

文章编号 1004-924X(2025)21-3352-12

低噪声高帧频短波红外成像系统设计

任同阳¹, 贾建禄^{1*}, 于 勇¹, 刘塔拉¹, 郭鹏飞¹, 李学良¹, 马 爽¹, 陈姝岐^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为实现地基大口径望远镜对短波成像(Short-Wave Infrared, SWIR)系统低噪声、高线性度的需求,以及摆脱国外对科学级短波红外成像的技术封锁,缩短项目周期,于是设计了基于 InGaAs 材料焦平面阵列(Focal Plane Array, FPA)的制冷型短波红外成像系统。首先,设计了成像系统的基本架构,在架构基础上设计了低噪声硬件电路。然后,结合半导体制冷(Thermoelectric Cooling, TEC)技术,在保证极低读出噪声和暗电流的基础上设计了基于现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Arrays, FPGA)的传感器驱动、高效完成图像读出和程序传输。最后,形成系统样机。实验结果表明,该成像系统能够在零下 10 °C 的工况下持续运行,实现了最快 116 frame/s 的全画幅图像输出,在低增益、中增益、高增益模式下分别达成了 364.87 e⁻, 40.66 e⁻, 15.73 e⁻ 的噪声水平,线性度、响应均匀程度均表现良好,在室内和室外均能稳定工作并清晰成像,满足科学级探测器的指标要求。

关键词:短波红外;现场可编程门阵列;成像驱动电路;半导体制冷

中图分类号: TN27 **文献标识码:** A

doi: 10.37188/OPE.20253321.3352

CSTR: 32169.14.OPE.20253321.3352

Design of low-noise high-frame-rate short-wave infrared imaging system

REN Tongyang¹, JIA Jianlu^{1*}, YU Yong¹, LIU Tala¹, GUO Pengfei¹, LI Xueliang¹, MA Shuang¹,
CHEN Shuqi^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,

Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: jiajianlu@ciomp.ac.cn

Abstract: To meet the demands for low noise and high linearity in ground-based, large-aperture short-wave infrared (SWIR) imaging systems and to circumvent international constraints on scientific-grade SWIR imaging while expediting project timelines, a cooled SWIR imaging system based on an InGaAs focal plane array (FPA) was developed. The system architecture was first established, followed by the design of a low-noise hardware circuit incorporating thermoelectric cooling (TEC) to minimize readout noise and dark current. An FPGA-based sensor drive circuit and an optimized image readout and data-transmission program were implemented to realize a prototype. Experimental results indicate stable operation at

收稿日期: 2025-04-25; 修订日期: 2025-05-30.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 12122304, No. 12303085, No. 12473085)

$-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ with a maximum full-frame output rate of 116 frames per second. In low-, medium-, and high-gain modes, noise levels of 364.87 e^{-} , 40.66 e^{-} , and 15.73 e^{-} were measured, respectively, together with excellent linearity and response uniformity. The system demonstrates robust performance and produces high-quality images in both indoor and outdoor environments, satisfying specifications for scientific-grade detectors.

Key words: shortwave infrared; Field Programmable Gate Array (FPGA); imaging driving circuit; Thermoelectric Cooling(TEC)

1 引言

InGaAs 短波红外探测器具有高探测效率、高均匀性的特点,广泛应用于航空航天、医疗、军事和天文观测等领域,且针对探测器以及驱动方式的研究已经成为该领域的热点^[1-2]。近年来,国内外在 InGaAs 焦平面探测器领域开展了大量研究^[3],暗电流更低、像元均匀性更佳、盲元数更少的产品已经逐渐向民用化、产品化方向发展。然而,评价一套成像系统性能指标,不能仅对比探测器性能优劣,其本身是否具有低噪声驱动电路设计和高效控制策略也尤为关键。

美国 Sensors Unlimited 公司首次研制出 InGaAs 焦平面探测器,因其卓越的军事价值获得军方大力支持,推动了该技术的快速发展。法国 First Light Imaging、日本 Hamamatsu 和比利时 Xenics 等企业随后也推出了多款红外探测相机,广泛应用于国内科研机构。近年来,受国际形势影响,很多国外产品大幅上调价格,甚至无法进口,用户购买的产品面临无法维修和迭代的难题,大量设备急需对应的替代产品。中国短波红外相机产业虽起步较晚,但随着工业水平的进步发展迅速。短波相机的研制受限于焦平面探测器的生产能力。在核心元器件方面,中国电子科技集团第四十四研究所成功研制出 640×512 规格的 InGaAs 焦平面探测器。北方夜视科技研究院开发的 640×512 非制冷型短波红外相机模块,质量不到 200 g,功耗低于 3 W。中国科学院上海技术物理研究所突破了 InGaAs 材料外延生长和读出电路设计关键技术,研制出 640×512 探测器,其量子效率超过 70%,响应非均匀性小于 5%。整机研制方面,西安立鼎光电 LD-

SW6401715UC 型号的 $15\text{ }\mu\text{m}$ 像元的 640×512 面阵短波红外产品实现了低增益 390 e^{-} 、高增益 32 e^{-} 的读出噪声。北京博视智动研制出深度制冷的相机,进一步降低了噪声水平。虽然我国实现了一系列技术突破,但国内产品的相关参数和稳定性与国外产品仍存在较大差距。

为了提升应用灵活性、降低项目成本,打破对国外产品的依赖,本文研制了一种基于 FPGA 的短波红外成像系统,采用 FPA0640P15F-17-T1 系列 InGaAs 探测器,并设计了低噪声模拟电路和高读写速度的数字驱动电路,采用 TEC 制冷技术实现了低读出噪声条件下的高帧频成像功能,可用于科学级成像应用。

2 系统构成与工作原理

2.1 系统整体结构

短波红外成像系统由光学元件、探测器、模拟采集电路、数字驱动电路和 TEC 制冷系统 5 大部分构成,如图 1 所示。光学元件将被探测目标的光收集到探测器的焦平面上,而探测器由电源电路提供稳定、精准的驱动电压,且时序驱动信

