

文章编号 1004-924X(2018)02-0471-09

紫外遥感仪器高速 CMOS 成像电子学系统

张 恒^{1,2}, 马庆军^{1*}, 王淑荣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. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:基于长光辰芯公司的背照式 CMOS 探测器 GSENSE400 和 Xilinx 公司的 Virtex-4 FPGA, 设计了紫外遥感仪器高速 CMOS 成像电子学系统, 包括探测器驱动电路、低噪声偏置电源电路及时序控制单元等。在接收高速图像数据时, 针对传统的通道训练方法只考虑了线路上的随机性抖动而没有考虑固定性抖动的问题, 提出了一种新的训练策略, 增加了对采样数据正确性的判断, 提高了对数据眼图有效窗口识别的准确度。为了克服在随后的图像数据传输过程中由于温度变化和电压漂移引起的采样点的再次偏移, 提出了一种实时窗口监视算法, 在不影响数据正常传输的情况下, 利用监视通道实时监测采样点与有效窗口左右边界的距离, 根据需要及时调整线路延时, 使采样点始终位于比有效窗口更小的一个安全采样窗口内, 由此保证了图像数据长时接收的高可靠性。设计的高速 CMOS 成像电子学系统工作稳定, 输出图像数据率最高可达 2.4 Gb/s, 读出噪声为 $1.72e^-$, 动态范围 94 dB, 满足载荷的任务需求。

关键词:紫外遥感仪器; CMOS 成像电子学; 驱动电路; 数据眼图; 实时窗口监视

中图分类号: TH744.1; TN386.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182602.0471

High speed CMOS imaging electronics system for ultraviolet remote sensing instrument

ZHANG Heng^{1,2}, MA Qing-jun^{1*}, WANG Shu-rong¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

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

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

Abstract: For ultraviolet remote sensing instrument, a CMOS spectral imaging system based on the CMOS image sensor GSENSE400 produced by Gpixel company and Virtex-4 FPGA produced by Xilinx company was realized, including driving circuits, bias and the timing control unit. When receiving the high-speed data, the conventional LVDS training method only take into account the random jitter and ignore the sample error caused by deterministic jitter. Therefore, a new training algorithm was established to improve the accuracy of transition identification by increasing a judgment of sample data correctness. A real-time window monitor method was also presented to avoid the drift of temperature and voltage in aerospace application without affecting the data transmission. By monitoring the distance

收稿日期: 2017-11-03; 修订日期: 2018-01-19.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 41575023, No. 41105014)

between sampling edge and the edges of data window and readjusting the delay of the data paths as soon as the window enter the transition, the method held the sampling edge in the safe sampling window and ensured the high reliability of long time data receiving. The system designed is stable and reliable, the highest image data rate is 2.5 Gb/s, the temporal noise is $1.72e^-$, the dynamic range is 94 dB, satisfies the requirement of the space load.

Key words: ultraviolet remote sensing instrument; CMOS spectral imaging system; driver circuit; data eye; real-time window monitor

1 引言

全球环境问题日趋严重,化石燃料燃烧产生的温室气体导致臭氧层破坏、气候变暖,二氧化硫和二氧化氮等会导致呼吸疾病和肺部损伤^[1]。因此,对大气环境的保护和对臭氧及大气痕量气体的监测十分必要。紫外遥感仪器通过获取大气紫外波段高分辨率的天底和临边光谱数据,反演得到全球臭氧、二氧化硫和二氧化氮柱总量和大气臭氧垂直结构,可以快速、实时、大范围地监测大气环境污染和变化,以便及时制定处理措施,减少大气污染所造成的损失,具有巨大的社会和经济效益^[2-4]。

大动态范围、低噪声探测器是探测仪的关键技术之一。性能优良的 CCD(Charge-coupled Device)探测器一直是光谱成像领域的首选^[5-7],然而随着探测器面阵规模和帧频的增大,CCD 的成本、功耗激增,其应用受到制约^[8]。目前,CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor)探测器的成像性能已接近或超越 CCD,并在帧频、集成度、功耗等方面优势明显。此外,在光谱成像应用中,CMOS 不会产生拖尾现象,可以灵活开窗和选行读出^[9]。在空间应用中,CMOS 探测器的抗电离总剂量能力较 CCD 也要强一些^[10]。

