

宽动态范围微弱光电信号检测系统

黄书佳, 韩 军, 孔英秀, 王天澳

(西安工业大学 光电工程学院, 西安 710000)

摘要: 昼夜工作的探测器在一天中处于不同照度环境下的信号探测, 为了精确测量出工作在宽动态范围照度下的光电探测器的输出信号, 利用 FPGA 工具和相关检测原理设计了一套宽动态范围高精度信号测量采集系统; 该系统由接收光学系统模块, 跨阻放大电路模块, 锁相放大电路模块以及 A/D 采集模块组成, 接受光学系统实现了屏蔽杂散光功能, 对水平与垂直方向上的光强进行了误差校正; 跨阻放大电路和锁相放大电路实现了微弱信号的放大和噪声的抑制, A/D 采集模块将数据实时采集显示; 在暗室环境下, 以中心波长为 650 nm 稳功率激光器为光源, 使用滨松 S2386-5K 光敏二极管为光电探测器进行试验, 实验过程中通过改变信号调制频率和激光器功率大小, 最终选择调制信号频率为 1 000 Hz 最为适宜; 实验结果表明, 光电检测系统在照度范围为 0.01~100 lx 均可以完成准确测量, 拓宽了测量的动态范围, 实际测量值与理论值误差在精度允许范围之内, 该研究对于其它波长的光源或其它微弱信号检测系统的设计与分析具有借鉴意义;

关键词: 宽动态; 低照度; 光电信号; 噪声分析; 相关检测; 信号采集; 跨阻放大; FPGA

Wide Dynamic Range Weak Photoelectric Signal Detection System

HUANG Shujia, HAN Jun, KONG Yingxiu, WANG Tianao

(Xi'an University of Technology, School of Optoelectronic Engineering, Xi'an 710000, China)

Abstract: Under the different illumination environments, the photodetector working day and night can accurately measure the output signal under a wide dynamic range of illumination, a set of wide dynamic range of high-precision signal measurement and acquisition system is designed by using the FPGA tools and related detection principles; The system is composed of the receiving optical system module, transimpedance amplifier circuit module, lock-in amplifier circuit module and A/D acquisition module. The receiving optical system realizes the function of shielding stray light, and the error correction of the light intensity is carried out in the horizontal and vertical directions; The transimpedance amplifier circuit and the lock-in amplifier circuit are used to realize the amplification of weak signals and the suppression of noise, and the A/D acquisition module collects and displays the data in real time; In the dark room environment, the center wavelength of 650 nm is used to stabilize the power laser as the light source, and the Hamamatsu S2386-5K photodiode is used as the photodetector for the experiment. During the experiment, the signal modulation frequency and the laser power are changed, and the modulation signal frequency of 1 000 Hz is finally selected. The experimental results show that the measurement of photoelectric detection system can be accurately completed in the illuminance range of 0.01 lx to 100 lx, which broadens the dynamic range of measurement, and the error between the actual measured value and the theoretical value is controlled in the allowable accurate range. This research provides the reference for the design and analysis of light sources with other wavelengths or other weak signal detection systems.

Keywords: wide dynamic; low illumination; photoelectric signal; noise analysis; related testing; signal acquisition; transimpedance amplification; FPGA

0 引言

探测器经过几十年来无数科学家的研究, 当前正朝着全天候、多波段、一体化的方向发展, 全天候工作的探测器, 工作在照度变化极大的环境下, 如何准确快速的进行信号测量采集, 得到探测器实际工作中的响应数据, 对进一步应用相关探测器进行系统性产品的研发奠定着强大的数据基础, 但现有的宽动态范围测量研究, 因为构建宽动态照度范围环

境难, 测量过程中噪声过大等问题, 很多仅仅达到 0.5 lx^[1], 于斌等人的研究实现 0.1~10 lx 范围内的检测^[3], 但依然无法满足实际应用中宽动态低照度的信号检测。

所以本测量采集系统主要针对工作在宽动态, 特别是低照度下的探测器展开研究, 系统以半导体激光器为光源, 利用光敏二极管作为光电探测器, 以斩波器和锁相放大器为核心部件搭建光电检测系统, 研究过程中重点关注杂散光噪声和电路噪声对探测器信号输出的影响, 通过相关检

收稿日期: 2022-03-09; 修回日期: 2022-05-07。

基金项目: 陕西省自然科学基金(2019ZDLGY16-01)。

作者简介: 黄书佳(1994-), 男, 安徽亳州人, 硕士研究生, 主要从事光电检测、光电信号处理方向的研究。

通讯作者: 韩 军(1966-), 男, 山东章丘人, 工学博士, 二级教授, 博士生导师, 主要从事信息光电系统评估评测技术及检校设备研制、先进成像探测技术、光电信息处理技术领域方向的研究。

引用格式: 黄书佳, 韩 军, 孔英秀, 等. 宽动态范围微弱光电信号检测系统[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(11): 85-91.

