

调焦调平线阵 CCD 成像系统超频读出设计

周佐达^{1,2,3}, 陈迪虎^{1,2,3*}, 路美娜^{1,3}, 金伟^{1,3}, 魏来^{1,2,3}, 汪文韬^{1,2,3},
宋茂新^{1,2,3}, 洪津^{1,2,3}

¹中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;

²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;

³中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031

摘要 调焦调平系统主要通过光学三角法的测量原理来实现,线阵电荷耦合器件(CCD)具有高帧频和高分辨率等特点,适用于高速且高精度检测的三角法测量。某调焦调平项目要求线阵 CCD 具有 2048 个有效像元,5 kHz 的行读出频率,为此提出对最大额定读出频率为 10 MHz 的 S11156-2048 型线阵探测器进行 12.5 MHz 超频读出的驱动设计,以满足系统行读出频率的要求。首先从理论上验证超频读出的可行性,然后在电源、时序驱动和模拟前端的设计上展开细致研究,最后使用积分球光源在 6.0 MHz 的额定频率读出和 12.5 MHz 的超频读出下对线阵 CCD 成像系统的光电性能进行对比测试。实验结果表明,S11156-2048 型探测器采用 12.5 MHz 的超频读出设计光电性能没有明显下降,信噪比为 54.22 dB,电荷转移效率为 0.999974,满足调焦调平系统的成像性能要求。

关键词 光学设计; 调焦调平; 线阵 CCD; 超频读出; 电荷转移效率; 信噪比

中图分类号 TP212.9

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1822001

Overclocking Readout Design of Focusing and Leveling Linear Array CCD Imaging System

Zhou Zuoda^{1,2,3}, Chen Dihu^{1,2,3*}, Lu Meina^{1,3}, Jin Wei^{1,3}, Wei Lai^{1,2,3},
Wang Wentao^{1,2,3}, Song Maoxin^{1,2,3}, Hong Jin^{1,2,3}

¹Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science,
Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

²University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

³Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract The focusing and leveling system is mainly realized by the measurement principle of optical triangulation. Linear charge coupled device (CCD) has the characteristics of high frame rate and high resolution, which is suitable for high-speed and high-precision triangulation measurement. A focusing and leveling project requires a linear array CCD with 2048 effective pixels and a line readout frequency of 5 kHz. For this reason, it is proposed to overclock the S11156-2048 linear array detector with a maximum rated readout frequency of 10 MHz to 12.5 MHz. The readout drive is designed to meet the requirements of the system line read-out frequency. First, the feasibility of overclocking readout is verified theoretically. Then, the design of power supply, timing drive and analog front end is studied in detail. Finally, the photoelectric performance of the linear CCD imaging system is compared by using an integrating sphere light source at 6.0 MHz rated frequency and 12.5 MHz overfrequency. The experimental results show that the S11156-2048 detector adopts 12.5 MHz over-frequency readout design with no significant degradation in its optical and electrical performance, the signal-to-noise ratio is 54.22 dB, and the charge transfer efficiency is

收稿日期: 2021-01-04; 修回日期: 2021-03-25; 录用日期: 2021-04-02

基金项目: 国家自然科学基金 (61975212)

通信作者: *dhchen@aiofm, ac, cn

0.999974, which meets the imaging performance requirements of the focusing and leveling system.

Key words optical design; focusing and leveling; linear CCD; overclocking readout; charge transfer efficiency; signal-to-noise ratio

OCIS codes 220.3740; 040.1520; 120.4640

1 引言

光刻技术难题是由中国科学技术协会发布的 2020 年十大工程技术难题之一,该技术是集成电路制造的核心技术,而高分辨率的投影光刻机是主流光刻设备^[1-3],投影光刻机的两个关键参数分别为分辨率和焦深。根据瑞利判据可知,通过缩短曝光波长和增大物镜的数值孔径来提高分辨率将会引起焦深的显著下降,并且还会带来离焦的问题^[4-5],进而造成集成电路的质量和成品率的下降,而调焦调平系统可对离焦问题进行解决。

目前,国内外的调焦调平系统主要通过光学三角法的测量原理来实现^[6-7]。为了保证测量精度和速度,作为三角法测量的核心器件,光电成像器件需要具有高信噪比、高分辨率和高读出速度等特点。电荷耦合器件(CCD)具有高灵敏度、大动态范围和低噪声等诸多优点^[8],特别是线阵 CCD 具有高帧频和高分辨率的特点,非常适用于高速且高精度的检测应用。高速线阵 CCD 成像系统的驱动时序复杂,而且工作在多种偏置电压的环境中,所以信号间容易产生串扰,这是三角法测量系统中的设计难点之一。国内外关于线阵 CCD 成像电路系统的设计研究已有不少报道^[9-14],但均是在探测器的额定工作频率以内进行设

计,鲜有针对超频读出对其成像性能的影响进行研究。

某调焦调平项目要求成像系统的线阵 CCD 具有 2048 个有效像元,5 kHz 的行读出频率,但一般的线阵 CCD 不能满足要求。针对此问题,本文对线阵 CCD 进行超频读出的设计,定量计算 CCD 超频读出对电荷转移效率的影响,并通过 CCD 在超频和额定频率读出的情况下进行光电性能的对比测试,验证 CCD 超频读出设计的可行性。

