

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2312652

# 星载多模式和多通道图像采集与处理<sup>\*</sup>

刘静军 贺小军 王鹏 孔祥皓 王行行

(长光卫星技术股份有限公司 长春 130102)

**摘要:** 为了获取遥感卫星相机多模式与多通道的遥感影像,提出了星载多模式和多通道图像数据采集与处理系统的设计及实现方法,可将卫星在常规模式与降轨模式下的多通道图像数据采集并传输给存储系统,解决了现有星上存储单元无法并行存储多路数据的问题。设计了可兼容常规模式和降轨模式的多通道图像采集模块,将采集到的图像数据进行多模式图像处理,通过轮询调度算法实现多路图像归一化处理,最后通过 Aurora64/66b 传输协议将经过处理的图像数据传输给存储系统,完成了数据的高效采集与处理。经过实验测试,系统数据采集传输速率可达 9.2 Gb/s,采集数据准确,零误码。系统稳定可靠、实时性好,满足实际卫星使用需求。

**关键词:** 多通道图像采集;TLK2711;轮询调度;FPGA

**中图分类号:** V474.2   **文献标识码:** A   **国家标准学科分类代码:** 510.4030

## Spaceborne multi-mode and multi-channel image acquisition and processing

Liu Jingjun He Xiaojun Wang Peng Kong Xianghao Wang Hanghang

(Changguang Satellite Technology Co., Ltd., Changchun 130102, China)

**Abstract:** In order to obtain multi-mode and multi-channel remote sensing images of remote sensing satellite cameras, this paper proposes the design and implementation method of spaceborne multi-mode and multi-channel image data acquisition and processing system, which can collect and transmit multi-channel image data of satellites in conventional mode and deorbit mode to the storage system, which solves the problem that the existing on-board storage unit cannot store multi-channel data in parallel. A multi-channel image acquisition module compatible with conventional mode and down-orbit mode is designed, and the collected image data is processed in multiple modes, multi-channel image normalization processing is realized through the polling scheduling algorithm, and finally the processed image data is transmitted to the storage system through the Aurora64/66B transmission protocol, completing the efficient acquisition and processing of data. After experimental testing, the system data acquisition transmission rate can reach 9.2 Gb/s, and the collected data is accurate and zero bit error. The system is stable and reliable, with good real-time performance, and meets the actual satellite use needs.

**Keywords:** multi-channel image acquisition; TLK2711; round-robin; FPGA

## 0 引言

对地观测卫星已应用于国防军工、生态农业、灾害监测和环境保护等各个领域<sup>[1]</sup>。随着对地观测卫星技术的快速发展,其视场和分辨率不断提升,使数字化后的图像数据量随之增大,导致载荷数据实时传输的速率急剧增大,并且卫星提供常规模式成像和降轨模式成像,卫星降轨后图像分辨率进一步提高,数据率也随之增大,而存储单元接口相对单一,处理能力有限,无法直接对多模式和多通道相机数据进行存储<sup>[2-3]</sup>。

传统方法一般使用 LVDS 接口对数据进行采集,但由于该接口速率较低,需要几十路接口并行使用,硬件系统过于复杂。目前国内外对高速数据采集大多使用 TLK2711 接口,该接口速率高,在 100 MHz 的时钟下,单路可达 1.6 Gb/s,但都采用数据采集与存储一体化的设计,为了适应前端载荷的多通道与多模式的高速数据传输,需要不断的对星载存储单元进行升级设计,这种方法设计周期长,系统复杂,调试难度大<sup>[4]</sup>。基于以上的考虑,本文提出了一种可兼容常规模式和降轨模式的多通道图像采集与处理的系统,将数据采集处理单元与存储单元分开,该系统分别连接

收稿日期:2023-01-17

<sup>\*</sup> 基金项目:吉林省科技发展计划项目(20220201081GX)、国家重点研发计划项目(2020YFA0714104)资助

相机和存储单元,不需要对星上存储单元进行改动,提高了整星系统的可靠性与可扩展性。系统以 Xilinx 公司的 Virtex-5 系列现场可编程门阵列 (field-programmable gate array, FPGA) 为载体,对星载多通道与多模式图像进行采集和处理,最后传输给存储系统。通过地面实验,系统常规模式速率为 6.6 Gb/s 的数据率,降轨模式数据率可达 9.2 Gb/s,比传统图像采集系统速率提高 20% 左右<sup>[5]</sup>。使卫星相机图像无论以哪种模式输出都能够快速、稳定、可靠的传输至存储系统。

