

空间太阳硬X射线成像仪 量能器读出电子学设计*

张 岩^{1,2†} 郭建华¹ 张永强^{1,2}

(1 中国科学院暗物质与空间天文重点实验室 中国科学院紫金山天文台 南京 210033)

(2 中国科学院大学 北京 100049)

摘要 先进天基太阳天文台(ASO-S)是中国科学院空间科学先导专项2期规划的太阳观测卫星,其针对第25个太阳活动峰年,同时观测太阳磁场、日冕物质抛射和太阳耀斑爆发.硬X射线成像仪(HXI)作为该卫星3个科学载荷之一,实现了高时间分辨率和空间分辨率的太阳硬X射线成像观测,其量能器由99套溴化镧闪烁晶体-光电倍增管探测单元和读出电子学板构成,实现了30–200 keV的硬X射线光子能谱测量.针对HXI量能器的观测需求,设计了一套空间高事例率读出电子学系统,并通过实验室测试,证明了该系统单事例读出死时间小于2 μs ,同时验证了该系统电子学噪声小于120 fC,积分非线性小于2%,满足HXI仪器要求.

关键词 天文电子学, 硬X射线成像仪, 先进天基太阳天文台

中图分类号: P171; **文献标识码:** A

1 引言

耀斑和日冕物质抛射是最剧烈的两类太阳爆发现象,现代太阳物理学普遍认为两者主要由太阳磁场驱动,但怎样的磁场可以产生耀斑和日冕物质抛射,这在当今太阳物理中仍是一个极其重要的问题^[1–2].对太阳X射线的观测,有助于研究太阳内部结构和活动周期,了解太阳磁场、太阳耀斑和日冕物质抛射三者之间的关系,对太阳物理研究及相关恒星形成与演化研究有重要的科学意义^[3–5].

先进天基太阳天文台(ASO-S)是中国科学院空间科学先导专项规划的第2批科学卫星之一,通过多种仪器的联合观测,实现对太阳磁场、太阳耀斑及日冕物质抛射3种太阳活动现象内在关系的研究^[1].ASO-S搭载了3个科学载荷,分别是Lyman- α 望远镜(LST),全日面磁向仪(FMG)和硬X射线成像仪(HXI)^[6].

HXI由3台单机组成,分别是准直器、量能器和电控箱,如图1所示.为实现在30–200 keV能段对太阳硬X射线进行成像观测,HXI采用了空间调制成像技术,利用准直器

2019-03-28收到原稿,2019-05-24收到修改稿

*国家自然科学基金项目(11703097、11427803、11622327),中国科学院战略性先导科技专项(XDA15320104)资助

[†]yzhang@pmo.ac.cn

前后基板安装92对不同缝宽和指向的金属钨光栅,对入射的太阳硬X射线进行傅里叶调制,随后由量能器测量每对光栅调制后的X射线通量和能谱,再通过电控箱收集汇总,由卫星平台发送至地面,最后经过地面数据处理完成图像重建工作.

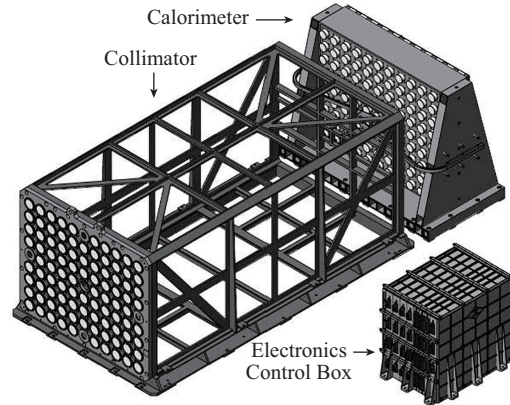


图 1 HXI仪器单机视图

Fig. 1 Schematic view of the HXI payload

量能器作为硬X射线成像仪的重要部件,包含 9×11 个探测单元阵列及相应的读出电子学系统和高压分配电路.每个探测单元由1个溴化镧(LaBr_3)晶体和光电倍增管(PMT)组成:其中92个探测单元位于准直器光栅正后方,用于测量不同傅里叶分量的X射线通量和能谱;3个探测单元前端无光栅遮挡,用于直接测量全日面X射线通量;剩余4个探测单元被金属钨完全遮挡,实现对空间环境带电粒子本底的测量.读出电子学系统安装于探测单元正后方,用于探测单元输出信号的放大、成形和采集处理,并将处理后的能谱和通量等科学数据,通过科学数据接口定时发送给电控箱.

根据ASO-S卫星方案论证报告和HXI分系统任务书的要求,HXI量能器需要观测能段为30–200 keV的太阳硬X射线,在轨标定使用的 ^{133}Ba 可以提供最高能量为381 keV的特征X射线,通过前期测试获得的探测单元对X射线光子的转换效率约为1 pC/keV(光电管电压约800 V),考虑一定的余量,要求电子学系统动态范围为0–400 pC.

