

文章编号:1000-1964(2005)05-0630-06

空间太阳望远镜星载偏振图像高速处理技术

王宇舟¹, 金声震¹, 宁书年²

(1. 中国科学院 国家天文台, 北京 100012;

2. 中国矿业大学 机电与信息工程学院, 北京 100083)

摘要: 空间太阳望远镜(SST)是我国独立发展的太阳磁场观测科学卫星;其主光学望远镜 8 个 CCD 以 20MB/s 的速率采集太阳偏振磁图;图像处理系统需要进行图像积分、CCD 辐射劣化校正、目标的几何改正、Stokes 参数计算和图像格式化等处理. SST 在轨实时数据运算量达每秒数十亿次,我国现有星载计算机系统的处理能力远远达不到 SST 的需求. 针对这一问题,在系统处理任务分析的基础上,设计出了并行阵列处理的系统体系结构,并在单通道子系统样机的研制上,采用了 FPGA 加 DSP 的模块结构,在 FPGA 内设计了在线实时积分器,由 DSP 进行离线计算和格式化;还给出了 DSP 软件流程图;进行了系统仿真和原理样机的制作,经测试表明:该系统达到了 SST 的星载高速数据处理要求. 这种新型高速数据处理方法,可以广泛应用于我国未来航天的高速数据处理领域.

关键词: 并行阵列处理结构;图像积分;图像格式化;FPGA;ADSP21060

中图分类号: V 447; V 443 **文献标识码:** A

On-Board Polarized Images High-Speed Processing Technology for Space Solar Telescope

WANG Yu-zhou¹, JIN Sheng-zhen¹, NING Shu-nian²

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

2. School of Mechanical, Electronic & Information Engineering,
China University of Mining & Technology, Beijing 10083, China)

Abstract: Space Solar Telescope (SST) is a magnetic field observation satellite. Its 8 CCDs of Main Optical Telescope (MOT) collect solar magnetic images with a velocity of 20 MB/s; Data processing system deals with such process as image integral, CCD calibration, object geometric correction, calculation of Stokes parameters and image formatting. SST's on-board real-time data calculation volume is several billion times per second, and current on-board computer system can't complete SST's tasks. On the basis of system processing tasks analysis, a parallel array processing system architecture is presented; During single channel subsystem development, FPGA and DSP module parallel array structure is adopted, in which the on-line real-time integrator is designed inside FPGA, and off-line calculation and image formatting is performed by DSP; DSP's software flowchart is also presented; System functional prototype is emulated and proved. The new high-speed data processing method can be also used in future space high-speed data processing fields.

Key words: parallel array processing architecture; image integration; image formatting; FPGA; ADSP21060

收稿日期: 2004-11-10

基金项目: 863 计划(8632.5.1.25)

作者简介: 王宇舟(1970-),男,四川省三台县人,博士研究生,从事图像处理、卫星有效载荷设计与测试方面的研究.

E-mail: wyz@sst.bao.ac.cn

太阳磁场的精细观测与研究是 21 世纪的重大物理难题。空间太阳望远镜^[1-2](SST)是我国独立研制的第一颗大型科学卫星,它以太阳磁元结构观测为突破点,通过高空、高时间和高频率分辨率对太阳进行多波段的观测,为研究太阳磁场的三维演化、太阳耀斑物理、太阳日冕加热机制、日地空间多种瞬变活动等提供科学资料。它的磁场望远镜口径为 1 m,空间分辨本领为 0.1 arcsec,对宁静太阳磁场偏振测量精度能达 10^{-4} 。因此它被国外同行专家称为:“是一个雄心勃勃的大项目,能获得独一无二的观测结果。具有实现太阳物理最重大突破的能力”。

