

文章编号:1007-2780(2019)01-0024-09

基于 GL0816 传感器的高速线阵 CMOS 相机系统设计

张军亮*, 戚 涛, 李 晖, 乔 健

(凌云光技术集团有限责任公司 相机开发部, 北京 100094)

摘要:为了满足印刷等高端工业检测中物体快速运动,需要大幅面、高行频、高分辨率图像采集等要求,研发了一款微米级高分辨率、高速线阵工业相机。首先,介绍了高行频、高分辨率国产 CMOS 图像传感器 GL0816 的功能与特点。然后,基于该芯片设计了一套高速大幅面高分辨率线阵工业相机系统,该系统采用 FPGA 作为整个系统的控制核心,以 DDR3L SDRAM 作为图像缓存器,以 GigE vision2.0 协议为输出标准,以 SFP+ 作为高速图像输出接口。最后,搭建相机系统测试环境,对所设计的相机进行系统测试。结果表明:该相机系统行分辨率为 8 192,可连续采集 2 000 行作为一帧图像输出,行频为 50 kHz,动态范围为 57.32 dB,信噪比为 40.95 dB,具有实时图像采集功能。该相机系统具有大幅面、高帧频、高分辨率、高信噪比、宽动态范围等优点,适用于印刷检测行业快速运动目标捕获成像及图像实时显示。

关键词: CMOS 图像传感器;高分辨率;线阵;FPGA;GigE vision2.0

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20193401.0024

Design of high speed linear CMOS camera system based on GL0816 sensor

ZHANG Jun-liang*, QI Tao, LI Hui, QIAO Jian

(LUSTER LightTech Group Co. Ltd., Beijing 100094, China)

Abstract: In order to meet the requirements of high-speed motion, high-frequency, large-scale, high-resolution image acquisition in high-end industrial detection such as printing and so on, a micron-scale high-resolution, high-speed linear array industrial camera was developed. Firstly, the function and characteristics of the high frequency and high resolution domestic CMOS image sensor GL0816 were introduced. Then, a high-speed, large-scale and high-resolution linear array industrial camera system was designed based on the chip. The system used FPGA as the control core of the whole system, DDR3L SDRAM as the image buffer, GigE vision 2.0 protocol as the output standard, and SFP+ as the high-speed image output interface. Finally, a camera system test environment was built to test the designed camera. The results show that the system has a line resolution of 8 192, and can continuously capture 2 000 lines as an output frame. The line frequency is 50 kHz, the dynamic range is 57.32 dB, and the signal-to-noise ratio is 40.95 dB. It has real-time image acquisition function. The camera system has the advantages of high frame frequency, high resolution, large size, high signal-to-noise ratio and wide dynamic range. It is suitable for capturing, imaging and real-time display of fast

收稿日期:2018-09-17;修订日期:2018-10-13.

基金项目:国家重大仪器专项(No.2013YQ140517)

Supported by National Major Instrument of China(No.2013YQ140517)

* 通信联系人, E-mail: zhangjunliang2008@163.com

3 相机系统总体方案设计

3.1 相机系统的性能指标

本相机系统是完成印刷质量检测视觉系统的图像采集核心单元,它的性能指标关乎视觉系统方案的应用场景。综合当前印刷及工业检测市场对高分辨率高速相机的需求,结合 GL0816 图像传感器的性能参数,本相机系统的性能关键指标如表 2 所示。

表 2 相机系统关键技术指标
Tab.2 Key technical indicators of camera system

技术指标	参数
分辨率	8 322(H)×16(V)
最大行频	50 kHz@8K RGB
像元尺寸	5 μm×5 μm
数据格式	10 bit
数据接口	10GigE vision SFP+
动态范围	58 dB
信噪比	41 dB

3.2 相机系统架构

基于图像传感器 GL0816 的高分辨率高速线阵相机由相机成像模块、相机控制模块、相机接口模块等 3 部分组成,如图 2 所示。

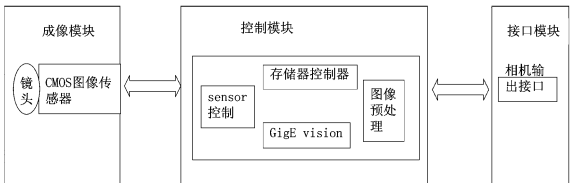


图 2 GL0816 相机系统框图
Fig.2 GL0816 camera system block diagram

相机采集模块主要有镜头可 CMOS 图像传感器构成,镜头卡口采用 M58 接口,镜头结合印刷检测需求,选用施耐德 1068013 型手动可变焦距镜头,工作距离 100 cm,光信号通过镜头射入到 CMOS 图像传感器,完成光信号到电信号的转换。相机控制模块采用 FPGA 作为主控制单元,为图像传感器提供驱动时序及控制信号,完成图像采集。相机存储模块挂载 2 组 DDR3L