测的处理手段,实现了工作在宽动态照度范围下探测器输出信号的准确测量。

1 光电检测系统设计及工作原理

光电检测系统框图如图 1 所示,系统工作原理为光电探测器在光源垂直入射光敏面时,器件内部经过光电转换后,输出响应光电流,将光电流接入跨阻放大电路进行 I-V 转换并放大,经过噪声处理后输出,最后由 FPGA 驱动采集电路采集输出信号,FPGA 与电脑选用串口通信,采集到的数据在上位机端实时显示。

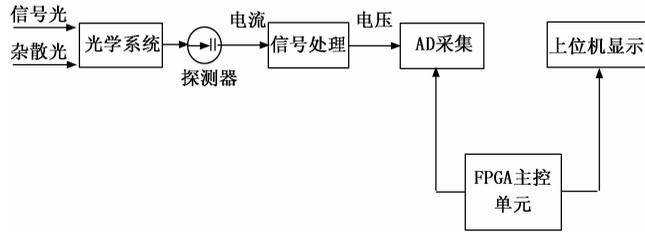


图 1 光电检测系统框图

接收光学系统的存在是为了改善探测系统的性能,尽可能的将光信号收集到探测器光敏面上,除了增加探测光敏面积,往往在光源与探测器之间搭建前设计出适宜的接收光学系统。光源经接收光学系统后,光信号频率完成了调制,并且使光源发出的光束直径尽可能与所用光电探测器的光敏面相匹配,本研究设计的光路系统框图如图 2 所示,半导体激光器上电之后,激光光源发出的准直光线先经过扩束和滤光操作,然后通过调节光阑大小进行空间滤波,使光束直径与探测器有效光敏面相匹配,再运用光学斩波器进行光源的频率调制,经过五五分光镜分成两束强度相同的光,通过衰减片可以调节出我们所需的低照度光,经过调节后的光分别垂直照射,位于分光镜距离相同的照度计与探测器上。

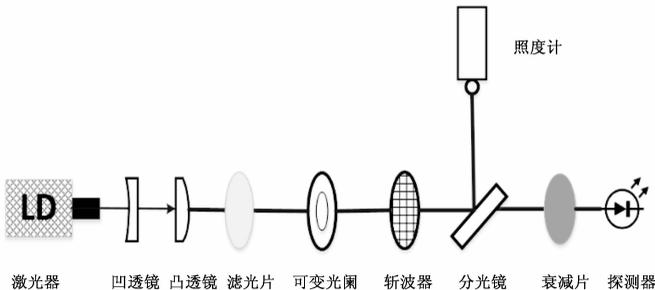


图 2 光路系统框图

按照上述设计的接收光学系统框图进行实物搭建,如图 3 所示,所有的光学器件均放置在同一个光学平台下,保证在同一水平高度。

2 光电探测器噪声分析抑制及信号处理

在对目的信号测量过程中观察到,采集系统除采集到有用信号之外,总会受到一些无用信号的干扰,分析可知,这些噪声主要是背景噪声,器件噪声,电路系统噪声^[12],

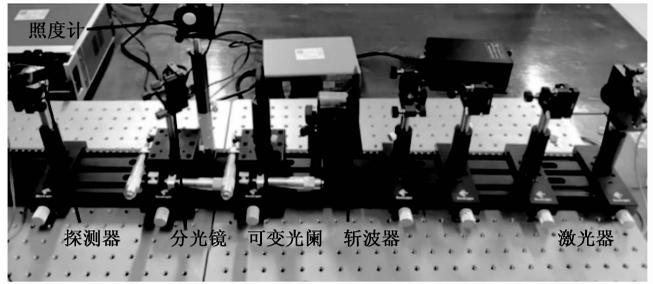


图 3 实物系统平台

例如光电探测器中的光电子随机起伏的干扰,激光光源在传输过程中受到通道和背景光的影响;光电转换完成后,需要对复合的微弱电信号进行放大,在对目的信号放大的同时,也会将噪声一并放大,无疑引入了放大器的干扰等;在进行微弱信号测量时,这些噪声的影响是不可忽略的,要想提高探测器探测性能,就要把淹没于数倍噪声的光信号精准提取出来。

在对光电检测理论研究过程中,不难发现光电检测电路存在的噪声,在此次研究中,着重关注散粒噪声与热噪声的影响。

热噪声产生机理是由导电材料中载流子不规则热运动而引起材料两端的电压或电流随机起伏,可表示为:

$$i_n^2 = \frac{4kT\Delta f}{R} \quad (1)$$

式中, k 为玻耳兹玻常数, T 为热力学温度, R 是器件电阻值, Δf 为所取得通带宽度。

散粒噪声是 PN 结中载流子通过结区产生的随机起伏,用公式可表示为:

$$i_n^2 = 2qI\Delta f \quad (2)$$

式中, q 为电子电量, I 为器件的输出平均电流, Δf 为所取的带宽。

在实际测量前,要清晰对系统性能有了解,不仅要掌握接收光学系统可提供的照度范围,还要计算出光电探测器能探测到的最小入射光功率,一般去计算噪声等效功率后,便可估算探测器最小接收光功率数值,因为噪声等效功率就是探测器信噪比为 1 时的最小输入光功率,一般简写为:

$$NEP = \frac{IS_d}{V_s/V_N} \quad (3)$$

I 是入射到光探测器上的光强, S_d 是光探测器的光敏面积, V_s 是光电探测器输出的信号电压均方根值, V_N 是光探测器的噪声电压均方根值。

本系统以滨松公司光电二极管型号为 S2386-5K 作为探测核心器件,在不加偏压且处于室温下,其平均暗电流为 5 nA,在 650 nm 波长附近的灵敏度为 0.42 A/W,有效光敏面积约为 5.44 mm² (2.33×2.33 mm)。实验过程中,采用光电二极管作为探测器,根据其频响特性知其调制频率不应太大,选择小于 2 kHz 为宜^[2],因此系统中选择调制信号频率为 $f=1$ kHz, $f_0=0$ Hz,光电探测器测量频带宽可近似为式:

$$\Delta f = f - f_0 = 1 \text{ kHz} \quad (4)$$

当被测光信号十分微弱时, 光电流产生的散粒噪声可以忽略, 计算噪声等效功率时可以考虑暗电流产生的散粒噪声^[1], 由此计算得散粒噪声均方电流为 $6.1 \times 10^{-25} \text{ A}^2$, 则最小可探测光功率 $\text{NEP} = 17.8 \times 10^{-12} \text{ W}$, 已知有效光敏面积, 最小探测照度亦可计算出。

