

多探测器数据控制与处理系统设计

成桂梅, 刘 涛, 荣 鹏, 程甘霖, 段 京

(北京空间机电研究所, 北京 100094)

摘 要: 全谱段光谱成像仪集成可见多光谱、短波/中波红外以及长波红外三种探测器, 覆盖十多个谱段, 具有目前国内同类遥感仪器最宽光谱信息, 同时系统复杂且技术难度较大。为解决全谱段光谱成像仪多探测器同步控制、海量数据存储与集成处理以及探测器在轨增益、级数、积分时间等其他参数调整问题, 设计了一种多探测器数据控制与处理系统。该系统硬件以现场可编程门阵列(FPGA)为核心控制处理单元, 采用光耦合差分器件与其它设备进行连接和传输; FPGA 软件采用模块化设计思想, 自顶向下用硬件描述语言(VHDL)进行设计; 利用仿真工具、硬件模拟器进行验证, 结果证明了该设计的正确性和有效性。在实际工程应用中, 该系统功能全面、接口灵活、可靠性高且易扩展。

关键词: 数据处理; 同步控制; 多探测器; FPGA; 全谱段光谱成像仪

中图分类号: TP732; TP47 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0420002

Design of multi-detector data control and processing system

Cheng Guimei, Liu Tao, Rong Peng, Cheng Ganlin, Duan Jing

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China)

Abstract: A broad-spectral imager integrates three detectors which include a visible multi-spectral detector, a short-wave/middle-wave infrared detector and a long-wave infrared detector, and it can provide coverage over the broadest spectral range of more than 10 spectrums in the same type of domestic remote sensors so far, which involves more complex systems and more difficult design challenges. In this paper, a design of data control and processing system of multi-detector was given to solve these challenging problems of the broad-spectral imager such as synchronization control of multi-detector, mass data storage and integrated processing, imaging parameters adjustment of detectors which include gain, stage, integral time and others on orbit, etc. Field programmable gate array (FPGA) was used as a key cell of control and processing in the system hardware; and optocoupler and low-voltage differential signal(LVDS) devices were used to transmit signals to other systems; By means of modularized conceptual design, the software was designed from top to bottom with very-high-speed integrated circuit hardware description language(VHDL); Finally, verification of the design were performed with simulation tools and hardware simulator, and the results show its correctness and effectiveness. In practical engineering application, the system has comprehensive functions, flexible interface, high reliability and expansibility.

Key words: data processing; synchronization control; multi-detector; FPGA; broad-spectral imager

收稿日期: 2015-07-16; 修订日期: 2015-08-21

基金项目: 国家预研项目基金

作者简介: 成桂梅(1972-), 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事遥感卫星视频电子学设计方面的研究。Email: huiyuan4255@sina.com

0 引言

随着光谱成像技术和焦平面技术的发展,进一步推动光谱成像仪不仅向高空间分辨率、高光谱分辨率、高时间分辨率方向发展,同时向着多波段、宽光谱覆盖及小型化方向发展^[1]。将多种探测器集成应用于同一台成像仪,可获得更多波段、更宽光谱的光谱信息,实现快速、连续、全天候、多方位的观测,从而得到更加精确和实时的目标信息^[1-2]。例如美国陆地卫星 Landsat 系列载荷业务陆地成像仪(OLI),采用推扫方式成像、探测器阵列,光谱范围从可见光到红外光区,能以足够的空间、光谱、时间分辨率探测到可能发生的变化、季度性的实现地球陆地表面的全球覆盖;欧洲全球环境与安全监测(GMES)计划哨兵(Sentinel)-2 卫星,采用推扫方式成像、多波段宽幅集成探测器,光谱范围可覆盖从可见光到长波红外或短波红外的十多个谱段,用于森林覆盖和陆地监测;此外美国能源部的多光谱热成像仪(MTI)卫星,具有 15 个成像通道,光谱范围从 0.45~10.7 μm,其目的用于探测和辨别大规模杀伤性武器设施等^[3-6]。这些卫星均具有全谱段光谱成像能力。

