

空间太阳望远镜的星载固态存储器研制

王 芳¹, 李 恪², 苏 林³, 耿立红¹

(11 中国科学院国家天文台, 北京 100012; 21 北京科学技术大学, 北京 100083; 31 中国科学院遥感所, 北京 100101)

摘 要: 空间太阳望远镜有五个载荷仪器, 其每天产生的数据达 1728GB, 数据流以固态存储器为核心在星上数据处理系统各单元间调度, 完成缓存、压缩、存储和下传. 本文分析了对固态存储器的需求, 建立了其状态机模型, 并确定了总体设计方案. 根据该方案用 DSP 和 FPGA 构成控制逻辑, 用 DRAM 芯片阵列构成存储模块, 制做的地面原理样机对系统功能进行了模拟和验证.

关键词: 星载固态存储器; 数据存储; 状态机; ADSP21060; DRAM

中图分类号: V447; V443 **文献标识码:** A **文章编号:** 03722112 (2004) 030472204

Development of Onboard Solid State Recorder for Space Solar Telescope

WANG Fang¹, LI Ke², SU Lin³, GENG Li2hong¹

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

21 Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China;

31 Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: The science data generated by five instruments onboard the space solar telescope is about 1728GB per day. Data flow passes through the onboard data handling system with the data storage unit called the solid state recorder as the core element to be buffered, compressed, stored and downlinked. The requirements for the solid state recorder were analyzed, the state machine model was made, which could reduce the system design in complexity, and the whole scheme was established. A ground functional prototype was completed according to above scheme with DSP and FPGA as the control part, and the DRAM chip array as the storage module. The system functions were emulated and proved.

Key words: onboard solid state recorder; data storage; state machine; ADSP21060; DRAM

1 引言

高分辨率太阳磁场观测是目前和未来太阳物理研究的前沿课题. 由于地球大气对电磁波的吸收和大气湍流的影响, 在地面上无法实现全波段太阳磁场和相关日面活动的高分辨率观测. 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卫星 (Space Solar Telescope, 缩写为 SST) 的研究工作.

空间太阳望远镜主要搭载五个科学观测仪器, 期望对太阳磁场进行多波段协同的、高分辨率的、多工作模式的和不间断的观测, 这要求星上数据处理系统具有对高速、海量科学数据流进行实时处理的能力. 数据流以数据存储单元 (固态存储器 Solid State Recorder, 缩写为 SSR) 为核心在各数据处理单元间调度, 完成缓存、压缩、存储和下传, 这使 SSR 成为星上数据处理系统设计的关键.

本文在分析空间太阳望远镜对固态存储器需求的基础

上, 建立了 SSR 的状态机模型, 由此确定总体设计方案, 并给出了地面原理样机的硬件结构、软件设计和实验结果, 最后给出进一步的优化考虑.

2 空间太阳望远镜对固态存储器的需求^[1]

空间太阳望远镜有效载荷包括主光学望远镜 (MOT)、HA 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) 五个科学仪器. 数据采集由 CCD 探头和天线传感器完成, 按照预定的观测任务, 原始观测数据量高达 1728GB/天. 不同仪器产生的数据格式、数据率均不同, 特别是由于观测模式的不同, 使同一种仪器产生的数据量在不同时间的起伏很大, 因此, 数据在进入 SSR 之前, 先由预处理单元 (Preprocess Unit) 完成图像积分, 并统一数据格式. 图像积分是指根据观测模式的不同做不同的在线图像累加, 该处理可提高图像的信噪比, 并显著减小数据量至 50 GB/天. 当卫星过顶时, 卫星与地面站建立通信, SSR 送数

据到数据传输系统(Data Link System),由其完成数据下传.图 1 给出了科学数据流的流向图.因为 SSR 采用单地面站接收方式,每天星地通信时间约 30 分钟,拟采用的下传数据率为 60Mbps,下行能力约 10GB/天,因此,进入到 SSR 的数据还要进行压缩,压缩比为 5:1.由于星载处理器处理速度的限制,采用离线压缩(Data Compression Unit).图中的控制单元(Control Unit)通过 485 总线对各部分的工作进行控制和协调,并监控它们的状态.