SDRAM,用作数字图像处理过程中图像缓存。相机采用 GigE vision 标准协议,输出接口采用 2×10 Gb/s SFP+ 接口,完成高分辨率实时图像传输。

3.3 相机成像模块

3.3.1 CMOS 图像传感器驱动

相机的成像模块由镜头和 CMOS 图像传感器组成,CMOS 图像传感器接收被摄物体的光信息,利用光电效应将光信息转换成电信息,再通过 CMOS 内部集成的 ADC(Analog to Digital Converter)转换将拍摄的信息以数字量传给核心控制单元 FPGA。

CMOS 图像传感器要能正常出图,正确的驱动时序必不可少。本相机系统的驱动时序通过 XILINX 厂商的 XC7K325T-2FFG900IFPGA 产生。GL0816 的驱动时序分为积分阶段(Integration Phase)、(Frame Overhead Time, FOT)帧转移阶段、读阶段(Read Phase)和空阶段(Black phase)时序,曝光模式如图 3 所示。

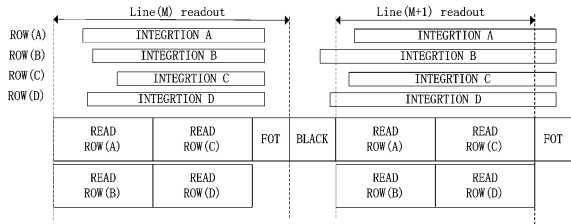


图 3 4 线曝光模式
Fig.3 Exposure in 4-line mode

图 3 中,曝光过程可分为如下几个阶段:

(a)积分阶段:该阶段像素点完成光子的收集,持续时间长短是依据曝光时间调节的。

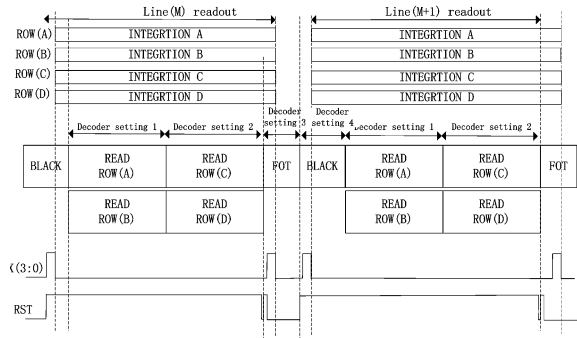


图 4 4 线模式最大行频曝光时序
Fig.4 Exposure timing under max line frequency in 4 line mode

(b) 帧转移阶段:该阶段完成像素信号的采样的转移,该阶段的持续时间依据时序而定。

(c) 读阶段:包括像素数据的信号放大,信号量化,和信号输出。

(d) 空阶段:根据行频和曝光时间,额外插入的空白时间。

4 线模式最大行频曝光时序如图 4 所示。

图 4 中,当 RST 保持高电平期间,TX[3:0] 的下降沿为积分开始。当 RST 保持低电平期间, TX[3:0] 的下降沿为积分结束。如果要加大曝光时间,在帧转移 FOT 阶段之后,可以加入 BLACK 空阶段。图 5 为带有 10 bit ADC 的读阶段时序图。

