 LED 两端信号波形可知,调制信号经过驱动电路后,得到的信号波形与 FPGA 输出的调制信号波形

2.2.2 调制模块性能测试

本文采用 Xilinx 公司 ARTIX-7 系列的 XC7A100T 芯片开发板实现系统的数字信号处理。为测试调制模块性能,通过 USB 数据线实现发送端 PC 与 FPGA 板之间的数据传输,使用示波器测试发送端 FPGA 的输出信号波形。FPGA 开发板上电后,将发送端代码使用 JTAG 线下载至开发板,使用串口调试助手循环发送原始数据。设置计算机的串口参数:波特率是 115200 Baud,无校验位,数据位是 8 bit,停止位是 1 bit。采用上述实验测试方法,分别发送十六进制数据 01(0000 0001)、b6(1011 0110)、c8(1100 1000)、d4(1101 0100),得到如图 8 所示的调制信号波形。此时 FPGA 输出高电平信号的电压为 5.2 V,测试所得波形与图 5 发送端仿真结果相同。该结果表明,FPGA 正确输出了 OOK 调制信号,发送端 OOK 调制设计正确且输出稳定。

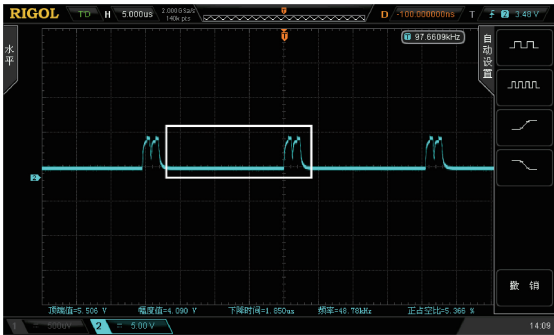
一致且输出稳定,驱动电路设计可以达到系统需求。

2.2.4 二值化阈值算法测试

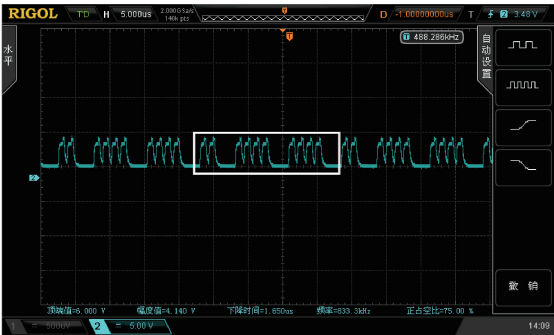
发送端硬件系统搭建完成后,为测试算法性能,首先将发送端 PC 与发送端 FPGA 板连接,然后将探测器与紫外 LED 水平对准,最后将探测器收集到的数据信息通过串口传输给计算机进行数据分析。设定发送端串口循环发送十六进制信息 d4(1101 0100),通信速率为 0.026 kbit/s,串口波特率为

115200 Baud,通信距离为 1 cm,得到如图 10 所示的数据信号波形图。其中折线是探测器接收到的光强信号,点线是经过算法处理后的二值化信号。由于氧化镓探测器的光响应下降时间较慢(181 ms),

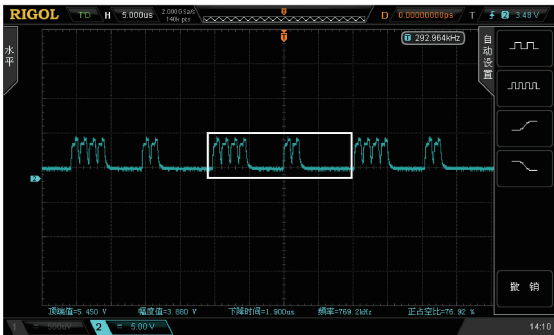
因此在接收到连续的方波光脉冲时,探测器无法回归初始状态,此时光强值的接收显示杂乱且无法处理。经过二值化阈值算法处理后,复杂的光强信号被直接转换成可处理的二值信号。



(a) 十六进制数01的LED两端信号



(b) 十六进制数b6的LED两端信号



(c) 十六进制数c8的LED两端信号



(d) 十六进制数d4的LED两端信号

图 9 紫外 LED 灯两端信号的输出波形

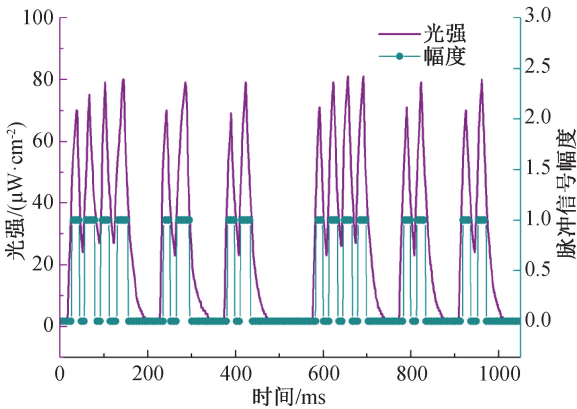


图 10 氧化镓探测器接收信号波形

通过对 1~4 cm 通信距离内探测器接收到的信号进行数据分析发现,在不同的通信距离下,数据处理算法可以准确、稳定地实现信号的模数转换,得到的通信距离与阈值的对应关系如表 2 所示。由于单颗紫外 LED 的发光功率较小,当通信距离超过 4 cm 时,探测器探测到的光强值几乎没有变化,无法接收到正确的数据,但通过构建紫外 LED 阵列的方法可以解决这一问题。在光通信系统中,该算法适用于通过光脉冲发送信号的所有调制与编码技术,