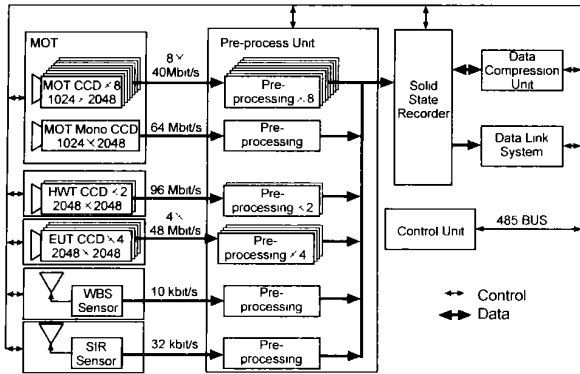


图 1 SSR 有效载荷数据流

总结数据处理系统对 SSR 的需求如下:

- (1) 从控制单元接受命令和观测标志,并向其报告状态;
- (2) 接收预处理单元数据,加上相应标志进行缓存;
- (3) 送缓存数据到数据压缩单元;
- (4) 当压缩完成后,存储压缩数据;
- (5) 当数据下传任务开始后,停止其它数据处理工作,送压缩数据到数据传输系统.

3 固态存储器的建模

从对 SSR 的需求分析可以看到 SSR 是一个以数据流为中心的状态机,在控制单元的命令下完成对数据流的缓存、转移、存储和下传,因此,采用状态机的分析方法建模来描述并实现其功能.

SSR 的工作状态应包括:

- (1) 对应于上述需求的四种数据流动状态,即,接收预处理单元数据到存储阵列缓存、送缓存数据到压缩单元、取回压缩单元的压缩数据到存储阵列存储、送压缩数据到下传系统;
- (2) 初始化,进入正常工作前对系统作初始设置;
- (3) 待命状态,系统准备好,等待接受命令去完成相应任务;
- (4) 刷新,SSR 拟采用的存储介质是 DRAM 芯片,需要周期刷新;
- (5) 空闲,SSR 暂时无数据流动,为降低功耗,使存储阵列处于数据保持状态.

SSR 在不同的控制命令下,在以上各种工作状态间互相转换.触发状态转换的命令信号定义如表 1 所示,状态图见图 2,图中以小写字母表明命令,以信号值为 1、0 表示状态的开始和结束.四种数据流动和刷新都要访问存储阵列,为使 SSR

对数据流进行处理时不被 DRAM 的刷新中断,以简化数据处理流程,所以从待命状态进入四种数据流动状态之前,先进入刷新状态,确保在数据流动时不出现刷新命令;当处于一种数据流动状态时,对新的命令先进行缓存,等待本次数据流动结束,回待命状态后再作处理,由于命令的传输速率低,所以这样并不会对命令的执行产生过大的延迟;处于待命状态时,对命令响应的优先顺序是刷新、数据下传、接收预处理数据、存储阵列到压缩、压缩到存储阵列、空闲.

表 1 触发状态转换的命令信号

信号名	值为 1	值为 0
i	开始初始化	初始化结束
n	进入空闲	空闲结束
r	刷新周期到	刷新结束
p	预处理到存储阵列申请	预处理到存储阵列结束
s	存储阵列到压缩申请	存储阵列到压缩结束
f	压缩到存储阵列申请	压缩到存储阵列结束
d	下传到存储阵列申请	下传结束

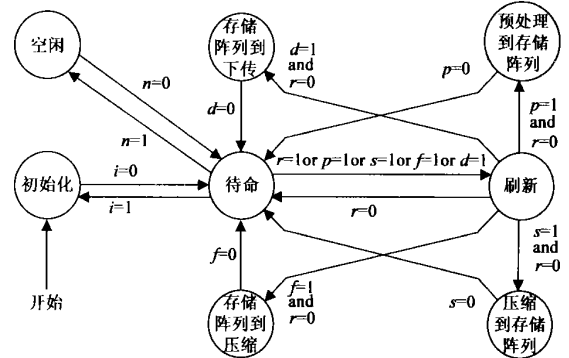


图 2 固态存储器状态图

4 固态存储器的设计方案^[1]

