

空间太阳望远镜的图象预处理系统研制

王宇舟^{1,2}, 金声震¹

(1. 中国科学院国家天文台, 北京 100012; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要: 空间太阳望远镜太阳磁场测量要求图象的信噪比为 10^4 。受 CCD 满阱电荷的限制, 必须对 CCD 采集到的图象, 在预处理单元进行图象积分以提高信噪比; 为了减小 CCD 引入的噪声, 还采用了 CCD 图象改正技术; 对于宁静态的长时间太阳观测, 为了克服图象漂移导致无法进行图象积分的难题, 提出了图象相关内插累加技术, 来进一步提高信噪比; 预处理单元还担负着偏振测量中的 Stokes 参数归一计算、CCD 控制、调焦控制和图象格式化等任务。文中分析了预处理系统的处理功能需求, 确定了系统设计方案; 采用 FPGA 加 DSP 的硬件结构, 制作了地面原理样机, 开发了系统软件, 在地面支持设备上对系统功能进行了仿真和测试。

关键词: 预处理; 图象积分; CCD 图象改正; 相关内插累加; FPGA (Field Programmable Gate Array)

中图分类号: V447; V443 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2005) 07-1291-04

Development of Image Pre-processing System for Space Solar Telescope

WANG Yu-zhou^{1,2}, JIN Sheng-zhen¹

(1. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Signal-to-Noise Ratio (SNR) requirement of Space Solar Telescope is 10^4 . At the limits of CCD full well electron numbers, in order to improve SNR, the images collected by CCD must be accumulated in pre-processing unit; CCD image correcting technique was adopted to decrease CCD self-noise; In order to solve image drift, images correlative interpolation accumulation method was brought forward to further improve SNR and to meet design requirement. Pre-processing unit also undertakes tasks as following: Stokes parameter calculation during polarization measurement, CCD control, focusing control and image formatting. The requirements of pre-processing unit were analyzed, and system design solution was established. A ground functional prototype was completed according to above scheme with DSP and FPGA as the main chips, and system software was developed. The system function was simulated and testing under ground support equipment.

Key words: Pre-processing; image integral; CCD image correcting; correlative interpolation accumulation; FPGA

1 引言

太阳是天文学研究的重要内容, 而太阳磁场是太阳物理中最重要的核心物理量, 它在太阳大气结构和太阳活动现象中, 发挥了十分重要的作用。以高分辨率的太阳磁场测量是目前和未来太阳物理研究的前沿课题。由于地球大气的严重干扰, 空基观测在波段的扩展上、时间、空间和光谱分辨率上都是地基望远镜无法比拟, 空基观测还可以对太阳进行连续的全天候观测。因此, 国家天文台在 863 专家组、国家基金委、国家航天局和中国科学院的支持下, 开展了空间太阳望远镜 (Space Solar Telescope, 缩写为 SST) 的研究工作^[1,2]。

SST 主要搭载的科学观测仪器包括: 口径为 1m 的主光学望远镜 (MOT)、H 和白光望远镜 (HWT)、极紫外望远镜 (EUT)、宽波段光谱仪 (WBS) 及太阳和行星际射电频谱仪 (SIR)。通过这五个仪器, 期望对太阳磁场进行多波段协同的、高分辨率的、多工作模式和不间断的观测。由五个仪器的 CCD 或天线传感器采集的科学数据达 1728 GB/天, 这些数据通过预处理系统进行图象积分、CCD 图象改正、偏振计算、数据格式化等处理以后, 数据量缩减为 50 GB 的统一格式化数据, 送

到后续单元进行其他处理。可见, 预处理是整个科学数据处理系统的关键处理节点, 预处理系统的研制是星载科学数据处理系统的关键环节之一。

本文在分析了 SST 对预处理系统需求的基础上, 介绍了图象预处理的基本内容和预处理的技术方法; 接着对预处理的设计方案进行分析, 通过系统的性能要求和处理要求分析, 确定了总体设计方案; 对软硬件进行了合理划分, 确定了系统软硬件结构, 并给出了地面样机的硬件结构、软件流程和以及实验结; 最后给出了进一步的设计优化考虑。

