星载大孔径静态干涉高光谱成像仪高速成像电路设计

刘永征,孔 亮,刘学斌,陈小来,刘文龙,张 昕

(中国科学院西安光学精密机械研究所,陕西 西安 710119)

摘 要: 根据遥感领域高光谱成像对大幅宽、高分辨率需求,研制了一套适合航天 LASIS 高光谱成像应用的高分辨率、宽视场、高光谱、高可靠性的新型高速光谱成像仪电子学系统,它采用多片四通道并行处理 ADC 芯片进行模数转换,以 V5 系列 FPGA 为核心处理器,用高速 SerDes 芯片传输图像数据,成像测试及相关环境试验及可靠性测试,验证了设计的有效性。该设计为我国进入航天遥感领域领先行列提供了技术支撑,也为深入开展高分辨遥感提供了有益的借鉴。

关键词: 高速 CCD 成像; 成像电路; 高光谱成像仪; 干涉光谱成像

中图分类号: TH744.1;TN386.5 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200096

Design of high-speed imaging circuit of spaceborne LASIS hyperspectral imager

Liu Yongzheng, Kong Liang, Liu Xuebin, Chen Xiaolai, Liu Wenlong, Zhang Xin

(Xi′an Institute of Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy of Sciences, Xi′an 710119, China)

Abstract: According to the requirement of high resolution and wide range for hyperspectral imaging in the field of remote sensing, a high-speed spectral imager electronic system with high resolution and high reliability was developed, which was suitable for the application of Large Aperture Interferential Imaging Spectrometer(LASIS). The multiple four channel parallel ADC chips for analog-to-digital conversion was used, with V5 series FPGA as the core processor and high-speed SerDes chip for image data transmission. At last, the imaging performance and reliability of our high-speed imaging circuit were validated. All these measures provide technical support for China to enter the leading position in the field of space remote sensing, and also provide useful reference for further development of high-resolution hyperspectral imaging remote sensing.

Key words: high-speed CCD imaging; imaging circuit; hyperspectral imager; interference spectral imaging

收稿日期: 2020-04-05; **修订日期:** 2020-05-06

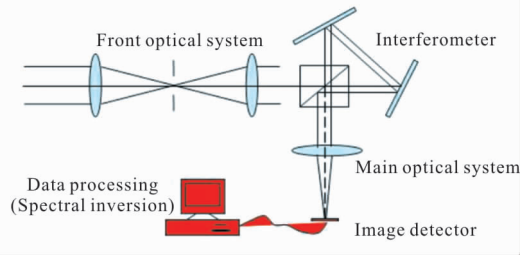
作者简介: 刘永征(1977-),男,工程师,硕士,主要从事高光谱成像电子学方面的研究工作。Email: liuyongzheng@opt.ac.cn

0 引 言

近年来，在高光谱成像遥感领域对高分辨、大幅宽要求不断提高的条件下，基于大孔径干涉成像光谱技术 (Large aperture static imaging spectrometry, LASIS) 的高光谱成像成为遥感领域的一支重要力量。大孔径干涉成像光谱仪(LASIS)是在成像光学系统中的前置镜和傅氏镜之间加入分束作用的横向剪切干涉仪，光学结构包括前置光学系统、准直光学系统、干涉仪、傅氏镜系统和探测器[1]。面阵 CCD 探测器单次成像，可获得目标的二维空间图像和叠加在空间图像上的干涉信息，由于每个像元每次成像仅获得目标某一光程差处干涉信息，需要通过推扫才能获得全部视场的完整干涉图。可以简单地认为 LASIS 采用空间调制方式产生光程差，采用时间调制方式获得干涉信息。这种干涉图像获取方式也称为窗扫式。LASIS 是利用时空联合调制方式获得干涉图的一种新型光谱成像技术，它既具有时间调制型仪器的高灵敏度特点(无狭缝)，又具有空间调制型仪器的稳定性特点(无运动部件)[2]。LASIS 概括为响应高灵敏、结构高稳定、高能量通量、高光谱分辨率和高空间分辨力[3]。星载 LASIS 高光谱成像仪需要采用面阵 CCD 并依靠卫星推扫获得地物的二维空间信息和一维光谱信息，得到干涉图像中不同视场的地物单元对应不同的干涉光程差。高分辨、宽视场、高光谱分辨的需求使得 LASIS 成像电路需要具备成像面阵大、帧频高、信噪比高，如图 1 所示。

