

气溶胶探测器 CCD 成像系统的设计

梁少林^{1,2*}, 王咏梅^{1,2**}, 贾楠¹, 石恩涛¹, 毛靖华¹

¹中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190;

²中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049

摘要 设计了吸收性气溶胶探测器 CCD 成像系统, 该系统的硬件包括驱动时序电路、预处理和模拟前端电路、电源管理电路、FPGA 主控单元, 以及 Camera Link 通信电路等。提出一种带有反向转移的驱动时序来消除帧转移过程的残余电荷, 并对该 CCD 成像系统性能进行测试验证。实验结果表明, 该成像系统能稳定输出 14 bit 图像数据, 帧频为 1.8 frame/s, 最短曝光时间为 17.28 ms, 非线性度误差为 1.68%, 当曝光饱和度为 80% 时, 成像信噪比为 54.36 dB, CCD 可探测信号的动态范围为 61.55 dB, 可满足探测器输出稳定、时间分辨率高、线性性能优、信噪比高、信号动态范围大的工作需求。

关键词 探测器; CCD 成像; 反向转移; 曝光时间; 信噪比; 动态范围

中图分类号 TP23

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1110001

Design and Implementation of CCD Imaging System for Aerosol Detector

Liang Shaolin^{1,2*}, Wang Yongmei^{1,2**}, Jia Nan¹, Shi Entao¹, Mao Jinghua¹

¹National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

²School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract A CCD imaging system in the absorbent aerosol detector is designed, whose hardware includes timing driving circuit, pre-processing and analog-front-end circuit, power management circuit, FPGA main control unit, Camera Link communication circuit, and so on. A kind of driving timing with reverse transfer is introduced to effectively eliminate the residual charge in the frame transfer process and improve the signal-to-noise ratio. The performance of this CCD imaging system is tested. The experimental results show that as for this imaging system, the 14 bit image data can output steadily with a frame frequency of 1.8 frame/s, the shortest exposure time of 17.28 ms and a nonlinearity error of 1.68%. Under the condition of 80% saturation exposure, the imaging signal-to-noise ratio is 54.36 dB, and the dynamic range of CCD detectable signals is 61.55 dB. The operational requirements of this detector such as stable output, high time resolution, excellent linear performance, high signal-to-noise ratio, and large dynamic range of signals are satisfied.

Key words detectors; CCD imaging; reverse transfer; exposure time; signal-to-noise ratio; dynamic range

OCIS codes 040.1490; 040.1520; 040.1880

1 引言

随着工业化进程的推进,化石燃料使用量逐渐增加,大气污染程度加剧,严重影响了生态安全和人类健康。因此,对大气环境的监测和保护十分必要。而大气污染物如沙尘、黑炭气溶胶,以及 O₃、SO₂ 等痕量气体对太阳光表现出强烈的吸收性,在消光(包括散射和吸收)作用中占据主导地位。中国科学院

国家空间科学中心研制了吸收性气溶胶探测器,并将其搭载在风云气象卫星平台,采用“卫星推扫+面阵 CCD”的探测方案来获取紫外-可见光波段高分辨率的大气后向散射光谱数据,并利用差分光学吸收光谱法反演得到吸收性气溶胶指数、光学厚度、类型和粒径等参数。该吸收性气溶胶探测器可以快速、实时、大范围地监测大气环境污染和变化,为大气环境、气候变化的研究提供有效数据。

收稿日期: 2018-04-18; 修回日期: 2018-05-09; 录用日期: 2018-05-22

基金项目: 国家自然科学基金(41005013)

* E-mail: shaolin_liang@163.com; ** E-mail: wym@nssc.ac.cn

作为探测仪的核心器件,科学级 CCD 具有高灵敏度、大动态范围、高读出速度且低噪声等特点,但其驱动时序较复杂,工作时需要多种偏置电压,因此 CCD 成像电路一直是光谱成像仪器的设计难点之一。国内外许多学者基于科学级 CCD 进行地基或星载大气环境探测仪研制,主要集中在以下几个方面:CCD 驱动时序的设计,以获得较高的目标帧频和较短的曝光时间^[1];成像信噪比的提高^[2];线性性能的提升^[3];信号动态范围的扩大^[4]。而吸收性气溶胶探测仪在驱动时序上要求每 0.55 s 获取一帧图像,曝光时间在 0.5 s 内可调;当曝光饱和度为 80% 时信噪比达到 54 dB 以上;可探测信号动态范围需大于 58 dB;非线性度误差不超过 2%。吸收性气溶胶探测仪的上述工作要求对 CCD 成像系统的设计提出了更高要求。

2 CCD55-30 器件分析

基于探测仪工作要求,选用英国 E2V 公司的 CCD55-30 帧转移型面阵探测器。该 CCD 具有 3 个显著特点:1)像元面积大,达到 $22.5 \mu\text{m}^2$,满阱容量高达 4.5×10^5 个电子,这极大地扩大了可探测信号的动态范围,提高了信噪比极限;2)采用薄型背照式技术,并涂有楔形防反膜,极大地提高 CCD 的响应带宽和量子效率;3)采用先进的反相工作模式(AIMO)来获得极低的暗电流,进一步提高成像信噪比。

