

低功耗无线紫外光功率计系统设计与研究

王 辉¹, 王 军^{1,2}, 董兴法¹, 陈海松¹

(¹.苏州科技大学 电子信息工程学院,江苏 苏州 215009;
².中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,长春 130033)

摘 要: 针对工业上紫外光功率检测精度低、辐射大、功耗高等问题。提出一种基于低功耗单片机 MSP430 为核心控制器、两个紫外光电传感器为探测器、无线 LoRa 为数据传输方式的设计方案。该方案采用双传感器,通过减法放大电路实现光电转换和环境光滤除,并采用高精度可编程 AD 采集芯片实现对信号的可控放大以及将模拟量转换成数字量传输至主控制器 MSP430,利用改进的滑动平均滤波法对采集的数据进行数字滤波处理,并计算出相应的功率值,通过无线 Lora 进行数据传输至上位机进行实时显示。研究与实验表明: 整个系统运行稳定、精度高、功耗低、能远程实时检测紫外光功率变化,可广泛用于工业紫外光检测领域上。

关键词: 功率检测; 低功耗; 无线 LoRa; 双传感器; 高精度

中图分类号: TN234 **文献标识码:** A **DOI 编码:** 10. 14016/j.cnki.jgzz. 2020. 01. 071

Design and research of low power wireless UV power meter system

WANG Hui¹, WANG Jun^{1,3}, DONG Xingfa¹, CHEN Haisong¹

(¹.Suzhou University of Science and Technology, Suzhou Jiangsu 215009, China;
².Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun Jilin 130033, China)

Abstract: For the problems of low precision, high radiation and high power consumption of UV light in the industry. A design scheme based on low-power microcontroller MSP430 as the core controller, two ultraviolet photoelectric sensors as the detector, and wireless LoRa as the data transmission method is proposed. This solution uses dual sensors to implement photoelectric conversion and ambient light filtering through a subtractive amplification circuit, and uses a high-precision programmable AD acquisition chip to achieve controllable amplification of the signal and convert the analog to digital to the main controller MSP430. The improved moving average filtering method performs digital filtering on the collected data, calculates the corresponding power value, and transmits the data to upper computer for real-time display through wireless Lora. Research and experiments show that the entire system operates stably with high accuracy, low power consumption, and can detect real-time UV power changes remotely. It can be widely used in the field of industrial UV detection.

Key words: power detection; low power consumption; wireless LoRa; dual sensors; high precision

1 引言

现如今,光通信行业的不断发展,对光电器件产品的固化封装提出了更高的要求,紫外光(UV)被成功的推广到商业应用。各胶黏剂生产商针对 UV 光固化特性,研制出用于粘接、密封、印刷等系列 UV 产

品,并广泛应用于通讯、电子、光学、印刷等众多领域。这些产品在 UV 光(特定波长及定光强度)照射下,会固化或硬化(聚合),但 UV 灯强度不够高时会导致固化效果不佳^[1-3],然而现在市场上的功率计存在许多不足之处,例如:测量精度不高、电路复杂、功耗大、受紫外光辐射大。针对以上情况,提出了一种基于 MSP430 单片机的低功耗无线紫外光功率检测系统^[4],该系统采用减法电路滤除环境光,高精度 AD 芯片转换,主控制器进行采集处理通过无线 LoRa 传输数据至上位机并解码显示实时功率。不仅提高测量精度和数据传输的准确性,以及解决功耗低的问题,还降低了系统的复杂度以及避免了紫外光辐射的

收稿日期: 2019-07-18

基金项目: 江苏省研究生工作站项目; 江苏省研究生科研创新项目 (No.KYCX17_2060)

作者简介: 王辉(1994-),男,安徽,汉族,在读硕士生,光电信息处理。
E-mail: whsc0608@163.com

通信作者: 王军(1979-),男,江苏,副教授,光电测控技术与仪器。
E-mail: E-mail: wjyhl@126.com

<http://www.laserjournal.cn>

危害。

2 功率检测系统介绍

低功耗无线紫外光功率计系统框图如图 1 所示, 主要由 UV 探测器、信号转换模块、差分放大模块、AD 转换模块、主控制器(低功耗 MSP430 单片机, TI, 美国) 以及液晶屏 12864 显示和上位机显示模块组成。紫外光功率计是将光信号通过光电器件转换成电信号, 再经前置滤波放大电路转换为差分信号, 主控制器通过驱动 24 位高精度 ADC 进行差分采集, 最后通过无线 LoRa 模块将数据传输至上位机进行紫外光功率实时显示^[4-6]。

