

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2105658

# 紫外光通信 FDPSPIM 调制原理与实现

杨永坤 白晓晨 马守领  
(西安工程大学 电子信息学院 西安 710048)

**摘要:** 在无线紫外光通信系统中,采用合适的调制与解调技术可以有效提高系统通信质量。设计定长双脉冲对称脉冲间隔调制(FDPSPIM)方法实现紫外光通信,对其符号结构进行详细分析,使用 modelsimSE 10.1c 进行时序仿真,验证了调制方案的可行性,同时采用硬件描述语言完成了基于现场可编程门阵列(FPGA)的 FDPSPIM 调制器与解调器设计,通过自定义帧结构实现了发送信息的同步处理。测试结果表明,基于搭建好的紫外光通信实验平台,通过 Verilog HDL 设计的 FDPSPIM 调制器与解调器可以正确的识别出原始信息,有效降低了发射功率。

**关键词:** 紫外光通信;调制解调;FPGA;同步

**中图分类号:** TN23 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

## Principle and implementation of FDPSPIM modulation in ultraviolet light communication

Yang Yongkun Bai Xiaochen Ma Shouling  
(School of Electronic and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** In the wireless ultraviolet communication system, the use of appropriate modulation and demodulation technology can effectively improve the system communication quality. A fixed-length dual-pulse symmetrical pulse interval modulation (FDPSPIM) method is designed to realize ultraviolet communication, and its symbol structure is analyzed in detail. The modelsimSE 10.1c is used for timing simulation to verify the feasibility of the modulation scheme. At the same time, the hardware description language is used the FDPSPIM modulator and demodulator design based on field programmable gate array (FPGA) realizes the synchronization processing of sending information through a custom frame structure. The test results show that based on the built-up ultraviolet light communication experimental platform, the FDPSPIM modulator and demodulator designed by Verilog HDL can correctly identify the original information.

**Keywords:** uv communication; modulator and demodulator; FPGA; synchronization

### 0 引言

非直视(non-line-of-sight, NLOS)无线紫外光通信主要利用大气分子和气溶胶粒子对紫外光子的散射作用实现信息传输,弥补了自由空间光通信必须在直视对准条件下才能进行通信的不足<sup>[1-3]</sup>。“日盲”波段无线紫外光通信具有高保密性、强抗干扰能力、可全天候工作等优点,在无人机的编队飞行、隐蔽通信等领域有广阔的应用前景<sup>[4-5]</sup>。

目前大多数光通信系统都采用强度调制/直接检测(intensity modulation/direct detection, IM/DD)方式<sup>[6-8]</sup>。于晓娜等<sup>[9]</sup>选用定长数字脉冲间隔调制(fixed-length digital pulse interval modulation, FDPIM)作为紫外光通信的调制解调方法,对2阶的编码方法进行了设计,通过数字

锁相环实现接收信号的解调。刘金龙等<sup>[10]</sup>提出通过先进先出(first input first output, FIFO)存储结构缓存串口数据的紫外光通信系统,对开关键控调制(on-off keying, OOK)、脉冲位置调制(pulse position modulation, PPM)差分脉冲位置调制(differential pulse position modulation, DPPM)进行改进,完成了现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)的实现。毛昕蓉等<sup>[11]</sup>采用随机存取存储器存储实现 DPIM(digital pulse interval modulation, DPIM)调制方式,通过硬件资源来换取容量,解决调制方式不定长的问题。

上述文献研究主要集中在 FPGA 设计的方法和软件功能仿真中,本文结合上述设计思想,设计定长双脉冲对称脉冲间隔调制<sup>[12]</sup>(fixed length dual pulse symmetric pulse

收稿日期:2021-01-05

interval modulation, FDPSPIM), 其中文献[12]详细分析该调制方式的优劣, 采用同步帧头来进行数据同步, 对该方法同时进行了功能仿真和实际光路测试。

### 1 FDPSPIM 符号原理

FDPSPIM 把  $M$ (调制阶数)位的原始比特信息固定到长度为  $2^{M-1} + 5$  个时隙上, 利用中间  $m_k$  个空时隙来传递原始信息, 符号的初始位置为单个光脉冲和一个空保护时隙, 之后加  $m_k$  个表示信息的空时隙, 再加标识脉冲  $f_k$  和一个空时隙, 最后根据  $k$  值在补充空时隙  $s_k$ 。  $m_k, f_k, s_k$  的取值通过式(1)~(3)求得。

$$m_k = \begin{cases} k, & k < 2^{M-1} \\ 2^M - k - 1, & k \geq 2^{M-1} \end{cases} \quad (1)$$

$$f_k = \begin{cases} 10, & k < 2^{M-1} \\ 110, & k \geq 2^{M-1} \end{cases} \quad (2)$$

$$s_k = \begin{cases} 2^{M-1} - k, & k < 2^{M-1} \\ 2^{M-1} + k - 2^M, & k \geq 2^{M-1} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $k$  为所发二进制信息的十进制数值;  $M$  为调制阶数。