CCD55-30 结构如图 1 所示,主要由成像区 A、存储区 B、寄存器 C,以及读出放大器 A1(高速通道)和 A2(低噪声通道)组成。成像区 A 包含 1252×576 个有效感光像素单元,在曝光时间内,成像区 A 内产生光生电荷,曝光完成后,电荷垂直转移到存储区 B(此过程称为帧转移)。存储区 B 和成像区 A 的像素结构完全相同,但在存储区 B 上覆盖了一层遮光罩。帧转移完成后,存储区 B 内的电荷依次转移到寄存器 C(此过程称为行转移),并经由放大器 A1 或 A2 转换成电压后输出至后端电路进行处理和采样(此过程称为水平读出),至此,一帧图像的曝光和读取完成。CCD55-30 的电荷清除操作还包括:1)电荷泄放,即成像区 A 的电荷自下向上转移到器件顶部泄放掉;2)电荷倾倒,即成像区 A 内的电荷经过帧转移、行转移之后在寄存器 C 中倾倒掉。

3 CCD 成像电路的设计

吸收性气溶胶探测仪 CCD 成像系统方案如

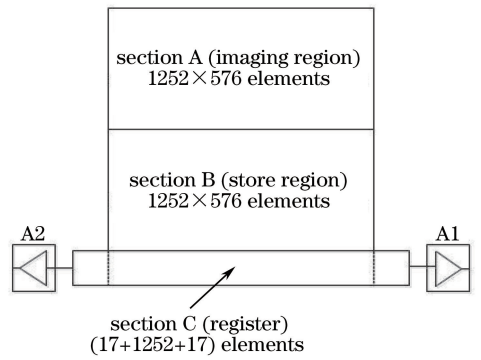


图 1 CCD55-30 结构图

Fig. 1 Structural diagram of CCD55-30

图 2 所示。该系统以 CCD 器件为核心,以 XC2V3000 系列现场可编程逻辑门阵列(FPGA)为主控单元,通过 Camera Link 接口实现和中控个人计算机(PC)的通信(中控 PC 通过 1553 B 总线和卫星通讯)。CCD 外围电路包括驱动时序电路、预处理和模拟前端(AFE)电路,以及电源管理电路。其中,时序驱动转换电路将 FPGA 产生的数字时序信号调制成为 CCD 要求的模拟功率信号,CCD 输出的模拟图像信号经过 AFE 电路转换成 14 bit 数据,而电源管理电路提供 CCD 工作时所需的各种直流偏置电压。FPGA 主控单元主要控制 CCD 驱动时序发生和图像数据采集,其外围电路则包括供电电路、静态随机存取(SRAM)数据缓存电路和可编程只读存储器(PROM)配置电路。FPGA 通过 Camera Link 的低电压差分信号(LVDS)接口芯片与 PC 进行双向通信,包括图像数据的上传、CCD 工作状态的监测和工作参数设置。电源转换电路将外部单电源滤波和 DC/DC 转换后,再供给系统的各部分电路使用。

3.1 驱动时序电路

CCD55-30 正常工作时需要成像区时钟 $A\phi$ 、存储区时钟 $B\phi$ 、寄存器时钟 $C\phi$ 各三相,读出通道复位时钟 $\phi R1$ 、 $\phi R2$,以及成像区反向转移控制时钟 IG 、寄存器电荷倾倒控制时钟 DG 共 13 路时钟信号。时钟信号不仅对高低电平有要求,其上升和下降时间也必须处在一定范围内,CCD55-30 时钟信号的上升或下降时间与其驱动电流 I 的关系为

$$I = C[(V_H - V_L)/t] \times 80\%, \quad (1)$$

式中: V_H 和 V_L 分别为时钟信号的高、低电平; t 为上升或下降时间; C 为时钟管脚等效电容。根据上述要求,选用美国 Intersil 公司的 40 MHz 非反相式驱动器 EL7457,将由 FPGA 产生的驱动时序转换成满足 CCD 要求的驱动电平^[5],其中成像区时钟转换原理如图 3 所示,引脚 VH 和 VL 限定了输出信

