

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209328

# 一种光通信数字图像传输系统的设计与实现\*

李知恒 周 锋 杨文俊

(哈尔滨工程大学水声工程学院 哈尔滨 150001)

**摘要:** 本文以光通信数字图像传输为目标,基于FPGA设计了一种可见光通信数字图像传输系统。首先,在光通信系统发射端利用数字图像编码技术将图片信息转换为BMP图像编码格式,然后通过UART串口通信协议将图像数据发送至FPGA调制系统进行OOK调制,经功率放大后以光通信方式进行传输。其次,在接收端将接收到的图像数据进行非相干解调,将解调后的图像数据在接收端显示或进行后续处理。在此基础上,基于FPGA对光通信的调制、解调电路及紫光LED通信电路进行了设计,并利用System Verilog语言进行了实现。最后,对光通信图像传输系统进行了实验测试,实验结果表明该系统可以在满足通信速率与误码率的条件下,实现图片信息的有效传输。

**关键词:** 光通信;图像传输;DDS;OOK;FPGA

**中图分类号:** TN929.5 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5020

## Design and implementation of a digital image transmission system basing on light communication

Li Zhiheng Zhou Feng Yang Wenjun

(College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract:** In this paper, for the purpose of transmitting digital images via light communication, a visible light communication digital image transmission system basing on FPGA is designed. First of all, in terms of the digital image encoding technique, the content of an image is converted into BMP file format at the transmitting end of the optical communication system. Then, the dataset of a digital image is transmitted to the FPGA modulation system for OOK modulating and in this procedure, transmission is based on UART protocol. After modulation, the modulated signal is power amplified before being sent out via optical wireless communication. Secondly, the received dataset of the image is demodulated non-coherently at the receiving end of the optical communication system so that it can be displayed or further processed. Furthermore, basing on the FPGA, the modulation and demodulation circuits of optical communication and violet LED communication circuits are designed and software algorithms are implemented via System Verilog. Finally, the whole system was tested and the experimental results proved that in the condition of satisfying communication speed and BER, the feasibility of effective transmission of image information could be verified.

**Keywords:** optical communication; image transmission; DDS; OOK; FPGA

## 0 引 言

随着无线通信技术的发展,新型高速无线通信技术逐渐受到人们的关注,比如光通信是一种高速通信技术的典型代表之一<sup>[1]</sup>。光通信技术具有速率快、带宽高、抗干扰能力强等优势<sup>[2-6]</sup>,近年来已逐渐被用于许多通信应用场景中,如水下通信领域<sup>[7-8]</sup>。由于传统的水声通信方式存在通信速率低、通信距离近、抗干扰能力差的缺陷,无法满足大

容量图像与视频数据的通信需求<sup>[9]</sup>。可见光通信具有传输距离远、穿透能力强、方向性好、时延低、收发端系统设计简单等优势<sup>[10-12]</sup>,非常适合水下无线图像与无线视频传输。因此,可见光通信技术在未来海洋图像与视频信号传输领域中具有极大的应用价值。

文献[13]给出了一种基于单片机实现的可见光字符传输系统,字符信息数据量较小,对实时性要求不高,该系统并不适合大数据量信息的传输。文献[14]给出了一种基于

收稿日期:2022-03-19

\* 基金项目:国家大学生创新创业训练计划项目(202110217088)资助

STM32 单片机实现的可见光语音及温度信息传输系统,该系统需要将采集到的模拟信号进行 A/D 转换后进行后续处理,采集信息的完整性与实时性易受到 A/D 采样精度及采样速率的影响,因此不适合于数据量大的图像信息的传输。本文采用 FPGA 实现的光通信图像传输系统,相较于单片机方案具有在调制解调、编码解码等数字信号处理环节更好的实时性以及更快的处理速度,因而具有更强的实用性。

### 1 系统总体方案设计

可见光通信数字图像传输系统主要基于 Altera Cyclone IV EP4CE6E22C8 FPGA 进行设计,主要包括光通信发射系统、光通信接收系统,其设计方案如图 1 所示。