2 系统的总体设计

调焦调平电子学系统能够根据成像条件来实现参数的调整,对 CCD 图像数据进行高精度的实时采集和处理,完成三角法测量中光斑中心的亚像素级定位。为了满足上述需求,电子学系统的设计分为光电成像和信号处理两个子系统,结构如图 1 所示,其中 FPGA 为现场可编程门阵列,AFE 为模拟前端电路,SRIO 为高速串行总线,EMIF 为外部存储器接口,DSP 为数字信号处理器,PC 为个人计算机,SFP+ 为小型热插拔光模块。其中光电成像子系统用来实现图像的实时采集和数据传输,信号处理子系统用来实现亚像素级点的定位以及与上位机通信,子系统之间通过 Camera Link 接口来实现异步串行通信和图像数据传输。

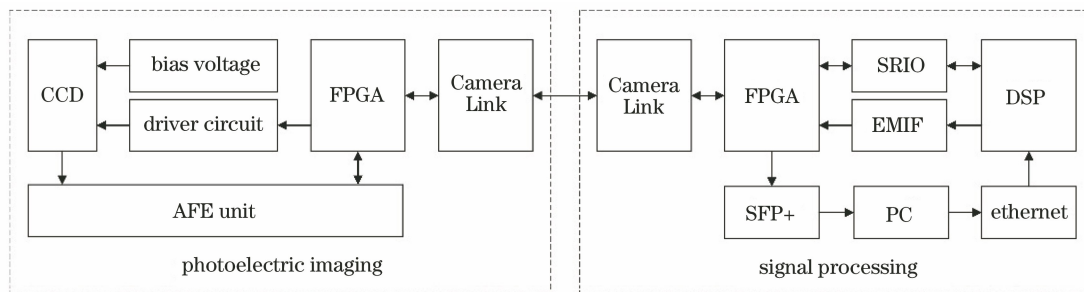


图 1 调焦调平电子学系统的结构

Fig. 1 Structure of focusing and leveling electronics system

光电成像子系统以线阵 CCD 为核心,以 FPGA 为主控单元。CCD 外围电路包括电源管理电路、时序驱动电路和 AFE。电源管理电路为 CCD 提供低噪声的直流偏置电压,同时为时序驱动、FPGA 和 AFE 等电路提供各自所需的电源。时序驱动电路将 FPGA 所产生的数字时序信号转换为满足 CCD 驱动电压和电流要求的功率信号。AFE 包括三极

管射极跟随电路、相关双采样电路、暗电平箝位电路、可编程增益放大电路以及模数转换电路,其中三极管射极跟随电路通过分立元件来搭建,其余模块通过专用集成电路 AD9826 来实现。FPGA 为时序驱动电路提供 CCD 的所需时序,控制 AD9826 来完成图像数据的采集,并通过 Camera Link 接口与信号处理子系统进行双向通行以发送图像数据和

CCD 状态,接收积分时间和增益倍数等控制参数。

信号处理子系统采用“FPGA + DSP”架构, FPGA 完成接口匹配与数据传输, DSP 调用多核, 即通过多任务多线程的方式进行高速的图像处理以实时解析出光斑位置。成像子系统中的图像数据首先通过 Camera Link 接口传输至 FPGA 缓存, 然后经过 SRIO 接口传输给 DSP 进行图像处理, 处理的结果再经过 SRIO 接口返回至 FPGA, 最后通过 SFP+ 光纤模块将结果上传至 PC。PC 可以对 DSP 的图像处理、FPGA 的数据传输和成像子系统的成像过程进行控制, 依次通过以太网络、EMIF 和 Camera Link 接口传递和控制参数。

光电成像子系统决定系统的成像质量, 影响光斑中心的定位精度。本文就 CCD 成像电路的设计展开研究, 包括电源管理、时序驱动和模拟前端的设计和实现, 并对设计完成的成像系统进行光电性能测试。

3 S11156-2048 型线阵 CCD 探测器的成像技术分析

基于三角法测量的工作要求, 选用滨松公司的 S11156-2048 型线阵 CCD 探测器。S11156-2048 型线阵 CCD 探测器具有如下特点: 1) 具有电子快门的功能, 能够精确调节曝光时间; 2) 采用背照式 CCD 结构, 可以提高短波响应和量子效率; 3) 采用电阻栅结构, 可以实现高速低滞后传输, 最高读出速度为 10 MHz; 4) 单个像元尺寸为 $14 \mu\text{m} \times 1000 \mu\text{m}$, 单像元满阱电荷数为 2×10^5 , 具有较大的动态范围。

S11156-2048 型线阵 CCD 探测器的结构如图 2 所示, 分为成像单元、存储单元和水平移位寄存器。成像区域的像素单元为 $1000 \mu\text{m}$ 长的条型结构, 采用特殊的电阻栅结构可以在高电阻栅上形成电势逐渐降低的斜坡, 从而将电荷向存储区转移, 并通过水平移位寄存器将电荷输出。

