

文章编号 1004-924X(2022)02-0127-10

天问一号高分辨率相机图像存储及处理系统设计

王 征^{1,2}, 何云丰¹, 孙兴国³, 吴凡路^{1,2}, 王 栋^{1*}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械及物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 月球与深空探测重点实验室, 北京 100101;

3. 一汽-大众汽车有限公司, 吉林 长春 130011)

摘要: 由于地球和火星之间数据传输带宽受限, 无法将大量的高分辨率图像实时传回地面, 天问一号高分辨率相机需要载荷本身具备图像存储能力。针对高分辨率相机成像数据量巨大问题, 本文设计了基于FPGA的NAND Flash图像存储及处理系统。首先, 根据成像系统CCD和CMOS图像传感器输出种类, 划分了NAND Flash存储空间。接着, 为解决高速率存储问题, 设计了流水存储方法。然后, 针对在轨新增坏块问题, 设计了坏块自检方法。最后, 为解决地火传输带宽紧张问题, 设计了下采样、像元融合、区域提取等图像处理方法。试验结果表明, 高分相机存储及处理系统接收并存储图像数据率达到3 Gb/s, 下行数据量最低约可降至原数据量0.4%。通过使用多种下行工作模式, 既能获取丰富的图像数据, 又能满足深空探测有限的传输速率。

关键词: 天问一号; 高分辨率相机; 存储及处理; 现场可编程门阵列(FPGA); NAND Flash

中图分类号: V476.4; V445.8 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20223002.0127

Design of image storage and processing system for Tianwen-1 high-resolution camera

WANG Zheng^{1,2}, HE Yunfeng¹, SUN Xingguo³, WU Fanlu^{1,2}, WANG Dong^{1*}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Key Laboratory of Lunar and Deep Space Exploration, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;*

3. *FAW-Volkswagen Automotive Co. Ltd, Changchun 130011, China)*

* *Corresponding author, E-mail: wangd@ciomp.ac.cn*

Abstract: Due to the limited data transmission bandwidth between the Earth and Mars, it is impossible to transmit a large number of high-resolution images back to the ground in real time. The Tianwen-1 high-resolution camera requires the payload itself to have image storage capabilities. Aiming at the huge problem of high-resolution imaging camera imaging data, this paper designs a FPGA based NAND Flash image storage and processing system. First, according to the output requirements of CCD and CMOS image sensors, NAND Flash storage space is divided. Then, in order to solve the problem of high-rate storage,

收稿日期: 2020-09-24; 修订日期: 2020-11-09.

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(No. 42001345, No. 61805001); 中国科学院月球与深空探测重点实验室开放基金资助项目(No. LDSE201901);

a pipeline storage method was designed. Next, aiming at the problem of newly added bad blocks on orbit, a self-checking method for bad blocks is designed. Finally, in order to solve the problem of tight transmission bandwidth between Earth and Mars, image processing methods such as down-sampling, pixel binning, and region extraction are designed. The test results show that the high-resolution imaging camera storage and processing system receives and stores the image data rate up to 3 Gb/s, and the download data rate can be reduced to about 4% of the original data rate. By using a variety of download working modes, it is possible to obtain rich image data and meet the bottleneck of deep space exploration data transmission.

Key words: Tianwen-1; high resolution camera; storage and processing; Field Programmable Gate Array (FPGA); NAND Flash

1 引言

深空探测是人类对月球及以远的天体或空间开展的探测活动,作为与地球轨道卫星和载人航天并驾齐驱的航天活动,深空探测不仅是众多高新技术的高度综合,也是体现一个国家综合国力和创新能力的重要标志^[1-3]。

和其他行星相比,火星的自然环境与地球更为相似,是人类目前认识最深入的类地行星。火星探测是继月球探测之后行星探测的最大热点,是未来载人行星探测的重要目标^[4]。我国于 2020 年 7 月 23 日成功发射首颗火星探测器——天问一号,天问一号由一个环绕器和一个着陆巡视器组成^[5]。高分辨率相机(以下简称高分相机)是天问一号环绕器上的 7 个科学有效载荷之一,其主要科学任务是获取火星表面重点区域的高分辨率影像,观测火星表面地质现象的形成和变化过程,为着陆探测优选合适区域提供基础数据和科学依据。环绕器上所有的载荷由一台载荷控制器进行控制和管理^[6]。

随着空间科学技术的进步,在轨卫星运行期间产生海量的数据,对数据存储设备的容量要求也越来越高。HiRISE 相机是目前火星探测分辨率最高的相机,搭载在 2005 年美国发射的火星勘测轨道飞行器(MRO)上,传回地球近 300 TB 火星图像数据。HiRISE 相机在火星 300 公里高度的轨道上,观测火星地表分辨率最高可以达到 0.3 米。应对地火传输速率低的问题,HiRISE 使用了多种工作模式,如 CCD 传感器选择、更改积分时间、binning、14 位到 8 位映射查找表等^[7-9]。