研究中选用的激光器对其实际工作中的性能测试, 其能提供的照度范围为 $0.005 \sim 120 \text{ lx}$, 满足本次研究的实验条件。

2.1 跨阻放大电路模块

为了能够对输入信号动态范围较大时的小信号和大信号都实现无失真放大, 基于全天时硅光探测的基础上等效电路模型, 采用负反馈降低输入阻抗结构, 在结合实际研究中光电流宽动态输入需求, 设计了一种在输入信号频率为时, 输入电流信号范围在低至, 高至且输出无失真的跨阻放大电路如图 4 所示, 满足硅光探测宽动态信号前置放大处理。设计的跨阻放大电路模块, 实际测量中测得极限输入参数范围: 10 pA 到 2 mA 范围内都可完成对电流的放大。

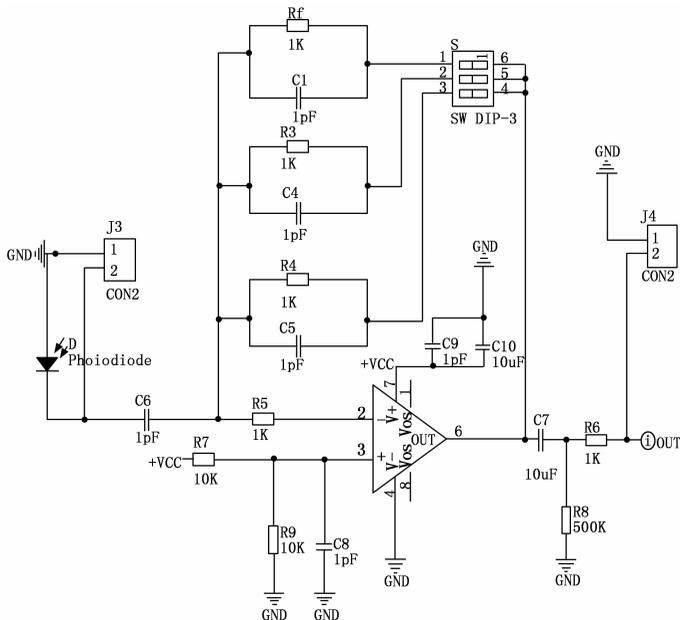


图 4 跨阻放大电路原理图

2.2 锁相放大电路模块

探测器输出的信号中含有多种噪声, 因此在对其动态信号进行 AD 采集之前应对信号进行调理^[7], 锁相放大器主要由信号通道、参考通道、相敏检波器以及输出电路为主要部分组成, 主要针对交变信号进行信号处理。利用锁相放大器中的信号相关原理, 对有序的周期信号和杂乱无章的噪声信号进行相乘和积分处理后, 将湮没于噪声中的有用微弱信号检测出来, 达到通过互相关运算削弱噪声影响的目的。

以图 4 进行说明检测原理, 待检测信号 $X(t)$, 同周期同频率的参考信号为 $Y(t)$, 对混有噪声的信号 $X(t)$ 作互相关处理, 图中 $Y(t)$ 为参考信号, 经过延迟电路后变

为 $Y(t-\tau)$, 将 $Y(t-\tau)$ 与待测信号同时输入乘法器进行乘法运算, 再经过积分运算, 由于绝大部分噪声与参考信号 $Y(t-\tau)$ 是不相关的, 所以在输出端得到 $X(t)$ 与 $Y(t)$ 的互相关函数, 最后输出的信号只保留与参考信号相关的信号部分, 绝大部分噪声却被抑制掉^[2], 互相关理论函数为公式 (5) 所示:

$$R(\tau) = \int_0^T X(t) * Y(t-\tau) dt \quad (5)$$

从公式中可计算出, 只要积分时间够长, 可以实现彻底噪声抑制, 但在实际测量中, 由于测量时间会有所限制, 所以完全实现零噪声是很难实现的。

锁相放大电路采用互相关检测原理来实现对微弱信号的检测, 通过待测信号中的有用信号和参考信号互相关的原理, 经过相敏检波器的相关运算和低通滤波器的滤波作用^[5], 由于在众多噪声中也会存在相关的一部分信号, 噪声信号与参考信号的互相关函数积分后不一定为零, 从而经过相关检测处理, 输出信号也一定会避免不了细微误差。

根据 AD630 芯片手册可了解到, 它的信号处理包括平衡调制和解调, 正交与相敏检波, 锁相放大等功能, 根据项目需求灵活配置, 内部采用高精度薄膜电阻并集成补偿电容, 只需要芯片管脚间连接即可稳定工作在闭环增益上。不仅如此, 它还允许设计者使用外部反馈, 实现高增益或者复杂转换的反馈拓扑结构, 满足应用者其它要求功能。图 5 为本次研究中使用 AD630 配置的锁相放大电路原理图。

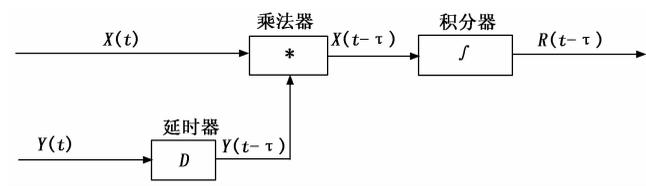


图 5 互相关检测原理框图

2.3 AD7606 采集模块

在详细分析了采集信号的特征后, 根据处理后的输出信号大小及实验中要求的采样精度, 本文选用 AD7606 作为采集模块的主芯片, 该芯片由 ADI 公司生产, 市面上在售的共有 3 个型号, 本文选择其中一款, 该款芯片拥有八通道采集功能。芯片相关性参数如表 1 所示。

