

云相机控制系统的设计及实现

石晶晶^{1,2}, 胡亚东^{2*}, 李孟凡², 孙斌², 王改², 池杲璠², 王相京², 洪津^{1,2}

¹ 中国科学技术大学环境科学与光电技术学院, 安徽 合肥 230026;

² 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031

摘要 为实现云相机控制系统的模块化设计、提高系统集成度,提出了基于 FPGA(field programmable gate array)的在轨实时云判系统硬件平台的设计方法。在对系统各功能模块进行划分的基础上,确立了片内双核 CPU 软件架构,其中一个 CPU 独立处理云判算法以保证所提算法运行的实时性,另一个 CPU 用于与卫星进行数据交互和部分数据预处理,通过自定义 IP (intellectual property)核实现 CCD 成像和外围接口的时序控制。以 CCD 图像采集与存储模块为例,重点讨论了 CCD 驱动电路、模拟前端电路、数据存储电路的设计和时序,并对该模块 IP 核的设计方法进行了说明。最后对云相机的成像性能参数进行测试,实验结果表明:设定积分时间内,随着积分时间的推移,相机暗电流噪声变化较小;中心视场处,输出非线性度为 1.29%;在信号达到饱和光强的 80%时,信噪比为 128.1,满足云相机工作要求。

关键词 大气光学; 云相机; 片上可编程系统; CCD 成像系统; 性能测试

中图分类号 TP73

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2001001

Design and Implementation of Cloud Camera Control System

Shi Jingjing^{1,2}, Hu Yadong^{2*}, Li Mengfan², Sun Bin², Wang Gai²,

Chi Gaojun², Wang Xiangjing², Hong Jin^{1,2}

¹ School of Environmental Science and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

² Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract In order to realize the modular design of a cloud camera control system and improve the system integration, a design method for the hardware platform of an on-bit real-time cloud judgement system based on field programmable gate array (FPGA) is proposed. On the basis of the system functional module division, an on-chip dual-core CPU software architecture is established. One CPU independently processes the cloud judgement algorithm to ensure the real-time performance of the proposed algorithm, and the other CPU is used for data interaction with satellites and partial data pre-processing. The timing control of the CCD imaging and peripheral interface is realized by the self-defined intellectual property (IP) core. Taking the CCD image acquisition and storage module as an example, the designs and time sequences of the CCD driving circuit, analog front-end circuit, and data storage circuit are mainly discussed, and the design method of the IP core of the module is analyzed. Finally, the imaging performance parameters of the cloud camera are tested. Experimental results show that the change of the dark current noise of the camera with the integration time in the set integration time is small. The output nonlinearity is 1.29% at the central field of view, and the signal-to-noise ratio is 128.1 when the signal intensity is 80% of the saturated light intensity, which meets the requirements of the cloud camera.

Key words atmospheric optics; cloud camera; on-ship programmable system; CCD imaging system; performance test

OCIS codes 010.1615 ; 040.1520; 120.4640

收稿日期: 2020-05-25; 修回日期: 2020-06-20; 录用日期: 2020-06-28

基金项目: 王宽诚率先人才计划“卢嘉锡国际团队项目”(GJTD-2018-15)

* E-mail: huyadong@aiofm.ac.cn

1 引 言

在空间遥感相机的在轨工作过程中,50%以上的图像会受到云的干扰,云层的覆盖会严重影响遥感传感器对观测目标反射光的接收,导致有效信息丢失,降低遥感数据反演精度^[1],同时云影响的无用数据和观测将浪费卫星功率、存储和通信等资源,降低价格昂贵的卫星资源利用率,并缩短了卫星使用寿命。目前具备云检测功能的遥感卫星主要分为以下几种:

1) 卫星主载荷本身具备云检测光谱通道。例如中分辨率成像光谱仪 MODIS,其具有 36 个光谱通道,覆盖了从可见光到红外波段,利用云和地物在可见光波段和红外波段不同的反射率和亮温值可以有效地进行云识别和云相态的检测^[2];法国发射的多角度、多偏振、多光谱载荷 POLDER 可探测 9 个波段,其中 490 nm、670 nm、865 nm 的偏振波段和 763 nm、765 nm 的非偏振波段均与云检测相关^[3-4]。

2) 卫星搭载专用云相机。其主要代表有美国 Glory 卫星,研究人员为其主载荷气溶胶偏振探测仪(APS)配备了云相机,该相机具有 443 nm 和 865 nm 两个光谱波段,相比于主载荷,其在 APS 视场范围内具有 500 m 的高空间分辨率,可以为载荷提供有效的云监测和几何校正^[5];日本发射的温室气体监测卫星 GOSAT、GOSAT-2 均搭载了云和气溶胶成像仪(CAI),CAI-2 可探测紫外光、可见光、近红外到短波红外 4 个波段,用于观测导致温室气体含量测量误差的云和气溶胶等大气因素,从而提高主载荷数据反演精度^[6]。

3) 在轨实时云判模式。云检测算法复杂度高且要求实时性好,具备在轨实时云检测的载荷较少,其中澳大利亚科学卫星 FedSat 的有效载荷 HPC-1,通过基于 FPGA 的在轨可重构计算技术实现天上云检测^[7]。国内对于实时云检测系统也进行了有益的探索,文献[8]设计了一套基于 FPGA 和数字信号处理(DSP)硬件平台的张量在轨云检测方法,文献[9]研制了一种基于 VPX 架构的星载遥感图像实时处理系统,文献[10]提出一种基于嵌入式 DSP、可实现多特征提取的实时云判技术。

云相机是中国科学院安徽光学精密机械研究所针对小卫星平台研制的一款光学遥感载荷,结合以上几种探测模式的优点,能够在卫星主载荷成像前对目标区域进行提前云识别和云覆盖率的判别,从而为其提供观测时间窗口和必要的指向信息。相机

采用大视场加可见光彩色 CCD 的探测形式,成像幅宽分别为 800 km(穿轨)和 400 km(沿轨),星下点空间分辨率优于 500 m,通过预滤光片及 CCD 片上 Bayer 滤光片实现探测波段的选择,星上云判算法根据采集图像的空间信息和光谱信息完成目标区域的实时云反演。传统的星上数据在轨实时处理的硬件平台通常采用 FPGA 和 DSP 配合工作的方式,但是这种“FPGA+DSP”的电路结构比较复杂,数据传输速度受到硬件接口和总线带宽的限制,不利于系统集成和模块化设计。同时,小卫星对于载荷的体积功耗有着更加严格的限制,电子学系统需要进一步优化以提高集成度。针对此问题,本文在 FPGA 内部嵌入双 Microblaze 软核处理器,设计了应用于云相机控制的片上可编程系统(SOPC),采用单片 FPGA 就可以完成“FPGA+DSP”的功能。该片上系统充分利用了硬件并行执行和软件顺序执行的特点,实现了 CPU 和 FPGA 的优势互补,系统集成度高、可移植性强。