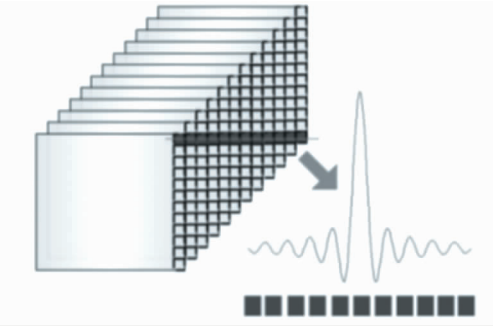
目前，CCD 高速成像电路研制，国外有报道 1 200 fps 的面阵 CCD 高速相机，面阵往往较小，且多处于实验室阶段，不适用于航天遥感；面阵像元数在 200 万以上的高速 CCD 相机，帧频大多最高也只到 60 fps[4-5]。国内除了部分单位有处于实验室研究阶段的高速面阵成像系统外，具备航天产品化的大面阵 CCD 高速成像系统仅有中国科学院西安光学精密机械研究所 2012 年入轨的 1 024×256 像面 740 fps 的高速高光谱成像仪和中国科学院上海技术物理研究所 2015 年公布的 2 208×320 像面 500 fps 的高光谱成像仪[6]。

要满足图像分辨率持续提高，遥感幅宽不断增大，之前的高光谱成像仪电路设计出现了硬件规模成比例增大、电路功耗持续增高，极大地增加了对卫星平台资源的过度占用等问题。



(a) LASIS 的光路组成

(a) Sketch map of LASIS light path



(b) 从 LASIS 图像提取干涉曲线

(b) Interferogram curve extracting from LASIS images

图 1 LASIS 成像仪

Fig.1 Large aperture static imaging spectrometry imager

笔者在长期从事遥感高速高光谱成像仪电路工程化设计经验的基础上，利用最新推出的四路模拟视频转换器的特点，率先设计出用 4 路模拟视频并行进行模数转换为基本单元的同步处理大面阵、高帧频的多抽头可见光近红外视频信号、Virtex5 构架 FPGA 并行拼接及存储图像数据、高速 SerDes 输出压缩图像数据的技术方案，并攻克了工程化应用的多个技术难题，将本设计成功用于民用遥感高分辨率高光谱成像仪中，得到了良好的效果，为后续分辨率指标持续提升奠定了基础。

1 LASIS 电子学系统设计

空间分辨率和推扫幅宽决定了 LASIS 高光谱成像探测器选用面阵列数不小于 2 000 像元；谱段数 120 确定了探测器在干涉图方向不少于 240 个像元(按每个谱段采样 2 个像元考虑)。所搭载卫星轨道高度确定了推扫时成像帧频不低于 1 400 fps。综合分析：高光谱成像仪电子学设计输入指标要求为图

像幅面 2 048×256,最高帧频不低于 1 430 fps;在图像 DN 值 2 200 时,干涉图像信噪比优于 800。

高速光谱成像电路设计中，为同时实现高空间分辨率和高光谱分辨率，需采用宽光谱响应的背照式大面阵、高速 CCD,要求多个高速通道并行同步读出，每个通道能独立进行信号调理和高速模数转换以补偿通道差异。将数字化的数据进行图像拼接以合成完整的整帧二维空间干涉图，最后对干涉图进行压缩后下传到地面应用中心以进行图谱分类、地物识别等应用级处理。

电子学设计要实现有效像元为 2 048×256、帧频 1 500 fps 的低轨对地高空间分辨率光谱成像，其中水平方向 2 048 列像元决定了高光谱成像仪的空间分辨率及刈幅宽度；推扫方向 256 行像元决定了高光谱成像仪干涉图的谱段数（波数分辨率已确定条件下）。之前的高速光谱成像设计思路,电路规模比较大,研制成本高,且占用空间资源多、功耗大,极大加剧了卫星资源紧张的局面 [7]。笔者设计用四通道模拟视频并行分区处理来缩小电路规模及降低功耗,且具有降低成本的优势,如图 2 所示。