为实现大范围、全天候的动态环境监测,我国研制了独立载荷全谱段光谱成像仪,它采用国际上先进的光学系统设计方案,推扫方式成像,集成可见多光谱、短/中波红外、长波红外三种类型探测器,光谱范围可覆盖十多个谱段,是目前国内载荷光谱范围最宽的成像仪之一,其研制关键除涉及前端复杂光学系统设计、探测器拼接技术外,还涉及到多探测器控制与数据处理技术、后端大规模读出电路技术等多项关键技术,文中针对多探测器控制与数据处理技术,设计了多探测器数据控制与处理系统(MDCPS),以解决多探测器同步工作控制、海量数据存储、多源数据集成处理和在轨参数调整等问题。文中首先简要介绍了该系统应用背景及主要功能,重点描述了系统各硬件设计和软件模块详细设计思路和方法,通过仿真软件和硬件模拟器对该设计进行了验证与测试,最后给出验证及测试结果。

1 系统概述

1.1 应用背景

MDCPS 应用于全谱段光谱成像仪,其所在位置

如图 1 所示。此成像仪由光机分系统和电子学分系统两大部分组成,前者包括主光学系统、分光系统、探测器焦面组件;后者包括三个视频电路系统、数据控制与处理系统(MDCPS)、管理控制系统。成像过程为:入射光束经主光学系统后经分光系统分为可见多光谱、短/中波红外、长波红外三个通道,分别会聚到多光谱 CCD、短/中波和长波红外焦面组件探测器实现各波段成像,后经过各自视频处理系统完成模拟信号合成、采样保持、信号放大、A/D 转换及数据处理后发送至 MDCPS,经过数据集成处理编排后发送给数据传输系统,其中管理控制系统接收卫星遥控指令并转发 MDCPS,由 MDCPS 完成焦成像参数在轨调整。

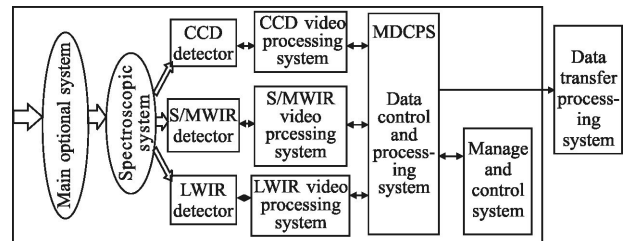


图 1 全谱段光谱成像仪结构框图

Fig.1 Block diagram of a broad-spectral imager

1.2 系统功能

MDCPS 功能有:(1) 发送时钟、行同步信号给三个视频处理系统以同步控制各自探测器工作;(2) 接收三个视频处理系统输出的图像数据,数据集成处理后按照卫星数据要求进行格式编排,分包输出给数据传输处理系统;(3) 接收管理控制系统发来的遥控指令包括焦面成像参数和其他开关指令等,转发至三个视频处理系统,以完成相应探测器级数、增益、积分时间调整,算法校正等;(4) 接收管理控制系统发来卫星参数(姿态、时间码等),并打入辅助数据中相应位置。

2 系统设计实现

2.1 硬件设计

MDCPS 硬件结构包括 FPGA、PROM 配置芯片、时钟管理电路、电源电路、视频处理系统接口电路(包括可见光、短/中波红外、长波红外视频接口电路)、数据传输系统接口电路及管理控制系统接口电路。其示意图如图 2 所示。

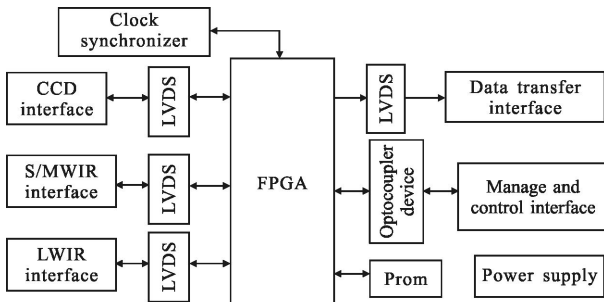


图 2 基于 FPGA 的 MDCPS 框图

Fig.2 Block diagram of MDCPS based on FPGA

(1) 可编程逻辑器件FPGA

FPGA 为整个系统的核心器件, 具有编程灵活、集成度高、适用范围宽等特点。它提供了最高的逻辑密度和高性能 I/O, 以及嵌入式块 RAM、数字时钟管理模块和 DSP 算术功能^[7-9], 如采用 90 nm 工艺技术 FPGA 器件, 其芯片密度高达 20 万逻辑单元, 从逻辑结构到内建模块均能运行于高达 500 MHz 时钟频率, 加法器、计数器和存储器(RAM/ROM)等, 可利用 LUT(查找表)实现的逻辑结构以及内建的存储器和 DSP 等模块都可以运行在此时钟速率下。因此, FPGA 在数据吞吐量、集成度以及整体功耗方面具有优越性, 且有丰富的 IP 资源, 从而可满足海量数据存储并准确快速处理^[10]。