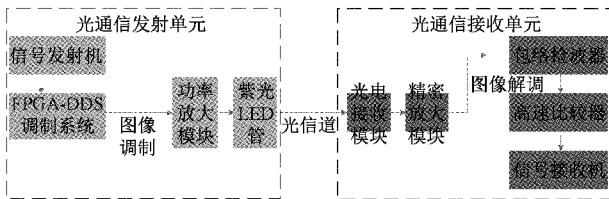


图 1 光通信数字图像传输系统总体设计方案

其中,光通信发射系统由 FPGA-DDS 模块、功率放大模块以及紫光 LED 发射模块组成,完成对信号发射机输入数字图像信号的调制与发射功能,主要的工作流程如下:首先,利用 UART 串口通信将数字图像文件从信号发射机传输至 FPGA-DDS 调制系统,然后在 FPGA 中将数字图像文件进行 OOK 调制,再通过 DAC 信号调理电路将已调信号输出,最后通过光纤激光发射模块(功率放大模块+紫光 LED 发射管)将已调信号发射出去;接收系统由光电接收模块、精密放大模块、非相干解调系统组成,完成对数字图像调制信号的解调功能,主要工作流程如下:首先,利用光电接收模块接收信号,并通过精密放大模块对其放大,然后通过非相干解调系统(包络检波器与高速比较器)对接收信号进行解调,最后将解调得到的数字信号通过 UART 串口通信发送至信号接收机以进行后续处理。在图像传输系统中,调制与解调是系统设计的核心环节,具体原理如下所述。

#### 1.1 OOK 调制方法

OOK 数字调制基本原理如图 2 所示。

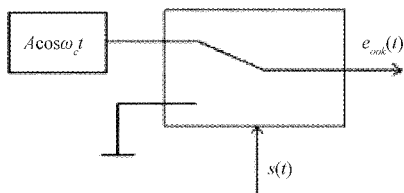


图 2 OOK 数字调制原理

图 2 中,  $s(t)$  为调制信号,  $A\cos\omega_c t$  为载波信号,  $e_{ook}(t)$  为已调信号。OOK 信号的产生方法主要有模拟调

制法和数字键控法。本文中光通信系统使用数字键控法将基带信号  $s(t)$  调制到载波上。OOK 调制是一种二进制数字调制,其载波的幅度仅有两种变化状态,即分别对应二进制信息 0 或 1,其表达式为:

$$e_{ook}(t) = \begin{cases} A\cos\omega_c t, & \text{以概率 } p \text{ 发送 } 1 \\ 0, & \text{以概率 } 1-p \text{ 发送 } 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $e_{ook}(t)$  表示 OOK 已调信号;  $A\cos\omega_c t$  为载波信号,  $A$  表示信号幅度,  $\omega_c$  表示载波频率。

#### 1.2 OOK 解调方法

在接收到 OOK 已调信号后需要对其进行解调处理。OOK 信号的解调方法主要有非相干解调(包络检波)法与相干解调(同步检测)法,本文中光通信系统使用非相干解调法对接收信号进行解调。非相干解调的基本原理如图 3 所示。

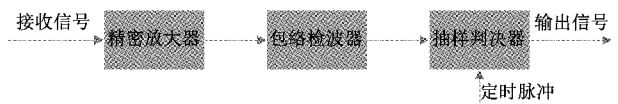


图 3 非相干解调工作原理

### 2 系统硬件设计

依据光通信系统设计方案,利用立创 EDA 软件分别对不同功能模块的硬件电路进行设计,具体硬件电路设计如下所述。

#### 2.1 光通信发射单元硬件设计

光通信发射单元主要完成载波频率为 10 MHz、信道容量为 115 200 bit 的 OOK 已调信号生成。主要由 FPGA-DDS 调制模块与光纤激光发射模块组成。其中,FPGA-DDS 调制模块由 FPGA 与 DAC 信号调理电路构成。FPGA 主要实现直接数字频率合成器 DDS 的编码器功能,FPGA 型号为 EP4CE6E22C8;DAC 信号调理电路主要实现已调信号的放大输出,DAC 芯片型号为 3PD5651E,其精度为 10 bit,电压范围  $[-\text{Amp}, \text{Amp}]$  (Amp 表示信号幅值),信号放大采用 LMH6643 运放芯片。另外,光纤激光发射模块主要实现已调信号的功率放大,这里采用了基于 OPA690 芯片的二级功率放大电路,并通过紫光 LED 将已调信号发射出去,再由光通信接收单元进行接收。