## 1 系统概述

图像数据采集与处理系统使用 Xilinx 公司的 Virtex-5 系

列 FPGA 作为主控制器<sup>[6-9]</sup>。如图 1 所示,相机由 5 片 CCD 构成,系统与 CCD 相机通过 TLK2711 高速串并转换芯片连接,每片 CCD 由两路 TLK2711 接口与其连接,用来采集相机输出的图像数据,时钟为 100 MHz,数据位宽为 16 bit。当相机常规模式成像时,数据量较小,使用单路 TLK2711 传输数据,当相机降轨模式成像时,图像速率大大增加,单片 CCD 输出速率可达 2 Gb/s 左右,单路 TLK2711 最高 1.6 Gb/s 无法满足要求,降轨模式则使用两路 TLK2711 来传输一片 CCD 的数据,可通过中心机输出的指令来控制选择哪种模式传输,系统与中心机使用 CAN 总线通信,系统将采集到的图像数据经过多模式图像处理和图像归一化处理,将数据传输给存储系统,与存储系统接口为 GTX 接口。

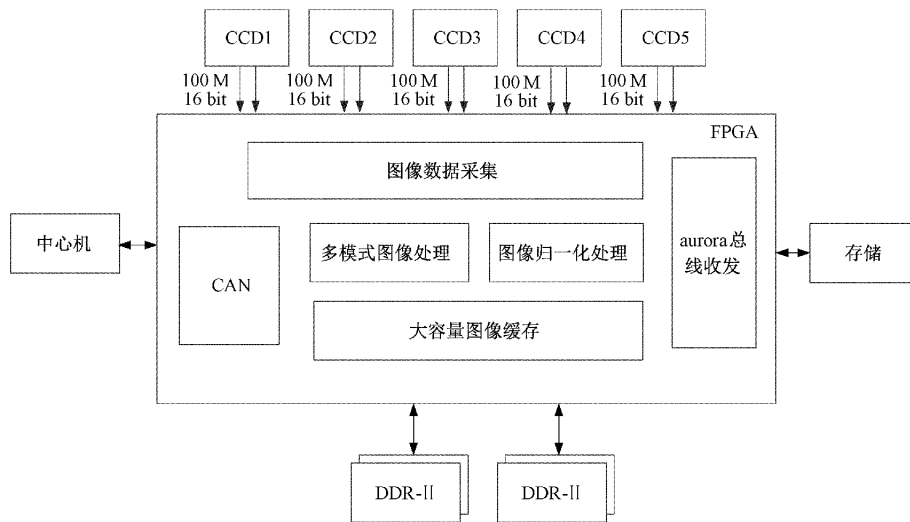


图 1 图像采集与处理系统框图

## 2 软件关键模块设计

### 2.1 TLK2711 数据协议

TLK2711 高速串行协议是一种基于点对点的协议<sup>[10]</sup>。表 1 给出了协议中自定义的协议原语。它以 16 bit 为一个基本的传输单位,数据被分成了高 8 位和低 8 位,因此每个控制字符都定义成了 2 bytes。

表 1 控制字符

编码说明	编码	16 进制原语
同步字	/D5. 6/K28. 5/	C5BC
帧头	/K28. 2/27. 7/	5CFB
帧尾	/K29. 7/30. 7/	FDFE

为了确保数据在协议通道中正确传输,需要在数据传输过程中使用一些控制字符,用 8 B/10 B 编码中的 K 字符和 D 字符组合来实现,编码方式由 2 个控制信号 TKMSB/RKMSB 和 TKLSB/RKLSB 决定<sup>[11]</sup>。约定发送端和接收端之间通过一定的数据帧格式进行数据传输。