(2) 可靠性设计

MDCPS 是与多台设备相连, 其可靠性关系到多路数据传输的准确与稳定, 文中采取的措施有: 系统核心部分的电源、地与输入、输出信号完全隔离, 这样受到外界的干扰比较小, 处理数据就相对准确; 电源采用隔离电源模块与外部分开; 与管理控制系统传输的遥控信号通过光电耦合器件隔离; 与视频处理系统、数据传输系统的同步、数据等信号采用差分器件 LVDS 来传输以增强信号传输中抗干扰能力; 采用专用时钟管理芯片来产生 FPGA 工作时钟, 电路包括时钟同步器、VXCO(压控晶振)、低通滤波器。时钟同步器具有高性能、低相位噪声与低时钟歪斜特性, 可为 FPGA 提供稳定的工作时钟。

2.2 软件设计

FPGA 软件是整个系统的中心枢纽, 按照系统功能划分为四个模块: 同步控制模块、图像数据处理模块、遥控遥测模块、辅助数据处理模块。其工作原理如图 3 所示。

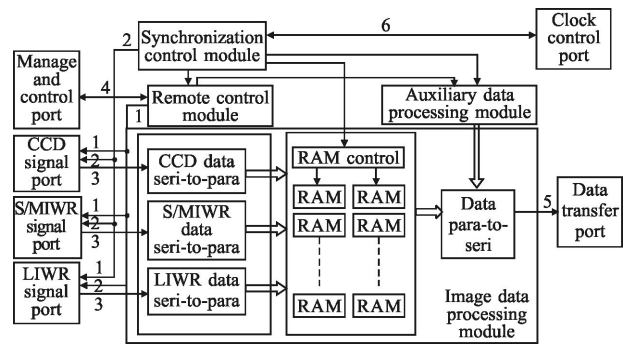


图 3 系统软件原理图

Fig.3 Schematic diagram of system software

由同步控制模块产生信号 2(时钟、行同步)发送给视频处理系统后, 接收三台视频处理系统图像数据信号 3(数据、门控、时钟), 由图像数据处理模块接收(进行串并转换)、存储集成处理后发送(进行并串转换)给数传系统信号 5(数据、门控、时钟), 遥控遥测模块接收管理控制系统遥控指令信号 4(串行数据、使能、时钟)并转发给三个视频处理系统信号 1(串行数据、使能、时钟), 同时发送给辅助数据处理模块, 信号 6 为时钟管理芯片驱动信号。各模块设计实现如下。

(1) 同步控制模块

该模块首先产生驱动时钟管理芯片工作时序, 从而获得稳定 FPGA 工作时钟 CLKFPGA12; 其次产生时钟 CLKFPGA6、行同步 LSYN 给三台视频处理系统以保证三个探测器同时工作。

模块中设计了 ROM 和计数器, ROM 读出时钟和计数器时钟为晶振时钟 CLK6, CLK6 由 CLK12 分频产生; ROM 用于存储时钟管理芯片正常工作的配置码字, 上电复位完成后, 通过计数器控制在固定时间段读出相应码字给时钟管理芯片, 待芯片配置完成后, 输出稳定的工作时钟 CLKFPGA12 给 FPGA。由 CLKFPGA12 通过 BUFG 后进行二分频, 产生 CLKFPGA6, LSYN 由计数器来产生, 计数器时钟为 CLKFPGA6 通过 BUFG 进入全局时钟网络。

(2) 图像数据处理模块

该模块用于接收三个视频处理系统输出的 N 位串行数据并转换成并行数据后进行存储并处理, 同时接收辅助数据处理模块输出的参数数据, 按照卫星数据格式要求进行编排, 最后辅助数据按照 M 位、图像数据按照 $N-1$ 位串行数据发后送给数据传

输系统。

模块的接收设计：外部输入该模块信号有三组，来自三个视频处理系统，每组有串行数据、门控、时钟 CLK3。模块中设计了移位寄存器、锁存器、分频器。分频器在门控信号下降沿复位并进行 N 分频产生各自锁存器时钟 CLK3N。串行数据进入移位寄存器，移位时钟为 CLK3，每 N bit 数据存入锁存器。CLK3N、CLK3 均通过内部 BUFG 进入全局时钟网络。