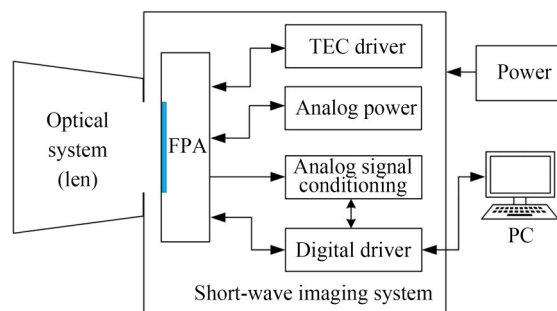


图 1 短波成像系统整体构成

Fig. 1 Overall composition of Short Wavelength Infrared (SWIR) system

号数字由驱动电路给出。探测器正常驱动后,可将光信号转换为电信号后产生模拟输出,信号经过后端模拟电路调制后转换为数字信号,再经过数字格式转换,最后通过上位机显示出数字图像。

2.2 工作原理

系统采用 6 MHz 主时钟驱动探测器,选用四通道模式输出模拟原始图像信号。电子学设计主要由模拟电路和数字电路两部分构成。其中,模拟电路分为电源电路和信号调理电路,系统整体数据流如图 2 所示。

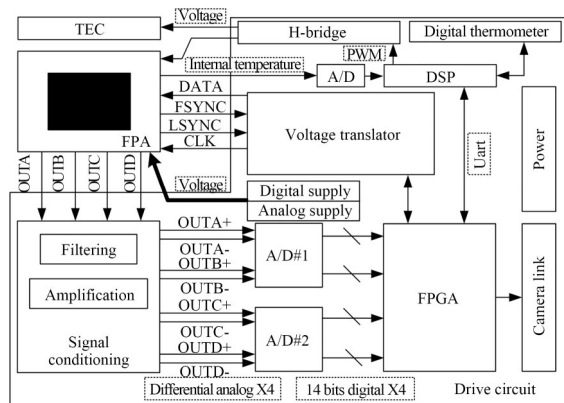


图2 短波成像系统数据流

Fig. 2 Data flow of short-wave imaging system

电源电路为驱动 FPA 提供多种低温漂、低噪声的数字和模拟直流偏置电压。FPA 输出的连续电压信号依次通过滤波、偏置调整、差分放大等处理,被调整为模拟数字转换器 (Analog-to-Digital Converter Chip, ADC) 可以转化的输入电压。数字电路可采集 ADC 输出的 14-bit 数字信号,利用 FPGA 强大的时序逻辑控制和并行处理能力,实时地将 4 路数字图像信号合成,最后通过并转串芯片换成标准 CameraLink 信号。探测器内部集成的温度传感器以电压的形式输出片内温度信息,数字信号处理器 (Digital Signal Processor, DSP) 采集经过 ADC 转换后的温度信息和 TEC 驱动电流作为温控闭环输入信号,通过比例-积分-微分控制 (Proportional-Integral-Derivative controller, PID) 输出 PWM 波。全桥整流电路将交流控制信号转为直流电压驱动信号,分

别输出给 FPA 内部集成和外部贴装的 TEC,实现闭环制冷控制,进一步降低探测器的暗电流噪声。

3 系统硬件电路设计

3.1 低噪声探测器驱动电源设计

电源主要分为系统总电源电路和低噪声偏置电压输出电路。整体设计采用“模拟地”和“数字地”分离的方法,将模拟电路部分的器件集中放在电路板的一个区域,将含有“数字地”部分集中放置在另一个区域,最后将二者在电路中的一个节点用磁珠相连,与电源输入部分共地。第一级数字电路的供电采用 LT1765,具备足够的输出电流以驱动 FPGA 等芯片的内核和 IO 电压转换芯片。使用带载能力强、效率高、占用空间小的 SPX3819M5-3.3 和 SPX3819M5-1.8 分别为数字电路提供 3.3 V 和 1.8 V 的电压。

第一级模拟电路供电系统采用单片降压开关稳压器 LT8608,其静态电流消耗仅为 $1.7 \mu\text{A}$,在 12 V 输入、5 V 输出时效率在 90% 以上,并可持续提供 1.5 A 的电流,纹波保持在 10 mV 以下。

第二级模拟电源采用线性稳压器 (Low Dropout Regulator, LDO) LT3045 供电,主要为信号调理电路中的模拟器件供电。LT3045 为超低噪声 LDO,电源抑制比 76 dB (@1 MHz),适合在对噪声敏感的电路中使用,具备可编程的电压输出范围和电流限制功能,在输出电流需求较大时可并联使用以扩大带载能力,如图 3 所示。

LT3045 在工作时会产生结温,需要使输入与输出之间的压差足够低。第一级为 DC-DC 电源,转换效率受压差影响较小,第二级 LDO 受压差影响较大,故设计第一级输出电压值等于第二级输入最小电压即可。经计算控制 LT8608 输出 5.6 V 电压,第二级由两片 LT3045 提供 5 V 电压,供给所有放大器和参考电源,另单独配置两片 LT3045 分别为两片 ADC 提供 3 V 电压。

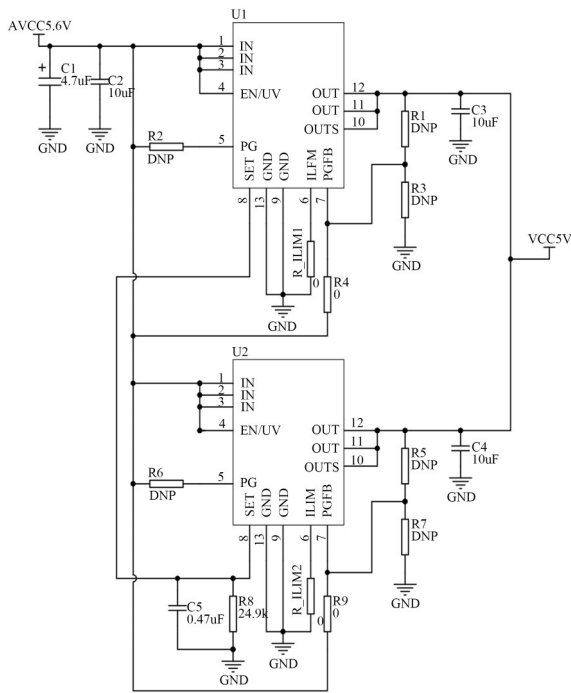


图3 双LT3045并联电路原理

Fig. 3 Schematic diagram of dual LT3045 parallel circuit

3.2 低噪声模拟驱动电路设计

探测器在内部集成了大量的光敏器件及逻辑门,受到封装尺寸限制,需要设计外部电压驱动电路。在设计电源时,需着重考虑光敏元件部分输入电压的精度和噪声,因为这些电压的质量会直接反馈在成像效果上。系统采用线性稳压器、基准电压源和放大器相结合的方式。基准电压源采用ADR44X系列芯片,产生的低噪声基准电压通过精密电阻分压和低噪声运算放大器ADA4805调整至理想电压,运放电平转换电路如图4所示。