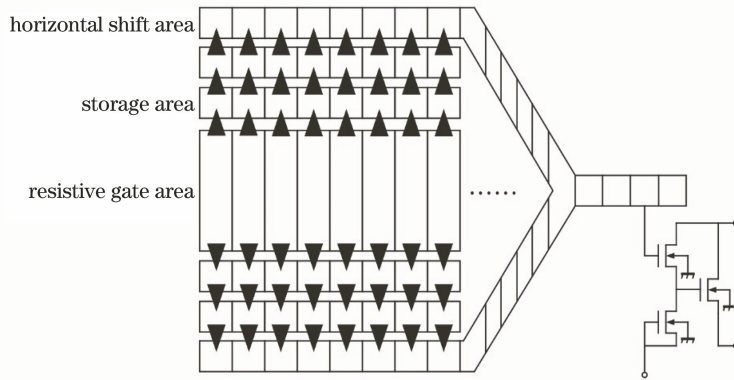


图 2 S11156-2048 型线阵 CCD 探测器的结构

Fig. 2 Structure of S11156-2048 linear array CCD detector

3.1 CCD 超频读出对电荷转移效率的影响

CCD 器件中信号电荷的转移需要消耗一定的时间, 读出频率的升高将有一部分电荷来不及转移而导致电荷的转移效率降低。电荷转移效率 $\eta(t)$ 和转移时间 t 的对应关系为^[15]

$$\eta(t) = 1 - \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{t}{\tau_0}\right), \quad (1)$$

式中: τ_0 为衰变时间常数, 可表示为

$$\tau_0 = \frac{4L^2}{\pi^2 D_e}, \quad (2)$$

式中: L 为电极长度; D_e 为电子扩散系数。由(1)式可以看到, 电荷转移效率随转移时间的减少呈指数递减。对于二相 CCD, 其转移时间 t 和读出频率 f 的对应关系为

$$f = \frac{1}{2t}. \quad (3)$$

为了满足行频率为 5 kHz 的系统要求, 对 S11156-2048 型探测器进行 12.5 MHz 的超频读出设计。S11156-2048 型探测器的最大额定输出频率为 10 MHz, 在 1/2 的满阱容量处其电荷转移效率的典型值为 0.99999。根据(1)式和(3)式进行计算, 当读出频率 f 为 12.5 MHz 时, 转移效率的理论值为 0.9999, 满足系统需求。

3.2 电源管理设计

电源管理电路为线阵 CCD、时序驱动、AFE、FPGA 和 Camera Link 接口供电, 这会影响系统的稳定性和成像性能。电源可以分为如下三类: 1) AFE 模拟部分和 CCD 的电源(电压分别为 +15.0, +14.0, +5.0, +3.5, +1.0, -7.0, -9.5 V), 这两部分电源的纹波水平将影响系统的信噪比, 因此使用线性稳压器或者运算放大器来供电, 并且与存

在的噪声源采用磁珠隔离的方式隔离以保证电源的低噪声性能;2)时序驱动电路的电源(电压分别为 +10.5, +8.0, +6.0, +1.0, -5.0 V)需要具有较大的供流能力和瞬态响应能力,以保证时序驱动电路的驱动能力,因此采用开关电源或者大电流低压差线性稳压器供电,而且并联大退耦电容;3)FPGA 电源、Camera Link 接口电源和 AFE 数字部分的电源(电压分别为 +3.3, +2.5, +1.2 V)为数字器件供电,需要保证其供流能力满足设计需求。模拟、功率和数字三类电源中,模拟部分容易受到其他电源及器件的干扰,在电路设计和布局布线上需要进行

充分的隔离^[16]。

基于以上设计需求,电源管理电路整体采用“开关电源+线性稳压器”的设计方式,同时保证电源效率和低噪声性能^[17]。电源转换方案如图 3 所示,系统外部是输入电压为 +24.0 V 的电源,第一级电平转换过程中与外部输入电源相差较大的 +3.3 V 和 +6.5 V 的电源使用开关电源芯片 TPS54202 来获得,相差较小的 +15.0 V 电源使用线性电源芯片 LM317-N 来获得,再通过开关电源、线性电源和电荷泵进行第二级和第三级电源转换来获得系统所需的各个电源。

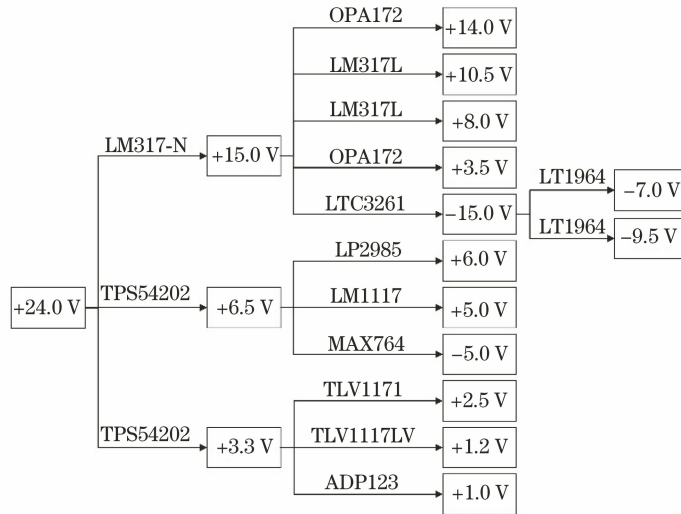


图 3 电源转换方案

Fig. 3 Power conversion scheme

3.3 时序驱动设计

当为 CCD 提供时序驱动信号时,为了达到快速变化的边沿,需要为 CCD 容性负载引脚提供足够大的瞬态电流。驱动信号的上升沿和下降沿可近似为线性变化^[18],根据电容理论模型可以推导驱动电流 I 和上升或下降边沿时间 t' 的对应关系^[19],表达式为

$$I = C \times (V_H - V_L) / t' \times 80\%, \quad (4)$$

式中: C 为 CCD 时序驱动引脚的等效电容; V_H 和 V_L 分别为时序驱动信号的高、低电平值。S11156-2048 型探测器的各个时序驱动引脚所对应的容性负载的典型值、驱动信号的电压摆幅、最短的边沿时间,以及根据(4)式计算的最大驱动电流如表 1 所示。