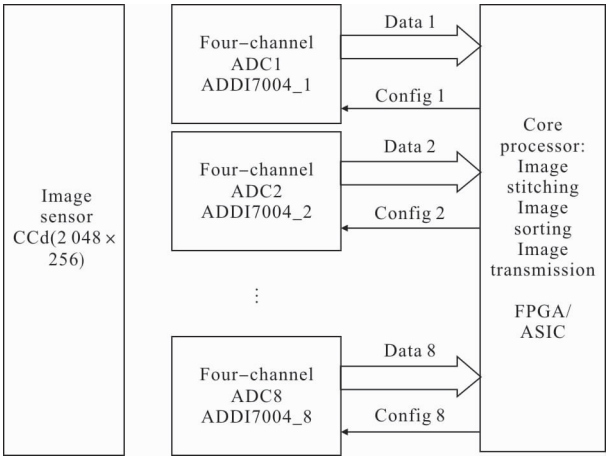


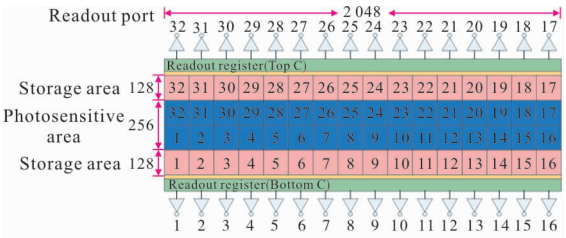
图 2 文中设计的大面阵高速 LASIS 电路

Fig.2 Large area array high-speed LASIS circuit disigned in this paper

设计中 CCD 采用定制背照式面阵高帧频来实现 2 048×256 像元面阵 1 500 fps 的速度,模数转换采用 8 片ADDI7004 构成了实现 2 048×256 像元图像幅面、32 并行通道像元速率均为 35 MHz 的高速 CCD 视频模数转换，中央控制采用升级筛选的 Virtex5 构架 FPGA 芯片 XQ5VFX130T 高速并行缓存、拼接并存储图像数据，图像输出使用 8 片高速 SerDes 芯片 TLK2711HFG 来实现 12.8 Gbps 的传输带宽[8]。在此设计指标下,图像数据率达到了 9.6 Gbps

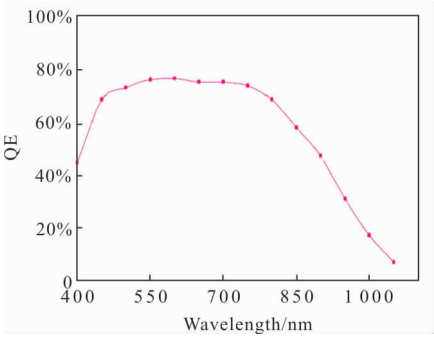
1.1 光电转换电路设计

LASIS 高光谱成像仪可见光近红外谱段（400~900 nm）光电转换采用定制背照式 2 048×256 像元的大面阵、高帧频 CCD,像元大小为 16 μm×16 μm。它有 32 个抽头，每个抽头对应 128×128 像元区域，实现光电转换。其感光区垂直转移采用 A1、A2、A3 三相转移结构,转移频率最快 6 MHz。水平转移采用 C1、C2 两相转移结构，最快 35 MHz。32 个抽头均工作在读出像元速率 35 Mpixels/s 下，可实现最高 1 500 fps 的速度。CCD 饱和时满阱电荷数为 250ke⁻,填充系数为 100%。CCD 接口部分有 192 个引脚：其中 32 个引脚是视频输出；驱动输入引脚 22 个;供电引脚 16,接地引脚 32,其余均为偏置电压引脚,如图 3 所示。



(a) 大面阵、高帧频 CCD 结构

(a) Structure of large array, high-frame rate CCD



(b) 高速 CCD 的谱响应曲线

(b) Spectral response curve of high speed CCD

图 3 LASIS 定制的光电转换用 CCD

Fig.3 Customized CCD for photoelectric conversion for LASIS

CCD 光电转换所需 11 路驱动信号 A1、A2、A3、B1、B2、B3、C1、C2、SUM、TR 和 RET 具有摆幅大、

频率高特点，驱动信号产生电路使用了 ISL7457SRH，它是单片四通道输出芯片，工作电压 15 V，每路峰值输出电流 2 A。输出电阻≤3 Ω，上升/下降时间≤12 ns，最高工作频率 40 MHz。CCD 驱动脉冲的幅度由驱动器 ISL7457SRH 的 15 V 工作电压决定，驱动脉冲的电平由偏压进行调节[9]。驱动时序由后续 FPGA 产生后送驱信号产生电路。