磁场测量是 SST 的核心任务,主光学望远镜是 SST 的主要载荷仪器,它由 8 个可见光通道的偏振计构成,每个通道一个 CCD,分别采集 Stokes 偏振分量 Q 、 U 、 V 的左、右旋磁图。所采用 CCD 的规格是: $2048 \times 1024 \times 10$ bit,图像采集速率达 1 帧/s,8 个通道采集的数据量达 20 MB/s。CCD 所采集到的图像,在卫星上要进行如下处理:实时磁图的积分去噪、CCD 辐射劣化改正、目标的几何改正(相关内插积分)、偏振计算、图像格式化和图像后传等。经估算,实时完成以上任务需要一台数十亿次量级的超级计算机。

近 20 余年,国内外星载数据处理芯片的使用档次在逐渐提高。比如,欧空局的 ROSETTA 卫星,将 TI 公司的 C30 型商用 DSP 芯片,经辐射加固后,直接应用于构建星载数据处理系统;美国海军实验室发射的 NEMO 卫星,其星载图像处理系统是由 32 个 SHARC21060L 型 DSP 构成,这些 DSP 按象限组方式排列,构成并行阵列处理结构,该系统能够胜任数据接收、图像分析、图像压缩等高速图像处理任务;相比之下,国内的星载数据处理技术还较落后,我国卫星上使用的处理器芯片大多为 8086 或 8031;较近发射的清华 1 号小卫星,处理器采用的是 80C386 芯片。国内这些星载计算机的处理能力都只有几个 MIPS,远远不能满足 SST 的高速图像处理任务。

本文在详细分析了系统任务和需求的基础上,提出了一种 FPGA 与航天 DSP 级联的处理模块,并用该模块来构建成阵列数据处理结构。研究表明,这种阵列处理结构能够完成 SST 的图像处理任务。该系统的研制成功,为我国航天高速数据处理领域的技术发展提供经验。

1 系统处理任务

1.1 太阳偏振测量

太阳磁场的测量原理^[3]主要是基于太阳光谱线的 Zeeman 效应,我们选择具有强度量纲的 Stokes 参数^[3-4]来描述太阳可见光的偏振状态,通过观测得到的 Stokes 参数进行定标计算,可以推导出矢量磁场的相关物理量。如图 1 是 SST 偏振观测的示意图。

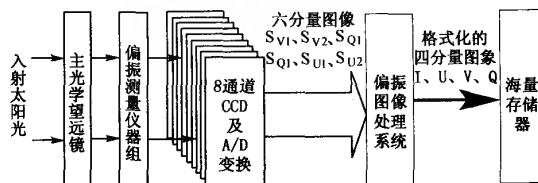


图1 偏振图像采集和处理流程图
Fig.1 Polarized light collection and processing flow diagram

太阳光通过主光学望远镜和偏振测量仪器组后,由 8 个 CCD 通道在 39 000~65 630 nm 的波长范围内,选择 8 个不同的波段分别进行成像。每个通道分别得到六个分量的图像,它们分别是: S_{V1} , S_{V2} , S_{Q1} , S_{Q2} , S_{U1} , S_{U2} ; 这些图像通过本文介绍的图像处理系统,变换成具有标准统一格式的 I , V , Q , U 四个 Stokes 分量,然后送到海量存储器进行存储。8 个不同波段的图像通道观测了光球不同深度的磁图,通过三维图像重建,可以最终实现了太阳磁场的三维观测。

1.2 观测模式

根据太阳磁场观测的不同对象,SST 的太阳磁场观测分为 3 个观测模式:耀斑模式、活动区模式和宁静态模式。它们分别对应着对太阳耀斑、活动区和宁静太阳米粒组织的观测。3 种观测目标的特征时间尺度分别为:30 s, 3 min 和 30 min。SST 磁图观测的信噪比要求分别为:耀斑 10^3 、活动区 3×10^3 、宁静太阳的米粒组织 10^4 。受 CCD 满阱电荷限制,要达到这样的信噪比要求,必须采用多帧叠加(积分)的方法来实现。采用多帧叠加(积分)时信噪比的计算公式为^[5]

$$S/N = \sqrt{N_e} \times \sqrt{N_f}, \quad (1)$$

式中: N_e 为每个象元的满阱电子数, N_f 为积分的图像帧数。SST 主光学望远镜 8 个通道所选用的 CCD 均是 Thomson 7899,它的满阱电荷可达 2.2×10^5 个电子。