表 1 S11156-2048 型探测器时序驱动引脚的驱动电流

Table 1 Drive current of timing drive pin of S11156-2048 detector

Function	Symbol	Typical capacitance /pF	Voltage amplitude /V	Minimum edge time /ns	Maximum drive current /mA
All reset gate	ARG	100	7.0	200	2.8
Transfer gate	TG	100	15.5	20	62.0
Horizontal register	P1H/P2H	200	11.0	10	176.0
Summing gate	SG	10	11.0	10	8.8
Reset gate	RG	10	13.0	5	20.8

时序驱动电路将 FPGA 所产生的数字信号转换为 CCD 时序驱动信号,需要同时满足驱动电流、

驱动频率和高电平的设计要求^[20]。考虑到超频读出的设计需求,时序驱动电路的驱动频率至少为

12.5 MHz, 驱动电流至少为 176 mA, 并留有一定余量。选用 Renesas 公司生产的驱动频率为 40 MHz 的 CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) 集成驱动芯片 EL7457 和 EL7156,

分别具有 2.0 A 和 3.5 A 的驱动电流, 两种型号可满足 CCD 不同引脚的高、低电平需求, 设计的时序驱动电路如图 4 所示。

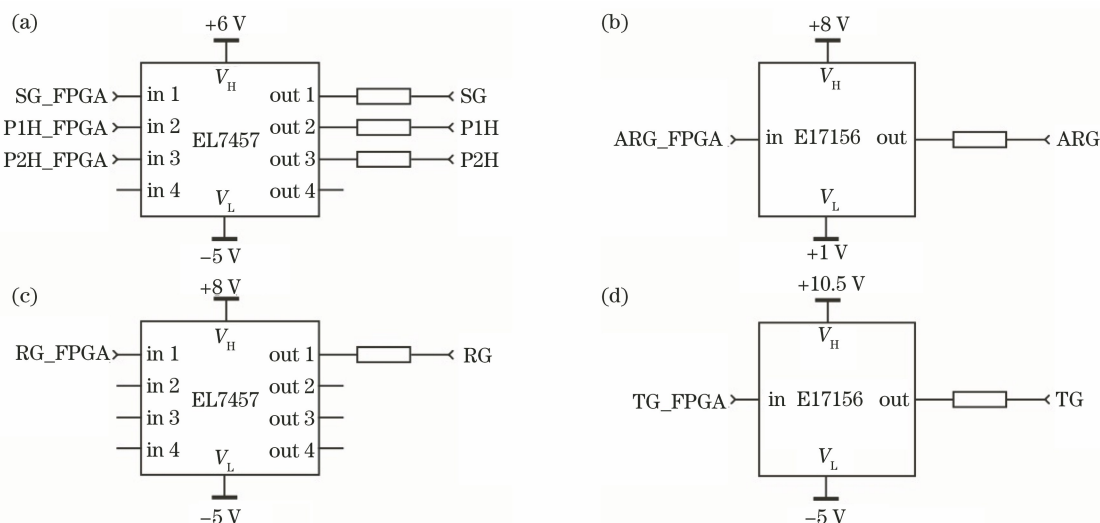


图 4 时序驱动电路。(a) SG、P1H 和 P2H 引脚驱动;(b) ARG 引脚驱动;(c) RG 引脚驱动;(d) TG 引脚驱动
Fig. 4 Timing drive circuit. (a) SG, P1H and P2H pin drivers; (b) ARG pin drive; (c) RG pin drive; (d) TG pin drive

驱动芯片正负电源的电平决定输出驱动信号的高低电平, 对不同高低电平的驱动信号使用 4 片驱动芯片进行匹配。驱动芯片的输入引脚提供数字时序驱动信号给 FPGA, 输出引脚提供时序驱动信号给 CCD, 并且串联限流电阻以调节驱动信号边沿的变化速度^[21]。驱动芯片的电源入口处并联多个不同容值的去耦电容, 以防出现轨道塌陷噪声。

S11156-2048 型探测器中的移位寄存器采用二相电极结构, 相位相差 180° 的两相脉冲 P1H 和 P2H 可驱动信号的电荷单向传输, 相加阱(SG)用于隔离水平移位寄存器和输出节点。示波器抓取的 P1H、P2H 和 SG 驱动信号如图 5 所示。

3.4 模拟前端的设计

S11156-2048 型探测器输出的模拟信号包括复位门(RG)产生的复位电平、偏置电压提供的参考电平以及信号电荷拉低参考电平产生的信号电平, 参



图 5 探测器驱动信号的波形
Fig. 5 Waveform of detector drive signal

考电平和信号电平之间的差值可以反映 CCD 信号电荷的大小。通过设计高精度的模拟前端对 CCD 输出信号进行信号调理和模数转换^[22], 可以保证高质量图像信号的输出, 模拟前端电路如图 6 所示, 其中 CCD_out 表示 CCD 输出的模拟信号, R_load 表示负载电阻, CDS 为相关双采样, 9-bit DAC 表示

