

文章编号 1004-924X(2020)12-2710-09

可见光车灯信号发送控制装置

邓健志^{1*}, 程小辉²

- (1. 桂林理工大学 信息科学与工程学院, 广西 桂林 541004;
2. 桂林理工大学 广西嵌入式技术与智能系统重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要:针对车联网中的通信需求,本文提出了一种即插即用的可见光车灯信号发送控制装置。装置利用车灯低压直流供电线路进行信号传输,并通过车灯发送可见光通信信号。装置前级将接收的输入信号,由高速开关电路控制线路的供电通断,从而将通信信号传导至后级并由后级控制LED车灯发送可见光信号。通过推导和实验选用电容作为线路储能器件,并采用2FSK调制和Modbus协议建立前后级间通信。实验证明装置可以利用线路实现最快不低于4 Mb/s的信号传输,并通过可见光车灯控制地锁的实验模型,进一步验证了该装置接收信号并通过低压直流供电线路控制车灯发送可见光信号的功能。本设计为利用直流供电线路传输信息并点亮的LED灯实现可见光通信,提供了参考设计模型。

关键词:直流电力线通信;可见光通信;LED通信;车地通信;车联网

中图分类号:TN913.6;TN929.1 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20202812.2710

Visible light vehicle lamp signal transmission control device

DENG Jian-zhi^{1*}, CHENG Xiao-hui²

- (1. *School of Information Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China;*
2. *Guangxi Key Laboratory Embedded Technology and Intelligent System, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China*)
** Corresponding author, E-mail: dengjianzhi@163.com*

Abstract: To address the needs of the Internet of Vehicles, a plug and play visible light signal transmission control device was designed for a vehicle lamp. In this device, the signal was first transmitted to a light-emitting diode (LED) driver via the DC power line and output as flashes of the vehicle LED lamp. The device was composed of a front-end circuit and a back-end circuit. The power switching was controlled by a high-speed on-off circuit in the front-end circuit based on the received input signal. The signal in the DC power line was then transmitted to the back-end circuit. Based on the signal, the VLC signal was sent by driving the flashing LED lamp. A capacitor was selected as the energy storage module after charge - discharge analysis. The communication between the front-end and back-end circuitry was achieved with 2-frequency shift keying (FSK) modulation and Modbus protocol. The device tests showed that the signal could be transmitted over the DC power line at minimum speeds of 4 Mb/s. The design and testing of the VLC parking lock control module also proved the feasibility of the communication and control

收稿日期:2020-06-03;修订日期:2020-07-02.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61662017);广西科技研究资助项目(No. 1598007-16)

functions. Thus, the proposed device could be a reference design for DC power line communication for an LED VLC system.

Key words: direct current power line communication; visible light communication; LED communication; vehicle to device communication; internet of vehicle

1 引言

在车联网中,车-车通信、车-地(设备)通信是相当重要的组网环节。在没有移动电话前,车辆之间常通过灯语来实现简单交流。灯语是应用长短不同的灯光明暗间歇来传递信息的一种简易通信方式。灯语在海上船间的通信应用较为广泛,道路上的汽车驾驶员也常利用车灯的亮灭闪烁向前车及对向来车传递信息。例如:闪一下提示前方车辆让出车道;闪两下提示对向来车关闭远光灯;闪三下提示前车有故障等等。

目前,车联网的组网通信主要还是依赖于 4G、WIFI 及蓝牙等无线射频技术^[1],尽管 5G 的应用能扩展了车联网的通信模式,但我们仍希望充分开发无线通信资源,打造多元化的车联网通信模式。

与此同时,当前车内设备通信主要采取包括 CAN, LIN, TTP(Time-Triggered Protocol)在内的串行通信模式。其中,一些实时性不高的系统控制,如:中控门锁、电动车窗、电动座椅与灯光照明等,主要采用数据传输速率为 $1 \sim 10^4$ bit/s 的 LIN, TTP 协议^[2]。这些通信方式都需设置专有的通信线路,且传输速率普遍不高。

可见光通信(Visible Light Communication, VLC)是一种利用灯光进行通信的新一代信息技术,原理跟灯语一样,但速度更快,信号更复杂。如今,VLC 技术已被列入 5G 后的下一代技术,作为多样化 6G 接入网络的组成部分之一。本文研究采用 VLC 实现车-车通信,让采用 VLC 的车联网通信成为未来通信的新模式^[3-5]。