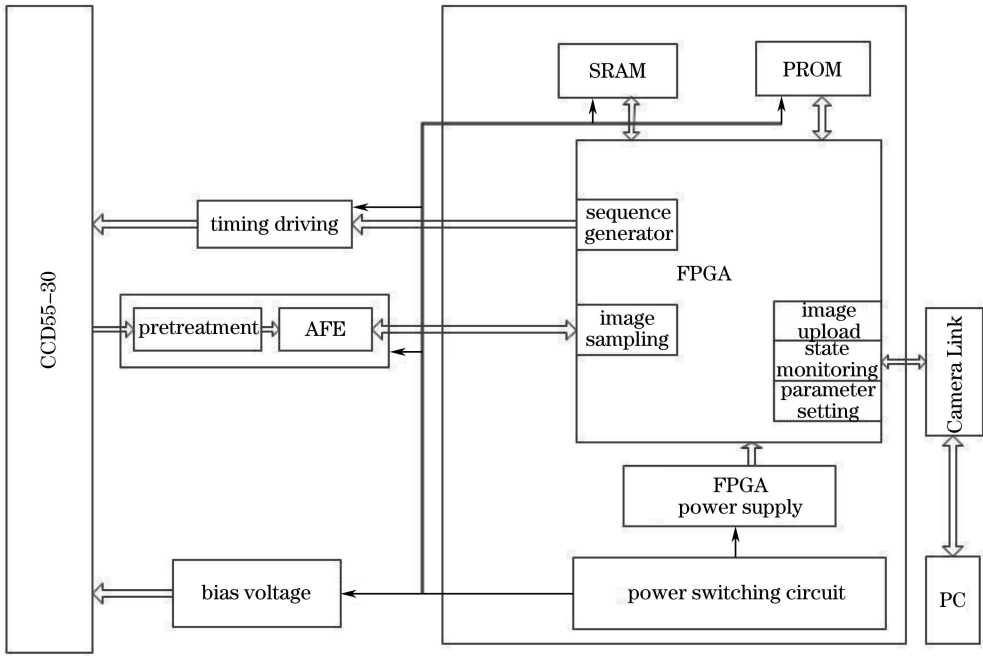


图 2 CCD55-30 成像电路系统

Fig. 2 Imaging circuit system of CCD55-30

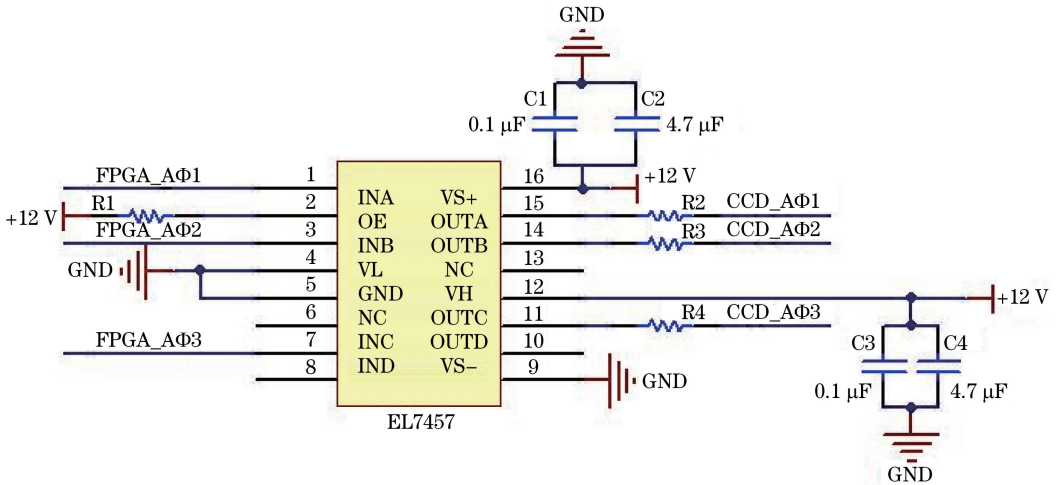


图 3 成像区时钟转换原理图

Fig. 3 Schematic of imaging clock conversion

号的高、低电平。为了将上升或下降时间控制在指定范围内,需要在输出端串联限流电阻来限制其峰值电流,改变管脚的充放电速度^[6]。

3.2 AFE 电路

CCD55-30 模拟信号的输出波形包括复位脉冲、复位电平和信号电平,有效信号为复位电平和信号电平之差,可通过数字相关双采样(CDS)获得^[7]。CCD 成像区的满阱容量为 4.5×10^5 个电子,通道 A1 的响应度为 $1.2 \mu\text{V}/\text{electron}$,因此输出电压的最大值为 540 mV,但叠加在直流复位电平上,因此

需要经过隔直电容后才能得到有效的 CCD 输出信号^[8]。此外,CCD55-30 读出放大器的输出负载并没有集成在芯片内部,因此还需外接电阻负载或恒流源负载。考虑到恒流源负载所引入的噪声较大,决定采用电阻负载的方式;同时,为了增强信号的驱动能力,对输出信号进行射极跟随处理^[9]。AFE 电路如图 4 所示。

经过预处理后,CCD 的输出信号进入模拟前端,模拟前端的芯片选用美国 AD 公司的 AD9814。该芯片内部集成了 5 种电路:1)输入钳位(input clamp)电

路,对输入信号进行直流搬移,重建参考电平;2)CDS电路,分别对参考电平和信号电平采样,并差分输出;3)数模转换(DAC)电源管理电路,对采样信号施加偏置信号,防止其在极小信号时采样结果出现负值^[10];4)可编程增益放大器(PGA)增益电路:放大转换信号,放大倍数要使 CCD 的满阱容量与芯片的满量程相对应;5)精度为 14 bit 的模数转换(ADC)。采样完成后数字输出至 FPGA,FPGA 也通过三线串行接口