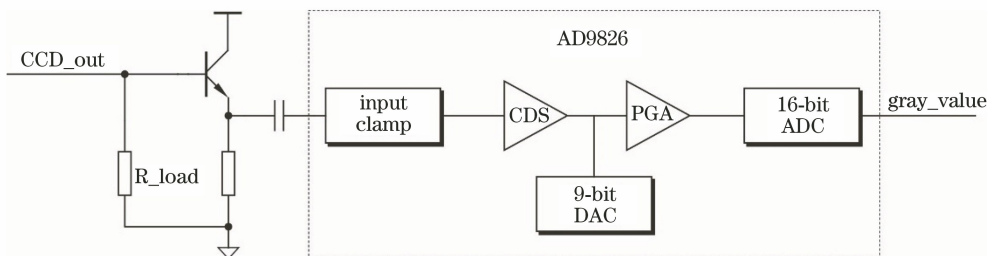


图 6 模拟前端的电路
Fig. 6 Analog front-end circuit

9 bit 的分辨率数模转换器,PGA 表示可编程增益放大器,16-bit ADC 表示 16 bit 的分辨率模数转换器。

S11156-2048 型探测器的信号输出端不包含片内负载,因此在输出端添加电阻为 2.2 kΩ 的负载电阻。输出端连接三极管射极跟随电路,可以增加输出信号的驱动能力。由于 S11156-2048 型探测器的输出信号具有电压为 8 V 的直流电平,这增加了后续电路的设计难度并且容易淹没有效图像信号^[23],因此采用隔直电容的交流耦合来消除直流分量,同时可降低直流功耗并抑制 1/f 噪声^[24]。此时的信号为高频交流小信号,通过专用集成电路芯片 AD9826 在 FPGA 的控制下进行输入箝位、相关双采样、直流偏置、增益调节和模数转换处理。AD9826 芯片在单通道模式下具有 12.5 MSa/s 的转换速率,满足探测器 12.5 MHz 读出频率的速度要求。输入箝位和直流偏置处理可以将交流信号转移到正电平范围,相关双采样进行两次采样以及差分可以实现复位噪声的抑制^[25],PGA 电路对信号进行增益可调放大以匹配 ADC 的量程,最后通过 16 bit 的 ADC 对信号进行高精度的模数转换,将得到的数字图像信号发送给 FPGA。AD9826 芯片分别在相关双采样脉冲(CDSCLK 1 和 CDSCLK 2)的下降沿采样 CCD 输出的参考电平和信号电平,示波器抓取的波形如图 7 所示。

CCD 探测器的驱动电路板采用 6 层印制电路板,其实物如图 8 所示。

4 光电性能测试

为了探究 12.5 MHz 的超频读出设计对 S11156-2048 型探测器光电性能的影响,参照 EMVA1288 标准在实验室的室温环境下搭建 CCD

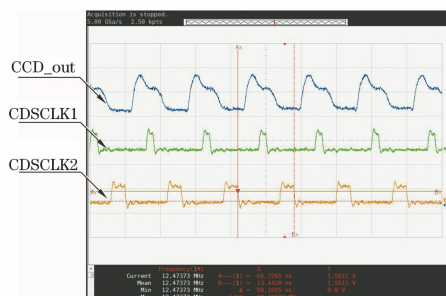


图 7 探测器输出信号与采样脉冲的波形

Fig. 7 Waveform of detector output signal and sampling pulse

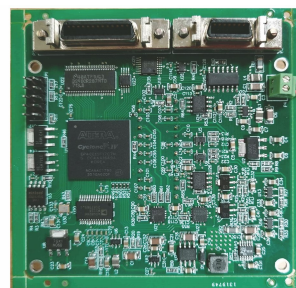


图 8 探测器驱动电路板

Fig. 8 Detector drive circuit board

测试系统,在 6.0 MHz 和 12.5 MHz 的读出频率下进行对比测试,测试现场如图 9 所示。CCD 工作在不平衡状态,驱动频率的变化将会影响成像系统的电荷转移效率和信噪比^[26-27],因此重点对成像子系统的电荷转移效率和信噪比进行测试。CCD 光电性能参数的测试系统主要由双卤钨灯光源、积分球(出光口直径为 50 cm)、暗室、上位机、显示器和稳压电源构成。卤钨灯具有发光稳定、出射光功率密度波动小和色温稳定的特性,其发出的光线在积分球中经过多次漫反射后出射均匀光,通过暗室后到达待测的 CCD 靶面。待测的 CCD 线阵探测板安装在垂直方向的金属结构件上,通过升降台来控制探测器的高度,CCD 靶面与积分球出光口的轴向距离

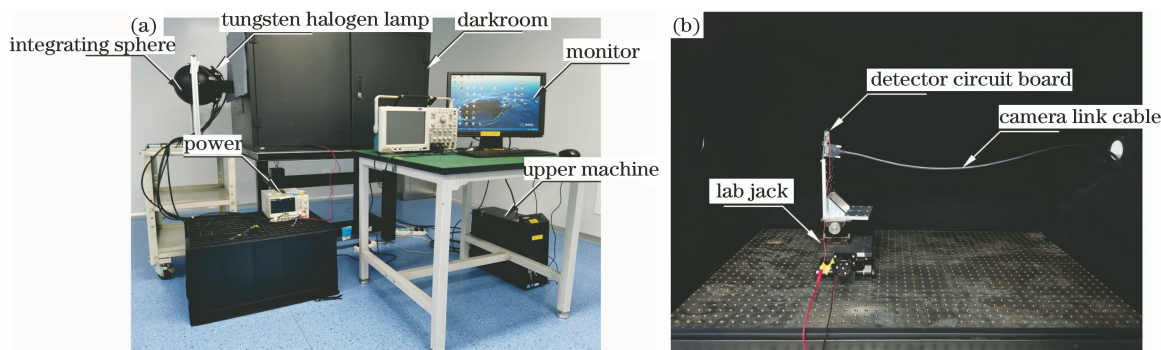


图 9 CCD 光电性能测试现场。(a)测试系统;(b)暗室内部结构

Fig. 9 CCD photoelectric performance test site. (a) Test system; (b) internal structure of darkroom