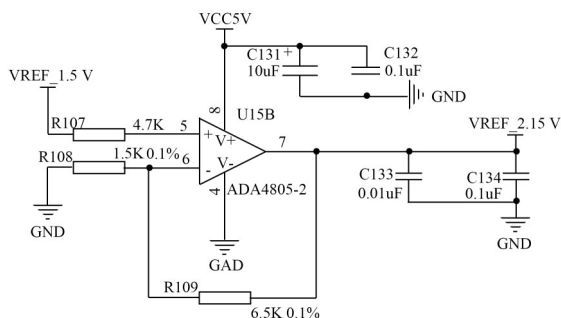


图4 运放电平转换电路

Fig. 4 Op-Amp level shifter circuit

由于红外探测器的实际效果受到电压的影响,每一个电压通道均采用轨至轨^[5]、低噪声的运放AD8616提供射级电压跟随并隔离,电路原理如图5所示。

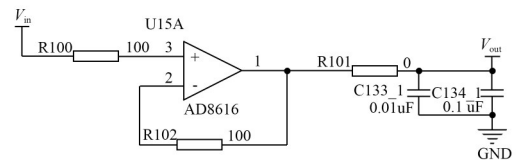


图5 电压跟随器原理

Fig. 5 Schematic diagram of voltage follower

3.3 高速模拟信号采集电路设计

探测器输出的信号最终要通过ADC转换成数字形式。为了提高输入信号的共模抑制比,ADC往往采用差分输入的方式,需要根据所选芯片的要求调整输入信号的幅度和偏置。

ADC选用LTC2298,该芯片具备14-bit分辨率、65 M采样率、双通道、3 V低电压电源驱动等功能。探测器输出的模拟信号为兆赫兹级别的单边信号,为了满足信号采样不失真的要求,采用ADA4805低输入失调电压、低噪声、高压摆率轨至轨运放提供一级跟随,AD8139作为差分放大器,将信号调整至满足ADC允许的输入范围,并在最后引入一级低通滤波。

如图6所示,以通道“OUTA”为例,FPA输出的模拟信号幅度是1~3.3 V, $V_{cm}=2.15$ V, $V_{pp}=2.3$ V。ADC的输入差分信号的要求是 $V_{cm}=1.5$ V, $V_{pp}=1$ V,需要信号先做一级跟随,再经过差分放大器。设计差分放大器正向输入端 IN^+ 为FPA输出的原始信号,反向输入端 IN^- 原始信号的偏置量为2.15 V,等同于消除偏置后,输入信号单边幅值为1.15 V。设置差放的 V_{ocm} 为AD要求的偏置1.5 V,则需要调整差放的增益为 $1\text{ V}/1.15\text{ V}=0.87$,才可使差分单端信号的 $V_{pp}=1$ V,保证动态范围最大,且满足ADC的输入信号要求。

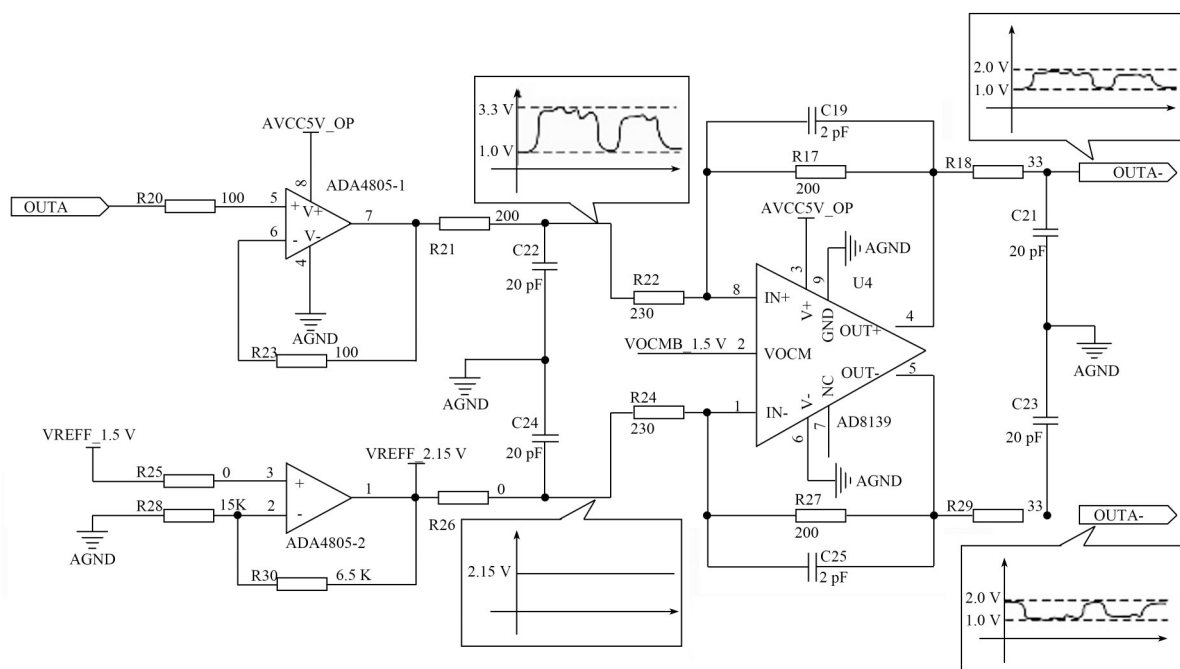


图 6 模拟信号调理电路原理

Fig. 6 Schematic diagram of analog signal conditioning circuit

4 FPGA 驱动时序设计

4.1 FPGA 功能模块设计

系统由 200 MHz 外部晶振提供主时钟, 经过 FPGA 内部锁相环 (Phase-Locked Loop, PLL) 生成 6, 12, 24 和 80 MHz 时钟, 分别用于系统时钟、ADC 时钟、控制时钟和图像时钟。FPGA 各功能模块的简化描述如图 7 所示。

PLL 模块产生时钟信号, FPA_command 模块将控制字发送至 FPA_control 模块, 输出探测器的寄存器配置数据 DATA、时钟信号 CLK、帧

同步信号 FSYNC 以及行同步信号 LSYNC。AD_control 模块的功能是按照 ADC 要求, 延后两个时钟周期进行数据采样。由于 FPA 上升、下降沿均输出数据, 即四通道的输出方式是将像素按照 4 列为半个时钟周期逐行交替输出。