根据方案阶段的测试,溴化镧-光电倍增管探测单元的本身能量分辨率在30 keV时约为20%,根据光子转换率和能量分辨率(采用半高全宽(FWHM)统计)的定义,30 keV光子的输出信号分布应在 (30 ± 2.55) pC的范围内(1σ),又因读出电子学噪声应显著小于探测单元信号自身的分布,从而避免造成能量分辨率的恶化,那么按照小于1/5信号分布的要求,读出电子学系统噪声应小于500 fC.

根据HXI分系统任务书的要求,单个探测器需要探测的硬X射线光子的最大流量不小于 $100 \text{ Photons} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (30 keV),已知准直器光栅平均透过率为1/4,探测单元前端铝合金衰减率为1/2 (30 keV),单个探测单元有效面积为 4 cm^2 ,可以计算出每个探测单元的最大事例率不小于50 kHz/s.考虑到探测器输入事例通常服从泊松分布以及读出电子学死时间通常应小于1/10平均事例间隔,因此要求单通道死时间不大于 $2 \mu\text{s}$.

读出电子学输出能谱的能量分辨率来自于太阳硬X射线观测的物理需求,系统积分非线性则按照常规读出电子学系统要求,不大于2%.表1总结了量能器读出电子学系统

的主要性能参数.

表 1 HXI量能器读出电子学性能指标
Table 1 The readout electronics performance of the HXI calorimeter

Performance	Value
Dynamic Range	0–400 pC
Equivalent Noise Charge	≤ 500 fC
Dead Time	≤ 2 μ s
Energy Resolution (FWHM)	$\leq 27\%$ (30 keV)
Integer Non-Linearity	$\leq 2\%$

2 读出电子学需求和挑战

读出电子学(Read-out electronics, RE)系统首先应当满足HXI量能器的各项功能和性能需求. 由于量能器探测单元采用LaBr₃晶体和PMT的探测方式, 读出电子学系统应具备高精度的电荷测量能力, 电子学噪声需要小于探测单元(包括LaBr₃晶体和光电倍增管)自身的能量分辨率; 读出电子学系统动态范围应大于HXI的能量探测范围, 可以用于补偿不同探测单元之间LaBr₃晶体光产额及PMT增益的差异. 考虑到卫星平台数据存储空间和传输带宽的限制, 读出电子学系统应将采集得到的数据转换为分能段的事例计数和能谱数据, 减少星地之间传输的数据量; 读出电子学系统应具有在轨标定功能, 以便及时修正由于温度或其他环境参数变化而造成的测量结果偏差, 并为后续科学数据处理提供依据.

除了上述基本需求外, 针对空间太阳硬X射线成像观测的特点, HXI读出电子学系统还存在以下设计挑战:

2.1 高事例率读出

通过分析国外已有的太阳观测卫星的X射线观测数据, 可以看出太阳X射线流量与太阳耀斑爆发呈现明显的相关性^[7]. 在太阳平静时期, 其X射线流量几乎与空间环境背景一致, 小于1 Photons \cdot cm⁻² \cdot s⁻¹ (30–200 keV); 在太阳活动剧烈时期, X射线流量相比于平静时期有4至5个数量级的增长^[8], 可达到10⁵ Photons \cdot cm⁻² \cdot s⁻¹ (30–200 keV).

国外同类探测卫星常用的活动式X射线衰减片提高了应对高流量信号的能力, 在太阳爆发时移动衰减片遮挡探测单元, 降低实际进入的X射线流量^[9–10], 但由于卫星平台的体积和重量限制, HXI量能器无法采用此类方法. 读出电子学系统一方面需降低单次事例的读出死时间, 提高系统吞吐率; 另一方面应具备信号堆积检测功能, 避免在入射X射线事例率较高时, 采集到信号堆积后的错误幅值.

2.2 高集成度并行读出

空间探测仪器的体积和重量受到卫星平台及运载火箭的严格约束, 因此HXI量能器采用了紧凑的一体化设计方式, 其单机结构布局如图2所示. 量能器在碳纤维框架结构中布置了9 \times 11个探测单元阵列, 并在碳纤维框架后部屏蔽板内侧安装4块电路板, 用于

布置读出电子学系统, 每块电路板面积不超过 $16\text{ cm} \times 18\text{ cm}$.