本协议规定数据帧包括帧头、帧尾和同步字和有效数据 4 部分组成,数据传输时序如图 2 所示。传输时帧与帧之间发送 16 进制 C5BC 同步字符保证传输链路的同步,控制信号 MSB 为低电平,LSB 为高电平。帧头为 5CFB,控制信号 MSB 为高电平,LSB 为高电平。帧尾为 FDFE,控制信号 MSB 为高电平,LSB 为高电平。有效数据时控制信号 MSB 和 LSB 都为低电平。收发双方约定的有效数据长度,常规模式为 1 552 bytes,降轨模式为 776 bytes。

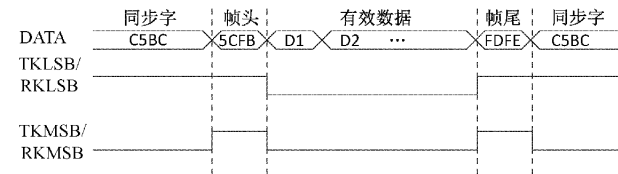


图 2 数据传输时序图

### 2.2 多通道图像采集模块

相机与图像采集传输系统由 10 路 TLK2711 连接,相机每片 CCD 与系统使用两路 TLK2711 连接,图像数据采集模块根据数据传输协议进行数据采集。系统时钟频率为 100 MHz,图像数据接收时外部时钟需要过 BUFR 对数

据进行采集,通常 FPGA 时钟驱动都使用全局时钟 BUFG 来完成,但是 BUFR 最大的优势就是有较小的时钟偏移,由于 TLK2711 时钟较高,且 16 bit 并行采集,使用 BUFR 为了实现源同步设计,使数据信号更加稳定可靠。

图像采集的程序设计流程如图 3 所示,当系统接收到开始成像指令后对数据进行搜索,上文提到数据流中会有帧同步字,同步字数据非有效数据,接收过程中需要将其剔除。判断帧头和控制信号的状态,当帧头为 5 CFB, RKMSB 和 RKLSB 都为高电平时开始接收有效数据,并开始记录接收到的数据拍 pat\_cnt 的个数,每收到一拍数据 pat\_cnt 数值加一,并判断是否达到帧长度,如果未达到帧长度则继续接收数据,当达到帧长度时停止接收数据,完成一帧的数据接收,返回等待下一帧数据。

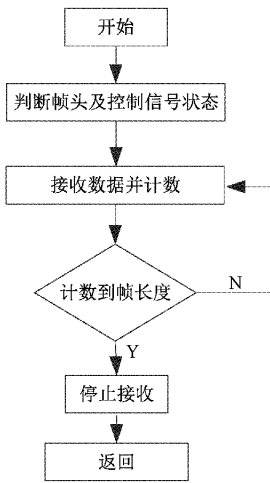


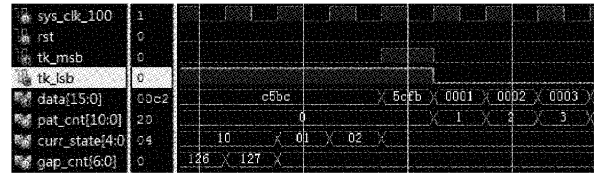
图 3 图像采集流程

对数据采集模块进行仿真,如图 4(a)所示,为图像数据帧头部分的数据仿真结果,从图可看出当 msb 为低电平时、lsb 为高电平时,data 为数据同步字 C5BC,当 msb 和 lsb 都为高电平时,data 为数据帧头 5CFB。图 4(b)为图像数据帧尾部分的数据仿真结果,从图可看出当 msb 和 lsb 都为低电平时,为有效数据,当 msb 和 lsb 都为高电平时,data 为数据帧尾 FDFE。图像采集模块状态机按照数据协议正确采集帧头、帧尾和数据等信息。使用同样的方法例化 10 个采集模块即可完成 10 路数据采集。

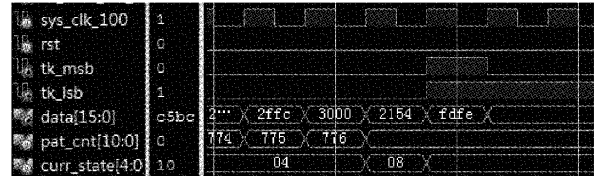
将接收到的有效数据传输给下一级模块进行 fifo 缓存,如图 5 所示,该 fifo 为异步 fifo,数据进行 fifo 缓存的目的是要对数据进行跨时钟域处理,由于多路 TLK2711 解码输出图像数据的参考时钟的不同,相位不确定,需要将各路相对参考时钟相位不同的数据转换为本地参考时钟的图像数据,因此需要对解码后的多路图像数据进行异步 fifo 缓存,如果不对其进行处理可能引起系统亚稳态<sup>[12-13]</sup>。