CCD 的所需的各个偏置电压均由高品质线性稳压器 LM2941 产生。

CCD 的 32 个读出端输出的包含目标光信息的电压信号，是 35 MHz 的高频成份丰富的模拟视频信号，经过由 32 个 UB3DG112D32 搭建的 32 路射极跟随电路后，送给后级的模数转换电路。为实现 32路的一致性，32 个射随电路的器件参数经过严格挑选，参数误差控制在 1%以内。

1.2 多通道模数转换单路设计

大面阵、高速 CCD 成像电路核心之一是模数转换，设计中选用的关键单元是 ADDI7004，它是 ADI 公司新研发的一款集成并行处理四通道 CCD 视频信号的模数转换器，速度快、功耗低、体积小。其像素处理速率高达每个通道 72 Mp/s；芯片封装为 76 引脚 BGA，尺寸 6 mm×6 mm，最大功耗 0.529 W。

ADDI7004 的 4 个通道均带有专用于 CCD 的模拟视频信号调理前端电路。模数转换前都可选用相关双采样或采样保持的工作模式，通道增益可在 6~42 dB 范围内设置。模数转换的量化分辨率均为 14 bit，并行处理时每通道最高速度 72 MHz，设计中 ADDI7004 工作在 40 MHz。

为 ADDI7004 的 LVDS 输出接口可靠传输，接收端进行了 100 Ω 端接匹配[10]；通过三线 SPI 串行接口进行配置寄存器参数选择接口的数据位数、电流值、单/双数据端口模式选择、同步控制等，外部参数配置图如图 4 所示。