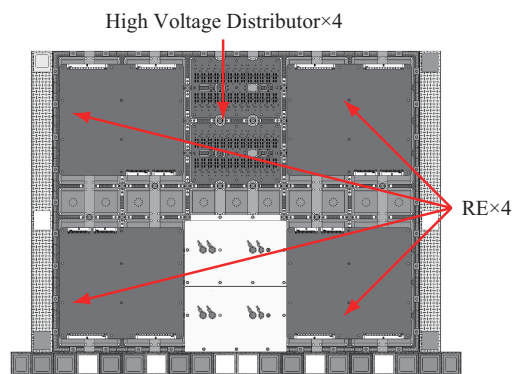


图 2 HXI量能器布局图

Fig. 2 Lay out of the HXI calorimeter

参考暗物质粒子探测卫星的设计经验^[11-12], 读出电子学系统采用了多通道集成电路测量芯片, 从而降低电路复杂度, 降低电子学功耗. 不同于暗物质粒子探测卫星的数据采集和触发机制^[13], 空间傅里叶调制成像原理决定了不同傅里叶分量的探测单元之间不存在数据相关性, HXI读出电子学系统需要为每个探测单元提供独立的触发采集功能, 并拥有独立的信号放大、成形和采集电路, 确保不同通道的数据读出互不影响.

2.3 抗辐射及高可靠性要求

空间仪器的特殊性要求其能够抵御严酷的外部环境, 无法维修的客观条件也要求其具备较高的可靠性. 针对HXI量能器读出电子系统, 空间环境的主要考验来自于高能带电粒子和宇宙线造成的辐射损伤. 根据辐射效应基本知识, 空间辐射效应主要表现在关键元器件的单粒子效应(Single Event Effect, SEE)和总剂量损伤(Total Ionizing Dose, TID)两个方面. 读出电子学系统需要选用高耐辐射等级的元器件, 并在结构上和电路设计上采用合理措施, 提高元器件总剂量和单粒子效应防护等级, 满足空间环境应用要求.

在可靠性方面, 探测单元和模拟信号处理部分无法增加冗余备份, 主要依靠合理设置光栅, 配合地面图像重建算法的优化, 来增加各探测单元数据的冗余度. 读出电子学系统通过在控制现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)芯片内部采用3模冗余设计, 在通信接口等方面采用冗余热备份的方式, 增加系统可靠性.

3 系统设计

3.1 电子学整体结构

读出电子学系统整体结构如图3所示, 全部99套探测单元的输出信号被接入到4块读出电子学板, 每块电路板包含2套读出电子学模块, 每套模块由电荷测量芯片, 13路运算放大器(Operation Amplifier, OPA)和模数转换芯片(Analog Digital Converter, ADC)芯片, FPGA及遥测电路组成. 读出电子学系统的供电来自于HXI电控箱的直流-直流转换(DC-DC)模块, 并通过读出电子学板上的低压差稳压芯片(Low Dropout Regulator, LDO)进行稳压.

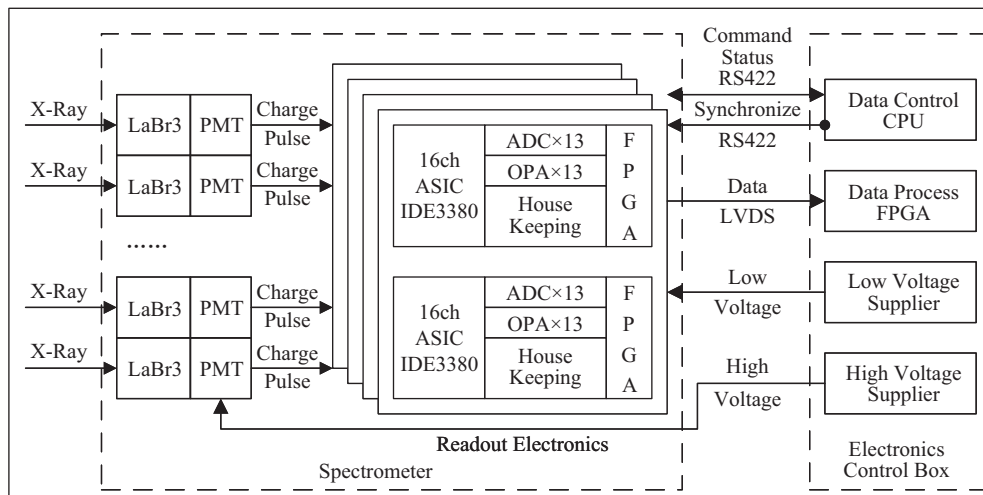


图3 读出电子学框图

Fig. 3 Block diagram of the read-out electronics

读出电子学模块通过电荷测量芯片接收来自PMT的信号, 经过放大和成形后, 输出给外部运算放大器及ADC芯片, 同时输出相关触发信号给控制FPGA, 以控制对应通道的ADC芯片的转换工作. FPGA完成数据采集和能谱累积后, 通过科学数据接口将上述数据传送给电控箱. 科学数据接口采用低电压差分信号(LVDS)电平标准, 码速率为25 Mbps. 为保证全部8套读出电子学模块采集过程同步, 电控箱通过RS422接口向所有模块发送采集同步信号, 信号采用 (500 ± 50) ns负脉冲形式. 电控箱发送的命令信息和读出电子学模块返回的状态信息通过命令/状态接口传输, 该接口采用半双工形式, 使用通用异步收发传输(UART)协议, 传输码速率为115.2 kpbs.