2 预处理系统的需求分析

预处理系统是 SST 星载科学数据处理单元 (SDPU) 的一个子系统。如图 1 是 SDPU 的结构示意图, 五个仪器共形成 17 个数据通道, 它们是: 15 个 CCD 通道、1 个由三个仪器构成的光谱仪通道和 1 个由 320 通道构成的射电频谱仪通道。17 个通道的数据以不同的观测模式、不同的数据率和不同的数据字长, 流向预处理阵列中各自对应的预处理单元。预处理接收到数据后, 主要进行信噪比提升和数据量压缩, 如图象积分、CCD 图象改正和相关内插累加等; 对于偏振测量的 8 个 MOT

收稿日期: 2004-07-15; 修回日期: 2005-04-25

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 课题 (No. 863 - 2.5.1.25)

通道还要进行 Stokes 参量归一计算;预处理还担负着部分仪器控制任务,如 CCD 曝光起停、CCD 数据读出控制、调焦控制和偏振分析仪状态改变等;预处理以后,图象的数据量由 1728GB 缩减到 50GB;最后各通道的数据经格式化以后被送到海量存储器(固体数据记录器)^[3]中进行保存.海量存储器除了要实时接收和保存 17 个预处理通道送来的数据外,还要负责把数据送到压缩单元进行压缩,压缩完成后再保存回海量存储器.卫星过顶时,海量存储器还负责把数据送到数据下传单元,以便由下传单元把数据传送到地面站.卫星的下传能力为 10GB/天,预处理后的 50GB 数据被压缩单元压缩到 10GB.整个 SDFU 由一个控制单元(管理机)通过 485 总线对各单元进行控制、协调和监测.

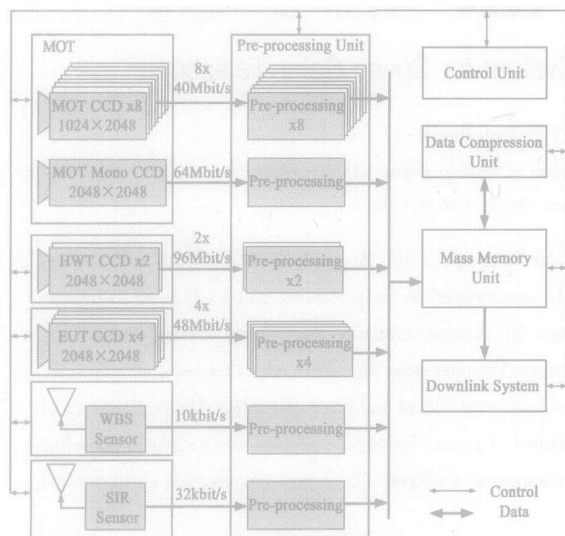


图 1 SST 系统结构和数据流图

总结预处理系统的处理任务应有如下几个方面:

- (1) 从五个仪器接收科学数据;
- (2) 对图象进行信噪比提升处理操作,如图象积分、CCD 改正和相关内插累加等;
- (3) 偏振测量的 Stokes 参量归一计算;
- (4) 仪器控制,如 CCD 控制、调焦计算与控制偏振分析仪状态改变控制等;
- (5) 接收管理机的观测任务、观测数据格式化所需的数据;
- (6) 进行数据格式化;
- (7) 把数据传向海量存储单元.

其中(2)、(3)、(6)是预处理单元的数据预处理的主要内容,而其它是一些数据流控和辅助管理功能.

3 数据预处理

数据预处理任务是预处理系统的基本功能.它包括信噪比提升算法、Stokes 参量归一计算、和数据格式化三个内容.

3.1 信噪比提升

信噪比提升算法包括图象积分、CCD 改正和相关内插累加三方面.

