

基于EBAPS的国产成像电路研制

杨婧薇 钱芸生 柳磊 卢杰

Development of domestic imaging circuit based on EBAPS

YANG Jingwei, QIAN Yunsheng, LIU Lei, LU Jie

引用本文:

杨婧薇, 钱芸生, 柳磊, 等. 基于EBAPS的国产成像电路研制[J]. 应用光学, 2023, 44(3): 668–676. DOI: 10.5768/JAO202344.0305002

YANG Jingwei, QIAN Yunsheng, LIU Lei, et al. Development of domestic imaging circuit based on EBAPS[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(3): 668–676. DOI: 10.5768/JAO202344.0305002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0305002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种双波段成像系统的红外通道杂散光分析

Stray light analysis on infrared channel of dual-band imaging system

应用光学. 2018, 39(2): 262–267 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0206002>

基于雪崩级联电路控制激光照明源的水下激光选通成像

Range-gated imaging of underwater laser based on control laser illumination sources of avalanche cascade circuit

应用光学. 2021, 42(5): 830–838 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0502002>

基于FPGA的PPM调制可见光图像传输系统

FPGA-based PPM modulated visible light image transmission system

应用光学. 2019, 40(1): 162–166 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0108002>

双通道红外准直投影光学系统设计

Design of dualchannel infrared collimating projection optic system

应用光学. 2019, 40(1): 58–62 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0105002>

双通道红外准直投影光学系统设计

Design of dual-channel infrared collimating projection optic system

应用光学. 2019, 40(1): 58–62 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0105002>

基于FPGA的自适应光学系统SPGD算法实现

FPGA -based SPGD algorithm implementation of adaptive optical system

应用光学. 2021, 42(5): 810–816 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0501008>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 03-0668-09

基于 EBAPS 的全国产成像电路研制

杨靖薇, 钱芸生, 柳 磊, 卢 杰

(南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘 要: 电子轰击型有源像素传感器 (electron bombarded active pixel sensor, EBAPS) 具有高增益、快响应、低功耗和低成本等优点, 研究 EBAPS 已成为微光夜视成像技术的一个重要发展方向。国内相关机构在电路设计时, 对于 EBAPS 成像电路中所涉及到的芯片主要还是依赖于进口, 为加快 EBAPS 器件成像电路的国产化进程, 研制了一套基于 EBAPS 的全国产成像电路评估板。该电路以国产复旦微 FMK50t 系列的 FPGA 芯片为主控芯片, 通过设计 CMOS (complementary metal oxide semiconductor) 驱动模块、数据处理模块、Cameralink 显示模块等, 分别完成对 EBAPS 器件的驱动、数字图像处理和实时显示等功能。实验结果表明: 在轰击高压为负 1 500 V 的情况下, 该国产 EBAPS 相机的最低探测照度可达到 10^{-3} lx 量级。

关键词: EBAPS; 国产; FPGA; 成像系统

中图分类号: TN223

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0305002

Development of domestic imaging circuit based on EBAPS

YANG Jingwei, QIAN Yunsheng, LIU Lei, LU Jie

(School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology,
Nanjing 210094, China)

Abstract: Electron bombarded active pixel sensor (EBAPS) has the advantages of high gain, fast response, low power consumption and low cost. Research on EBAPS has become an important development direction of low-light-level night vision imaging technology. In the circuit design of relevant domestic institutions, the chips involved in the EBAPS imaging circuit mainly rely on imports. In order to accelerate the localization process of imaging circuits of EBAPS devices, a set of domestic-produced imaging circuit evaluation board based on EBAPS was developed. The circuit used the FPGA chip of domestic Fudan Micro FMK50t series as the main control chip, and completed the functions of driving the EBAPS device, digital image processing and real-time display by designing a complementary metal oxide semiconductor (CMOS) driver module, a data processing module, and a Cameralink display module. The experimental results show that when the bombardment negative high voltage is 1 500 V, the minimum detection illuminance of the domestic EBAPS camera can reach the order of 10^{-3} lx.

Key words: electron bombarded active pixel sensor; domestic; field programmable gate array; imaging system

引言

电子轰击型有源像素传感器 (electron bombarded active pixel sensor, EBAPS) 是一种高性能的真空-半

导体混合器件, 具有高灵敏度、快响应度、低成本、低功耗等优点, 广泛应用于军事装备、遥感测绘、空间探测等领域, 研究 EBAPS 已成为数字微

收稿日期: 2022-08-30; 修回日期: 2023-01-06

基金项目: 国家自然科学基金“叶企孙”科学基金项目 (U2141239)

作者简介: 杨靖薇 (1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事光电信息探测、FPGA 开发和图像信号处理研究。

E-mail: yjwei0310@163.com

通信作者: 钱芸生 (1968—), 男, 博士研究生, 教授, 博士生导师, 主要从事光电成像器件、系统与相关检测技术研究。

E-mail: yshqian2015@163.com

光夜视技术研究领域的重点方向^[1]。EBAPS 是减薄后的互补金属氧化物半导体(complementary metal oxide semiconductor, CMOS)芯片在像增强器荧光屏位置进行耦合,通过采用光电子转换成高能倍增电子的方式,使低照度光电图像得以倍增的^[1]。其工作过程如下:微弱的光信号透过入射窗到达光阴极,在光阴极表面发生外光电效应并产生微弱的光电子信号;在光阴极与电子敏感 CMOS 负高压的作用下,电子加速撞击有源像素传感器(active pixel sensor, APS)表面的电子倍增层以实现电子数目的倍增;产生的二次电子被传感器结区收集后经过光电二极管输出,实现微弱信号的探测与采集,以方便后续信号的处理^[2]。