(SCLK、SLOAD、SDATA)来设置 AD9814 的钳位电平、偏置电压、放大器增益和工作模式,并根据 CCD 驱动时序,给 AD9814 提供 AD 时钟、CDS 的前采样和后采样时钟,其中前后采样信号的差值即为图像信号。为了输出 14 bit 图像数据,AD9814 的 8 位数据管脚需要分时复用,即在一个 AD 时钟的前半周期和后半周期分别输出数据的前 8 位和后 8 位(其中 2 位为无效数据)。

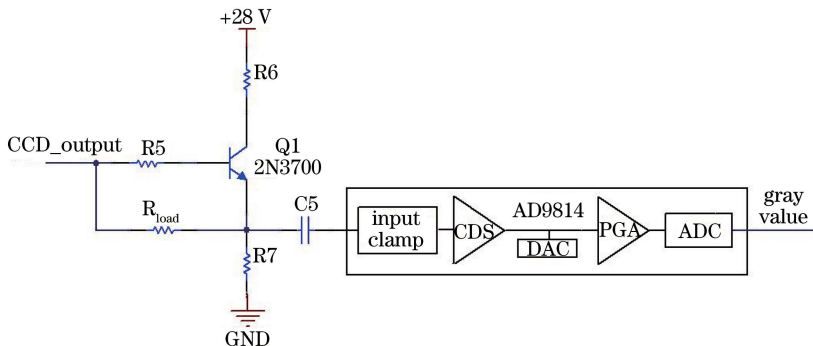


图 4 AFE 电路示意图

Fig. 4 Schematic of AFE circuit

3.3 电源管理电路

成像系统使用 +28 V 的外部单电源供电,而目标电源包括 CCD55-30 工作时所需的多种直流偏置电压(30、22、18、9、3 V,需要满足一定的上电顺序)、时序驱动电压(13、12、1 V),以及 FPGA 工作时所需的多路电压(1.5、3.3、1.8 V)等。这些电压的稳定将影响到 CCD 的电荷转移效率和输出信号的噪声水平,所以在进行电源转换时需要降低

电压噪声,提高转换效率。为此,可以采用具有 DC/DC 转换效率高和低压差线性稳压器(LDO)噪声低优点的“DC/DC + LDO”的转换方案^[11]。电源转换方案如图 5 所示,+28 V 电源经过滤波和 DC/DC 变换后转换成过渡电压,再经过电感滤波后,接入线性 LDO,产生所需的各种电压。此外,为了进一步降低噪声,还需同步控制过渡电压的产生。

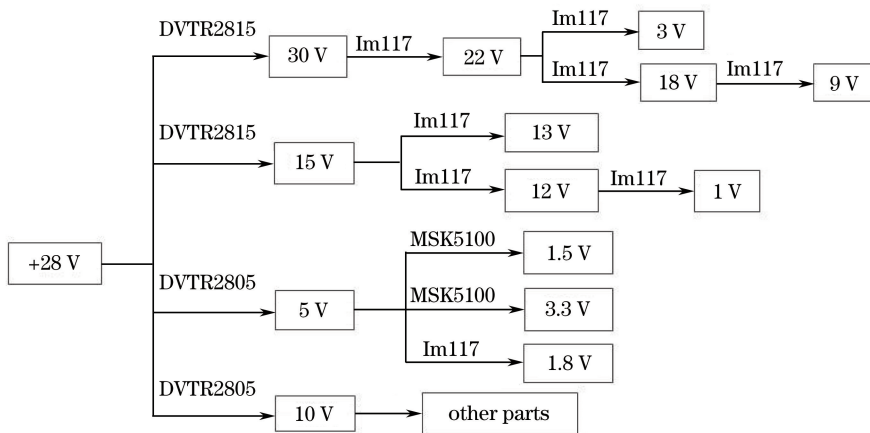


图 5 电源转换方案

Fig. 5 Power conversion scheme

3.4 FPGA 主控单元

FPGA 主控单元主要控制 CCD 驱动时序的发生、模拟前端芯片 AD9814 的配置和图像数据的采

集。FPGA 与中控 PC 通过 Camera Link 接口芯片进行图像数据上传和串口通信,而串口通信可以遥测 CCD 的工作状态以及修改曝光时间等参数。

FPGA 控制芯片选用美国 Xilinx 公司 Virtex-2 XC2V3000 系列 FPGA, 具有 3584 个逻辑单元, 最高可实现 1728 kbit 的块随机存取存储 (RAM)。配置芯片选用 32 Mbit PROM XCF32P。由于系统对帧频要求较高, 若图像采集完成后直接上传到中控 PC, 则帧周期较长。利用两片 1 Mbit × 32 bit 的 SRAM 来缓存图像数据, 在上传前一帧图像的同时进行后一帧图像的采集, 两者在两片 SRAM 中乒乓操作, 可以极大地缩短帧周期^[12]。