根据公式(1),再由 Ne 和信噪比要求,以及 Stokes 参数的计算公式,可以分别计算出 3 种模式下积分的图像帧数。经计算,耀斑模式、活动区模式和宁静态模式下,图像积分的帧数分别为 4, 24, 240。

1.3 图像处理任务

图像处理的内容包括:图像积分、宁静模式目标几何改正、CCD 图像辐射劣化校正、Stokes 参数计算和图像格式化等处理。

1) 图像积分和几何改正:通过 1.2 节的分析可知,对于耀斑、活动区和宁静太阳 3 种不同时间特征尺度的目标进行观测时,为了确保观测精度和信噪比要求,采用了图像积分技术。为了保证不损失主镜 0.1 arcsec 的分辨本领,图像处理系统要求在做图像积分时,实时对观测目标作精细的几何校正^[6-7]。由于 SST 配置了高精度相关跟踪系统,在短时间范围(3min)内系统能自主地在 0.1 arcsec 范围内锁定观测目标,因而无须作几何改正。但是,在进行宁静模式观测时,由于观测积分时间长达 30 min,这时就需要进行数字几何改正,以确保 0.1 arcsec 的高分辨率图像。几何改正的方法是:把前后待叠加的图像进行相关运算,求出图像在 X, Y 两正交坐标上的漂移量($\Delta x, \Delta y$),再利用二维泰勒公式: $I(x, y) = I(x_0, y_0) + \frac{\partial I}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial I}{\partial y} \Delta y$,可以求出新图像在前图像栅格上的内插值,最后再进行图像累加。

2) CCD 辐射改正:由于空间辐射环境的影响,CCD 长久工作之后性能会发生劣化、暗流会不断的增加,象元光敏特性分布会发生不均匀的变化,因此要求在图像积分后,对图像进行 CCD 辐射改正。CCD 图像改正主要内容有:坏像点的在线检测和剔除、暗流消除、偏置消除和平场(非均匀性)消除等^[5-8]。坏点的剔除方法是边检测边剔除,检测方法是给定一个灰度门限,超出门限者即为坏点,坏点的剔除方法是:以其邻点的均值来替代。暗流、偏置消除方法是分别从目标图像中减去暗图像和偏置图像;平场(非均匀性)的消除是在目标图像上作除法。暗流、偏置和平场的获取,由图像处理系统设计专门的标定计算程序来完成。

3) Stokes 参数计算:CCD 采集到的图像,分别经过了上面介绍的图像积分、CCD 辐射校正及相关内插积分以后,还要进行 Stokes 参数计算。Stokes 参数计算是利用如下公式(2)把 $S_{V1}, S_{V2}, S_{Q1}, S_{Q2}, S_{U1}, S_{U2}$ 等 6 个分量计算得到归一化的 I,

万方数据

V, Q 和 U。8 个通道的 Stokes 参数计算是并行独立进行的。

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

$$Q = \frac{S_{Q1} - S_{Q2}}{S_{Q1} + S_{Q2}}; U = \frac{S_{U1} - S_{U2}}{S_{U1} + S_{U2}}; V = \frac{S_{V1} - S_{V2}}{S_{V1} + S_{V2}}, \quad (2)$$

4) 图像格式化:采用 CCSDS 协议来将 SST 的星上数据打包。图像头中应包括:观测仪器标志、观测通道号标志、观测模式标志、观测分量标志、观测时间、数据大小等。图像格式化所需的数据由系统通过串行口通信从管理机获得。