大面阵、高帧频 CMOS 探测器在航天光谱成像领域的应用才刚刚起步^[11-13]。本文基于长光辰芯光电技术有限公司的背照式 CMOS 探测器 GSENSE400,设计一套具有高可靠性的高速 CMOS 成像电子学系统,将重点解决偏置电源的低噪声和稳定性、高速图像数据的正确采样和长期稳定接收等问题。

2 系统方案设计

CMOS 成像电子学系统原理框图如图 1 所

示,主要功能模块有:探测器模块、时序控制模块、通讯数传模块及二次电源模块等。

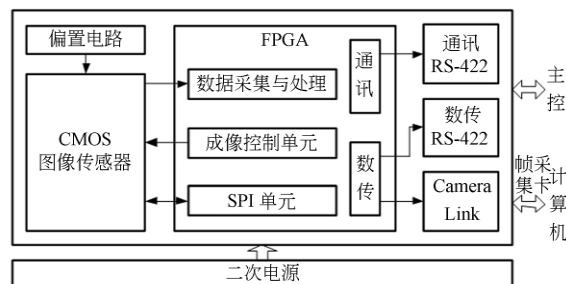


图 1 成像电子学系统原理框图

Fig. 1 Block diagram of spectral imaging system

CMOS 成像电子学系统通过通讯 RS-422 总线与主控系统进行异步串行通讯,接收命令与参数,返回工作状态;FPGA(Field-Programmable Gate Array)根据接收的命令与参数,产生探测器驱动时序,控制 CMOS 将紫外光谱信号转换为数字图像信号,并接收 CMOS 输出的高速图像数据;对图像数据进行处理和打包后,通过数传 RS-422 总线发送给卫星数管单元。在地面试验阶段需要下传 CMOS 原始图像来辅助系统装调、定标和性能测试,因此设计了 Camera Link 数传模块和接口,将高速图像数据通过 PCIE-1433 帧采集卡直接下传至地检计算机。二次电源模块对母线电源进行 EMI 滤波和电压变换,为系统提供工作所需的各类电压。

3 硬件电路设计

CMOS 成像电子学系统硬件电路包括 CMOS 探测器及其驱动电路,FPGA 及其配置电路,二次电源变换电路,RS-422 通讯、数传电路等。本文将结合探测器的航天应用特点及高速图像数据收发的需求,重点论述 CMOS 探测器驱动

电路设计及 FPGA 选型。

3.1 探测器驱动电路设计

GSENSE400 是长光辰芯光电技术有限公司开发的背照式、紫外增强型科学级 CMOS 探测器^[14]。其像元分辨率为 2048×2048 , 像元尺寸为 $11 \mu\text{m}$, 紫外波段峰值量子效率为 $74\% @ 280 \text{ nm}$, 支持电子卷帘快门。探测器结构框图如图 2 所示, 包括像元阵列、驱动电路、偏置电路、串行配置接口 SPI、锁相环 PLL、相关双采样 (CDS)、增益放大器 (AMP)、模数转换器 (A/D)、温度传感器及 LVDS 高速图像数据串行发送电路等。

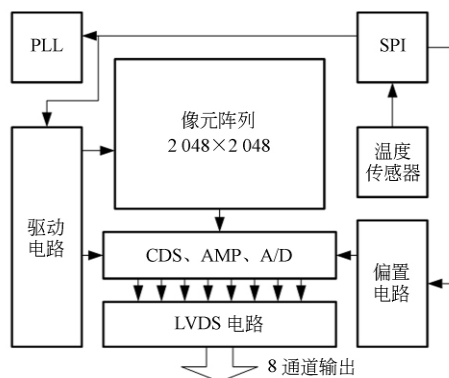


图 2 GSENSE400 结构框图

Fig. 2 Architecture of GSENSE400 sensor

GSENSE400 有两种工作模式, STD (Standard, 标准) 和 HDR (High Dynamic Range, 高动态范围)。HDR 模式下探测器满阱电荷为 86.4 ke^- , 读出噪声 1.4 e^- , 动态范围可达 95.8 dB , 帧频 23.8 f/s , 最大功耗仅为 588 mW 。

与 CCD 探测器相比, CMOS 探测器工作所需的电压幅值较小, 但种类较多。GSENSE400 正常工作时, 需要提供 4 类共 9 种直流偏置电压, HDR 模式下的偏置电压值如表 1 所示。