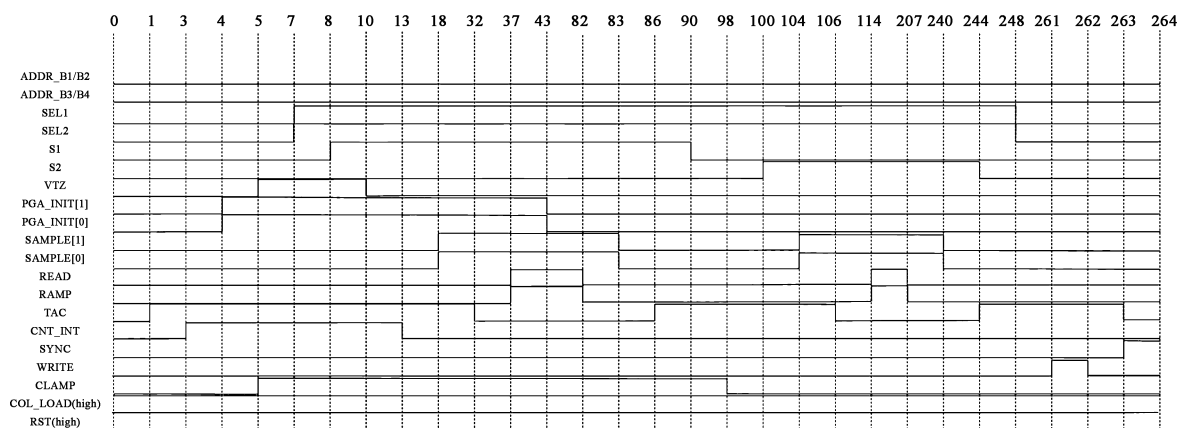


图 5 4 线 10 bit 模式读阶段时序图

Fig.5 READ phase timing in 4 line 10 bit mode

图 5 中,左侧信号为驱动 GL0816 的读阶段控制信号,时序图给出了不同时刻各信号所需的电平及持续时间。在 4-line 10 bit 模式下,一个完整的读阶段需要持续 264 个 CLE_SEQ 时钟单元。图 6 为带有 10 bit ADC 的 FOT 阶段时序图。

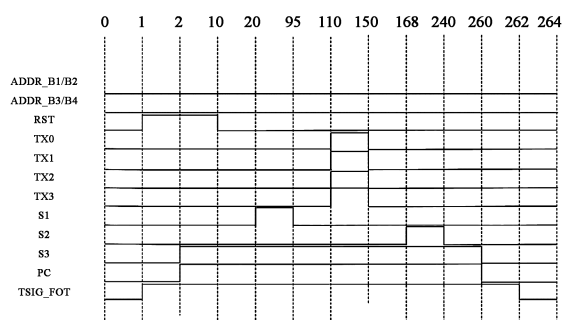


图 6 4 线 10 bit 模式 FOT 阶段时序图

Fig.6 FOT phase timing in 4 line 10 bit mode

图 6 中,左侧信号为驱动 GL0816 的帧转移阶段控制信号,时序图给出了不同时刻各信号所需的电平及持续时间。在 4-line 10 bit 模式下,一个完整的帧转移阶段也需要持续 264 个 CLE_SEQ 时钟单元。

3.3.2 图像数据的输出格式

由于传感器的流水线特性,像素采样和数据

输出之间有一个延时。即输出第 M 行像素数据时,也在进行第 $M+1$ 行积分,如图 7 所示。

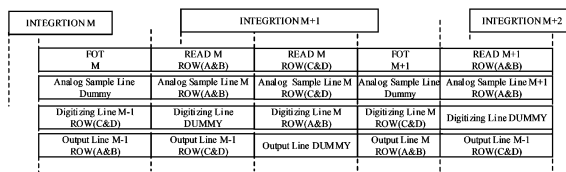


图 7 4 线模式流水线特性

Fig.7 Pipeline characteristic in 4 line mode

4 线模式输出时,第一个读阶段,ROW(A)和 ROW(B) 分别从左侧和右侧数据链路读出。ROW(C)和 ROW(D)在第二个读出阶段从左右两侧数据链路通道读出。4 线模式的数据输出形式,如图 8 所示。比如:在 4-line 模式下,设置总线选择寄存器 REG_PIX_SEL1_EN(D(47:32))为二进制 0000 0001 0000 0001, REG_PIX_SEL2_EN(D(63:48))为二进制 0001 0000 0001 0000, ROW(A)、ROW(B)、ROW(C)、ROW(D)将被选择; ROW(A)、ROW(B)的像素数据将从左侧 33 个 LVDS 数据通道读出, ROW(C)、ROW(D)的像素数据将从右侧 33 个 LVDS 数据通道读出。同时,图 8 数据输出阶段还需进行数据通道校准及无效像素输出等设置。