对于不同的观测模式,数据处理的具体流程是不相同的,如图 2 是处理系统在 3 种模式下要进行的数据处理流程。

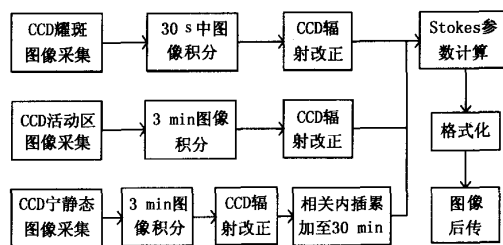


图 2 系统数据处理流程图

Fig. 2 System data processing flow diagram

由图可见,对于耀斑模式,CCD 采集的图像首先经过 30 s 的积分,然后依次进行 CCD 辐射改正、Stokes 参数计算、图像格式化和图像后传;对于活动区模式,首先进行 3 min 的图像积分,然后依次进行 CCD 辐射改正、Stokes 参数计算、格式化和图像后传;对宁静态模式,先进行 3min 的图像积分,然后进行 CCD 辐射改正、相关内插累加操作,这个过程连续进行 10 次重复,最后进行 Stokes 参数计算、格式化和图像后传。

2 系统体系结构

图像处理系统除了第 1 节中介绍的数据处理任务外,还要负责一些控制任务和复杂的数管工作^[9]。主要包括:1) CCD 的曝光启动、停止和复位;2) 同管理机进行串口通信,获取系统的观测任务和格式化时所需要的数据;3) 接受管理机的管理,以进入正常的观测状态,或是进入系统测试状态或 CCD 标定计算状态;4) 接收来自 CCD 的数据,将处理就绪的数据传送到海量存储器中;5) 由于 8 个通道采用一套共享的总线进行数据后传,因此还必须设计一个总线仲裁机构。

面对如此复杂的数据处理和数管系统的设计,我们采用如下设计策略:积分与运算分级处理、单

通道采用 DSP 加 FPGA 模块结构、系统由模块构成并行阵列处理结构。

我们把系统结构分为图像积分和图像运算两级完成,积分级采用 FPGA 设计硬件模块来实现,完成对 CCD 图像采集的管控、磁图分类($S_{V1}, S_{V2}, S_{Q1}, S_{Q2}, S_{U1}, S_{U2}$)及秒量级的积分;在 DSP 中作相关处理和内插累加,直到完成 30 min 的观测。如图 3 是积分器和 DSP 的分级处理图,CCD 采集的图像送到积分器进行图像积分,得到 $S_{V1}, S_{V2}, S_{Q1}, S_{Q2}, S_{U1}, S_{U2}$ 等 6 个分量的积分图像,然后送 DSP 进行其他处理。

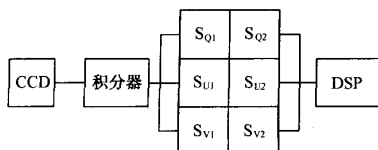


图3 积分和DSP处理分级图

Fig. 3 Integral and DSP processing section diagram

如图4是不同观测模式下,图像采集的顺序图,图像积分必须按此顺序进行正确的积分。

图4 磁图采样时序图

Fig. 4 Magnetic image collection timing diagram

由图可见,耀斑模式、活动区模式和宁静模式的积分时间分别是:30 s, 3 min 和 30 min。每个分量的观测帧数分别是:耀斑模式 4 帧、活动区模式 24 帧、宁静态模式 240 帧;3 种观测模式下,8 个通道的 6 个偏振分量磁图 $S_{V1}, S_{V2}, S_{Q1}, S_{Q2}, S_{U1}, S_{U2}$ 各自进行叠加。

如图5示,给出了FPGA和DSP中要进行图像处理的内容。在30 s内CCD采集到的数据,通过积分得到 $S_{V1}, S_{V2}, S_{Q1}, S_{Q2}, S_{U1}, S_{U2}$ 六帧图像。其中,30 s的时间是这样安排的,每个分量连续采集4帧,每秒一帧,然后1 s时间进行偏振光学元件的切换。若是耀斑模式,则图像直接送到DSP进行CCD辐射改正、Stokes参数计算和格式化;若是活动区模式,则积分要连续进行6次耀斑模式(30 s)的积分,积分时间一共是3 min,得到6个分量积分图像,再送到DSP进行其它处理;若是宁静态模式,则要连续观测10次活动区模式(3 min)图像积