为解决 ADDI7004 的航天适应性问题，专门制定

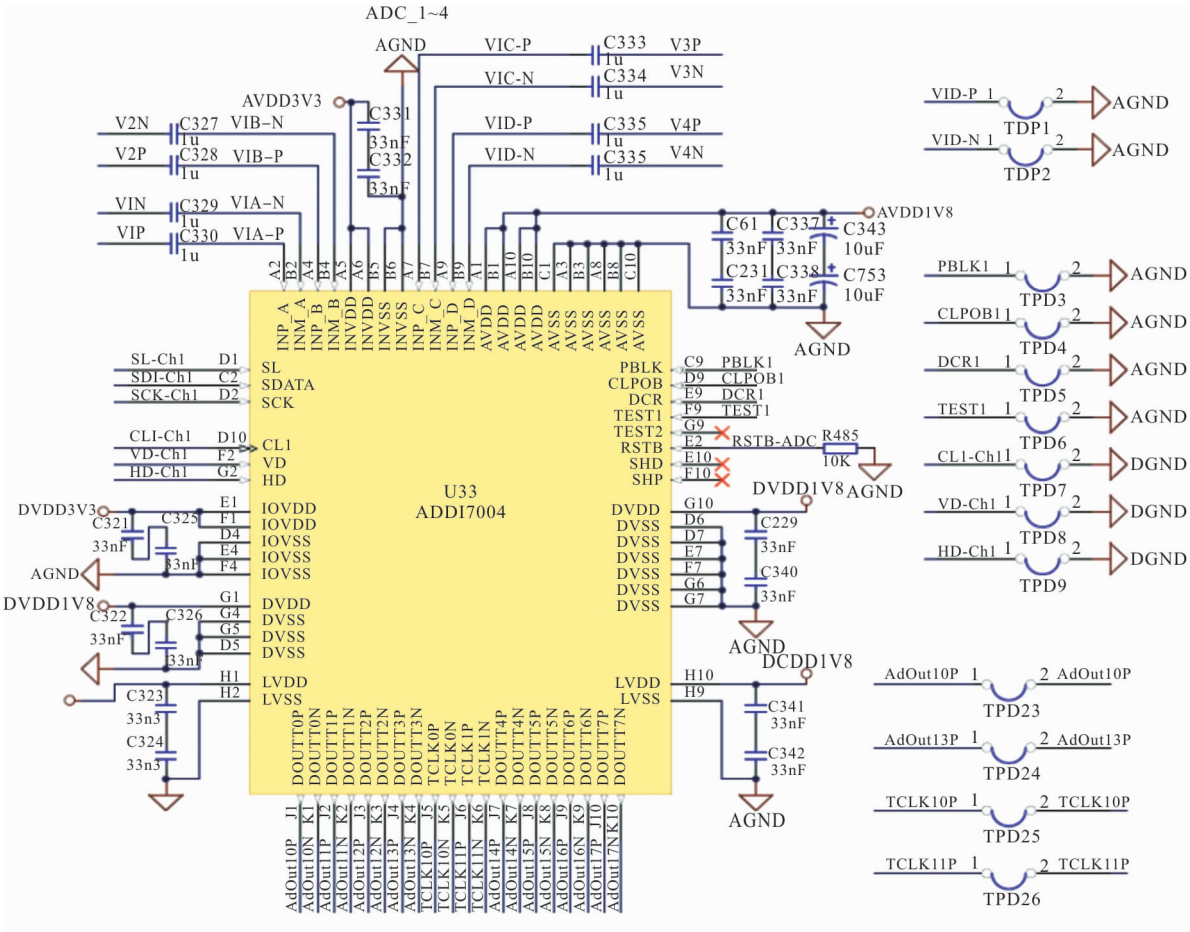


图 4 ADDI7004 的电路设计图

Fig.4 Diagram of ADDI7004 circuit design

了针对性的可靠性质量保证方案，并按照结构分析、破坏性物理分析、电离总剂量辐照试验、单粒子效应辐照试验、通电老练试验和寿命试验等分析结果进行了升级筛选。

电离总剂量辐照评估试验结果表明该器件抗辐照能力大于 50 krad(Si)；单粒子效应评估测试表明该器件单粒子锁定 LET 阈值大于 13.4 MeV·cm²/mg。结构分析和破坏性分析表明该器件可用于航天产品，但需要对焊接工艺进行特别设计。

对 ADDI7004 进行了板级老练及寿命考核试验，结果表明老练及寿命试验过程中，器件工作均正常。为整体上进一步提高该芯片航天适应性能力，在电装工艺上进行了小球距封装的电装工艺设计及验证，确保电装工艺满足航天产品应用可靠性；在硬件电路设计上，还考虑采用了 ADDI7004 的芯片热备份设计，以进一步提高抗意外中断能力；在 LASIS 机械结构设计上对 ADDI7004 进行了加钽板等抗辐照加固措施。

1.3 中控电路设计

采用赛灵思公司 Virtex5 系列 FPGA 芯片 XQ5VFX130T 作为 LASIS 高光谱成像仪电子学系统的中央处理器，功能设计框如图 5 所示，它有 20 480 个 CLB slices，10 728 kB 的块 RAM，840 个输入/输出(I/O)管脚，12 个数字时钟管理器，6 个锁相环，内部信号 500 MHz 以上。

FPGA 用于完成 CCD 时序产生、图像数据的接收、缓存、拼接、输出等操作。实际逻辑资源占用了 60%，I/O 资源占用了 621 个。

FPGA 的配置方式采用主串方式，配置程序存储器采用赛灵思公司的专用配置芯片 XQR17V16CC44，它是一次性可编程的只读程序存储器，采用反熔丝结构，确保程序数据存储 20 年，尤其适合航天应用。其工作电压为 3.3 V，存储容量 16 Mbits。