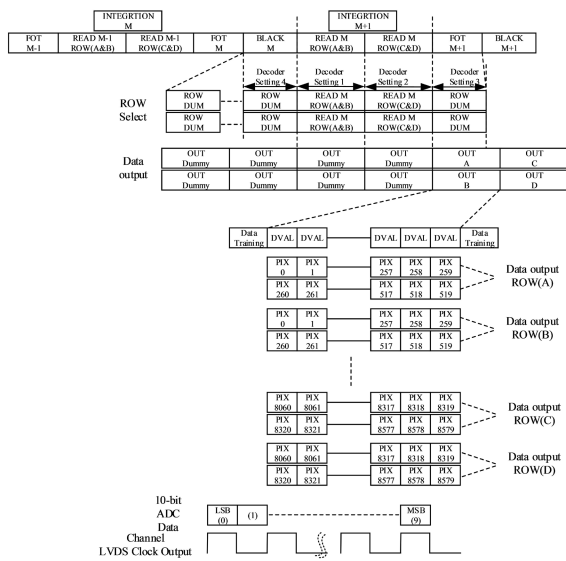


图 8 4 线模式数据输出形式

Fig.8 Data output format for 4-line mode

GL0816 对电源的需求比较复杂,偏置电压较多。4 线输出模式所需电源说明如表 3 所示。

由于所需的偏置电压较多,模拟数字电源同

表 3 GL0816 图像传感器电压说明

Tab.3 Power specification of GL0816 image sensor

电源名称	电源功能	电压典型值/V
VDD33A	模拟电源	3.3
VDD20D	数字电源	2.0
VDD22AD	ADC 电源	2.2
VDDPLL	锁相环电源	2.0
VDDPIX	像素电源	3.0
VTXH	像素转移门高电压	3.3
VTXL	像素转移门低电压	0
VPIX_PCH	像素控制信号高电压	0.62
VRH	行驱动高电压	3.3
VRL	行驱动低电压	0
VSWH	像素控制信号高电压	3.1
VSWL	像素控制信号低电压	0
VREF	放大器参考电源	1.26
VRS	行偏置电压	1.26
VPC	列偏置电压	1.6
CLAMP	放大器的钳位偏置电压	3.2

时存在。表 3 中,VDD33A 为模拟电压,在电源拓扑设计时,通过 100 nF 的电容器将其与其他数字电源隔离,减小数字电源对模拟电源的干扰。由于图像传感器需要多路偏置电压,偏置电压供电方案采用 DAC (Digital to analog converter)+射极跟随器,DAC 通过 IIC 配置输出多路数字电压,经过设计跟随器进行缓冲隔离,供给偏置电源。

3.4 相机控制模块

FPGA 作为现场可编程逻辑器件,具有灵活、可重构等特点。相机控制系统和图像传感器驱动时序共用同一块 FPGA,其中型号为 XC7K325T-2FFG900I。控制系统框图如图 9 所示,FPGA 软核 Micro Blaze 通过 SPI 总线配置 SENSOR 寄存器、上电加载配置 FLASH 中 FPGA 配置文件、FPGA 正常运行时读写数据 FLASH。FPGA 片外挂载两组 DDR3L SDRAM 芯片,其中一组挂载 FPGA HP BANK 实现 GigE vision 协议 8 Gb 重传机制,另外一组 DDR3 可用于图像预处理算法。FPGA 在 2 个 10 Gb/s SFP+接口上采用 GigE vision 协议与上位机数据传输与命令交互。FPGA 内部逻辑主要划分几个逻辑单元:(1)数据处理单元,主要实现产生 SENSOR 驱动信号与数据接收、按照 GF8K 整体需求进行对图像数据处理功能。(2)图像数据按照 GigE vision 协议传输单元,该单元主要实现 GigE vision 协议,将图像预处理算法处理后图像进行打包成 GigE vision 协议数据格式,并通过 SFP+接口输出。(3)逻辑参数配置与控制单元,该单元主要采用 Micro Blaze 作为系统的控制核心,实现包括与上位机实现指令交互、参数管理、监控相机温度过压保护状态等功能。