在汽车内部,车灯、车门窗等设备主要是通过供电线路与开关连接,并不具备通信功能。如若采用现有方法实现车灯的 VLC 通信,需要增设通信线路和复杂的通信模块等,需改变车辆内部结构、线路布线等,而这些改变可能会影响车辆的整体安全性,影响车辆的整体设计。因此,本文设计了一个即插即用的可见光车灯信号的

发送装置,希望在不改变现有车辆结构和减少通信线路使用的前提下,简单便捷地将 VLC 技术移植到汽车上,让车灯成为一个车间通信的信号载体。

2 系统方案及硬件设计

本装置包括前级电路、后级电路和储能模块三个部分。前级电路有微控制单元(Microcontroller Unit, MCU)、稳压模块、输入模块、开关模块等;后级电路有 MCU、稳压模块、整形模块、驱动模块等。前级电路与后级电路仅仅通过供电线路相连接,前级到后级的电能供给和信号的传输,都经由两条供电线路完成;后级根据前级的信号控制驱动模块带动负载工作;储能模块在工作时用做临时电源^[6]。

2.1 工作原理

系统结构和模块连接原理如图 1 所示。系统功能可分为供电和信息传输两个部分^[7]。

(1)系统供电原理:前级电路通过外部电源获得 +12 V 供电,并由开关模块的控制 A、C 两端的供电通断;储能模块在 A、C 两端供电接通时储蓄电能,并在 A、C 两端供电中断时释放电能,以用作临时电源为后级电路提供电能;后级电路从储能模块 C、D 两端获得电能。为保证供电稳定,前、后两级均采用了稳压模块。

(2)系统的信息传输功能,主要是输入模块的输入信息经由前级电路传输至后级电路,工作原理如下:前级 MCU(Microcontroller Unit)根据

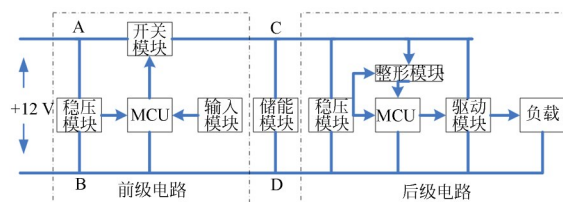


图 1 系统原理框图

Fig. 1 System scheme

输入模块的输入信息,控制开关模块产生开关动作;开关模块的开关动作导致 A,C 两端的接通和断开,从而使得 C,D 两端的电平随着开关动作产生变化;C,D 两端的电平变化经过整形模块处理得到脉宽调制 PWM(Pulse Width Modulation)信号,后级 MCU 将整形模块输出的 PWM 信号解调得到由前级 MCU 传输的信息,由此实现前、后两级电路的信息传输,并由驱动模块根据传输的信息控制负载^[7]。

本设计的负载采用 LED,即由驱动模块控制 LED 发出可见光信号。输入模块可以是一组按键、开关等,也可以提供手机、平板等外设数据的串行通信接口,用以接收并转发外设的输入信息。例如:将车灯拨杆作为输入模块,将拨杆拨动作为输入信号,装置作为一个即插即用模块,连接在电源与车灯之间,如图 2 所示。

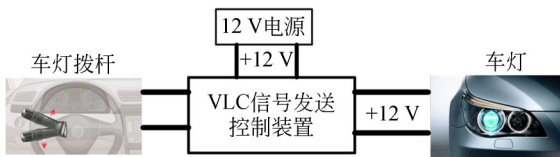


图 2 系统连接示意图

Fig. 2 Connection scheme

根据上述原理,系统发送 LED 发出可见光信号的整体信号的传递形式如图 3 所示:首先,由输入模块发出指令信号,前级 MCU 将该信号指令转换为相应的开关模块的控制信号;由开关模块根据控制信号产生供电通断的引起电压变化的开关信号;储能模块两端的电压变化信号经过整形模块后得到整形后的脉冲方波;后级 MCU 根据整形模块的脉冲方波输出信号,向驱动模块