EBAPS 技术属于高科技军事领域,美国 and 法国在这方面的研究成果最为突出。1999 年,美国 Intevac 公司率先发布了电子轰击有源像素传感器混合型光电探测器的相关发明专利^[3];2005 年,美国 Intevac 公司发布了 ISIE6 和 ISIE10,相对于 Night Vista 帧频提升,读出噪声减小,低照度性能更优^[4-5];2009 年,法国核物理研究所研制的 EBAPS 器件的灵敏度探测下限达到了单光子量级^[6];2013 年法国 Photonis 公司推出名为 EBNOCTURN 的 EBAPS 相机^[5-7];2020 年,Intervac 公司为美国海军提供 ISIE19 型 EBAPS 传感器,便于海军陆战飞行员在微光环境下正常执行任务^[5]。在国内,以北方夜视技术股份有限公司和微光夜视技术国防科学重点实验室为代表的研发团队已在 EBAPS 的理论研究、器件制备等方面取得一定成果^[2,8-9],但其成像电路所采用的多数芯片主要依赖于进口。由于美国在半导体行业对中国的制裁,使得芯片供不应求,阻碍了我国 EBAPS 成像系统的发展,因此,本文基于 EBAPS 的国产成像电路研制展开了深入研究。

本文拟设计一套基于 EBAPS 的国产产成像电路评估板。该系统全部采用国产芯片,以 FPGA 芯片作为核心处理器,针对我国自主研发的电子轰击型有源像素传感器的特点设计成像电路;其电路对 CMOS 图像传感器输出的图像信号进行实时采集,并通过数字图像处理算法提高成像质量;采用 Cameralink 接口实现 1 280×1 024 pixel@30 f/s 视频输出。该成像系统可实现 3×10^{-3} lx 环境照度下目标物体的成像,对微光夜视技术和国内集成电路产业的发展具有重要意义,对低照度环境下的探测工作有一定的应用价值。

1 整体方案设计

1.1 EBAPS 选型

本文选定了国内某公司用国产 APS 芯片完成封装的正照式 EBAPS 器件,其基本结构^[1-2]如图 1 所示。该 APS 芯片分辨率为 1 280(H)×1 024(V)像素,像素时钟最大不超过 80 MHz,主要工作波段为 0.3 μm ~0.97 μm ,卷帘门式曝光,由 9 路外部信号控制,分别是 VSYNC、HCLK、HSYNC、VCLK、RD1、RD2、RST、SEL、T,其中 VSYNC 信号的占空比设置决定有效曝光时间,且采用模拟差分输出方式。APS 芯片的主要技术参数在一定程度上会影响其他器件的选型与硬件电路的设计,芯片主要技术参数如表 1 所示。

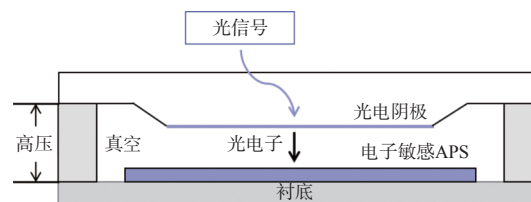


图 1 EBAPS 基本结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of basic structure of EBAPS

表 1 APS 芯片主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of APS chip

技术参数	指标
供电电压/V	3.5
分辨率/pixel	1 280(H)×1 024(V)
像素尺寸/ μm	12.5
像素时钟频率/MHz	≤ 80
光谱范围/ μm	0.3~0.97
存储温度/ $^{\circ}\text{C}$	-40~+80
输出数据格式	差分模拟(2 V & 1.2 V~2 V)

1.2 硬件设计框架

本系统将复旦微电子 FMK50t 系列 FPGA(field programmable gate array)芯片作为核心处理器,含 CMOS 图像传感器模块、模数信号转换模块、FPGA 核心板模块、视频输出模块以及系统供电模块 5 个模块。其中,CMOS 图像传感器模块由 FPGA 控制,在高压电子轰击模式下,器件表面的光阴极接收到光学镜头汇聚的光信号,光阴极发生光电效应产生光电子,在高压电场的作用下,光电子加速撞击 APS 芯片实现电子倍增,最终以一对差分

模拟信号输出;模数信号转换模块完成模拟信号到数字信号的转换,在接收 CMOS 图像传感器模块输出的模拟信号时,先通过具有缓冲作用的电压跟随器,随后经过可平衡差分输入的全差分运算放大器,从 AD(analog digital)转换器输出 16 bit 的数字信号至 FPGA 核心板模块中;FPGA 核心板

模块对数字信号进行有效地缓存与处理后,在视频输出模块将数字信号通过 Cameralink 采集卡传输到上位机,实现 Cameralink 接口输出。整个系统的总电源幅值为 12 V,系统供电模块则是通过电源芯片的转换以满足各个模块的供电需求,整个成像系统结构框图如图 2 所示。

