

文章编号 1004-924X(2025)21-3373-10

地基大型光学望远镜大靶面相机成像电路设计

刘塔拉, 任同阳, 于 勇, 贾建禄*, 王之一, 王建立, 刘昌华, 马俊林
(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:针对地基大型光学望远镜大视场探测的需求,定制了一款1 680万分辨率背照式可拼接sCMOS图像传感器,并设计了相机成像电路。对该电路设计中的硬件设计、功能模块设计、数据流设计、高动态合成、曝光时刻信息记录和同步运行设计等方面进行了研究。成像电路选择FPGA芯片作为核心处理器,采用模块化、高集成度设计。数据缓存采用4片并行DDR芯片,最高数据读写速率为102.4 Gb/s。通过GTX高速收发器设计了5 Gb/s通信速率的自定义光通信接口,实现相机控制和图像传输功能。FPGA内部数据流采用AXI-Full总线协议,实现了高性能、高带宽和灵活互联架构。在FPGA片内设计了高动态图像合成功能,实时生成高位深合成图像。通过接收时间和姿态信息并细分,实现了图像曝光时刻信息记录,其时间分辨率为1 μ s。经过测试,该系统实现了1 680万分辨率全画幅4 frame/s的成像。通过图像高动态合成,动态范围提升为95.52 dB,满足探测器系统的应用要求。

关键词:大靶面相机;高动态合成;曝光时刻信息;光通信

中图分类号:TP212.9 **文献标识码:**A

doi:10.37188/OPE.20253321.3373 **CSTR:**32169.14.OPE.20253321.3373

Design of imaging circuit for large-format camera of ground-based large optical telescope

LIU Tala, REN Tongyang, YU Yong, JIA Jianlu*, WANG Zhiyi, WANG Jianli,
LIU Changhua, MA Junlin

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China)

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

Abstract: To meet the wide-field detection requirements of ground-based large optical telescopes, a 16.8-megapixel stitchable back-illuminated (BSI) sCMOS sensor and its dedicated camera imaging circuitry were custom-developed. This article presents the hardware architecture, functional modules, data-flow design, high-dynamic-range (HDR) synthesis, exposure-event recording, and synchronous operation strategies implemented in the circuit system. An FPGA serves as the central processor, enabling a modular and highly integrated architecture. Data caching is realized with four parallel DDR devices, achieving a maximum read/write throughput of 102.4 Gb/s. A custom optical communication interface based on GTX transceivers provides 5 Gb/s links for camera control and image transmission. Internal FPGA data transfers employ the AXI-Full bus protocol to ensure high performance, substantial bandwidth, and flexible in-

收稿日期:2025-04-25;修订日期:2025-05-29.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 12122304, No. 12303085, No. 12473083);中国科学院青促会优秀会员资助项目(No. Y2023060)

terconnectivity. On-chip HDR composition produces high bit-depth composite images in real time. By ingesting and processing time and attitude information, exposure timing is recorded with 1 μs resolution. The system supports 16.8-megapixel imaging at 4 frame/s and, through HDR compositing, attains a dynamic range of 95.52 dB, satisfying the detector system's application requirements.

Key words: large-format camera; high-dynamic-range synthesis; exposure event record; optical communication

1 引 言

地基大型光学望远镜在空间态势感知和空间目标探测方面发挥着不可或缺的作用^[1-4]。一方面,大口径设计显著提高了光学分辨率和灵敏度;另一方面,通过拼接探测器还可以获得广阔的视场覆盖能力,使望远镜能够高效地监测和观测更大范围的天空区域^[5]。

国际上,多个国家和研究机构纷纷投入大量资源建设和运营先进的大口径大视场望远镜。薇拉·鲁宾天文台(Vera C. Rubin Observatory)的大型综合巡天望远镜(Large Synoptic Survey Telescope, LSST)采用三反射式光学系统和 8.4 米级主镜,可实现约 9.6 平方度的超大视场成像。在望远镜系统中,3.2 亿像素高分辨率 CCD 相机是核心成像设备之一,该相机依赖于拼接探测器来实现超大面积成像。相机焦平面由 21 个“Raft”模块紧密拼接而成,每个 Raft 包含 9 块科学 CCD,合计 189 块 4K $\times$ 4K 分辨率 CCD,提供了 32 亿像素的探测规模,外围还布设了 8 个导向传感器和 4 个波前传感器^[6]。如此庞大的 CCD 阵列需要复杂的驱动、高带宽数据采集和传输设计,以保证在短时间内完成观测并快速输出图像数据。

国内在大口径大视场望远镜的建设与研究方面也取得了显著进展。中国科学技术大学-紫金山天文台的 2.5 米大视场巡天望远镜(The Wide Field Survey Telescope, WFST),也称为“墨子”巡天望远镜,采用国际先进的主焦光学设计,提供大视场、高精度和宽波段巡天能力^[7-8]。大靶面主焦相机是“墨子”巡天望远镜开展大视场、高精度、高频次时域观测的关键设备。该相机总像素数达 7.65 亿,3 度视场内像素填充率达