#### 2.2 光通信接收单元硬件设计

光通信接收单元主要完成对接收信号的解调,将接收到的已调信号解调为数字信号,以便接收机进行后续的信号处理。光通信接收单元主要由光电接收模块、精密放大模块、包络检波模块与整形电路模块构成。光电接收模块使用科扬光电公司 APD 雪崩光电接收模块。由于光电接收模块所接收到的信号幅度较小,在包络检波前需要对其进行放大,本设计采用 OPA847 精密放大器实现信号放大功能。由于包络检波后的波形是畸变的类方波,因此需要对其进行抽样判决。本文采用 TLV3501 高速比较器,通过调整比较器电路的门限电压将包络检波波形整形为方波。

### 3 光通信图像传输系统软件设计

在系统硬件设计的基础上,为了能够实现图像信息的有效传输,本文对光通信图像传输系统软件进行了设计。软件设计的基本思想:首先,将目标图片以 BMP 格式进行软件编码,并通过软件编程对 BMP 数字图像信号进行 OOK 调制,然后通过光通信发射系统将 BMP 图像数据按字节发送,最后基于 UART 串口通信协议实现了光通信系统发射端与接收端之间图像数据的传输。

#### 3.1 BMP 图像生成原理

由文献[15]知,BMP 文件是由 14 字节的文件头、40 字节的位图信息头、颜色表与图形数据构成。其中,文件头主要描述了该 BMP 文件的类型、文件大小与位图起始位置信息;位图信息头描述了位图的尺寸信息;颜色表描述了位图中的颜色信息;图形数据存储了整张位图每一个像素点的像素值,按“低位在前”顺序存储。BMP 文件的生成过程如图 4 所示。



图4 BMP文件生成过程

#### 3.2 OOK 调制软件设计

依据图 2 所示的 OOK 调制原理,软件设计主要包括两个部分:基于 DDS 编码器的载波信号生成与基于数字键控的已调信号生成。由文献[16]知,DDS 编码器的原理可以描述为,创建一段长度的连续地址空间(通常取  $2^M$ ,  $M$  为正整数)以存储一个周期的正弦波波形数据,然后通过调整系统时钟  $f_{clk}$  与频率控制字  $f_{word}$  实现任意频率的正弦信号输出。最终,DDS 输出正弦信号的频率  $f_{out}$  可以表示为:

$$f_{out} = \frac{f_{clk}}{2^M} \times f_{word} \quad (2)$$

本文 OOK 调制使用的载波信号频率为 10 MHz,单个周期的正弦信号波形数据用 4 096 点存储,其中,考虑到 EP4CE6E22C8 寄存器资源有限,因此为了提高 FPGA 的存储空间利用率,本文仅实际存储 1 024 点的 1/4 波形数据,根据正弦信号的对称性,通过下式的数学变换生成完整的正弦信号。

$$data\_out = \begin{cases} ROM[addr[9:0]] + 512, & addr \in [0, 1\ 023] \\ 512 - ROM[1\ 024 - addr[9:0]], & addr \in [1\ 024, 2\ 047] \\ 512 - ROM[addr[9:0]], & addr \in [2\ 048, 3\ 071] \\ 512 - ROM[1024 - addr[9:0]], & addr \in [3\ 072, 4\ 095] \end{cases}$$

其中,ROM 表示 1/4 正弦波形参数寄存器,addr 为地址寄存器,data\_out 表示 DDS 的输出波形参数。为了验证 DDS 正弦载波信号生成方法的正确性,在 ModelSim 仿真软件中进行了仿真测试,测试结果如图 5 所示。测试结果与理论分析结果一致。

最后,通过软件编程实现 OOK 数字键控,得到最终的已调信号。

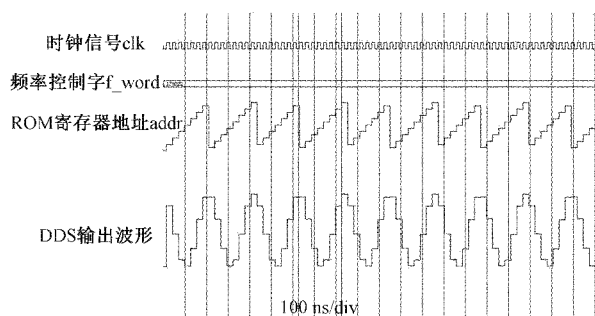


图5 DDS正弦载波信号仿真波形

#### 3.3 UART 通信协议

UART 串口通信协议具有接收端与发射端无需时钟信号同步、发送与接收协议简单等优势,比较适合于可见光通信数字图像的传输。UART 串口通信协议的时序如图 6 所示。