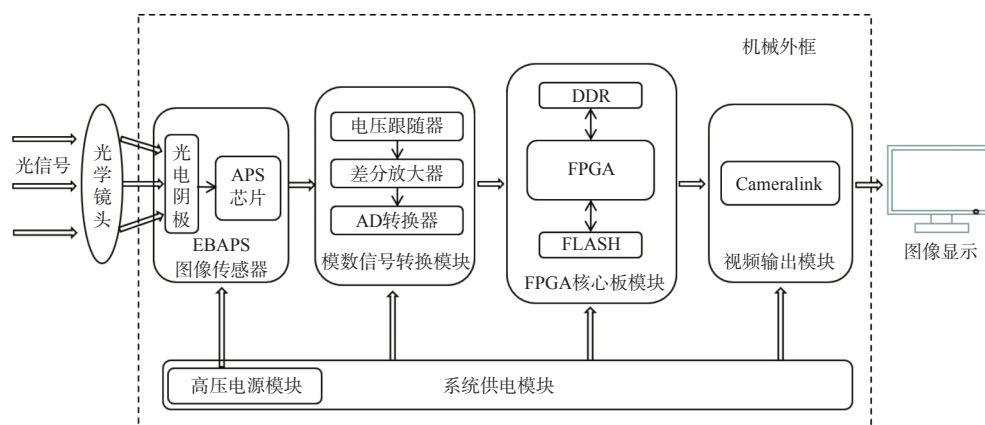


图 2 成像系统结构框图

Fig. 2 Structure block diagram of imaging system

2 硬件电路设计

本项目硬件电路围绕 EBAPS 传感器、FPGA 核心处理器开展系统的硬件设计。依据模块化的设计理念,硬件电路设计主要包括系统电源板、探测器驱动板、FPGA 核心板、视频输出板,通过合理的器件选型、外围电路设计、PCB 绘制和调试完成各电路板的预设功能。

2.1 系统电源板

系统电源模块负责各个模块的供电工作,是设计电路能否正常工作的基础与保障。根据 DC-DC(direct current-direct current)电源芯片转换效率高、输入电压范围宽, LDO(low drop-out)电源芯片稳定性好、负载响应快、效率低等特点,结合各模块供电需求,本设计采用矽力杰的 DC-DC 开关电源 SY8113 和圣邦微 LDO 电阻分压电源芯片 SGM2028。在原理图设计时,为避免供电电源引起串扰,电路采用单独供电的方式;为减小电压波动,芯片输出端采用串联钽电容的方式稳定信号。系统电源模块供电方案如图 3 所示。

2.2 探测器驱动板

探测器驱动板包含图像传感器模块和模数信号转换模块。UV1280 芯片是图像传感器模块的核心器件,该芯片有 9 路数字驱动信号线、2 路模拟差分信号线;模数信号转换模块核心芯片为 AD

转换器。本设计中,AD 选择的是芯佰微的 16 位模数转换器 CBM92AD68-80,其采样率为 80 MSPS。为了保证图像信号的稳定,本设计采用杭州瑞盟的 MS8617M 电压跟随器和华芯微的 HRF8138M 差分放大器完成信号的缓冲和放大。