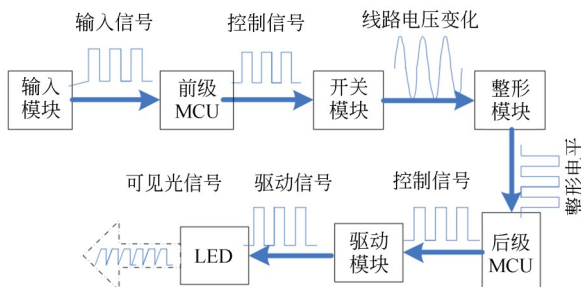


图 3 信号传递图

Fig. 3 Signal transmission scheme

发出驱动信号,由驱动模块控制 LED 发送可见光信号。

2.2 整形模块

储能模块在开关模块的 PWM 开合控制引起的供电通断过程中,不断地充放电;由此,在储能模块的两端就会出现电压的波动,这样的波动也会反应在整形模块的输入上,整形模块将电压变化转换成一组脉冲,由此从电压的瞬时跳变中,获取供电通断变化所携带的信号。

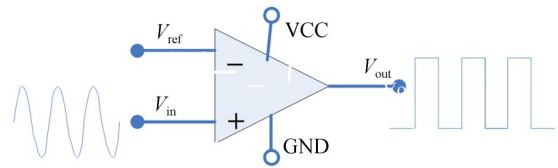


图 4 整形模块原理

Fig. 4 Plastic module

3 开关信号单向脉冲有效值分析

本设计是利用系统的供电线路进行信号的传输,为了保证系统的正常工作,稳定供电是第一位。装置后级的供电是由开关模块的开关动作控制通断,供电线路上的瞬时电压电流并不是固定的,开关电路的开关动作产生了由峰值电压及低电平来回交替形成的脉冲。

而后级电路的供电不是由普通的直流电实现,是通过开关模块的开关动作产生由峰值电压及低电平的来回交替形成的直流脉冲,所以工作时需要考虑脉冲的有效值是否达到供电需求。

通过纯电阻 R 在电压、电流峰值为 I_m 的正弦交变供电系统中一个周期 T 内的能耗 Q 的计算公式^[8]:

$$Q = \frac{I_m^2 RT}{2} = \frac{u_m^2 T}{2R}. \quad (1)$$

可知其电流 I 、电压 U 的有效值为:

$$I = I_m / \sqrt{2}, U = U_m / \sqrt{2}. \quad (2)$$

由于单向脉冲实质是一种脉冲直流电,当接入纯电阻 R 后一个周期 T 内耗散的能量等于直流电耗散能量的 t/T ,其中 t 为一个周期的高电平时间,根据有效值定义可知:

$$\frac{U^2}{R}T = \frac{tU_m^2}{TR}T, \quad (3)$$

$$I^2RT = \frac{tI_m^2}{T}RT. \quad (4)$$

即,电流有效值为 $I = \sqrt{t/T} I_m$,电压有效值为 $U = \sqrt{t/T} U_m$ 。通常MCU的供电电压一般为 3.3 V 和 5 V,因此,以 LM7805 稳压芯片提供 5 V 稳压供电为例,LM7805 输入工作电压范围为 7~36 V,对于脉冲的有效值最低不能低于 7 V。当输入峰值 12 V 且要求有效值为 7 V 时,有 $7/12 = \sqrt{t/T}$,即在一个脉冲周期里,高电平的持续时间不应小于 $1/3T$ 。

3 储能模块设计与测试

3.1 电容充放电测试

电容、电感都具有充放电特性,因此可利用这一特性,将其当作临时电源使用。在本设计中,拟采用电容、电感作为储能模块,在电源供电时,集聚电能;当电源供电中断时,释放电能,并用于给后级电路的整形模块、稳压模块、MCU 等提供电能输出。

当前级 MCU 给开关模块分别输出 1 KHz~5 MHz 的占空比 D_k 为 50% 的 PWM 信号,对 10 pF~1 μF 范围内的多组电容的压降、充放电时间、频率等进行了测量,部分电容充放电情况测试,如表 1。