4.1 固态存储器的结构设计

依据 SSR 的状态机模型,SSR 应由存储单元、存储管理单元、接口单元、电源单元组成(图 3).存储单元由若干存储模块组成,各存储模块在硬件上完全一样,由数据量决定存储模块的数量.存储管理单元作为中央处理器控制 SSR 中各项功能的执行.接口单元包括与主控单元、预处理单元、压缩单元和数据传输系统的接口.由于数据下传开始后,SSR 停止与预处理单元和压缩单元的数据传送工作,所以,数据传输系统可以和压缩单元复用接口,由存储管理单元控制接口的使用权.每个接口均用数据缓存器缓存接收或待发送的数据,使各接口的数据传送可并行.存储模块以串联或并联总线与接口相连.除与主控单元的命令接口外,其余接口都要与 SSR 的存储模块交换数据,但与存储模块的数据转移只有一个通道,而且,存储模块本身还要定时刷新,为避免数据吞吐瓶颈,数据以直接存储器访问(DMA)方式经过此通道.因为每次数据的传送是以数据块的形式,采用文件的方式对数据块的存储进行管理,给出文件存储的起始地址及大小,就可在存储模块里找到该文件.

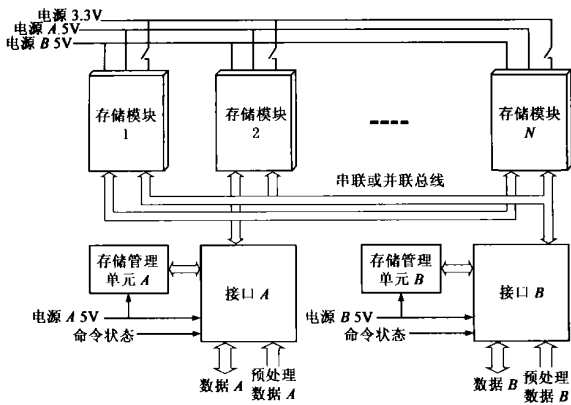


图3 固态存储器结构框图

4.1.2 航天可靠性设计

SSR 元器件大多为半导体器件,抗辐照问题是 SSR 设计的主要问题.拟采取措施如下:

(1)选择等级高的器件.根据 SST 的轨道条件和卫星寿命,可知星上电子器件受到的辐照总剂量为 10 Krad(Si).对于系统控制电路等关键核心部位所使用器件,如 CPU, FPGA, ROM, RAM 等可以买到等级达 MIL-STD-883B,耐辐照可达 30Krad(Si)以上;对于用量最大的存储器件可以买到工业级的 DRAM,通过筛选和加固措施也能达到很好的耐辐照效果.而且,SSR 外壳采用 5mm 等效铝屏蔽^[2],可使其承受电离辐照达数百 Krad(Si).

(2)关键线路采取冗余设计,例如增大额定存储容量的 1/4,对于损坏的部分由冗余补偿;存储管理单元、接口电路和电源单元均为双备份模块,当出现异常时可以自动切换到备份工作电路工作.

(3)采用汉明编码(检测数据字的两位错,纠正一位错误)实现对错误数据的校正处理.每个字中由一次单粒子事件(SEU)导致的错误可以更正,随着时间推移造成的错误积累要靠对全部存储空间的周期扫描来纠正.周期扫描完成对每个存储字的读出,并在发现单个错误后重写正确字.错误纠正和周期扫描均由硬件支持,对用户透明.

(4)从电磁兼容性上考虑,例如,用防辐射导线,良好接地,电子线路合理布局,电源加滤波,CMOS 器件加限流保护电阻防门锁等措施.

5 固态存储器的地面原理样机研制^[3-7]

初步的地面原理样机的研制目标是按照上述方案,实现 SSR 所需功能,并对可靠性作初步考虑.

5.1 硬件设计

对主要器件的选择作如下考虑:¹ 鉴于 ADSP21060 的前身 ADSP21020 进行过空间应用,并且 ADI 公司正试图以 ADSP21060 取代 ADSP21020,因此 DSP 芯片选择 ADSP21060;² FPGA 和 DRAM 芯片比较通用,因此仅在芯片规模上考虑了空间应用的可行性.

按照结构框图 3,硬件电路由控制板和存储板组成.控制板由 DSP 和 FPGA 构成,完成接口和存储管理功能.存储板相应于一个存储模块,由 64 片 16M16 位的 DRAM 芯片 HY57V561620 构成,净容量为 2GB.64 片 DRAM 分为 7 组进行控制,分组控制可以简化控制逻辑,并降低由于全部芯片同时刷新导致的较大的瞬态电流.