为满足需求,DDR3L 芯片的选型主要基于两

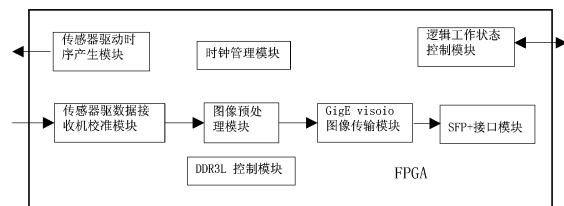


图 9 GL0816 相机控制系统功能框图

Fig.9 GL0816 camera control system functional diagram

点:内部容量和工作频率。考虑到 GL0816 的输出数据率很高,为确保完整的接收和储存高速的数据流,在选择 DDR3L 芯片时须注意频率和带宽参数。本设计最终选择 Micron 公司的 MT41K256M16HA,其单片存储容量为 4 Gb,位宽 16 bit,数据传输速率最高为 1 600 Mb/s,可满足

足系统帧频实时监控需求。

3.5 相机接口模块

相机系统输出接口完成图像数据输出及上位机显示。由于相机成像数据量较大,对输出接口实时传输速度要求也较高。常见的工业相机接口见表 4。

表 4 高速相机常用接口对比

Tab.4 High-speed camera interface comparison

接口类型	10-GigE Vision	Camlink HS	CoaX Press	Camlink 2 FULL
最高带宽	N×10 Gb/s	N×3.125 Gb/s(电) N×10Gb/s(光)	N×6.25 Gb/s	12.8 Gb/s
协议支持	GigEVision2.x	CLHS_Release_v1	CXP-001-2015	自定义协议
易用性	1>光纤传输,安装简单,折弯半径小于 2 cm,现场布线灵活;	1>电缆传输,折弯半径较大,现场布线有空间要求;	1>仅支持电缆传输,折弯半径较大,现场布线有空间要求;	1>仅支持电缆传输,折弯半径较大,现场布线有空间要求;
	2>在协议基础上功能扩展性强;	2>光纤传输,安装简单,折弯半径小于 2 cm,现场布线灵活;		
	3>光接口可选配光模块或光转电光模块,适应不同接口采集卡应用;	3>在协议基础上功能扩展性中;	2>在协议基础上功能扩展性差;	2>功能扩展性差;
可靠性	1>光纤传输,抗电磁干扰能力强;	1>电缆传输,抗电磁干扰能力相对弱;	1>抗电磁干扰能力相对弱;	1>抗电磁干扰能力相对弱;
		2>光纤传输,抗电磁干扰能力强;		
	2>有数据重传和错误校验机制,数据接收更稳定可靠;	3>有数据重传和错误校验机制,数据接收更稳定可靠;	2>有数据错位校验机制,但无重传机制,发生错误,无法消除;	2>无数据重传和错误校验机制;
市场成熟度	借用通信行业成果,成熟度高,	图像视觉行业内使用,成熟度低。	图像视觉行业内使用,成熟度中。	图像视觉行业内使用,成熟度低。
	风险小。	现仅 DALSA 使用。	业内有十余个商用案例。	现仅个别厂家使用。

通过表 4 相机接口特点的对比,结合系统性能指标的要求,选择 10 GigEvision 作为图像输出接口协议,选择高密度、低功耗、低成本的 SFP+ 作为输出接口,可满足 8K 像素 50 kHz 行频的相机实时传输高分辨率高速图像数据的要求。

4 测量实验与结果

4.1 分辨率测试

对所设计相机系统进行分辨率测试实验,实验环境如图 10 所示。



图 10 相机系统分辨率测试

Fig.10 Camera system resolution test

测试环境包含被测试相机(含镜头),测试用光源,靶标,用于控制行频的运动轨道,及上位机。

系统过程中,相机曝光时间设置为 $80 \mu\text{s}$,行频设置为 50 kHz ,系统通过 DDR3L 缓存 CMOS 图像传感器所采集到的图像,通过 SFP+ 图像传输到上位机显示。所采集到的靶标如图 11 所示。

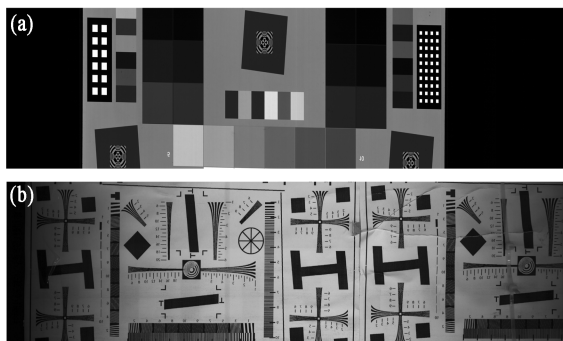


图 11 (a) 相机系统图卡测试;(b) 相机系统靶标测试。

Fig.11 (a) Camera system PIC Card test; (b) Camera system target test.