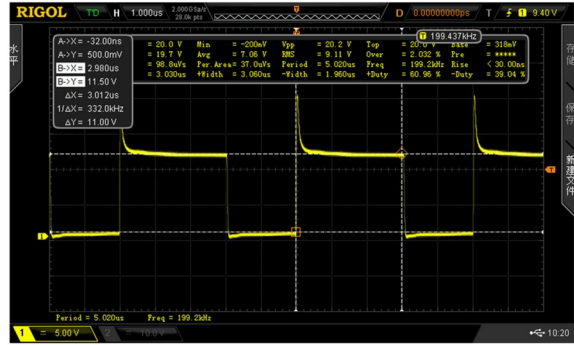
其中 33 pF 电容值的电容充放电如图 5 所

表 1 电容充放电测试数据

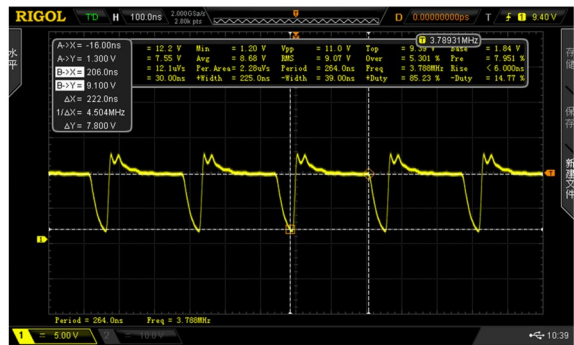
Tab. 1 Charge-discharge test of capacitor (Unit: V)

f/ MHz	33 pF		150 pF		330 pF		2 200 pF	
	V _{pp}	D _k	V _{pp}	D _k	V _{pp}	D _k	V _{pp}	D _k
0.1	10.8	0.55	10.6	0.58	11.9	0.54	10.8	0.56
0.2	11.0	0.60	11.4	0.62	12.3	0.59	11.0	0.62
0.5	12.2	0.71	11.4	0.73	11.8	0.7	11.6	0.71
0.1	11.2	0.74	11.4	0.72	11.7	0.72	11.4	0.72
1.5	10.0	0.71	9.4	0.68	10.5	0.69	9.2	0.72
1.8	8.8	0.73	8.6	0.69	10.1	0.71	8.2	0.73
2	8.6	0.73	8.6	0.69	10.1	0.71	8.2	0.73
2.5	8.2	0.76	7.8	0.75	9.2	0.74	8.0	0.74
3	7.8	0.78	7.8	0.76	8.7	0.77	7.0	0.78
3.5	7.8	0.82	7.8	0.81	7.9	0.81	8.2	0.84
4	7.8	0.84	7.8	0.84	7.9	0.84	8.2	0.84

示。33 pF 的电容在 200 KHz 的开关信号控制下,两端电压占空比为 3:2,压降接近 12 V;当开关信号提高至 4 MHz 时,两端电压占空比 D_k 为 4:1,压降约为 8 V。



(a) 200 KHz



(b) 3.788 MHz

图 5 33 pF 电容频率测试波形

Fig. 5 Test waveform of 33 pF capacitor

3.2 电感充放电测试

电感与电容一样,也可以用作储能元件。然而,通过对 470 μH 和 1 mH 的电感进行测试发现,电感在充放电频率较高时,电压的变化不明显,且发热量很大。

电感测试数据如表 2,47 μH 电感在开关频率为 1 KHz,500 KHz,1 MHz 时,压降均达不到 0.5 V,且在短暂的测试过程已经有微热;采用 1 mH 电感在开关频率为 1 KHz 时,波形较好且压降可以达到 4 V,但发热严重。显然,电感不适合用作本设计的储能模块,其波形图如图 6。

3.3 测试分析

由于上述推导及电容充放电特性可知,容值越大,充放电越慢;反之则越快。而对于同一电容,开关频率越高,电容的充放电时间越短,电容

表 2 电感充放电测试数据表

Tab. 2 Charge-discharge test of inductor

电感值/ μH	频率/Hz	V_{pp}/V	占空比 D_k
	1 K	120 m	0.51
470	500 K	420 m	0.50
	1 M	440 m	0.12
1 M	1 K	4.6 m	0.51

两端的压降也越小。以 33 pF 电容为例,当产生开关信号的 PWM 频率达到 4 MHz,若用每一个脉冲携带一个 bit 信号,既前级向后级传输信号可达到 4 MHz 的传输速率。

