

文章编号:1007-2780(2017)03-0240-09

高动态科学级 CMOS 相机设计与成像分析

孙宏海^{1*}, 何舒文², 吴 培^{1,3}, 王延杰¹

(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. 北方自动控制技术研究所, 山西 太原 030006; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为了满足高动态范围高灵敏度的全局曝光模式下成像系统的需求, 基于 CIS-2521 科学级 CMOS 图像传感器设计了一个相机系统, 通过分析 CIS-2521 芯片像素读出结构特点, 通过芯片内部模拟相关双采样与 FPGA 片内数字域相关双采样完成相关四采样算法, 列向噪声去除效果明显。通过设计曲线拟合双增益通道图像数据合成输出, 保证了系统成像有较高输出动态范围。相机常温下输出图像峰值信噪比达 62.9 dB, 采用半导体制冷后输出图像峰值信噪比 74.3 dB。根据 EMVA1288 标准实测相机动态范围达到 78.2 dB, 设计的相机系统实现了每秒 50 帧 $2\,560 \times 2\,160$ 像素, 16 bit 深度高清晰度高动态范围图像的实时全局曝光成像输出, 能够满足低照度条件下的高帧频高动态范围成像的需求。

关键词:全局曝光; 科学级 CMOS; 相关四采样; 噪声抑制; 高动态范围

中图分类号: TP212 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20173203.0240

Design and imaging analysis of high dynamics scientific CMOS camera

SUN Hong-hai^{1*}, HE Shu-wen², WU Pei^{1,3}, WANG Yan-jie¹(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*2. *North Automatic Control Technology Institute, Taiyuan 030006, China;*3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: In order to satisfy the demand of the imaging system under the global exposure mode of high dynamic range and high sensitivity, we designed a camera based on the CIS-2521 scientific CMOS image sensor, implementing the correlated quadruple sampling algorithm in the FPGA by analyzing the feature of CIS-2521's pixel readout structure and combining its built-in circuit of correlative double sample, and it denoises the vertical noise obviously. The imaging system has higher output dynamic range of the image data by designing a curve matching the double gain channels. The output image peak signal to noise ratio of the camera can reach 62.9 dB under the room temperature, and can reach 74.3 dB using the semiconductor refrigeration. The dynamic range of the camera can reach

收稿日期: 2016-11-09; **修订日期:** 2016-12-13.

基金项目: 国家高技术研究发展计划基金课题 (No.2015AA7031010B)

Supported by National High Technology Research and Development Program of China (No. 2015AA7031010B)

* 通信联系人, E-mail: sunhh@ciomp.ac.cn

78.2 dB according to EMVA1288 standard. The designed camera can realize the global exposed real time imaging output with high definition and high dynamic range for $2\,560 \times 2\,160$ and 16 bits images under 50 fps, and can satisfy the demand of the high frame frequency and high dynamic range under the low brightness.

Key words: global exposure; scientific CMOS; correlated quadruple sampling; noise suppression; high dynamic range

1 引言

科学级相机由于其低输出噪声,高灵敏度,宽广光谱响应,极好的线性度,高分辨率,以及高量子效率等技术优点^[1-2],在医学图像诊断,单分子成像,微光成像,暗弱小目标探测,天文观测和高清智能监控等技术领域发挥着重要作用。目前国内使用的科学级相机主要为科学级 CCD 相机,设计中模拟电路复杂,对模拟信号的驱动和采集都有较高的要求,大多为帧转移方式读出,帧频较低操作不灵活。相比于科学级 CCD 器件,科学级 CMOS 图像传感器具有低功耗,低成本,高帧频,高集成度,可控开窗读出等优点^[3],有利于实现小体积低能耗的相机系统。科学级 CMOS 图像传感器标准读出模式为卷帘模式,在该模式下可通过片内集成相关双采样电路较好地抑制噪声^[4]。而在一些科学研究中,需要相机工作在全局曝光模式下,此时一般的相关双采样技术将难以获得较好的效果,CMOS 相机在全局曝光模式下系统动态范围较低。本文选用一种科学级 CMOS 芯片 CIS-2521,通过分析其像素读出结构特点,以 FPGA 为核心处理单元设计了相关高速驱动电路和图像预处理功能,通过降低系统读出噪声和提高系统读出能力来获取高动态范围图像数据,并通过实验对成像性能进行了客观分析。

2 CIS-2521 参数与相机系统组成

CIS-2521 是 Fairchild 公司开发的科学级 CMOS 图像传感器芯片,具有高灵敏度和低噪声等特点,适用于在极弱光条件下获取高品质的图像 CIS-2521 的一些基本性能参数见表 1。