表 1 AD7606 性能参数表

芯片型号	AD7606
通道数	8
最高采样速率	200 KSPS
输入电压范围	-5 ~ +5 V
工作温度	-40 ~ 85 °C
输入接口	八路 SMA
测量精度	0.5 mV
AD 位数	16 位

该芯片采用单电源供电, 内部置有过压保护电路, 输入放大器和数字滤波器等提升性能的配置, 该芯片能够满

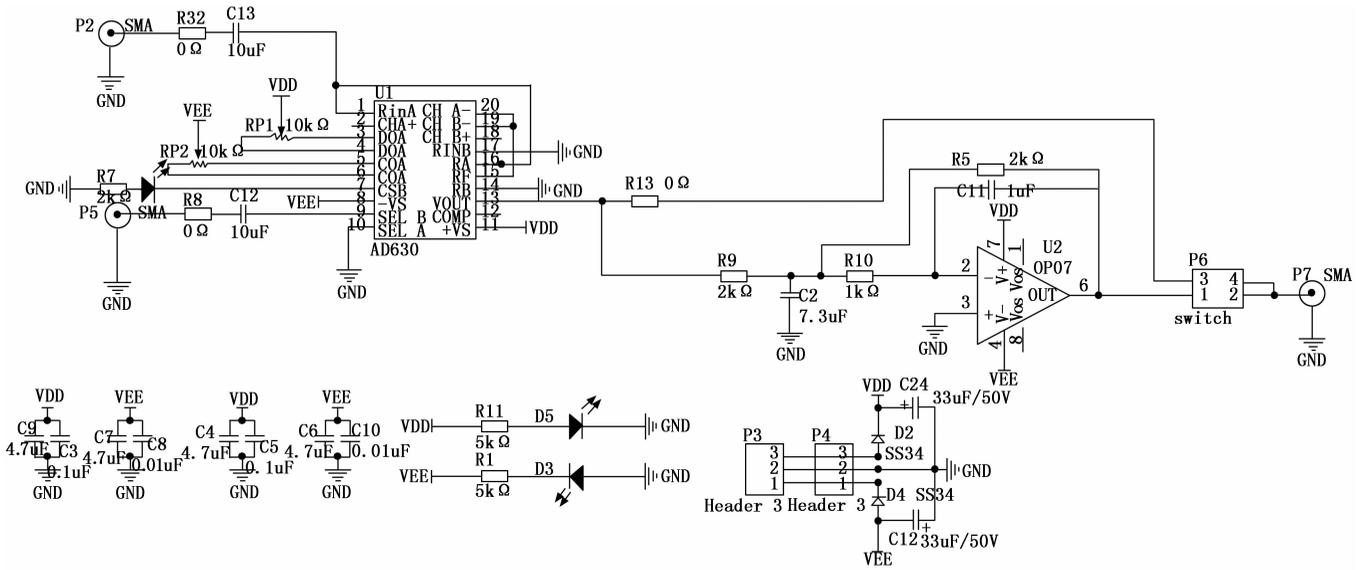


图 6 AD630 锁相放大电路原理图

足 8 通道同步采样且所有通道都能实现 200 KSPS 的吞吐速率。AD7606 抗混叠滤波器在 3 dB 截至频率数值为 22 kHz；当以最高速率采样时，抗混叠抑制性能不受影响，内部的数字滤波器发挥着改善信噪比，并降低 3 dB 带宽的作用。在以上优势之外，还有这灵活的采集方式和基准形式配置，如电路图 7 中所示，当 R3 焊接，R5 不焊接，使用外部基准；当 R3 不焊接，R5 焊接默认使用内部基准。当 R9 不焊接，R1 焊接将并行采集数据，R9 焊接，R1 不焊接则以串行进行数据采集，本文中配置了并行采集和内部基准，为后续可能的多探测器信号采集奠定技术基础。