### 2.3 多模式图像数据处理

对上述 fifo 出来的数据进行多模式数据处理,如图 6 所示,为多模式图像数据处理框图,模块主要包含 3 部分,



(a) 图像数据帧头部分



(b) 图像数据帧尾部分

图 4 图像采集数据仿真结果

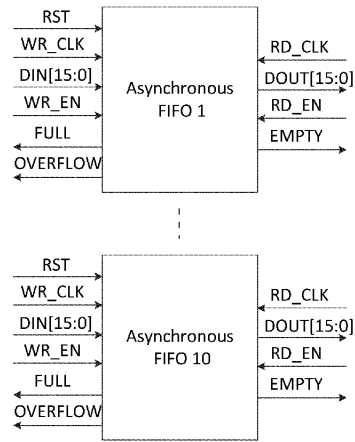


图 5 图像数据 fifo 缓存图

分别为数据选择器、数据合并单元以及数据源选通单元,多通道图像采集模块输出的 10 路图像数据作为本模块的输入,直接与数据选择器和数据合并单元相连接。

第 1 部分为数据选择器,当成像模式为常规模式时,将两路 TLK2711 的 16 bit 数据做 2 选 1 处理,只有一路数据传送到主数据通道上,具体选择哪一路数据是由 can 总线指令来配置的。主数据通道数据经过内部 fifo 将位宽转换为 32 bit,数据进行位宽变换,与后端数据位宽匹配。共 10 路 TLK2711,每两个通道做一个 2 选 1 操作,最终将 10 路数据转换为 5 路输出,即对应的 5 片 CCD 数据。

第 2 部分为数据合并模块,当成像模式为降轨模式时,将两路 TLK2711 的 16 bit 数据进行数据高低位拼接,组合成 32 bit 的数据,共 10 路 TLK2711,每两个通道做组合操作,最终将 10 路数据转换为 5 路 32 bit 数据输出,即对应的 5 片 CCD 数据。

第 3 分为数据源选通模块,根据中心机 can 总线发送的成像模式指令来确认输出。当成像模式为常规模式时,将子模块 mux\_2\_1 的输出传送到唯一的公共通道上去,当成像模式为降轨模式时,将子模块 merge\_2\_1 的输出传送到唯一的公共通道上去,该模块功能相当于一个单刀双掷

开关,该子模块公共通道的输出作为多模式图像数据处理模块的最终输出。

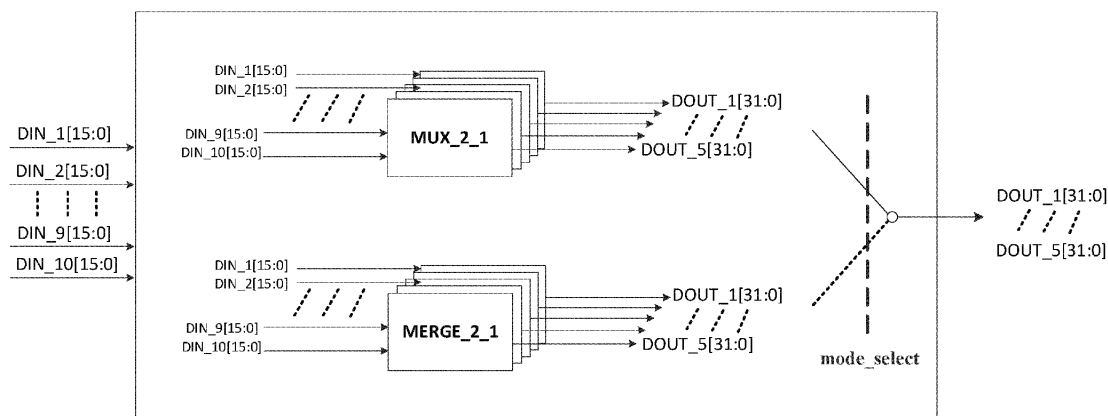


图6 多模式图像数据处理

#### 2.4 图像归一化处理

图像归一化处理模块主要思路是将5片来源不同的图像数据进行格式统一,这样后端可按照一种数据源来处理。对上述输出的5片32 bit的CCD数据进行大容量缓存,分别存入5个DDR地址段不同的区间中,将大容量缓存模块中的数据进行分块操作,每个DDR区间中的图像数据都按照 $12\ 416 \times 512$ 块大小的图像传输给后续存储。如图7所示,为了解决负载均衡问题,将缓存到DDR中的