CIS-2521 的高动态范围性能实现表现在其具有较低的读出噪声和双通道可选增益操作,芯片内置的双增益可调放大器配合双 11 bit 列级

表 1 CIS-2521 基本参数性能

Tab.1 Basic parameters of CIS-2521

阵列尺寸	2 560(H) × 2 160(V)
像素大小	6.5 μm × 6.5 μm
最大帧频	100 fps(卷帘曝光) 50 fps(全局曝光)
AD 转换器位宽	11 bit X2
列级放大器	1x 或 2x (低增益通道) 10x 或 30x (高增益通道)
功耗	<2 W
满阱电荷	>30 000e ⁻
最小读出噪声	<2e ⁻ RMS(卷帘曝光)
暗电流	<35e ⁻ /pixel/sec
动态范围	15 000 : 1
峰值量子效率	>0.55

AD 转换器,可以同时输出在不同增益下采样的 11 bit 编码图像数据,通过数据融合可获得更高动态范围图像数据。基于 CIS-2521 设计的相机系统结构如图 1 所示。

相机系统采用单电源 12 V 供电,在板上转换为各个模块所需电压,选用 FPGA 搭载 DDR3 作

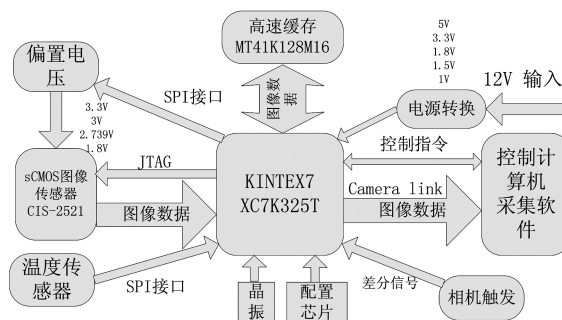


图 1 系统框图

Fig.1 Diagram of the system

为处理架构,其中 FPGA 主控芯片采用 Xilinx 公司 Kintex 7 系列的 XC7K325T,具有丰富的逻辑资源,可根据不同需求现场可编程,产生系统其余部件所需驱动控制时序,DDR3 采用 4 片 MT41K128M16 并联而成,共 1GB 容量,能够满足高速数据缓存的需求。系统工作流程为: FPGA 上电加载配置程序,接收控制计算机的控制指令,通过 SPI 接口设置偏置电压值,通过 JTAG 接口设置 sCMOS 工作模式, sCMOS 接收外触发信号后输出图像数据, FPGA 采集高速图像数据缓存并进行图像预处理,转换为标准 Camera Link Full 接口数据格式输出,控制计算机通过采集软件采集图像数据并显示。

3 相关四采样对 CMOS 器件噪声抑制

CMOS 图像传感器动态范围定义为最大非饱和信号值与最小可测信号值的比值^[5],在物理性质最大非饱和信号受到光电二极管的满阱容量限制,最小可测量的信号由系统读出噪声限制。对于 CIS-2521 芯片,像素满阱中有效电荷变化不大,如何通过设计相机驱动方式降低读出噪声将是提高系统动态范围的关键因素。

CIS-2521 芯片内部采用 5T 像素结构,内置双增益通道和相关双采样电路,光信号到数字信号的转换过程如图 2 所示。像素结构部分中由 M1, M2 晶体管控制光电二极管的曝光时刻和转移时刻,当 TX2 为高电平时光电二极管复位到参考电压;当 TX2 为低电平时,光电二极管开始工作,入射光子在光电二极管转换成电荷,而当 TX1 为高电平时,电荷被转移到节点电容 C_{fd} 上,

M3 可通过选通复位 C_{fd} 至参考电压, M4 为源级跟随器, M5 为行选通信号,当 M5 导通时信号被传输到列总线,经过两个不同增益的放大器后进入模拟存储区,可在此进行芯片内部模拟域相关双采样处理,之后经过两个 11 bit 的 ADC 转换器处理将模拟信号数字化,分别输出 11 bit 的格雷码数据供采集处理。

CIS-2521 的信号读出路径中引入的噪声可分为时间噪声和空间噪声^[6]。其中时间噪声表现为噪声随时间不同而变化,并且随像素的不同而不同,包括光电二极管处的光子散粒噪声 σ_{shot} ,暗电流噪声 σ_{Idark} ,像素的复位电流产生的复位噪声 σ_{reset} ,读出热噪声 σ_{tn} 和闪烁噪声 $\sigma_{1/f}$, ADC 量化噪声 σ_{ADC} 等。空间噪声则是噪声值随像素分布的差异而不同,但是不随时间变化而变化,也称 FPN(固定模式噪声)。 FPN 分为与光信号无关偏置型噪声 σ_{FPN_offset} 和随信号变化而变化增益型噪声 σ_{FPN_gain} 。系统中总的噪声可由式(1)表示^[7]:

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_{shot}^2 + \sigma_{Idark}^2 + \sigma_{reset}^2 + \sigma_{tn}^2 + \sigma_{1/f}^2 + \sigma_{ADC}^2 + \sigma_{FPN_offset}^2 + \sigma_{FPN_gain}^2. \quad (1)$$