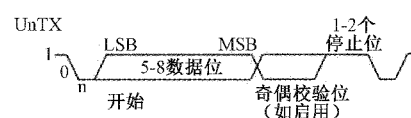


图6 UART串口通信协议时序

### 4 实验测试结果

在完成光通信数字图像传输系统软硬件设计的基础上,最后进行了软件调试和实验验证。实验系统实物如图 7 所示。该实验系统主要包括 RIGOL DS2202A 示波器、基于 CH340 的 USB 转 UART 模块、FPGA 调制模块、DAC 模块、光发射模块、光电接收模块、高速运放模块、包络检波器与高速整形电路模块等。软件调试主要在 Quartus 软件上进行,通过 Altera USB Blaster 将工程文件的代码下载并固化至 FPGA 上以进行后续的相关代码调试和功能测试。实验测试中分别进行了 24 位位图生成、位图文件发送调制、位图文件接收解调功能测试。

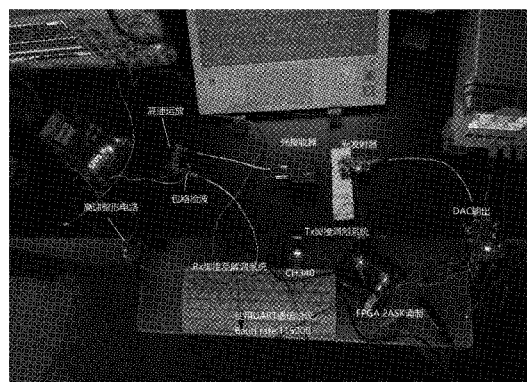


图7 光通信图像传输实验系统实物图

为了测试系统传输数字图像的性能,本文采用了大小为 153 KB 的数字图像进行测试。首先将图像编码为 24 位 BMP 图像,然后将图像通过 UART 协议进行编码生成调



制信号,本文中 UART 通信协议的主要参数如下:波特率配置为 115 200,无校验位,1 位停止位。经过 OOK 调制后发射,调制与已调波形如图 8 所示。

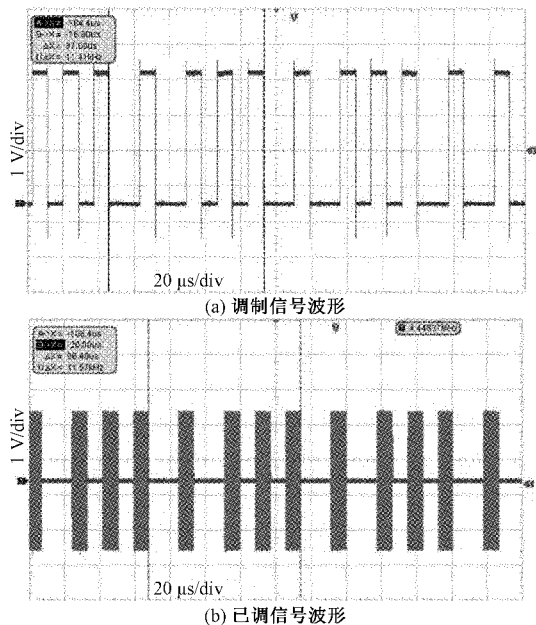


图 8 发射单元信号波形

其中,图 8(a)为将 BMP 图像编码转换为二进制的数字调制信号波形,图 8(b)为将数字调制信号与 10 MHz 正弦载波信号进行 OOK 调制后的已调信号波形。并且在传输距离为 25 cm 条件下进行了图像的可见光通信传输,接收波形与解调波形如图 9 所示。