数据依次轮询读出,每512行图像,切换到下一片CCD,此处按照CCD1~CCD5这样的顺序方式执行轮询操作,当查询至当前DDR用户且该DDR存够512行的数据量,即可读出,如果不满足则询问下一个DDR用户,即顺序询问,但是数据输出的顺序不是固定的,只有当前用户满足 $12\ 416 \times 512$ 块大小的数据量才可以读出。图像归一化处理模块中还对数据进行了fifo数据位宽变换,转换为128 bit数据,作为后续模块输入。

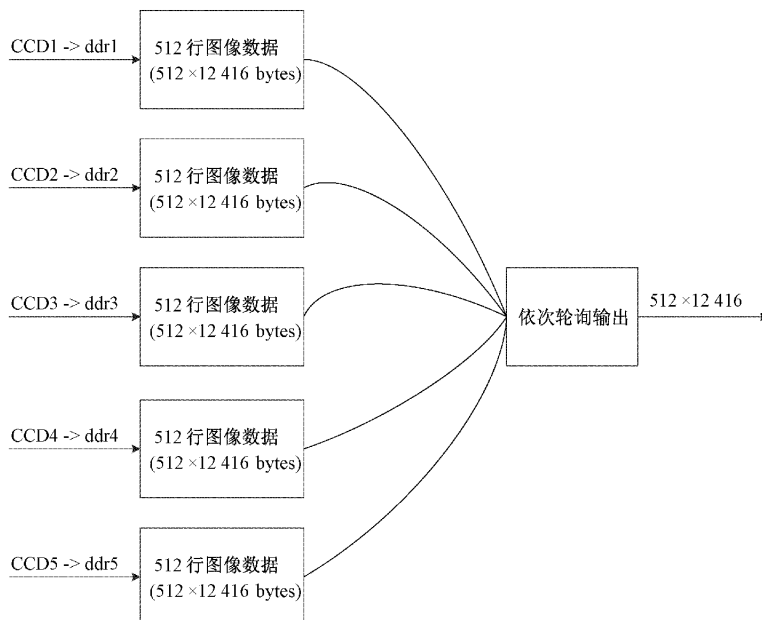


图7 数据轮询调度处理

#### 2.5 图像Aurora发送模块

Aurora图像发送模块主要功能是将前端处理好的图像数据发送给存储系统,整个发送过程如图8所示,模块例化两组Aurora64/66b协议IP,总带宽可达12 Gb/s,使用流模式发送数据。根据aurora协议总线的ready信号和存储系统的握手信号来判断数据是否可以发送,如果可以

发送,则将前端输出的128 bit数据分高64 bit和低64 bit数据分别输入两路异步fifo,这里由于输入数据时钟与Aurora协议时钟不同,需要使用fifo进行跨时钟域处理,使用Aurora协议时钟将两组fifo中的数据读出发送给两组IP,通过GTX高速接口将图像数据传输给存储系统<sup>[14-16]</sup>。

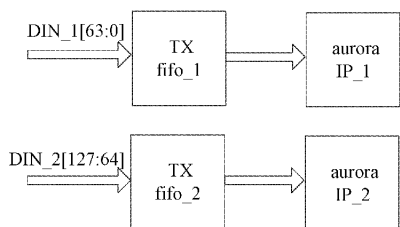


图 8 aurora 发送模块

### 3 实验与结果

为了验证系统数据采集处理及传输的正确性和可靠性,在实验室环境下,使用地检成像数据源模拟 CCD 相机输出,地检成像数据源可设置为常规模式和降轨模式两种输出模式。如图 9 所示,3 块地检数据源与图像采集传输系统连接实物图,通过 SMA 线缆连接 TLK2711 接口,由于 TLK2711 为差分信号线,每路则需要两根线,共使用 20 根线缆进行连接。