一般对 sCMOS 图像传感器噪声分析中重点关注由 M3 的复位带来的复位噪声 σ_{reset} 影响,认为该噪声是限制光电二极管读出电路最主要噪声源^[8], A 点的复位噪声均方值为:

$$\overline{V^2(t)} = \frac{KT}{C_{fd}} e^{\left(-\frac{2t}{R_{off}C_{fd}}\right)}, \quad (2)$$

其中: R_{off} 是 M3 截止沟道电阻, $R_{off}C_{fd}$ 常数较大(约为 ms 级)将导致在短时间内节点电容 C_{fd} 上的噪声均方值不会发生较大变化。传统去除复位噪声的方法是采用相关双采样技术,在电荷转移到 C_{fd} 的前后短时间内对 C_{fd} 上电压各进行一次采样两次采样相减可去除复位噪声,相关双采样同时还能去除一部分偏置型噪声,并在一定程度上对读出热噪声和闪烁噪声进行抑制^[9-11]。

sCMOS 图像传感器标准读出模式为卷帘曝光模式^[12],每行的图像数据依次复位,曝光和读出如图 3(a),每一行复位(S1)和读出(S2)的间隔较短,约为 μs 级别,此时相关双采样电路可以达到很好的去噪效果。但是在某些场景下(如高速运动),卷帘曝光模式会导致拍摄图像变形,此时需要 sCMOS 图像传感器工作在全局曝光模式,全局曝光模式下所有像素统一曝光,然

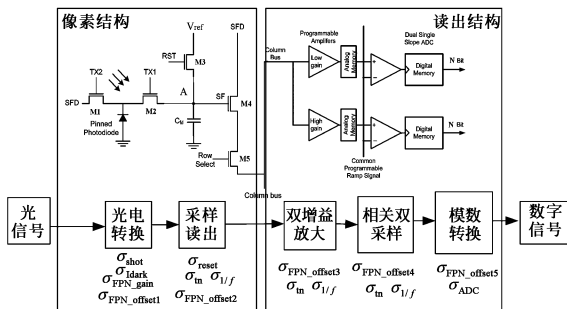
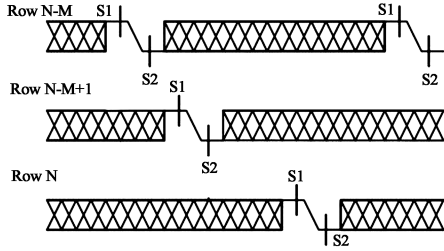


图 2 信号读出路径及引入噪声示意图

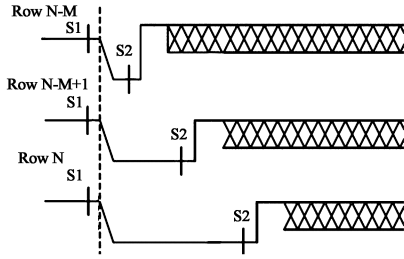
Fig.2 Route of signal reading and noise adding

后逐行等待读出如图 3 (b), 各行复位(S1)到读出(S2)的时间间隔不同, 对于高分辨率的图像传感器, 首尾行等待读出时间间隔相差可达 ms 级别, 这将导致相关双采样对复位噪声不能完全去除, 只能达到一定程度抑制的效果。另外相关双采样电路本身采用电容进行采样保持, 电容的差异性和后续电路的差异依旧会引入部分偏置型 FPN^[13]。



(a) 卷帘快门模式

(a) Rolling shutter mode



(b) 全局快门模式

(b) Global Shutter mode

图 3 卷帘快门与全局快门比较

Fig. 3 Comparison between rolling shutter and global shutter

本文设计采用相关四采样技术(CQS)对图像数据进行读出, 即利用芯片内部相关双采样结构完成两次模拟域相关双采样, 结合在 FPGA 内完成一次数字域的相关双采样对噪声进行抑制。相关四采样示意图如图 4 所示, S1r, S2r 构成一组复位帧的相关双采样, 用于读出复位后节点电容 C_{fd} 上噪声信号, 数据逐行进行双采样后将输出复位帧 I_{reset} , 然后在全局曝光模式下所有像素统一曝光和电荷转移, S1d, S2d 构成另一组相关双采样, 数据逐行双采样后将输出信号帧 I_{sig} , I_{sig} 中包含光电转换后信号分量和噪声。两帧数据相减得到相关四采样结果 I_{CQS} 。设 A 为放大器增益, K_{ADC} (V/DN) 为 ADC 转换器单位, SF_{cds} 为相关双采样后引入的偏置 FPN 分量 ($\sigma_{FPN_offset4}$, $\sigma_{FPN_offset5}$)。