2 总体方案设计

云相机的在轨工作需根据成像模式及成像条件实现参数调整,对 CCD 图像数据进行高精度的实时采集、预处理及存储,根据遥控指令完成对目标区域的云识别,生成云掩模图,并在给定时间内完成云判结果的上传及图像的发送。为了满足这些要求,本文在分析系统功能的基础上建立了合适的片内体系结构,采用 Xilinx 公司的 FPGA 芯片 XC4VSX100-10FF1148 作为主控器,在 FPGA 内部嵌入两个 Microblaze 软核处理器,将不同的任务划分至不同处理器核上,实现系统的双核并行控制与计算,并且通过硬件编程设计了各个功能模块的 IP (intellectual property)核控制器。云相机各电路模块、FPGA 内部系统架构和数据流如图 1 所示。

第一软核处理器 Microblaze0 主要负责云相机工作流程控制,可灵活调用硬件资源,实时监测系统工作情况。FPGA 内部通过 PLB 总线实现 Microblaze 软核与各 IP 核之间的数据交互以及 IP 核工作模式的控制^[11]。CCD 图像采集与存储 IP 核的作用是向驱动电路发送 CCD 正常工作所需要的驱动时钟信号,并且生成模数(A/D)转换模块工作所需的时序信号,完成对视频模拟信号的采集,同时将图像数据存入存储器中,存储器作为缓冲单元保证了图像能够以数据传输协议要求的速率读出,实现图像采集与输出的平缓过渡;LVDS(low-voltage

differential signaling)数据发送 IP 核负责将组包好的原始图像数据、云掩模数据按照接口协议生成单端信号, LVDS 接口芯片将单端信号转换成标准电平的差分信号, 并将其发送至卫星数传单元; 系统时间管理 IP 核利用高精度的晶振时钟源实现系统内部计时, 通过接收 GPS 接收机发出的秒脉冲信号,

并利用周期性的时间码广播来同步载荷与卫星时间, 完成校时、守时; 系统中断管理 IP 核可响应 CAN 总线控制器中断引脚的硬件中断信号, 系统中断服务函数可完成对星载计算机发出的时间广播、控制指令的接收、译码及转发, 同时将载荷内部遥测信息进行打包上传。

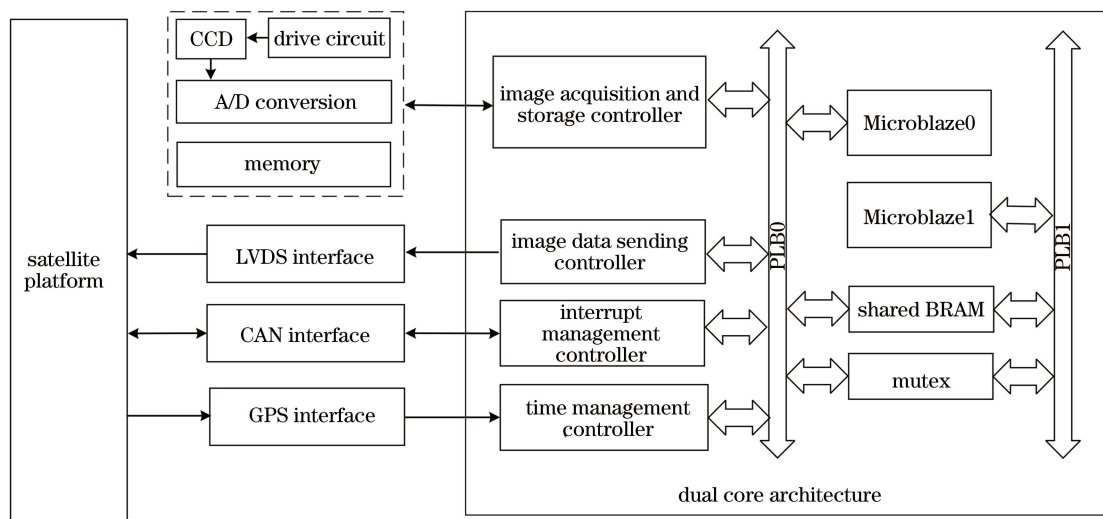


图 1 云相机电子学系统框图

Fig. 1 Block diagram of cloud camera electronics system

第二软核处理器 Microblaze1 主要负责星上实时云判算法的执行、相应云掩模图的生成以及目标区域云覆盖率计算, 其将数据发送给 Microblaze0。Microblaze 处理器是片内 32 位哈佛结构 RISC 软核, 带有专用的浮点运算单元 (FPU), 支持 32 位的单精度浮点数运算^[12], 适合于复杂算法的硬件实现。双核利用片内存储器 shared BRAM 内存共享的方式进行通信, 并通过内部 mutex 对两个处理器同时读写的情况进行仲裁, 实现互斥访问。

CCD 图像采集与存储模块是相机控制系统设计的关键所在, 直接影响了成像的质量及云判结果的准确性。下文以此为例, 详细阐述了 CCD 驱动电路、模数转换电路、存储单元电路的设计和时序, 并对该模块的自定义 IP 核各功能单元、数据传输接口的设计方法进行了说明。其他模块的设计与之类似, 本文不作赘述。

3 CCD 图像采集与存储模块

基于云相机的设计需求, 项目选用的探测器型号为 KAI-08050, 是安森美公司生产的一款行间转移面阵 CCD, 其具有优异的成像性能、高灵敏度、低

噪声、宽动态范围等特点, 并且具备电子快门, 曝光时间可调整, 像元表面有按照 Bayer 规律排列的基色滤光片, 用于实现颜色的分离^[13]。KAI-08050 工作需要垂直、水平驱动信号, 电子快门信号, 以及复位信号等, 各信号要求的电压幅值及管脚对应的等效电容见表 1。