大于积分球出光口径的 6 倍,这可以获得均匀照射。稳压电源为卤钨灯和线阵探测板供电,通过改变卤钨灯的供电电流来调节其发光强度,细分精度高。上位机通过 Camera Link 线缆来发送控制指令和接收图像数据,在显示器上呈现实时的图像, Camera Link 线缆从暗室后端传出。

4.1 信噪比测试

S11156-2048 型探测器工作在 $24 \mu\text{s}$ 的积分时间下,调节光源的供电电流可以使 CCD 输出信号的灰度值达到饱和光强的 80%^[28],连续拍摄 50 幅图像。成像系统中单个像素点的信号和噪声分别由扣除暗信号的信号灰度均值 Y_{light} 和标准差 N 来表征,二者的比值作为该点的信噪比 R_{SN} ,表达式为

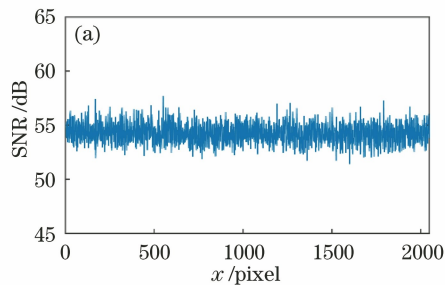
$$Y_{\text{light}} = \frac{\sum_{i=1}^{50} [Y(i) - Y_{\text{dark}}(i)]}{50}, \quad (5)$$

$$Y_{\text{avg}} = \frac{\sum_{i=1}^{50} Y(i)}{50}, \quad (6)$$

$$N^2 = \frac{\sum_{i=1}^{50} [Y(i) - Y_{\text{avg}}]^2}{50}, \quad (7)$$

$$R_{\text{SN}} = \frac{Y_{\text{light}}}{N}, \quad (8)$$

式中: $Y(i)$ 为单个像素第 i 帧图像的灰度值; $Y_{\text{dark}}(i)$ 为单个像素第 i 帧图像的暗信号灰度值; Y_{avg} 为单个像素 50 帧图像的灰度均值。在



12.5 MHz 的超频读出和 6.0 MHz 的额定频率读出下对信噪比进行对比测试,分别计算 2048 个有效像元的信噪比,取各点信噪比的均值作为系统的信噪比,结果如图 10 所示。当以 6.0 MHz 的额定频率读出时,系统的信噪比为 54.26 dB,当以 12.5 MHz 的超频读出时,信噪比为 54.22 dB,信噪比没有明显下降,并且满足系统需求。

4.2 电荷转移效率测试

扩展像素边界边缘响应的方法是先为 CCD 提供一个平场,通过拓展像元的递延电荷量来计算电荷转移效率^[29]。对于一个 M 列的器件,拓展像元区的递延电荷累积量为 L ,最后一列的电荷量为 A ,电荷转移效率 E_{CT} 为

$$E_{\text{CT}} = 1 - \frac{L}{A \times M}. \quad (9)$$

在 12.5 MHz 的超频读出和 6.0 MHz 的额定频率读出下分别对电荷转移效率进行测试,S11156-2048 型探测器工作在 $24 \mu\text{s}$ 的积分时间下,调节光源的供电电流可以使 CCD 输出信号的灰度值达到饱和光强的 50%,并将成像模式设置为过扫描模式以读取拓展像元的信号。为了减少噪声对测量结果的影响,扣除暗信号的信号值并将 50 幅图像的灰度值取均值,探测器在感光区以外具有 4 个拓展像元,计算其平均信号的灰度值以及感光区最后一列信号的灰度值,将数值代入(9)式可计算电荷转移效率,结果如表 2 所示。

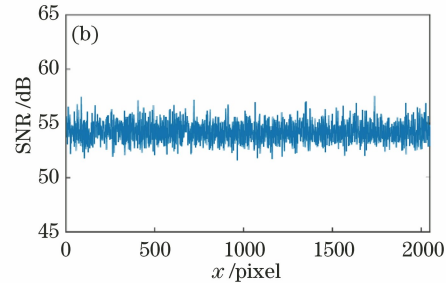


图 10 不同读出频率下的信噪比对比测试曲线。(a) 6.0 MHz;(b) 12.5 MHz

Fig. 10 Signal-to-noise ratio comparison test curves at different readout frequencies. (a) 6.0 MHz; (b) 12.5 MHz

表 2 不同读出频率下的电荷转移效率

Table 2 Charge transfer efficiency at different readout frequencies

Readout frequency /MHz	L	A	E_{CT}
6.0	2217	22080	0.999951
12.5	1168	21814	0.999974

从表 2 可以看到,对于 6.0 MHz 的额定频率, CCD 电荷转移效率为 0.999951,在数据手册给定电

荷转移效率的最小值(0.99995)和典型值(0.99999)之间;对于 12.5 MHz 的超频,电荷转移效率为 0.999974,大于理论计算值(0.9999),满足系统需求。对两种工作频率下的电荷转移效率进行对比,12.5 MHz 频率下的电荷转移效率有所提升,其中一个原因是频率的上升会引起探测器温度的上升,升温可以使电子扩散系数 D_e 增大^[30],根据(1)式和(2)式可知,电荷转移效率将增大。