3.2 PMT信号输入及保护电路

为了减少信号衰减并提高信号抗干扰能力, PMT输出信号需要进行屏蔽保护. 综合考虑量能器单机内部布线空间和读出电子学板接插件的布局空间, 最终决定选用RG-178型同轴电缆和Nicomatic公司的CMM型接插件进行信号传输. 为简化设计, 每个读出电子学模块均安装一个13路同轴电缆输入接插件, 并在量能器单机总装时根据实际情况探测单元布置情况, 接入12或13路PMT信号.

根据电荷测量芯片数据手册说明, 芯片内部已经添加了静电放电(ESD)保护二极管. 但是根据暗物质粒子探测卫星研制经验^[11], 对于信号输入管脚依然需要额外添加外部的限流电路和保护二极管, 避免高压电源加断电瞬间产生的大脉冲信号对芯片造成损伤.

图4展示了电荷测量芯片模拟信号输入管脚的静电放电保护电路, 其中 51Ω 电阻提供限流功能. 为了减少电路板面积占用, 保护二极管选用Microsemi公司的1N5772二极管阵列芯片, 每个芯片可以提供8路信号的ESD保护. 需要注意的是, 由于两个保护二极管在正常工作时的漏电流并不完全一致, 因此会产生一个直流电流分量进入电荷测量芯片^[11], 并对实际信号测量造成影响. 生产过程中应对选用的二极管阵列进行筛选, 选择

漏电流尽可能相近的芯片,同时利用电荷测量芯片的输入端电流补偿功能,消除漏电流对测量结果造成影响.

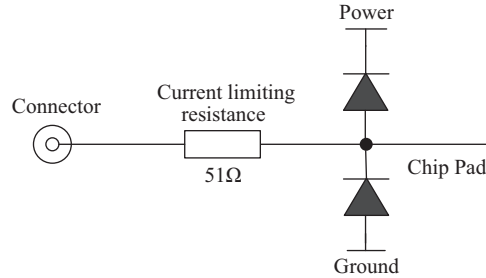


图 4 输入保护电路框图

Fig. 4 Block diagram of the input protection

3.3 电荷测量芯片及模拟电路

集成电荷测量芯片实现了探测单元信号的放大、触发和成形功能,每个芯片提供16路独立的信号处理通道,读出电子学系统通过使用8片电荷测量芯片,实现全部探测单元信号的读出.在集成电荷测量芯片的选型过程中,首先需要考虑芯片的动态范围和噪声必须满足仪器的指标要求;其次,成形滤波电路的时间常数不宜过大,根据现有数据,太阳耀斑爆发时硬X射线平均流量约为 $10^5 \text{ Photons} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,考虑到单位时间内进入探测器的事例数服从泊松分布,要求电荷测量芯片输出信号的达峰时间应小于400 ns,避免高事例率条件下发生信号堆积.综合考虑上述需求和之前类似探测器的研制经验,在HXI电性件阶段,采用IDE3380作为电荷测量芯片来验证系统功能,在初样阶段更换为添加了新功能的IDE3381芯片.

IDE3380芯片的原理框如图5所示,PMT输出信号通过AIN接口输入芯片,由芯片内部的电流输入模块(CMIS)补偿外部ESD保护电路的漏电流,同时根据需要来调整不同探测单元信号的增益.随后信号经过电荷灵敏放大器(Charge Sensitive Amplifier, CSA)积分放大后分别进入慢成形电路(P3)和快成形电路(P4).在慢成形电路中,信号由CR-RC电路滤波成形,输出信号峰值正比于输入脉冲信号的电荷量,信号达峰时间约300 ns,并由跟踪保持电路(Track & Hold)保持,输出给外部ADC芯片进行采集,考虑到ADC芯片的采样转换时间约为1.6 μs ,可以确保单次事例采集的死时间不超过2 μs ;在快成形电路中,信号由另一个达峰时间为50 ns的CR-RC电路成形放大,经过一个可配置的比较器产生触发信号,输出给外部控制FPGA,由于溴化镧晶体的荧光衰减时间不超过25 ns,50 ns达峰时间可以保证电荷收集弹道损失不大,满足触发要求.

读出电子学系统采用每通道独立触发采集的工作方式,触发阈值的标定采用能谱截断的方式间接完成,通过观测不同阈值下采集的能谱数据的截断能量位置,实现触发阈值的能量标定.