表 1 GSENSE400 直流偏置电压

Tab. 1 Power specifications of GSENSE400 sensor

电源分类	电源名称	典型电压值/V	典型电流值/mA
模拟电源	VDD33A	3.3	56.62
	VREF	1	<1
基准电源	VRF	1	<1
	VRS	1	<1
数字电源	VDD18D	1.8	159.6
	VDDPLL	1.8	1.75
	VDDPIX	2	10.12
像素电源	VDRL	0.5	<1
	VTXH	2.5	<1

由于 CMOS 所需的直流偏置电压较多, 在电源设计中, 综合考虑了各电源管脚数量及位置分布, 并做好滤波和去耦。对于电压值相同、功能不同的电源, 均串联铁氧体磁珠, 以滤除高频噪声、避免相互之间的干扰。

在像素电源的设计中, 由于 VDRL 电源存在电流回流, 因此利用放大器设计了电压跟随电路, 使其成为电流沉, 提高电源的拉电流能力。根据 VDRL 电源要求, 放大器在 0.5 V 输出时需要具有 1 mA 的拉电流。受航天应用的条件限制, 放大器的选型难度较大。广泛应用于航天领域电压跟随电路中的 LM124 在 0.5 V 时的拉电流能力为 0.04 mA , 无法满足探测器需求。经过分析和实验, 设计选用了 LM6142, 在 0.5 V 输出时拉电流最大可达 10 mA , 并且可应用于航天领域, 满足了电源设计需求。

VREF、VRF 和 VRS3 种基准电源对于探测器的性能至关重要, 其稳定性直接影响着 CMOS 的行噪声。相较于稳定性, 对基准电源的准确性要求并不严格, 10 mV 以内的变化均可接受。设计的基准电源电路如图 3 所示, 首先选用温度系数小于 $10 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ 、长期稳定性为 $15 \text{ ppm}/1000 \text{ h}$ 的 AD586 得到 5 V 电压基准, 再由温度特性为 $\pm 25 \times 10^{-6}/\text{K}$ 的金属膜电阻分压产生所需的基准电压。

在分压电阻和 CMOS 探测器之间设计了运放缓冲电路进行阻抗隔离和低通滤波, 这对于基准电源的性能至关重要。阻抗隔离避免了探测器内部阻抗对电阻分压电路的影响, 保证了分压结果的准确性和温度稳定性; 低通滤波由电容 $C6$ 和电阻 $R1$ 、 $R2$ 实现, 滤波器的一 3 dB 截止频率 $= 1/(2\pi \times (R1//R2) \times C6) = 0.375 \text{ Hz}$, 可以进一步滤除基准电压源的噪声以及分压电阻的热噪声, 保证了电路的电源抑制性能 (PSRR)。 $R3$ 为平衡电阻, 阻值为 $R1$ 与 $R2$ 的并联, 可以避免运放输入端偏置电流产生附加的差模输入电压, $C7$ 用于消除电阻 $R3$ 上产生的约翰逊噪声。

在驱动器方面, 不同于 CCD 需要专用的驱动芯片, FPGA 与 CMOS 探测器均采用标准 CMOS 工艺制作, 都支持 LVCMOS33 和 LVDS25 I/O 标准, 因此可以直接相连进行驱动控制。

3.2 FPGA 选型

FPGA 是成像电子学系统的控制中枢, 用于

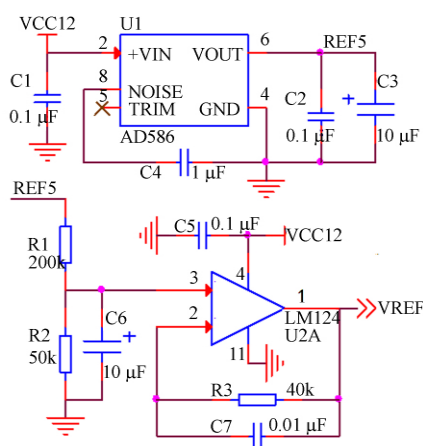


图 3 基准电源电路原理图

Fig. 3 Diagram of voltage references circuit

实现 CMOS 探测器的驱动控制、探测器输出高速图像数据的接收、处理和下传以及 RS-422 异步串行通讯等多种功能。其中,接收探测器输出的高速源同步图像数据要求 FPGA 的 I/O 资源必须具有输入延时可动态精细调整的能力。当前国内民用航天领域选用的大规模可编程逻辑器件多来自于 Xilinx 公司的 Virtex II ~ Virtex-4 系列^[15](Virtex II 系列目前已有国产化替代型号),但 Xilinx 公司从 Virtex-4 系列才开始提供输入延时可动态调整的功能,因此设计中选用了 Virtex-4 系列的 VC4VSX55 型号。为了提高产品的可靠性,设计中采用了多种抗辐照加固措施:合理选择单机壁厚、贴铅皮等措施进行抗总剂量加固;实时监测并限制核心电流进行抗门锁设计等。该款 FPGA 已在风云系列气象卫星中的多个载荷中使用,通过了所有的地面试验和航天飞行验证。