探测器的读出方式分为先积分再读取 (Integrate Then Read, ITR) 和边积分边读取 (Integrate While Read, IWR) 两种方式。在要求高帧频输出时, 需要选用 IWR, 如图 8 所示。

“OUT”信号分为 A, B, C, D 四组, 即四路信

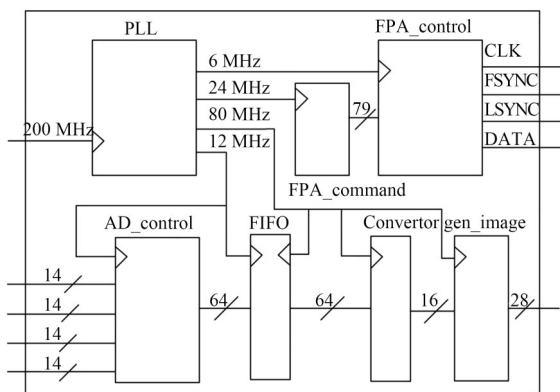


图 7 FPGA 设计描述

Fig. 7 FPGA design description

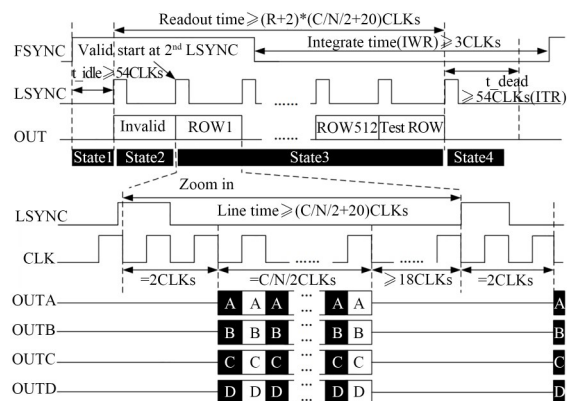


图 8 FPA 的 IWR 读出时序

Fig. 8 IWR readout timing of FPA

号均在一个时钟周期内输出,通过两个双通道的 ADC 同时采集四路 14-bit 转化值。FPA 是双边沿输出,所以设计 ADC 的采样频率是 FPA 工作频率的 2 倍,且为了数据匹配,将 14-bit 图像数据补齐成 16-bit,在模块中以 64-bit 的格式读出。数据经过 FIFO 后需要通过 Converter 模块将 64-bit 数据转为 16-bit 数据,依次输出给 Gen_image 模块生成最终的并行图像信号。使用 DS90CR287 芯片,将并行图像数据转化为 Cameralink 协议的高速 LVDS 串行数据流。

4.2 探测器驱动时序设计

探测器需要根据时序特性构建带有 IWR 和 ITR 两种模式可选的驱动时序,如图 5 所示。图中, C 为开窗列数取 640, R 为开窗行数取 512, N 为同时输出通道数取 4。

由于数据每一帧图像输出前后都存在精确的时钟延时,为了提升程序效率,实现对每一帧图像传输时间的精确控制,采用状态机加组合逻辑的方式输出驱动探测器的 FSYNC 与 LSYNC 信号,状态图如图 9 所示。将一帧图像分为 5 个状态,状态之间用计数器统计时钟周期以判断状态转移条件。系统通过在 state2 中切换 Read_Mode 调整读出模式为 IWR(1)或 ITR(0)。IWR 模式下,当 $\text{Intergrate_Time} < (20 + C/N) * (R + 2)$ 时计数至 $(54 + (20 + C/N) * (R + 2) + 144) - \text{Intergrate_Time}$, 否则计数至 $54 + 144$ 。ITR 模式下则固定计数至 $54 + 141 + (20 + C/N) * (R + 2)$ 。state3 与 state4 之间设计 512 行数据的子循环,用于读取一帧完整信号,实现状态机内部的时序自动跳转。

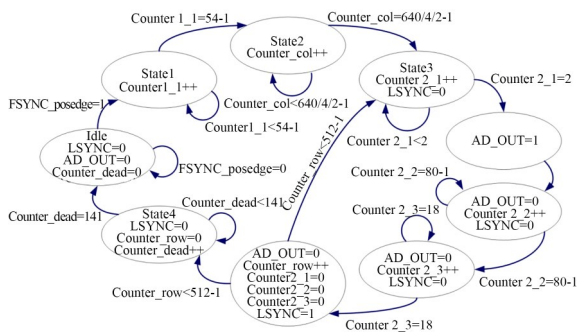


图 9 FPA 驱动时序状态

Fig. 9 Timing state of FPA driving

4.3 图像读取时序设计

在高速图像数据读取过程中,如果先将一帧图像全部缓存再读出,耗时较长,大量占用系统资源,降低系统工作效率^[6]。为了提升采集效率,设计了基于双 FIFO 的乒乓缓冲(Ping-Pong Buffer)系统,将图像分为奇偶序列,一个用于写入,另一个用于读取,反复交替并行工作,以实现数据的无冲突读写。

FIFO 的写入和读取位宽均为 16-bit,深度为 1024-bit。具备读、写计数器每次计数 640 行,位宽选用 10-bit,读写驱动时钟均为 80 MHz。系统分为两个模块:控制逻辑模块和双 FIFO 模块。

控制逻辑模块以一行的像素数 640 为计数值,交替激活 odd 和 even 两个控制信号,取帧同步信号的上升沿 FSYNC_pos 为一帧的使能信号,优先级最高,确保每一帧开始时模块都处于强制重置的状态。双 FIFO 模块的读写使能为 odd 和 even 信号,同时依赖外部的帧有效信号 fval 和行有效信号 lval。工作时序是当 odd=1 时,开始写入 FIFO_odd,随着数据的写入, FIFO_odd 的写计数器 wr_count_odd 递增,当增加到 640 时即一行数据读完毕,切换 even=1,改