图象积分是天文观测提高信噪比的基本策略,对于暗星

的观测直接可以在 CCD 的势阱里进行.但对于高灵敏度的太阳(亮星)观测,由于 CCD 的满阱电荷限制,只能把积分放在数据处理上,就是对 CCD 采集到的图象进行多帧图象叠加. SST 的 MOT 定义如下三种标准的观测模式: 突发模式:观测周期为 30s; 活动区模式,观测周期为 3min; 太阳宁静模式,观测周期为 30min. 模式和 是基本突发模式的多次重复,且: $= \times 6$; $= \times 10$; 我们的观测安排如表 1,光学仪器组合状态在 4s 时间内保持不变,然后用 1s 时间改变仪器状态,在 4s 的间隔期间 4 次曝光,每次占用 1s,这些曝光图象将用于数字累加(图象积分),6 个累加结果为 S_{V1} , S_{V2} , S_{Q1} , S_{Q2} , S_{U1} , S_{U2} . 累加从时间 0 点开始, S_{V1} 的累加从 0s 到 4s, 4s 到 5s 期间进行仪器调整, S_{V2} 的累加从 5s 到 9s,如此依次完成如表 1 中从 S_{V1} 到 S_{U2} 的观测,这样一个突发模式周期为 30s. 活动区模式是由 6 个连续的突发周期构成,也就是上述 6 个连续的观测周期的重复;而宁静模式又是 10 个活动区模式构成.

表 1 三种模式下 Stokes 参量观测安排

	突发模式	活动区模式	宁静模式
S_{V1}	4s + 1s	24s	256s
S_{V2}	4s + 1s	24s	256s
S_{Q1}	4s + 1s	24s	256s
S_{Q2}	4s + 1s	24s	256s
S_{U1}	4s + 1s	24s	256s
S_{U2}	4s + 1s	24s	256s
观测时间	30s	3min	30min

CCD 图象改正的目的是为了抑制探测器的内部噪声,进一步提高图象信噪比. CCD 图象改正的内容主要包括:坏像点的在线检测和改正、暗流偏置消除和平场(非均匀性)消除等^[4~6]. 坏点的检测和改正的方法是:坏点检测的方法,是顺次扫描图象的每个像点的灰度值,看它是否超越一个给定的上下界,若超越则表明它为坏点;坏点改正的方法,是在以坏点为中心的领域取定一个 5×5 的数据块,以这个数据块除了坏点外的所有点的均值作为坏点的改正值.暗流偏置和平场的消除,首先是在星上计算出暗图象、偏置结构和平场.暗流和偏置是两种不同的噪声,但二者都是加性的,并且二者也混在一起,可以不分进行标定. CCD 采集零一系列曝光图象,预处理通单元过对这些数据的处理可以获得暗图象和偏置值;同样,CCD 采集一系列虚焦的极区图象,由预处理结合前面计算得到暗流偏置,可以计算出平场图象.在图象改正时,先改正坏点,再减去暗流偏置,最后除以平场,便完成了 CCD 图象的改正.

相关内插累加是提出来,用于解决前后采集到的图象,由于漂移而无法直接进行积分(叠加)的难题^[7,8]. 这个操作主要是对长达 30 分钟的宁静观测模式进行的,30 分钟时间间隔采集到每个分量的 240 帧图象要叠加在一起.由于图象严重漂移,图象直接进行叠加的结果显然是无效的,因此,我提出了相关内插累加方法.由于宁静模式观测是 10 个活动区模式的重复,在进行宁静模式观测时,以一次活动区模式(3min)为单位进行图象积分,每个 3min 的积分图像依次按如下方法进行

处理.在第一个 3min 积分图象的适当位置选 256 × 256 作为参考图象,并把第一帧积分图保存为累加量;在以后得到的 3min 积分图象中同样的位置,取出 256 × 256 图象作为活动图象,将参考图象和活动图象进行相关,可以计算出图象的整数漂移量(整数部分),并拟合出亚像元漂移量(小数部分);有了图象的漂移量,先将图象整体反向挪动以补偿漂移,挪动量是整数漂移量,再根据亚像元漂移量进行线性内插,最后再把内插图象叠加到累加量上去,得到新的累加图象,如此一直到完成一次宁静模式的观测.