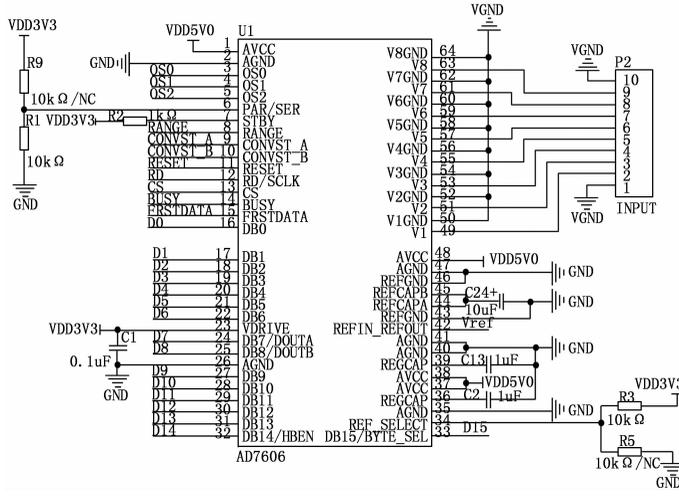


图 7 AD7606 核心电路原理图

3 实验结果与误差分析

3.1 接收光学系统测试

未进行开始实验之前，先对理论设计的接收光学系统进行调试，确保该系统能达到所要求的照度动态范围，模拟出宽动态照度范围环境，是测试系统的首要前提，如图 8

测量得到，照度计误差照度在 0.003 lx 左右，激光器经调节后的光源可以提供 0.028~103.88 lx 的照度范围，接收光学系统满足设计要求。



图 8 照度计误差测试数值

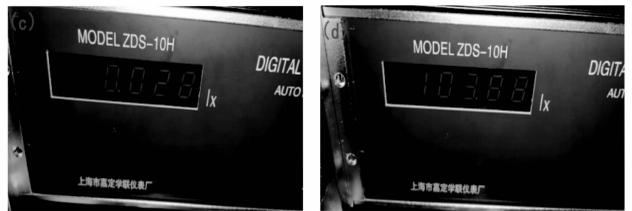


图 9 照度测试数据图

实验中发现，五五分光镜在设计的光路系统中分光镜表现出的分光效果无法达到理想状态，所以对分光后的两路光强，即水平方向与垂直方向照度进行精细化误差校正，因为本次实验对照度的精确度要求较高，之所以经过反复测量进行误差校正，测试数据如表 2，使用分辨率为 0.001 lx 的照度计，采用的方法是多次测量，求多组数据的平均误差作为整体误差，数据显示测得两路光强在分光镜误差参数范围之内，正式测量实验中数据统一按照 3% 处理。

经实际测试，无论在低照度还是高照度下，照度计上数据显示出的参数都能够达到实验所要求的宽动态范围的光照环境，证实接收光学系统符合设计预期。

表 2 分光后的两路光照度参数对比 lx

垂直方向	水平方向	误差/%
0.028	0.029	3.55
0.146	0.149	2.93
0.542	0.551	2.97
1.054	1.108	2.88
5.078	5.199	2.94
10.832	11.102	3.73
50.746	52.231	2.97
103.880	107.080	3.08

3.2 待处理信号测试

搭建好只有探测器与示波器组成的测试平台, 测试环境为暗室, 在自然光环境中, 对探测器输出的后的信号直接接入示波器中, 观察输出信号如图 10 所示, 可以看到信号波形不平滑, 有杂散光产生的噪声混入其中, 噪声呈杂乱无序, 无规律且无周期性。

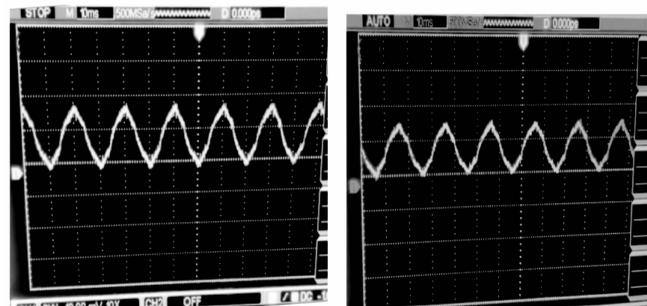


图 10 混合信号测试图

3.3 对跨阻放大电路输出进行误差校正

测量过程中探测器暗电流过大会影响有用电流信号的提取, 因此合理的确定测量条件也是信号测量的关键, 根据相关参数, 本次测量中探测器处于室内环境温度为 25 °C, 探测器无偏压状态下, 斩波频率为 1 000 Hz, 实验中, 在 $10^{-2} \sim 10^2$ lx 照度范围内, 产生的光电流为 nA 级别, 选择跨阻放大器的二档, 此时跨阻放大器相关参数如下, 跨阻放大器供电电源电压 $V_{CC} = 5$ V, $R = 10$ M Ω , 经过跨阻放大之后, 探测器理论输出电压值为:

$$V_{out} = \frac{1}{2} V_{CC} - I * R \quad (6)$$

在实际测量中, 无光电流情况下对输出电压值进行测量, 测得 $V_{out} = 2.37$ V, 所以跨阻放大器输出端实际输出函数为:

$$V_{out} = 2.37 - I * 1\,000\,000 \quad (7)$$

跨阻放大器输出之后的电压, 作为模拟锁相放大器的输入端, 模拟锁相放大器的参考输入信号为斩波器提供相同频率的信号, 经过测量模拟锁相放大器输出的电压, 进而得出不同照度条件下的光电压。

3.4 锁相放大电路测试

锁相放大器应用了相敏检测 (phase-sensitive detection,

PSD) 的技术, 可以测量出混合信号中的连续周期性信号。相对于噪声, 连续周期性信号具有固定的频率和相位, 相比较于噪声, 这个特性用于区别有用信号与噪声信号, 相关检测正是利用目的信号与参考信号具有相同的频率, 实现抽取目标的周期性信号, 抑制噪声提高电路输出信噪比。

实验测试中, 光学斩波器在调制光源的同时, 产生一个具有特定频率的参考信号作为载波输出, 用此信号对待测信号进行调制, 使待测信号具有相同的频率, 待测信号与参考信号作相乘积分处理后将信号输出, 借助示波器观察处理效果, 处理后的效果图如图 11 所示, 观察相关检测处理前后信号差异, 可以看出, 经锁相放大电路处理后的信号, 噪声基本被抑制, 波形显示平滑。

