

基于低压汞灯的紫外光通信多进制调制系统实验

王鹏晖¹, 汪井源², 李建华², 刘学治¹, 韦 玮^{1*}

(1. 南京邮电大学 电子与光学工程学院、微电子学院, 南京 210023;

2. 中国人民解放军陆军工程大学 通信工程学院, 南京 210007)

摘要:针对当前日盲紫外光通信中低压汞灯采用二进制频移键控(2FSK)调制传输速率低的问题,提出了一种利用多进制频移键控(MFSK)对低压汞灯调制的方案。探测器采用紫外增强型雪崩光电二极管(APD),实验系统采用四进制频移键控调制低压汞灯,每个码元传输 2 比特的信息,实现低压汞灯最大调制速率为 15 kHz,最大传输速率达到 30 kb/s,较二进制频移键控调制成倍地提高了低压汞灯的传输速率。

关键词:日盲紫外; 低压汞灯; 多进制调制; 频移键控; 雪崩光电二极管

中图分类号:TN23 文献标识码:A 文章编号:1002-5561(2019)08-0021-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.08.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Experimental of ultraviolet communication multi-band modulation system based on low pressure mercury lamp

WANG Penghui¹, WANG Jingyuan², LI Jianhua², LIU Xuezhi¹, WEI Wei^{1*}

(1.College of Electronic and Optical Engineering & College of Microelectronics, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China; 2. College of Communication Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China)

Abstract: Aiming at the low transmission rate of low-voltage mercury lamp modulated by binary frequency shift keying (2FSK) in solar blind ultraviolet communication, a scheme of modulating low-voltage mercury lamp by multi-band frequency shift keying (MFSK) is proposed. The detector uses ultraviolet enhanced avalanche photodiode(APD). The experimental system uses the quaternary frequency shift keying to modulate the low-voltage mercury lamp. Each symbol transmits 2 bits of information. The maximum modulation rate of the low-voltage mercury lamp is 15 kHz and the maximum transmission rate is 30 kb/s. Compared with the binary frequency shift keying modulation, the transmission rate of the low-voltage mercury lamp is doubled.

Key words: solar blind ultraviolet; low pressure mercury lamp; multi-band modulation; FSK; APD

0 引言

紫外光通信系统主要由发射端、信道和接收端组成,其中紫外发射光源主要有低压汞灯、紫外发光二极管(UV-LED)。早在 20 世纪 80 年代,低压汞灯作为光源就已被广泛采用,美国 Naval Ocean System Center 的 M. Geller 等人采用功率为 25 W 的 2 个水银放电

收稿日期:2019-03-20。

基金项目:江苏省光通信工程技术研究中心资助项目(ZXF20170101)资助。

作者简介:王鹏晖(1994-),男,硕士研究生,就读于南京邮电大学电子与光学工程学院、微电子学院,主要从事紫外光通信方面的研究,现阶段主要研究方向为基于低压汞灯的多进制光源调制方面的研究。

* 通信作者:韦玮(E-mail: weiwei@njupt.edu.cn)。



灯作为发射光源,探测器采用前端加装紫外滤光片的光电倍增管,通信速率最高达到 2.4 kb/s^[1]。2001 年,美国通用电气公司以低压汞灯为光源,为美国海军成功研制了一套视距紫外光通信系统并装备海军部队,通信速率达到 4.8 kb/s,误码率为 10^{-6} ^[2,3],通信距离达到 2 km。2008 年,国内重庆大学采用二进制频移键控(2FSK)调制方式,低压汞灯为光源,在 100 m 范围内实现了速率为 4.8 kb/s 的语音通信系统;次年,通信速率提高到 9.6 kb/s,误码率小于 10^{-5} ^[4]。随后,紫外激光器在紫外光通信中被广泛研究,重庆大学采用紫外激光器实现室外 10 m、传输速率为 2.4 kb/s 的通信^[4]。进入 21 世纪以来,随着发光二极管(LED)的快速发展,利用紫外 LED 光源开展日盲紫外光通信引起众多学者的关注。2012 年,西安理工大学赵太飞团队采用多

个 365 nm 的紫外 LED 作为光源,在 170 m 范围内实现了速率为 115 kb/s 的通信系统^[5]。2014 年,中科院上海技物所汤心溢等人采用紫外 LED 和光电倍增管(PMT)探测器设计了一套通信速率为 2.4 kb/s 的紫外光语音通信系统^[6]。