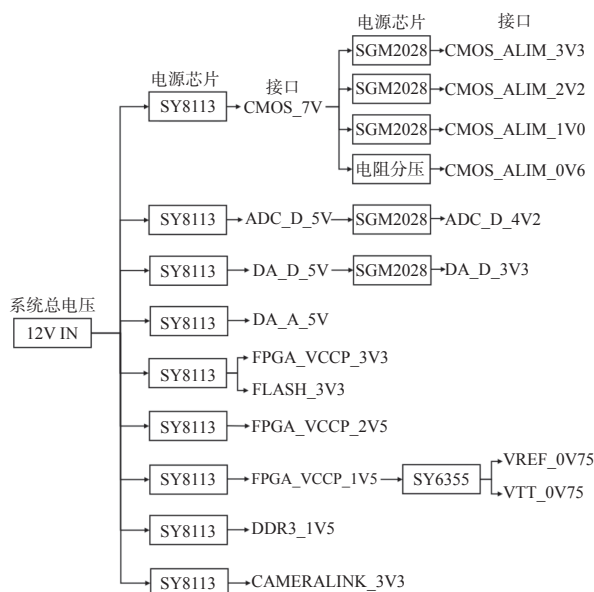


图 3 系统电源模块供电方案

Fig. 3 Power supply scheme of system power module

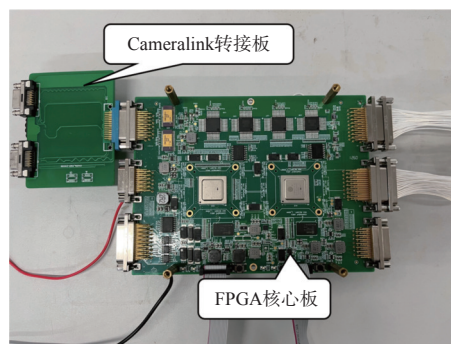
2.3 国产 FPGA 核心板

现场可编程门阵列(FPGA)是一种可编程的半

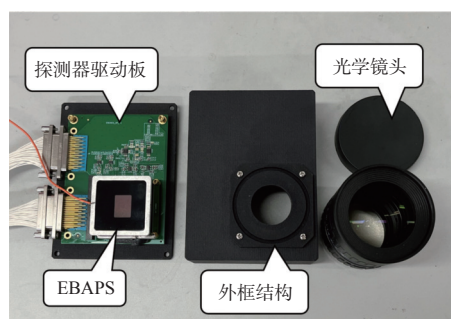
定制电路, 可通过编写硬件逻辑语言完成数据信息存储与处理。本系统选用复旦微电子 FMK50 系列 FPGA 的芯片, 该芯片具有 52 k 逻辑单元、120 个计算单元、250 个 User I/O、4 个通用高速收发器, 与市面上具有相同可编程逻辑资源的主流 FPGA 相对比, 该芯片功耗更低, 性价比更高。在数据存储方面, 为稳定数据信号以及提高图像质量, FPGA 核心板模块设有西安紫光国芯半导体的 DDR(double data rate) 芯片 HXI15H4G160AF-13K 用于图像缓存, 兆易创新的 FLASH 芯片 GD25S512MD 用于数据存储。根据设计要求, 本项目基于复旦微 FMK50T4-FPGA 芯片完成核心板设计, 该核心板上设有主、从 FPGA, 为保证两片 FPGA 芯片之间可进行高速无损数据通信, 在 PCB(printed circuit board) 设计时, 着重确保信号线等长、等间距。

2.4 视频输出板

视频输出模块使用 Cameralink 视频输出方式^[10], 采用 85 MHz 时钟频率。Cameralink 芯片采用成都振芯科技的接口控制芯片 GM8283, 该芯片具有宽时钟频率范围 10 MHz~90 MHz, 可将并行输入的 28 bits LVCMOS(low-voltage CMOS) 数据和 1 bit 时钟信号转为 5 路串行通道输出。电路中信号线多为差分信号, 为解决输出差分信号极性相反、差分阻抗不变且抑制共模干扰等问题, 在 PCB 设计中遵循等长、等间距的设计原则。硬件电路实物如图 4 所示。



(a) FPGA 核心板



(b) 探测器驱动板与结构

图 4 关键硬件电路实物图

Fig. 4 Physical drawing of key hardware circuits

3 逻辑设计

3.1 逻辑设计框架

FPGA 逻辑设计含 CMOS 驱动模块、AD 配置模块、数据处理模块、视频输出模块。逻辑设计框图如图 5 所示。

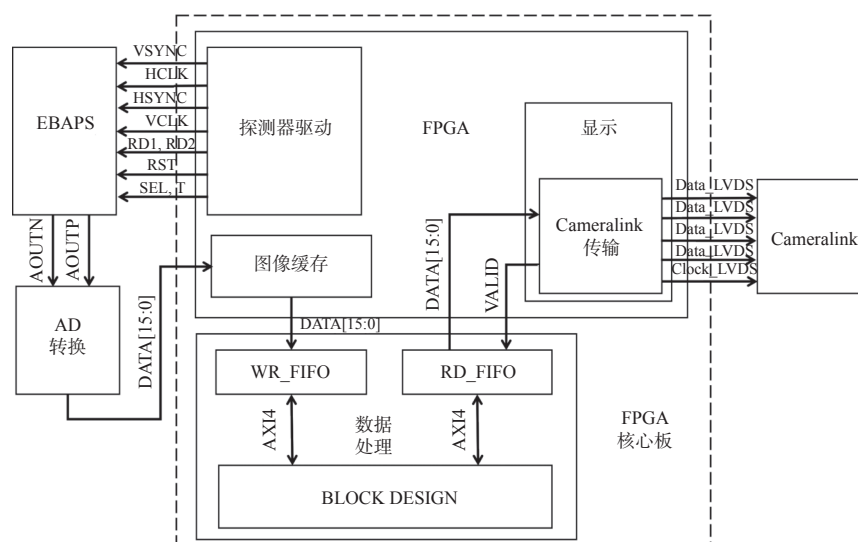


图 5 逻辑设计框图

Fig. 5 Block diagram of logic design

CMOS 驱动模块是整个逻辑设计中的起始端, 该模块使用 Verilog 语言编写传感器 9 路数字驱动

信号的方式完成驱动, CMOS 输出的差分数据通过电压跟随器和差分运算放大器后进入 AD 芯片进行模数转换。在 AD 配置模块, 信号在 FPGA 内部进行对齐测试训练后方可进入正常工作模式, AD 芯片将 2 路差分模拟信号转换成 16 路并行数字信号, 传输至 FPGA 芯片进行数据处理。根据硬件电路设计和数据流的流向, 主 FPGA 负责与前端 CMOS 进行交互, 从 FPGA 负责后端显示模块的输出, 主、从 FPGA 则通过握手机制完成信息交互。在数据处理模块, 数字信号先进入写 FIFO(first input first output) 完成位宽转换、跨时钟域的操作, 然后使用 AXI4 总线协议配置 MIG(memory interface generators) 核的方式, 使数字信号在 DDR 中完成缓存和图像处理算法复现的读写操作。视频输出模块, 即 Cameralink 显示模块, 通过 GM8283 芯片完成并串转换操作, 实现上位机与 FPGA 之间的通信。