0.89。焦面布局采用 3 种 CCD 拼接而成,其中科学成像区采用 9 个背照式全帧型科学级 9K $\times$ 9K 分辨率 CCD,以拼缝 0.5 mm 进行 3 $\times$ 3 拼接构成,拼接平整度要求达到峰谷值 20 μm ^[9]。在科学成像区的四周分别安装 4 个背照式全帧型 4K $\times$ 4K 分辨率 CCD,用于指导主动光学调节。同时还集成了 4 个 1K $\times$ 1K 分辨率背照式帧转移型 CCD 导星传感器。

在图像传感器方面,科学级互补金属氧化物半导体(Scientific Complementary Metal Oxide Semiconductor, sCMOS)图像传感器已开始应用在空间目标探测领域。sCMOS 图像传感器是一种高性能图像传感器,它在保持较高速度的同时,显著降低了读出噪声,并具备更广的动态范围和更优异的量子效率^[10-11]。近些年,我国 sCMOS 图像传感器不断发展,其中长光辰芯研发的 GSENSE 系列背照式图像传感器已达到国际先进水平。

当 sCMOS 图像传感器同步输出高低增益图像时,可以通过高动态范围(High Dynamic Range, HDR)合成技术,融合高低增益图像,实现动态范围扩展,使得在同一幅图像中既能呈现极亮区域的细节,又不失暗部的微弱信号^[12-16]。这种技术在空间目标观测领域中具有显著优势。在地基望远镜项目中常用的相机中,英国 AN-DOR 公司的 Marana 4.2B-11 相机动态范围达 94.49 dB,日本 HAMAMATSU 公司的 C13440-20CU 型号相机动态范围达 91.36 dB,德国 PCO 公司的 PCO. edge 4.2 型号相机动态范围达 91.48 dB。在国内,鑫图光电的 Dhyana 4040BSI 型号相机动态范围达 90 dB。王伶杰设计的高动态相机动态范围为 91.6 dB^[17]。本文在此基础上,以地基大型巡天望远镜大靶面拼接探测器为

应用背景,设计了大靶面相机可拼接成像电路,实现了图像采集、曝光时刻信息记录、高动态合成和同步运行等功能。

2 硬件设计

为实现大视场探测,定制了一款背照式可拼接 sCMOS 图像传感器,该芯片采用特殊封装设计,最大限度地减少边框尺寸,非常适用于拼接探测器。该芯片拥有 1 680 万分辨率,峰值量子效率为 92%,最小读取噪声为 $1.2e^-$ 。该芯片使用 10 对 LVDS (Low-Voltage Differential Signaling) 传输数据,每对工作速度为 420 Mb/s,支持 12 位双增益成像模式和 14 位单增益成像模式,最高支持 4 frame/s。因高灵敏度和低噪声等特点,该图像传感器非常适用于暗弱目标探测。

大靶面相机成像电路设计如图 1 所示。其中,sCMOS 图像传感器驱动部分包括图像传感器三批次共 19 通道驱动电源、配置工作模式和参数的 SPI 接口、图像传感器时钟源 420 MHz LVDS 信号 CLK_IN、配置行选择的 13 通道 DECODER 信号、时序控制信号 26 通道 TIMING 信号、用于传输图像数据的 10 通道 LVDS_OUT 和数据同步时钟 CLK_OUT。同时还配置了温度、电压监测电路,对 sCMOS 图像传感器进行实时监测。

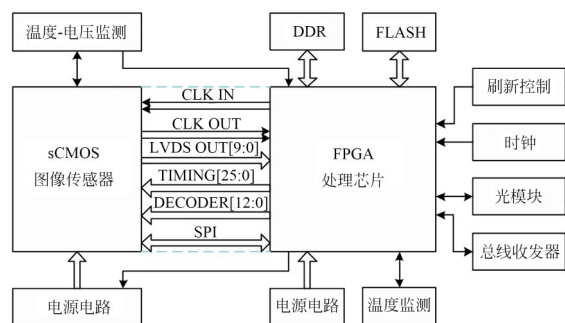


图 1 成像电路设计

Fig. 1 Imaging circuit design

处理电路部分采用 Kintex7 系列 FPGA XC7K325T-2FFG900 作为核心处理芯片,该芯片集成了 326 080 逻辑单元、16 020 kb 存储容限

块 RAM、840 单元 DSP48 模块以及 16 个 12.5 Gb/s 高速收发器。FPGA 并行连接了 4 片 256 M×16 规格的 DDR 芯片,数据读写速率为 102.4 Gb/s,存储空间为 16 Gb。配置了 4 片 QSPI FLASH 存储参数,总存储空间为 2 Gb。对外接口采用光通信和 RS422 串行数据总线,其中,图像信息采用光通信接口发送,相机配置和状态可通过光通信接口和 RS422 串行总线同时通信。

3 功能模块设计

成像电路功能模块通过 FPGA 内部程序设计来实现,通过模块化设计对各功能进行了封装,总体架构如图 2 所示。sCMOS 图像传感器驱动部分包括时钟产生模块、DECODER 控制模块、TIMING 控制模块和 LVDS 接收模块,通过配置可以自动化运行。