为提高航天工程使用可靠性，首先 XQ5VFX130T

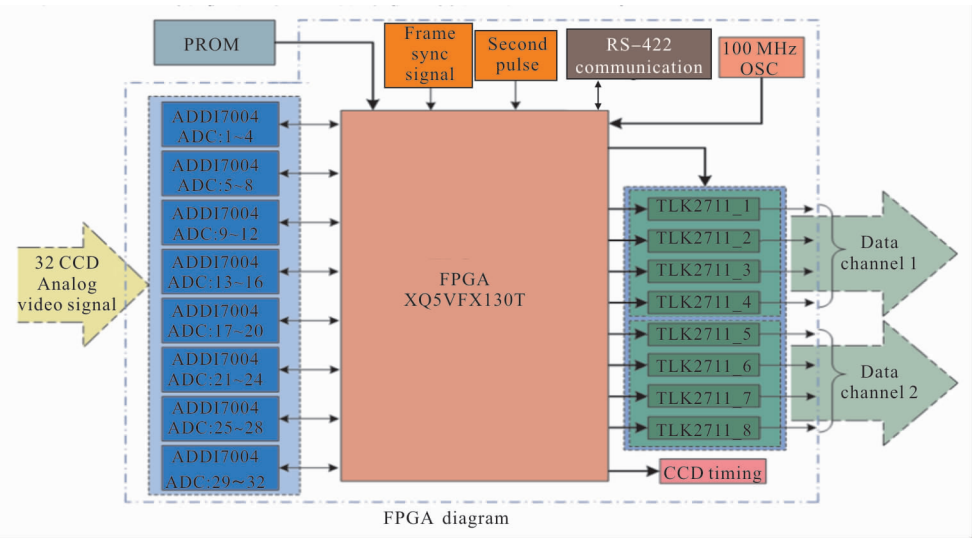


图 5 核心处理器 FPGA 电路设计

Fig.5 Diagram of Central Circuit based on FPGA

进行了升级筛选；其次给 FPGA 壳体加装了散热设计，将专用的导热冷板与器件封装散热壳体间填充导热硅脂，通过冷板将热量传导至电路板与金属机箱的铝边框上。

1.4 高速 SerDes 接口设计

为了实现对 LASIS 的海量图像数据传输，采用 8 片高速 SerDes 传输芯片 TLK2711HFG 的接口电路设计[11]。工作时钟频率 100MHz，此时有效承载带宽 1.6 Gbps，8 片 TLK2711HFG 接口的数据传输带宽为 1.6 Gbps×8=12.8 Gbps，满足 LASIS 可见光近红外 9.6 Gbps 的图像输出需求。

为降低误码率，使用 4 片高精度、低抖动的基于三次泛音设计的 KC 级 ZA715CB3-100 MHz 石英晶体振荡器作为 8 片 TLK2711HFG 的发送时钟，并对晶振的布局进行了均衡化考虑，如图 6 所示。此外，还通过在 PCB 布局布线上控制高速差分对的阻

抗连续和容性参数最小化，来提高信号完整性。

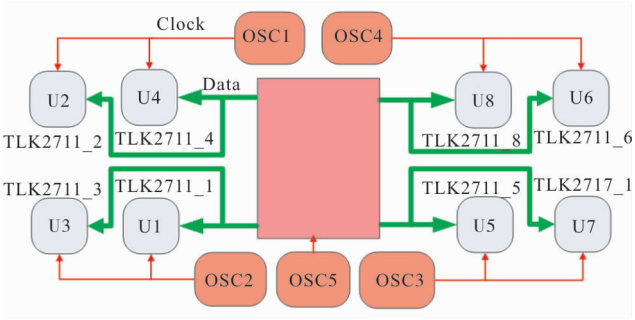


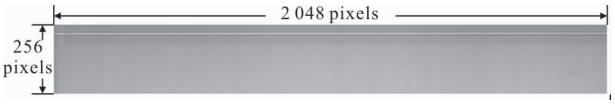
图 6 高可靠 SerDes 传输电路设计

Fig.6 High reliability SerDes circuit design

对 TLK2711HFG 也进行了散热设计，冷板通过导热硅脂将芯片散热壳体的热量传导至金属机箱的铝边框上。

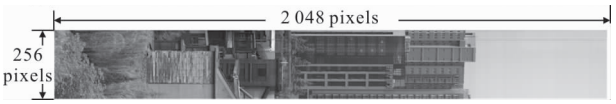
2 星载 LASIS 电子学成像测试

对该 LASIS 电子学进行了成像测试，图 7 是在实验室获取的太阳模拟器光照图像及在室外自然光下的推扫图像。为进一步考核系统软硬件设计的可靠性，进行了−40~70 ℃高低温试验，系统在高低温的图像数据处理依然正常。



(a) 均匀光 LASIS 图像

(a) Uniform light LASIS image



(b) 室外推扫 LASIS 成像

(b) Outdoor push-broom LASIS image

图 7 光谱成像仪获取的图像

Fig.7 Images from hyperspectral imager

为在电子学设计实现高速、大面阵同时，确保实现高信噪比，从整体上规划了电路的降噪设计：CCD 射随电路、模数转换电路进行了严格的噪声控制，特别是模拟信号线长尽可能短；驱动电路和时钟电路部分，进行了精心的合理化布局，驱动器尽可能放置近 CCD，驱动波形进行修正设计，阻抗尽可能小、容抗可能大；数字电路部分，在满足功能需求条件下，将主时钟的频率限值到最低以减小耦合和瞬态效应；供电电路充分利用各类电容器的优点相互组合，进行了细致的滤波、退耦及旁路设计。

