

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 2-0272-05

基于现场可编程门阵列的短波紫外光通信发射系统

王 玺¹ 肖沙里¹ 赵 明¹ 施 军¹ 姜蓉蓉^{1,2} 黄 睿¹

(¹ 重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030)
(² 重庆工商大学实验与实验设备管理处, 重庆 400067)

摘要 采用数字化的方法,从实际工程应用出发,开发了一套稳定性好、实用性强的“短波紫外光”通信发射系统。该系统以低压汞灯作为光源,采用现场可编程门阵列(FPGA)作为核心控制器件,将状态控制、数据通信、调制编码集成一体,整合程度高,具有抗干扰能力强、稳定可靠、通信性能优异、维护保养和改进升级方便等优点。对该系统的传输距离、误码率、数据传输速率等一系列实验表明,系统可靠的通信性能满足短距离语音通信的要求,在 200 m 距离处可以达到 2.4 kbit/s 的通信速率。

关键词 光通信;短波紫外光;发射;调制;现场可编程门阵列

中图分类号 TN929.12 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s2.0272

Short-Wavelength Ultraviolet Communication Transceiver System Based on Field Programmable Gate Array

Wang Xi¹ Xiao Shali¹ Zhao Ming¹ Shi Jun¹ Jiang Rongrong^{1,2} Huang Rui¹

¹ Optoelectronic Technologies and System Key Lab of Education Ministry, Chongqing University, Chongqing 400030, China
² Laboratory & Facility Management Division, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China

Abstract This paper describes a new short-wavelength ultraviolet communication transceiver system, which is steady and practical, based on digital technology applying to a real engineering. The low-pressure mercury lamp is used as ultraviolet (UV) source in the system, and field programmable gate array (FPGA) as the core controller integrates for state controlling, data exchanging, modulating and coding. The system has excellent advantages in antijamming ability, maintaining and improvement upgrade. At last, the experiment results illustrate the stable transceiver system is suitable for real-time speech communication in short distance. The fact shows that the short-wavelength ultraviolet communication system can get a data rate of 2.4 kbit/s in the range of 200 m.

Key words optical communications; short-wavelength ultraviolet; transceiver; modulation; field programmable gate array

1 引 言

利用短波紫外光独特的“日盲”特性进行通信,相对无线电通信技术具有更加灵活、更强的抗干扰性能,以及难以截获等诸多特点,还具备一定的非视距通信能力,在军事领域的优越性十分突出^[1~5]。

本套系统可以采用的紫外光源有两种:低压汞灯和紫外发光二极管(LED)。美国林肯实验室在 2006 年设计了基于紫外 LED 的通信系统^[6],但目前大功率的短波紫外 LED 制造技术存在困难,其功

率小,发光效率低,实用中还有不少困难需要解决。

采用低压汞灯的短波紫外光通信系统尽管其体积与便携性不如基于 LED 的通信系统,而且控制起来也更为复杂,但目前仍然是最为行之有效的方案,并且已在外国军队中装备。

本系统的设计采用数字化的方法,使用现场可编程门阵列(FPGA)作为控制核心,将状态控制模块、数据通信模块、调制编码模块高度整合,不但克服了纯模拟系统的稳定性差、可靠性不足、数据传输

作者简介: 王 玺(1983—),男,硕士研究生,主要从事光通信方面的研究。E-mail: 20070802007@cqu.edu.cn

导师简介: 肖沙里(1953—),男,教授,博士,主要从事光电探测与成像方面的研究。E-mail: xiaoshali@cqu.edu.cn

速率低、误码率较高、难以控制等缺点，而且使得整个系统集成度高，功能划分清晰，维护保养和改进升级也十分方便。实验证明该系统已经可以实现近距离语音通信。

2 光源的选择

目前主要供选择的光源有两种：紫外 LED 和低压汞灯。对于不同的光源，设计的发射系统有很大不同。选定了光源才能决定后面的设计。所以，光源的选择决定了整个发射系统的设计思路与方案。

基于紫外 LED 的通信系统具有体积小、控制方便等优点，而且编码方式也比较成熟，典型的方式是脉冲宽度调制 (PPM)，以及改进型 PPM 方式^[7,8]。但是由于目前短波紫外 LED 制造工艺水平有限，其发光效率低、功率小，即使采用了 LED 阵列的方式，其总的发射功率也很小，要实现非视距传输还是十分困难的。美国林肯实验室将 240 支紫外 LED 做成了阵列，作为发射光源，其峰值功率约为 40 mW，仅在 11 m 处达到了 2.4 kbit/s 传输速率的非视距通信^[1]。鉴于短波紫外 LED 技术还不够成熟，没有足够高的功率，光源仍然采用常见易得的低压汞灯，生产商提供了其频谱特性，并声称在 254 nm 典型效率为 40%，如图 1 所示。可见，低压汞灯不仅功率高，而且发光效率相对较高，十分适合于目前的系统研制。