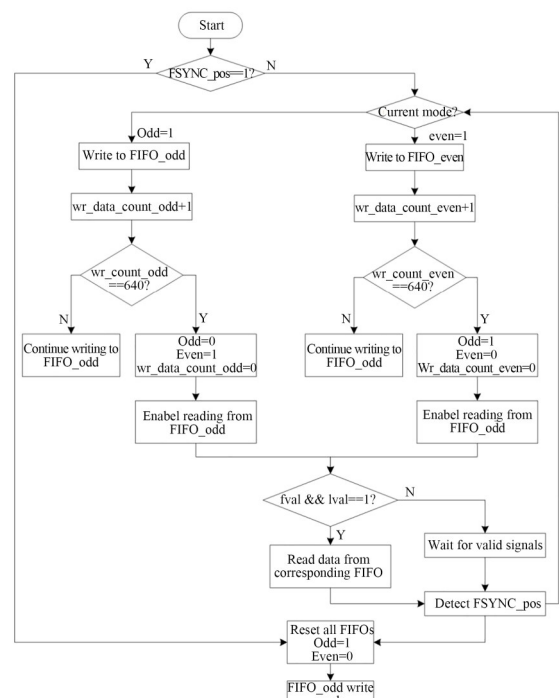


图 10 双缓冲控制时序流程

Fig. 10 Timing flowchart of dual-buffer control

为写入 FIFO_even。在写入 FIFO_even 期间 FIFO_odd 的数据被同步读取。当 FIFO_even 写满后再返回 odd=1 状态,形成乒乓效果。

交替输出的信号传到图 7 中的 Gen_image 模块,当两个 16-bitFIFO 的计数器分别计满 640 时,通过 Cameralink 的行有效信号 lval 控制一行数字信号的输出,进而通过帧有效信号 fval 和数据有效信号 dval 控制一帧信号的输出。以一帧图像开始输出为例,FSYNC 信号置 1,数据的输出流程如图 10 所示。

4.4 闭环制冷系统设计

影响 InGaAs 探测器成像效果最主要的因素是芯片本身的暗电流和驱动系统的读出噪声。控制暗电流最有效的方法就是对 FPA 实现制冷,引入 TEC 技术是最简单高效的方案,适合在空间狭小、集成度高、制冷温差要求低的工况^[7]。

FPA 通常内部集成一级 TEC,但是单靠内部制冷无法达到足够低的温度以获得更低的暗电流噪声^[8]。故本设计采用在 FPA 外部贴装第二级 TEC 的方案,外加散热片和大风量直流风扇将第一级的热量快速导出,实现了常温下最大 40℃温差的制冷效果。

制冷控制部分选用 DSP 作为主控制器,通过 24 位 ADC 采集 FPA 输出的温度电压信号和 TEC 工作时的电流信号,DSP 芯片通过 PID 运算产生 PWM 驱动控制信号,通过 H 桥将交流信号转换为直流的 TEC 电压驱动信号形成全自动闭环控制^[9]。通过串口与 FPGA 通信,可以采用上位机选择自动和手动工作模式切换,制冷温度设置等功能。

由于 TEC 在制冷过程中热面会聚集大量的热,如果依然保持大温差工况,当热量堆积超过系统最大散热能力时,TEC 的热面会带动冷面升温进而形成正反馈,影响系统正常工作。故系统采用双环 PID 算法^[10],具体的策略是 FPA 外部增设一个数字温度计(Digital Thermometer),用于采集环境温度,同时设计 TEC 电流监视电路,采用温度环和电流环作为控制核心,增加限幅和保护机制,保证系统自动稳定长时间工作。为了便于分解控制步骤,将系统分为模式层、判断层、控制层和调整层,详细工作流程如图 11 所示。

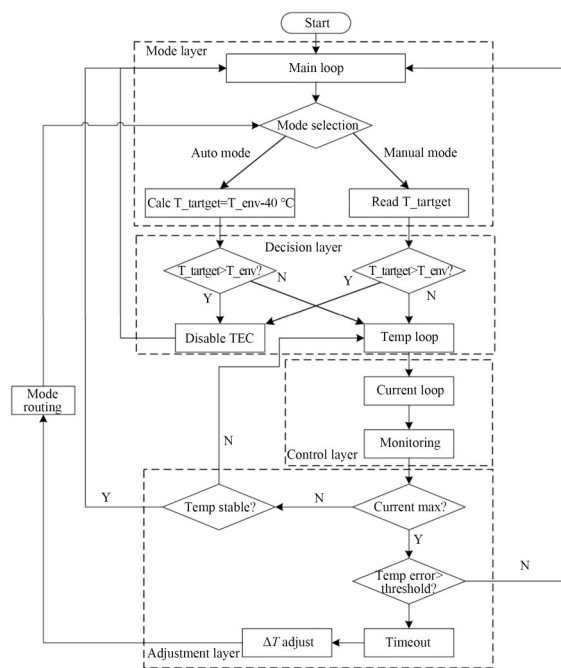


图 11 双环 PID 温控流程

Fig. 11 Temperature control flowchart of dual-loop PID

手动模式中经过用户设置,系统闭环至预设目标温度。自动模式是系统采集 FPA 外部环境温度 T_{env} ,以 T_{env} 为 -40°C 作为闭环目标温度起点,温度环作为内环,测量得到的 TEC 工作电流环为外环,开始工作。自动和手动工作模式下如果 TEC 电流一直上涨且长时间温度环无法闭环,则增加目标温度,适当缩小温差,直到电流闭环到稳定时的最大输出,温度闭环至目标温度为止。若 TEC 系统没有达到最大工作电流,则适当降低目标温度,直到电流环闭环到额定功率以内的最大输出,温度闭环至目标温度为止;若系统的目标温度高于环境温度,则制冷系统不工作。