为检验成像电路设计的噪声水平，对电路进行了暗室背景测试，采集暗背景图像数据以计算图像的噪声值，以此测量电路的噪声水平。

计算图像噪声来测量电路噪声具体步骤：先采集 500 帧暗背景图像；再计算每一个空间像元 500帧图像中时间方向上的灰度值的均方差；此均方差即视作电路的噪声[12]。计算结果表明：暗电平图像的噪声在≤1.3 LSB 水平，满足遥感 LASIS 高光谱成像仪工程化应用需求。

笔者将所研制的高速大面阵相机指标（见表 1）与国内外研制同类相机的专业单位（A、B、C 是国内三家具有较强研制高速 CCD 相机实力的单位）产品进行对比，可以看出综合大面阵、高帧频以及电路噪声指标方面，笔者所在单位研制的高速 CCD 成像系统具有领先优势。

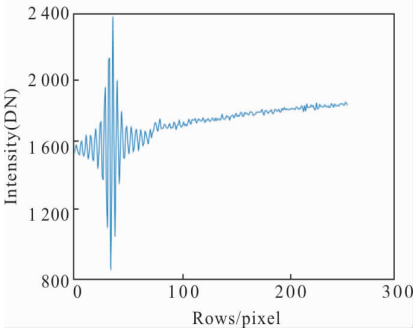
对 LASIS 光谱成像仪的实验室定标试验数据的图像进行了干涉图提取，如图 8(a)所示，为某列干涉图，出于数据量与复原光谱精度需求折中考虑，干涉图采用单边过零采样。对干涉图处理后，再进行光谱复原，复原曲线见图 8(b)。可以看到提取的光谱曲线在 400~900 nm 波长范围谱线光滑连续[13]。

表 1 面阵高速相机指标对比

Tab.1 Performance comparison of high speed area CCD camera

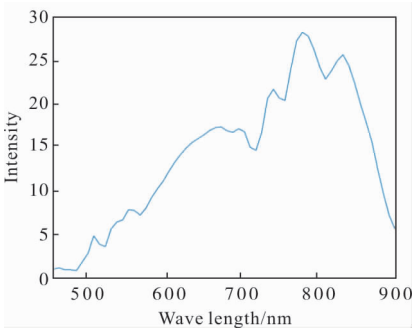
R&D institutions	CCD image array	Fps(Max.)	Release time
XIOPM	2 048×256	1 500	2019
XIOPM	1024×256	740	2012
R&D A	2 208×320	500	2015
R&D B	228×164	1 000	2013
R&D B	1 000×1 000	48	2013
R&D C	128×128	1 000	2009
R&D French	240×240	1 200	2010

经过测试，高光谱成像仪电子学设计满足图像幅面 2 048×256 像元，帧频最高 1 500 fps。计算图像 SNR 的方法是：在太阳模拟器光照下，干涉图最亮条纹 DN 值为 2 200 时，采集 500 帧干涉图，计算每个



(a) 从 LASIS 数据中提取干涉图像

(a) Extracting interference curve from LASIS data



(b) 从干涉图复原的点目标光谱曲线

(b) Recoveried spectral curve of point target from interferogram

图 8 LASIS 图像数据的光谱反演

Fig.8 Spectral inversion of LASIS image data

空间像元时间方向上 DN 值均值视为信号值，时间方向上均方差视为图像噪声。干涉图信噪比 SNR=S/N≥800。与设计指标进行相比，均优于指标要求。

试验表明该电子学系统性能良好、稳定可靠，满足星载 LASIS 的航天环境适应性要求。基于本设计的工程产品已经通过所有性能测试、环境试验及可靠性增长试验。

3 结 论

目前遥感 LASIS 高光谱成像仪的分辨率和幅宽指标不断攀升，大面阵、高速 CCD 逐渐广泛用于遥感光谱成像仪，迫切需要具备高度集成的高速 CCD 成像电子学设计，文中为此进行了有效的探索。构建的基于四通道视频模数转换器 ADDI7004 的星载 LASIS 电子学系统，具有大幅面、高速、低噪的优点，验证试验及实测数据表明，可满足航天遥感应用需求。所开展的研究为多路并行 ADC 用于航天工程化遥感成像奠定了坚实基础，为高分辨率高光谱遥感电子学设计提供了有益的借鉴。

参考文献：

[1] Zhao Yun, Lv Jinguang, Qin Yuxin, et al. Optimization design and experimental study of micro-Fourier transform spectrometer [J]. ***Chinese Optics***, 2020, 13(2): 411-425. (in Chinese)
赵云，吕金光，秦余欣，等.微型傅里叶变换光谱仪的优化设计与实验研究[J]. 中国光学, 2020, 13(2): 411-425.