4 FPGA 软件设计

FPGA 软件采用 VHDL 语言编写,主要完成探测器的驱动控制和数据接收,以及通讯和数传等功能。具体包括:时钟与复位管理模块、CMOS 时序发生模块、SPI 模块、图像数据接收模块、RS-422 通讯模块、数传模块等。

时钟与复位管理模块为其它模块提供各种全局或区域时钟及对应的上电复位信号。

CMOS 时序发生模块产生 19 路驱动信号控制探测器进行逐行复位、逐行读出,每一行像元复位和读出之间的时间间隔就是该行像元的曝光时间。

SPI 模块通过探测器的 SPI 接口对探测器的工作模式、放大增益和训练字等进行配置,并对配置和探测器温度进行回读。

RS-422 通讯模块完成与主控系统的异步串行通讯,接收命令与参数,对其它模块进行调度,然后向主控系统返回成像电子学系统的工作状态。

探测器输出高速图像数据的接收和下传是 CMOS 成像系统软件设计的关键所在,下面将进行重点论述。

4.1 高速图像数据接收

和很多高速 AD 芯片一样,GSENSE400 采用了当今广为流行的源同步 LVDS 接口技术来发送高速图像数据,包括 8 个 300 Mb/s 的 LVDS 数据通道和 1 个 150 MHz 的 LVDS 伴随时钟(DDR 源同步时钟)通道。在发送时 DDR 伴随时钟与数据是边沿对齐的,但由于探测器本身各通道的不匹配及电路板 PCB 路径长度的不一致,导致在接收端各数据通道与时钟通道之间的相位关系发生未知的变化。并且在进入 FPGA 后,时钟路径上也比数据路径多一个 BUFIO(I/O Clock Buffer, I/O 时钟缓冲器),即 FPGA 本身也会进一步引入时钟与数据路径的相位偏差(Skew)。为了确保 CMOS 发送的高速串行数据能够被正确采样,需要将数据眼图(Data eye)的中心与时钟的采样沿对齐,即位对齐(Bit Alignment)。在位对齐之后还要做串并转换才能得到并行的 12 bit 图像数据,这就需要在串行比特流中准确识别出字边界,即字对齐(Word Alignment)。

当前普遍采用的做法是“先训练、再传输”,即在发送正式数据前,由接收端指示发送端先在数据通道上连续发送固定的训练字,进入训练模式:逐步增加数据路径的延时,通过判断采样的并行数据是否稳定,寻找到数据眼图有效窗口的左右边界,确定有效窗口的位置,再将延时回调有效窗口长度的一半,使采样点位于数据眼图有效窗口的中心(最佳采样点),完成位对齐。位对齐之后,再比较并行数据与训练字是否相同,不同则向 ISERDES(输入串并转换器)发送一次位移操作(Bitslip)指令,直至 ISERDES 输出为训练字,完成字对齐。

上述训练策略广泛应用于各种高速数据接收中,很多时候可以实现数据的正确采样,但其在寻

找有效窗口的左右边界时忽略了一个问题,就是过渡区(Transition)内的抖动不仅仅可能是随机的,也有可能是固定的。随机性抖动可通过判断采样数据是否稳定来识别,但对于固定性抖动,采样数据是稳定的却不正确的,也就是说即使采样稳定,采样点也可能仍在过渡区。因此,就会混淆过渡区和有效窗口,造成数据采样错误。图4所示为数据眼图的示意图,分为有效窗口和抖动形成的过渡区两部分。