3.5 硬件结构实现

以模拟前端芯片 AD9814 为界, CCD 成像电路可分为模拟和数字两部分, 因此在设计硬件结构时, 需要考虑数模电路的隔离和地平面的分割, 以减小引入的干扰和噪声。为此, 系统电路使用三块大小相同的电路板, 包括 CCD 板、FPGA 控制板和电源板。CCD 板是模拟部分, 主要搭载 CCD 驱动和采样电路; FPGA 控制板搭载数字电路; 电源板搭载各种电源转换电路。三块电路板之间使用柔性连接器连接, 而 CCD 板和 FPGA 板的模拟地/数字地分别通过 0 Ω 电阻和电源地单点连接, CCD 板上的 AD9814 桥接在模拟-数字地平面上, 这样既能隔离数模电路, 又能最大程度保证地平面的完整, 有效地降低数模混合带来的干扰和板间传输引起的噪声^[13]。整个系统硬件结构如图 6 所示。

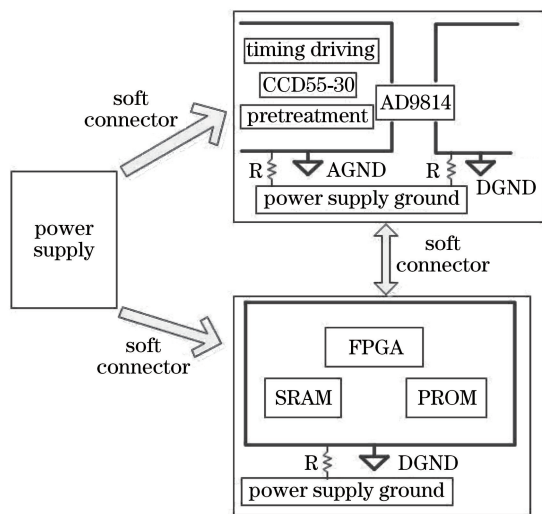


图 6 硬件结构布局

Fig. 6 Hardware structure layout

4 实验与结果

4.1 带反向转移的驱动时序分析

为了满足高时间分辨率、大动态范围图像的获取要求, CCD 成像系统需要具备短帧周期、大动态

范围、可调曝光时间等特点。但是, CCD55-30 本身不具有电子快门, 在不外加机械快门的情况下, 上电后 CCD 将一直处于曝光状态。如何区分有效曝光来获得可调的曝光时间, 这是设计的难点之一。另外, 为了进一步提高信噪比, 还要求在两帧图像曝光之间添加清除操作, 以清除上一帧图像转移过程的残余电荷^[14]。结合 CCD55-30 器件的特点对常用的两种驱动时序加以分析, 并提出了一种带反向转移的驱动时序。

传统的“帧转移+帧读出(包括上述行转移和水平读出)”时序如图 7(a) 所示, 下一帧图像的曝光发生在当帧图像的帧转移结束后, 这样可以缩短帧周期, 但最短曝光时间为帧读出时间和一次帧转移时间之和 (325.44 ms), 动态范围较小。另外, 由于 CCD 的电荷转移效率小于 100%, 在当帧图像帧转移时会有部分残留电荷, 这些残留电荷作为噪声带入下一帧图像(特别是在强光条件下), 降低成像的信噪比, 且由于 CCD55-30 的像元结构没有抗溢出漏极, 下一帧图像曝光时会提前出现电荷溢出现象, 降低真实信号的动态范围^[15]。带电荷倾倒的驱动时序设计如图 7(b) 所示, 在下一帧图像曝光前, 进行多次“帧转移+电荷倾倒”操作[图 7(b) 中只画出一], 可以有效消除由于帧转移过程的残余电荷, 从而使成像区变得更“干净”, 提高成像的信噪比, 且最短曝光时间为最后一次电荷倾倒和相邻两次帧转移时间之和 (25.92 ms), 因而动态范围进一步扩大^[16]。但带电荷倾倒的驱动时序极大地增加了帧周期, 每进行一次“帧转移+电荷倾倒”操作, 帧周期就增加了 17.28 ms。

CCD55-30 器件成像区的顶部存在泄放电极, 使得成像区的电荷可以反向转移到顶部泄放掉。在当帧图像的帧转移结束后且下一帧图像曝光前进行多次反向转移[图 7(c) 中只画出一], 以快速清除残余电荷, 且通过控制反向转移前的等待时间来调节目标曝光时间^[17]。即只有在最后一次反向转移后的曝光才是有效的, 这样最短曝光时间可进一步降低为一次帧转移和一次反向转移的用时之和 (17.28 ms), 总帧周期基本不变。

带有反向转移的驱动时序波形如图 8 所示, 其中 A ϕ 为成像区电荷转移时钟, B ϕ 为存储区电荷转移时钟, C ϕ 为寄存器电荷转移时钟, CCD55-30 电荷转移采用标准的三相时钟模式, 包括普通相 ϕ 1、 ϕ 2 和掺杂相 ϕ 3。这里需要注意的是, 欲使 CCD55-30 工作在 AIMO 模式, 除了将衬底偏置电