外部运算放大器及ADC电路如图6所示.因为电荷测量芯片采用单端电压输出,所以运算放大器仅作为跟随电路,增强驱动能力.由于ADC转换时间是读出死时间的主要部分,为提高系统读出事例率,要求ADC转换时间小于1.7 μs .在ADC选型中发现,采

用Delta-Sigma架构的ADC虽然采集精度较高(超过16 bit), 但采样率通常较低, 不能满足转换时间要求; 采用流水线架构的ADC芯片可以提供5 MHz以上的采样率, 但功耗基本超过200 mW, 如果需要满足16个通道的信号采集, 通常需要配合多路模拟开关, 造成电路功耗较高, 同时电路板面积也较大; 采用逐次逼近寄存器(Successive Approximation Register, SAR)架构的ADC芯片采集精度为10–12 bit, 采样率通常为0.2–1 MHz, 功耗不超过10 mW, 总体性能较为平衡, 可以满足系统对采样速率和功耗的要求. 经过对比后选用ADI公司生产的AD7476EP芯片, 其采集精度为12 bit, 采样率为600 kHz, 功耗小于5 mW, 16个通道总功耗不超过80 mW; 芯片采用SOT23封装, 可以在较小的电路板面积上设计16个通道的采集电路. 该芯片也在暗物质粒子探测卫星硅微条探测器上得到成功应用, 具备在轨飞行经验.

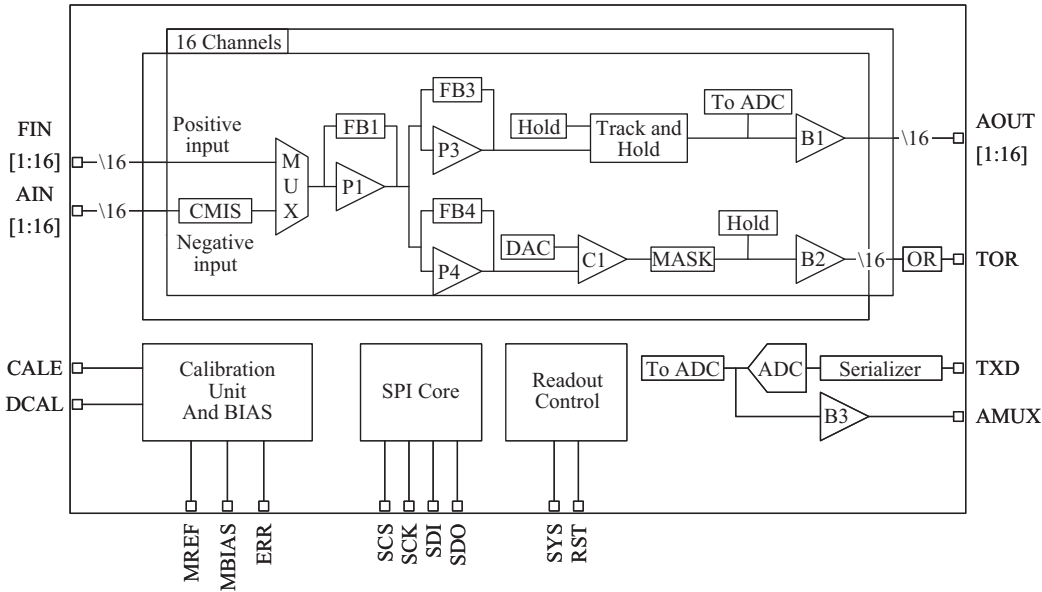


图 5 IDE3380芯片框图

Fig. 5 Block diagram of IDE3380 chip

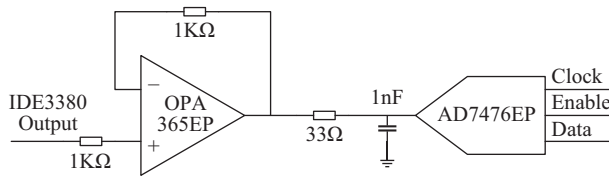


图 6 OPA与ADC电路图

Fig. 6 Block diagram of the OPA & ADC

3.4 FPGA数据处理

ADC转换数据进入FPGA后被处理为科学数据并传输给电控箱. 根据HXI的观测需要, 科学数据分为3类: 逐事例数据—记录了每个信号触发时间码和触发状态等信息, 可

用于在轨触发阈值标定; 能谱数据—将每次采集的数据以能谱形式保存, 用于硬射线图像重建, 同时配合内部标定源可以实现探测单元绝对能量标定; 分能段计数数据—直接使用电荷测量芯片(IDE3381)内部触发单元的分段计数功能, 记录4种不同阈值的触发事例数, 用于太阳大耀斑爆发时($\geq 10^5 \text{ Photons} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)的图像重建, 并可对能谱数据进行修正.

FPGA模块结构如图7所示, 采用存储控制状态机多通道轮询的读出方案. 由存储控制状态机逐个查询每个通道的数据缓存, 如果存在触发采集的数据, 则进行相应的能谱数据和逐事例数据存储. 存储控制状态机的工作频率为50 MHz, 每4个周期完成一个通道的数据处理, 1.1 μs 内完成全部13个通道的数据处理, 小于每个通道ADC芯片的单次转换时间, 从而避免轮询式存储过程丢失数据.