5 实验与结果分析

5.1 系统基本功能验证实验

为样机设计 PCB 板和结构组件,PCB 组合后的结构如图 12(a)~12(c)所示,将电路板装入相机的外壳结构,最终搭建系统实验样机如图 12(d)所示。

给样机安装镜头,用白炽灯丝作为输入,照亮靶面第一行的中间区域,调整灯丝亮度至饱和状态,对系统在成像状态下的驱动时序在线仿

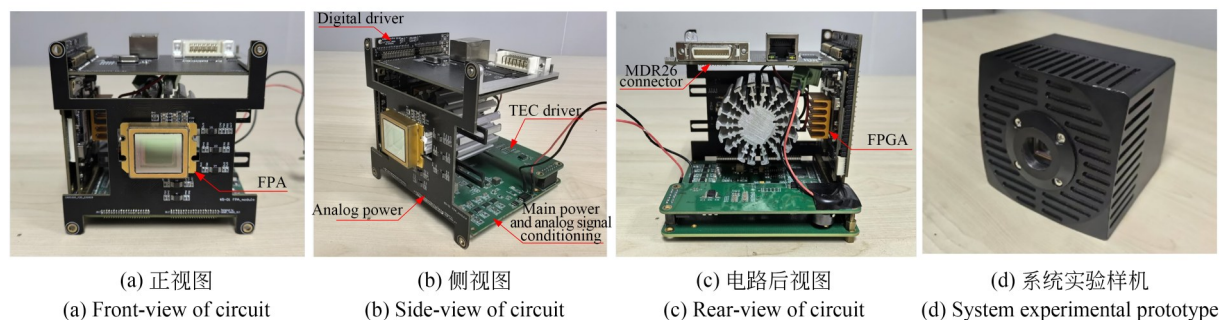


图 12 短波成像系统电路板与原理样机

Fig. 12 Short-wave imaging system PCB and principle prototype

真。仿真工具使用 Vivado 自带的 IP 核 ILA^[11], 添加帧同步信号 FSYNC、行同步 LSYNC、计数器 Line_counter 和 ADC 输出的图像信号。将积分时间设为最小, IWR 模式下, 50 MHz 仿真采样波形如图 13 所示。图中显示系统在 FSYNC 信号到来后, 出现一个 LSYNC, 行计数器 Line_counter 开始自增, 此后 LSYNC 依次出现, 图像开始输出, 与图 8 所述理论时序状态相同。以后的每个 LSYNC 上升沿到来后, 4 个 ADC 通道均有输出。由于一帧信号的总时间远超过仿真最大采样周期, 故只截取帧头和帧尾衔接时刻波形, 通过多次抓取波形计算 2 个 FSYNC 信号间隔 430 687 个采样时钟周期 (861.374 ms), 故系统理论最快可以实现每秒 116.094 帧的全画幅图像输出。将 ADC 仿真数据用实际模拟量化值格式显示, 实际光强分布近似为高斯分布特性, 证明系统对物体进行了有效成像。对样机进行实际功耗测试, 在非制冷状态下总功耗为 4.96 W。在室温 26.3 °C, 制冷目标温度稳定在 -10 °C 的工况下总功耗为 18.76 W。

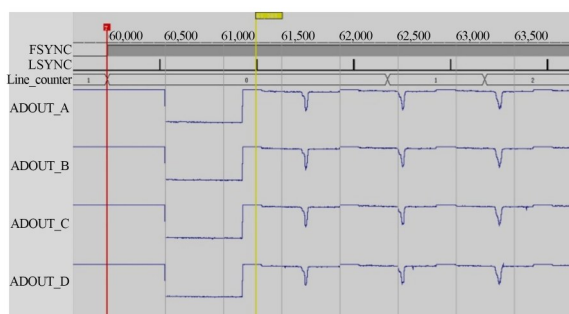


图 13 FPGA 驱动程序仿真时序

Fig. 13 Timing sequence for FPGA driver simulation

5.2 系统成像测试实验

5.2.1 样机响应特性测试

在实验室中搭建测试装置, 采用积分球、光谱仪等仪器, 对系统整体性能进行测试。相机 TEC 闭环制冷系统打开, 所有测试均在探测器靶面温度 -10 °C 的条件下进行^[12], 测试装置如图 14 所示。

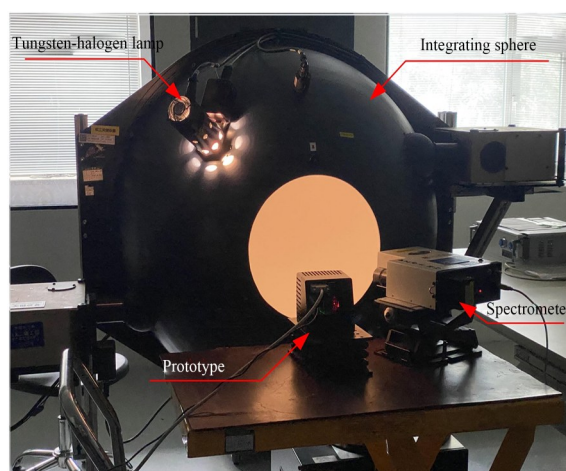


图 14 系统样机测试装置

Fig. 14 System prototype test equipment

盖住镜头盖, 遮挡靶面, 将积分时间调整至 3 μ s, 低增益模式, 暗场下测量全靶面输出结果。分析系统暗场环境下的热噪声分布, 如图 15 所示。打开镜头盖, 将积分时间调整至 100 μ s, 打开光源灯, 亮度调整为 50 Lux, 使系统处于有光输入的状态, 测量系统在亮场环境下的光响应均匀性, 如图 16 所示。从平场和暗场响应分布可以看出, 样机整体响应的均匀性较好。

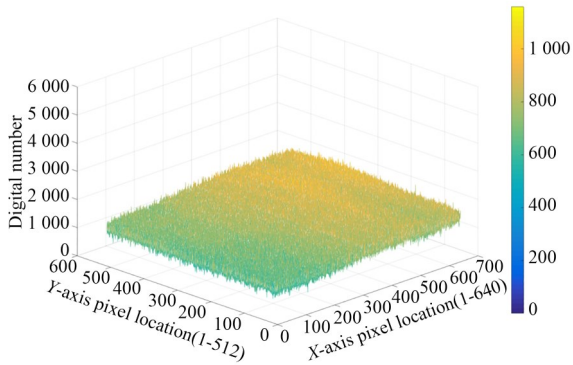


图 15 系统暗场下热噪声分布

Fig. 15 Distribution of thermal noise in dark field of system

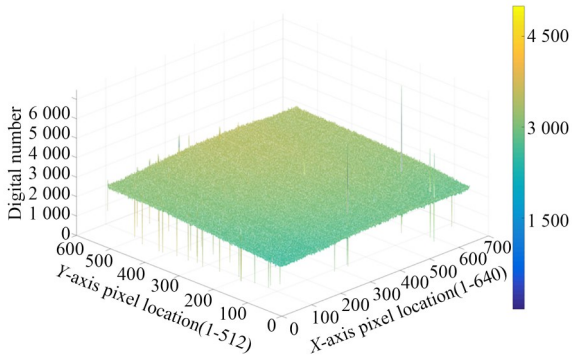


图 16 系统亮场响应均匀性分布

Fig. 16 Distribution of light response uniformity in bright-field of system

对两幅图像计算暗场和亮场的响应非均匀性 (Response Non-Uniformity, RNU), 计算公式如下:

$$R_{NU} = \frac{\sigma_{\text{response}}}{\mu_{\text{response}}} \times 100\%, \quad (1)$$