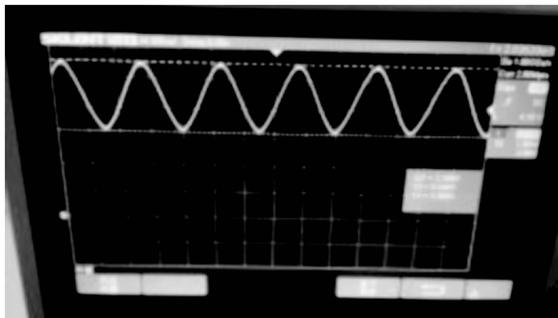


图 11 相关检测后的波形图

3.5 系统测试

完成前期信号处理后, 采集单元作为最后关键一环, 根据芯片手册中指导, FPGA 驱动 AD7606 实现数据转换和采集的功能时, 有并行模式和串行模式两种通信模式可选择, 模式的变换可以通过设置引脚来改变, 两种模式的区别在于并行模式下数据传输速度上较快, 可以一次性完成多位数据的输送, 串行模式下是将待传输数据排成一列, 单个按次序进行发送, 在控制接口方面较为常见。本文在完成采集电路程序设计的时候, 根据实际需求, 选择的是并行模式读取经处理后的光电探测器输出信号, 在八通道并行工作的时候, 选取其中一通道完成对光强信号的采集, 其余通道统一置零。

AD7606 的信号输入范围可以设置为 ± 5 V 或者是 ± 10 V 两个范围段, 选择哪种输入范围, 当结合研究中信号的特点和工程需求中的采集精度, 设置 ± 5 V 输入范围时, 计算出精度每 1 LSB = 152.58 μ V; 当选择 ± 10 V 输入范围时, 计算出精度每 1 LSB = 305.175 μ V。在实际工作中, 只需通过设置管脚 RANGE 的电平来选择模拟输入电压的范围。本文在采集电路程序设计上, 配置的 ± 5 V 的模拟电压输入范围, 这是因为本文中探测器输出的光电流经跨阻放大器放大后的输出信号在范围之间, 那么选择 ± 5 V 即可满足测试条件。

根据上文中芯片手册的时序部分, 设计出符合时序的状态转移图如图 12 所示。

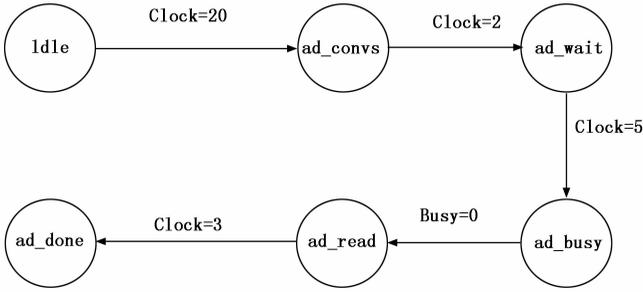


图 12 AD7606 状态转移图

首先使芯片处于 idle 状态，等待 20 个时钟周期后，跳转到下一个状态进行 AD 转换，继续等待转换完成后的标志信号，当 busy 信号拉高，代表模数转换完成，此时将数据读出，完成整个模数转换过程。根据状态转移图编写的 AD 驱动模块部分核心程序：

```

case(state)
  idle: begin
    ad_cs<=1'b1;
    ad_rd<=1'b1;
    ad_convst<=1'b1;
    if(i==20) begin //等待 20 个 clock 开始
      i<=0;
      state<=convst;
    end
  end
  else begin
    i<=i+1'b1;
  end
end
convst: begin
  if(i==2) begin //等待 2 个 clock
    rx ⊐
  
```

```

    i<=0;
    state<=wait;
    ad_convst<=1'b1;
  end
  else begin
    i<=i+1'b1;
    ad_convst<=1'b0; //启动 AD 转换
  end
  end
  wait: begin
    if(i==5) begin //等待 5 个 clock，等待 busy 信号为高
      i<=0;
      state<=busy;
    end
  end
  else
    i<=i+1'b1;
  end
  busy: begin
    if(ad_busy==1'b0) begin //等待 busy 信号拉低
      i<=0;
      state<=read_data;
    end
  end
  end
  end
  
```

对上述设计好的逻辑电路进行 RTL 级检验，生成对应的 RTL 电路，RTL 级是使用寄存器这一级别的描述方式来描述电路的数据流方式。RTL 在很大程度上是对流水线原理图的描述。弥补了行为级不关注电路的具体结构，不一定可以综合成实际电路结构的不足，RTL 级接近实际电路结构的描述，可以精确描述电路的原理、执行顺序等，其目的在于可综合。如图 13 中可以清晰地看出 A/D 采集电路