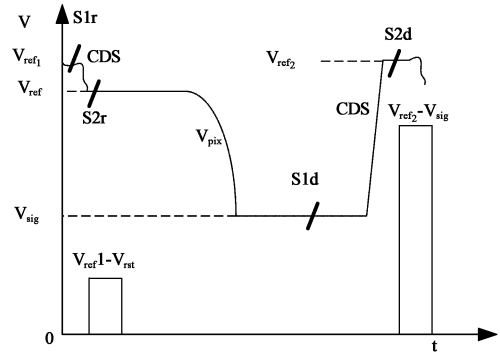


图 4 相关四采样原理

Fig.4 Principle of correlated quadruple sampling

$$I_{dark} = \frac{A(V_{ref1} - V_{rst}) + SF_{cds} + \sigma_1}{K_{ADC}}, \quad (3)$$

$$I_{sig} = \frac{A(V_{ref2} - V_{sig}) + SF_{cds} + \sigma_2}{K_{ADC}}, \quad (4)$$

$$I_{CQS} = I_{sig} - I_{dark} = \frac{A(V_{ref2} - V_{ref1} + V_{rst} - V_{sig}) + \sigma}{K_{ADC}}, \quad (5)$$

式(5)中 σ_1, σ_2 为除了 SF_{cds} 外各噪声总称, 假设参考电压无干扰, 即 $V_{ref1} = V_{ref2}$, 则 $V_{rst} - V_{sig}$ 即为读出信号分量, σ 中部分偏置型 FPN 已经被去除, 复位噪声, 闪烁噪声和读出热噪声被部分抑制。此时 I_{CQS} 可简单写作:

$$I_{CQS} = \frac{AV_s + \sigma}{K_{ADC}}. \quad (6)$$

相关四采样对噪声抑制实际效果如图 5 所示, 其中图 5(a)复位帧图像, 图 5(b)信号帧图像, 图 5(c)为在 FPGA 内部完成相关四采样后图像。复位帧中不包含信号信息, 采集的仅仅是之前分析的各种噪声叠加值, 以列向条纹最为明显, 信号帧包含场景信息, 但受到列向噪声影响, 图像可视性较差。图像帧中列向噪声已经基本去除, 图像上残留噪声为点噪声, 从人眼观察角度上看图像质量得到很大提高。

利用图像峰值信噪比 (PSNR) 来衡量图像帧与信号帧的差异有:

$$PSNR = 20 \log \left(\frac{\max(I)}{\sqrt{MSE}} \right), \quad (7)$$

$\max(I)$ 为图像输出最大数值, MSE 为图像均方差。设复位帧, 信号帧, 图像帧的均方差为 σ_r, σ_s , σ_1 , 由于图像之间为相减的运算, 所以有

$$\sigma_s^2 = \sigma_r^2 + \sigma_1^2. \quad (8)$$

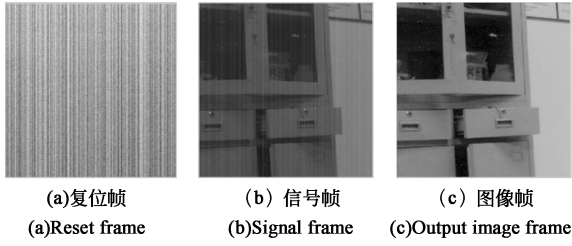


图 5 相关四采样对列向噪声抑制

Fig.5 Vertical denoising of correlated quadruple sampling

另外由于输出图像最大数值有 $\max(I) = \max(s)$, 于是有

$$I_{\text{PSNR}} - s_{\text{PSNR}} = 20 \log \left(\frac{\max(I)}{\sigma_1} \right) - 20 \log \left(\frac{\max(s)}{\sigma_s} \right) = 20 \log \left(\frac{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_r^2}}{\sigma_1} \right). \quad (9)$$

对于复位帧图像 σ_r 全部可视为噪声, 其中固定模式噪声居多, 每次采集复位帧图像并不一样, 但是 σ_r 的水平并不随积分时间和光照而变化, 仅在一定范围内波动。由于 $\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_r^2} / \sigma_1 > 1$, 所以图像帧较信号帧峰值信噪比有所提高, 实验中发现 σ_r 变化不大, 而 σ_1 受温度和光照的影响, 当 σ_1 较小时, $I_{\text{PSNR}} - s_{\text{PSNR}}$ 有较大取值, 以常温无光照条件下估计 σ_1 的最小值约为 1.5, σ_r 取值大致范围为 16~18, 采用相关四采样技术最大可提高图像峰值信噪比约 21 dB。图 5 中图像帧较信号帧峰值信噪比提高大约 3.91 dB。

4 高动态范围数据合成

成像系统动态范围不仅与最小读出噪声相关, 而且受到读出电路的读出能力影响, 高精度 ADC 较低精度 ADC 可以更精确量化出最小读出噪声, 但是采用高精度 ADC 会大大提高 sCMOS 图像传感器成本。CIS-2521 芯片内部集成了双 11 bit 位宽 ADC 转换器, 量化输出的双增益通道数据可在芯片外合成更高动态范围图像数据。