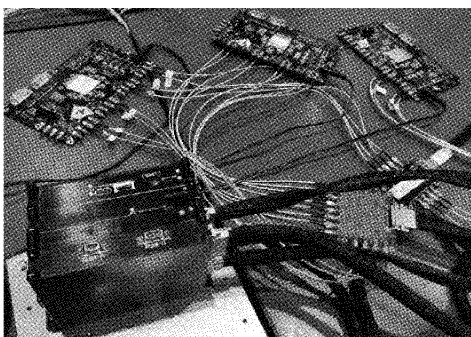


图 9 系统测试实物

地检数据源的数据格式与星上相机数据格式一致,数据为累加递增的数据源,如图 10 所示,为使用 chipscope 工具抓取的接收数据,数据显示帧结尾 FDFE,帧同步字 C5BC 和有效数据,有效数据呈递增状态,图中数据为 16 进制显示,由图可以看出与校验数据(图中最后一行)相同,数据接收正确无误,验证了数据采集的准确性。

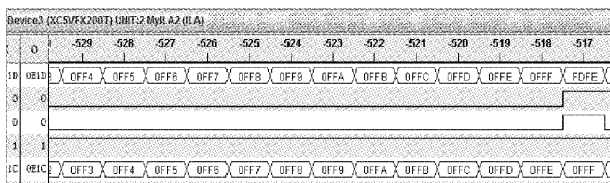


图 10 Chipscope 数据采集

根据不同的成像模式进行多次测试实验,每次测试时间固定为 30 s,用传输到存储系统中的数据量除以测试时间,得到每次实验的系统传输的数据率。如图 11(a)所示,为常规模式下测试的数据率,如图 11(b)所示,为降轨模式下测试的数据率。分别测试了 30 组成像数据率,常规模式下,数据率均大于 6.6 Gb/s,降轨模式下数据率均大于

9.2 Gb/s,实验表明系统可兼容不同速率的成像模式,并且系统稳定可靠,传输速率优于指标要求。

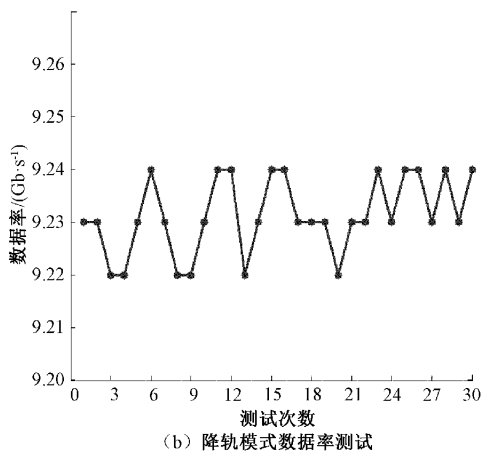
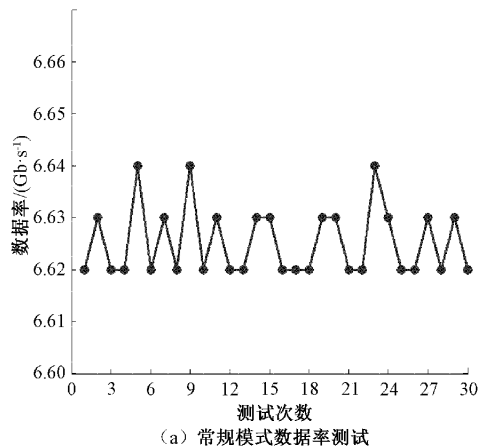
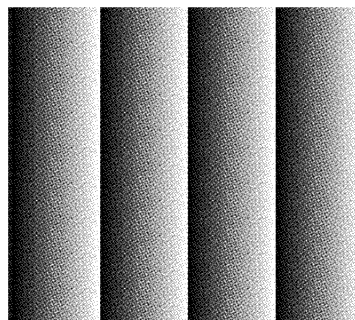