近年来,NAND Flash 因具有存储容量大、读写速度快、易擦除的特点^[10],同时存储芯片能够承受温度的变化、机械的振动和冲击,具有较高的可靠性,而被广泛应用于航空航天领域,高分辨率对地观测设备中^[11]。

由于高分相机产生的图像数据率最高可达 3 Gb/s,一次拍摄任务至少需 30 s。而地火传输的速率仅为几百 Kb/s,并且多个载荷同时执行任务,无法实现实时下传。本文在高分相机上设计了基于 NAND Flash 的图像存储及处理系统,设计了多种图像处理模式,解决了高分相机海量图像数据无法下传的问题。

2 存储及处理系统设计

2.1 存储及处理系统硬件设计

高分相机主体完成光学成像并输出对图像数字信号,成像控制箱安装在相机主体焦面组件的后部,主要完成相机的成像控制功能。高分相机存储及处理板安装在相机主体的成像控制箱旁,实时接收并存储成像系统获取的图像数据,如图 1 红框所示为高分相机正样主体。

当高分相机允许图像数据下行时,根据地面的要求,对原始图像数据进行处理,通过 LVDS 串行接口输出至环绕器有效载荷控制器,由载荷控制器对各载荷的科学数据进行统一压缩,载荷控制器设置了多种压缩比,默认压缩比为 6:1。

高分相机成像系统负责将三片 TDI CCD 和两片 CMOS 的光信号转化为电信号,主控系统负责相机的综合控制和功能管理。存储及处理系统运行在存储及处理板上,如图 2 所示。包含图

像存储单元和图像处理单元,其结构框图如图 3 所示。



图 1 高分相机正样主体

Fig. 1 Main part of high resolution imaging camera

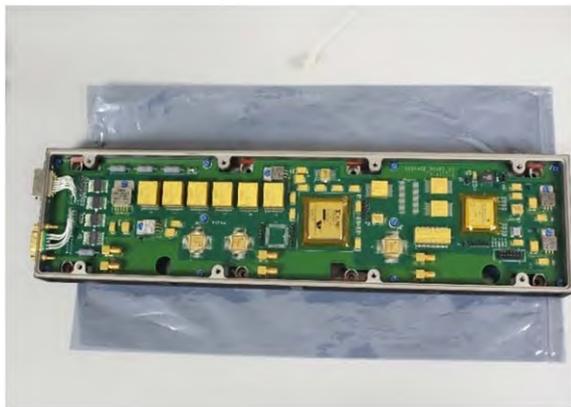


图 2 高分相机存储及处理板

Fig. 2 Image storage and processing system of high resolution imaging camera

图像存储单元核心器件为 FPGA,使用 Xilinx 公司的 Virtex-2 系列宇航级芯片 XQR2V3000 4CD717V,300 万门。存储处理 FPGA 通过 RS-422 通讯接口与主控系统进行指令和工程参数的交互,控制三通道 NAND Flash 存储图像数据。NAND Flash 采用 3D 公司的芯片 3DFN64G16VS8477 MSA00,共计 384 Gb 存储容量。由于高分相机为短时工作,因此存储处理 FPGA 控制 EEPROM 存储器保存当前存储地址和新增坏块地址,控制 SRAM 存储器缓存与图像处理 DSP 交互的图像数据。

图像处理单元的核心器件为图像处理 DSP,

型号为 SMV320C6701GLPW14,负责实现若干图像处理算法。

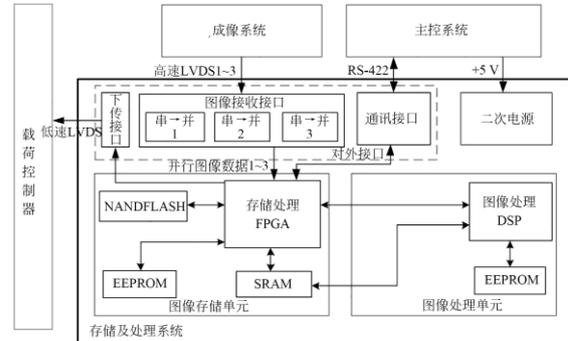


图 3 存储及处理系统结构框图

Fig. 3 Block diagram of storage and processing system

2.2 NAND Flash 流水线设计

存储处理 FPGA 从 3 路高速串行 LVDS 通道接收成像系统发送的 3 片线阵 CCD 和 2 片面阵 CMOS 数据,CCD 和 CMOS 不同时拍摄。成像系统的 CCD 图像由全色谱段、红色谱段、绿色谱段、蓝色谱段及近红外谱段组成,全色谱段的像元数为 6 144,彩色谱段的像元数为 1 536。成像系统的 CMOS 为全色成像,像元数为 512×512,数据量远小于 CCD 图像。在 265 km 近火轨道高度成像时,CCD 输出全色图像的行频约为 8.1k 行/s,每输出一行全色数据后接一行彩色数据,每个像元用 16 bit 量化,因此每通道输出图像的数据率约为 1 Gb/s。