当  $M=3$  时, FDPSPIM 的符号结构如图 1 所示, 图中的虚线方框表示标识脉冲“10”, “110”不同的标识脉冲将对解调产生不同的影响。

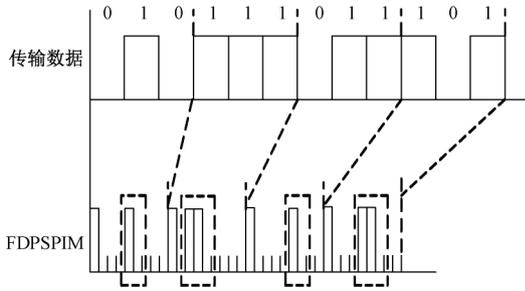


图 1 FDPSPIM 调制方式的符号结构

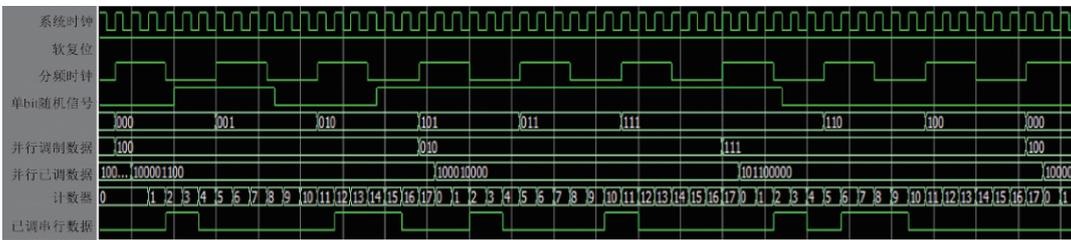


图 3 调制仿真图

通过分析 FDPSPIM 调制原理可以看出该调制方法对任意的信源信息, 初始时刻总是一个高脉冲, 结合该特点本文采用连贯式插入法的检测原理实现帧同步, 具体实现方式是对每一帧数据都插入一个同步码组作为帧同步头(也称为帧同步字)<sup>[13]</sup>, 对于帧同步头主要采用了长零串格式, 这样既不会产生数据的反转, 也不会额外的消耗功率, 同时结合过零点信息提取, 使用信号的跳变沿来获得信息数据的起始时刻, 其相位检测原理如图 4 所示。

## 2 FDPSPIM 仿真和实验

### 2.1 modelsim 软件仿真

FDPSPIM 调制系统的设计是将输入的串行比特序列转变为时隙脉冲输出的过程。主要由串/并转换、分频和调制等几个主要模块组成。本文主要是对 FDPSPIM 的  $M=3$  阶调制仿真和实际测试。FDPSPIM 调制系统原理如图 2 所示。

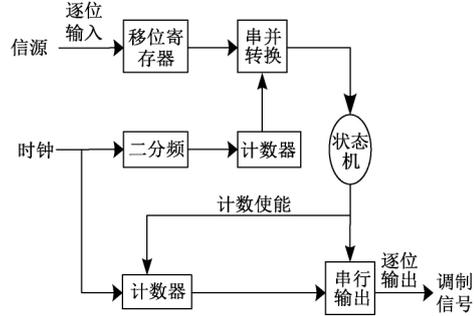


图 2 FDPSPIM 调制系统原理

图 2 中串并转换模块和移位寄存器, 主要实现串行输入比特流的数据分组, 在系统时钟的控制下把 3 比特的串行输入进行分组, 存储到 3 位的暂存寄存器中之后把 3 位的暂存寄存器的值送给状态机模块, 根据暂存寄存器 3 位数据的值通过对应调制转换表实现 3 位的原始输入转换成 9 位的调制输出, 同时在系统时钟控制的计数器下, 实现逐位的串行输出。

调制仿真图如图 3 所示, 从图 3 可以看出输入单 bit 随机信号信源的条件下, 分频时钟控制对输入信源的每一个 bit 做串并转换, 得到 3 bit 的并行调制数据, 通过状态机判断得到并行已调数据, 再通过系统时钟控制的计数器, 将并行已调数据逐位输出。结果表明理论调制方式和仿真波形结果保持一致。