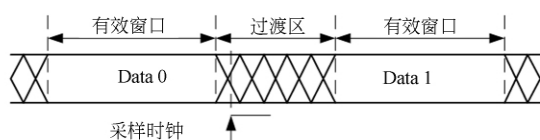


图4 数据眼示意图

Fig. 4 Diagram of data eye

航天应用中的可靠性至关重要,不允许存在风险和不确定因素。为此,本文提出了一种新的训练策略,用于准确识别出数据眼图有效窗口的边界,其控制流程如图5所示。

该训练策略分为4个步骤:寻找第一个过渡区,穿过第一个过渡区,寻找第二个过渡区,最后回退到眼图中心。

在判断采样点是否走出第一个过渡区时,不再是只比较采样并行数据是否稳定,还要判断与训练字是否相同。发现采样稳定后,如果与训练字不同,就做一次位移操作。如果某一次位移后采样数据与训练字相同,就说明采样是稳定并正确的。如果12次位移后仍无法得到训练字,就说明采样虽然稳定却不正确,采样点仍处在过渡区。

在寻找第二个过渡区时,只需对比采样并行数据与训练字是否相同即可,相同就说明仍在有效窗口内,不同就说明已到达第二个过渡区。

该训练策略把字对齐嵌入到位对齐中,同时判断采样的稳定性和正确性,提高了过渡区识别的准确度,却没有增加算法的复杂度。

此外,不同数据序列的眼图有效窗口位置和大小也会有所不同,训练字的选取应尽量模拟真实数据。真实数据很可能包含连续的0和1,因此本文选择0x4C7(010 011 000 111)作为训练字,使其眼图更接近真实数据眼图,提升训练的实际效果。

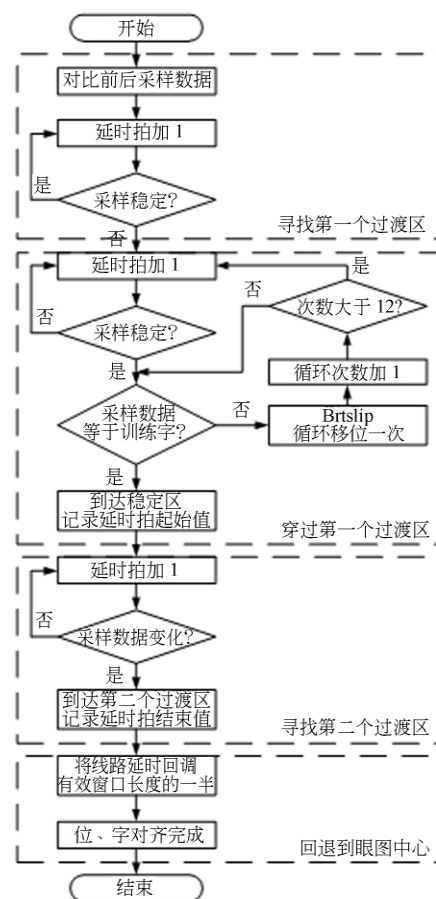


图5 训练策略控制流程图

Fig. 5 Flow chart of training algorithm

4.2 实时窗口监视

上电后的初始通道训练校准了由芯片工艺、电路传输等造成的相位偏差,使采样点位于数据眼图的中心。但在随后的工作过程中如果温度发生变化或供电电压漂移,采样点可能会再次偏离数据眼图中心,甚至引起采样错误。作为航天设备,要求在高温实验及严苛的空间环境中仍要保持高可靠性,因此本文设计了实时窗口监视(Real-Time Window Monitor, RTWM)算法,实时地监测数据采样结果,根据需要进行及时调整数据线路的延时,以保证采样点始终在数据眼图的有效窗口内。

RTWM不再继续使用训练字,而是需要一个监视通道来提供数据通道的拷贝,来判断采样点与有效窗口边界的距离。Virtex-4的差分输入缓冲器IBUFDS_DIFF_OUT恰好可以输出一正一反且延时相同的两路数据。算法的基本思想是利用监视通道来判断采样点与有效窗口左右边界

的距离,根据设定的安全距离,在有效窗口内再建立一个更小的安全采样窗口,并使采样点始终位于该窗口内。具体做法为:在训练结束后,将监视通道设置与数据通道相同的初始延时;然后在数据通道正常接收数据的同时,将监视通道的延时增加或减少一个安全距离,比较两个通道采集的数据是否匹配(互补)。如果匹配,就意味着两个通道的采样点都在有效窗口内;反之,就意味着监视通道的采样点已开始进入过渡区,而数据通道上的采样点已偏出安全采样窗口(但仍在有效窗口内)。这时应同时调整数据通道和监视通道的延时,使监视通道的采样点重新回到有效窗口内,数据通道的采样点重新回到安全采样区域内。可以看到在整个监视及延时调整的过程中,数据通道的采样点始终处于有效窗口内,对正常的数据传输没有任何影响。