为了能够满足 1 Gb/s 的存储速率,硬件设计将两片 NAND Flash 的控制管脚并联作为一个通道存储器。物理上每一通道存储器根据片选信号可分成 4 组基片,每组基片包含 4 096 个块,每个块包含 64 个页,每个页的容量为 4 096×32 bit,以页为存储的基本单位,如图 4 所示。存储处理 FPGA 控制 NAND Flash 存储时,每个时钟写入 32 bit 数据,高 16 bit 存储 1 号像元,低 16bit 存储 2 号像元。写满 4 096 个像元后,页地址指针指向下一页。写满 64 页后,块地址指针指向下一个块,直到写满所有可存储的块为止。使用 NAND Flash 最高的 40 MHz 写入时钟,能够实现 1.25 Gb/s 写入速度。

由于 NAND Flash 芯片操作机制,每操作完

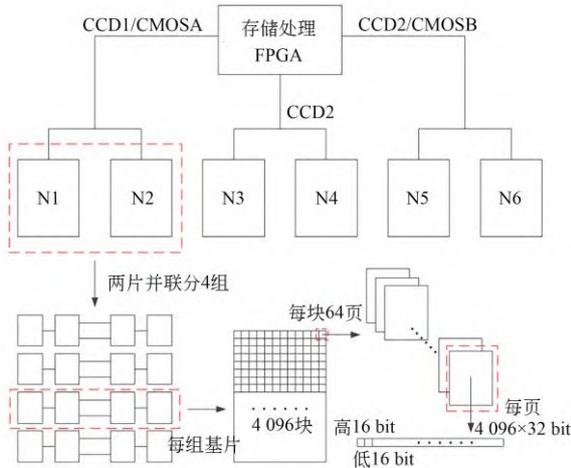


图 4 NAND Flash 结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of NAND Flash structure

一页, NAND Flash 需要 busy 一段时间, 期间对该基片不能进行操作, 时间约为 100 μ s。若等待 busy 时间结束后再进行下一页写操作, 耗时积累会导致存储速率不足以支撑 CCD 最高成像速率要求。因此, 设计通过控制 NAND Flash 片选信号方式实现 4 级流水操作。首先, 写完第 1 组基片的第一页后, 在第 1 组基片的 busy 时间时写第 2 组基片的第一页。然后, 同理写入第 3 组基片和第 4 组基片的第一页。最后, 返回第 1 组基片, 此时第 1 组基片已恢复空闲状态, 继续写第 1 组基片的第二页^[12]。所有写入过程以此类推, 如图 5 所示。

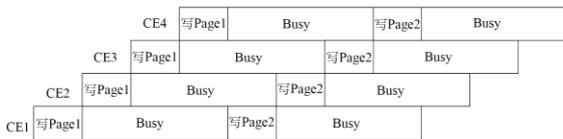


图 5 NAND Flash 4 级流水存储示意图

Fig. 5 Schematic diagram of NAND Flash 4-level pipeline storage

2.3 NAND Flash 存储空间划分

第 1 通道与第 3 通道 NAND Flash 既需要写入 CCD 数据还需要写入 CMOS 数据, 若不区分 CCD 或 CMOS 直接存储, 不利于地面下行任务的指令控制。为解决此问题, 设计将 NAND Flash 存储 CCD 与 CMOS 的地址分离, 划分空间存储各自图像。每通道 NAND Flash 共计 4 096

个块, 将 0~3 516 块作为 CCD 的存储空间, 将 3 517 到 3 995 块作为 CMOS 的存储空间(第 2 通道没有 CMOS 不进行存储空间划分), 从 3 996 到 4 090 块作为出厂坏块的替换地址, 将 4 091~4 095 块作为新增坏块备用区域。

成像系统输出的格式是一包全色, 一包彩色交替输出, 彩色又分 R、G、B 和 IR 等 4 个谱段, 格式如下 P1/R1/P2/G1/P3/B1/P4/IR1/P5/R2……一包全色的数据量是 6 154 \times 16 bit, 一包彩色的数据量是 1 546 \times 16 bit。为了充分利用空间, 同时保证各个谱段图像能够分开下行, 设计将一行全色与一行彩色写入一个页中, 剩余部分使用数据进行填充, 如图 6 所示。根据前文的 4 级流水设计, 第一组基片每页存储 P 和 R, 第二组基片每页存储 P 和 G, 第三组基片每页存储 P 和 B, 第四组基片每页存储 P 和 IR。CMOS 为全色输出, 一包图像的数据量是 522 \times 16 bit, 设计将四行 CMOS 数据写入一个页中, 剩余部分使用数据进行填充。