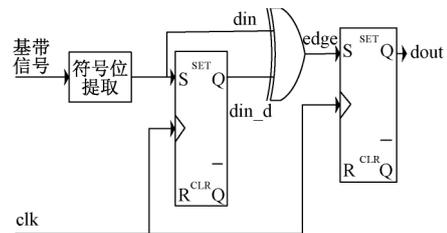


图 4 相位检测原理

FDPSPIM 解调器主要由帧同步模块、解调编码模块和并/串转换模块组成<sup>[14]</sup>。其作用是对经过大气信道传输、光/电转换、放大、滤波、整形处理后的基带信号进行解调,输出原始串行数据。具体的解调程序大体上为调制的逆过程。FDPSPIM 解调系统原理如图 5 所示。

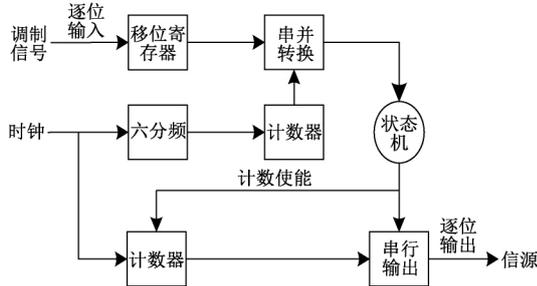


图 5 FDPSPIM 解调系统原理

解调为调制的逆过程,基本原理和调制大体相同,在得到解调同步时钟的前提下,既可以实现对于调制串行比特流的解调算法,主要还是由串并转换模块和移位寄存器,主要实现串行输入比特流的数据分组,在系统时钟的控制下把 9 位的时隙信号进行分组,存储到 9 位的暂存寄存器中之后把 9 位的暂存寄存器的值送给状态机模块,根据暂存寄存器 9 位数据的值通过对应解调转换表实现 9 位的调制输入数据转换成 3 位的原始比特数据,同时在系统时钟控制的计数器下,实现逐位的串行输出。

解调仿真图如图 6 所示,已调信号在进入接收端 FPGA 之后通过相位检测获得起始时刻,在已调信号计数器、原始数据计数器和系统时钟控制下对串行已调信号进行移位拼接,并行调制数据做移位输出得到原始的数据。

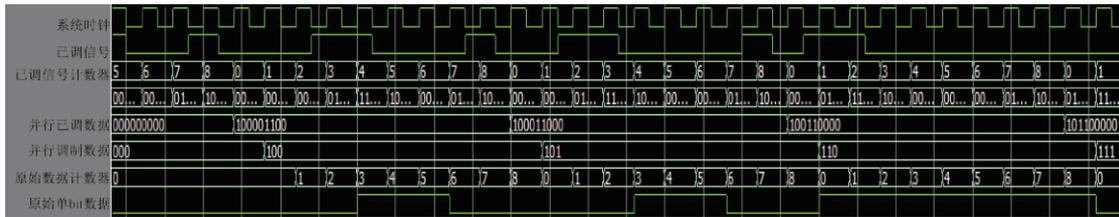


图 6 解调仿真图

## 2.2 实验测试

大气无线紫外光通信模型如图 7<sup>[15]</sup>所示。由图 7 可知,发射端输入数据首先送入 FPGA (ALTERA 公司的 CYCLONE IV 系列 EP4CE30F23C7 芯片) 中实现对于线性串行数据码流的分组调制,已编码信息经过 FPGA 后映射为设定调制阶数的 FDPSPIM 符号形式,然后经过电压驱动放大器核心 (OPA2613),将 FDPSPIM 信号放大,使其

驱动中心波长为 365 nm 的紫外 LED 灯。接收端 FDPSPIM 信号经过大气信道传输后,先经过滤光片减少背景噪声, PMT 使用滨松公司的侧窗型 CR293-01 型光电倍增管,得到数据经过接收电路处理,具体有放大电路,滤波电路,整形电路,电源和接口电平转换部分,其中转换后的电平信号在送入解调板 FPGA 型号与发射端相同,得到原始信号。

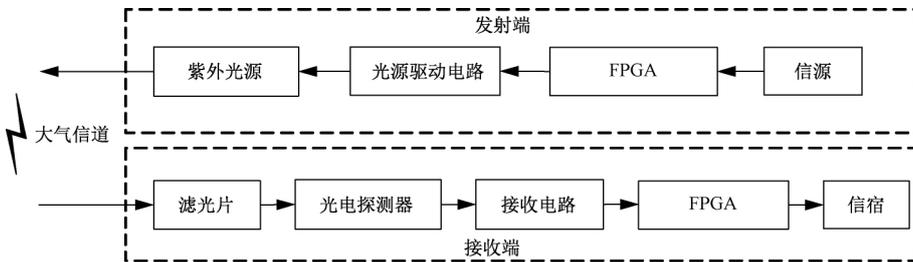


图 7 大气无线紫外光通信模型

通过 2.1 节的仿真验证了代码逻辑的正确性,修改功能代码逻辑来满足实际系统需求的通信速率,并且实际测试夜间空旷室外直视条件下 50 m 通信距离 FDPSPIM 调制接收信号和解调信号。