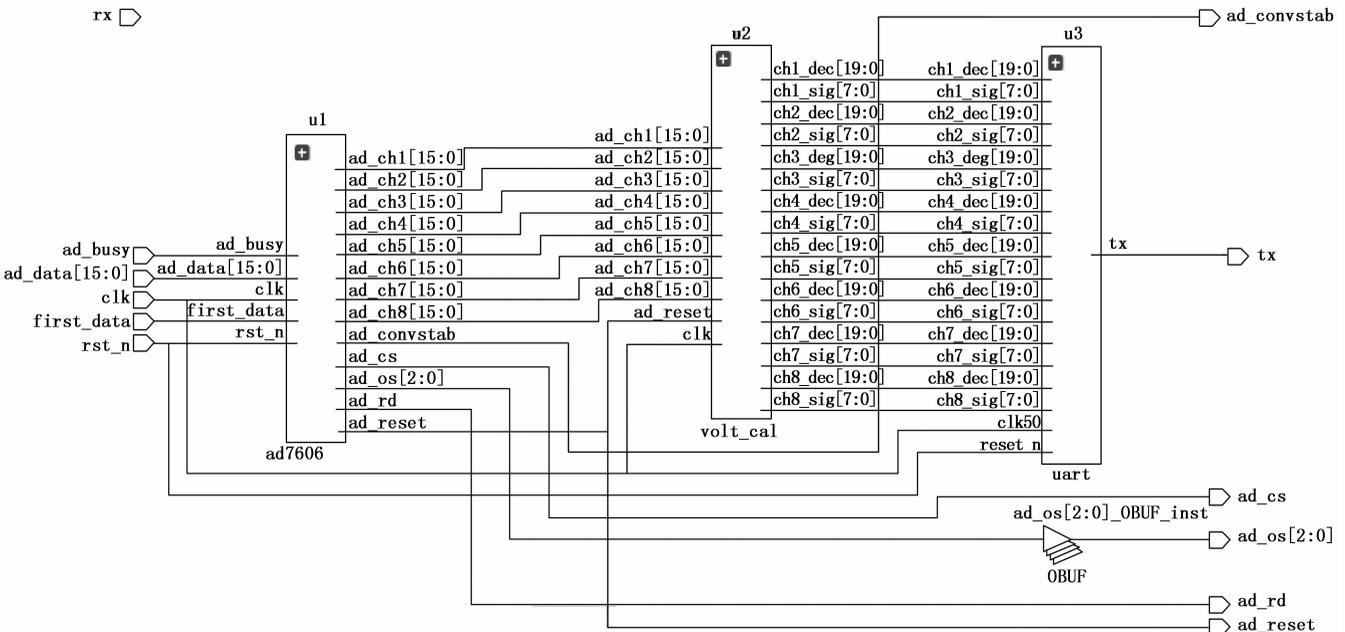


图 13 A/D 转换顶层模块电路原理图

模块符合设计逻辑, 通过系统功能仿真, 验证了 FPGA 内部逻辑程序的正确性以及片内逻辑资源的使用情况。

在对系统进行稳定性测试, 以电压源为输出, 将电压源调节至 1.5 V, 作为采集系统的原始信号输入, 测试效果图如图 14 所示, 信号测试结果精度保持在 0.000 1 V。通过对系统各电路模块及整系统测试, 证明光电检测系统可以实现宽动态范围下的光电检测, 方案实用可行。

AD1: -1.5544V	AD2: +0.0000V	AD3: +0.0000V	AD4: +0.0000V	AD5: +0.0000V	AD6: +0.0000V	AD7: +0.0000V
AD1: -1.5522V	AD2: +0.0000V	AD3: +0.0000V	AD4: +0.0000V	AD5: +0.0000V	AD6: +0.0000V	AD7: +0.0000V
AD1: -1.5570V	AD2: +0.0000V	AD3: +0.0000V	AD4: +0.0000V	AD5: +0.0000V	AD6: +0.0000V	AD7: +0.0000V
AD1: -1.5541V	AD2: +0.0000V	AD3: +0.0000V	AD4: +0.0000V	AD5: +0.0000V	AD6: +0.0000V	AD7: +0.0000V
AD1: -1.5550V	AD2: +0.0000V	AD3: +0.0000V	AD4: +0.0000V	AD5: +0.0000V	AD6: +0.0000V	AD7: +0.0000V
AD1: -1.5550V	AD2: +0.0000V	AD3: +0.0000V	AD4: +0.0000V	AD5: +0.0000V	AD6: +0.0000V	AD7: +0.0000V
AD1: -1.5527V	AD2: +0.0000V	AD3: +0.0000V	AD4: +0.0000V	AD5: +0.0000V	AD6: +0.0000V	AD7: +0.0000V
AD1: -1.5563V	AD2: +0.0000V	AD3: +0.0000V	AD4: +0.0000V	AD5: +0.0000V	AD6: +0.0000V	AD7: +0.0000V
AD1: -1.5533V	AD2: +0.0000V	AD3: +0.0000V	AD4: +0.0000V	AD5: +0.0000V	AD6: +0.0000V	AD7: +0.0000V
AD1: -1.5549V	AD2: +0.0000V	AD3: +0.0000V	AD4: +0.0000V	AD5: +0.0000V	AD6: +0.0000V	AD7: +0.0000V
AD1: -1.5528V	AD2: +0.0000V	AD3: +0.0000V	AD4: +0.0000V	AD5: +0.0000V	AD6: +0.0000V	AD7: +0.0000V
AD1: -1.5551V	AD2: +0.0000V	AD3: +0.0000V	AD4: +0.0000V	AD5: +0.0000V	AD6: +0.0000V	AD7: +0.0000V
AD1: -1.5563V	AD2: +0.0000V	AD3: +0.0000V	AD4: +0.0000V	AD5: +0.0000V	AD6: +0.0000V	AD7: +0.0000V
AD1: -1.5542V	AD2: +0.0000V	AD3: +0.0000V	AD4: +0.0000V	AD5: +0.0000V	AD6: +0.0000V	AD7: +0.0000V
AD1: -1.5544V	AD2: +0.0000V	AD3: +0.0000V	AD4: +0.0000V	AD5: +0.0000V	AD6: +0.0000V	AD7: +0.0000V
AD1: -1.5519V	AD2: +0.0000V	AD3: +0.0000V	AD4: +0.0000V	AD5: +0.0000V	AD6: +0.0000V	AD7: +0.0000V
AD1: -1.5579V	AD2: +0.0000V	AD3: +0.0000V	AD4: +0.0000V	AD5: +0.0000V	AD6: +0.0000V	AD7: +0.0000V
AD1: -1.5525V	AD2: +0.0000V	AD3: +0.0000V	AD4: +0.0000V	AD5: +0.0000V	AD6: +0.0000V	AD7: +0.0000V
AD1: -1.5521V	AD2: +0.0000V	AD3: +0.0000V	AD4: +0.0000V	AD5: +0.0000V	AD6: +0.0000V	AD7: +0.0000V
AD1: -1.5544V	AD2: +0.0000V	AD3: +0.0000V	AD4: +0.0000V	AD5: +0.0000V	AD6: +0.0000V	AD7: +0.0000V
AD1: -1.5557V	AD2: +0.0000V	AD3: +0.0000V	AD4: +0.0000V	AD5: +0.0000V	AD6: +0.0000V	AD7: +0.0000V