然而,由于紫外激光器体积和重量较大,不便携带;而日盲紫外 LED 光功率小(仅为毫瓦级,目前市售单个 265 nm 紫外 LED 的光功率为 1 mW,280 nm 的光功率为 3 mW),无法满足当前机载及无人机组编队在日盲紫外光通信的要求。因此,采用低压汞灯作为光源用于日盲紫外光通信的方案又被再次提出。目前,低压汞灯具有光功率大、体积小、重量轻和价格低等优点,其缺点是传输速率较低。为了解决传输速率较低的问题,本文提出采用多进制频移键控(MFSK)调制的方案提高传输速率。

1 系统构成及原理

整个系统分为发射端和接收端两部分,具体包括场可编程门阵列(FPGA)信号发射模块、调制驱动电路、低压汞灯、雪崩光电二极管(APD)探测器、数据采集卡和计算机,如图 1 所示。

信号发射模块产生 4 种不同频率的载波信号 f_1 、 f_2 、 f_3 和 f_4 ,4 种载波信号分别代表 00、01、10 和 11,并以一定的频率进行切换输出,经过调制驱动电路,驱动光源(低压汞灯)发出 4 种不同频率的光信号,通过大气信道传输至接收端。在接收端,APD 探测器将接收到的光信号转换并放大为不同频率的模拟电信号,数据采集卡捕捉模拟电信号送入 FPGA 进行数字处理,最后通过计算机显示出正确的原始信号。

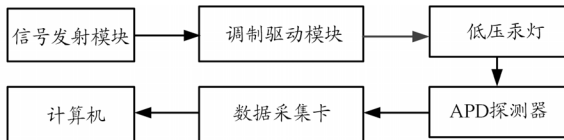


图 1 系统原理框图

2 四进制调制实现

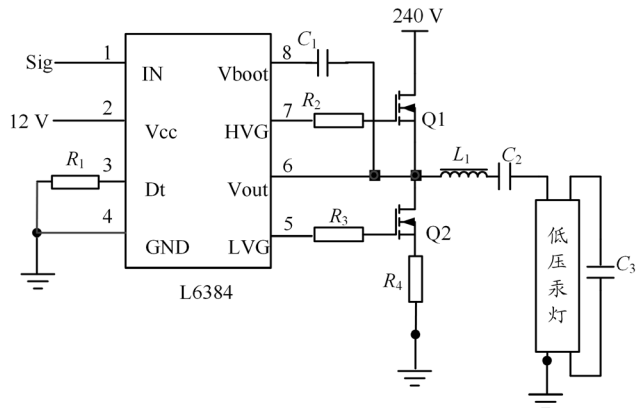
2.1 半桥谐振开关电路

低压汞灯属于一种气体放电灯,启动过程分为 3 个过程:预热、点火和正常工作。一般需要配合电子镇流器作为驱动电路完成上述过程,在功率输出级通常采用半桥谐振开关电路,改变输入端信号频率来调节电流达到调光目的,进而实现对灯的频率调制^[7]。

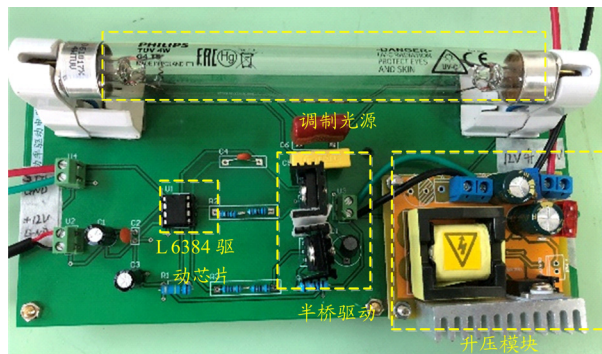
2.2 电子镇流芯片 L6384 工作原理

L6384 是一款 8 引脚高压半桥驱动芯片,具有一个半桥驱动结构,可以驱动 2 个 N 沟道的功率 MOS 管,最高可以支持 600 V 的电压。芯片工作电压由引脚 2 接入,信号的输入端为引脚 1,功率管 Q1 控制引脚 7 输出,其相位电平与输入的信号保持一致,引脚 5 的输出信号是引脚 7 输出信号的互补波形。