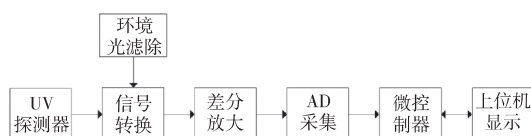


图 1 弱光检测系统框图

3 功率检测系统实现方案

3.1 前端信号处理方法设计

该方案针对前端信号设计了一种基于减法放大电路滤除环境光的处理方法, 与目前的处理方法不同, 而是从模拟信号源处就进行低噪声优化处理提高测量精度。电路如图 2 所示: 为了尽可能消除暗电流带来的热噪声的影响, 本方案采用图 2 中 (a) 虚线框电流转换电路, 图中 D1 只接受环境光, D2 正常采光, 图 3 是常用电流转电压放大电路(对比用的)。

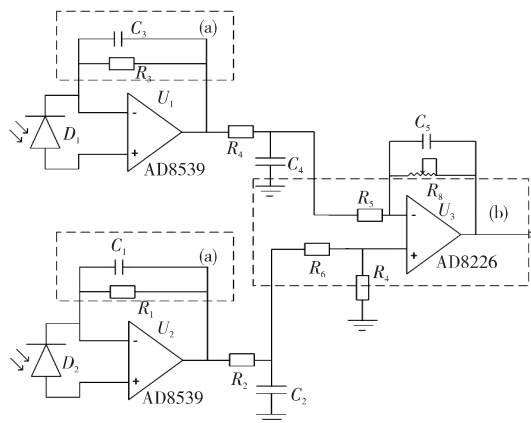


图 2 前端低噪声处理

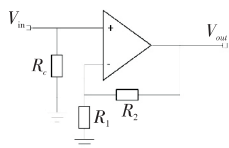


图 3 电流放大电路

图 2 中 (a) 是负反馈电流放大电路, 此方法能够

有效降低输入阻抗。图 3 中 R_C 为采样电阻, 输入信号通过电阻转换成电压, 运放输入端实际放大的 R_C 两端的电压信号。两者的输出 V_{out} 分别为:

$$V_{out} = -(I_S * R_C) \quad (1)$$

$$V_{out} = I_S * R_C * \frac{R_1 + R_2}{R_1} \quad (2)$$

图 2(a) 中, 输入阻抗会因负反馈的原因降到很小, 所以此放大器能实现更好的效果, 图 3 中输入电流视为电流源时, R_C 成负载, 此时 R_C 必须很小才能越趋近于理想信号源。此外, 从噪声角度看(1 μA 电流转 1 V 信号)。

图 2(a) 输出噪声为:

$$= \sqrt{(R_C)^2_{noise} + e_n^2 + (i_n + R_C)^2} \approx \sqrt{(129nV)^2 + (10nV)^2 + (10nV)^2} \approx 130nV/\sqrt{Hz} \quad (3)$$

图 3 输出噪声为:

$$= 1000 \sqrt{(R_C)^2_{noise} + (R_1/R_2)^2_{noise} + e_n^2_{noise} + (i_n * R_C)^2_{noise}} \approx 1000 \sqrt{(4.07nV)^2 + (1.29nV)^2 + (10nV)^2 + (10pV)^2} \approx 10.9uV/\sqrt{Hz} \quad (4)$$

由公式 (3) 和 (4) 可知, 同样放大条件下, 图 3 的噪声比图 2(a) 中的大 100 倍左右, 图 2(a) 中的噪声主要来源是反馈电阻本身的热噪声, 图 3 的前端采样电阻噪声会一并放大。因此, 一般来说, 反馈电阻尽量取大些, 有利于提高信噪比^[7-8]。本方案选择的前端信号处理方式, 可以有效避免前端噪声一同被放大的情况, 同时也有效地滤除了环境光的影响。

3.2 差分采集与数据处理方法

A/D 采集中使用单端采集较多, 信号受干扰大, 而差分信号变化较大, 所以为了避免 A/D 采集中接地回路干扰以及环境引起的共模干扰的影响, 选用差分采集。该方式采用内部含有 3 个差分模拟输入的 24 位高精度 ADC 采集芯片, 其片内低噪声仪表放大器可通过编程控制放大倍数, 采集小信号。当增益设置为 1, 更新速率为 4.17 Hz 时, 均方根噪声为 40 nV。因此, 在高精度采集中增加了单端转差分电路, 加上高分辨率 ADC 差分采集方式, 利用前端噪声最小化和提高分辨率的方法提高精度, 除了硬件上的方法, 在软件中使用均值滤波的算法, 减少数据跳动。电路如图 4 所示, 前端输出信号 V_{out} 经运放 OP295 转成差分信号, 然后微控制器通过 SPI 接口与 AD7793 通