3.1 CCD 驱动电路及时序设计

本设计中云相机工作在单次成像模式下, CCD 采用单通道输出方式。由上文可知该 CCD 正常工作所需的驱动信号种类多, 不同电平间压差大, 并且驱动时钟管脚具有大电容特性, 而 CCD 对驱动信号的上升沿和下降沿都有指定的时间要求, 这就要求驱动信号在较大的电压摆幅下能够为快速变化的边沿提供足够的瞬时电流。根据电容模型计算出在不同的容性负载下所需的瞬态电流:

$$i = C \times \frac{du}{dt}, \quad (1)$$

式中: u 为信号电压摆幅; C 为 CCD 驱动时钟管脚等效电容。可以认为信号的上升沿和下降沿近似成线性变化, 驱动电流计算式^[14]为

$$i = C \times \frac{V_H - V_L}{t_{rise}} \times 80\%, \quad (2)$$

表 1 CCD 驱动信号电平及等效电容

Table 1 CCD drive signal levels and equivalent capacitances

Description	Signal	Level	Voltage	Equivalent capacitance /nF
Vertical clock	V1T/V1B	High	12 V	43
		Mid	0 V	
		Low	-8 V	
Vertical clock	V2T/V2B V3T/V3B V4T/V4B	High	0 V	43
		Low	-8 V	
		High	0 V	
Horizontal clock	H1S α / H2S α	Low	-5 V	0.28
		High	0 V	
Horizontal clock	H1B α / H2B α	Low	-5 V	0.19
		High	0 V	
Horizontal clock	H2SL α	Low	-5 V	0.02
		High	0 V	
Reset gate	R α	Low	-2 V	0.016
		High	3 V	
Electronic shutter	SUB	High	VSET	3
		Low	VSUB	

式中： V_H 、 V_L 分别为驱动信号的高、低电平； t_{rise} 为上升时间。水平时钟频率为 6.25 MHz，信号边沿时间为 32 ns，利用水平时钟管脚最大等效电容进行计算，需要的电流为 35 mA。垂直时钟频率为 11.4 kHz，高电平脉宽为 4 μ s，CCD 等效电容为 86 nF，根据 CCD 数据手册，要求信号上升沿和下降沿的时间在高电平脉宽的 5%~10% 以内，驱动电流为 2.75 A。

1) 驱动电路设计

FPGA 发出的信号的最大电平幅值为 3.3 V，该信号经过电平转换器才能驱动 CCD 正常工作。本文采用 TI 公司的三态输出缓冲器 SNJ54AHC244W 设计水平时钟驱动电路和复位电路，输出电压摆幅为 5 V，峰值电流达到 50 mA，满足设计要求。垂直驱动信号包括双电平脉冲和三电平脉冲，对这两种驱动信号的设计，尤其是三电平脉冲信号的生成是难点。选用 intersil 公司的 EL7457 作为双电平脉冲驱动器，首先利用 EL7457 将 FPGA 输出的垂直驱动信号电平转换成指定电平，而 EL7457 的最大输出电流为 2 A，故将其输出信号接入高速 MOSFET 双驱动器以增强驱动能力，保证了垂直驱动电路正常工作，并留有一定的裕量。对于 V1T/V1B 的三电平脉冲驱动信号，其高、低电平之差需达到 20 V，常见的时序驱动芯片难以满足该要求，本文采用功率 MOSFET 对管驱动的方法。电路原理图如图 2 所示，通过上下两个驱动器分别产生 V_1 、 V_4 信号，利用第一个驱动器输出端信号控

制第二个驱动器电源输入端信号，两驱动器组合生成三电平驱动脉冲。通过 LTspice XVII 软件对图 2 所示的电路进行仿真，仿真结果如图 3 所示，输出信号的低电平为 -8 V，中间电平为 0 V，高电平为 12 V，满足设计要求。

CCD 的基底时钟信号 (SUB) 即为电子快门。KAI-08050 通过在基底加上合适的直流偏压 VSUB 实现强光溢出保护功能，电压值通常在 5~15 V 之间。如果在基底直流电平上施加一个大电平脉冲 VSET 可以使得 CCD 进入快门工作状态，此时基底的大电压抽空感光单元中积累了电荷，CCD 重新曝光，实现积分时间的调整，该过程要求 SUB 脉冲信号的电平范围为 29~40 V，脉宽持续时间为 1 μ s 以上。参考文献[15]的设计方法通过两个互补的三极管组成反相驱动电路，利用三极管的基极信号控制其开关状态，输出信号经过耦合电容和二极管箝位电路，在合理的偏压下得到电子快门脉冲，电路原理图见图 4。最终生成的 SUB 信号直流电平为 8.8 V，脉冲电平为 36.8 V，脉宽为 6 μ s。

2) 驱动时序分析

KAI-08050 图像传感器的电荷转移时序包括三个阶段，分别为曝光、帧转移和像素读出。帧转移时序仅在一帧图像曝光结束后产生，如图 5(a) 所示，在垂直时钟 P1、P2、P3、P4 的配合下，感光元件中电荷全部被转移至垂直存储单元，转移过程发生在 P1 三电平脉冲高电平期间。需要注意的是，在同一时刻，P1、P2 时钟的上升沿和下降沿分别与 P3、P4 时