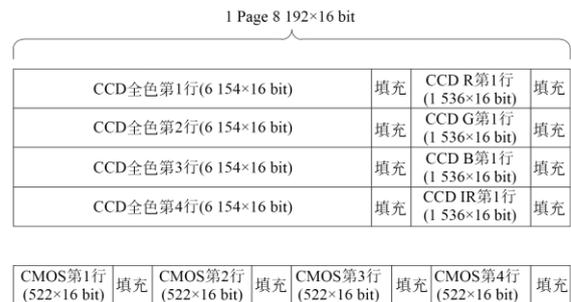


图 6 NAND Flash 存储格式及区域划分

Fig. 6 NAND Flash storage format and area division

根据设计的存储格式, 对于单次任务的存储空间可以通过起始、终止两个块地址来确定。存储时起始和终止地址通过工程参数遥测回传地面, 地面系统可根据一次任务中两个地址建立任务号与存储空间对应关系。

3 存储及处理软件设计

3.1 坏块管理及自检设计

由于制造工艺的原因, NAND Flash 出厂允许存在一定数量的坏块, 坏块会影响存储器读写

的正确性,影响图像质量及下行链路。用户可以通过读取 NAND Flash 出厂坏块信息来识别出所有已知坏块^[13]。

存储处理 FPGA 通过设计逻辑地址和物理地址的映射关系,针对每一通道 NAND Flash 建立一个坏块管理列表。在存储处理 FPGA 内部开辟一个 4 096×12 bit 的 RAM 存储空间,每一个逻辑地址存储其真实的物理地址,写、读及擦除时均按照逻辑地址执行,而实际是对 NAND Flash 的物理地址进行操作,具体替换方法如图 7 所示。图 7(a)是坏块表的初始态,物理地址和逻辑地址一致。根据之前的存储区域划分,假设出厂逻辑地址 2 是坏块,将逻辑地址 2 对应的物理地址改为 4 001,实现该坏块与有效块的替换。其余坏块以此类推,替换掉所有出厂坏块,图 7 (b)则为最终坏块管理列表。

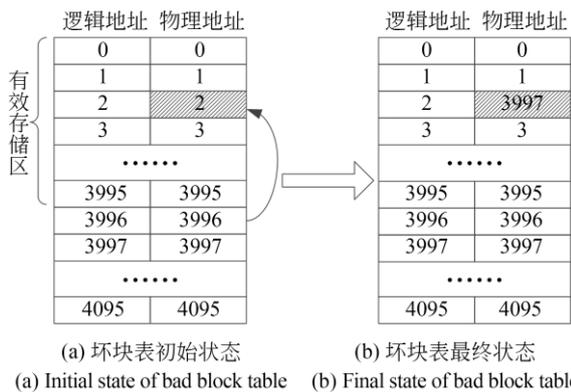


图 7 NAND Flash 坏块管理方法

Fig. 7 NAND Flash bad block management method

由于 NAND Flash 只能执行有限的写入和擦除次数,因此在超过 10 万次以上的擦写时可能会出现新增的坏块。根据 NAND Flash 芯片属性,在擦除一个块或写入一个页时操作失败,可以通过读取状态标识位的方式判断该块为坏块。存储处理 FPGA 将每一通道的 NAND Flash 出现坏块时的状态标识位作为工程参数遥测回地面,实时监测新增坏块,由地面决定是否执行坏块自检。坏块自检的目的是修正在轨新增坏块,对图像下行正确性进行保障,其操作流程如图 8 所示。