3.2 自适应曝光算法

曝光程度是相机能否呈现清晰图像的重要影响因素。曝光是由光圈大小、曝光时间、ISO 感光度三者共同决定, 其中, 光圈大小影响进光量, 曝光时间是光到达的时间长度, ISO 感光度是增益大小^[11]。自动曝光的宗旨是通过调整这三者以改变图像亮度。图像亮度 Y 组成如(1)式所示:

$$Y = k \times E \times (D/f)^2 \times T \times G \quad (1)$$

式中: k 为常数; E 为环境照度; $(D/f)^2$ 为相对孔径, 是光圈系数的倒数; T 为曝光时间; G 为感光度。

在 FPGA 硬件实现时, 考虑到环境因素、相对孔径、探测器内信号增益大小等不宜使用 FPGA 实现控制, 故设计了一种调整曝光时间 T 的自适应曝光算法。结合 EBAPS UV1280 的芯片手册, 有效曝光时间由 9 路驱动信号中的 VSYNC 信号的占空比设置, 故探测器最大曝光时间为一帧图像的时间。该算法以平均亮度算法为参考完成自动曝光操作, 因系统输出为黑白图像, 故图像灰度和图像亮度两者数值相同, 利用当前帧的平均像素信息, 并结合恒定步长搜索法以调节下一帧的曝光时间, 经过不断优化后使得最终输出的图像平均灰度处于最佳亮度范围 $[Y_{\min}, Y_{\max}]$ 。通过大量的实验测试, 得出本系统在低照度环境下的最佳亮度范围为 $[24\ 000, 25\ 600]$ 。设置初始曝光时间为 T_{default} , 如果平均灰度数值正处于最佳亮度范围, 则

曝光时间将保持初始值; 如果平均灰度值超过最佳亮度, 则曝光时间将自动减少标准步长; 如果平均灰度值不足最佳亮度, 则曝光时间将自动增加标准步长。曝光时间 T 的计算公式如下:

$$T = T_{\text{default}} \pm \Delta s \quad (2)$$

最大曝光时间 T_{max} 的计算公式如下:

$$T_{\text{max}} = m \times n / f \quad (3)$$

式中: s 表示标准步长; m 表示横向像素数; n 表示纵向像素数; f 表示像素时钟频率。像素时钟频率为 40 MHz, 标准步长为 640 000 ns, 根据计算, 该系统的最大曝光时间 T_{max} 为 32 768 000 ns, 最小曝光时间 T_{min} 为 1 000 000 ns, 初始曝光时间 T_{default} 为 16 384 000 ns。若增加步长后的曝光时间超出曝光范围, 最终的曝光时间将设为最大曝光时间; 若减少步长后的曝光时间不足曝光范围, 最终的曝光时间将设为最小曝光时间。图 6、图 7 为自动曝光算法前后 EBAPS 成像效果图。

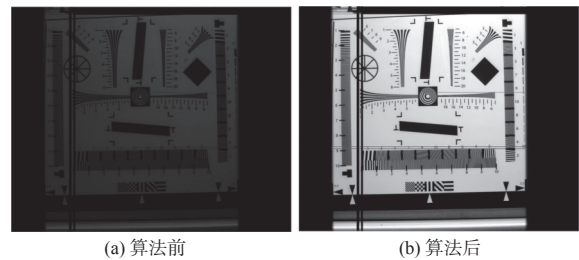


图 6 不足曝光时算法效果图

Fig. 6 Algorithm effect diagram when underexposed

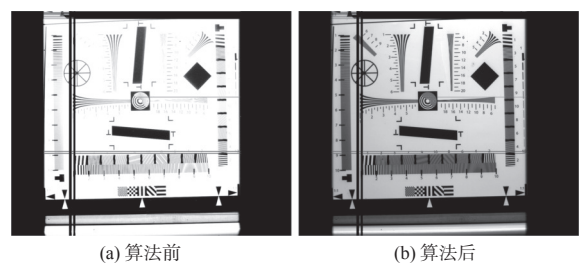


图 7 过度曝光时算法效果图

Fig. 7 Algorithm effect diagram when overexposed

3.3 帧间噪声抑制算法

噪声是影响图像质量水平的重要因素。CMOS 图像传感器噪声主要分为固定模式噪声 (fixed pattern noise, FPN) 和随机噪声两类^[12-18]。固定模式噪声是 CMOS 传感器自身结构特点所产生的。CMOS 输出图像信息如(4)式:

$$\text{CMOS_OUT} = \text{Ori_ph} + \text{Temp_n} + \text{FPN_n} \quad (4)$$

式中: CMOS_OUT 为采样的真实图样信息; Ori_ph

为不含噪声的理想图像信息; Temp_n 为像素随机噪声; FPN_n 为暗电流 FPN^[15-18]。

根据 EBAPS 的成像特点提出帧间噪声抑制算法, 该算法主要是去除低照度环境下图像的固定模式噪声 FPN_n, 采用实时图像与暗背景图像线性相减的方式实现。本算法采用 AXI4 总线协议控制 MIG 核的方式, 在 DDR 中开辟了 5 片大小为 1 280×1 024×2 Bytes 地址空间, 前 4 片地址用于存放 4 张连续的无光照环境下的暗背景图像, 最后 1 片地址用于存放实时图像, 通过对“KEY=1”的判断来进行写入地址的选择。将前 4 片地址中的 4 帧图像进行对应图像位置的像素值求平均计算, 得到最接近真实的暗背景图像信息, 实时图像中固定模式噪声的去除, 采用前 4 片平均像素值的暗背景图像与第 5 片地址的实时图像之间进行线性相减的方式完成, 由此可近似得到固定模式噪声去除后的图像。去噪算法逻辑设计框架如图 8 所示。算法实现中的重点是对 DDR 地址跳变的控制和数据对齐的把控。在 DDR 地址控制方面, 需先配置好读写文件中的地址与数据通道相关参数设定, 控制好 5 片地址的起始地址 AXI4_AWADDR, 以及每次数据传输的突发长度。

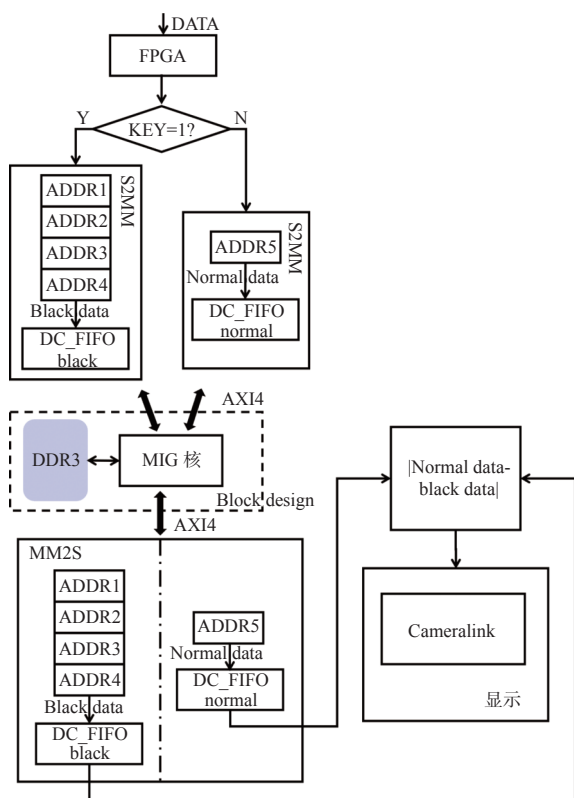


图 8 去噪算法逻辑设计框架

Fig. 8 Logic design framework of denoising algorithm

在 S2MM 写操作时, 数据在进入 DDR 前, 会先进入 FIFO 进行跨时钟域变换与位宽转换, 当 FIFO 的 prog_empty 信号为拉低状态时, 即可继续进行突发式写操作, 同时拉高地址通道的 AXI4_AWVALID 信号; 等待 MIG 核反馈的 AXI4_AWREADY 信号, 如果该信号同时处于拉高状态, 即可完成一次地址握手。每完成一次地址握手, 地址位将增加一个 BRUST 的长度, 等待下一次地址握手。当地址握手和数据握手均完成时, 即可完成一个地址的突发式数据写入。以此类推, 直至一幅图完全写入 DDR 地址中。使用以上方式完成 5 片地址的图像写入, 其中通过判断“KEY=1”真假选择写入的地址信息, “KEY=1”为真, 则写入前 4 片地址; “KEY=1”为假, 则写入第 5 片地址。式(5)为 AXI4 总线中地址位的表达式:

$$awaddr_r = ADDR_BIAS + ADDR_offset + address_r \quad (5)$$

式中: ADDR_BIAS 为基地址; ADDR_offset 为偏移地址, 用以控制写入不同图像的起始地址; address_r 表示一次 BRUST 的长度。

在 MM2S 读操作时, 数据需要通过 FIFO 进行跨时钟域与位宽转换后进入显示模块。其中, 将 4 片地址上平均黑图像素值 black_data 与图像像素值 normal_data 作差之前, 需要先通过设置相同的 FIFO 读出信号 rd_en, 使两个像素值一一对应。至此完成图像算法的全部内容, 图 9 为帧间噪声抑制算法前后 EBAPS 成像对比图。

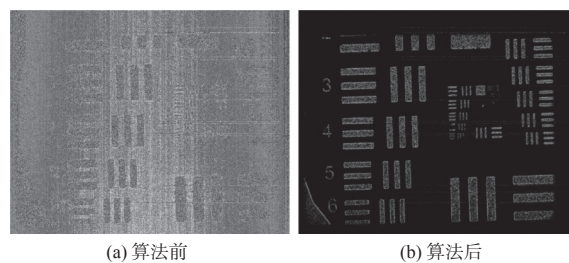


图 9 算法前后 EBAPS 成像对比结果

Fig. 9 Comparison results of EBAPS imaging before and after algorithm

4 测试结果分析与讨论

基于上文所述硬件电路与逻辑电路设计, 完成 EBAPS 国产成像电路的设计与组建。为测试该成像电路的成像效果, 组建了与之功能配套的成像检测系统, 设计了 EBAPS 高压轰击测试方案,