信对差分信号进行采集和处理。

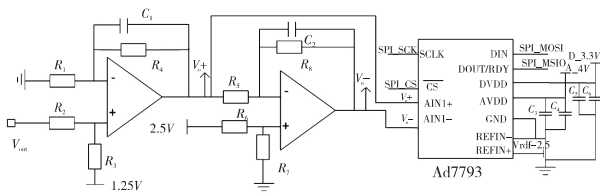


图 4 差分采集电路

图 4 中 $R_2 = R_3$; $R_1 = R_4$; $R_6 = R_7$; $R_5 = R_8$ 。其中输入信号与差分信号之间关系式为:

$$V_+ = V_{out} + 1.25 \quad (6)$$

$$V_- = -V_{out} + 1.25 \quad (7)$$

本设计 AD 采集参考源选用外部 2.5 V 基准源, 因此, 由 AD 采集的数字量输出代码与电压信号对应关系式为:

$$Code = \frac{V_{in} \times 2^N \times GAIN}{V_{REF}} \quad (8)$$

设计中最高输出电压为 2.5 V, 与参考电压 V_{REF} 一致。内部增益 GAIN 设为 1, 由芯片手册可知 $GAIN = 1$ 时, 分辨率 $N \approx 20$ 。最大模拟电压设定为 2 V, 其对应功率设为 1 W 以及对应的数字量为 13 421 772, 若超过不再增加, 故其模拟输入电压与光功率之间关系为:

$$W = 0.5 V_{in} \quad (9)$$

4 数字滤波方法

在进行数据采集时, 会遇到数据的随机误差, 随机误差是由随机干扰引起的, 可以通过数字滤波方法, 来提高测量精度以及信号稳定性^[8]。数字滤波原理是将输入信号转换成另一组输出信号序列, 设数字滤波器的输入信号为 $X(t)$, 输出信号为 $Y(t)$, 则输入与输出信号可用差分方程表示为:

$$Y(t) = \sum_k^N a_k X(t-k) - \sum_k^N b_k X(t-k) \quad (10)$$

其中: $X(t)$ 可以是 A/D 转换后的数字序列, 也可以是计算机输出信号。由方程式 (10) 组成的滤波器称为递归滤波器。如果将公式 (10) 中 b_k 取为 0, 则可得非递归型数字滤波器。本方法使用改进的滑动平均滤波法对采集的数据进行数字滤波处理, 其中取 i (当 $i > 49\ 999$ 时, i 取 10) 为采样次数, 当 $i = 9$ 时, 将采样值存放于新建数组 $a[i]$ 中, 此后每次采样的新数据取代数组元素中 $a[m]$ 的数据, 然后对当前数组进行平均处理, 获得新的滤波结果。此算法表示为:

$$Y_l = \frac{1}{10} \left(\sum_{i=0}^{i=9} a[i] + a[l] \right) \quad (11)$$

式中 Y_l 为第 l 次采样经过滤波处理后的输出值; $t \neq m, m = i \% 10$, 此方法与传统的滑动平均滤波相比, 每次计算只需改变一个元素, 大大提高了运算速度, 同时, 实验表明, 输出的数据更加稳定。此方法流程如图 5 所示。

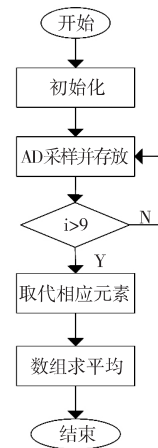


图 5 数字滤波流程图

5 系统软件设计方法

5.1 低功耗系统设计

下位机程序流程图如图 6(a) 所示, 主控制器先对一些函数以及 LoRa 模块进行初始化命令^[14] (LoRa 传输模式选择定向传输中的点对点, 空中速率选择 1.2 kB, 发射功率为 20 dBm), 单片机先进入低功耗模式 (LPM3 模式, 其仅打开内部低功耗时钟 ACLK, 消耗电流仅为 0.7 μ A, 所以定时器初始化时需将默认时钟修改为 ACLK), 设计中通过定时器中断触发退出低功耗模式并接收上位机发送的命令, 由微控制器通过 SPI 接口与 AD7793 进行通信, 对差分信号采集和处理, 最后通过无线 LoRa 发送到上位机。