图 6 为 RTWM 算法的原理示意图,其中设定的安全距离为 2 个延时拍(delay tap),(a) 为训练后采样点位于眼图中心时的情况;当温度或电压变化导致数据路径的相对延时增加后,采样点距左侧过渡区已不足一个安全距离,如图(b)所示;此时监视算法就会把两个通道的延时都减少一拍,结果如图(c)所示,由此采样点又重新回到了安全采样窗口内。

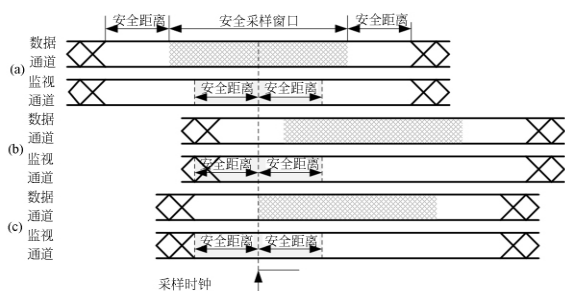


图 6 RTWM 原理示意图

Fig. 6 Diagram of RTWM

RTWM 算法的具体流程如图 7 所示。首先将监视通道的延时增加一个安全距离,然后比较两个通道的数据是否匹配。如果不匹配,就说明采样点已向左偏出安全采样窗口,将数据通道和监视通道的延时拍各减 1,再次比较两通道数据,直至匹配。然后将监视通道的延时减少 2 倍安全距离,判断采样点是否已向右偏出安全采样窗口,并做相应调整。之后,将监视通道的延时增加 2 倍安全距离,开始新一轮的监测。

安全距离是将有效窗口内缩得到安全采样窗口的距离,它的选取与有效窗口大小及可靠性设计有关。数据率越高,有效窗口越小,安全距离可选的长度越小;可靠性要求越高,安全距离就应越大。综合考虑以上两个因素,本文的安全距离设计为 10 个延时拍。

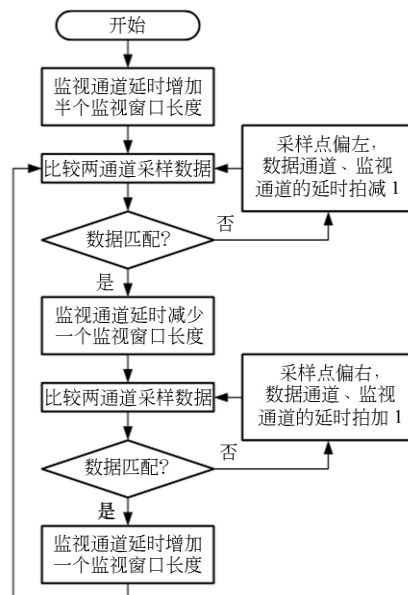


图 7 RTWM 控制流程图

Fig. 7 Flow chart of RTWM

4.3 图像数据下传

探测器输出的原始图像数据是一个二维数组,一个方向是空间维,另一个方向是光谱维。载荷的应用要求光谱维(列方向)不变,空间维(行方向)的所有像元合并成一个像元。12 位原始图像数据进行 2 048 个像元合并后,图像数据位数 = $\text{ceil}(\log_2((2^{12} - 1) \times 2\,048)) = 23 \text{ bit}$, 下传数据率 = $(2\,048 \times 2 \times 23 \text{ bit}) \times 23.8 \text{ f/s} = 2.243 \text{ Mb/s}$ 。对合并后的光谱数据进行打包,通过同步 RS-422 总线发送给卫星数管单元,时钟频率为 3 MHz。

在地面调试、测试阶段,需要使用原始的二维图进行系统装调、定标和性能测试等。探测器以最高帧频输出全帧图像时,数据率 = $(2\,048 \times 2\,048 \times 12 \text{ bit} \times 2) \times 23.8 \text{ f/s} = 2.4 \text{ Gb/s}$,因此设计了 Camera Link 接口将探测器的原始图像发送至地检计算机,图像采集卡选用 NI 公司的 PCIE-1433。Camera Link 是专门针对数字摄像机的高速图像数据传输提出的一种接口标准,有 3 种配

置方式,设计中选用了最大传输数据率为 4.76 Gb/s 的中速模式(Medium)。在接口转换方面,Virtex-4 系列 FPGA 可以在内部实现数据的并串转换,不需要专门的 Camera Link 接口转换芯片。