3.2 Stokes 参量计算和数据格式化

按表 1 积分好的图象,都是 Stokes 参量左右旋分量,一方面为了减少数据,另一方面为了数据定标的需要,因此要以像点为基础进行 Stokes 参数计算,其公式如下:

$$I = \frac{1}{2} (S_{V1} + S_{V2}) \text{ 或 } \frac{1}{2} (S_{Q1} + S_{Q2}) \text{ 或 } \frac{1}{2} (S_{U1} + S_{U2})$$

$$Q = \frac{S_{Q1} - S_{Q2}}{S_{Q1} + S_{Q2}}; U = \frac{S_{U1} - S_{U2}}{S_{U1} + S_{U2}}; V = \frac{S_{V1} - S_{V2}}{S_{V1} + S_{V2}}$$

数据的格式化采用 CCSDS 标准格式.国外在 80 年代初推出 CCSDS 标准,现已普遍采用.目前,国内在载人航天、双星空间探测、风云气象卫星和月球探测工程中已实际应用这种标准协议.CCSDS 标准主要针对多任务飞行器,将大量不同步数据同时传输.SST 各有效载荷科学探测数据在速率、格式上有很大不同,因此,SST 特别适合采用 CCSDS 格式化标准.依据 CCSDS 标准,可以通过虚拟信道主导头和包头标识来区分不同数据,将各种不同速率、不同应用过程、不同性质的数据打包复接为一串行数据流,送统一物理信道下行传输给地面接收站.预处理单元要按 CCSDS 协议打包 SST 的星上数据.图象头中应包括的内容有:(1)观测仪器标志;(2)观测通道号标志;(3)观测模式标志;(4)观测分量标志;(5)观测时间;(6)数据大小等.只有经过了格式化的数据才能传送到海量存储器.

4 预处理单元的设计方案分析

根据上面对数据处理任务的分析,可见预处理单元具有较大的计算复杂度,同时具有处理的并行性和实时性的特点.并行性体现在图象积分与 CCD 纠正、Stokes 参量计算、相关内插累加计算以及数据格式化等,必须在时间上并行进行;CCD 图象采集的实时性要求预处理的处理也是实时进行的.除了数据处理任务,预处理还负责一些管理任务,如 CCD 控制、调焦控制和偏振测量仪器调制等.预处理还通过 RS485 总线与控制单元通信,主要获取观测任务、返回系统的健康和状态标志等.

系统结构体系可以是由 DSP 芯片组成阵列处理系统,也可以用 FPGA 或 CHLD 构成硬件处理结构.DSP 阵列处理结构的优点是:具有软件变成的灵活性,可以处理复杂的算法和进行浮点数处理,但其缺点是:DSP 阵列处理结构系统的体积大、功耗大、重量大、造价高;FPGA/CHLD 构成的硬件处理结构,可以充分利用可编程器件的逻辑资源,硬件逻辑结构可重构配置,可以设计出并行和流水处理结构,处理速度较快,其缺点是对于复杂算法和浮点数处理,硬件的设计的难度很大.

根据上面的分析,在预处理的系统结构上,采用了 FPGA

加 DSP 的结构,综合两者的优势,使系统在软件和硬件上的灵活性较好.对于有 17 预处理单元的预处理阵列,可以采用相同的硬件结构,根据各仪器的不同要求来配置 FPGA 即可;利用 FPGA 的丰富资源还可以设计大量的并行逻辑结构,实现预处理的多模式、多功能、多处理任务、大数据量的处理和流控管理.

值得一提的是,为了克服美国的航天级芯片限制制度,欧洲已作了大量的研究,准备在商用的 FPGA 芯片内设计处理器内核,充分利用 FPGA 的资源优势,采用多种技术,保证空间应用的可靠性.目前,可以直接植入 FPGA 的处理器 IP 核(Leon2)已经设计出来,可以直接放到商用的 FPGA 里去,并对其加以一些诸如屏蔽措施等空间化策略,就可以用于空间应用系统中.在我们的设计和研制过程中,也在努力借鉴这一技术,以期提高我国星载系统的处理能力.