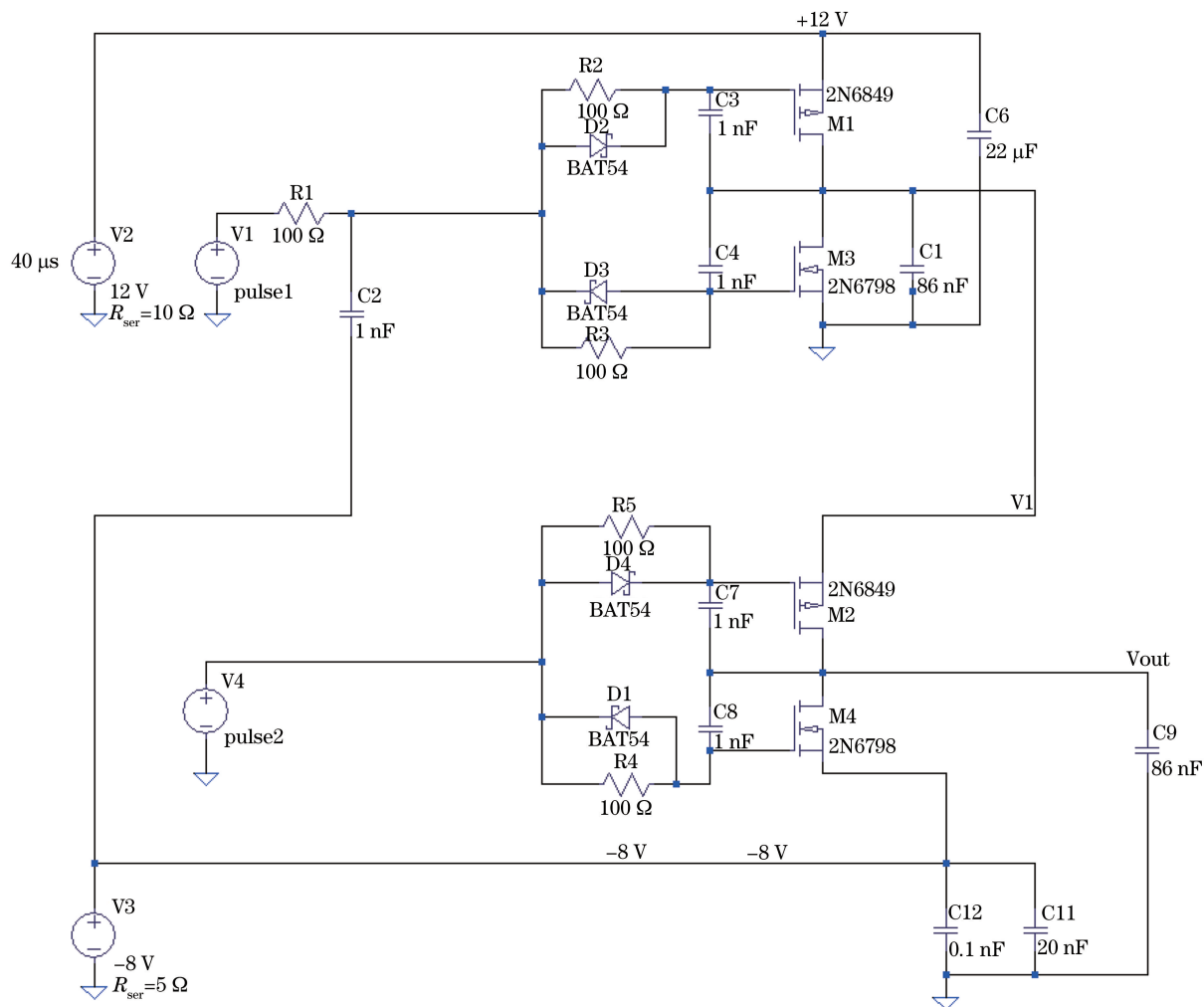


图 2 三电平脉冲信号驱动电路

Fig. 2 Three-level pulse signal driving circuit

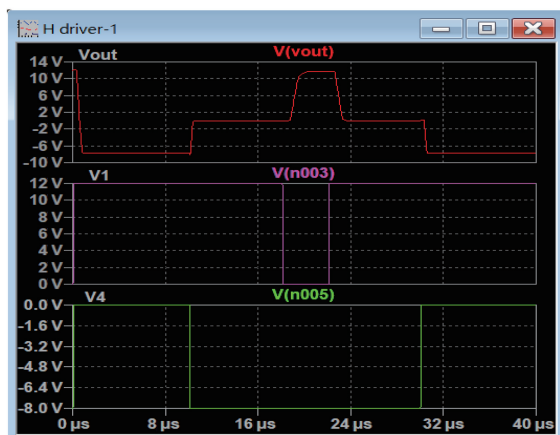


图 3 三电平脉冲仿真图

Fig. 3 Simulation diagram of three-level pulse signal

钟下降沿和上升沿对齐,此外要求两时钟上升沿和下降沿交叠点处的电平值为信号幅值的 75%~100%。

CCD 电荷的垂直转移和水平转移发生在像素

读出阶段,如图 5(b)所示,在垂直时钟 P1 的下降沿,垂直存储器中的电荷向下转移,最后一行电荷会转移至 CCD 底部水平移位寄存器中,电荷垂直转移的过程中,水平时钟一直处于屏蔽状态。接着水平时钟 P5 和 P6 的反相电平使水平移位寄存器中产生势阱存储电荷,并将电荷转移至浮置扩散输出节点,通过末端放大器完成模拟视频信号的输出。P7 为复位时钟,用于清除水平移位寄存器中的残余电荷。CCD 每行均按照上述步骤依次进行电荷转移,直到所有电荷完全输出。