5 系统测试与分析

为了评估 CMOS 成像电子学系统的性能,对读出噪声、数据眼图和光谱成像效果进行了测试与分析。

根据 EMVA 1288 标准^[16],测试系统在室温下的读出噪声,结果如图 8 所示。系统读出噪声为 $1.72e^-$,与数据手册中提供的 CMOS 读出噪声 $1.4e^-$ 相近,表明系统电路引入很少噪声,性能较好。

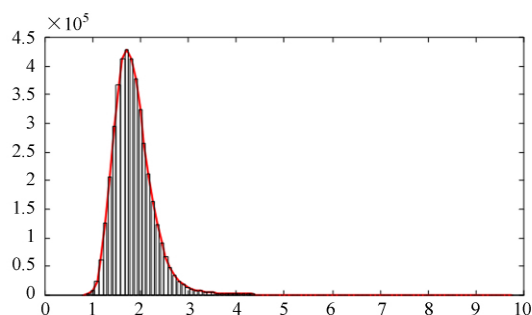


图 8 系统读出噪声分布图

Fig. 8 Temporal Noise Distribution

通道位对齐的训练结果通过 Camera Link 的异步串行通信接口 SerTFG(Serial communications To Frame Grabber.)下传至地检计算机,测得 8 个数据通道眼图有效窗口的长度分别为 39、39、41、40、42、40、41 和 39 拍。Virtex-4 每一个延时拍 75/s, 300 Mb/s 数据的一个比特周期为

3.33 ns,相当于 44~45 拍。由此可知过渡区的长度仅占 3~6 拍,这充分肯定了成像电路高速 PCB 的设计。

为了验证系统的成像效果,对标准汞灯光谱进行了成像实验。二维光谱图像及第 784 列像元灰度值的曲线如图 9 所示。图像的行方向为空间维,列方向为光谱维。从曲线上可以看到,汞灯的 4 条特征谱线均清晰可见。

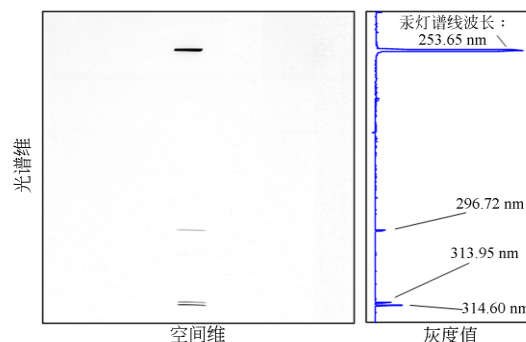


图 9 汞灯光谱图像

Fig. 9 Spectral imaging of mercury lamp

6 结 论

基于长光辰芯的 GSENSE400 探测器,设计了具有高可靠性的紫外遥感仪器高速 CMOS 成像电子学系统。设计的通道训练和实时窗口监视算法校准了由于芯片工艺、PCB 设计、温度和电压变化等引起的相位偏移,保证了高速图像数据接收的准确性和长时间接收的高可靠性。实验结果表明:设计的 CMOS 成像电子学系统可正确接收 300 Mb/s 的高速图像数据,且在温度循环试验中一直工作稳定。系统读出噪声 $1.72e^-$,动态范围 94 dB,满足载荷任务需求。

参考文献:

- [1] 张晶,王淑荣,黄煜,等. 临边成像光谱仪的发展现状与进展[J]. 中国光学, 2013, 6(5): 692-700.
ZHANG J, WANG SH R, HUANG Y, et al.. Status and development of limb imaging spectrometer[J]. Chinese Optics, 2013, 6(5): 692-700. (in Chinese)

- [2] 汪龙祺,王淑荣,李福田,等. FY-3A 紫外臭氧垂直探测仪程控设计与实现[J]. 光学精密工程, 2010, 18(2): 303-310.
WANG L Q, WANG SH R, LI F T, et al.. Software design and implementation of FY-3A solar backscatter ultraviolet Spectrometer[J]. Opt. Precision Eng., 2010, 18(2): 303-310. (in Chinese)