设满阱电荷对应电压幅值为 V_{full} , ADC 输入电压范围可通过调节设置为 $[0, V_{\text{full}}]$, 进入列总线信号为 $V_s \in [0, V_{\text{full}}]$, 单一增益通道放大倍数为 A , 其可选值为低增益通道 ($A=1$ or $A=2$) 和高增益通道 ($A=10$ or $A=30$), 则经 11 bit 位宽

ADC 量化后输出数据 I (向下取整) 为:

$$I = \begin{cases} 0 & V_s < \frac{V_{\text{full}}}{2048A} \\ \left\lfloor \frac{AV_s}{K_{\text{ADC}}} \right\rfloor & \frac{V_{\text{full}}}{2048A} \leq V_s \leq \frac{V_{\text{full}}}{A} \\ 2047 & V_s > \frac{V_{\text{full}}}{A} \end{cases}, \quad (10)$$

当 V_s 为最小值, 即为系统噪声时, 为将 V_s 量化成数字量读出, 至少需要满足 $V_s \geq V_{\text{full}} / 2048A$, 此时增益 A 取值越大对应可读出越小信号的数据。而当 V_s 为最大值 V_{full} 时, 要满足读出数据不饱和, 越小的 A 值可以读出对应越大信号的数据。以低增益通道 X1 ($A=1$), 和高增益通道 X10 ($A=10$) 的配置为例分析, 双通道输出数据均为 0~2047 数字量, 设 X1 通道输出最大值 2047 对应满阱电荷 30000e⁻, X1 通道的分辨能力为 30000/2048=14.6e⁻, 即单位数字量对应 14.6 个电子。X10 通道输出最大值 2047 对应电荷 3000e⁻, X10 通道分辨能力为 1.4e⁻, 即单位数字量对应 1.4 个电子。双通道输出量化数据与 C_{fd} 中电荷关系如图 6 所示。

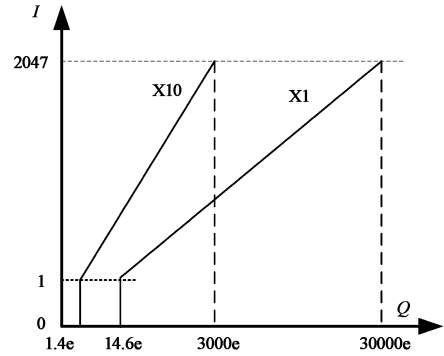


图 6 理想双增益通道比较

Fig.6 Comparison of ideal double gain channels

单一通道读出数据动态范围均为 2047 : 1, 而采用双通道读出数据的方式, 可读出数据动态范围为:

$$DR_{\text{sys}} = 20 \log \left(\frac{(\max(I_L) + 1) K_{\text{ADC}} / A_L}{(\min(I_H) + 1) * K_{\text{ADC}} / A_H} \right) = 20 \log \left(\frac{2048A_H}{A_L} \right), \quad (11)$$

式中 $\max(I_L)$ 是低增益通道输出最大数字量, 即 2047, $\min(I_H)$ 是高增益通道量化出最小有效信号量, 即 0。双增益通道读出动态范围的能力比

单通道读出动态范围能力提高 $20\log(A_H/A_L)$, 当 $A_H=10$ 且 $A_L=1$ 时, 读出动态范围的能力将提高 20 dB。对于列级放大器, 各列增益系数 A 并非常数, 对于单个像素 I_H 和 I_L 本身是含有噪声的数据量, 会导致出现 I_H 与 $A_K I_L$ 并不相等, 本系统设计中采用了一种曲线的方式拟合双增益通道数据如下:

$$I_{\text{HDR}} = \begin{cases} I_H, I_H < I_a \\ \frac{(I_b - I_H)}{I_b - I_a} I_H + \bar{A}_K \frac{(I_H - I_a)}{I_b - I_a} I_L, I_a \leq I_H \leq I_b \\ \bar{A}_K I_L, I_H > I_b \end{cases} \quad (12)$$

合成曲线规则设计为三段的形式, $[I_a, I_b]$ 为经验选取的数据衔接区间, 其中 $\bar{A}_K$ 为高低通道增益系数之比的均值, 用于将高低增益通道数据量纲统一。当选择高通道增益 X10, 低通道增益为 X1 时, 选取同一场景下双通道输出图像上对应的不同灰度值的多个 50×50 区域求取均值, 以区域均值做 X1 与 X10 关系图(图 7)。去除坏点后利用最小二乘法拟合出直线斜率的倒数作为 $\bar{A}_K$ 的估计值, 解得 $\bar{A}_K$ 值为 9.54, 为了方便 FPGA 内部数据计算, 实际应用中采取 $28/3 = 9.33$ 代替 9.54 进行曲线拟合, 此时低增益通道数据乘以拉伸倍数 28, 高增益通道乘以拉伸倍数 3, I_{HDR} 数据范围为 $0 \sim 57\,316$ 。采用 16 bit 数据格式输出, 拉伸本身并不会对相机动态范围有影响。