本文为探测器的数据处理方案提供了直接有效的编码思路。

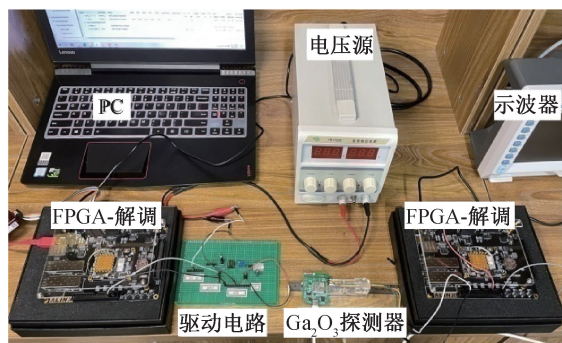
表 2 通信距离与阈值对应关系

通信距离/cm	阈值/( $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ )
1	36.35
2	15.86
3	6.02
4	3.03

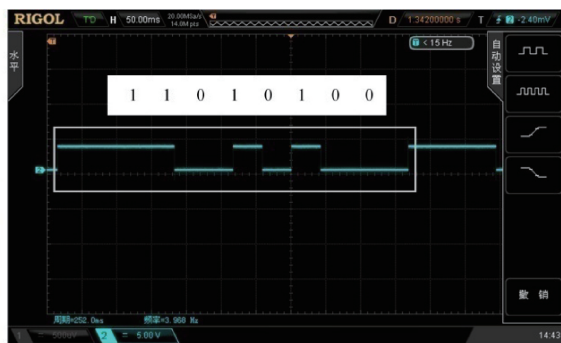
### 2.2.5 系统传输与误码率测试

为验证基于氧化镓探测器的日盲紫外光通信系统整体运行性能,根据图 1 所示的日盲紫外光通信系统框架,将各个模块硬件连接起来,搭建整套日盲紫外光通信系统,进行相关性实验。整体实验环境如图 11(a)所示。设定收发距离为 2 cm,通信速率为 0.026 kbit/s。图 11(b)为串口调试助手以十六进制形式发送 d4(1101 0100)时,接收端 FPGA 解调后的信号波形。由图 11(b)可以看出,串口调试助手发送基带信号 d4,经过 FPGA 调制、紫外 LED 灯发送、探测器接收以及 FPGA 解调后,接收端实时准确输出基带信号 1101 0100。该结果与图 6 所示接收端解调仿真结果一致,表明系统可以进行正确通信。





(a) 实验环境照片

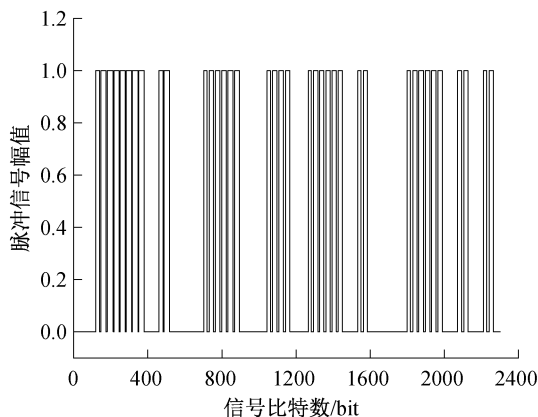


(b) 通信系统输出信号

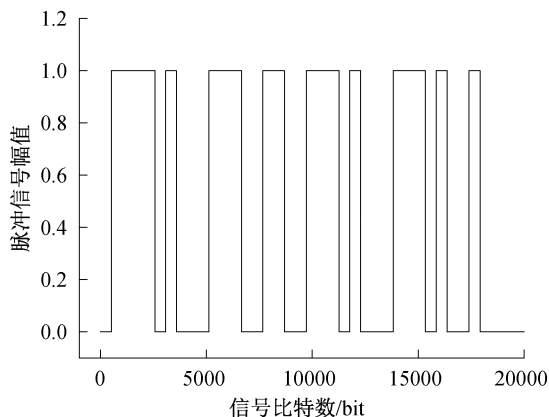
图 11 基于氧化镓探测器的日盲紫外光通信系统实验环境照片和输出信号

在对系统进行十六进制字符串通信测试后,为进一步优化系统框架,减少后续因硬件自身特性导致的误差,并提高通信系统的可靠性,本文基于氧化镓探测器的可编程特性将探测器接收到的信号通过串口直接传输给计算机,并使用计算机对信号进行解调处理。根据上述测试方法,发送“zstu”信号后,系统测试结果如图 12(a)—(b)所示。通过查询 ASCII 码与二进制码对应表,得知“zstu”的二进制码分别表示为“0111 1010、0111 0011、0111 0100、