图 10 给出了实验测试设备系统实物图,该系统包含光学镜头、成像电路、可调式恒流源、微弱光光度计、Cameralink 采集卡、专用上位机等。EBAPS 是电子轰击型有源像素传感器,需在光阴极和 APS 芯片之间加一个负高压以实现电子倍增,测

试系统为其准备了专用高压电源。实验中的环境照度、轰击电压均可进行调节。在整机正常工作情况下,硬件电路功耗为 4.8 W,逻辑设计电路片上功耗为 1.261 W,其中,动态功耗 1.185 W、静态功耗 0.076 W。

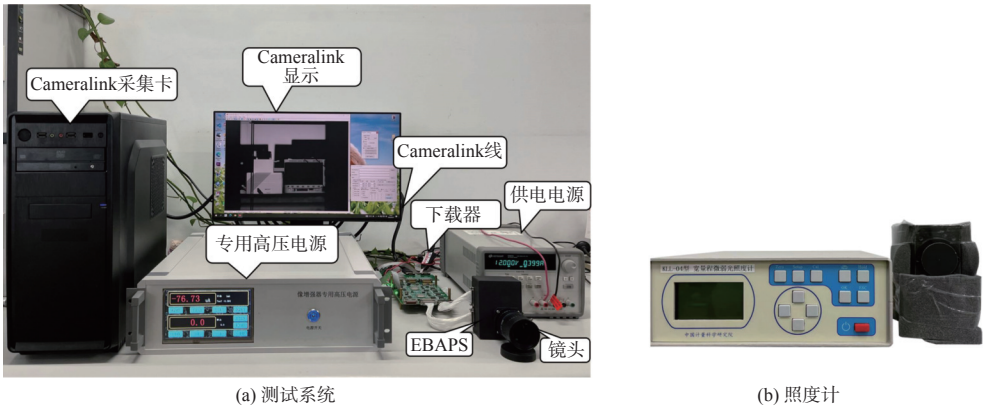


图 10 测试系统结构组成实物图

Fig. 10 Physical drawing of structure composition for test system

为进一步提高 EBAPS 成像系统的成像效果,感光器件获得合适的曝光量,使所摄物体呈现正常亮度,增设自动曝光算法,对不同高压、环境照度条件下的图像进行采集和对比。实验采集 0~

1 500 V 范围内的 EBAPS 成像图,为方便结果对比,选取 0 V、-500 V、-1 000 V、-1 500 V 作为代表性结果。图 11 所示图像为自动曝光算法和帧间噪声抑制算法综合后的效果图。

照度	60 lx	60 lx	3×10 ⁻¹ lx
图像显示			
高压	0 V	0 V	0 V
照度	3×10 ⁻¹ lx	3×10 ⁻² lx	3×10 ⁻³ lx
图像显示			
高压	-500 V	-500 V	-500 V
照度	3×10 ⁻¹ lx	3×10 ⁻² lx	3×10 ⁻³ lx
图像显示			
高压	-1 000 V	-1 000 V	-1 000 V

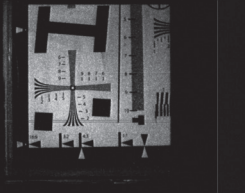
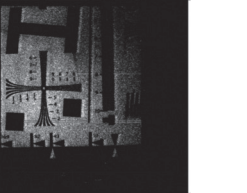
照度	3×10^{-1} lx	3×10^{-2} lx	3×10^{-3} lx
图像显示			
高压	-1 500 V	-1 500 V	-1 500 V

图 11 可变高压下的 EBAPS 成像图

Fig. 11 EBAPS imaging images under variable high voltages

从图 11 中可以看出,除了因 EBAPS 器件工艺原因形成的明显横条纹存在以外,在自动曝光算法和帧间噪声抑制算法下,已可以呈现出较清晰的图像。图 11 中横向对比是环境照度的变化,纵向对比是高压伏值的变化,展示了在不同环境照度和高压值时,国产 EBAPS 成像电路的成像效果。其中,在不加高压、 3×10^{-1} lx 照度下,图像已基本无物体的轮廓特征。根据图 11 中第 3、4 行前两幅图可看出:在相同高压的情况下,自动曝光算法在调节不同环境照度下图像亮度时,有一定成效;EBAPS 器件加以合适的高压后,即使在低照度环境下仍可识别图像,并且在轰击电压设为-1 500 V 时, 3×10^{-3} lx 环境照度下仍可成像。根据实验结果,可以得出,本系统已实现了 EBAPS 的国产电路成像的基本功能。

5 结论

为加快 EBAPS 器件成像电路的国产化进程,本文设计了一套基于 EBAPS 的国产成像电路评估板。首先,以国产复旦微 FMK50t 系列的 FPGA 芯片为核心,通过器件选型、外围电路设计、PCB 绘制搭建了系统的硬件平台;其次,通过逻辑设计完成探测器驱动、图像缓存、Cameralink 显示,初步完成 EBAPS 图像显示功能;最后,设计了自适应曝光算法、帧间噪声抑制算法改善图像质量,实现了 EBAPS 图像传感器在 3×10^{-3} lx 低照度环境下的实时显示。实验证明,该成像电路整机功耗 4.8 W,可以有效去除固定模式噪声,改善成像质量。下一步工作将从低功耗、小型化角度对电路进行优化。本文设计的 EBAPS 国产成像系统,可为 EBAPS 器件的国产成像电路设计提供参考。

参考文献:

[1] 金伟其,陶禹,石峰,等. 微光视频器件及其技术的进

展[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(11): 3167-3176.