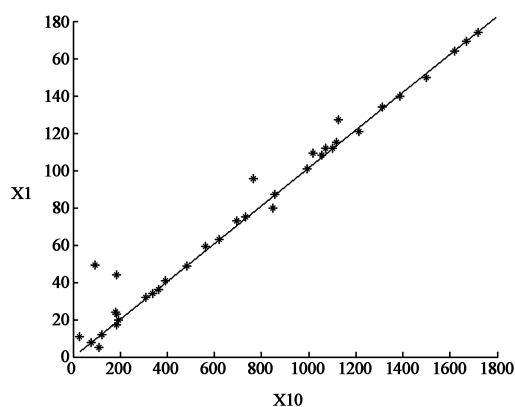


图 7 实际双增益通道增益系数比

Fig.7 Gain ratio of double gain channels

双增益通道数据合成效果如图 8 所示, 其中 (a) 为 X1 通道图像数据, 经过相关四采样后的图像列向噪声已经去除, 书柜橱窗和柜子内区域较

暗而不能辨识。(b) 为 X10 通道图像数据, 图像大部分区域已经饱和, 但是橱窗和柜子内部区域能较清楚辨识。(c) 为采用本论文提出拟合方法在 FPGA 内部合成高动态范围图像数据, 图像整体可视性较好, 局部在 (a) 中较暗的区域也能清楚辨识, 以图像均方根值作为读出噪声估计值计算图像 (c) 动态范围较图像 (a) 提高约 2.93 dB。



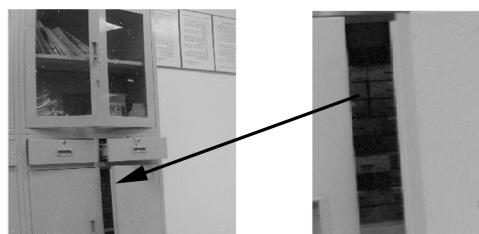
(a) 低增益通道图像

(a) Low gain channel image



(b) 高增益通道图像

(b) High gain channel image



(c) 合成高动态范围图像与细节

(c) Combining effect of high dynamic image and detail

图 8 高动态范围图像数据合成效果

Fig.8 Combining effect of high dynamic range image

5 sCMOS 相机软件设计流程

FPGA 内部的数据处理流程如图 9 所示。

从芯片输出的 287MHz 44 bit 原始数据, 进

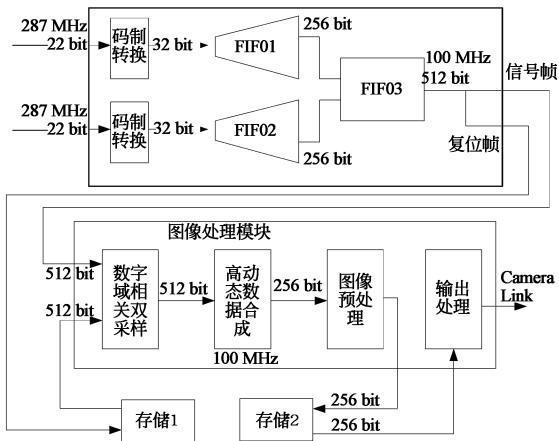


图 9 FPGA 数据处理流程图

Fig.9 Flow diagram of data processing with FPGA

入 FPGA 内部经过格雷码到二进制码的转换后, 单个通道像素灰度值调整为 16 bit 数据排列组合后送入 FIFO 缓存, 通过判断当前帧若为复位帧则送入 DDR3 缓存, 若为信号帧则提取缓存的复位帧数据实现数字相关双采样, 经过数字相关双采样后的双增益通道数据送入高动态范围数据合成模块, 生成高动态范围数据后进行一定规则(如中值滤波)图像预处理, 缓存在 DDR3 中, 调整图像数据输出格式后经过输出接口输出全局曝光模式下 $2560 \times 2160 \times 16$ bit, 50 帧/s 的图像数据。相机内部图像处理流程如图 10 所示。