整个半桥驱动过程由芯片内部完成,无需外界干预。由引脚 1 输入 TTL 信号,引脚 5 和引脚 7 上的输出信号频率就会随引脚 1 的高低电平相应变化,从而决定 Q1 和 Q2 的轮流导通与关闭。同时,死区时间由芯片的引脚 3 控制,在芯片内部集成了一个电流源,在引脚 3 上外接一个电阻形成一个控制电压由芯片内部的电路控制死区时间,死区时间可以避免 Q1 和 Q2 同时导通而烧毁器件。调制驱动模块如图 2 所示。



(a) 电路图



(b) 实物图

图 2 调制驱动模块

2.3 工作载频确定

在图 2(a)中,负载灯与电容 C_3 并联,与电容 C_2 ,电感 L_1 串联。令 $C_E = \frac{C_2 C_3}{C_2 + C_3}$,自然谐振频率 $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_E}}$,工作频率 $f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$ 。取 $L_1 = 2.3 \text{ mH}$, $C_2 = 0.1 \text{ }\mu\text{F}$,

$C_3=0.01\ \mu\text{F}$,可求出 $f_0=35\ \text{kHz}$ 。当在工作频率 f_0 时,电路阻抗最小,电流最大,容易导致电路烧毁。实验实测时,低压汞灯在 $20\sim 120\ \text{kHz}$ 均能正常工作,考虑到载波频率选取时应满足以下几个条件:①保证灯的正常工,避免损坏;②载波频率尽可能高,保证调制速率上限可以较高;③载频之间间隔合适(过大引起频带资源浪费,过小无法区分载频频率,为接收解调带来困难)。最终选取 f_1 、 f_2 、 f_3 和 f_4 4种载频分别为 $45\ \text{kHz}$ 、 $60\ \text{kHz}$ 、 $75\ \text{kHz}$ 和 $90\ \text{kHz}$ 。

3 四进制频移键控(4FSK)信号解调

本文构建的实验系统调制解调等处理均是基于FPGA开发平台实现的,可以很好地实现信号的调制与接收。

解调端FPGA模块设计主要包括锁相环时钟、Rx接收、鉴频处理和拖尾处理4个模块。锁相环时钟模块通过对系统时钟进行分频为内部模块提供计数器进行时钟计数。Rx接收模块主要作用是接收串行输入的数据。鉴频处理模块主要是利用计数器计数的原理对4FSK信号进行鉴频。4FSK信号包括4种不同频率的信号,当发送数据为“00”时,输出固定频率 f_1 ;当发送数据为“01”时,输出固定频率 f_2 ;以此类推,发送数据“10”和“11”时分别输出固定频率 f_3 和 f_4 。以上4种频率对应的输出时间均为 T 。计数器在时间 T 内对不同的载波周期数进行计数,假设在 T 时间内对载波 f_1 、 f_2 、 f_3 和 f_4 分别调制为 M_1 、 M_2 、 M_3 和 M_4 ,那首先可以在计数器内设定3个阈值 P_1 、 P_2 和 P_3 ,且 $P_1=(M_1+M_2)/2$ 、 $P_2=(M_2+M_3)/2$ 、 $P_3=(M_3+M_4)/2$ 。当计数器内对载波的周期计数结束,与内部设定的阈值进行比较,当 $M_n < P_1$ 时($n=1,2,3,4$),即系统将其判定为 f_1 ,代表数据“00”;当 $P_1 < M_n < P_2$ 时,代表数据“01”;当 $P_2 < M_n < P_3$ 时,代表数据“10”;当 $M_n > P_3$ 时,代表数据“11”,这样就可以将4FSK信号解调出来。

由于低压汞灯在频率切换时存在拖尾问题,如图3所示。该问题是由于低压汞灯自身的负阻特性造成的,只能进行优化,无法消除,因此我们在解调时需要加入拖尾处理模块。

当 $M_n=P_1$ 、 P_2 或者 P_3 时,就会引入计数器计数错误,信号的拖尾现象是该问题的根本原因。对拖尾进行处理时,我们首先读取该段时间 T 内的数据信号,判断该时间段内高低电平数量,如果高电平数大于低电平数,输出即为 M_n+1 ,反之仍然为 M_n 。这样就能将4FSK信号解调出来。