5.2 软件设计

根据 SSR 的状态图,DSP 软件的主程序完成系统初始化、待命和空闲状态的工作;DRAM 刷新以及存储模块与数据传输系统、预处理、压缩单元之间的数据流动由四个中断子程序分别完成,中断的优先顺序和上述排列顺序一致.状态图的控制策略体现在对中断的优先级和开关中断的控制上.中断子程序配合硬件的设计完成接口通信协议、内部状态寄存器查询、DMA 控制器设置、存储地址计算和 DRAM 芯片访问控制.

5.3 实验结果

已完成的地面原理样机的电路板见图 4,图中 DRAM 芯片双面放置.用 DSP 硬件仿真器对样机作硬件测试和软件开发.先对各接口作自测试,保证 SSR 的接口能正确收发数据,再接入图 1 所示系统中,经过闭环联调,结果表明达到设计目标,可以完成系统需求中所列的各项功能.

6 结论

在分析 SST 对 SSR 需求后建立的 SSR 状态机模型,为具体的方案设计提供了依据,并使复杂的控制得以简化;SSR 地面原理样机的研制证明了设计方案的可行性,并为进一步的研究提供了经验.

在调试过程中发现有以下两个方面还需进一步改进:完

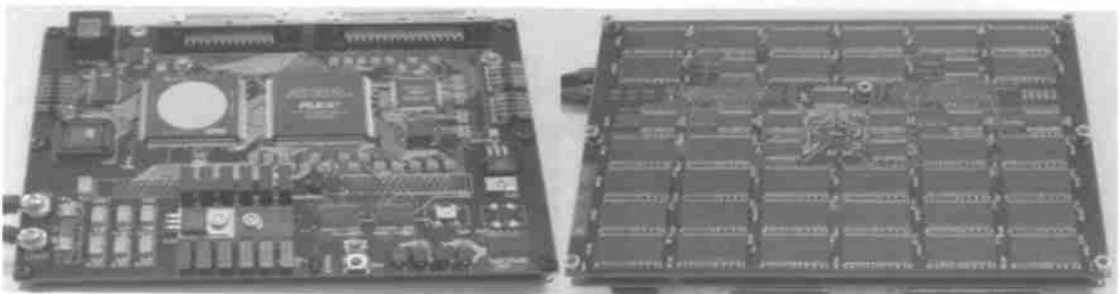


图4 固态存储器原理样机的控制板和存储板

成某一功能的硬件、软件折衷; 针对多种仪器观测数据的存储分配优化.

参考文献:

- [1] 张秀忠. 空间太阳望远镜 A 相研究报告第 3 卷之数管系统 [R]. 北京: 中国科学院北京天文台, 1996.
- [2] 詹辛农, 胡其正, 詹昂. 航天数据固态记录器设计问题(下) [J]. 遥测遥控, 1999, 20(3): 8- 17.
- [3] 苏涛, 吴顺军, 廖晓群. 高性能数字信号处理器与高速实时信号处理 [M]. 陕西西安: 西安电子科技大学出版社, 2000.
- [4] 齐正华. 高速大容量数据存储器的研制 [D]. 北京: 中国科学院空间科学与应用研究中心, 2001.
- [5] 王晓东, 郝志航. 大容量固态记录器技术 [J]. 光学精密工程,

2001, 9(4): 396- 399.

- [6] 蒋洵, 熊剑平, 尤政. 利用 FPGA 实现模式可变的卫星数据存储
器纠错系统 [J]. 电子技术应用, 2002, (8): 44- 47.
- [7] 王卫红, 房兴业, 等. 卫星舱内辐射测量数字固态记录器的研制
[J]. 航天医学与医学工程, 1995, 8(4): 273- 276.

作者简介:

王 芳 女, 1969 年 9 月出生于湖北省沙市市, 1991 年毕业于解放军信息工程大学通信工程系, 现为中国科学院国家天文台博士生, 主要研究方向为通信与信息处理.

李 恪 女, 1947 年 4 月出生于北京市, 1970 年毕业于北京大学技术物理系, 现为北京科学技术大学信息工程学院副教授、硕士生导师, 从事计算机数学、数据库、神经网络等方面的研究工作.