压设置为“高”外,在驱动时序上,某一操作开始时首先变化的相位应为 ϕ_3 ,而非 ϕ_1 ,这与非反相工作模式(NIMO)不同^[18]。而反向转移是类似于帧转移,

其对成像区时钟 $A\phi$ 的顺序要求与帧转移相反,其余均与帧转移相同,以使成像区电荷反向转移至器件顶部泄放掉。

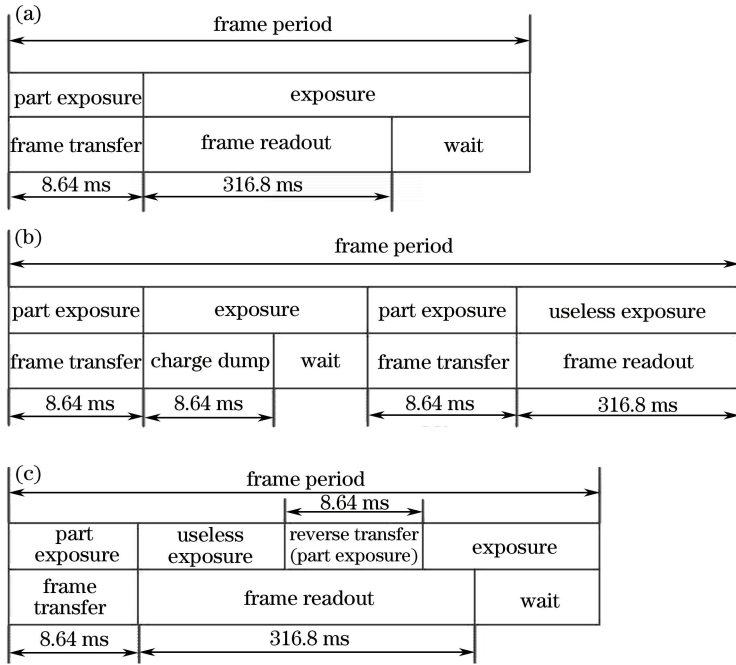


图 7 三种驱动时序。(a)传统驱动时序;(b)带电荷倾倒的驱动时序;(c)带反向转移的驱动时序

Fig. 7 Three kinds of drive timing. (a) Traditional driving timing; (b) driving timing with charge dump; (c) driving timing with reverse transfer

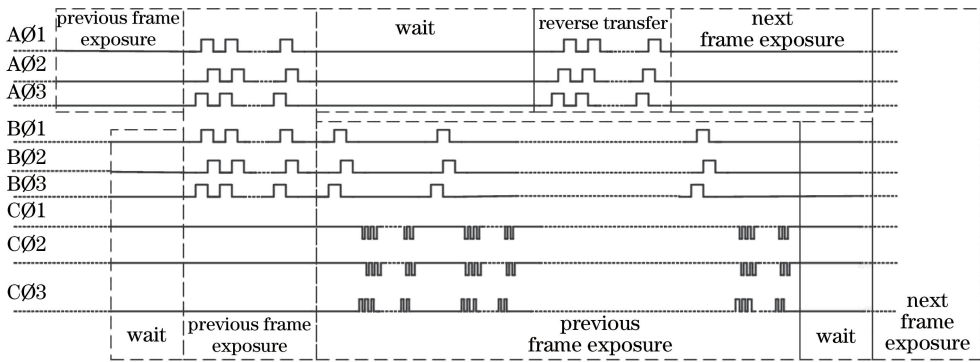


图 8 带反向转移的驱动时序波形图

Fig. 8 Waveform of driving timing with reverse transfer

4.2 成像性能测试

为测试该 CCD 系统的成像性能,在实验室室温环境下,利用积分球(内置卤素灯)发射均匀光源,CCD 曝光 0.5 s。结果表明 CCD 可以稳定输出 14 bit 图像数据,帧频为 1.8 frame/s,满足探测仪工作的帧周期要求。为验证在带有反向转移的驱动时序下 CCD 输出图像的信噪比、线性以及动态范围,调节卤素灯电流以改变光强,使 CCD 在曝光时间为 0.5 s 时灰度值接近饱和。再设置 20 档曝光时间,在每档曝光时间下拍摄亮暗图像各 100 帧(需要亮