5.2 无线传输系统设计

在信号监测无线数传系统中, 采用 SEMTECH 公司的无线 LoRa 模块, 该模块传输距离远、速度快、功耗低、抗干扰性高等优点^[11-14], 可用于把主控制器处理的各类数据进行编码, 按照相应格式把数据通过无线方式远距离发送出去^[13], 也可以接收控制中心的命令。如图 6(b) 所示, 计算机先检查无线 LoRa 连接是否异常并记录, 然后上位机对一些函数及 LoRa 模块初始化以后, 发送获取命令, 接收到数据后根据相应的协议进行判断帧格式并进行解码, 计算出相应的功率和温度值, 实时显示在显示屏上。

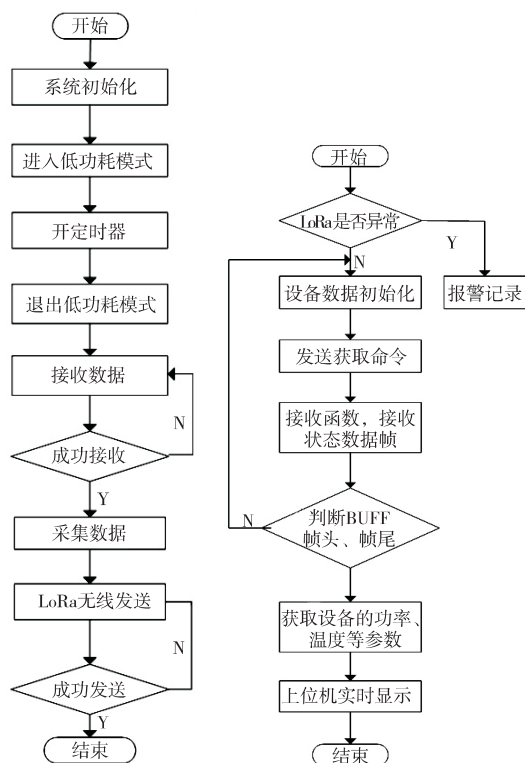


图6 软件程序流程图

6 实验结果与分析

实验所设计的实物如图 7(a) 所示,可查看功率和温度值,图 7(b) 是单端转差分的 Multisim 仿真图,由仿真图可以看出差分信号 $V_+ + V_- = 2.5$ 。图 8 是上位机通过无线 LoRa 接收的数据,根据通信协议显示实时功率和温度值。图 9(a) 是前端信号未进行处理,杂光干扰大约 46 mV,且纹波较多,图 9(b) 是进行优化处理的少。测得装置总电流 3 mA 范围内摆动,某波形图,杂光幅值只有 3.2 mV,且纹波较品牌 STM32 系列功率计总电流 16 mA。实验中紫外光源选用 365 nm 的面光源,以 500 mW 光照强度进行标定时,单传感器和双传感器测量数据如表 1 所示,单传感器数据跳动大,线性度差,且与标准值相差较大,其曲线拟合如图 10 所示,双传感器与标准值吻合度较大。数字滤波和未滤波的测量数据如表 2 所示,数字滤波后的

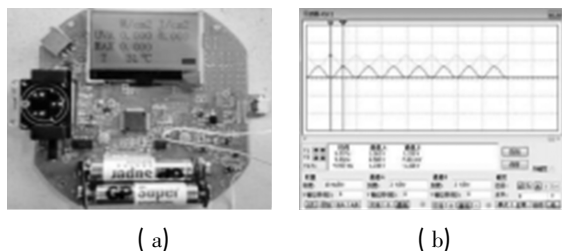


图7 实物及差分 Multisim 仿真图

测量值与标准值相差较小,其曲线拟合如图 11 所示,数字滤波线性度较好,且由两表可以看出功率值越大光照温度越高。



图8 上位机界面显示

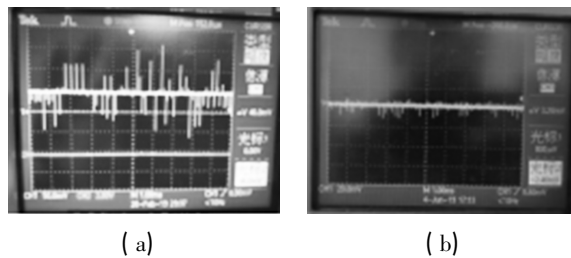


图9 前端信号处理

表1 单传感器和双传感器测量数据

标准值 mW/cm ²	单传感器/ mW/cm ²	双传感器 mW/cm ²	温度/°C
100	86	98	27
200	181	196	27
300	286	298	27
400	389	396	28
500	500	500	28
600	592	601	29
700	689	703	31
800	786	802	32
900	879	904	33
1 000	978	1012	34