其中: σ_{response} 是所有有效像元响应值的标准差, μ_{response} 是所有有效像元响应值的平均值, 单位是 DN (Digital Number)。图中毛刺是 FPA 的坏像元, 计算整体响应非均匀性时需要去掉坏像元的影响。具体方法是对整张图像中值滤波, 获取背景, 计算每个像素与中值的绝对偏差, 再计算中值绝对偏差 (Median Absolute Deviation, MAD) 作为噪声基准。本次实验选取 5 倍 MAD 作为基准, 遍历每个像素, 若大于 $5 \times \text{MAD}$ 则视为坏像元, 不参与 R_{NU} 计算。经计算, 有效像元占比 99.57%, R_{NU} 测试结果如表 1 所示。

表 1 响应均匀性数据与计算结果

Tab. 1 Response uniformity data and calculation results

Items situation	$\sigma_{\text{response}}/\text{DN}$	$\mu_{\text{response}}/\text{DN}$	RNU/%
Dark field	83.91	669.14	12.54
Light field	212.86	3097.51	6.87

5.2.2 样机响应线性度测试

将样机靶面直接对准积分球光源孔, 保持积分时间 $20 \mu\text{s}$ 不变, 调整积分球输入光源强度由暗场到探测器饱和共 40 个点, 每个采样点采集 100 张图片存储。将输入光谱仪 $900 \sim 1700 \text{ nm}$ 的数据使用梯形积分法得到每个光照强度下对应波段的累计辐射亮度^[13], 将样机输出的每个采样点 100 组数据灰度值做平均, 得到系统响应曲线, 如图 17 所示。图中曲线在接近饱和的区间内线性度良好。

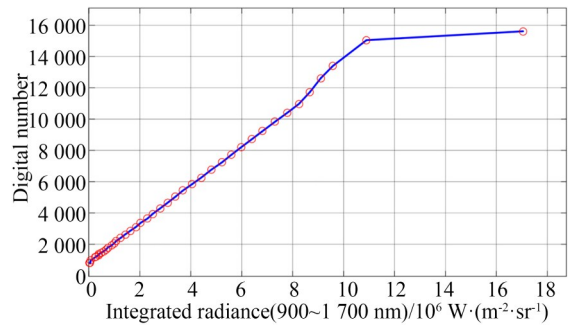


图 17 系统样机响应曲线

Fig. 17 Response curve of system prototype

5.2.3 噪声测试

遮挡靶面, 测试暗场环境中样机在低增益 (Low Gain, LG)、中增益 (Medium Gain, MG)、高增益 (High Gain, HG) 等不同模式下的读出噪声。设置积分时间为 0.05 ms , 输出帧频为 100 Hz , 连续采集 100 帧图像, 计算每帧图像每个像元响应的时域标准差, 再将所有标准差取平均值, 得到最终读出噪声结果 DN 值。最后, 乘满阱容量 (Full well capacity, FWC) 除以 14-bit 分辨率量化值, 换算成电子数形式, 公式如下:

$$N_{\text{read}}(e^-) = \frac{\sigma_{\text{DN}}}{2^{14}} \cdot \text{FWC}. \quad (2)$$

以同样的实验条件测量 C-RED2 系列相机, 由于该相机在室温条件下只能维持在 0°C 稳定工作, 故所有该相机测试结果均在该条件下产生。

二者测试原始数据和噪声计算结果如表 2 所示。样机除了在中增益读出噪声稍高,在中高增益下的读出噪声值均优于国外相机。

遮挡靶面,选取响应线性度较好的积分时间 0.1~0.6 s,以 0.1 s 为累加值分别测量 6 组,每组 100 张暗场图像。对每组图像上的所有像素灰度值取均值,测量结果如表 3 所示。

以同样的条件继续进行暗电流噪声测试。

表 2 读出噪声测试结果
Tab. 2 Results of readout noise

Gain select items	FWC (Me ⁻)		Read noise(DN)		Read noise(e ⁻)	
	Prototype (@-10 ℃)	C-RED2 (@0 ℃)	Prototype (@-10 ℃)	C-RED2 (@0 ℃)	Prototype (@-10 ℃)	C-RED2 (@0 ℃)
LG	1.440	1.40	4.151 4	3.611 9	364.87	308.63
MG	0.096	0.12	6.939 3	6.205 0	40.66	45.45
HG	0.019	0.03	13.564 2	11.829 2	15.73	21.66

表 3 暗电流测试数据与计算结果
Tab. 3 Dark current test data and calculation results

Gain select integrate times/ms	Prototype(@-10 ℃)			C-RED2(@0 ℃)	TE3(@-10 ℃)
	LG	MG	HG	LG	LG
0.003	669	881	2 704	1 335	2 474
100	679	1 180	2 868	1 246	2 489
200	687	1 237	2 960	1 269	2 508
300	696	1 300	3 038	1 291	2 528
400	700	1 356	3 119	1 313	2 548
500	710	1 394	3 200	1 334	2 568
600	716	1 450	3 283	1 356	2 590
$\sigma_{\text{dark}}/(e^{-}\cdot s^{-1}\cdot \text{pixel}^{-1})$	7 379	3 597	1 271	20 623	22 036

将上述每组增益下相邻时间增加的灰度值取平均后得到 $\Delta\mu$ (DN),再除以时间变化量 ΔT (0.1 s)得出单位时间新增暗信号电子响应灰度变化量 Adu ,计算公式如下:

$$Adu=\frac{\Delta\mu}{\Delta T}.$$

(3)

再计算实际灰度和电子数的转化关系,即转换增益 K 值,单位是 e^{-}/DN ,计算公式如下:

$$K=\frac{FWC}{\mu_{\max}-\mu_{\min}},$$

(4)

其中: $\mu_{\max}$ 和 $\mu_{\min}$ 分别是采样图像的最大和最小灰度值。参考 5.2.2 节中线性度测试结果,在线性区间内选取本系统最大和最小灰度值,分别为 15 108 和 669。最终计算得到暗电流噪声电子数,单位是电子/秒/像素($e^{-}/s\cdot \text{pixel}^{-1}$),计算公

式如下:

$$\sigma_{\text{dark}}=Adu\cdot K.$$

(5)

用同样的测试和计算方法测量了两台 640×512 制冷型相机低增益工作模式下的对应参数,两台相机均工作在各自稳定的制冷温度下。暗电流噪声计算结果如表 3 最后一行数据所示,对比结果可见,样机相较于两款产品可以实现更低的暗电流噪声。