电子快门曝光时序图见图 5(c),积分时间为 SUB 信号下降沿到三电平脉冲信号高电平下降沿的时间,调整 SUB 信号高电平位置可以控制 CCD 精确曝光时间。

图 6 为示波器显示的 CCD 各驱动信号测试波形图,可以看出电平范围、边沿时间、边沿交叠时序均满足设计要求。

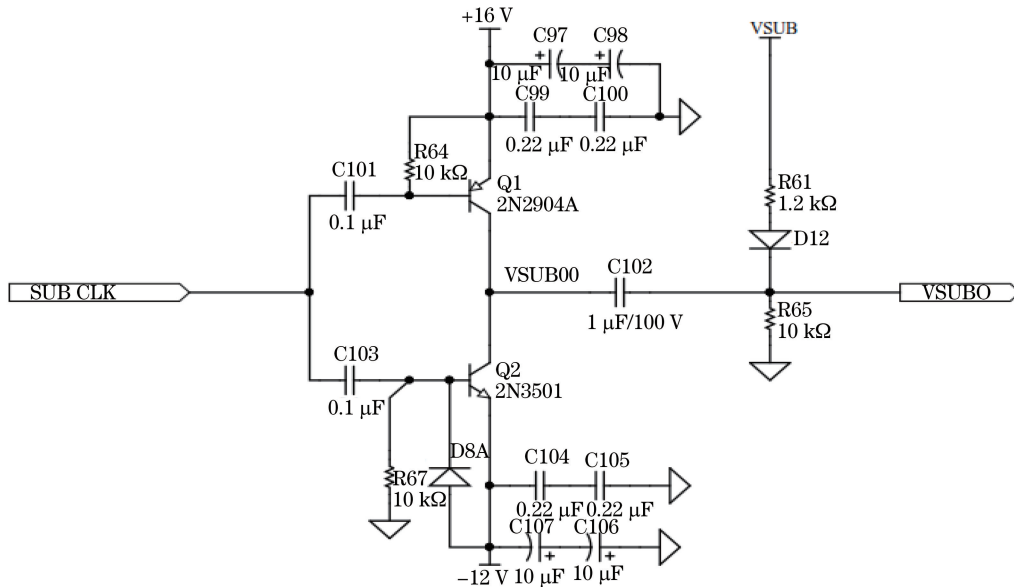


图 4 电子快门驱动电路

Fig. 4 Driving circuit of electronic shutter

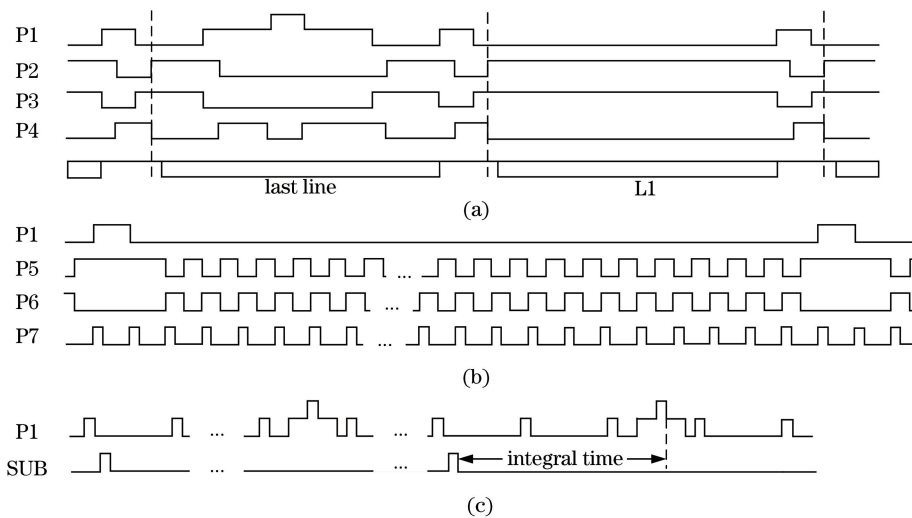


图 5 帧转移时序、像素读出时序和电子快门时序。(a)帧转移时序;(b)像素读出时序;(c)电子快门时序

Fig. 5 Frame transfer timing, pixel readout timing, and electronic shutter timing. (a) Frame transfer timing; (b) pixel readout timing; (c) electronic shutter timing

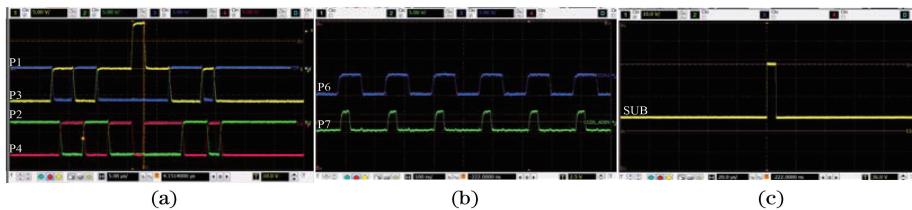


图 6 垂直时钟、水平时钟和复位信号,以及电子快门。(a)垂直时钟;(b)水平时钟和复位信号;(c)电子快门

Fig. 6 Vertical clock, horizontal clock and reset signal, and electronic shutter. (a) Vertical clock; (b) horizontal clock and reset signal; (c) electronic shutter

3.2 模拟前端电路

为了增强信号驱动能力并且与后端集成电路隔

离,CCD 输出的模拟视频信号首先经过射极跟随器,再通过一个隔直电容之后进入模数转换单元。

实际输出模拟信号包括像元光电响应信号和复位信号,通过相关双采样技术(CDS)分别在复位周期结束后和光电响应信号的信息段进行采样,将采样值相减可以消除复位噪声的影响^[16]。本文选择 ADI 公司的 AD9826 作为模拟信号采集器,其内部有三个数据转换通道,每个通道均由箝位电路、相关双采样器、偏移数模转换器(DAC)和可编程放大器组成,并通过多路复用的方式接入一个高性能 16 位模数转换器(ADC)。主控 FPGA 通过三线式串行接口来配置其内部寄存器,完成工作参数的设置,并根据 CCD 时序提供采样时钟和相关双采样的前、后采样信号,AD9826 分别在采样时钟的前、后半时钟周期内输出高 8 位和低 8 位电平^[17]。

3.3 图像存储

CCD 曝光之后,先将输出的数字信号记录于 SDRAM 中,再经过第一软核处理器 Microblaze0 读出信号,将其进行组包后发送至卫星平台。选用 Micro 公司的 MT48LC8M16A2 作为存储单元,这是一款 16 MB 的同步动态随机存储器(SDR

SDRAM),满足一帧图像存储的要求。SDRAM 对外接口多,控制时序复杂,本文采用有限状态机的方式来控制内部状态的跳转,完成存储器的读写^[18]。

首先进行初始化设置,初始化流程见图 7(a),SDRAM 上电等待 $200\ \mu\text{s}$ 后对所有存储块(BANK)执行预充电命令(PRECHARGE),充电完成之后执行自动刷新操作(AUTO REFRESH),最后设置模式寄存器(MODE REGISTER SET)完成 CAS(column address strobe)潜伏期、突发传输模式、突发长度等参数设置。完成初始化之后,进入正常工作状态。SDRAM 采用突发读写工作模式,能够在接收命令后连续读写多个数据,提高读写效率。突发读写控制过程为:首先进行行激活(ACTIVE),在经过 $2/3$ 个时钟周期延时 tRCD(RAS to CAS Delay)之后发送读写命令,在写指令有效时,数据被写入地址连续的存储单元中,为了保证写入数据的有效性,保留足够的写回(WRITEBACK)时间。读指令有效时,等待 $2/3$ 个