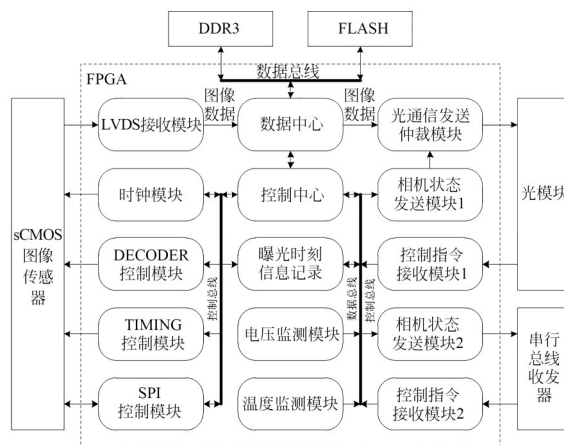


图 2 成像电路功能模块设计

Fig. 2 Design of function module of imaging circuit

数据管理部分由数据中心模块、外置 DDR 芯片和外置 QSPI FLASH 芯片组成。由于 sCMOS 图像传感器分辨率高,图像数据和参数的数据量庞大,数据中心模块根据数据类型分类存储到外置存储器中。对外数据通信接口包括串行数据总线收发模块和光通信总线收发模块,成像电路支持 2 个独立的控制接口,1 路通过光通信接口,另 1 路通过串行数据总线,分别对应成像

电路单独控制和同步控制。状态监测部分实时采集电路板电压和温度,输出到控制中心闭环控制。控制中心是成像电路中最顶层的控制模块,需要根据上位机配置和状态监测信息,控制其他功能模块的使能和时序。

3.1 图像数据流

sCMOS 图像传感器发送的时钟信号和数据信号采用了 LVDS 接口,是一种高速低电压差分信号。本设计采用 420 Mb/s 高速数据传输速率,并且传输线距离较长,对电路板信号完整性保障提出了考验。在成像电路中,设计了全信号链路阻抗匹配,等长布局等方式保证了 FPGA 接收端的信号质量。FPGA 接收到 LVDS 信号后通过 ISERDES 模块实现数据转换,转换为低速率高位宽信号。根据接收数据,闭环控制前端 IDELAY 模块延迟设置,实现多通道数据对齐。LVDS 信号实际测试数据如表 1 所示,接收端信号抖动均小于 509 ps,保证了接收数据的稳定性。

表 1 LVDS 信号接收测试结果

Tab. 1 Test result of LVDS signal reception

通道	信号稳定 时间/ps	信号抖动 时间/ps	信号稳定 比率/%
1	1 872	509	78.62
2	2 028	353	85.17
3	2 028	353	85.17
4	1 872	509	78.62
5	1 872	509	78.62
6	2 028	353	85.17
7	1 872	509	78.62
8	1 950	431	81.90
9	1 950	431	81.90

sCMOS 图像传感器 1 帧图像大小约为 386 Mb,远超 FPGA 内部存储资源。在成像电路板中采用 4 片外部 DDR3 芯片作为数据存储,数据读写速率为 102.4 Gb/s。读写数据均采用 AXI-Full 总线协议,该协议是高性能、高带

宽、低延迟的片内总线协议,适用于高性能的存储器映射需求。数据传输路线如图 3 所示,数据中枢是定制设计的 AXI 总线交互中心。通过主端接口 M00_AXI 连接到 MIG 核和 DDR 芯片。校正参数数据和图像数据通过双 FIFO 乒乓缓存方式,分别通过从端接口 S00_AXI 和 S01_AXI 接口存入 DDR 芯片中。图像处理 and 发送模块分别通过从端接口 S02_AXI 和 S03_AXI 接口读取参数和图像数据,经过双 FIFO 乒乓缓存后经过计算最终发送给图像处理服务器。

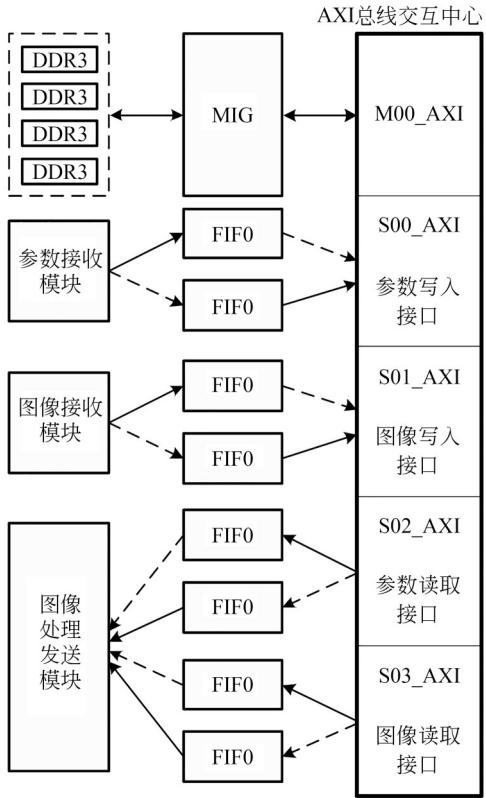


图 3 数据缓存和读取

Fig. 3 Data caching and reading

图像处理发送模块输出的数据进入光通信接口编码发送。光通信接口通过 FPGA 集成的 GTX 高速收发器实现,该接口通过集成并串转换、时钟恢复、数据编解码与接收均衡等功能,可以实现从每秒数百 Mb 到 12.5 Gb 的高速串行数据传输。