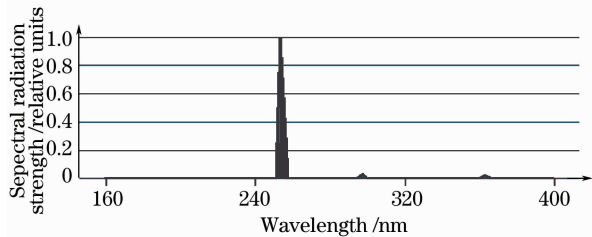


图 1 Ozone-free 型低压汞灯辐射光谱

Fig. 1 Spectrum of Ozone-free UV lamp

3 调制驱动系统总体设计

传统的驱动方式一种是采用纯模拟电路搭建，另一种是采用专用集成电路设计^[9,10]。但是它们都存在两个主要问题，首先是整合度不够，抗干扰性差；其次，设计主要针对工作在单一频率的模式，使得调制模块的接入十分困难^[11]。

而数字化的调制驱动系统，采用 FPGA 作为核心，将半桥驱动前端的控制模块整合起来，并且集成了调制编码模块，所有功能区域都采用内部衔接，集

成度高，抗干扰性能好。同时，为本系统以后的维护和改进工作提供了极大的方便。

本系统以 FPGA 为核心，整合了调制与驱动两个部分，显得十分简洁，其结构如图 2 所示。从通用异步接收/发送装置 (UART) 输出的数据在 FPGA 内可以很方便地得到调制。然后，用调制后的信号来控制半桥电路。同时，FPGA 还实时监测紫外灯的工作状态。当电流或电压超过设定阈值时，关闭半桥电路，起到过流和过压保护的作用。半桥驱动采用集成芯片 L6384 可以获得很好的效果，它根据从 FPGA 得到的信号不断改变控制信号，从而使两个半导体金属氧化物 (MOS) 管推挽式交替导通，驱动紫外灯管工作。

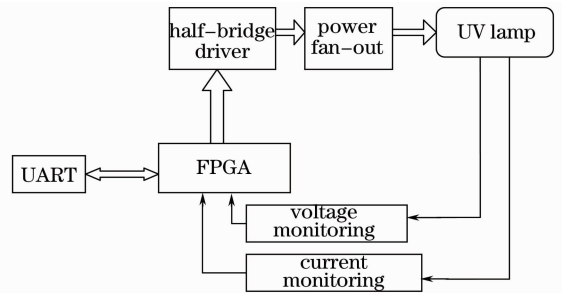


图 2 紫外通信发射系统结构框图

Fig. 2 Structure diagram of transmitter system of UV communication

控制灯管的过程包含几个状态。这些状态必须按照一定的限制条件进行转换，否则容易使灯管过早老化，不能高效率地辐射出短波紫外光，甚至还可能烧坏灯管。在 FGPA 中，使用状态机可以非常方便简洁地实现上述过程，其状态转化图如图 3。

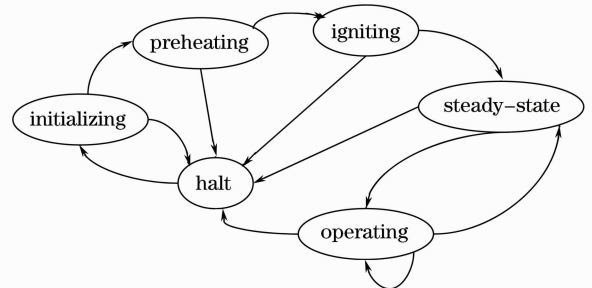


图 3 紫外灯状态转换图

Fig. 3 Diagram of state transition of UV lamp

现分别对每个状态作简单说明：

1) 初始阶段

将 FPGA 初始工作频率设置为 100 kHz 信号并保持 200 ms，目的是避免提前点火造成灯的加载电压过大而损坏整个电路。

2) 预热阶段

预热可以降低低压汞灯的点火电压,同时起到保护灯丝减缓老化的作用。这个阶段通过 FPGA 来控制整个过程,即可以选择所需要的电流。这是一个逐次调节的过程,时间间隔约 125 ns。当检测到的电流比预期的要大或者小时,FPGA 将相应地提高或者降低频率。