图 11 多模式数据率测试

目前该系统已经成功应用在某型号卫星,可通过卫星模拟飞行实验和卫星在轨实际传输的数据来进一步验证系统的正确性。将图像数据传输给存储单机后,将图像数据解析得到原始影像。如图 12(a)所示,为图像采集与处理系统采集到的地面递增数据源的图像,数据源中每个像元较前一像元灰度值增加 1,从图可以看出图像灰度由暗渐变为亮,图像数据无误码。如图 12(b)所示,为通过图像采集与处理系统实际传输的卫星图像,可以看出图像场景连续,数据格式正确,无缺通道、丢数据的现象,验证了多



(a) 递增数据图像



(b) 卫星拍摄图像

图12 图像采集与处理系统输出的图像

模式及多通道图像数据采集、处理、传输系统设计的正确性及可靠性。

#### 4 结 论

本文描述了星载多模式和多通道图像数据采集与处理系统的设计与实现,介绍了系统组成,数据协议及关键软件模块结构设计,研究了系统数据采集、多模式图像处理、归一化图像处理等原理及其实现方法。该设计具有高速度、高可靠等特点,试验结果证明,系统能够采集传输数据率为 9.2 Gb/s 的图像数据,并且可靠稳定的运行,满足卫星使用需求,并已成功应用。未来的工作将研究在轨压缩功能,可将图像数据在轨压缩功能融入处理系统中,进一步减少星上存储单机的负担。

#### 参考文献

- [1] 张雷,邵梦旗,薛志鹏,等. 微纳卫星高分辨视频相机光机结构设计与试验(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2021,50(10):52-58.
- [2] 罗平,张彤. 基于闪存的星载存储数据管理研究[J]. 计算机应用研究,2018,35(2):479-482.
- [3] 董振兴,朱岩,许志宏,等. 星载存储器吞吐率瓶颈与高速并行缓存机制[J]. 哈尔滨工业大学学报,2017,49(11):52-59.
- [4] 王子懿,沈三民,杨峰,等. 基于 FPGA 的高速大容量存储与传输系统[J]. 电子测量技术,2021,44(13):150-155.

- [5] 王永康,顾晓东. 基于 FPGA 的星载图像实时处理系统设计[J]. 电子设计工程,2015(3):179-182.
- [6] 段梦月,赵宏亮. 微型 CMOS 图像采集存储系统设计[J]. 仪表技术与传感器,2021(9):78-81,86.
- [7] 孙晓磊,王红亮,陈航. 基于 FPGA 的双 FLASH 数据记录器设计与实现[J]. 电子测量技术,2021,44(23):36-41.
- [8] 苏健,于正阳,徐磊. 基于 FPGA 的 CCD 成像电路软件设计[J]. 电子测量技术,2019,42(9):59-63.
- [9] 郝少帅,杨玉华,王淑琴. 基于 FPGA 的高精度采集系统的研究与实现[J]. 电子测量技术,2020,43(19):154-158.
- [10] 贾建超,陈涛,李钊. 基于 TLK2711 的高速数据串行传输[J]. 电子技术应用,2013,39(9):47-49,53.
- [11] 张媚,杜辉,关晖,等. 基于 TLK2711 的遥感卫星高速串行载荷数据接口设计[J]. 航天器工程,2015,24(6):13-19.
- [12] 瑚琦,石彬彬,吴莹. 近景线阵 CCD 数据采集系统的设计与实现[J]. 电子测量技术,2017,40(7):161-164.
- [13] 余达,刘金国,徐东,等. 多路基于 TLK2711 高速串行图像数据的传输系统[J]. 液晶与显示,2017,32(10):815-821.
- [14] 陈旭,夏果,马艳,等. 基于 FPGA 的光谱数据采集系统设计[J]. 电子测量技术,2019,42(14):157-162.
- [15] 杨云鹏,许波,高媛,等. GTX 接口在宽带自适应传输中的应用[J]. 电子测量与仪器学报,2020,34(3):171-179.
- [16] 刘明辉,周刚,陆爱杰,等. 一种高精度多路信号采集系统的设计[J]. 国外电子测量技术,2018,37(2):100-104.

#### 作者简介

刘静军(通信作者),硕士,工程师,主要研究方向为相机成像处理系统与卫星存储系统方面的研究。

E-mail:liujingjun1990@126.com

贺小军,博士,研究员,主要研究方向为光学遥感卫星、光电成像方面的研究。

E-mail:hexiaojun@charminglobe.com