4 软件设计

结合硬件结构,软件设计包括前级 MCU 和后级 MCU 两个部分的控制程序,前级用于接收并解析输入模块的指令,再根据指令控制开关模块的开合;后级根据整形模块的输出识别出前级的开关控制信号,并据此发出驱动信号。

4.1 FSK 调制原理

本设计利用载波的频率变化来传输数字量的信息,采用两个频率表示二进制“0”和“1”的 2FSK。FSK(Frequency-Shift Keying)频移键控,是利用载波频率的变换来传输数字信息,FSK 拥有易实现、抗噪声、抗衰减的优点,适合用于远程中低速通信传输。本设计的 2FSK 调制采用微控制器实现。

4.2 协议与数据格式

考虑到前级到后级的信息传输可能存在的线路干扰、误动作等问题,设计采用了 Modbus 协议的 RTU 模式,其数据帧格式如表 3。

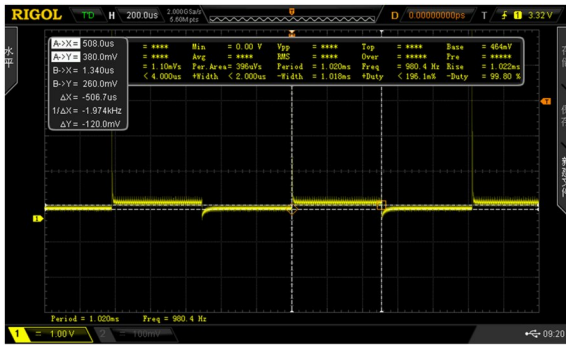
表 3 数据帧结构表

Tab. 3 Frame structure

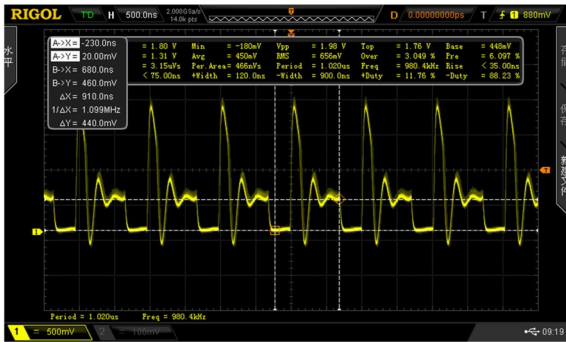
起始位	设备地址	功能码	数据	CRC 码	结束位
T1~T4	1 Byte	1 Byte	n-Byte	2 Byte	T1~T4

其中,在数据帧加上 T1~T4 的起始位和结束位,用大于 3.5 Byte 的时间,代表不同数据帧之间的间隔。如若一帧数据未完成或是有大于 T1~T4 间隔没数据,接收设备会准备下一个数据帧的接收;当数据帧接收完成时需通过计算 CRC 校验码,判断接收数据帧的正确与否;设备地址为接收设备相应的 ID;功能码为数据帧接收设备需执行功能对应的代码或标识码;数据位有 n 个 8 bit 的数据, N 的值由功能码确定。

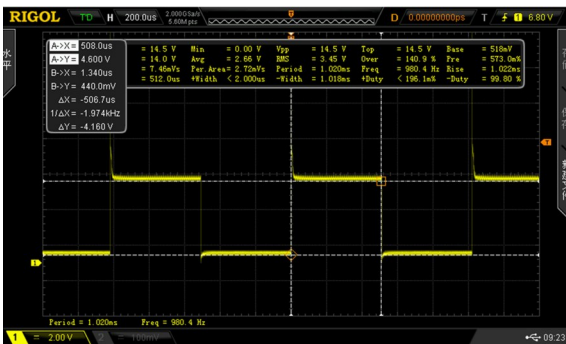
本设计的前级与后级之间按 RTU 模式的 Modbus 协议进行数据帧的发送:(1)其中前级将