3) 点火阶段

这个阶段中,FPGA 降低频率,增加电压来点亮灯管。一旦点火,灯管的加载电压将急剧降低,FPGA 检测到点火以后马上会使电路转入下一状态。

4) 稳定阶段

点火之后,设定 FPGA 的输出为一个稳定的频率。

5) 工作阶段

在这个阶段,FPGA 通过对两个不同的工作频率的控制,实现二进制数字调制(2FSK)调制。此时和预热阶段不同,两个频率之间可以不使用逐次调整的方法,因为灯管内的气体在每次频率改变之后要经过一段时间才能稳定,即产生了所谓的“过渡频带”。同时,也说明了这两个频率的交替变化是不能高速进行的。这正是制约整个系统调制速率的主要原因之一。

6) 停止阶段

这不同于关闭电路,当 FPGA 检测到电路系统电压和电流出现异常情况时,自行关闭半桥电路。从而起到保护电路的作用,特别是在高电压下工作的 MOS 管,它极易因操作不当或其他不可见原因导致电路异常而烧毁。

4 调制方案

调制采用简单易行的二进制数字调制。这种调

制方法具有控制方便、抗干扰性能好、信号动态范围大、解调方案灵活等诸多优点,十分适合低速率语音通信的环境。需要特别指出的是,此处的调制不是调制紫外光的频率,而是调制控制电流的频率,这和光学探测中涉及到光波本身的频率、相位不同,也和一般无线电通信有所区别。

在 2FSK 调制中,若正弦载波的频率随二进制基带信号在 f_1 和 f_2 两个频率点间变化,即二进制移频键控信号可以看成两个不同载波的二进制振幅控制信号的叠加。设二进制基带信号的 1 符号对应于 f_1 ,0 符号对应于载波频率 f_2 ,则 2FSK 信号的时域表达式为

$$e_{2FSK}(t) = \left[\sum_n a_n g(t - nT_s) \right] \cos(\omega_1 t + \varphi_n) + \left[\sum_n b_n g(t - nT_s) \right] \cos(\omega_2 t + \theta_n), \quad (1)$$

式中当发送概率为 P 时, $a_n = 0$; 当发送概率为 $1-P$ 时, $a_n = 1$ 。 b_n 是 a_n 的反码, φ_n 和 θ_n 分别代表第 n 个码元的初始相位。在 2FSK 中 φ_n 和 θ_n 不携带信息,通常可以令它们为 0。因此 2FSK 的时域表达式可以化简为

$$e_{2FSK}(t) = \left[\sum_n a_n g(t - nT_s) \right] \cos(\omega_1 t) + \left[\sum_n \bar{a}_n g(t - nT_s) \right] \cos(\omega_2 t). \quad (2)$$

常见的 FSK 调制的方法有两种:

1) 直接调频法:用数字基带矩形脉冲控制一个振荡器的某些参数,直接改变振荡频率,输出不同频率的信号。如图 4 所示,这是一个数字式频率合成器 DDS (Direct Digital Synthesizer) 的简化结构。它利用数字基带信号控制 DDS 的频率字输入,实现 FSK 调制。模拟其产生的信号如图 6 所示。

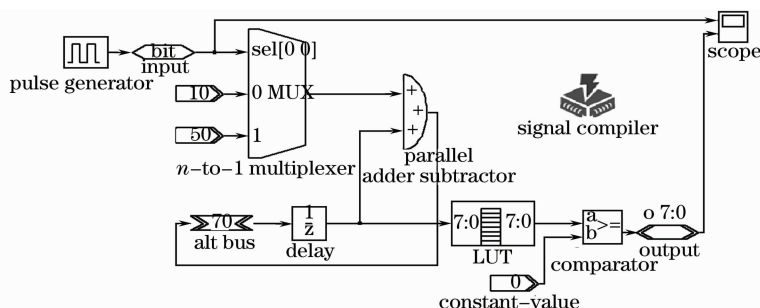


图 4 第一种 2FSK 调制模型

Fig. 4 First modulation model of 2FSK

2) 频率键控法:用数字矩形脉冲控制电子开关在两个振荡器之间进行转换,从而输出不同频率的信号。因为从外部晶振可以很容易通过分频处理得到两个不同的频率,而且仅仅只需要对分频器进行

简单的参数设置就可以满足不同的调制效果。这使得对两个 MOS 开关管的控制变得十分易行,整个设计也颇为简单。更重要的是,经过调制的数字信号可以直接用于控制,而不用进行数模转换,这是由