JIN Weiqi, TAO Yu, SHI Feng, et al. Progress of low-light video devices and their technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3167-3176.

[2] 严毅赞, 钱芸生, 张景智, 等. 电子轰击有源像素传感器光谱响应测试系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(23): 123-128.

YAN Yiyun, QIAN Yunsheng, ZHANG Jingzhi, et al. Design of EBAPS spectral response measurement system[J]. *Advances in Laser and Optoelectronics*, 2022, 59(23): 123-128.

[3] 徐鹏霄, 唐光华, 唐家业, 等. EBCMOS 混合型光电探测器研究[J]. 光电子技术, 2016, 36(4): 232-236.

XU Pengxiao, TANG Guanghua, TANG Jiaye, et al. Research on EBCMOS hybrid photodetector[J]. *Photoelectronic Technique*, 2016, 36(4): 232-236.

[4] AEBI V W, COSTELLO K A, ARCUNI P W, et al. EBAPS: Next generation, low power, digital night vision[C]. [S. l.]: OPTRO 2005 International Symposium, 2005: 1-10.

[5] 籍宇豪. 基于可变高压下的宽动态范围 EBAPS 成像技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2021.

Ji Yuhao. Research on wide dynamic range EBAPS imaging technology under variable high pressure[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2021.

[6] DOMINJON A, CHABANAT E, DEPASSE P, et al. LUSIPHER large-scale ultra-fast single photo-electron tracker[C]// IEEE Nuclear Science Symposium conference record. New York, USA: IEEE, 2009: 1527-1531.

[7] CHRZANOWSKI K. Review of night vision technology[J]. *Opto-Electronics Review*, 2013, 21(2): 153-181.

[8] 刘虎林, 王兴, 田进寿, 等. 高分辨紫外电子轰击互补金属氧化物半导体器件的实验研究[J]. 物理学报, 2018,

- 67(1): 175-180.
- LIU Hulin, WANG Xing, TIAN Jinshou, et al. Experimental study on high-resolution ultraviolet electron bombardment of complementary metal oxide semiconductor devices[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(1): 175-180.
- [9] 刘亚宁, 桑鹏, 吕嘉玮, 等. 微型低功耗EBAPS相机技术[J]. *红外技术*, 2019, 41(9): 810-818.
- LIU Yaning, SANG Peng, LYU Jiawei, et al. Miniature low-power EBAPS camera technology[J]. *Infrared Technology*, 2019, 41(9): 810-818.
- [10] 许恒煜. 基于FPGA的高清视频显示控制系统的设计与实现[D]. 南京: 东南大学, 2021.
- XU Hengyu. Research and design of high-definition video display control system based on FPGA[D]. Nanjing: Southeast University, 2021.
- [11] 尹传海. 基于图像处理的自动曝光和自动对焦算法研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2017.
- YINChuanhai. Research on automatic exposure and auto-focus algorithm based on image processing[D]. Suzhou: Soochow University, 2017.
- [12] 于帅. 基于CMOS图像传感器的高速相机成像电路设计与研究[D]. 上海: 中国科学院研究生院(上海技术物理研究所), 2014.
- YU Shuai. Design and research of high-speed camera imaging circuit based on CMOS image sensor [D]. Shanghai: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Technical Physics), 2014.
- [13] 胡晓明. 基于NSC1105传感器的数字接口CMOS成像系统研制[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
- HU Xiaoming. Development of digital interface CMOS imaging system based on NSC1105 sensor [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.
- [14] 郑扬帆, 尹达一, 李清灵, 等. 基于低噪声CMOS图像传感器的成像电路设计与实现[J]. *电子设计工程*, 2018, 26(4): 188-193.
- ZHENG Yangfan, YIN Dayi, LI Qingling, et al. Design and implementation of imaging circuit based on low noise CMOS image sensor[J]. *Electronic Design Engineering*, 2018, 26(4): 188-193.
- [15] 夏冠玉, 肖中俊, 严志国. 基于CMOS图像传感的低噪声研究分析[J]. *齐鲁工业大学学报*, 2020, 34(6): 13-17.
- XIA Guanyu, XIAO Zhongjun, YAN Zhiguo. Research and analysis of low noise based on CMOS image sensing[J]. *Journal of Qilu University of Technology*, 2020, 34(6): 13-17.
- [16] 李强, 金龙旭, 李国宁. 基于暗电流CMOS图像传感器固定模式噪声校正研究[J]. *液晶与显示*, 2021, 36(2): 327-333.
- LI Qiang, JIN Longxu, LI Guoning. Research on fixed pattern noise correction based on dark current CMOS image sensor[J]. *Liquid Crystal and Display*, 2021, 36(2): 327-333.
- [17] 李轩. CMOS图像传感器噪声抑制研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- LI Xuan. Research on noise suppression of CMOS image sensor [D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.
- [18] CHEN Nan, ZHONG Shengyou, ZOU Mei, et al. A low-noise CMOS image sensor with digital correlated multiple sampling[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2018, 65(1): 84-94.