5.2.4 环境成像测试

将样机放在实际应用场景进行成像测试,分别测量室内白炽灯灯丝和室外阳光充足下的场景,成像效果如图 18 所示。系统在低积分时间工作时背景纯净,信噪比足够高,可有效分辨成像物体形状。在长积分时间能清晰分辨对日光有较强反射能力的树叶和远处反射均匀的建筑物,

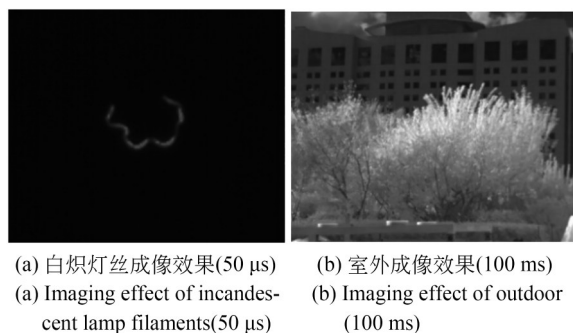


图18 系统样机成像效果

Fig. 18 Imaging effect of system prototype

成像效果优良。

6 结 论

本文根据地基大口径成像望远镜对短波成像系统轻量化、低噪声、高帧频输出和高一致性的需求,从系统整体架构介绍了样机工作原理,

设计了低噪声硬件电路、数字驱动程序、制冷控制策略,完成了试验样机集成。最后,通过系统测试获得了参数指标。实验结果表明:样机系统能够实现最高每秒116帧的全画幅图像输出,同时在低、中、高增益下噪声水平分别为364.87 e⁻, 40.66 e⁻, 15.73 e⁻,平面度、非均匀性、线性响应度和成像效果均能满足科学级探测的需求。

作者贡献说明:

任同阳:论文构思与撰写,软件设计,方法论;

贾建禄:软件设计,论文构思,获取资助,研究指导;

于勇:软件设计与调查研究;

刘塔拉:软件设计,方法论;

郭鹏飞:方法论,研究指导;

李学良、马爽:调查研究与实验数据分析;

陈姝岐:实验数据分析。

参考文献:

- [1] MACDOUGAL M, HOOD A, GESKE J, *et al.* InGaAs focal plane arrays for low-light-level SWIR imaging[C]. *Infrared Technology and Applications XXXVII. Orlando, Florida, USA*. SPIE, 2011: 801221.
- [2] BATTAGLIA J, BLESSINGER M A, ENRIQUEZ M D, *et al.* An uncooled 1 280×1 024 InGaAs focal plane array for small platform, short-wave infrared imaging[C]. *Defense + Commercial Sensing*, 2009.
- [3] 李雪, 邵秀梅, 李淘, 等. 短波红外 InGaAs 焦平面探测器研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(1): 64-71.
LI X, SHAO X M, LI T, *et al.* Developments of short-wave infrared InGaAs focal plane detectors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(1): 64-71. (in Chinese)
- [4] 刘军华, 高新江, 周勋. 短波红外 InGaAs 焦平面探测器的技术进展[J]. *半导体光电*, 2015, 36(5): 683-688.
LIU J H, GAO X J, ZHOU X. Developments and perspectives of SWIR InGaAs focal plane arrays [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2015, 36(5): 683-688. (in Chinese)
- [5] 程永鹏. 轨至轨精密运算放大器的分析与设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2023.
CHENG Y P. *Analysis and Design of Rail-to-rail Precision Operational Amplifier*[D]. Xi'an: Xidian University, 2023. (in Chinese)
- [6] 冯扬. 基于FPGA的乒乓线性归并排序算法的研究与实现[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
FENG Y. *Research and Implementation of Ping-pong Linear Merge Sorting Algorithm Based on FPGA* [D]. Changchun: Jilin University, 2021. (in Chinese)
- [7] 马晖, 廉雨倩, 徐娜娜, 等. 基于长短期记忆网络模型的短期电离层 TEC 预测[J]. *光学与光电技术*, 2025, 23(1): 61-66.
MA H, LIAN Y Q, XU N N, *et al.* Short-term ionospheric TEC prediction based on long short term memory network model[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2025, 23(1): 61-66. (in Chinese)
- [8] 李玟汉, 张恒, 刘昌华, 等. 高海拔地区科研望远镜 sCMOS 制冷型成像系统设计[J]. *红外技术*, 2025, 47(1): 19-28.
LI W H, ZHANG H, LIU C H, *et al.* Design of sCMOS refrigerated imaging system for high-altitude research telescopes [J]. *Infrared Technology*, 2025, 47(1): 19-28. (in Chinese)

- [9] XU G H, HE W, SHEN R J. Design of temperature testing system in multi-parameter combined environmental test[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 157/158: 127-131.
- [10] 张越. 基于热电偶温度传感器数据采集的工业锅炉模糊PID温度控制[J]. *工业仪表与自动化装置*, 2025(1): 111-115, 119.
ZHANG Y. Fuzzy PID temperature control of industrial boiler based on thermocouple temperature sensor data acquisition[J]. *Industrial Instrumentation & Automation*, 2025(1): 111-115, 119. (in Chinese)
- [11] STROUD C, LEE E, KONALA S, *et al.* Using ILA testing for BIST in FPGAs[C]. *Proceedings International Test Conference* 1996. *Test and Design Validity*. October 20-25, 1996, Washington, DC, USA. IEEE, 1996: 68-75.
- [12] DARMONT A, BODEGOM E, NGUYEN V. Using the EMVA1288 standard to select an image sensor or camera[C]. *IS&T/SPIE Electronic Imaging*, 2010: 753609.
- [13] 张芳, 高教波, 王军, 等. 积分球光谱辐射度建模与实验分析[J]. *应用光学*, 2010, 31(5): 709-713.
ZHANG F, GAO J B, WANG J, *et al.* Model and analysis of spectral irradiance of integration sphere[J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(5): 709-713. (in Chinese)

作者简介:



任同阳(1993—),男,吉林长春人,硕士,助理研究员,2016年、2019年于吉林大学分别获得学士和硕士学位,主要从事地基大口径地基望远镜相关电子学设计、软件设计等研究。E-mail: 864753404@qq.com

通讯作者:



贾建禄(1982—),男,内蒙古赤峰人,博士,研究员,2008年于天津大学获得硕士学位,2012年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事地基大口径地基望远镜电子学研究及总体技术的研究。E-mail: jianluciomp@163.com