半桥驱动芯片 L6384 固有特性,及其巧妙的设计决定的。图 5 给出了用 DSP Builder 设计的模型。此处省略了分频器,不同的频率用不同的激励脉冲源代替。其模拟效果如图 6 所示。需要指出的是图 5 中 f1 和 f2 并没有使用实际的频率,而是采用了差别较大的频率,这也是为了展示更加显著的调制效果。

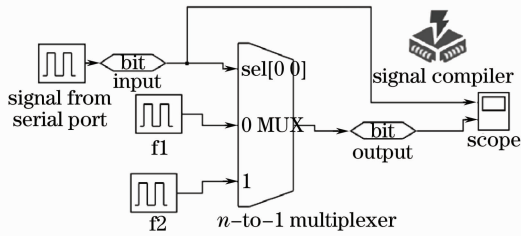


图 5 第二种 2FSK 调制模型

Fig. 5 Second modulation model of 2FSK

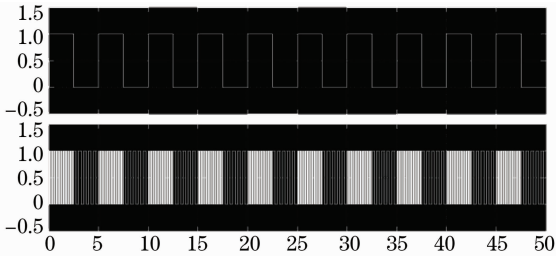


图 6 2FSK 仿真波形

Fig. 6 Simulation waveforms of 2FSK model

实验对两种方法的效果进行了对比,结果并没

有太大的差别。不过考虑到占用 FPGA 资源的情况,第二种方法更为紧凑。多次实验之后,实际使用了该方法。图 7 给出了实物照片。

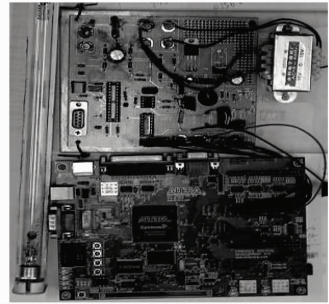


图 7 发射部分实物图

Fig. 7 Photo of the transmitter side

5 测试及分析

本系统在野外进行了实验,时间为冬季傍晚,小雨有雾,温度为 10 ℃。

图 8 给出了在 200 m 处、速率为 2.4 kbit/s 时,接收端得到的调制以后的波形。其中密集处代表调制信号高电平,稀疏处代表低电平。从图中可以看到明显的疏密特征,但是和仿真情况比较可以清楚地看到,两个频率交替处出现了干扰。这也正是出现误码的地方,限制了通信速率。图 9 是经过整形后的波形。图 10 是解调过后的波形,此波形的优劣要取决于解调时的方法。

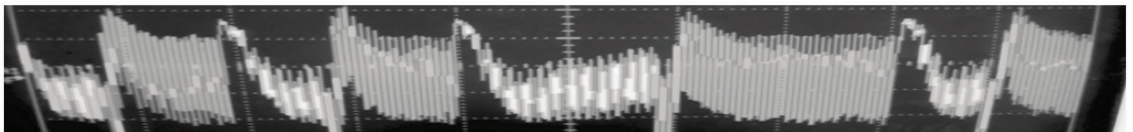


图 8 接收端得到的 2FSK 波形

Fig. 8 Waveforms of 2FSK detected by receiver side

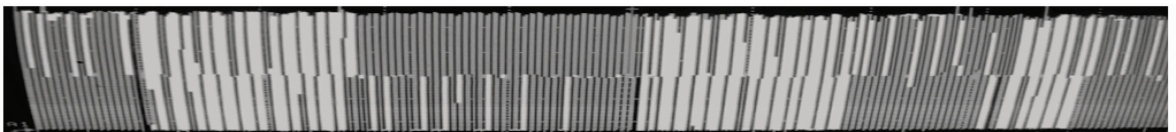


图 9 2FSK 信号在接收端整形后的波形

Fig. 9 Waveforms of 2FSK shaped by receiver side

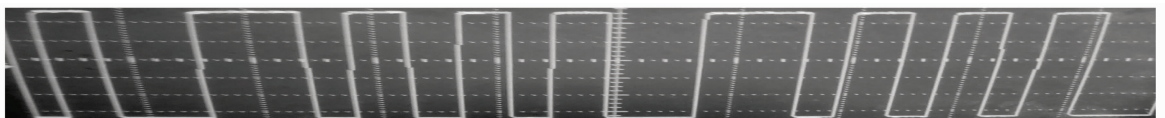


图 10 2FSK 解调后的波形

Fig. 10 Demodulated waveforms from 2FSK

误码率的实验测试结果如表 1 所示

表 1 误码率测试结果

Table 1 Experiment result of bit error rate

| Distance /m | Bit error rate | |
|----------------|----------------|----------------|
| | at 2.1 kbit /s | at 4.8 kbit /s |
| 50 | $<10^{-7}$ | $<10^{-7}$ |
| 100 | $<10^{-7}$ | $<10^{-7}$ |
| 150 | $<10^{-7}$ | $<10^{-3}$ |
| 200 | $<10^{-3}$ | $<10^{-3}$ |