在进行坏块自检模式前,NAND Flash 存储

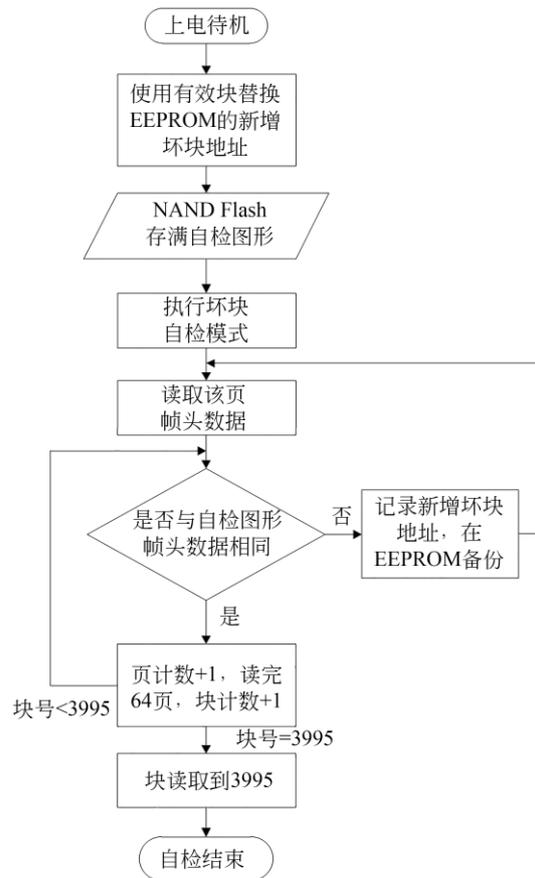


图 8 NAND Flash 坏块自检操作流程

Fig. 8 NAND Flash bad block self-check operation process

器中已经存满成像系统发送的自校图形,存储处理 FPGA 对 NAND Flash 存储器中所有页的图像数据的帧头进行判读。根据检测存储区数据帧头与自检图形不一致方法,可以识别出新增坏块的位置。自检结束后,将新坏块地址在 EEPROM 中进行备份。再上电时,使用 4 091~4 095 备用区域地址与新增坏块地址进行替换,实现在轨新增坏块处理,每通道 NAND Flash 可以处理 5 个新增坏块。

3.2 图像处理模式设计

高分相机存储及处理系统共设计了四种图像处理模式,分别为下采样、像元融合、区域提取及图像处理算法。

3.2.1 下采样

存储处理 FPGA 具备下行缩略图的能力,由于成像的图像分辨率较高,直接对原始图像抽点能够有效降低图像数据量。存储处理 FPGA 可

以对原始图像进行 2×2 、 4×4 、 8×8 及 16×16 下采样处理。在下行 $n \times n$ 下采样数据时,从 NAND Flash 中正常读取整个块的图像数据,然后在行方向 n 个页中选择第 1 个页进行下行,列方向每个页的 n 个像元中选择第 1 个像元进行下行,最终实现 $n \times n$ 缩略图下行,图 9 为 2×2 抽点示意图。

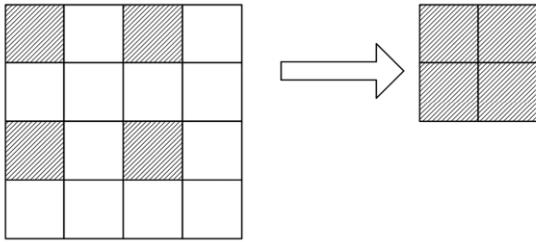


图 9 2×2 抽点示意图

Fig. 9 Schematic diagram of 2×2 downsampling

3.2.2 像元融合(binnging)

存储处理 FPGA 具备像元融合能力,像元融合与下采样相比,更能准确的表达图像信息。高分相机可以对原始图像进行 2×2 、 4×4 、 8×8 及 16×16 binnging 处理,将原始图像 $n \times n$ 窗口的图像变为一个像元,其像元值为窗口内所有像元的均值:

$$p_k = \sum_{i \in \text{win}(k)} I_i / n^2. \quad (1)$$

binnging 由高分相机的成像系统与存储及处理系统配合实行,行方向由成像系统完成 $n \times 1$ binnging,列方向由存储及处理系统完成 $1 \times n$ binnging。存储处理 FPGA 在读取 NAND Flash 的图像数据时,将一行中的每 n 个像元加和平均,实现列方向的 $1 \times n$ binnging,图 10 为 2×2 binnging 示意图。

3.2.3 区域提取

存储处理 FPGA 具备原始图像区域提取的能力,根据地面注入的区域提取指令和参数,下行原始图像的部分区域。根据上述存储区域划分,设计将 NAND Flash 中 1 个块的 256 行,每行 6 144 像元的 CCD 全色图像数据,等分为 16 个区域,每个区域像元为 256×384 。或者将 NAND Flash 中 4 个块的 256 行,每行 1 536 像元的 CCD

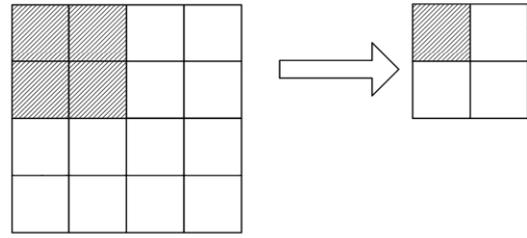


图 10 2×2 像元融合示意图

Fig. 10 Schematic diagram of 2×2 binning

彩色图像数据,等分为 4 个区域,每个区域像元为 256×384 ,如图 11 所示。存储处理 FPGA 根据注入的起始列和结束列的数值,进行原始图像的读取和下行,最终获取以 256×384 像元为基础图像块的区域图像。