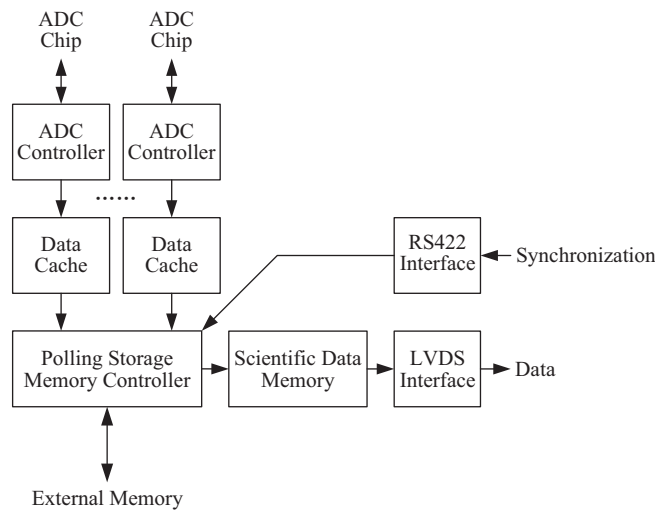


图 7 FPGA单元框图

Fig. 7 Block diagram of the FPGA units

3.5 高可靠性及抗辐射设计

ASO-S卫星运行在720 km高度太阳同步轨道, 根据轨道环境仿真结果, 在3 mm等效铝合金屏蔽条件下, 4 yr寿命内辐射总剂量小于10 krad (Si), 考虑到一定的余量, 要求元器件具备30 krad (Si)的总剂量指标. 探测单元晶体厚度为25 mm, 因此可以在读出电子学板正面替代屏蔽材料, 以阻挡大多数空间辐射; 读出电子学板背面采用增加屏蔽板厚度的方式, 提高总剂量指标. 暗物质粒子探测卫星元器件辐照试验表明^[14-15], VA160系列电荷测量芯片和APA600型FPGA芯片两种关键元器件的总剂量指标均超过30 krad (Si), HXI读出电子学系统采用相同型号的FPGA芯片作为主控芯片, 同时IDE3380芯片采用的生产工艺也与VA160相同, 生产厂家给出该芯片总剂量水平不低于100 krad (Si), 其余元器件也可以通过增加措施满足总剂量指标.

针对单粒子锁定(Single Event Latch-up, SEL)现象, 通过添加限流电阻并监测电流的方式进行防护: 在芯片电源输入端串联0.25 Ω 的电阻, 通过监控电阻两端的电压差实现对芯片工作电流的监控, 当发生单粒子锁定情况时, 控制FPGA可以及时关闭芯片供

电保证芯片安全. 对于单粒子翻转(Single Event Upset, SEU)现象, 通过FPGA内部状态机及关键寄存器的3模冗余设计, 同时添加传输数据校验, 可以有效避免数据错误. 根据厂家提供的指标, 电荷测量芯片单粒子翻转阈值不小于 $50 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$, 单粒子闩锁阈值不低于 $135 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$, 满足卫星空间环境的要求.

4 性能测试

4.1 读出死时间及堆积检测测试

图8展示了一次典型的触发采集过程, 自上而下分别为PMT输出信号、电荷测量芯片触发输出信号、电荷测量芯片模拟输出信号、ADC芯片工作使能信号. 从图中可以看出, 从PMT输出信号到ADC完成模数转换, 单次数据处理时间约为 $1.6 \mu\text{s}$, 满足死时间小于 $2 \mu\text{s}$ 的性能要求.

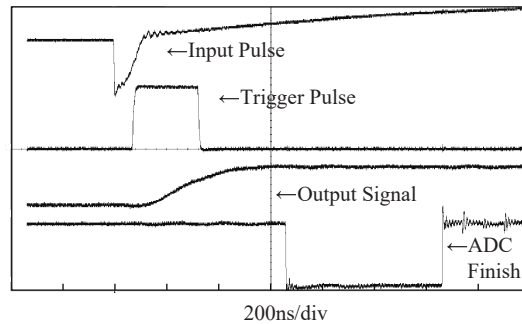


图 8 触发采集波形

Fig. 8 Waveform of the trigger & sampling

图9展示高事例率条件下经常发生的信号堆积过程, 自上而下分别为PMT输出信号、电荷测量芯片触发输出信号、电荷测量芯片模拟输出信号、堆积检测信号. 从图中可以看出, 当PMT输出信号间隔小于ADC采集时间时, 电荷测量芯片模拟输出的信号出现堆积, FPGA通过检测两个触发信号的时间间隔, 判断出现了信号堆积, 堆积监测信号输出高电平, 同时停止ADC芯片采集工作, 放弃当前信号的采集.