在数据收发接口端,采用自定义通信协议,满足数据高速传输、断点续传、数据校验和数据格式灵活切换等图像数据传输需求。

光通信接口采用 5 Gb/s 通信速率,通过 8b/10b 编码确保直流平衡和可靠的时钟恢复,通过配置均衡器与预加重保证信号的完整性。经过光纤回环测试,在 5 Gb/s 的通信速率时,眼图水平张开度 ≥ 0.76 UI,时序裕量充足。

3.2 高动态合成

sCMOS 图像传感器同步输出低增益图像和高增益图像,其原理是传感器内部光电转换之后通过两个独立的后端电路采集。

低增益输出和高增益输出光子响应曲线等效如下:

$$Y_L = a_L x + b_L, \quad (1)$$

$$Y_H = a_H x + b_H, \quad (2)$$

其中: Y_L 为低增益图像像素输出值, a_L 为低增益信道响应曲线线性区域的斜率, b_L 为低增益图像的黑电平偏移, Y_H 为高增益图像像素输出值, a_H 为高增益信道响应曲线线性区域的斜率, b_H 为高增益图像的黑电平偏移。

高增益输出光子响应曲线可以表示为:

$$Y_{\text{HDR}} = \begin{cases} Y_H (Y_H \leq T_H) \\ a_{\text{HDR}} Y_L + b_{\text{HDR}} Y_H (Y_H > T_H) \\ Y_M (a_{\text{HDR}} Y_L + b_{\text{HDR}} Y_H \geq Y_M) \end{cases}, \quad (3)$$

其中: Y_{HDR} 为高动态图像像素输出值, a_{HDR} 为高动态图像增益比, b_{HDR} 为高动态图像的补偿值, T_H 为低增益图像和高增益图像之间转换的阈值, Y_M 为输出数据格式最大值。由式(1)~式(3)推导得出:

$$a_{\text{HDR}} = \frac{a_H}{a_L}, \quad (4)$$

$$b_{\text{HDR}} = b_H - \frac{a_H}{a_L} b_L. \quad (5)$$

这里利用FPGA高速并行处理特性,将高动态合成功能设计在图像数据流中,数据处理过程如图4所示。其中,输入信号*i_data_lg*和*i_data_hg*分别代表低增益图像数据和高增益图像数据;信号*w_data_lgc*和*w_data_hgc*为处理过程数据;输出信号*o_data_hdr*为高动态合成数据。数据处理时钟采用 250 MHz,经过 4 个时钟周期之后可以输出高动态合成数据,具有非常高的实时性。

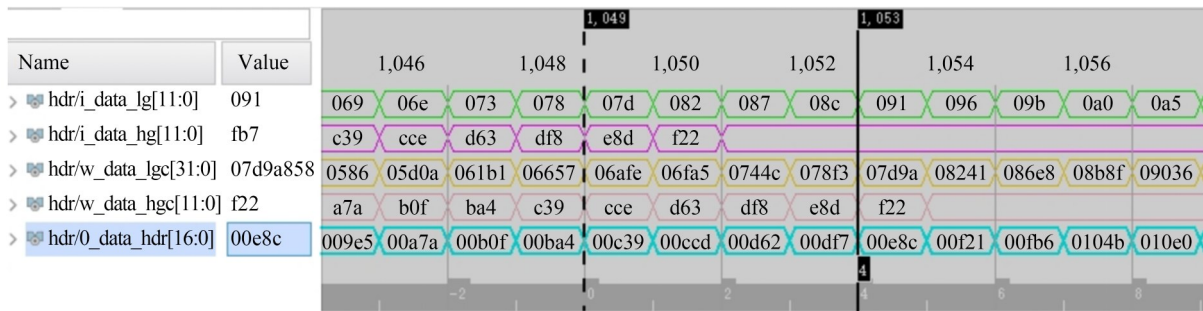


图 4 高动态合成数据流

Fig. 4 High Dynamic Range(HDR) data stream

3.3 曝光时刻信息

在光学望远镜系统中,成像图片需要匹配曝光时刻的时间和姿态等信息。通过精确记录每次曝光的时间信息,确保观测数据的时间准确性,对于天文定位等应用场景具有重要意义^[17]。通过相机曝光时刻信息可以确认多设备同步性,有效避免因时序偏差导致的数据不一致问题,确保多源数据的有效整合和分析。

sCMOS 图像传感器曝光采用卷帘快门,逐行曝光逐行读取。曝光时刻信息记录过程如图5所示。相机成像电路通过接收望远镜时统终端发送的时间信息,产生 1 μ s 分辨率的细分时间。当行 $n/2-1$ 和行 $n/2$ 累计积分时间等于这一帧积分时间时,记录当前时刻的时间和姿态等信息。记录数据和图像数据组合,发送至图像处理服务器。