5 预处理单元设计与地面样机研制

按照上面的方案讨论,我们对系统的软硬件结构进行了设计,并研制了初步的地面原理样机,以期实现所需的功能;设计时,对设计重用和设计的通用性进行充分考虑,因为不同的仪器的预处理单元并不完全相同,我们预期得到一个通用处理模块,并且基本功能可以重用.

5.1 硬件设计

图 2 为预处理的通用硬件结构,它由充色框和 DSP 一起构成.其中充色框是 FPGA 中设计的硬件模块,CCD 送来的图象送到积分器进行图象积分,上以次积分就绪的数据,由 DSP 进行其余处理;DSP 和积分器是并行进行的,两者的运行存储空间是对立的,为了避免图象在积分存储空间和 DSP 处理存储空间来回传递,采用乒乓结构的多路开关来进行存储区交换;预处理同管理单元的接口采用 UART 核在 FPGA 中实现;预处理同压缩单元的接口采用 DSP 的同步串口.

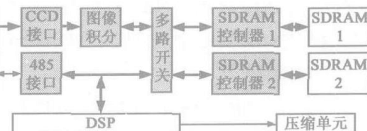


图 2 预处理硬件结构

系统的主要芯片是 DSP 和 FPGA,还包括存储器芯片和一些其它芯片.由图可见,图象积分、SDRAM 控制器、CCD 接口、485 接口都在 FPGA 中用硬件逻辑实现.而大部分的复杂运算是由 DSP 软件来完成的.

对主要器件的选择作如下考虑:(1)DSP 芯片选择的是 ADSP21060,因为它是已经经过了飞行验证、航空可用的芯片,并且处理能力强,时钟频率最高达 40MHz,提供 40MIPS、峰值 120MHOPS 和均值 80MHOPS 的运算性能.(2)FPGA 采用 SRAM 工艺的 XC2V1000 芯片,利用它丰富的资源,除了可以设计功能强大的处理功能,还可以进行关键逻辑冗余、三模表决和硬件纠错逻辑(如 EDAC)等可靠性设计,同时还可以进行放置自测试逻辑等可测性设计;SRAM 工艺 FPGA 可以采用可重构配置技术,届时星上系统可以通过地面站,修改系统的功能和结构,这对将来卫星目标和方案的修改是很方便的.

对主要器件的选择作如下考虑:(1)DSP 芯片选择的是 ADSP21060,因为它是已经经过了飞行验证、航空可用的芯片,并且处理能力强,时钟频率最高达 40MHz,提供 40MIPS、峰值 120MHOPS 和均值 80MHOPS 的运算性能.(2)FPGA 采用 SRAM 工艺的 XC2V1000 芯片,利用它丰富的资源,除了可以设计功能强大的处理功能,还可以进行关键逻辑冗余、三模表决和硬件纠错逻辑(如 EDAC)等可靠性设计,同时还可以进行放置自测试逻辑等可测性设计;SRAM 工艺 FPGA 可以采用可重构配置技术,届时星上系统可以通过地面站,修改系统的功能和结构,这对将来卫星目标和方案的修改是很方便的.

5.2 软件设计

如图 3 是预处理的工作流程, 充色框中的任务是 DSP 的处理流程, 白色框中的处理是硬件逻辑在 FPGA 中实现的. 由此可见预处理的软硬件功能划分情况. 积分处理由 FPGA 中设计的硬件积分器来实现, 而 CCD 图像改正、Stokes 参数计算、相关内插累加、图像格式化和图像传送由 DSP 软件来实现.

DSP 的软件开发分为两个部分, 一个是数据处理的软件, 主要完成如图 3 的 CCD 改正、Stokes 参数计算、相关内插累加和标定计算等, 这些软件模块是用 C 语言开发的, 主要是利用它较高的抽象级别, 缩短开发时间; 另一个是系统初始化、待命、空闲状态的工作、仪器控制、各种状态和模式的设置、数据传送的 DMA 设置等, 这些软件模块是由汇编指令来编写的, 主要是利用其执行的高效性, 利于实时处理.