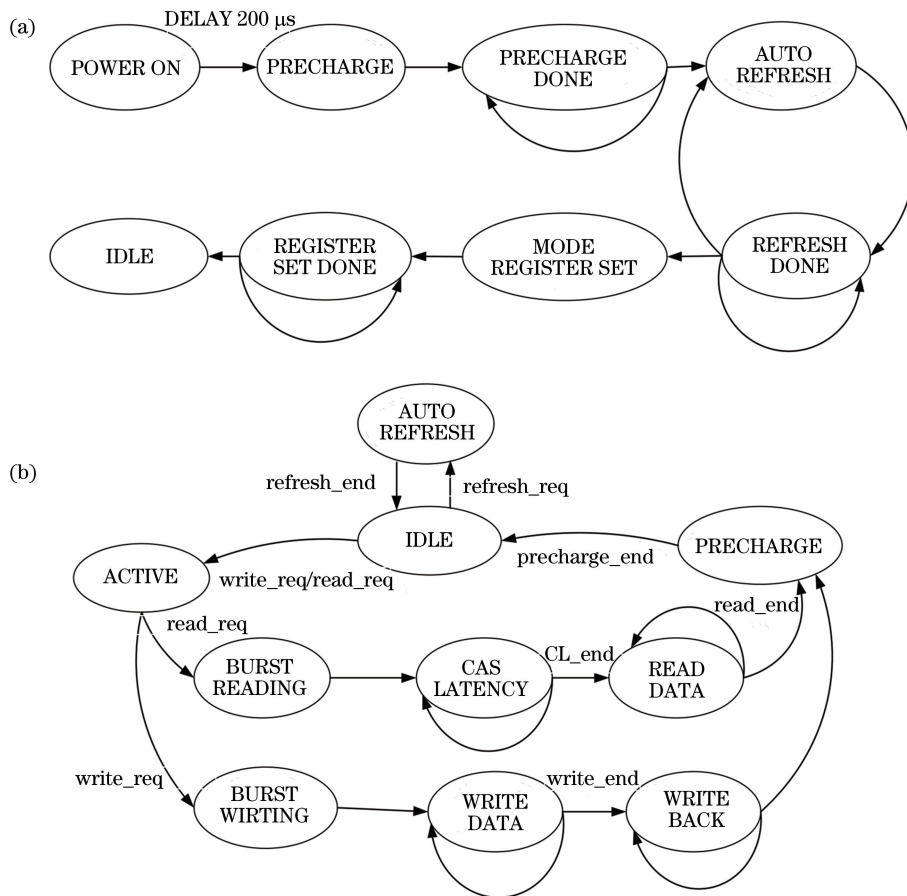


图 7 SDRAM 初始化流程和工作状态转移图。(a) SDRAM 初始化流程;(b)工作状态转移图

Fig. 7 SDRAM initialization process, and diagram of working state transition. (a) SDRAM initialization process; (b) diagram of working state transition

时钟周期的潜伏期 CL(CAS LATENCY)后通过数据总线对 SDRAM 存储单元中的数据进行读取,数据个数由突发长度设定参数决定,当一次读写操作完成后,需要发出预充电命令对工作行中所有存储体进行数据重写,并对行地址进行复位,以准备新行工作。由于 SDRAM 采用电容作为存储单元^[19],存储体中电容的数据有效保存期上限是 64 ms,也就是说每一行刷新的循环周期是 64 ms,这样才能保证数据不丢失,状态转移图如图 7(b)所示。

3.4 图像采集与存储 IP 核设计

根据上文对各模块的工作时序及原理分析,利用 Verilog 硬件描述语言设计了自定义 IP 核。如图 8

所示,IP 核内部集成了三个功能单元:CCD 驱动时序发生单元、A/D 转换单元、SDRAM 控制单元。IP 核作为从控制器,需要接收来自 Microblaze 主控器的控制命令,这里利用 IP 核内自定义寄存器来设计接口,接口分为初始化参数接口和控制命令交互接口。主控器通过初始化参数接口完成对 IP 核工作参数的设置,包括 CCD 积分时间、CCD 读出行列偏移量、AFE (analog front end) 配置、AFE 增益、AFE 偏置、SDRAM 读写起始地址与结束地址、SDRAM 突发读写长度等;通过控制命令交互接口向 IP 核转发相关卫星任务指令并根据反馈得到该子系统的工作状态,如 CCD 成像开始指令、CCD 成像结束状态反馈等。

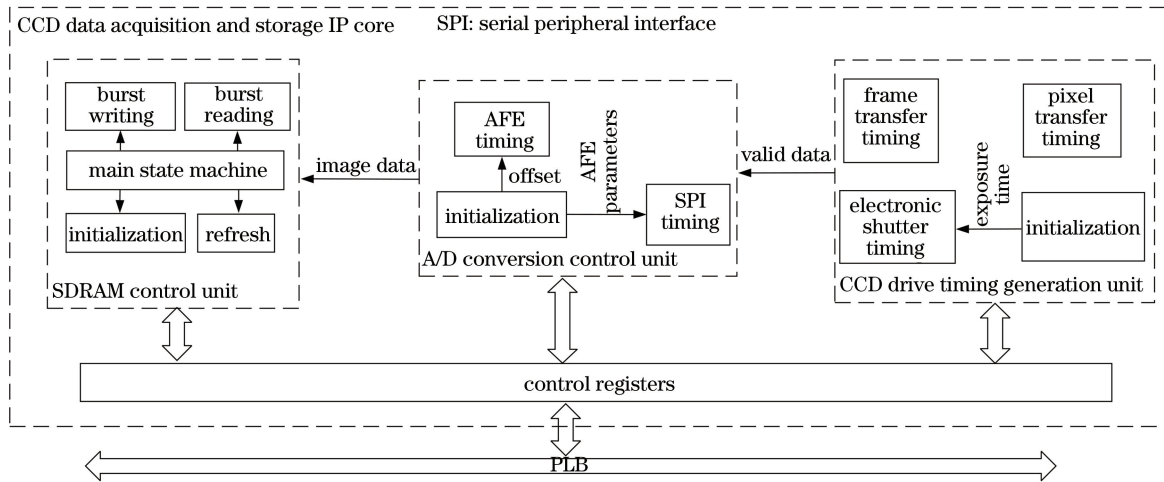


图 8 CCD 数据采集与存储 IP 核

Fig. 8 CCD data acquisition and storage IP core

4 相机成像性能测试

在室温下进行了云相机性能测试,云相机性能主要包括暗电流噪声、非线性度、信噪比等。图 9 为云相机性能测试框图,实验设备包括积分球、光谱辐亮度计(ASD)、地检计算机(PC),积分球作为辐射源为云相机提供均匀、稳定且能量可调的面光源,ASD 用于监测和测量相机入瞳处的光谱辐亮度值。相机性能测试现场如图 10 所示。

由于 CCD 暗电流会随温度的变化发生变化,因此相机暗电流噪声测试的实验过程需要在暗场环境下进行,并通过 CCD 焦面板上的热敏电阻实时采集温度遥测值,在温度稳定时进行实验^[20]。利用积分球光源进行测试时,调整相机和 ASD 使其分别正对积分球出光口中心,使得积分球出射光充满相机整个视场。测试过程中,相机积分时间分为 11 档,分别为 7, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50, 60, 70 ms。通过调节积分球出射辐亮度值,使得相机在设定的最