分,每次得到的3 min积分图像都送到DSP,由DSP进行相关内插累加(几何改正和10次累加),然后再进行其它处理。

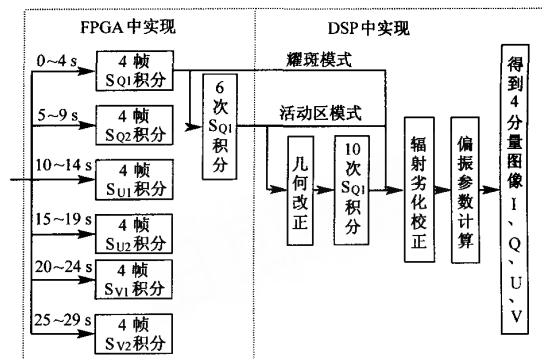


图5 积分与处理展开流程图

Fig. 5 Integral and processing unfolding flowchart

图像积分和DSP运算是并行进行的(在时间上是重叠的),积分器和DSP都必须有自己运行的存储器空间,存储器的设计采用乒乓交换结构方式,也就是图像积分所用的存储器空间和DSP运算所用的存储空间,在图像积分结束后,两者的进行交换,这样的好处是避免图像在两个存储区来回传送。

在线图像积分完结束后,才能进行CCD校正、相关运算、Stokes参数计算等处理,这些处理均采用离线计算方式,考虑到它们大部分计算都是浮点运算,因此选用DSP来完成这些处理。

如图6是系统体系结构框图,8个CCD采集到的图像以10 bit的精度A/D转换后,送到图像处理系统的在线积分器;经积分器积分以后的图像,由DSP进行相关内插积分、CCD校正、偏振计算和格式化等处理;各通道格式化以后的数据,最后通过一套共享的总线,在总线仲裁机的裁决下,依次把图像传到海量存储器中进行存储^[10]。

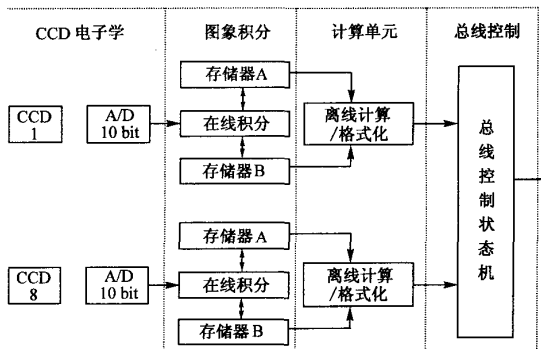


图6 图像处理系统结构

Fig. 6 Image processing system architecture

3 软硬件仿真与实现

在 8 个完全相同的并行处理通道中,单通道的实现如图 7,白框是通道的硬件结构实现,除了存储器,核心的器件是一片 FPGA 和一片 DSP, FPGA 完成图像的在线积分, DSP 完成图像的离线计算. 图 7 中虚线框中的部分就是 FPGA 中的逻辑模块,可见在 FPGA 中设计的逻辑模块有:各种外围接口、图像积分器、存储器接口、DSP 附加逻辑及可靠性/可测性设计模块等.

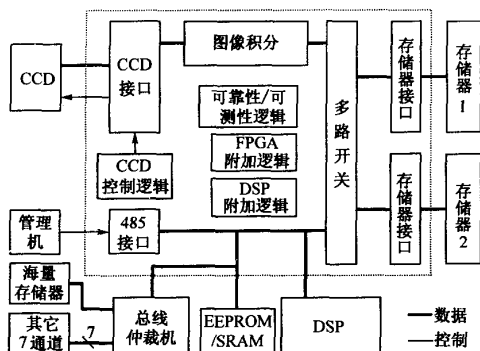


图 7 单通道实现框图

Fig. 7 Single channel implementation block diagram

如图 8 是 DSP 软件的工作流程图. DSP 根据不同工作状态,进行不同的处理任务,各种工作状态下的处理内容,图中已经清楚给出,这里不再作

解释.