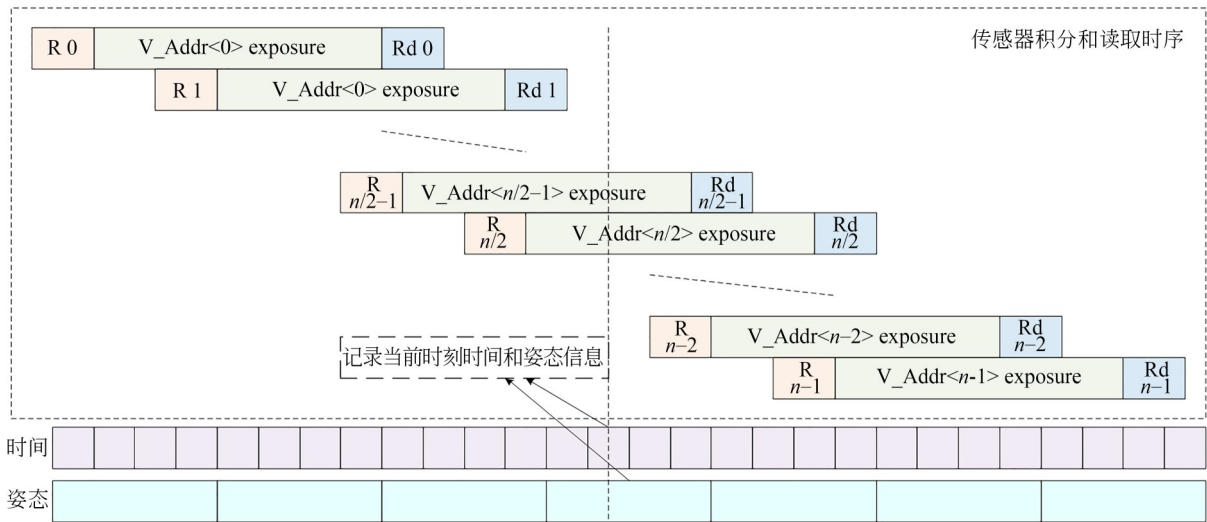


图 5 曝光时刻信息

Fig. 5 Data in exposure time

3.4 同步运行

拼接相机内部器件连接关系如图 6 所示,成像电路与 sCMOS 图像传感器一一对应,所以相机工作时序需要同步设计。在相机内部设计了同步控制终端,实现多探测器同步控制和同步成像。

同步控制终端至同步控制服务器的连接方式与成像电路板至图像处理服务器的连接方式保持一致,均采用 1 组光纤通信,简化了相机对外接口。在相机内部,同步控制终端通过串行通信总线连接每个成像电路板。

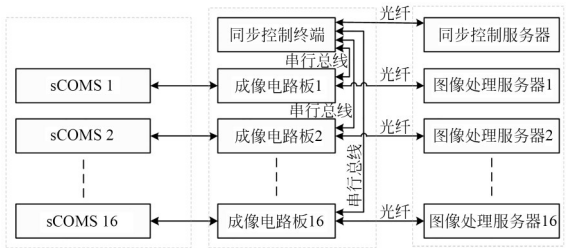


图 6 成像电路同步控制设计

Fig. 6 Synchronous control design of imaging circuit

数据和脉冲信号的传递时序如图 7 所示,同步控制终端接收到控制指令、时间信息和脉冲信号后对成像电路板进行分发,并产生同步触发脉冲,引导成像电路板同步运行。同步控制终端也接收各成像电路板状态信息,组合之后发送至同步控制服务器。

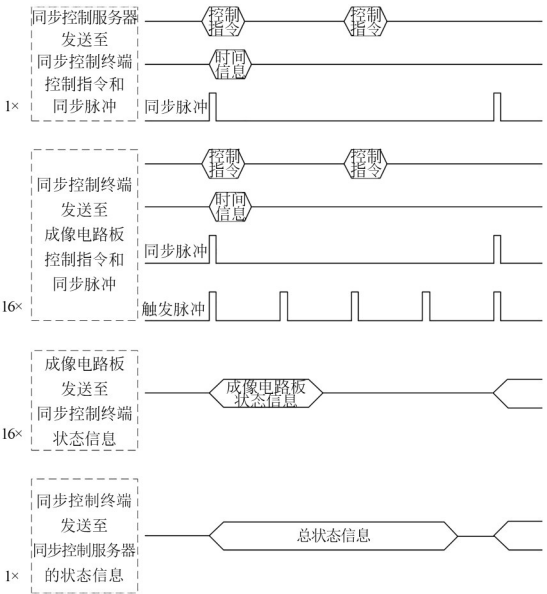


图 7 控制和状态信息时序

Fig. 7 Control and status information timing

4 测量实验与结果

相机成像电路实物如图 8 所示,在拼接探测器系统中,通过组合成像电路可以形成堆叠式电路系统。为了验证成像电路设计功能,电路板连接 sCMOS 图像传感器并上电运行,并通过光纤连接到上位机。经过实验测试,实现了 1 680 万分辨率全画幅 17 bit 的图像深度成像,帧率达 4 frame/s。