图 11(a)为图卡测试,图 11(b)为靶标测试。测试图表明,相机系统能对行频 50 kHz 、每行分辨率 $8\ 192\ 2\ 000$ 行一帧的图像进行清晰成像。

4.2 信噪比与动态范围测试

根据 EMVA1288 测试标准^[9],对所设计的相机系统在 4-line10 bit 输出模式,未开启图像预处理算法时,进行信噪比和动态范围进行测试,测试实验环境如图 12 所示。

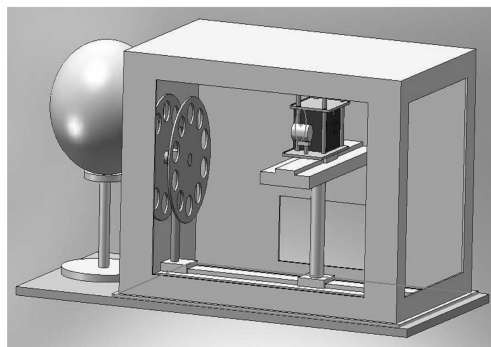


图 12 相机系统信噪比动态范围测试

Fig.12 Camera system SNR and DR test

测试环境包含被测试相机(不含镜头)、积分球、暗室、导轨运动系统及上位机。

搭建测试环境,采集明场、暗场图像。

(1)信噪比的测试方法如下:

(a)采集明场,暗场环境下不同曝光时间的数字信号均值 μ_y 、 $\mu_{y,\text{dark}}$ 。

(b)计算方差 σ_y ,带入式(1)计算不同曝光时间的信噪比 SNR 大小。

$$\text{SNR} = \frac{\mu_y - \mu_{y,\text{dark}}}{\sigma_y}, \quad (1)$$

式中: μ_y 为传感器输出的数字信号均值, $\mu_{y,\text{dark}}$ 暗场时传感器输出的数字信号均值, σ_y 为传感器输出的数字信号的方差。

(2)动态范围的测试方法如下:

(a)找出饱和输出均值 $\mu_{y,\text{sat}}$ 和信噪比 $\text{SNR} = 1$ 时的输出均值 $\mu_{y,\text{min}}$ 值。

(b)找出暗场饱和输出均值 $\mu_{y,\text{dark,sat}}$ 和信噪比 $\text{SNR} = 1$ 时的暗场输出均值 $\mu_{y,\text{dark,min}}$ 。

(c)带入式(2)计算动态范围 DR。

$$\text{DR} = \frac{\mu_{y,\text{sat}} - \mu_{y,\text{dark,sat}}}{\mu_{y,\text{min}} - \mu_{y,\text{dark,min}}}, \quad (2)$$

式中: $\mu_{y,\text{sat}}$ 为传感器输出的数字信号饱和输出均值, $\mu_{y,\text{min}}$ 为信噪比 $\text{SNR} = 1$ 时的输出值均值, $\mu_{y,\text{dark,sat}}$ 为暗场时传感器饱和输出均值, $\mu_{y,\text{dark,min}}$ 为暗场 $\text{SNR} = 1$ 时,传感器输出均值。

通过公式(2)得到表 5 所示的相机系统信噪比和动态范围。

表 5 相机系统信噪比和动态范围性能

Tab.5 Camera system SNR and dynamic range performance indicators

项目	R 分量	G 分量	B 分量	mean	单位
总增益	0.067 2	0.067 2	0.066 7	0.067 0	DN/e ⁻
随机噪声	1.280	1.247	1.271	1.266 2	DN
	19.05	18.56	19.06	18.885 1	e ⁻
饱和输出	935.57	932.35	922.20	930.041 2	DN
	13.92	13.87	13.82	13.871 2	ke ⁻
	876.92	899.49	882.02	886.144 0	DN
	13.05	13.38	13.22	13.216 6	ke ⁻
动态范围	730.73	747.67	725.47	734.622 4	X(倍数)
	57.28	57.47	57.21	57.320 6	dB
	684.92	721.32	693.85	700.032 6	X(倍数)
	56.71	57.16	56.83	56.900 3	dB
最大信噪比	110.76	112.75	111.01	111.508 9	X(倍数)
	40.88	41.04	40.91	40.945 9	dB