图 14 系统测试效果图

4 结束语

本文从光电检测为起点, 详细阐述了光电检测应用, 将光电检测系统中各电路依模块划分, 介绍了各电路模块及程序设计, 模块所实现的功能及设计思路, 并搭建了实验测试平台, 完成了系统的功能测试。对于接收光学系统的测试, 选用了分辨率为 0.001 lx 的高精度照度计, 对于锁相放大电路的测试, 通过示波器观察满足对噪声的抑制效果; 对于采集电路的测试, 通过对数据的处理及分析, 验证了其满足对采样周期及采样精度的要求。对于微弱光强信号的准确检测问题实际上就是噪声的抑制问题, 采用的 AD630 锁相放大模块, 很好地抑制了背景噪声和电路噪声, 提高了对微弱信号的提取能力。本系统采用 FPGA 作为系统的主要控制芯片, 由光电探测器采集光信号, 完成光电转换, 根据探测器输出阻抗高的特性, 选用了跨阻放大电路完成信号的转换放大, 再经过锁相放大电路完成了对噪声的抑制, 最后通过 A/D 转换进行采集输出信号, 实现了宽动态范围信号的检测, 经实际系统测试, 可以实现照度跨越 4 个数量级的探测器信号测量, 不仅可以满足微弱信号检测, 同样适用于一般光电探测器的信号测量, 测试结果显示在 $10^{-2} \sim 10^2$ lx 照度范围内, 光电信号都能在可允许误差范围内完成测量。

参考文献:

[1] 白泽生, 白宗文. 一种简易光照度检测电路的设计 [J]. 现代电子技术, 2006 (11): 91-92.
 [2] 王清正, 胡渝, 林崇杰. 光电探测技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 1994.

[3] 郑培超, 于斌, 刘克铭, 等. 硅光二极管光电检测电路的研究与设计 [J]. 重庆邮电大学学报 (自然科学版), 2013, 25 (4): 484-488.
 [4] 侯勃尧, 高爱华, 闫丽荣, 等. 大动态范围高精度激光透射率测量系统 [J]. 光电子·激光, 2020, 31 (6): 569-574.
 [5] 姚国生, 孙志斌, 李培刚, 等. 基于微弱交流信号检测的锁相放大系统设计 [J]. 工业控制计算机, 2017, 30 (1): 134-135.
 [6] 高国旺, 段鹏伟, 陈凯莉, 等. 基于 AD630 的锁相放大器的设计及应用 [J]. 信息记录材料, 2020, 21 (2): 198-199.
 [7] 郑羽洁, 梅佳. 基于 LED-89C52 的无人机动态信号采集处理系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (3): 995-997, 1001.
 [8] 王津东. 微弱信号采集测量电路的相关探索 [J]. 电声技术, 2019, 43 (9): 63-64, 71.
 [9] 任全会, 杨保海. 基于 FPGA 弱小信号测量系统研究与实现 [J]. 实验室研究与探索, 2018, 37 (3): 92-95, 100.
 [10] 牛晓阳, 千奕, 杨海波, 等. 微弱电流 I-V 转换电路保护环设计 [J]. 核电子学与探测技术, 2017, 37 (5): 531-535.
 [11] 许江淳, 李瑞, 赵焯, 等. 高精度微弱信号检测装置设计 [J]. 传感器与微系统, 2017, 36 (2): 94-96, 100.
 [12] 高法德. 基于 AD630 的强噪声背景下的微弱信号检测技术 [J]. 数字技术与应用, 2016 (2): 103-104.
 [13] 刘卫东, 刘延冰, 刘建国. 检测微弱光信号的 PIN 光电检测电路的设计 [J]. 电测与仪表, 1999 (4): 27-29, 26.
 [14] 刘浩, 沈荣生. 光电检测系统的微弱信号检测研究分析 [J]. 中国管理信息化, 2021, 24 (20): 190-192.
 [15] 王丽静, 张建军, 王丽君. 混合气体的光电检测系统 [J]. 仪表技术与传感器, 2021 (1): 73-76.
 [16] 王旭东, 陈涛, 郑磊. 基于 FPGA 的多通道数据采集系统设计应用 [J]. 数字技术与应用, 2021, 39 (10): 190-192.
 [17] 陶海军, 张一鸣, 曾志辉. 基于 AD7606 的多通道数据采集系统设计 [J]. 工矿自动化, 2013, 39 (12): 110-113.
 [18] 何振琦. 基于 FPGA 的 LVDS 高速数据采集系统设计 [J]. 自动化技术与应用, 2021, 40 (10): 166-168, 180.
 [19] 张燕强, 贾云飞, 蔡璨. 基于 FPGA 的磁异常数据采集系统设计 [J]. 电子设计工程, 2022, 30 (2): 100-105.
 [20] 李坤贺, 陈刚, 卢峥. FPGA 在双通道信号采集与传输系统设计中的应用 [J]. 电子世界, 2021 (21): 132-134.
 [21] 聂国政, 聂维新. 基于 FPGA 的多通道数据采集系统设计 [J]. 信息与电脑 (理论版), 2021, 33 (15): 188-191.
 [22] 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.
 [23] 赵庭兵, 曾曾. 光电检测系统的微弱信号采集与检测 [J]. 激光杂志, 2018, 39 (11): 158-161.