暗交替拍摄,以降低 CCD 温度变化对暗信号的影响),然后分别计算当前曝光时间下的某一像素的信号 $S_{(m,n)}$ 和噪声 $N_{(m,n)}$,并求出其信噪比 $R_{SN-(m,n)}$:

$$S_{(m,n)} = \left\{ \sum_{i=0}^{99} [Y_{i-(m,n)} - Y_{\text{dark-}i-(m,n)}] \right\} / 100, \quad (2)$$

$$N_{(m,n)} = \sqrt{\left\{ \sum_{i=0}^{99} [Y_{i-(m,n)} - \sum_{i=0}^{99} Y_{i-(m,n)} / 100]^2 \right\} / 100}, \quad (3)$$

$$R_{SN-(m,n)} = 20 \lg [S_{(m,n)} / N_{(m,n)}], \quad (4)$$

式中: $Y_{i-(m,n)}$ 为第 i 帧亮图像第 (m,n) 个像素的灰

度值; $Y_{\text{dark-}i(m,n)}$ 为第 i 帧暗图像第 (m,n) 个像素的灰度值。最后,将所有像素信号的平均值作为图像的信号 S_{image} ,将所有像素信噪比的平均值作为图像的信噪比 $R_{\text{SN-image}}$,图像信号、信噪比与曝光时间的关系分别如图 9 和图 10 所示。

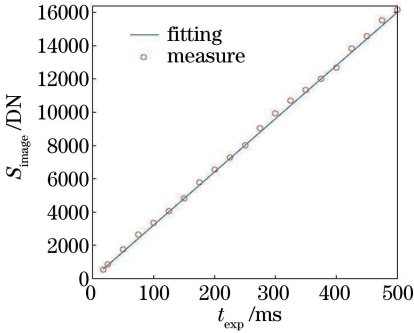


图 9 图像信号-曝光时间关系

Fig. 9 Relationship between signal of the image and exposure time

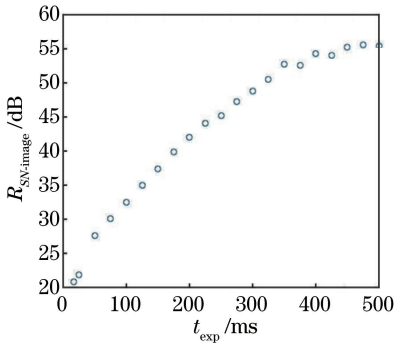


图 10 图像信噪比-曝光时间关系

Fig. 10 Relationship between $R_{\text{SN-image}}$ and exposure time

从图 9 可以看出,整帧图像的信号与曝光时间近似呈线性关系,利用最小二乘法拟合得到信号与曝光时间的理论关系为

$$S_{\text{image-fitting}} = 2.21 + 32.68 \times t_{\text{exp}}, \quad (5)$$

式中: $S_{\text{image-fitting}}$ 为整帧图像的信号拟合值; t_{exp} 为曝光时间。每个曝光时间下的非线性度 δ 为

$$\delta = 100\% \times (S_{\text{image-measure}} - S_{\text{image-fitting}}) / S_{\text{image-fitting}}, \quad (6)$$

式中: $S_{\text{image-measure}}$ 为整帧图像的信号实测值。在求得每个曝光时间下的非线性度后,可计算表征 CCD 线性性能的非线性度误差 E_L :

$$E_L = (\delta_{\text{max}} - \delta_{\text{min}}) / 2, \quad (7)$$

式中: δ_{max} 和 δ_{min} 分别为非线性度的最大值和最小值。本实验的非线性度误差为 1.68%,满足探测仪对 CCD 线性性能的要求。

从图 10 可以看出,当曝光饱和度为 80% 时, CCD 成像系统的信噪比为 54.36 dB,符合探测仪的工作要求。与传统的“帧转移+帧读出”驱动时序相比,当曝光饱和度为 80% 时,带反向转移的驱动时序的噪声电子数降低了 25 个,信噪比提高了 0.31 dB,这说明反向转移可以有效消除帧转移过程的残余电荷。从图 9 和图 10 还可计算 CCD 成像系统的动态范围 R_D :

$$R_D = 20\lg(S_{\text{image-sat}} / S_{\text{image-min}}), \quad (8)$$

式中: $S_{\text{image-sat}}$ 为饱和时的整帧图像的信号; $S_{\text{image-min}}$ 为信噪比等于 0 dB 时的整帧图像信号。由于当前使用的是卤素灯光强, CCD 在最短曝光时间下的信噪比仍大于 0 dB,因此,需要调低卤素灯工作电流以调低光强,同时不断调节曝光时间,以寻找到信噪比为 0 dB 时的整帧图像信号。本实验中信噪比为 0 dB 时的整帧图像信号为 13.38 DN,代入(8)式求得信号动态范围为 61.55 dB,符合探测仪工作要求。

与传统 CCD 驱动时序的设计相比,带有反向转移的驱动时序可使 CCD 成像系统能够兼顾信噪比、帧周期和动态范围三个方面的成像需求^[19]。本实验的测试结果均符合探测仪的工作需求,验证了该 CCD 成像系统设计的有效性。