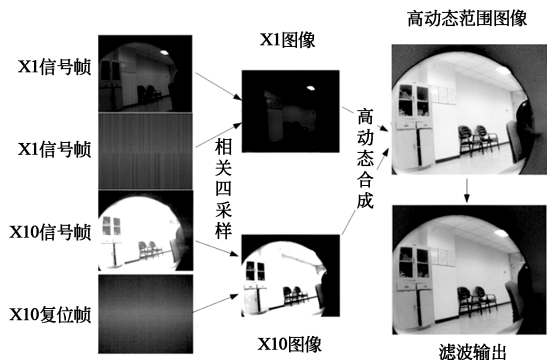


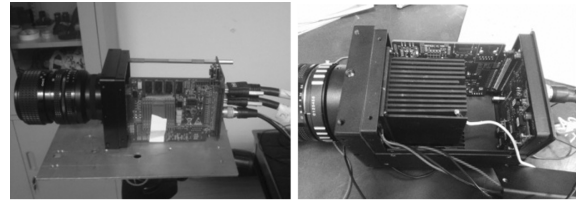
图 10 相机内部图像处理流程

Fig.10 Flow of image process in the camera

6 sCMOS 相机设计结果与成像分析

设计的相机系统如图 11(a)所示, 相机由三块电路板组成, 结构呈门字型, 中间板为 FPGA

控制处理板, 板板之间以高速连接器相连。图 11(b)为在(a)的基础上增加了二级半导体制冷片与散热片。



(a) sCMOS相机实物图

(a) sCMOS camera

(b) 增加制冷结构

(b) Camera with refrigerator

图 11 CMOS 相机设计实物图

Fig.11 Graph of the sCOMS camera

系统上电从配置芯片加载程序后, 采用上位机串口发送控制指令, 通过 Camera Link 接口获取图像数据进行显示, 系统在全画幅模式 (2560×2160) 下对实际场景进行了实时拍摄, 帧频为 50 fps, 输出像素深度 16 bit。图 12 为相机采集标准测试靶面结果。采集的测试图像清晰, 灰度层次分明, 分辨率高, 12 个灰度递增的条纹均能清晰辨别, 相机系统具有较高动态范围。

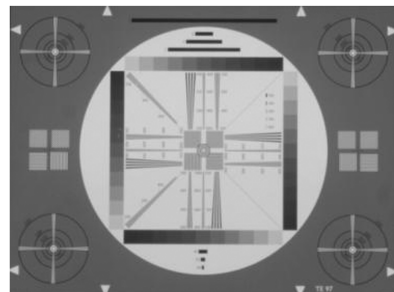


图 12 sCMOS 相机成像结果

Fig.12 Imaging result of sCOMS camera

客观上采用输出图像峰值信噪比来评价, 对输出高动态范围图像数据的相机系统。

$$\text{PSNR} = 20 \log \left(\frac{\max(I_{\text{HDR}})}{\sigma_{\text{HDR}}} \right), \quad (12)$$

计算中选取无光照区域均方根值作为 σ_{HDR} 的估计值, σ_{HDR} 中包含暗电流噪声, 产生与光电转换处的偏置型 FPN, 被抑制的闪烁噪声, 读出热噪声, 复位噪声。 σ_{HDR} 中除偏置型 FPN 外其余分量都与温度有关, 偏置型 FPN 噪声由基底偏置相减的方式进行去除, 其余噪声则考虑采用制冷方

式对其抑制。相机增加二级半导体制冷片与散热片,测试制冷对于相机性能的影响,在无光照情况下记录全画幅图像数据均值与标准差如表 2 所示。

表 2 制冷前后图像质量分析

Tab.2 Image quality analysis before and after refrigeration

实验条件	图像均值	σ_{HDR}
未制冷	101	41
半导体制冷	67	11

在制冷过程中,图像的均值下降,图像的标准差也逐渐减少。从制冷前后采集的图像(图 13)上看表现则是噪声点逐渐减少,在弱光照条件下的成像质量逐渐改善,图 13 所示图像均已做压缩

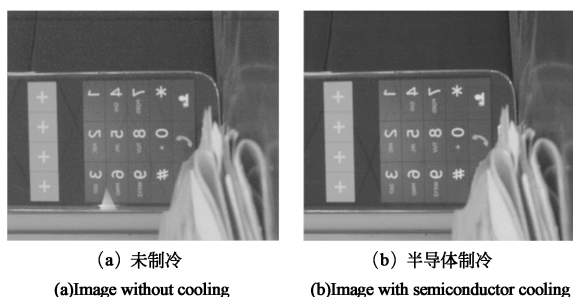


图 13 制冷对成像的影响

Fig.13 Effect of refrigeration to image's noise

显示,噪声有了明显的减少,实际大部分灰度值集中在图像低 8 位数据。

表 3 sCMOS 相机部分参数测试结果

Tab.3 Partial parameter test results of sCMOS camera

指标	单位	描述
转换系数	DN/e ⁻	1.6599
满阱	ke ⁻	34.53
线性误差	%	0.02
时域暗噪声	e ⁻	4.26
动态范围	dB	78.2

7 总 结

在分析了 CIS-2521 图像传感器的像素结构特点的基础上,设计了它的硬件驱动电路和 FPGA 图像去噪增强预处理程序,通过结合 CIS-2521 芯片内部模拟相关双采样与 FPGA 片内数字域相关双采样完成相关四采样算法,图像中人眼敏感的列向噪声已经去除,通过合成双增益通道数据,获取具有更高动态范围图像数据,常温下输出图像峰值信噪比达 62.9 dB,增加半导体制冷后相机输出图像峰值信噪比达到 74.3 dB。相机输出全局曝光模式下高清晰高动态范围图像数据,经测试系统动态范围达到 78.2 dB,基本满足科学研究中对高动态范围成像设备的需求。