图 8、9 所示为采用上述调制解调方式的实际波形,实际经过光路的调制波形图和解调波形图。图 8 为接收端接收到的 0~7 已调信号,图 9 为将已调信号送入 FPGA 之后的原始比特数据。通过波形图可以看出通过光路之后的信号 FPGA 调制解调器完全正确。

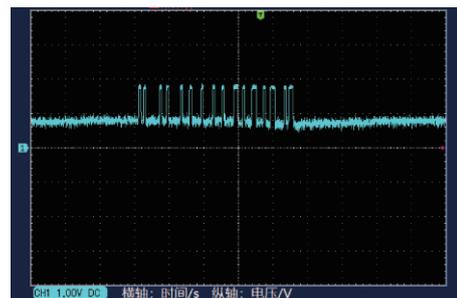


图 8 调制波形

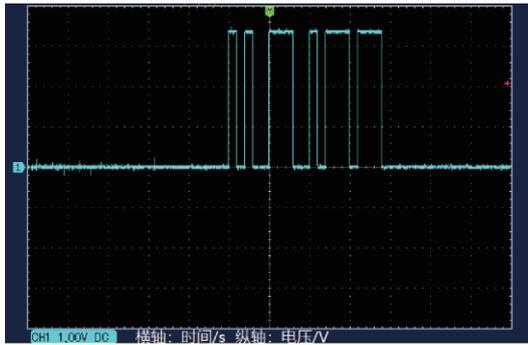


图 9 解调波形

### 3 结 论

本文使用 Verilog 硬件描述语言实现了基于 FPGA 的 FDPSPIM 调制解调器,通过插入帧头的方式解决了数据同步问题,并初步设计以 10 kHz 的持续时间为一个比特位的长度,其调制后的波形与 OOK 调制方式相比,可以看出 FDPSPIM 调制方式以牺牲带宽需求为代价,降低了发射功率需求,同时其特殊的编码方式有效地简化了程序设计的复杂度,本文设计主要是针对固定信源信息发送,后续可以继续研究对随机信源信息进行调制转换,同时讨论实际通信当中有关误码率的比较问题。

#### 参考文献

- [1] 吴忠良,梁菁,任杰,等. 紫外光通信系统现状及发展趋势分析[J]. 电子科技,2011,24(8):119-123.
- [2] YUAN R Z, MA J S. Review of ultraviolet non-line-of-sight communication[J]. China Communications, 2016, 13(6): 63-75.
- [3] HE X, XIE E, ISLIM M S, et al. 1 Gbps free-space deep-ultraviolet communications based on III-nitride micro-LEDs emitting at 262 nm[J]. Photonics Research,

2019,7(7): B41-B47.

- [4] 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.
- [5] 宋鹏,万杰峰,陈冲,等. 雾霾天气对紫外光通信的影响[J]. 光子学报,2018,47(5):0506004.
- [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] 田芃,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.
- [8] 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.
- [9] 于晓娜,李霁野. 新型紫外光通信系统调制解调器的 FPGA 实现[J]. 光通信技术,2009,33(12):14-16.
- [10] 刘金龙,左勇,张文博,等. 基于 FPGA 平台紫外通信系统的调制技术研究[J]. 光电子技术,2011,31(3):188-191.
- [11] 毛昕蓉,汪乐意,冀汶莉. 无线光通信中 DPIM 的调制/解调研究与 FPGA 实现[J]. 光通信技术,2018,42(6):42-45.
- [12] 万杰峰. 无线紫外光通信调制与解调技术研究[D]. 西安:西安工程大学,2019.
- [13] 杜勇. 数字通信同步技术的 MATLAB 与 FPGA 实现[M]. 北京:电子工业出版社,2013.
- [14] 张松,李筠. FPGA 的模块化设计方法[J]. 电子测量与仪器学报,2014,28(5):560-565.
- [15] 巩稼民,王智龙,汤琦,等. 紫外光通信 SDPPM 调制解调系统设计[J]. 光通信研究,2018(1):66-69.

#### 作者简介

杨永坤,硕士研究生,主要研究方向为无线紫外光通信调制解调技术。

E-mail:yyk\_receive@126.com