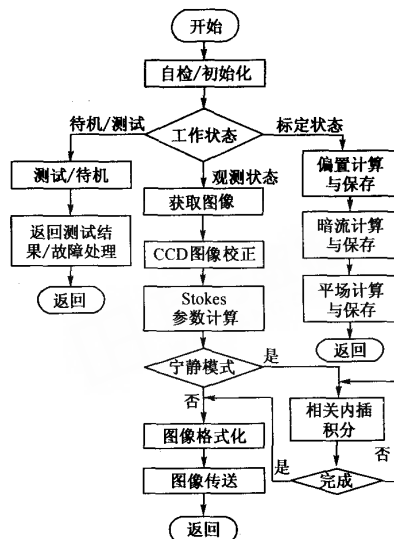


图 8 DSP 软件流程图

Fig. 8 DSP software flowchart

在原理样机的研制过程中,FGPA 器件采用的是 Xilinx 公司的 XC2V1000 器件^[11]. DSP 采用的芯片是 ADI 公司的 ADSP21060^[12]. 存储器芯片采用的是 Hynix 公司的 SDRAM 芯片. 总线仲裁的状态机也是在 FPGA 中实现. 如图 9 是原理样机的电路板框图,核心器件是 FPGA 和 DSP,其余的是存储器、电平转换器件和各种插件.

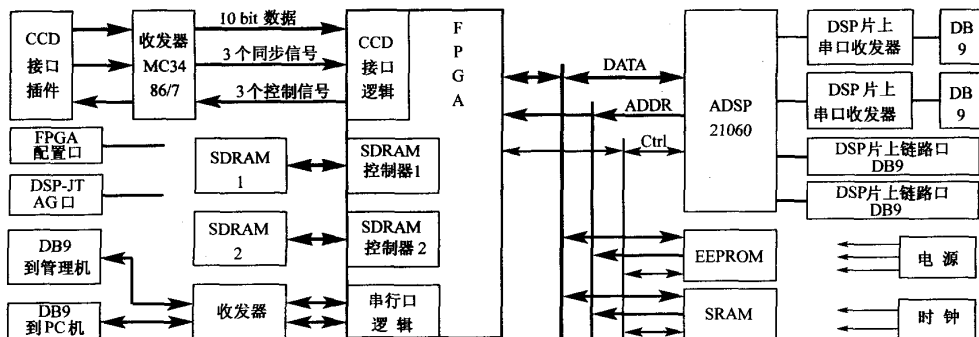


图 9 原理样机电路板框图

Fig. 9 Functional prototype PCB block diagram

系统的实现上,我们充分的考虑了:1) 对算法复杂度较低和控制较为简单的处理和功能,都尽量采用 FPGA 硬件来实现,如各种接口电路、DSP 的附加逻辑等;2) 利用观测模式是爆发模式的基本重复这一特点,尽量复用基本的 FPGA 积分功能单元;3) 多方面进行权衡,采用比较合理的软硬件划分方案;4) 在数据和控制方面,采用数据流和控制流分开的原则,在一定程度上简化了设计的难度.

4 结论和应用前景

通过仿真和原理样机制作与测试表明:图像积分和 CCD 劣化校正处理技术,可以达到图像信噪比要求;几何改正技术可以保证 0.1arcsec 的空间分辨本领;系统体系结构方面,采用的并行阵列处理结构、FPGA 加 DSP 模块设计、积分功能硬件化、基本单元复用、数据流和控制流分开等技术,使处理系统能够完成 SST 大数据量、多模式、多功能

的处理任务。

本系统的优点是:设计上充分考虑 SST 数据处理的通用性,可用作其它子系统的硬件;考虑到空间应用的特点,对它进行可靠性和可测性设计,保证空间应用的可靠性要求;在设计上还考虑到从前优秀设计技术的保留和进一步研究的需要,具有继承性的特点。

文中介绍的星载数据处理方法,是一种新型

的、FPGA 和 DSP 相结合的、阵列结构高速处理方法,它实现了 SST 的在轨实时高速图像处理。系统充分利用 FPGA 的可重构性和 DSP 的编程灵活性,构建了功能强大、具有通用性和可扩展性的处理结构体系。它特别适合于多载荷、多任务的高速数据处理,可以广泛的应用于我国天基遥测遥感、天基信息网络和天基预警等领域。