参 考 文 献:

- [1] 罗通顶,李斌康,郭明安,等.科学级 CCD 远程图像采集系统[J].光学精密工程,2013,21(2):496-502.
LUO T D, LI B K, GUO M A, et al. Remote image acquisition system with scientific grade CCD [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2): 496-502. (in Chinese)
- [2] 潘明忠,刘玉娟,陈少杰,等.中阶梯光栅光谱仪 CCD 相机的设计[J].光学精密工程,2012,20(8):1725-1731.
PANG M Z, LIU Y J, CHEN S J, et al. Design of echelle spectrograph CCD camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(8): 1725-1731. (in Chinese)
- [3] 刘新明,刘文,刘朝晖.大面阵 CMOS APS 相机系统的设计[J].光子学报,2009,38(12):3235-3239.
LIU X M, LIU W, LIU Z H. Design of a large area array CMOS APS camera system [J]. *Acta Photon. Sin.*, 2009, 38(12): 3235-3239. (in Chinese)
- [4] 李云飞,司国良,郭永飞.科学级 CCD 相机的噪声分析及处理技术[J].光学精密工程,2005,13(S1):158-163.
LI Y F, SI G L, GUO Y F. Noise analyzing and processing for scientific grade CCD camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(S1): 158-163. (in Chinese)
- [5] 杨东来,胡晓东,李俊娜.基于 CMOS 图像传感器的多斜率积分模式[J].红外与激光工程,2012,41(6):1499-1502.
YANG D L, HU X D, LI J N. Multiple slope integration based on CMOS image sensor [J]. *Infrared Laser Eng.*, 2012, 41(6): 1499-1502. (in Chinese)
- [6] 龚学艺,黄思婕,曲荣升,等.CMOS 图像传感器时间域噪声分析及其应用研究[J].光学与光电技术,2013,11(1):

- 86-90.
- GONG X Y, HUANG S J, QU R S, *et al.* Time domain noise analysis of CMOS image sensor and its application [J]. *Opt. Optoelectron. Technol.* 2013, 11(1): 86-90. (in Chinese)
- [7] 杨涛, 吴孙桃, 郭东辉. CMOS 图像传感器电路噪声分析[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2012, 51(3): 321-326.
- YANG T, WU S T, GUO D H. Analysis of noise behavior in CMOS image sensor [J]. *J. Xiamen Univ. Nat. Sci.*, 2012, 51(3): 321-326. (in Chinese)
- [8] 付贤松. CMOS 图像传感器动态范围扩展技术的研究[D]. 天津: 天津大学, 2006.
- FU X S. Study on techniques to enhance the dynamic range of CMOS image sensors [D]. Tianjin: Tianjin University, 2006. (in Chinese)
- [9] 刘春香, 郭永飞, 李宁, 等. 多通道航天相机内部的图像实时合成压缩[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2013, 43(6): 1680-1684.
- LIU C X, GUO Y F, LI N, *et al.* Real-time composing and compression of image within multi-channel spaceborne camera [J]. *J. Jilin Univ. : Eng. Technol. Ed.*, 2013, 43(6): 1680-1684. (in Chinese)
- [10] 魏巍, 李志慧, 赵永华, 等. 基于智能相机的混合交通流检测方法[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2013, 43(4): 866-870.
- WEI W, LI Z H, ZHAO Y H, *et al.* Developing a smart camera for mixed traffic flow detection [J]. *J. Jilin Univ. : Eng. Technol. Ed.*, 2013, 43(4): 866-870. (in Chinese)
- [11] 和文娟. CMOS 图像传感器的噪声分析及图像处理[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- HE W J. Noise analysis and image processing of CMOS image sensor [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)
- [12] 王华, 曹剑中, 王华伟, 等. 基于估计方法的 CMOS 图像传感器列固定模式噪声校正方法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(7): 1928-1932.
- WANG H, CAO J Z, WANG H W, *et al.* Column fixed pattern noise correction of the CMOS image sensor based on estimation method [J]. *Infrared Laser Eng.*, 2013, 42(7): 1928-1932. (in Chinese)
- [13] 刘智, 柴华, 李娜娜. CMOS 图像传感器中卷帘式快门特性及其应用[J]. 光学精密工程, 2009, 17(8): 2017-2023.
- LIU Z, CHAI H, LI N N. Shutter mode of CMOS image sensor and its application [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8): 2017-2023. (in Chinese)
- [14] European Machine Vision Association. EMVA Standard 1288 Release 3.0 Standard for characterization of image sensors and cameras [DB/OL]. (2010-11-29). <http://www.emva.org/wp-content/uploads/EMVA1288-3.0.pdf>.

作者简介: 孙宏海(1980—), 男, 吉林长春人, 博士, 副研究员, 主要从事先进光电成像技术及高速数字图像实时处理系统的研究。E-mail: sunhh@ciomp.ac.cn