- [3] 薛庆生. 空间大气遥感高光谱成像仪光学系统设计[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0822005.
XUE Q SH. Optical system design of multi-model hyperspectral imager for spaced-based atmospheric remote sensing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(8): 0822005. (in Chinese)
- [4] 刘成保, 王维和, 杨磊. FY-3C/臭氧总量探测仪太阳辐照度偏差的修正[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(7): 1859-1866.
LIU CH B, WANG W H, YANG L. Revision of solar irradiance of FY-3C/TOU[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(7): 1859-1866. (in Chinese)
- [5] 马骏, 肖喜中, 郎均慰, 等. 航空推扫高光谱成像仪 CCD 探测器选型研究[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 1011001.
MA J, XIAO X ZH, LANG J W, *et al.*. Study on selection of CCD detector of space-borne hyperspectral imager[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10): 1011001. (in Chinese)
- [6] 马庆军, 宋克非, 曲艺, 等. 紫外临边成像光谱仪 CCD 电路系统的设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(7): 1538-1545.
MA Q J, SONG K F, QU Y, *et al.*. Design of CCD circuit systems for ultraviolet limb imaging spectrometers[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(7): 1538-1545. (in Chinese)
- [7] 王忠良, 冯燕, 肖华, 等. 高光谱图像的分布式压缩感知成像与重构[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(4): 1131-1137.
WANG ZH L, FENG Y, XIAO H, *et al.*. Distributed compressive sensing imaging and reconstruction of hyperspectral imagery[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(4): 1131-1137. (in Chinese)
- [8] 曲宏松, 张叶, 金光. 基于数字域 TDI 算法改进面阵 CMOS 图像传感器功能[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(8): 1896-1903.
QU H S, ZHANG Y, JIN G. Improvement of performance for CMOS area image sensors by TDI algorithm in digital domain[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(8): 1896-1903. (in Chinese)
- [9] 郎均慰, 王跃明, 王建宇. 高灵敏度 APS CMOS 图像传感器光谱探测技术研究[J]. 光学学报, 2012, 32(7): 121-127.
LANG J W, WANG Y M, WANG J Y. Applications of high sensitivity APS CMOS sensors for imaging spectrometers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(7): 121-127. (in Chinese)
- [10] BENMOUSSA A, GISSOT S, GIORDANENGO B, *et al.*. Irradiation damage tests on backside-illuminated CMOS APS prototypes for the extreme ultraviolet imager on-board solar orbiter [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2013, 60(5): 3907-3914.
- [11] 解宁, 丁毅, 王欣, 等. 应用于高光谱成像的 CMOS 图像传感器[J]. 仪表技术与传感器, 2015(7): 7-9, 13.
XIE N, DING Y, WANG X, *et al.*. CMOS active pixel sensor for hyperspectral imaging application [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2015(7): 7-9, 13. (in Chinese)
- [12] 王跃明, 郎均慰, 王建宇. 航天高光谱成像技术研究现状及展望[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(1): 10008.
WANG Y M, LANG J W, WANG J Y. Status and prospect of space-borne hyperspectral imaging technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(1): 10008. (in Chinese)
- [13] 王征, 何云丰, 曹小涛, 等. 基于 FPGA 的大面阵 CMOS 相机高速率电子学系统设计[J]. 液晶与显示, 2016, 31(2): 173-178.
WANG ZH, HENG Y F, CAO X T, *et al.*. Design of large area array CMOS of high speed electronics camera system based on FPGA[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(2): 173-178. (in Chinese)
- [14] MA C, LIU Y, LI J, *et al.*. A 4MP high-dynamic-range, low-noise CMOS image sensor[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9403: 940305.
- [15] 陶晓霞, 邢炜, 徐启炳. Virtex-4 系列 FPGA 纠正单粒子翻转的方法研究[J]. 空间电子技术,

2011, 8(2): 54-58.

CHEN X X, XING W, XU Q B. Research on correcting single-event upsets in virtex-4 platform FPGA[J]. *Space Electronic Technology*, 2011, 8

(2): 54-58. (in Chinese)

[16] European Machine Vision Association. EMVA Standard 1288, standard for characterization of image sensors and camera[J]. *Release*, 2010, 3: 29.

作者简介:



张 恒(1990—),男,吉林四平人,博士研究生,助理研究员,2013 年、2015 年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事遥感数据获取及微弱信号检测技术方面的研究。E-mail: zhangheng@ciomp. ac. cn



马庆军(1979—),男,黑龙江密山人,博士,副研究员,2003 年于中国科学技术大学获得学士学位,2008 年于中国科学院研究生院获得博士学位,主要从事遥感数据获取和处理算法的研究。E-mail: qjma@ciomp. ac. cn