(a) 470 μH 1 KHz 频率波形图
(a) Waveform of 470 μH inductor in 1 KHz



(b) 470 μH 的 1 KHz 频率波形
(b) Waveform of 470 μH inductor in 1 MHz



(c) 1 MH 的 1 KHz 频率波形
(c) Waveform of 1MH inductor in 1 KHz

图 6 电感充放电测试

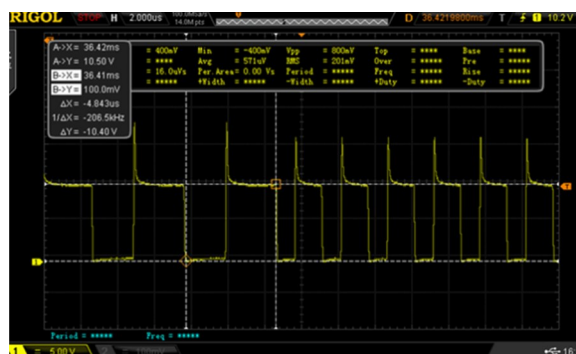
Fig. 6 Charge-discharge test of inductor

来自输入模块的信息打包成数据帧,通过 PWM 调制输出两个不同的频率分别代表二进制“0”和“1”,并按高位至低位的顺序发送数据帧;(2)后级通过 MCU 的定时器输入捕获功能获取保存数据,并按照 Modbus 的通信协议校验数据;(3)前级与后级之间的收发时钟同步采用 MCU 的多定时器配置实现。

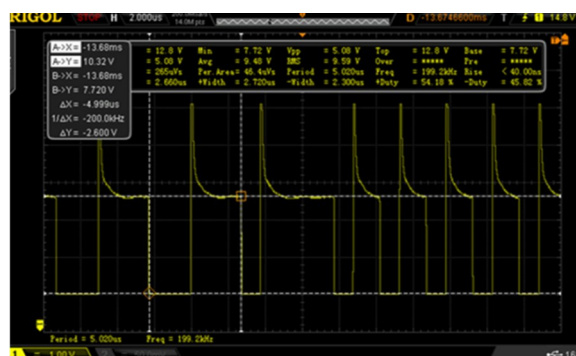
5 实验与测试

5.1 开关控制与线路电平信号测试

测试采用 Modbus 协议^[9-10],由前级 MCU 采用 200 KHz, 400 KHz 的两个不同的频率代表“0”,“1”,控制开关模块的快速动作。对比测试发现,在开关频率提高后,储能电容的储能作用的有无对系统的工作并不明显,但电容能滤除部分尖端及一些纹波。



(a) 无储能电容
(a) Without capacitor



(b) 有储能电容
(b) With capacitor

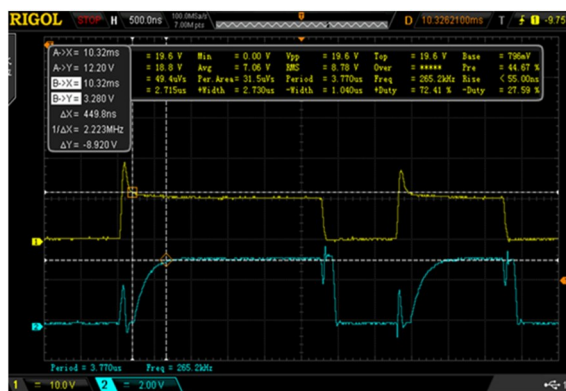
图 7 高速开关时储能电容效果

Fig. 7 Effect of capacitor in high speed

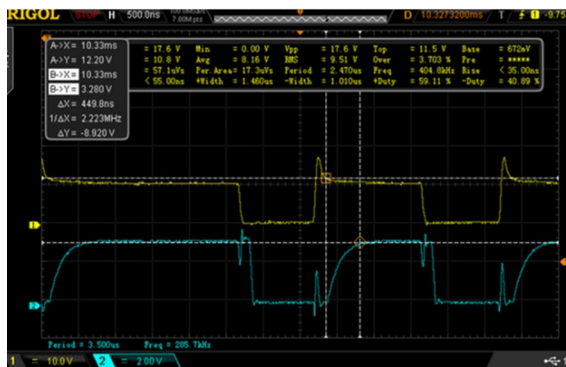
5.2 器件延迟测试

整形模块作为装置后级的信号转换电路,会产生一定的器件延迟。如图 8,示波器 CH1 的波形为通信时储能电容两端电压,CH2 的波形为整形模块的输出电压。其中 CH1 的储能电容两端波形,即供电线路上的波形。