5.3 实验结果

采用 DSP 在线仿真器对原理样机作了硬件测试和软件开发. 测试时, 首先是对各接口进行了测试, 在保证了数据可以正确的接收和发送以后, 测试系统的功能, 这些测试都是在一个专门为 SDPU 开发的, 对各子系统和整个系统都可以进行测试的地面支持系统平台上进行的. 经过单元测试, 再与其它单元接在一起进行系统级的联调和测试. 测试的结果表明预处理系统达到设计目标, 能够正确完成系统需求中所列的各项处理功能. 已完成的地面样机达到了合同的要求, 如图 4 是我们研制成功的预处理系统的地面原理样机.

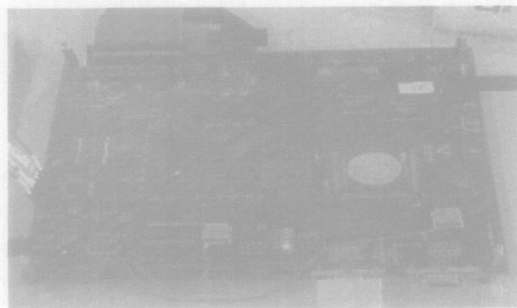


图 4 预处理系统的地面原理样机

6 结论

分析了 SST 对预处理单元的需求后, 给出了数据预处理的方法和技术, 为系统结构和软硬件的划分和权衡提供依据; 系统的结构设计, 在通用性和重用性上作了充分的考虑, 为将来采用可重构配置技术或将 Leon2 处理器核置入 FPGA 内, 作了一定的准备. 整个预处理阵列的 17 个通道, 每个通道采用相同的模块, 通过对 FPGA 的重新配置, 可以适用于不同的科学仪器, 这是采用 FPGA 的优点之一. 地面原理样机的研制证明了设计方案的可行性, 为进一步的研究提供了经验和准备.

在调试的过程中, 我们发现软硬件的合理化分方面还需进一步优化, 以充分发挥两者的优势, 按我们的期望, AD-SP21060 最终要被 Leon2 代替, 那么 DSP 当前承担的任务要进行硬件展开, 放进 FPGA, 因此进一步的研究是需要的.

参考文献:

- [1] 中科院北京天文台 SST 研究组, 德国马普高层大气研究所. SST A 相报告 (第二版) [R]. 1997. 3: 2. 1 - 2. 30.
- [2] 中科院北京天文台 SST 研究组, 德国航空航天研究所. SST 评估研究报告 [R]. 1997. 5: 30 - 36.
- [3] 王芳, 李恪, 等. 空间太阳望远镜的星载固态存储器研制 [J]. 电子学报, 2004, 32(3): 6 - 9.
Wang F, Li K, Su L, et al. Development of onboard solid state recorder for space solar telescope [J]. ACTA Electronica Sinica, 2004, 32(3): 6 - 9. (in Chinese).
- [4] 王庆有. CCD 应用技术 [M]. 天津: 天津大学出版社, 2000. 38 - 45.
- [5] Ians, Mclean, B. Sc (Hons). Electronic and Computer Astronomy: From Eyes to Electronic Sensors [M]. New York: Ellis Horwood Limited, 1989. 192 - 209.
- [6] James Janesick. Scientific Charge Coupled Devices [M]. Washington: SPIE Press, 2001. 605 - 690.
- [7] 孙后环, 周必方, 等. CCD 相关跟踪器系统的研制 [J]. 光学仪器, 2001, 23(1): 10 - 15.
- [8] 金一庆, 陈越. 数值方法 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000. 105 - 112.

作者简介:



王宇舟 男, 1970 年 10 月出生于四川省台县, 1993 年毕业于电子科技大学电子机械系, 现为中国科学院国家天文台博士研究生, 主要从事图像处理、数字系统设计与测试方面的研究.

金声震 男, 1944 年 6 月出生于湖南省长沙市, 1970 年毕业于北京大学物理系, 现为中科院国家天文台研究员、博士生导师, 主要从事星载电子、计算机系统、卫星姿态控制、遥测遥控和地面系统等方面的研究工作.