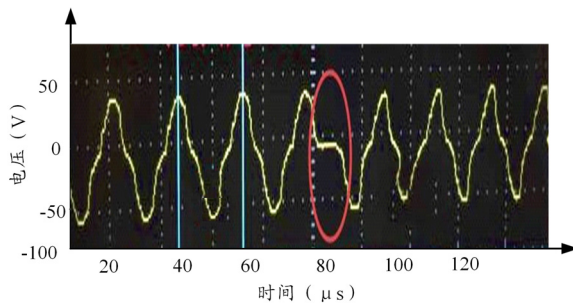


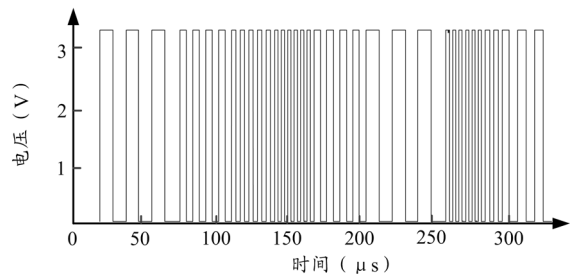
图3 低压汞灯拖尾信号

4 系统测试与结果

调制电路中使用带有稳压功能的升压模块,具有输出电压稳定、功率因数大等优点。将该模块与调制电路集成在同一块电路板上,方便进行实验。将收发端代码生成jic文件后分别固化至两端FPGA中,控制其串口以不同的载频对低压汞灯进行调制和数据发送。考虑到在发射端需保证低压汞灯的正常工,发射系统刚开始10 s内以单一频率进行工,10 s后再进行4FSK调制。原始数据通过FPGA加载到调制系统上,调制速率为 $15\ \text{kHz}$,数据传输速率为 $30\ \text{kb/s}$,光信号通过大气信道传输,接收端采用紫外增强型APD提高对日盲紫外光的响应度,将接收光信号转换为电信号,送入FPGA进行解调,最后进入PC机进行数据显示恢复。通过实验室内、走廊和室外等不同场景测试,光源调制速率为 $15\ \text{kHz}$ 时获得各部分的信号如图4所示。

实验结果表明:实验室内效果最好,在室内最大距离 $6\ \text{m}$ 时接收信号强度依然很强,为 $3\ \text{V}$ 左右,如图4(c)所示;在走廊内进行实验时,需要进行光准直,因此在APD接收模块前加装光学天线,如图4(d)所示为走廊内 $20\ \text{m}$ 时接收信号波形,信号强度较强达到近 $1400\ \text{mV}$;随着距离增加到 $30\ \text{m}$ 时,接收信号强度下降明显,如图4(e)所示为 $300\ \text{mV}$,但接收波形载频频率差别依然较明显。当距离继续增加时,接收信号强度减小与信噪比减小。