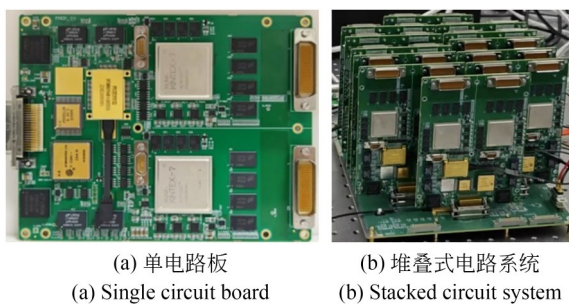


图 8 图像处理电路板实物

Fig. 8 Physical picture of image processing circuit board

在积分球光源和暗室等组成的实验平台上进行了成像实验,测试场景如图 9 所示。积分球采用定制 15 cm 开口高亮均匀光源系统 USS-2000C,光照亮度均匀度 $\geq 98\%$ 。



图 9 大靶面相机成像电路测试平台

Fig. 9 Test platform for imaging circuit of large-format camera

通过调整光源和曝光时间分别将高低增益图像灰度调整到约 1/2 最大灰度值,此时的成像效果如图 10 和图 11 所示。

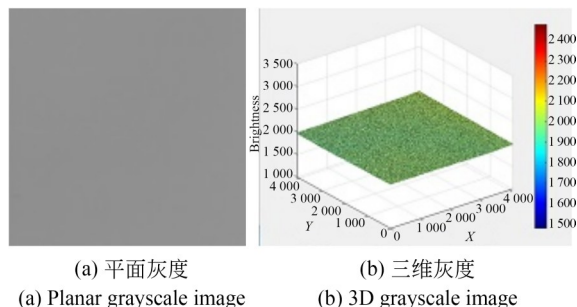


图 10 均匀光照下的低增益图像

Fig. 10 Low gain image under uniform illumination

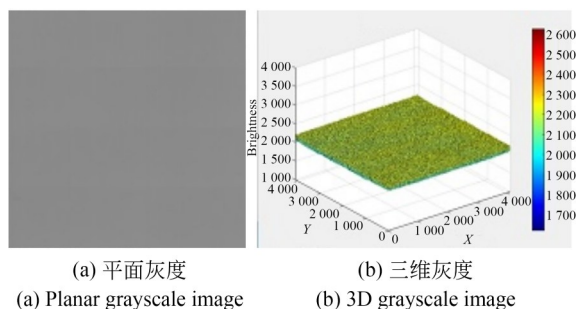


图 11 均匀光照下的高增益图像

Fig. 11 High gain image under uniform illumination

为了验证高动态合成功能,对比了低增益图像、高增益图像和高动态合成图像,如图 12 所示。可以看出,高动态图像相较于单一的低增益图像和高增益图像有更丰富的细节。

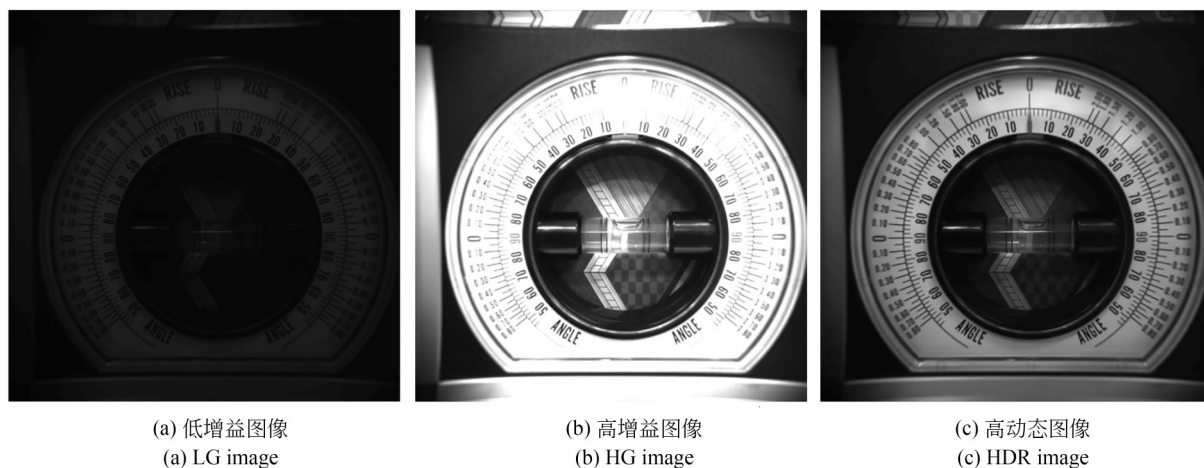


图 12 高动态数据合成

Fig. 12 Synthesis of HDR data

在成像图片的低进光量部分,低增益图像信噪比低,高动态合成时主要采用高增益图像数据进行计算。高动态图像与低增益图像局部对比如图 13 所示。

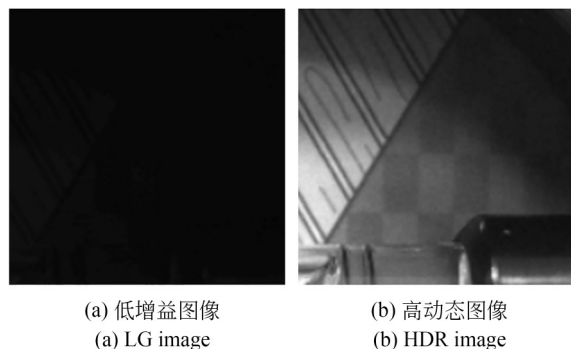


图 13 低增益-高动态局部对比

Fig. 13 Partial comparison of low gain and HDR

在成像图片的高进光量部分,高增益图像饱和失真,高动态合成时主要采用低增益图像数据进行计算。高动态图像与高增益图像局部对比如图 14 所示。

高动态合成图像的动态范围如下:

$$R_{\text{HDR}} = \begin{cases} 20 \log \frac{C_L}{N_{\text{RH}}} (N_{D_{\text{max}}} \geq FWC_L) \\ 20 \log \frac{N_{D_{\text{max}}}}{N_{\text{RH}}} (N_{D_{\text{max}}} < FWC_L) \end{cases} \quad (6)$$

其中: C_L 是低增益模式的满井容量, $N_{D_{\text{max}}}$ 是高增益合成后最大灰度值对应的电子数, N_{RH} 是高增益模式的读出噪声。在本设计中采用 17 bit 高动态合成位宽,图像输出范围超过了满井容量对应的灰度值。带入测试数据 C_L 为 66.3 ke^- , N_{RH} 为 1.11 e^- , 计算得出动态范围为 95.52 dB, 优于 Marana 4.2B-11 和 C13440-20CU 等地基望远镜项目常用的科学级相机。

5 结 论

本文为地基大型巡天望远镜大靶面拼接探

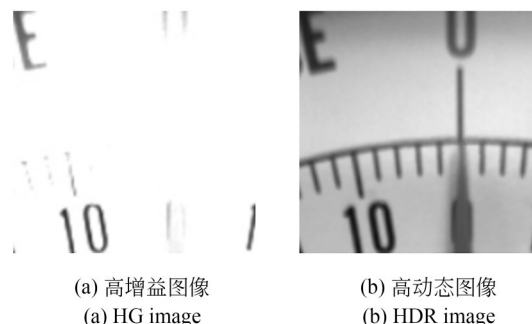


图 14 高增益-高动态局部对比

Fig. 14 Partial comparison of high gain and HDR

测器设计了大靶面相机可拼接成像电路。该成像电路采用 FPGA 芯片为核心处理器,集成了 sCMOS 图像传感器驱动、控制中心、数据中心、状态监测模块和对外通信接口等功能模块。接着,设计了全链路高速高质量数据收发接口、高带宽数据存储模块以及相机内部记录图像曝光时刻信息功能,可以精确记录相机成像时刻时间信息,其时间分辨率为 $1 \mu\text{s}$ 。经过上电测试,实现了 1 680 万分辨率全画幅成像,帧率达 4 frame/s。通过 5 Gb/s 高速光通信接口和自定义 17 bit 位深图像格式,保证了高动态图像在满井容量范围内不会饱和失真,最大限度提高动态范围。经 FPGA 实时图像高动态合成后动态范围提升至 95.52 dB,满足探测器系统的应用要求。

作者贡献声明:

刘塔拉:硬件设计、功能模块设计、实验测试、论文构思和撰写;

任同阳:驱动电压供给和信号传输设计;

于勇:图像采集卡和上位机控制设计;

贾建禄:调查研究,提供资源和指导;

王之一:图像质量检测 and 性能评估;

王建立:研究指导和资源支持;

刘昌华:图像信息真空贯穿设计;

马俊林:电路散热设计。

参考文献:

[1] 王建立. 空间目标地基光电探测与识别技术的发

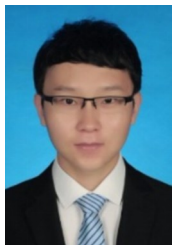
展[J]. 飞行器测控学报, 2015, 34(6): 489-499.