0111 0101”。探测器接收信号如图 12(a)所示,该信号是“zstu”的调制信号波形;经解调处理后,得到准确的基带信号,如图 12(b)所示。总体来看,系统可以实现短距离的通信。通过计算错误码元个数与总码元个数的比值,得出系统误码率低于  $10^{-3}$ ,这表明系统可以进行可靠地数据通信。该系统基于二值化阈值算法,简化了接收端的实现过程与硬件体积,可以在极端复杂环境下便携使用。



(a) 探测器接收到的“zstu”调制信号



(b) “zstu”解调信号

图 12 系统发送“zstu”的输出信号波形

### 3 结 论

本文设计了一种基于氧化镓探测器的日盲紫外光通信系统,并对该系统各个模块以及系统误码率进行了软件与硬件实验测试。测试结果表明:该系统能够准确输出调制信号的波形,仿真与实验结果的一致性较好;该系统在不同通信距离内(1~4 cm)能够准确接收大气中的紫外光信号并转换成二值数字信号,在 2 cm 通信距离内误码率低于  $10^{-3}$ ,具有较高的可靠性。同时,该系统具有无需滤波装置、小巧便携且仅需较低的工作电压等优点,为传统日盲紫外光通信系统硬件电路的简洁优化与系统可靠性的提升提供了可行的设计思路。

本文设计的日盲紫外光通信系统目前无法实现高速数据传输,后续将针对这一问题完善系统。

### 参考文献:

- [1] 彭木根,袁仁智,王志峰,等. 紫外光通信:原理、技术与展望[J]. 北京邮电大学学报,2022,45(3):13-18.
- [2] 李春艳,罗豆,李庚鹏,等. 基于偏振紫外光单次散射的非视距目标定位方法研究[J]. 光电子·激光,2022,33(3):296-304.
- [3] 杨永坤,白晓晨. 基于 FPGA 的紫外光字符通信系统设计[J]. 科学技术创新,2021(4):59-61.
- [4] Wang G C, Wang K, Gong C, et al. A 1Mbps real-time NLOS UV scattering communication system with

- receiver diversity over 1 km [J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(2):1-13.
- [5] McKendry J J D, Xie E Y, Islim M S, et al. 4 Gbps wireless optical communications up to 5 m using a UV-C micro-light-emitting diode array [C] // 2021 IEEE Photonics Conference (IPC). Vancouver, BC, Canada. IEEE, 2021: 1-2.
- [6] Peng Y W, Zhou D. Performance of UV spread spectrum communication system based on LDPC codes [C] // 2020 13th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID). Hangzhou, China. IEEE, 2021: 131-135.
- [7] Wu C, He C, Guo D, et al. Vertical  $\alpha/\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> phase junction nanorods array with graphene-silver nanowire hybrid conductive electrode for high-performance self-powered solar-blind photodetectors[J]. Materials Today Physics, 2020, 12: 100193.
- [8] 钟天晟,于舜杰,赵晓龙,等. 基于 MOCVD 外延超薄氧化镓薄膜的高性能日盲和 X 射线探测器(特邀)[J]. 光子学报, 2021, 50(10):1004001.
- [9] 王江,罗林保. 基于氧化镓日盲紫外光电探测器的研究进展[J]. 中国激光, 2021, 48(11):7-37.
- [10] Cao Y A, Yifanb Z, Liu Y, et al. Design of universal PPM modulation module for laser communication based on FPGA[C]//2020 IEEE 2nd International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology (ICCASIT). Weihai, China. IEEE, 2021: 323-326.
- [11] 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.
- [12] 李知恒,周锋,杨文俊. 一种光通信数字图像传输系统的设计与实现[J]. 电子测量技术, 2022, 45(16):171-175.
- [13] 王许浦,孙晓红,薛琦. 基于 FPGA 的 OOK 可见光通信系统仿真与实现[J]. 现代电子技术, 2020, 43(17):25-28.
- [14] 张静,周美玉. 一种低时延的紫外光通信系统设计[J]. 激光杂志, 2020, 41(4):150-154.
- [15] 薛婧文,秦文虎,赵晓燕,等. 基于数字锁相环的水下高速光通信解调算法设计实现[J/OL]. 激光杂志. (2023-03-01) [2023-03-14]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1085.TN.20230301.1243.016.html>.
- [16] 刘茹,胡金涛,向乾元,等. 日盲区紫外光通信真空光源研究进展[J]. 真空电子技术, 2022(2):15-22.
- [17] Tang Y F, Liu E X, Tao C, et al. Research progress and prospect of ultraviolet communication [C] // 2021 IEEE 6th International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS). Chengdu, China: IEEE; 2021: 987-992.
- [18] 杨宇,陈晓红,尤波,等. 日盲紫外 LED 实时视频传输系统设计[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(10):234-239.
- [19] Zhou S R, Zhang H, Peng X, et al. Fully Transparent and high-performance  $\epsilon$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> photodetector arrays for solar-blind imaging and deep-ultraviolet communication [J]. Advanced Photonics Research, 2022, 3(11): 2270037.

(责任编辑:康 锋)