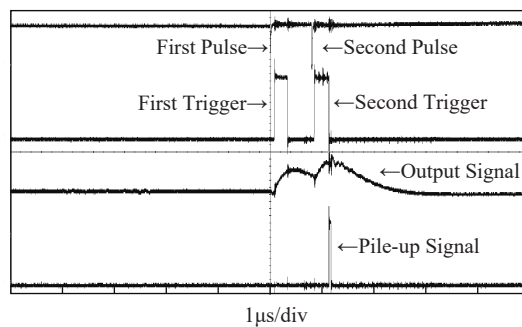


图 9 堆积检测波形

Fig. 9 Waveform of the pile-up detection

由于堆积检测电路采用放弃堆积信号采集的处理方式,会对太阳硬X射线流量测量造成影响,因此在未来IDE3381电荷测量芯片中需要添加能谱计数功能,通过直接利用快成形滤波电路的输出,统计当前通道的事例率,并用该数据作为实际测量能谱和流量数据的修正.

4.2 线性动态范围及噪声测试

通过更改标定电路的输出电压,可以模拟不同电荷量的输入,实现读出电子学线性动态范围测试.从图10可以看出,读出电子学模拟电路部分在30–462 pC输入电荷的范围内输出基本维持线性,拟合结果计算得到积分非线性小于2%.

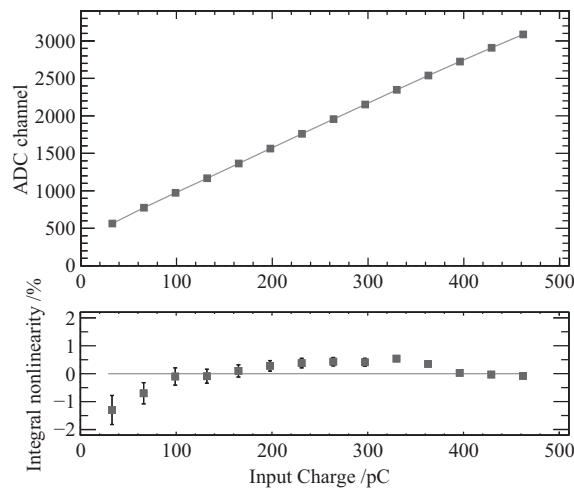


图 10 线性测试结果

Fig. 10 Result of the linearity test

通过标定电路输入小信号脉冲,可以测量电子学系统的探测下线和基线噪声情况,测量结果如图11所示.对于小于10 pC的输入信号,电荷测量芯片输出为恒定值,其数值由内部多级放大电路的失调电压决定,因此读出电子学系统无法测量小于10 pC的信号.图中误差棒为数据峰值高斯拟合后得到的标准差,代表了电子学的噪声水平.通过计算可以得到,电子学系统读出噪声不超过120 fC,满足读出电子学系统噪声小于500 fC的要求,对量能器能量分辨率影响小于0.4% (30 keV).

4.3 能量分辨率测试

使用 ^{133}Ba 和 ^{241}Am 两种放射源,可以测量HXI量能器的实际能量分辨率,图12和图13为测试结果能谱.需要指出的是,由于 LaBr_3 晶体含有 ^{138}La ,其衰变退激发的X射线和同时发生的俄歇电子效应会产生36 keV的能量沉积,与 ^{133}Ba 的31 keV特征X射线相互叠加,因此在进行数据拟合和能量分辨率计算时应当将两者分离.由于 ^{133}Ba 放射源和 LaBr_3 晶体内 ^{138}La 的活度均是已知的,通过双高斯拟合的方式,可以分别获得两个特征峰的分辨率.根据测试能谱计算结果, HXI量能器可以在31 keV实现19.7%的能量分辨率,在59.5 keV和81 keV分别获得13.6%和11.9%的能量分辨率,优于27%能量分辨率的设计指标,可以有效提升分能段成像时的精度.