5 结 论

在吸收性气溶胶探测仪 CCD 成像系统的设计中,从成像需求着手,在器件选型、电路研制、硬件优化、软件设计等环节展开细致的研究,提出了科学级 CCD 成像系统研制的改进措施,并利用积分球测试验证 CCD 的成像性能。结果表明, CCD55-30 成像系统可以稳定输出 14 bit 图像数据,帧频为 1.8 frame/s,最短曝光时间可降低至 17.28 ms,满足探测仪输出稳定、帧周期短以及曝光时间可调的要求。利用带有反向转移的驱动时序设置多档曝光时间,每档曝光时间下各采集 100 帧亮暗图像,通过计算得到 CCD 输出的非线性度误差为 1.68%,当曝光饱和度为 80% 时,成像信噪比为 54.36 dB, CCD 可探测信号的动态范围为 61.55 dB,满足吸收性气溶胶探测仪的工作需求。该 CCD 成像系统的设计方法具有一定的普适性,可为同类成像类光谱仪器的研制提供借鉴, CCD 性能的测试也可为同类仪器的测试提供参考。

参 考 文 献

[1] Zhang L, Song Y, Hu X Y. CCD noise processing

- based on CDS[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2007, 28(2): 265-272.
- 张林, 宋寅, 胡学友. 基于 CDS 技术的 CCD 噪声信号处理[J]. *半导体光电*, 2007, 28(2): 265-272.
- [2] 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.
- [3] Jerram P, Morris D. Recent sensor designs for earth observation[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9881: 988111.
- [4] Popowicz A. Analysis of dark current in BRITENANOSTELLITE CCD sensors[J]. *Sensors*, 2018, 18(2): 18020479.
- [5] Li Y P, He B, Fu T J. Design of imaging system of interline area CCD [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2602-2606.
- 李亚鹏, 何斌, 付天骄. 行间转移型面阵 CCD 成像系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(8): 2602-2606.
- [6] 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.
- [7] Fang L L, Wang Y, Qiu X H, *et al.* Application of integrated correlated double sampling A/D chip in satellite-borne devices [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2017, 34(1): 15-22.
- 方玲丽, 王煜, 邱晓晗, 等. 集成相关双采样 A/D 芯片在星载设备中的应用[J]. *量子电子学报*, 2017, 34(1): 15-22.
- [8] Zhang H, Liu D B, Li W, *et al.* Research of noise at analog front end in CCD imaging system[J]. *Modern Electronics Technique*, 2011, 34(24): 113-117.
- 张航, 刘栋斌, 李巍, 等. CCD 成像系统中模拟前端噪声的研究[J]. *现代电子技术*, 2011, 34(24): 113-117.
- [9] Zhao H J, Liu X K, Zhang Y. CCD imaging electrical system of AOTF imaging spectrometer[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(5): 1291-1296.
- 赵慧洁, 刘小康, 张颖. 声光可调谐滤波成像光谱仪的 CCD 成像电子学系统[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(5): 1291-1296.
- [10] Wang Y, Lu Y H, Zhao X, *et al.* Design and implementation of CCD imaging circuit for satellite-borne DOAS spectrometer [J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(6): 663-668.
- 王煜, 陆亦怀, 赵欣, 等. 星载差分吸收光谱仪 CCD 成像电路的设计及实施[J]. *激光与红外*, 2015, 45(6): 663-668.
- [11] 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.
- [12] Jin L X, Li G N, Liu Y Y. Design of driving circuit for frame transfer area CCD[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(6): 1140-1145.
- 金龙旭, 李国宁, 刘妍妍. 帧转移型面阵 CCD 驱动电路的设计[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(6): 1140-1145.
- [13] 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及实现[J]. *中国激光*, 2017, 44(8): 0804002.
- [14] Bai X P, Zheng Y, Li J, *et al.* A frame transfer EMCCD image sensor with 512×512 pixels [J]. *Infrared Technology*, 2016, 38(4): 300-304.
- 白雪平, 郑渝, 李金, 等. 512×512 元帧转移 EMCCD 图像传感器[J]. *红外技术*, 2016, 38(4): 300-304.
- [15] Zhang Z, Cheng X G, Jiang Z F. Excessive saturation effect of visible light CCD[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(6): 917-920.
- 张震, 程湘爱, 姜宗福. 可见光 CCD 的光致饱和现象[J]. *强激光与粒子束*, 2008, 20(6): 917-920.
- [16] Paul J, David M. Recent sensor designs for Earth observation[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9881: 988111.
- [17] Zhao X L, Ma X R, Peng X F, *et al.* A precise method to adaptively adjust the exposure time of CCD [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2011, 24(6): 870-873.
- 赵晓琳, 马秀荣, 彭雪峰, 等. 一种自适应精确调节 CCD 曝光时间的方法[J]. *传感技术学报*, 2011, 24(6): 870-873.
- [18] Jiang Y, Jedrkiewicz O, Minardi S, *et al.* Retrieval of spatial shot-noise in the full dynamic range of calibrated CCD cameras[J]. *The European Physical Journal D*, 2003, 22(3): 521-526.
- [19] Yu D, Zhou H D, Long K H, *et al.* Screening and testing method for area CCD[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(7): 0708001.
- 余达, 周怀得, 龙科慧, 等. 一种面阵 CCD 的筛选测试方法[J]. *中国激光*, 2013, 40(7): 0708001.