如图所示,图 8(a)当开关频率为 200 KHz 时,上升沿延迟 449 ns,下降沿延迟 169.5 ns;图 8(b)当开关频率为 400 KHz 时,上升沿延迟 449.8 ns,下降沿延迟 120.1 ns。



(a) 200 KHz



(b) 400 KHz

图 8 200 K 和 400 KHz 开关频率时器件延迟

Fig. 8 Device delay in 200 K or 400 KHz on-off frequency

5.3 前后级通信测试

测试将 PC 作为输入模块,前级 MCU 接收 PC 串口数据,并打包成数据帧通过开关模块发送;后级接收到数据帧,解包校验后还原成串口数据,再通过串口上传至 PC。供电线路上的数据帧传输,采用 Modbus 协议。

前级 MCU 通过定时器功能控制开关模块的开关动作, 后级 MCU 通过 IO 口的输入捕获功能采集整形模块的信号。前级 MCU 将接收到的 PC 串口数据计算得到 CRC 校验码, 再将数据和 CRC 码一并以二进制的形式从高位到低位以 200 KHz 和 400 KHz 的两个不同频率代表“0”, “1”进行调制后用以控制开关电路的动作; 开关电路通断产生的线路电平变化经过整形电路后, 送到后级 MCU 接收捕获; 后级 MCU 以定时器脉宽边沿触发中断而获取 FSK 的信号频率, 再据此解析数据帧得到串口数据, 并输出至上位机串口观察。

PC 端发送数据内容如图 9, 其中 58 和 07 分别代表 CRC 校验后的高位和低位。



图 9 发送数据测试

Fig. 9 Test of data sending

设计采用定时器中断记录脉冲并计算对应码元, 在 0.01 s 定时内, 捕获 200 K 对应“0”的脉冲为 1 995 个附近, 捕获 400 K 对应“1”的脉冲为 3 970 个附近, 误差控制在 0.01%~0.05%, 脉冲接收计数测试如图 10。

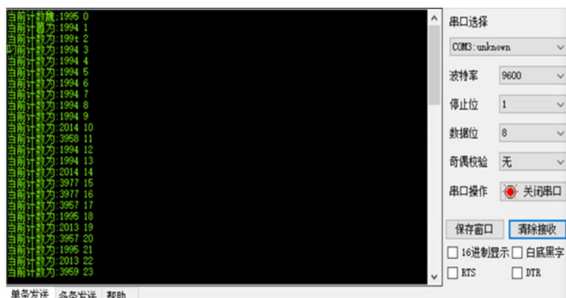


图 10 脉冲接收计数测试

Fig. 10 Counting test of the receive pulse

5.4 机构远程控制模型测试

为验证本直流线路通信车灯控制装置, 设计了一个如图 2 的拨杆(用按键代替)LED 车灯控制模型。用按键作为输入模块发出控制指令, 经过本设计的装置, 发出可见光控制信号, 远程控制地锁的起、落动作(如图 11)。LED 车灯控制模型在不改变汽车前照灯的供电照明线路的前提下, 实现了由按键发出的指令控制 LED 车灯发出可见光信号, 控制地锁的动作。同时, 结合作者前期对 VLC 的研究, 可以达到户外强光下的车-车间通信的应用要求^[11]。



图 11 VLC 车灯地锁控制模型

Fig. 11 VLC parking lock control module

6 结 论

本文研究并设计实现了一个可见光车灯信号发送控制方法和装置, 通过装置的接入和使用, 可以在不中断供电的前提下, 保持装置后级的持续工作, 能够通过装置将外部输入信号加载在低压直流供电线路传输, 并根据线路传输信号驱动 LED 车灯发送高速可见光信号。本设计已经在 12 V 直流供电电路上, 实现前后级间采用 Modbus 协议的信号传递。

本设计对多个不同规格的电感和电容进行测试研究, 可知电容更适合该类型的高速充放电; 同时, 电容能够一定程度减少线路毛刺的产生。通过电容的测试可知, 单向传输速率可以达到 MHz 级, 已经达到甚至超过 IIC 和 SPI 总线的