由表 5 可知:所设计的相机系统最大信噪比 40.945 9 dB,最大动态范围 57.320 6 dB。满足印刷等工业检测市场线阵相机的需求。

5 结 论

本设计将 GPIXEL 公司的 GL0816 型 CMOS 图像传感器运用在微米级高分辨率高速线阵相机系统中,与国内外其他相机相比在行分

辨率行频及高速实时显示方面都有很大提升;基于 GL0816 传感器芯片构建的相机采集系统采用 FPGA 作为系统控制核心,以 GigE vision2.0 协议为输出标准,SFP+作为相机接口,行分辨率 8 192,连续采集 2 000 行,行频 50 kHz;动态范围 57.32 dB,信噪比 40.95 dB。在高速相机内部,挂载大容量 DDR3L SDRAM 作为图像缓存器,通过 SFP+在上位机实时显示采集图像。本高速相机系统可广泛应用于印刷等高端工业检测行业。

参 考 文 献:

- [1] 徐冬冬,张宇,聂婷,等.小型 CMOS 相机系统设计及其硬件实现[J].西安电子科技大学学报:自然科学版,2016,43(4): 117-122.
XU D D, ZHANG Y, NIE T, *et al.* Design and hardware implementation of the small-size CMOS camera system [J]. *Journal of XiDian University*, 2016, 43(4): 117-122.(in Chinese)
- [2] 李方宁,王延杰,张涛,等.基于 AM41V4 传感器的高清高速 CMOS 相机系统设计[J].液晶与显示,2015,30(3): 492-498.
LI F N, WANG Y J, ZHANG T, *et al.* Design of high-speed and high-resolution CMOS camera acquisition system based on AM41V4 sensor [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015,30(3): 492-498. (in Chinese)
- [3] 周光宇,程萍.基于 FPGA 的 CMOS 工业相机设计[J].现代电子技术,2017,40(22): 134-136.
ZHOU G Y, CHENG P. design of CMOS industrial camera based on FPGA [J]. *Modern Electronics Technique*, 2017,40(22):134-136. (in Chinese)

- [4] 罗潇磊. 基于 GigE 接口的轻小型相机研究[D].北京:中国科学院大学,2016.
LUO X L. Research of light small camera based on GigE interface [D]. Beijing:University of the Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)
- [5] 张克寒,李明伟.高清 CMOS 图像传感器多通道数据传输系统设计[J].仪表技术与传感器,2017,(2): 54-57.
ZHANG K H, LI M W. Design of multi-channel data transmission system for high definition CMOS image sensor [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2017(2):54-57.(in Chinese)
- [6] 周围,陈洋,刘泽,等.基于 AM3354 的 CMOS 工业相机的设计和实现[J].半导体光电,2016,37(1): 142-145.
ZHOU W, CHEN Y, LIU Z, *et al.* Design and implementation of CMOS industrial cameras based on AM3354 [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2016,37(1):142-145. (in Chinese)
- [7] 苏宛新.一种高帧频 CMOS 图像传感器系统设计[J].液晶与显示,2013,28(6): 955-962.
SU W X. Design of high frame frequency CMOS image sensor system [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013,28(6): 955-962. (in Chinese)
- [8] 金浩文.基于高清 CMOS 相机的大市场目标探测系统设计 [D].西安:西安电子科技大学,2017.
JIN H W. A Design of wide field target detection system based on high definition CMOS [D]. Xi'an:XIDIAN University, 2017. (in Chinese)
- [9] 孙宏海,何舒文,吴培,等.高动态科学级 CMOS 相机设计与成像分析[J].液晶与显示,2017,32(3): 240-248.
SUN H H, HE S W, WU P, *et al.* Design and Imaging analysis of high dynamics scientific CMOS camera [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2017, 32(3): 240-248 . (in Chinese)
- [10] 刘则洵,万志,李宪圣,等.时间延迟积分 CCD 空间相机信噪比的影响因素[J].光学 精密工程,2015,23(7): 1829-1837.
LIU Z X, WAN Z, LI X S, *et al.* Influence factors on SNR of TDI CCD space camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(7): 1829-1837. (in Chinese)

作者简介:



张军亮(1988—),男,陕西岐山人,硕士,工程师,2016 年于西安科技大学获得硕士学位,主要从事机器视觉及工业相机方向的研究与开发。E-mail: zhangjunliang2008@163.com