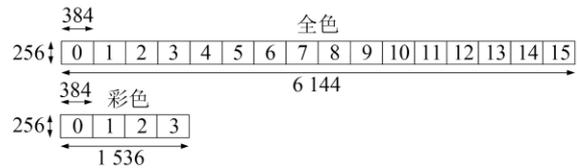


图 11 NAND Flash 区域提取示意图

Fig. 11 Schematic diagram of NAND Flash area extraction

3.2.4 图像处理算法

图像处理单元的图像处理 DSP 负责计算两个图像处理算法,感兴趣区域提取算法与焦面自动校正算法。地面注入想要计算图像的存储区位置,存储处理 FPGA 将图像数据读取并写入 SRAM 中缓存。图像处理 DSP 直接访问 SRAM,读取需要的图像数据并计算。

3.2.4.1 感兴趣区域提取算法

感兴趣区域提取算法的目的是高分相机对未知区域进行拍摄时,存储处理系统能够将图像细节丰富的地区提取出来,下传回地面。当高分相机存储及处理系统接收到地面注入的感兴趣区域提取指令后,存储处理 FPGA 依据前文的区域提取模式,依次将目标地址的图像数据分块写入 SRAM 中。图像处理 DSP 逐行读取 SRAM 中存储的待处理图像块内容,并对图像数据进行中值滤波处理。滤波处理结果存入内部存储区中,当完成 3 行待处理滤波图像数据后,使用 Sobel 算子对图像进行边缘特征处理和直方图计算,使

用的卷积模板为:

$$S_i = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

在整个图像块进行完边缘特征处理和直方图计算后,计算整幅图像的复杂度特征结果,并把结果反馈回地面。地面根据该块的复杂度特征结果,能够识别出该图像的内容丰富区域。使用区域提取方法下行该区域,能够有效的提高科学探测效率。

3.2.4.2 焦面自动校正算法

高分相机抵达火星后,焦面位置会由于振动等原因造成改变。焦面自动校正算法是通过在轨调焦过程中推扫成像,根据成像结果计算最佳焦面的方法。利用高分相机焦平面 CCD 交错拼接结构,推扫时前后两排 CCD 重叠区域对目标景物二次成像,在两次成像之间进行焦面调整,获取两幅同一场景不同焦面位置的图像。重叠区域宽度为 116 像元尺寸,每个像元尺寸为 8.75 μm,两排 CCD 之间间隔为 37.8 mm,如图 12 所示。

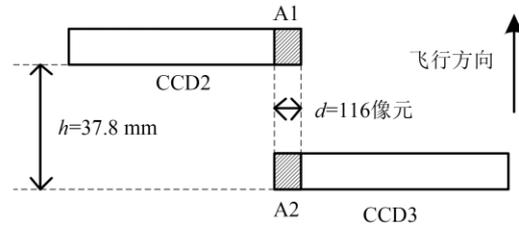


图 12 前后两排 CCD 拼接示意图

Fig12 Schematic diagram of two rows of CCD

CCD 推扫的行频与轨道高度相关,以近火轨道 500 km 高度为例,行频约为 4.32k 行/s,可以计算两次焦面调整成像时间间隔约为 1 s。根据飞行方向,CCD2 右端在 t1 时刻先对目标景物 A 成像,成像结果为 A1。1 s 之后的 t2 时刻 CCD3 左端对景物 A 成像,成像结果为 A2。高分相机在 t1 和 t2 之间进行调焦并且焦面达到稳定,因此获得了同一场景不同焦面位置的图像对。

同理,CCD2 在 t2 时刻对目标景物 B 成像 B1,直到 t9 时刻对目标景物 I 成像 I1,CCD3 在 t3 时刻对目标景物 B 成像 B2,直到 t10 时刻对目标景物 I 成像 I2,如图 13 所示。

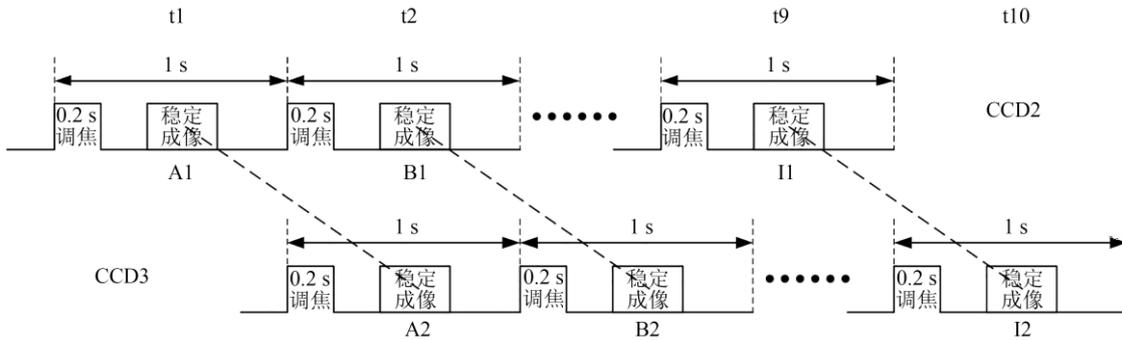


图 13 焦面校正时序示意图

Fig13 Schematic diagram of focal plane correction

比较同一目标场景不同焦面位置的图像对: A1 和 A2, B1 和 B2 至 I1 和 I2, 获取 9 组焦面的图像质量评价, 计算不同焦面质量评价的趋势

曲线, 获取最佳焦面位置。

考虑在轨计算处理的实时性, 采用灵敏度较高的灰度值梯度平方作为检焦函数^[14]:

$$F(k) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \{ |g(i, j) - g(i-1, j)|^2 + |g(i, j) - g(i, j-1)|^2 \}, \quad (3)$$