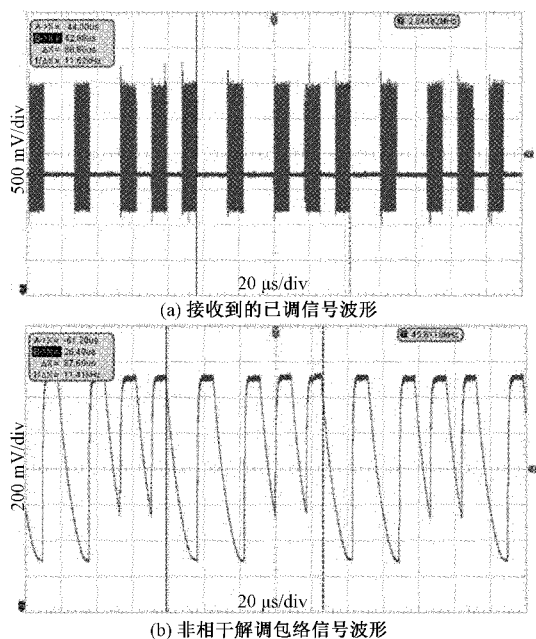


图 9 接收单元信号波形

图 9(a)为接收到的已调信号波形,图 9(b)为经过非

相干解调后的包络信号波形。最后将接收到的包络信号经过整形电路处理与 BMP 解码后还原为图像信号。图 10 所示为实验测试效果。



图 10 图像传输结果对比

由图 10 中的测试结果可以看出,接收端的图像信息完全反映了发送端的主要信息,后续经过纠错处理后即可恢复原始图像信息。因此,本文设计的基于 FPGA 和 OOK 调制解调的可见光通信系统完全可以用于图像信息的有效传输,能够进一步为水下光通信系统的应用奠定技术基础。

### 5 结 论

本文设计并实现了一种基于 FPGA 的可见光通信数字图像传输系统,并进行了实验测试。测试结果表明,该系统采用 BMP 图像编码方式和 OOK 调制方法具有图像编码简单、易于调制的优点。在非相干解调过程中,相较于传统的 ADC 直接采样实现抽样判决,本文所采用的高速比较器抽样判决方案具有更低的误码率,从而可以得到更佳质量的图像信息。在保证较高通信速率的条件下,能够实现图片信息的有效传输,并且本系统结构简单,易于实现,经济性较好。

## 参考文献

- [1] 槐利,张敏娟,林清,等.一种基于白光LED的室内通信方法研究[J].国外电子测量技术,2020,39(6):13-17.
- [2] 俞浩.无线光通信技术分析与前景研究[J].通信电源技术,2020,37(12):138-140.
- [3] 韩玮.无线光通信技术及其应用的研究[J].中国新通信,2019,21(8):26.
- [4] 赵雄文,张钰,秦鹏,等.空天地一体化无线光通信网络关键技术及其发展趋势[J].电子学报,2022,50(1):1-17.
- [5] 杨乾远,徐林,孙晖,等.船舶无线光通信技术[J].光通信技术,2019,43(8):25-27.
- [6] 张娜,唐卫斌,陈思瑞.基于LED可见光通信系统的设计[J].电子测量技术,2020,43(8):125-128/142.
- [7] 张义鑫,张果.水下回路通信电信号传输特性仿真研究[J].电子测量与仪器学报,2021,35(4):204-210.
- [8] 洪丹阳,王巍,周成阳,等.基于非均匀快速傅里叶变换的正交频分复用水声通信多普勒估计与补偿方法[J].仪器仪表学报,2021,42(4):67-74.
- [9] 刘兴,吴应明,罗广军,等.水下大容量无线光通信技术最新研究现状[J].无线光通信,2017,41(7):52-54.
- [10] 马晓晓.水下通信技术综述[J].电子世界,2020,(14):104,DOI:10.19353/j.cnki.dzsj.2020.14.054.
- [11] 王博,吴琼,刘立奇,等.水下无线光通信系统研究进展[J].激光技术,2022,46(1):99-109.
- [12] 迟楠,胡昉辰,周盈君.高速可见光通信技术的挑战与展望[J].中兴通讯技术,2019,25(5):56-61.
- [13] 王加安,杨鸿基,戴鹏.基于单片机的可见光字符传输系统[J].光通信技术,2022,46(2):13-17.
- [14] 田芑,郑帅,梁振木,等.LED可见光语音传输及温度监测系统[J].电子测量技术,2020,43(17):126-129.
- [15] 宋叶未,叶建芳.BMP格式位图文件的分析及显示算法[J].现代电子技术,2011,34(20):5-7.
- [16] 张林行,尚小虎,赵美聪,等.基于FPGA的直接数字合成信号源设计[J].电子设计工程,2016,24(1):172-174.

## 作者简介

李知恒,本科,主要研究方向为无线水下通信技术。

周锋(通信作者),教授,博士生导师,主要研究方向为水声通信网络技术、水下导航定位技术、嵌入式系统开发。

E-mail: zhoufeng@hrbeu.edu.cn

杨文俊,本科,研究方向为无线水下通信技术。