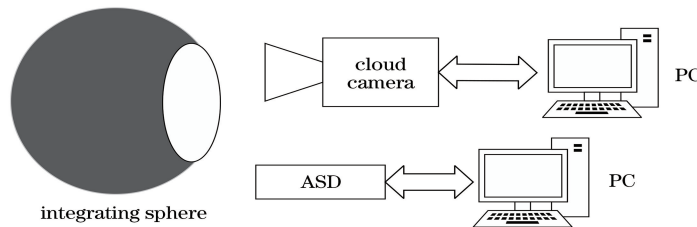


图 9 性能测试框图

Fig. 9 Block diagram of performance test

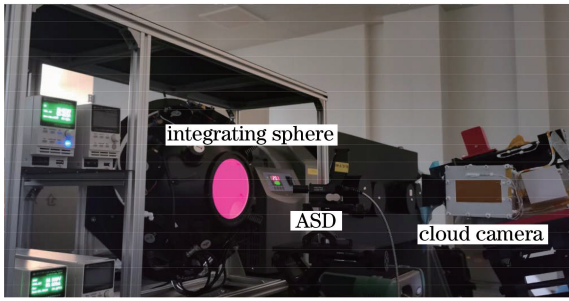


图 10 相机性能测试现场

Fig. 10 Camera performance test site

大积分时间内输出的 DN 值趋向饱和。在每档积分时间下,相机采集亮、暗图像各 20 帧用于后续数据处理。云相机输出 A/D 转换的高 8 位数据,CCD 的 R、G、B 通道响应不一致,需要分别进行处理。

4.1 暗电流噪声测试结果

对于不同积分时间采集的 20 帧暗图像,单个像元本底均值为

$$Y_{\text{dark},T,i,j} = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n D_{\text{dark},T,i,j,m}, \quad (3)$$

式中: $D_{\text{dark},T,i,j,m}$ 表示在积分时间 T 下,第 i 行、第 j 列像元第 m 次测量的本底值; n 为测量次数,对像面上所有像元的本底值取平均,结果如图 11 所示。在云相机在轨工作中,其检测对象为云,在目标典型辐亮度下,相机积分时间不超过 100 ms,测试过程中积分时间在 7~70 ms 之间变化,图像暗电流噪声输出值最大变化 0.91%,其随积分时间的变化较小。

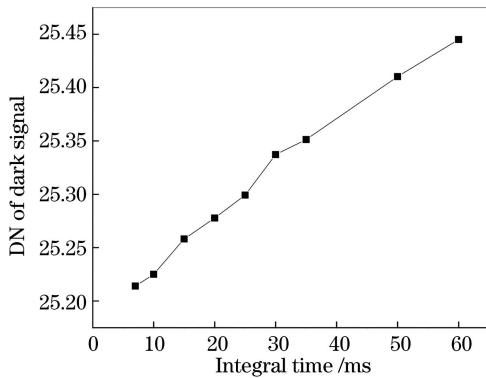


图 11 暗电流噪声测量结果

Fig. 11 Measurement results of dark current noise

4.2 非线性测试结果

理想情况下,CCD 输出信号值与光源辐照度呈线性变化,但是 CCD 阱深、模拟前端放大电路非线性、A/D 转换非线性等都会导致输出信号与曝光时间并非呈完美的线性关系^[21]。在测试获取的图像上选取中心视场 $M \times N$ 的像素矩阵,并进行灰度平均值计算,受限于系统的计算能力,云相机实时云

判算法只对目标热点区域 (11×11 像元) 进行云计算,不对全幅图像进行处理,因此本文非线性测试反映的是中心视场部分的非线性指标:

$$Y_{T,i,j} = \frac{1}{n} \left[\sum_{m=1}^n (D_{T,i,j,m} - Y_{\text{dark},T,i,j}) \right], \quad (4)$$

$$Y_{\text{avg}} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N Y_{T,i,j}, \quad (5)$$

式中: $D_{T,i,j,m}$ 表示在积分时间 T 下,第 i 行、第 j 列像元的第 m 次测量值; Y_{avg} 为目标区域内像素平均灰度值。CCD 输出平均灰度值与曝光时间的关系如图 12 所示,采用最小相对偏差的原理,并利用最小二乘法线性回归求得线性关系为

$$y_{\text{avg}} = 2.9258 \times T + 0.6738, \quad (6)$$

式中: y_{avg} 为图像信号拟合值。利用非线性不确定系数来表征仪器响应非线性度,即拟合标准差与响应均值之比,公式如下:

$$\delta = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (y_{\text{avg},k} - Y_{\text{avg},k})^2}{n}}}{\frac{\sum_{i=1}^n Y_{\text{avg},k}}{n}} \times 100\%, \quad (7)$$

式中: $Y_{\text{avg},k}$ 为云相机实测值; $y_{\text{avg},k}$ 为实测值对应积分时间下的拟合曲线函数值。通过计算得到非线性度为 1.29%。

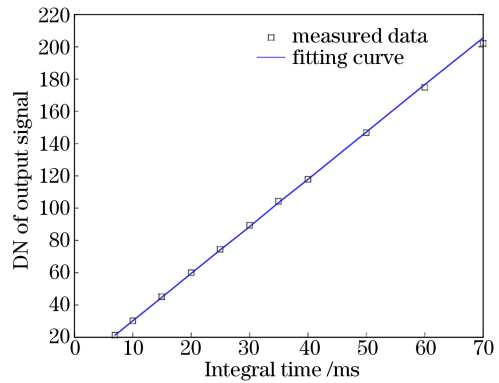


图 12 输出信号值与曝光时间的关系

Fig. 12 Relationship between output signal value and exposure time

4.3 信噪比测试结果

信噪比决定了采集数据的有效性,是科学评价相机成像质量的一个重要指标^[22]。云相机采集图像的信号值和噪声值可以由图像平均值和标准差来表征。像元平均响应值由(5)式求得,信噪比表达式为

$$R_{\text{SN}} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{Y_{T,i,j}}{S_{\text{noise},T,i,j}}, \quad (8)$$

其中

$$S_{\text{noise},T,i,j} = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^n (D_{T,i,j,m} - Y_{\text{dark},T,i,j} - Y_{T,i,j})^2}{n}} \quad (9)$$

表 2 不同曝光时间下的相机信噪比

Table 2 Camera SNR at different exposure time

T/ms	7	10	15	20	25	30	35	40	50	60	70
SNR	20.5	24.5	37.1	43.9	52.3	68.3	74.7	76.8	102.2	113.8	128.1