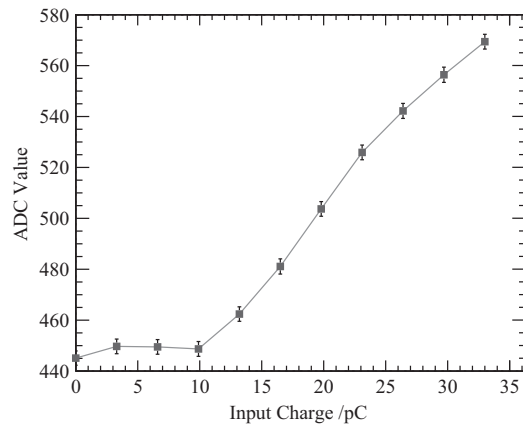
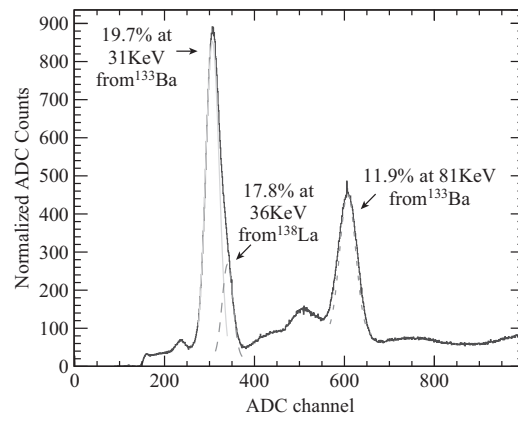
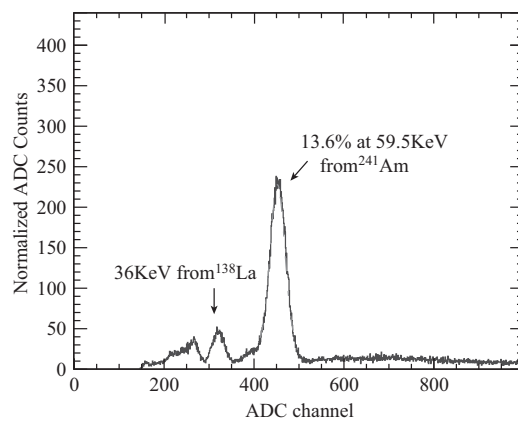


图 11 噪声测试结果

Fig. 11 Result of the noise test

图 12 ¹³³Ba能谱结果Fig. 12 Spectrum of the ¹³³Ba source图 13 ²⁴¹Am能谱结果Fig. 13 Spectrum of the ²⁴¹Am source

5 总结与展望

本文介绍了先进天基太阳天文台卫星硬X射线成像仪载荷量能器的读出电子学系统的设计, 该系统可以实现99路探测单元信号的并行读出和能谱处理, 其电子学读出死时间小于 $2\ \mu\text{s}$, 动态范围内(30–400 pC)积分非线性小于2%, 电子学噪声小于120 fC, 配合 LaBr_3 晶体和PMT探测单元能量分辨率可达19.7% (31 keV). 满足ASO-S卫星硬X射线成像仪对读出电子学系统的性能要求, 并可应用于其他空间太阳X射线探测项目.

参 考 文 献

- [1] Gan W Q, Fan Q L. ChJSS, 2018, 38: 662
- [2] Gan W Q, Huang Y, Yan Y H. SSPMA, 2012, 42: 1274
- [3] 白伟东, 李友平, 甘为群. 天文学报, 2011, 52: 481
- [4] Lanzerotti L J. SpWea, 2001, 125: 11
- [5] Gan W Q. ChJSS, 2016, 36: 636
- [6] Gan W Q, Deng Y Y, Li H, et al. SPIE, 2015, 9604: 96040T
- [7] Lin R P, Dennis B R, Hurford G J, et al. SoPh, 2002, 210: 3
- [8] 张平, 刘四明. 天文学报, 2015, 56: 35
- [9] Hurford G J, Schmahl E J, Schwartz R A, et al. SoPh, 2002, 210: 61
- [10] Krucker S, Bednarzik M, Grimm O, et al. NIMPA, 2016, 824: 626
- [11] Feng C Q, Zhang D L, Zhang J B, et al. ITNS, 2015, 62: 3117
- [12] 赵红赟, 孔洁, 杨海波, 等. 原子能科学技术, 2016, 50: 545
- [13] 郭建华, 蔡明生, 胡一鸣, 等. 天文学报, 2012, 53: 72
- [14] Gao S S, Feng C Q, Jiang D, et al. Nuclear Science and Techniques, 2014, 25: 10402
- [15] Shen Z T, Feng C Q, Gao S S, et al. ITNS, 2015, 62: 1010

Design of the Readout Electronics for Solar Hard X-ray Imager

ZHANG Yan^{1,2} GUO Jian-hua¹ ZHANG Yong-qiang^{1,2}

(1 Key Laboratory of Dark Matter and Space Astronomy, Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210033)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

ABSTRACT The Advanced Space-based Solar Observatory (ASO-S) is the first Chinese solar mission of Chinese Academy of Science, aimed at the 25th solar maximum. ASO-S is expected to observe solar magnetic field, coronal mass ejections (CMEs), and solar flares at the same time. Hard X-ray Imager (HXI) is one of the 3 payloads on board of ASO-S, providing solar X-ray image with high resolution in both time and position. The calorimeter in HXI consists of 99 LaBr₃ scintillators with Photon Multiplier Tubes (PMTs), and their readout electronics measures spectrum of solar X-ray photons in energy range 30–200 keV. A readout electronics for high event rate has been designed to fulfill the requirements of HXI in this paper. The preliminary test results show that the deadtime of readout electronics is smaller than 2 μ s, the noise of readout system is lower than 2 fC, and integral non-linearity is less than 2%, meeting the requirements of HXI instrument.

Key words astrionics, Hard X-ray Imager (HXI), Advanced Space-based Solar Observatory (ASO-S)