表2 数字滤波和未数字滤波测量数据

标准值 mW/cm ²	未数字滤波/ mW/cm ²	数字滤波 mW/cm ²	温度/°C
100	98	99	27
200	195	197	27
300	296	298	27
400	397	396	28
500	500	500	28
600	598	601	29
700	698	703	31
800	796	802	32
900	892	904	33
1 000	987	1 006	34

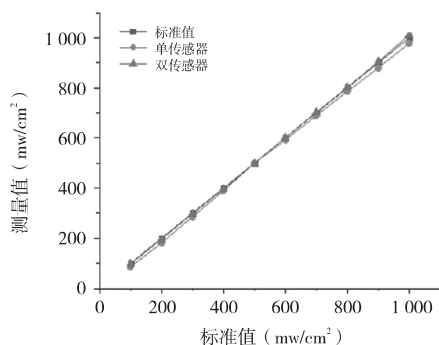


图 10 单传感器和双传感器曲线拟合

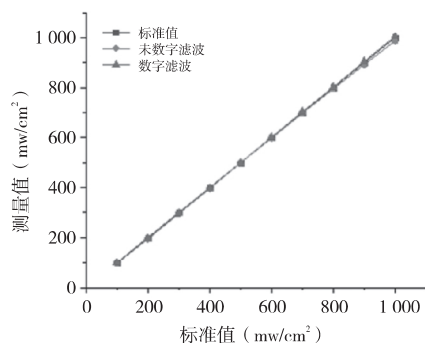


图 11 数字滤波和未数字滤波测量曲线拟合

7 结论

紫外光功率计在测量精度、功耗、安全性等方面进行了很大的改进。设计的前端信号处理电路,不仅滤除环境光,而且从信号源处进行低噪声优化处理。测量精度高,功耗低,以及无线 LoRa 数据传输不仅避免了强紫外光对人体辐射的问题,而且抗干扰性强、距离远以及能够远程实时检测紫外光功率大小。因此,该设计可广泛应用于工业紫外光检测领域。

参考文献

[1] 王军,韩力,杜博军,等.低功耗紫外光能量计的研究与

设计[J].激光与光电子学进展,2017,54(7):101202..

[2] 周瑞华,田秀云.光盘油墨涂层固化的 UV LED 光源系统研究[J].激光与光电子学进展,2014,51(9):092203

[3] 胡小玲,徐科军,方敏,等.一种超低功耗单片机 MSP430F6736 实验装置研制[J].实验室研究与探索,2014,33(1):69-72.

[4] 高镜,何怡刚,罗旗舞,等.一种光伏逆变器状态在线监测技术[J].仪表技术与传感器,2018,10(10):47-50.

[5] YUAN L Q, ZHAO Z M, ELTAWIL M, et al. Performance evaluation of switch devices eq-ipper in high-power three-level inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(6): 2993-3000

[6] 龚天平. LoRa 技术实现远距离、低功耗无线数据传输[J].电子世界,2016,10(082):115-117

[7] 李常青,梅欣丽,明奇.微弱光信号检测电路的实现[J].应用光学,2010,31(5):724-727.

[8] 郭培源,付扬.光电检测技术与应用[M].北京:北京航空航天大学出版社,2016:71,94-95.

[9] 陈晓燕,程志江,姜波,等.基于多传感器信号融合的数字滤波方法[J].电气传动,2015,45(2):54-57.

[10] 罗远志,张涛,汗骏.基于 STM32 的多通道照度计的设计[J].仪表技术与传感器,2013,32(4):618-624.

[11] 原群盛,钱松荣.基于 STM32 动态监测系统的设计[J].液晶与显示,2016,31(7):681-685.

[12] 龚天平. LoRa 技术实现远距离、低功耗无线数据传输[J].电子世界,2016,10(082):115-117

[13] 黄增波,叶锦娇,赵华玮.基于 LoRa 技术的低功耗无线锚杆应力传感器设计[J].煤矿现代化,2017(1):39-42

[14] 徐宏宇,赵行,孙彦超.基于 STM32 的光功率实时监测系统的设计[J].电子科技,2014,27(12):85-89.

[15] 赵贤德,高振,刑振等.便携式激光诱导荧光遥测系统研发与测试[J].激光技术,2019,40(5):49-53.