速率^[12]。

本研究的思路源自“灯语”,所设计的装置模型通过车辆LED前大灯实现信号的发送,本设计还可以用于车联网中的LED路灯到车辆

的下行可见光信号的发送控制,也可以作为一个通用的即插即用模块,用于实现对其他由直流供电线路直接驱动LED发送可见光信号的设计。

参考文献:

- [1] 《中国公路学报》编辑部. 中国汽车工程学术研究报告·2017[J]. 中国公路学报,2017,30(6):1-197.
Editorial department of China J. Highw. Transp. Review on China's automotive engineering research progress: 2017[J]. *Editorial department of China J. Highw.*, 2017,30(6):1-197. (in Chinese)
- [2] WANG Y, QIAO Y, ZHANG H, *et al.*. Transformerless ultrasonic ranging system with the feature of intrinsic safety for explosive environment[J]. *Sensors (Basel)*, 2018,18(12).
- [3] 曹婷, 陈华敏. 基于正交频分复用技术的低压电力线通信系统模型[J]. 液晶与显示, 2019, 34(9): 928-934.
CAO T, CHEN H M. Low voltage power line communication system model based on orthogonal frequency division multiplexing[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2019, 34(9): 928-934. (in Chinese)
- [4] 王惠琴, 杨顺信, 李亚婷, 等. 适合于大气激光通信的双空间调制[J]. 光学精密工程, 2020, 28(3): 565-572.
WANG H Q, YANG SH X, LI Y T, *et al.* Double spatial modulation suitable for atmospheric laser communication[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(3): 565-572. (in Chinese)
- [5] 孙森震, 李广云, 冯其强, 等. 可见光通信与双目视觉的室内定位[J]. 光学精密工程, 2020, 28(4): 834-843.
SUN S ZH, LI G Y, FENG Q Q, *et al.* Indoor positioning based on visible light communication and binocular vision[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(4): 834-843. (in Chinese)
- [6] 邓健志. 复杂指令的可见光车灯通信信号发送控制方法[P]. 中国, ZL2015105340894, 2018. 7. 3.
DENG J ZH. The Control Method of Signal Transmission of Visible Light Vehicle Lamp with Complex Instruction [P]. China, ZL2015105340894. 2018. 7. 3 (in Chinese)
- [7] 邓健志, 孙科壮, 程小辉. LED路灯可见光通信模型的研究[J]. 光通信技术, 2020, 44(5): 53-57.
DENG J ZH, SUN K ZH, CHENG X H. Research on visible light communication model of LED street lamp [J]. *Optical Communication Technology*, 2020, 44(5): 53-57. (in Chinese)
- [8] 司徒平. 几种典型交变电流有效值计算公式的推导[J]. 教学月刊, 2013, (1): 55-57.
SI D P. The derivation of several typical effective value calculation formulas for alternating current [J]. *The teaching issue*, 2013, (1): 55-57. (in Chinese)
- [9] PERSECHINI M. A. M., MENDES L. T. S.. Performance analysis among different acquisition systems for process control[J]. *ISA Trans*, 2020, 97(2): 86-92.
- [10] 徐文艳, 杨森, 段田东. 基于和速率最大化的以用户为中心可见光通信最优预编码设计[J]. 光学精密工程, 2020, 28(3): 686-694.
XU W Y, YANG S, DUAN T D. Sum-rate maximization of user-centric visible light communication cells with zero forcing precoding[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(3): 686-694. (in Chinese)
- [11] DENG J Z, YAO M, CHENG X H, *et al.* A real-time VLC to UART protocol conversion system [J]. *Optoelectronics Letters*, 2016, 12(4): 299-303.
- [12] 万文杰, 周建斌, 费鹏, 等. 高速SPI通信在多道能谱仪中的实现[J]. 核电子学与探测技术, 2017, 37(1): 29-32+42.
WAN W J, ZHOU J B, LI Y P, *et al.* Implemen-

tation of high-speed communication based on SPI bus interface in multichannel energy spectrum ana-

lyzer[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2017, 37(1):29-32+42. (in Chinese)

作者简介:



邓健志(1982-),男,广东高要人,教授,硕士生导师,主要从事可见光通信、嵌入式技术、物联网等方面的研究。E-mail:dengjianzhi@163.com