参考文献:

- [1] 中科院国家天文台,德国马普高层大气研究所. SST A 相报告[R]. 北京:国家天文台,1997,1(2):1-30.
- [2] 中科院国家天文台,德国航空宇航研究所. SST 评估研究报告[R]. 北京:国家天文台,1997. 30-36.
- [3] 林元章. 太阳物理导论[M]. 北京:科学出版社,2000. 57-62,73-74.
- [4] 王宇舟,金声震. 空间太阳望远镜偏振光测量技术[J]. 光学技术,2004,30(2):209-214.
Wang Y Z, Jin S Z. Polarized light measurement technology on SST[J]. Optical Technique, 2004, 30 (2):209-214.
- [5] Howell S B. Handbook of CCD Astronomy[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 47-74.
- [6] 孙后环,周必方,蒋筱如. CCD 相关跟踪器系统的研制[J]. 光学仪器,2001,23(1):10-15.
- [7] 金一庆,陈越. 数值方法[M]. 北京:机械工业出版社,2000. 105-1128.
- [9] 王同桓. 中巴地球资源卫星数据管理系统—电子综合技术在航天器上的应用[J]. 航天器工程,2002,11(2-3):10-15.
Wang T H. China-Brazil earth resources satellite data management system-application of electronic synthesis technology on spacecraft[J]. Spacecraft Engineering, 2002,11(2-3):10-15.
- [10] 王芳,李恪,苏林,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.
- [11] 朱明程. XILINX 数字系统现场集成技术[M]. 南京:东南大学出版社,2001. 272-308.
- [12] 刘书明,罗军辉. ADSP SHARC 系列 DSP 应用系统设计[M]. 北京:电子工业出版社,2003. 125-287.

(责任编辑 李成俊)

作者: [王宇舟](#), [金声震](#), [宁书年](#), [WANG Yu-zhou](#), [JIN Sheng-zhen](#), [NING Shu-nian](#)
作者单位: [王宇舟, 金声震, WANG Yu-zhou, JIN Sheng-zhen\(中国科学院, 国家天文台, 北京, 100012\), 宁书年, NING Shu-nian\(中国矿业大学, 机电与信息工程学院, 北京, 100083\)](#)
刊名: [中国矿业大学学报](#) [ISTIC](#) [EI](#) [PKU](#)
英文刊名: [JOURNAL OF CHINA UNIVERSITY OF MINING & TECHNOLOGY](#)
年, 卷(期): 2005, 34(5)
被引用次数: 0次

参考文献(11条)

1. 中科院国家天文台. 德国马普高层大气研究所 [SSTA相报告](#) 1997
2. 中科院国家天文台. 德国航空宇航研究所 [SST评估研究报告](#) 1997
3. [林元章](#) [太阳物理导论](#) 2000
4. [王宇舟](#), [金声震](#) [空间太阳望远镜偏振光测量技术](#)[期刊论文]-[光学技术](#) 2004(02)
5. [Howell S B](#) [Handbook of CCD Astronomy](#) 2000
6. [孙后环](#), [周必方](#), [蒋蓓如](#) [CCD相关跟踪器系统的研制](#)[期刊论文]-[光学仪器](#) 2001(01)
7. [金一庆](#), [陈越](#) [数值方法](#) 2000
8. [王同桓](#) [中巴地球资源卫星数据管理系统-电子综合技术在航天器上的应用](#) 2002(2-3)
9. [王芳](#), [李恪](#), [苏林](#) [空间太阳望远镜的星载固态存储器研制](#)[期刊论文]-[电子学报](#) 2004(03)
10. [朱明程](#) [XILINX数字系统现场集成技术](#) 2001
11. [刘书明](#), [罗军辉](#) [ADSP SHARC系列DSP应用系统设计](#) 2003

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_zgkydxxb200505019.aspx

授权使用: 陕西理工学院(sxlgxy), 授权号: 018a552c-b436-43b5-83ba-9df2010e1fac

下载时间: 2010年9月15日