其中: $g(i, j)$ 表示图像 (i, j) 点的灰度值, k 表示离焦量, m, n 表示图像的长度和宽度。

准计算, 获得第 2 幅图像块相对第 1 幅图像块的位移, 包括水平方向和垂直方向。根据位移结果, 对两幅图像数据相同位置的图像块进行边缘

图像处理 DSP 首先对两幅图像进行图像配

特征计算,计算整幅图像的质量评价值。质量评价值更优的图像作为更优焦点位置,并把最佳焦点位置通过工程参数遥测回地面。

4 试验与结果

4.1 图像数据存储试验

高分相机存储及处理系统进行单机试验,成像数据源模拟 CCD 图像输出,全色图像行频为 8.1 kHz。数据源是累加的自检图像,行列方向每个像元较前一像元灰度值自增 1,存储及处理系统接收并存储图像,根据指令下行给快视设备,其输出图像结果如图 14 所示。存储后下行的图像数据与图像源的数据一致,无误码和丢包问题,表明设计的 NAND Flash 存储速率及准确性满足任务要求。

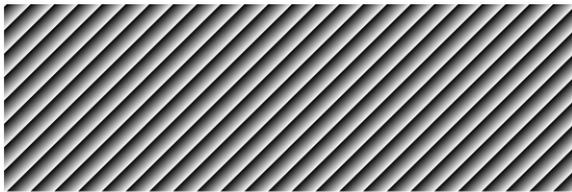


图 14 单机试验结果

Fig. 14 Results of stand-alone test

4.2 图像数据处理试验

高分相机进行外场试验,对 3.5 km 外的建筑自西向东推扫成像,存储及处理系统对成像系统输出图像数据进行实时存储,并对图像进行处理及下行。三片 CCD 品字形排列,CCD1 在上,CCD2 在中,CCD3 在下。试验列举 CCD3 蓝色谱段存储及处理下行结果,如图 15 所示。其中,(a)是 32 块 NAND Flash 输出的蓝色谱段原始图像,取其高 8 bit 显示,图像大小为 $2\ 048 \times 1\ 536$, (b)和(c)是对原始图像分别进行 2×2 和 4×4 下采样结果。(d)和(e)是对原始图像分别进行 2×2 和 4×4 像元融合结果。(f)和(g)是对原始图像区域提取试验结果,将 1 536 像元分 4 个区域,每个区域 384 像元。(f)是第 1 区域下行结果,图像大小为 $2\ 048 \times 384$, (g)是第 3-4 区域下行结果,图像大小为 $2\ 048 \times 768$ 。使用不同模式的



(a) 原始图像
(a) Origin image



(b) 2×2 下采样
(b) 2×2 downsampling



(c) 4×4 下采样
(c) 4×4 downsampling



(d) 2×2 融合
(d) 2×2 binning



(e) 4×4 融合
(e) 4×4 binning



(f) 区域提取 1-1
(f) Region extraction 1-1



(g) 区域提取 3-4
(g) Region extraction 3-4

图 15 外场成像试验结果

Fig. 15 Experiment of Outfield imaging

行处理方式,能够大幅的降低图像的数据量,表 1 列举了上述外场试验结果相对于原始图像的压缩比。

表 1 图像数据量统计

Tab. 1 Statistics of all image data

图像序号	数据量/Mb	压缩比
a	48	1
b	12	4:1
c	3	16:1
d	12	4:1
e	3	16:1
f	12	4:1
g	24	2:1

5 结 论

本文根据天问一号高分相机的设计需求,设计了基于NAND Flash的大容量存储及处理系统,首先介绍了存储的硬件设计及存储机制,包括存储区域划分及流水线设计。然后介绍了

在轨新增坏块的自检方法。最后列举了下采样、像元融合、区域提取等图像处理方法。试验结果证明:高分相机存储及处理系统接收并存储图像数据率达到3 Gb/s,下行数据量最高可降原数据量的4%。满足高分辨率相机火星探测存储及处理要求。

参考文献:

- [1] 吴伟仁,于登云. 深空探测发展与未来关键技术[J]. 深空探测学报, 2014, 1(1): 5-17.
WU W R, YU D Y. Development of deep space exploration and its future key technologies[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2014, 1(1): 5-17. (in Chinese)
- [2] 孙泽洲,孟林智. 中国深空探测现状及持续发展趋势[J]. 南京航空航天大学学报, 2015, 47(6): 785-791.
SUN Z Z, MENG L Z. Current situation and sustainable development trend of deep space exploration in China[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2015, 47(6): 785-791. (in Chinese)
- [3] 叶培建,邹乐洋,王大轶,等. 中国深空探测领域发展及展望[J]. 国际太空, 2018(10): 4-10.
YE P J, ZOU L Y, WANG D Y, et al. Development and prospect of Chinese deep space exploration[J]. *Space International*, 2018(10): 4-10. (in Chinese)
- [4] 于登云,孙泽洲,孟林智,等. 火星探测发展历程与未来展望[J]. 深空探测学报, 2016, 3(2): 108-113.
YU D Y, SUN Z Z, MENG L Z, et al. The development process and prospects for Mars exploration[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2016, 3(2): 108-113. (in Chinese)
- [5] 朱岩,白云飞,王连国,等. 中国首次火星探测工程有效载荷总体设计[J]. 深空探测学报, 2017, 4(6): 510-514, 534.
ZHU Y, BAI Y F, WANG L G, et al. Integral technical scheme of payloads system for Chinese Mars-1 exploration[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2017, 4(6): 510-514, 534. (in Chinese)
- [6] 李春来,刘建军,耿言,等. 中国首次火星探测任务科学目标与有效载荷配置[J]. 深空探测学报, 2018, 5(5): 406-413.
LI C L, LIU J J, GENG Y, et al. Scientific objectives and payload configuration of China's first Mars exploration mission[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2018, 5(5): 406-413. (in Chinese)
- [7] DELAMEREA, et al. MRO High Resolution Imaging Science Experiment (HiRISE): Instrument Development [C]. *Sixth International Conference on Mars*, 2003.
- [8] MCEWENA S, et al. Mars Reconnaissance Orbiter's High Resolution Imaging Science Experiment (HiRISE)[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2006, 112.
- [9] MCEWEN A S, BANKS M E, BAUGH N, et al. The high resolution imaging science experiment (HiRISE) during MRO's primary science phase (PSP)[J]. *Icarus*, 2010, 205(1): 2-37.
- [10] 乔亚飞,李华旺,常亮,等. 基于FPGA的星载NANDFLASH控制器的设计[J]. 电子设计工程, 2018, 26(14): 158-161, 166.
QIAO Y F, LI H W, CHANG L, et al. Design an on-board NAND FLASH controller based on FPGA[J]. *Electronic Design Engineering*, 2018, 26(14): 158-161, 166. (in Chinese)
- [11] 陶莉,陈万培. 多通道NAND Flash存储芯片控制器的设计与实现[J]. 无线电工程, 2018, 48(9): 810-815.
TAO L, CHEN W P. Design and implementation of multi-channel NAND flash memory controller[J]. *Radio Engineering*, 2018, 48(9): 810-815. (in Chinese)
- [12] 杨金宝,李飞,郑军伟. 基于视频行场消隐期的大容量FLASH存储控制器[J]. 光学精密工程, 2015, 23(4): 1153-1160.
YANG J B, LI F, QIE J W. Large capacity FLASH video storage controller base on blanking period of line and field signals[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(4): 1153-1160. (in Chinese)
- [13] 彭卓文,杨新民,王胜红. 基于FPGA控制的高

速大容量 NAND FLASH 存储模块设计[J]. 电子设计工程, 2017, 25(7): 111-114, 118.

PENG Z W, YANG X M, WANG S H. Design of nandflash memory module with high speed and large capacity based on FPGA[J]. *Electronic Design Engineering*, 2017, 25(7): 111-114, 118. (in Chinese)

[14] 卢振华, 郭永飞, 李云飞, 等. 利用 CCD 拼接实现推扫式遥感相机的自动调焦[J]. 光学精密工程, 2012, 20(7): 1559-1565.

LU Z H, GUO Y F, LI Y F, *et al.* Realization of auto-focus on APRC using CCD stitching [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7): 1559-1565. (in Chinese)

作者简介:



王 征(1987—),男,吉林长春人,硕士,助理研究员,2010年、2013年于吉林大学分别获得学士、硕士学位,主要从事空间电子学设计,深空遥感探测及图像处理等方面。E-mail: wang-zheng@ciomp. ac. cn



王 栋(1979—),男,山西阳泉人,博士,研究员,硕士生导师,2002年于长春理工大学获得学士学位,2007年于中国科学院研究生院获得博士学位,主要从事空间光学遥感器总体设计、空间电子学总体设计、数字图像处理等方面的研究。E-mail: wangd@ciomp. ac. cn