5 结 论

本文根据调焦调平系统的测量需求,采用“光电成像子系统+信号处理子系统”电子学分模块的设计。针对光电成像子系统提出线阵探测器超频读出的设计,首先从理论上对超频读出带来的性能影响进行定量计算,再对其可行性进行验证;然后从电源管理、时序驱动和模拟前端的设计上展开细致研究;最后使用积分球光源在 6.0 MHz 的额定频率读出和 12.5 MHz 的超频读出下对成像系统的光电性能进行对比测试。实验结果表明,6.0 的额定频率读出下的信噪比为 54.26 dB,12.5 MHz 的超频读出下的信噪比为 54.22 dB,信噪比没有明显下降。6.0 的额定频率读出下的电荷转移效率为 0.999951,12.5 MHz 的超频读出下的电荷转移效率上升。S11156-2048 型成像系统采用 12.5 MHz 超频读出的设计性能没有明显下降,满足调焦调平系统的成像性能要求。在高速且高精度的检测应用中,对探测器的行频率有着较高的要求,当探测器的额定行频率不能满足要求时,可借鉴文中的超频读出设计方法。

参 考 文 献

- [1] Sun Y W, Li S G, Zong M C. Nanoscale focusing and leveling measurement technology based on optical spatial split[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(5): 0512002.
孙裕文, 李世光, 宗明成. 基于空间分光的纳米级调焦调平测量技术[J]. *光学学报*, 2016, 36(5): 0512002.
- [2] Zeng A J, Wang X Z, Xu D Y. Progress in focus and level sensor for projection lithography system[J]. *Laser & Optronics Progress*, 2004, 41(7): 24-30.
曾爱军, 王向朝, 徐德衍. 投影光刻机调焦调平传感技术的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2004, 41(7): 24-30.
- [3] Liao F H, Li X P, Chen X D, et al. Probe spot position error on the accuracy of focusing and leveling measurement system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(4): 1041-1045.
廖飞红, 李小平, 陈学东, 等. 调焦调平探测光斑位置误差对测量准确度影响的研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(4): 1041-1045.
- [4] Sun S S, Wang D, Qi Y J, et al. Design of reflective projection optics used in lithographic focusing and leveling system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(15): 1522002.
孙生生, 王丹, 齐月静, 等. 用于光刻调焦调平的反
- 射式投影光学系统设计[J]. *光学学报*, 2020, 40(15): 1522002.
- [5] Zhuang Y Z, Qi J C, Chen X J. Research on test method of focusing and leveling system based on scanning mirror modulation[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2017, 36(10): 45-47.
庄亚政, 齐景超, 陈小娟. 基于扫描反射镜调制的调焦调平系统测试方法研究[J]. *传感器与微系统*, 2017, 36(10): 45-47.
- [6] Sun Y W, Li S G, Ye T C, et al. Process dependency of focusing and leveling measurement system in nanoscale lithography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(8): 0812001.
孙裕文, 李世光, 叶甜春, 等. 纳米光刻中调焦调平测量系统的工艺相关性[J]. *光学学报*, 2016, 36(8): 0812001.
- [7] Yin Z H, Liu S Y, Shi T L. Research on focus and level system for stepper based on linear array CCD[J]. *Semiconductor Technology*, 2007, 32(1): 74-76.
尹作海, 刘世元, 史铁林. 基于线阵 CCD 的光刻机调焦调平系统的研究[J]. *半导体技术*, 2007, 32(1): 74-76.
- [8] Zheng L L, Jin G, Qu H S, et al. Space-borne CCD imaging circuit system with high signal-to-noise ratio[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(8): 2027-2036.
郑亮亮, 金光, 曲宏松, 等. 高信噪比星载 CCD 成像电路系统[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(8): 2027-2036.
- [9] Grin S S, Kustov T V, Vezhenkova I V. Biotest information measuring system management organization using linear CCD[C] // 2017 IEEE II International Conference on Control in Technical Systems (CTS), October 25-27, 2017, St. Petersburg, Russia. New York: IEEE Press, 2017: 135-137.
- [10] Liu W, Qi M B, Xu J P, et al. High speed and color linear CCD real-time image acquisition system based on FPGA[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2017(5): 91-94.
刘伟, 齐美彬, 许建平, 等. 基于 FPGA 的高速彩色线阵 CCD 实时图像采集系统[J]. *仪表技术与传感器*, 2017(5): 91-94.
- [11] Xu J P, Lang W H, Luo J, et al. Design and analysis of high frame and colorized linear CCD real-time imaging system[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2016(7): 68-71, 78.
许建平, 郎文辉, 罗晶, 等. 高帧率彩色线阵 CCD 实时成像系统的设计与分析[J]. *仪表技术与传感器*, 2016(7): 68-71, 78.
- [12] Cheng Y, Gan T Y. Design of line array CCD output characteristic measurement system[J]. *Instrument*