5 结 论

根据云相机的功能需求,建立了基于 Microblaze 片上可编程双核控制系统,并以相机控制系统关键模块的设计方法为例,重点研究了 CCD 图像采集与存储模块的电路设计、时序分析及 IP 核设计过程。最后,采用积分球光源测试了相机成像性能,包括暗电流噪声、输出非线性、信噪比等参数,实验结果验证了云相机控制系统满足成像要求。所提出的云相机控制系统充分利用了 FPGA 硬件编程的高精度时序发生功能实现对外围接口的控制,同时结合片内软核快速浮点运算功能完成云判算法的硬件实现,相比于“FPGA+DSP”的硬件系统架构具有更灵活的可编程性、更高的系统集成度,适合于对体积功耗要求较高的空间载荷的应用,可以为同类星载遥感仪器的设计提供参考。

参 考 文 献

- [1] Meng S L, Pang Y, Zhang Z J, et al. Self-adaptive cloud detection approach for GaoFen-1 optical remote sensing data[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2019, 38(1): 103-114.
蒙诗栋, 庞勇, 张钟军, 等. 高分一号光学遥感数据自适应云区识别[J]. *红外与毫米波学报*, 2019, 38(1): 103-114.
- [2] Wang J C, Yang S Z, Ma J J, et al. Automatic cloud detection applied to MODIS image in the southeast of China[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, 31(3): 270-273.
王家成, 杨世植, 麻金继, 等. 东南沿海 MODIS 图像自动云检测的实现[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2006, 31(3): 270-273.
- [3] Fang W, Qiao Y L, Zhang D Y, et al. Threshold optimization in cloud detection by polarized multichannel remote sensing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(12): 1228005.
方薇, 乔延利, 张冬英, 等. 偏振多通道遥感云检测的阈值优化[J]. *光学学报*, 2018, 38(12): 1228005.
- [4] Li S, Sun X B, Ti R F, et al. Influence of scattering model and effective particle radius on cirrus cloud optical thickness retrieval[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(7): 0701001.
李树, 孙晓兵, 提汝芳, 等. 散射模型和有效粒子半径对卷云光学厚度反演的影响[J]. *光学学报*, 2018, 38(7): 0701001.
- [5] Chowdhary J, Cairns B, Mishchenko M I, et al. Using multi-angle multispectral photo-polarimetry of the NASA Glory mission to constrain optical properties of aerosols and clouds: results from four field experiments[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5978: 59780G.
- [6] Ishida H, Nakjima T Y, Yokota T, et al. Investigation of GOSAT TANSO-CAI cloud screening ability through an intersatellite comparison[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2011, 50(7): 1571-1586.
- [7] Williams J A, Dawood A S, Visser S J. FPGA-based cloud detection for real-time onboard remote sensing[C]//2002 IEEE International Conference on Field-Programmable Technology, 2002. (FPT). *Proceedings*, December 16-18, 2002, Hong Kong, China. New York: IEEE Press, 2002: 110-116.
- [8] Sui Y L, He B, Fu T J. Energy-based cloud detection in multispectral images based on the SVM technique[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2019, 40(14): 5530-5543.
- [9] Bian C J. Research on valid region on-board real-time detection and compression technology applied for optical remote sensing image[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018: 85-97.
卞春江. 光学遥感图像有效区域在轨实时检测与压缩技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018: 85-97.
- [10] Yan Y S, Long T. Real-time cloud detection in optical remote sensing image[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2010, 30(7): 817-821.
闫宇松, 龙腾. 遥感图像的实时云判技术[J]. *北京理工大学学报*, 2010, 30(7): 817-821.

- [11] Chen D C, Hu J Y, Lü W G, et al. Design and implementation of multi-interface LCD controller based on IP cores [J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2017, 32(2): 117-123.
陈东成, 胡敬营, 吕卫国, 等. 基于 IP 核的多接口 LCD 控制器的设计及实现 [J]. 液晶与显示, 2017, 32(2): 117-123.
- [12] Fan Q Y, Liu P F. An information processing system for Sun sensor based on SOPC [J]. Opto-Electronic Engineering, 2013, 40(1): 31-37.
樊巧云, 刘鹏飞. 基于 SOPC 的太阳敏感器信息处理系统 [J]. 光电工程, 2013, 40(1): 31-37.
- [13] Yang Y M, Li Q J, Li W M, et al. Modulation transfer function for color area CCD based on Bayer filtering [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(7): 1611-1618.
杨永明, 李清军, 李文明, 等. 基于 Bayer 滤波的彩色面阵 CCD 调制传递函数 [J]. 光学精密工程, 2012, 20(7): 1611-1618.
- [14] 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. 气溶胶探测器 CCD 成像系统的设计 [J]. 中国激光, 2018, 45(11): 1110001.
- [15] Ma T X. Design of area array-CCD KAI-04022 imaging system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(S1): 117-122.
马天翔. 面阵探测器 KAI-04022 成像系统设计 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(S1): 117-122.
- [16] 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.
- [17] Qiu X H, Wang Y, Chang Z, et al. Design and implementation of CCD imaging circuit for airborne ultraviolet DOAS imaging spectrometer [J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(5): 0538002.
邱晓晗, 王煜, 常振, 等. 机载紫外 DOAS 成像光谱仪 CCD 成像电路的设计及实施 [J]. 红外与激光工程, 2017, 46(5): 0538002.
- [18] Wang M F, Yang S H. SDRAM controller designed for real-time display system of large-array CCD image [J]. Journal of Computer Applications, 2009, 29(5): 1449-1451.
王明富, 杨世洪. 大面阵 CCD 图像实时显示系统中的 SDRAM 控制器设计 [J]. 计算机应用, 2009, 29(5): 1449-1451.
- [19] Wang B, Bai Y L, Ouyang X, et al. Spectrum data acquisition system based on linear CCD [J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(3): 441-445.
王博, 白永林, 欧阳娴, 等. 基于线阵 CCD 的高速光谱信息采集系统的研究 [J]. 光子学报, 2010, 39(3): 441-445.
- [20] Xiu J H, Huang P, Li J, et al. Non-uniformity correction of large area array color CCD aerial mapping camera [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0711003.
修吉宏, 黄浦, 李军, 等. 大面阵彩色 CCD 航测相机成像非均匀性校正 [J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0711003.
- [21] Liang S L, Wang Y M, Mao J H, et al. Test for pixel non-uniformity of scientific optical CCD [J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(4): 0417004.
梁少林, 王咏梅, 毛靖华, 等. 科学级光学 CCD 像素非均匀性的测试 [J]. 红外与激光工程, 2019, 48(4): 0417004.
- [22] Li H B, Liu Y Q, Song Y S, et al. Test method of optoelectronic parameters of CMOS camera [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(10): 100401.
李洪博, 刘云清, 宋延嵩, 等. CMOS 相机光电参数的测试方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(10): 100401.