[2] Wang Shuang, Xiangli Bin, Li Libo, et al. Research of spectrum signal-to-noise ratio of large aperture static imaging spectrometer[J]. ***Spectroscopy and Spectral Analysis***, 2014, 34(3): 851-852. (in Chinese)
王爽，相里斌，李立波，等. 大孔径静态干涉成像光谱仪光谱信噪比研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(3): 851-852.

[3] Wang Fubei, Jing Juanjuan, Wu Qiongshui, et al. Stripes elimenation and registration of large aperture static imaging spectrometer image. [J]. ***Acta Geodaetica et Cartographica Sinica***, 2016:45(6): 707-710. (in Chinese)
王府北，景娟娟，吴琼水，等. 大孔径静态干涉成像光谱仪图像的条纹消除与配准[J]. 测绘学报, 2016: 45(6): 707-710.

[4] Ren Hang. High-resolution large area CCD camera frame rate design and its non-uniformity correction [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2013, 42(6): 1491-1496. (in Chinese)
任航. 高分辨率大面阵 CCD 相机高帧频设计及其非均匀性校正[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(6): 1491-1496.

[5] Chen Xiao, Li Lihua, Liang Yan, et al. Progress of very high sensitivity infrared detector readout circuit [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2020, 49(1): 0103011. (in Chinese)
陈虓, 李立华, 梁艳, 等. 甚高灵敏度红外探测器读出电路研究进展[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(1): 0103011.

[6] Chen Jianwu. Research on driving and information processing technology of high-frame-rate bakcside-illuminated CCD in space [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015: 12-28.(in Chinese)
陈剑武. 空间高帧频背照式 CCD 驱动与信息处理技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015: 12-28.

[7] Yang Dongxu. Study on ASIC technology for high speed data transmission system and scientific CCD imaging system. [D]. Beijing: University of Science and Technology of China, 2018: 69-102. (in Chinese)
杨东旭. 专用集成电路技术在高速数据传输系统与科学级 CCD 成像系统中的研究 [D]. 北京: 中国科学技术大学,

2018: 69-102.

[8] Liu Yongzheng, Kong Liang, Yan Peng, et al. Design and implementation of image processing system of spaceborne high-speed hyperspectral imager based on ADDI7004. [J]. ***Chinese Journal of Electron Devices***, 2019: 42 (6): 1455-1457. (in Chinese)
刘永征，孔亮，闫鹏，等. 基于 ADDI7004 的星载高光谱成像仪图像处理系统设计实现 [J]. 电子器件，2019: 42 (6): 1455-1457.

[9] Sun Zhenya. Research on key technology of high integration modular CCD imaging system [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019: 29-39. (in Chinese)
孙振亚. 高集成度模块化 CCD 成像系统关键技术研究 [D]. 北京: 中国科学院大学，2019: 29-39.

[10] Ning Yonghui, Liu Hui, Zhao Qinglei. High-frame frequency imaging system of large area CMOS image sensor[J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2019, 27(5): 1168-1175.
宁永惠，刘辉，赵庆磊，等. 大面阵高帧频 CMOS 成像电子学系统设计[J]. 光学 精密工程，2019，27(5): 1168-1175.

[11] Yao Libin, Chen Nan. High-performance low noise digital readout circuit[J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2020, 49 (1): 0103009. (in Chinese)
姚立斌，陈楠. 高性能低噪声数字读出电路 [J]. 红外与激光工程，2020，49(1): 0103009.

[12] Chi Mingbo, Han Xinxin, Xu Yang, et al. Broad band and high resolution scanning spectrum calibration technology [J]. ***Chinese Optic***s, 2020, 13(2): 249-257. (in Chinese)
迟明波，韩欣欣，徐阳，等. 宽谱段高分辨扫描光谱定标技术[J]. 中国光学，2020，13(2): 249-257.

[13] Lu Qifeng, Zhou Fang, Qi Chengli, et al. Spectral perfoemance evaluation of high-spectral resolution infrared atmospheric sounder onboard DY-3D. [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2019, 46(12): 2106-2113. (in Chinese)
陆其峰，周方，漆成莉，等. FY-3D 星红外高光谱大气探测仪的在轨光谱精度评估[J]. 光学 精密工程，2019，27(10): 2106-2113.