在室外时,由于受到太阳光等背景噪声影响,除



(a) 发送信号

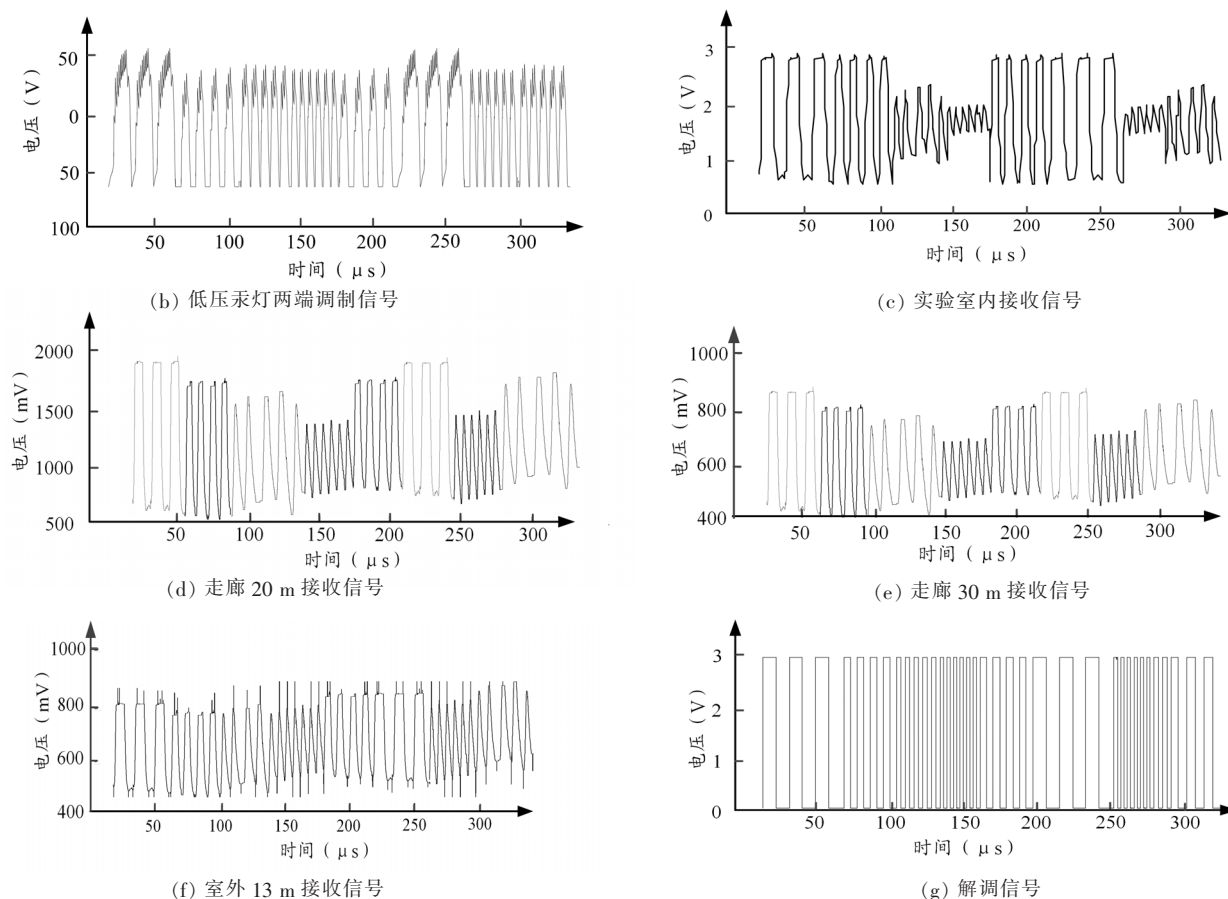


图4 各端口信号

接收端光学天线外,在接收端还需要加装日盲滤光片。如图4(f)所示,由于滤光片的存在,透过滤光片进入探测器的光信号相对减弱,通信距离达到13 m时接收信号强度也衰减为300 mV左右。虽然上述发射信号接收场景、距离不同,但各载频信号频率区分度均比较高,均可以成功地解调并还原成原始数据,即为00 01 10 11 01 00 11 10,如图4(g)所示。另外,本文搭建的实验系统在走廊内通信距离可达30 m,对比本课题组采用日盲紫外LED达到的实验室内4 m通信距离明显增加^[8],也明显高于单个日盲紫外LED的通信距离^[8],且本文发射端暂未采用光学天线,等后期定制光学天线后通信距离还可以进一步提高。

5 结束语

本文提出了一种四进制频移键控调制低压汞灯的方法,搭建了低压汞灯实验通信系统,给出了调制端与解调端设计方案,采用低压汞灯发射光源,保证了光源功率可以到达瓦级。采用码元携带信息量较大的4FSK调制方式对低压汞灯进行调制,最终提高了系统数据传输速率,通过实验室内、走廊和室外等多

场景性能测试,最大调制速率达到15 kHz,系统数据传输速率达到30 kb/s,高于目前文献报道的10 kb/s,为日盲紫外光通信系统提供了一种新的调制方案。

参考文献:

- [1] GELLER M, JOHNSON G B, YEN J H, et al. Short-range UV Communication Links [C]// Proc. The Tactical Communication Conference, April 28–30, 1992, Fort Wayne, USA. NEW York: IEEE, 1992: 1–50.
- [2] JIA H, CHANG S, YIN H. Study and design on high-data-rate UV communication system [C]// Proceedings of SPIE, May 2–5, 2005, Shanghai, China. Los Angeles: SPIE, 2005: 440–446.
- [3] XU G. Ultraviolet communications[J]. Communications Today, 2000, 4: 6–7.
- [4] 向平,肖沙里.基于FPGA平台的紫外光通信系统的解调技术的研究[J].光电子技术,2008,28(2):86–89.
- [5] 赵太飞,王小瑞,柯熙政.多LED紫外光通信系统设计与性能分析[J].红外与激光工程,2012,41(6):1544–1549.
- [6] 罗易雪.紫外通信信道特性研究以及语音通信平台搭建[D].上海:中国科学院研究生院(上海技术物理研究所),2014.
- [7] 蓝玉侦,肖沙里,罗亦军,等.日盲紫外光通信系统发送及调制技术的研究[J].光电子技术,2007,27(3):206–211.
- [8] 杨宇,陈晓红,尤波.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.