WANG J L. Development of technologies for detection and identification of space objects with ground-

- based E-O systems [J]. *Journal of Spacecraft TT&C Technology*, 2015, 34(6): 489-499. (in Chinese)
- [2] 李玉霞,王建立,郭鹏飞,等. 大口径光电高分辨成像远镜主镜电液型高精度位姿控制系统[J]. 光学精密工程, 2023, 31(10): 1487-1500.
LI Y X, WANG J L, GUO P F, *et al.* Electrohydraulic high-accuracy position and orientation control system of the primary mirror for a large-aperture high resolution telescope[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(10): 1487-1500. (in Chinese)
- [3] 邵蒙,李洪文,王建立,等. 自适应光学千单元级高压驱动系统的设计和性能分析[J]. 光学精密工程, 2023, 31(17): 2493-2504.
SHAO M, LI H W, WANG J L, *et al.* Design and performance analysis of high-voltage drive system for thousand-element adaptive optics[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(17): 2493-2504. (in Chinese)
- [4] 姜淳. 地基大视场望远镜空间目标探测技术研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2023.
JIANG CH. *Research on Space Target Detection Technology for Ground-Based Large-Field-of-View Telescopes*[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2023. (in Chinese)
- [5] 刘昌华. 主焦点式大口径大视场光学校正镜及拼接探测器关键技术[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2023.
LIU CH H. *Key Technologies of Corrector Lens and Mosaic Sensors for Large Aperture and Wild-Field Telescope*[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2023. (in Chinese)
- [6] GILMORE K, KAHN S, NORDBY M, *et al.* The LSST camera overview: design and performance[C]. *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy II. Marseille, France.* SPIE, 2008: 70140C.
- [7] 孔旭,杨戟,郑宪忠,等. 中国科学技术大学-中国科学院紫金山天文台 2.5 米大视场巡天望远镜(墨子巡天望远镜)[J]. 青海科技, 2024, 31(1): 10-24.
KONG X, YANG J, ZHENG X ZH, *et al.* The university of science and technology of China-purple Mountain observatory 2.5 m wide field survey telescope[J]. *Qinghai Science and Technology*, 2024, 31(1): 10-24. (in Chinese)
- [8] WANG T G, LIU G L, CAI Z Y, *et al.* Science with the 2.5-meter wide field survey telescope (WFST)[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2023, 66(10): 109512.
- [9] 王之越. 大视场巡天望远镜主焦相机控制系统的研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2024.
WANG ZH Y. *The Study of Control System for Wide Field Survey Telescope Prime Focus Mosaic Camera* [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2024. (in Chinese)
- [10] 邱鹏,邹思成,张晓明,等. 天文光学相机性能检测技术研究[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(12): 20230316.
QIU P, ZOU S CH, ZHANG X M, *et al.* Study on performance testing techniques for astronomical optical cameras[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(12): 20230316. (in Chinese)
- [11] 董建婷,杨小乐,董杰. 面阵 CMOS 图像传感器性能测试及图像处理[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(12): 3396-3401.
DONG J T, YANG X L, DONG J. Performance test and image processing of area CMOS image sensor[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(12): 3396-3401. (in Chinese)
- [12] 何舒文,王延杰,孙宏海,等. 高动态科学级 CMOS 相机系统的设计[J]. 液晶与显示, 2015, 30(4): 729-735.
HE SH W, WANG Y J, SUN H H, *et al.* Design of high dynamic scientific CMOS camera system [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(4): 729-735. (in Chinese)
- [13] 古万煜,史铿鸿,王紫薇,等. 基于彩色图像合成的互补线移条纹高动态范围三维测量[J]. 光学精密工程, 2024, 32(22): 3288-3299.
GU W Y, SHI K H, WANG Z W, *et al.* High dynamic range 3D measurement with complementary line-shifting strips based on color image synthesis [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(22): 3288-3299. (in Chinese)
- [14] 闫苏琪. 基于 sCMOS 的高动态范围图像合成技术研究[D]. 成都:中国科学院光电技术研究所, 2018.
YAN S Q. *High Dynamic Image Synthesis Technology Based on sCMOS*[D]. Chengdu: Institute

- of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2018. (in Chinese)
- [15] 曾海瑞, 孙华燕, 都琳, 等. 面向空间目标观测的高动态范围图像合成[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(4): 96-103.
- ZENG H R, SUN H Y, DU L, *et al.* High dynamic range image synthesis for space target observation [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(4): 96-103. (in Chinese)
- [16] 王伶杰. 基于FPGA的大面阵背照式sCMOS相机系统设计[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2021.
- WANG L J. *Design of Large Array, Back-side Illuminated sCMOS Camera System Based on FPGA* [D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2021. (in Chinese)
- [17] 张晓祥, 赵金字, 贾建禄, 等. 卷帘快门sCMOS相机对空间碎片观测的影响研究[J]. 光学精密工程, 2018, 26(6): 1441-1449.
- ZHANG X X, ZHAO J Y, JIA J L, *et al.* Study on the effect of rolling shutter sCMOS camera on space debris observation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(6): 1441-1449. (in Chinese)

作者简介:



刘塔拉(1992—),男,内蒙古通辽人,硕士,副研究员,2013年、2016年于吉林大学分别获得学士和硕士学位,主要从事大靶面相机和数据通信方面的研究。E-mail: liutala@ciomp.ac.cn

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,主要从事自适应光学系统波前处理研究与大口径地基望远镜总体技术的研究。E-mail: jiajianlu@ciomp.ac.cn