语音通信仅仅考虑 2.4 kbit/s 及其以上的传输率。可以看出,在 2.4 kbit/s 时,对于容错性较强的语音通信来说可以达到 200 m 的距离。而当速率提高一倍以后,只能在 150 m 处进行有效通信。

对于非视距特性,效果并不理想,试验中使用了功率为 16 W 的低压汞灯,也仅仅在遮挡物很小,而且比较靠近发射源时有效。所以对于所谓非视距传输,估计对发射功率的要求是相当高的,特别是天气条件不好的时候,比如多雾。

实验结果表明,以后工作的重点还是在于光源的改进,主要是提高发光效率和增加功率两方面。

6 结 论

本系统的设计采用数字化的方法,使用 FPGA 作为控制核心,将状态控制、数据通信、调制编码集成一体,不仅减小了系统综合的难度,而且大大提高了抗干扰性能,增强了通信性能。该套系统稳定可靠,简洁实用。各个模块功能划分清晰,十分便于维护、管理以及改进。实验证明,通信距离和速率达到设计目标,稳定性显著提高,取得了满意的效果,可以满足近距离语音通信的要求,在 200 m 距离处可以达到 2.4 kbit/s 的通信速率。

参 考 文 献

- 1 Manijeh Rzaeghi. Deep ultraviolet light-emitting diodes and photodetectors for UV communications [C]. *SPIE*, 2005, **5729**: 30~40
- 2 Gary A. Shaw, Melissa L. Nischan, Mrinal A. Iyengar *et al.*. NLOS UV communication for distributed sensor systems[C]. *SPIE*, 2000, **4126**: 83~97
- 3 Tang Yi, Ni Guoqiang, Wu Zhongliang *et al.*. Research on channel character of solar blind UV communication[C]. *SPIE*, 2007, **6829**: 682907
- 4 Jia Honghui, Yang Jiankun, Chang Shengli *et al.*. Study and design on high data rate UV communication system[C]. *SPIE*, 2005, **6021**: 602110
- 5 D. Reilly, D. Moriarty, J. Maynard. Unique properties of solar blind ultraviolet communication systems for unattended ground sensor networks[C]. *SPIE*, 2004, **5611**: 244~254
- 6 Gary A. Shaw, Andrew M. Siegel, Joshua Model. Extending the range and performance of non-line-of-sight ultraviolet communication links[C]. *SPIE*, 2006, **6231**: 62310C
- 7 Fan Yangyu, Bai Bo, Huang Aiping *et al.*. Pulse-position-width modulation scheme in wireless optical communication system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 1883~1887
樊养余,白勃,黄爱萍等.无线光通信中的脉冲位置宽度调制技术[J]. *中国激光*, 2008, **35**(12): 1883~1887
- 8 Cheng Gang, Wang Hongxing, Sun Xiaoming *et al.*. A new modulation scheme of optical wireless communications [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 1914~1918
程刚,王红星,孙晓明等.一种新型的无线光通信调制方法[J]. *中国激光*, 2008, **35**(12): 1914~1918
- 9 Xiao Shali, Xu Zhiming, Liu Yu *et al.*. Design of hardware in solar blind UV communication system [J]. *Wireless Opto-Communication*, 2006, **6**(10): 44~46
肖沙里,徐智敏,刘宇等.日盲紫外光通信硬件设计[J]. *无线光通信*, 2006, **6**(10): 44~46
- 10 Lei Xiaoming, Xiao Shali, Lan Yuzhen *et al.*. Development of the modulation system in solar blind UV communication system [J]. *Optoelectronic Technology*, 2007, **27**(3): 161~165
雷小明,肖沙里,蓝玉侦等.日盲紫外光通信系统中调制系统的研制[J]. *光电子技术*, 2007, **27**(3): 161~165
- 11 Xiang Ping, Xiao Shali, Gao Hongjie *et al.*. Research on demodulation technology of ultraviolet communication system based on FPGA[J]. *Optoelectronic Technology*, 2008, **28**(2): 86~88
向平,肖沙里,高红杰等.基于FPGA平台的紫外通信系统的解调技术的研究[J]. *光电子技术*, 2008, **28**(2): 86~88