- Technique and Sensor, 2019(5): 85-90, 95.
- 程瑶, 甘婷源. 线阵 CCD 输出特性测量系统设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2019(5): 85-90, 95.
- [13] Zhang X D, Gu J, Chang M, et al. Design and implementation of drive system for linear CCD based on PSOC [J]. Instrument Technique and Sensor, 2018(1): 81-84, 88.
- 张学典, 顾佳, 常敏, 等. 基于 PSOC 技术的线阵 CCD 驱动系统设计与实现 [J]. 仪表技术与传感器, 2018(1): 81-84, 88.
- [14] Shen B, Wang X P, Tian M, et al. Design of mode-adjustable CCD drive circuit based on FPGA [J]. Instrument Technique and Sensor, 2018(4): 20-23, 27.
- 沈斌, 王先培, 田猛, 等. 基于 FPGA 的模式可调线阵 CCD 驱动电路设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2018(4): 20-23, 27.
- [15] Tang Y H, Liu M J, Liu H C, et al. Correction of charge packet transfer rate in CCD [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6621: 66210O.
- [16] Xue X C, Li H F, Guo Y F. Anti-crosstalk techniques for high-speed CCD imaging circuit [J]. Chinese Optics, 2011, 4(6): 611-616.
- 薛旭成, 李洪法, 郭永飞. 高速 CCD 成像电路抗串扰技术 [J]. 中国光学, 2011, 4(6): 611-616.
- [17] Ma Q J, Song K F, Qu Y, et al. Design of CCD circuit systems for ultraviolet limb imaging spectrometers [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(7): 1538-1545.
- 马庆军, 宋克非, 曲艺, 等. 紫外临边成像光谱仪 CCD 电路系统的设计 [J]. 光学精密工程, 2011, 19(7): 1538-1545.
- [18] Shi J J, Hu Y D, Li M F, et al. Design and implementation of cloud camera control system [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(20): 2001001.
- 石晶晶, 胡亚东, 李孟凡, 等. 云相机控制系统的设计及实现 [J]. 光学学报, 2020, 40(20): 2001001.
- [19] Liang S L, Wang Y M, Jia N, et al. Design and implementation of CCD imaging system for aerosol detector [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(11): 1110001.
- 梁少林, 王咏梅, 贾楠, 等. 气溶胶探测仪 CCD 成像系统的设计 [J]. 中国激光, 2018, 45(11): 1110001.
- [20] Wang J, Feng Y, Zhang H, et al. Design of a scientific CCD camera with a large focal plane of 4K×4K pixels for BSST telescope in Antarctica [J]. Journal of Instrumentation, 2019, 14(5): C05014.
- [21] Xue X C, Li Y F, Guo Y F. Design of analog front end of CCD imaging system [J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(8): 1191-1195.
- 薛旭成, 李云飞, 郭永飞. CCD 成像系统中模拟前端设计 [J]. 光学精密工程, 2007, 15(8): 1191-1195.
- [22] Yao P P, Xu S L, Tu B H, et al. Design of performance test system and analysis of temperature dependence for space-borne array CCD [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(9): 0910001.
- 姚萍萍, 许孙龙, 涂碧海, 等. 星载面阵 CCD 性能测试系统设计与温度影响分析 [J]. 中国激光, 2020, 47(9): 0910001.
- [23] Di L M, Liu H, Zhang Z Y. Design of CCD low-noise readout circuit [J]. Modern Electronics Technique, 2019, 42(20): 1-4, 8.
- 狄腊梅, 刘宏, 张志勇. CCD 低噪声读出电路设计 [J]. 现代电子技术, 2019, 42(20): 1-4, 8.
- [24] Li S, Xu S Y, Liu D B, et al. Design of imaging system of cloud and aerosol polarization imager with high signal-to-noise ratio [J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(11): 1111006.
- 李帅, 徐抒岩, 刘栋斌, 等. 高信噪比云与气溶胶探测仪成像系统设计 [J]. 红外与激光工程, 2018, 47(11): 1111006.
- [25] Chen C, Xu Y F, Li C J, et al. Design and implementation of image acquisition circuit for satellite-borne CCD camera [J]. Electronic Technology, 2012, 39(3): 25-28.
- 陈川, 许逸飞, 李翠娟, 等. 星载 CCD 相机图像采集电路设计与实现 [J]. 电子技术, 2012, 39(3): 25-28.
- [26] Lin Z Z, Guo L Z. CCD transfer efficiency and experimental characteristics [J]. Semiconductor Optoelectronics, 1985, 6(1): 65-70.
- 林智准, 郭立忠. CCD 转移效率及其实验特性 [J]. 半导体光电, 1985, 6(1): 65-70.
- [27] Miao J D, Xu W J, Mou T S, et al. Photoelectric technology [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1995: 189-199.
- 缪家鼎, 徐文娟, 牟同升, 等. 光电技术 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1995: 189-199.
- [28] Chang Z, Wang Y, Si F Q, et al. Design and implementation of ultraviolet imaging system based on scientific grade CCD [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(8): 0804002.
- 常振, 王煜, 司福祺, 等. 基于科学级 CCD 的紫外成像系统设计与实现 [J]. 中国激光, 2017, 44(8): 0804002.
- [29] Shang Y Y, Guan Y, Zhang W G, et al. Research on evaluation method of CCD image sensor [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(s2): 317-322.
- 尚媛园, 关永, 张伟功, 等. CCD 固体成像器件性能测试方法的研究 [J]. 光学学报, 2008, 28(s2): 317-322.
- [30] Banghart E K, Lavine J P, Trabka E A, et al. A model for charge transfer in buried-channel charge-coupled devices at low temperature [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1991, 38(5): 1162-1174.