模块的存储设计：设计 RAM 控制子模块和两组 RAM 来存储三个探测器图像数据，RAM 控制子模块中有四个计数器，其中三个计数器时钟为各组 CLK3N 时钟，分别控制三个探测器 RAM 写地址、写使能，另外一个计数器时钟为读 RAM 时钟 CLKoutN-1，由数据传输时钟 CLKout 进行 $N-1$ 分频后得到，控制 RAM 读地址、读使能；RAM 读写采用乒乓操作模式。

模块的发送设计：模块把高 $N-1$ 位并行图像数据和 M 位并行辅助数据转换成串行数据，在每行固定位置输出辅助数据和图像数据给数据传输系统。设计了移位寄存器、2 个锁存器、选择器和计数器。移位寄存器、计数器的时钟为 CLKout，锁存器时钟分别为 CLKoutN-1 和 CLKoutM，CLKoutM 由 CLKout 进行 M 分频后得到，并通过内部 BUFG 进入全局时钟网络。数据由选择器在固定时刻来选择输出辅助数据或图像数据。

(3) 遥控遥测模块

该模块接收管理控制系统发来的焦面成像参数(增益、积分时间和级数等)和控制指令(算法开关、测试模式开关等)，并转发给视频处理系统，同时将焦面成像参数发送给辅助数据处理模块；该模块还接收卫星参数(姿态、时间码等)及工程遥测参数给辅助数据处理模块。

模块中设计了移位寄存器、锁存器、选择器、FIFO、计数器、RAM 以及状态机，其所用时钟均为 CLKFPGA6，同时以管理系统发来的串行时钟 CLKyk、串行使能 ENyk 为控制信号。对于管理控制系统发来的串行指令首先经过移位寄存器、锁存器，按照指令码字，由选择器分类，若为卫星参数(姿态、时间码等)及工程遥测参数存入 RAM；若为焦面成像参数和控制指令则存入各自 FIFO，由状态机转移输出，有限状态机如图 4 所示。

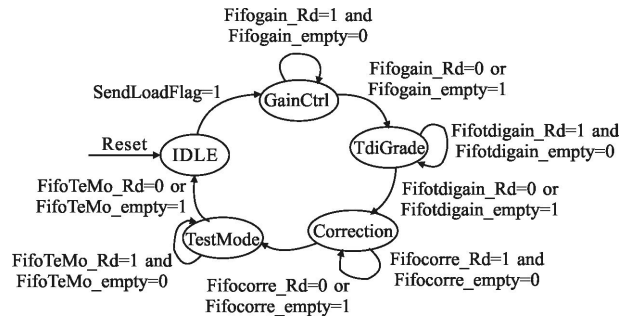


图 4 遥控遥测模块状态机描述

Fig.4 State machine description of remote control module

以可见光探测器视频处理系统为例，发送状态分为空闲状态、增益状态、级数状态、校正开关状态、测试模式状态五个基本状态。系统上电后首先进入空闲状态，接收到发送标志信号 SendLoadFlag 后，首先判断增益 FIFO 是否为空，若不为空且允许读出增益指令，那么读出并发送增益，若 FIFO 为空或不允许读出增益指令，那么进入级数状态，同样判断级数 FIFO 是否为空，若不为空且允许读出级数指令，那么读出并发送级数，否则跳转下一状态，以此类推，直到一个循环结束再次进入空闲状态，其中各 FIFO 读信号和 SendLoadFlag 在一个行周期的固定时刻输出。

(4) 辅助数据处理模块

该模块处理遥控遥测模块发来的焦面成像参数、控制指令及卫星参数，按格式要求进行编排。

模块中设计计数器、寄存器和选择器，所用时钟均为 CLKoutM；寄存器存储当前焦面成像参数和控制指令，遥控遥测模块中的 RAM 存储卫星参数，计数器用于产生 RAM 读地址和读使能，以行周期为基准控制选择器输出时间，即在行周期特定时刻按卫星要求格式顺序读出焦面成像参数、控制指令和卫星参数。

3 仿真验证与测试

MDCPS设计采用 VHDL 硬件描述语言对 FPGA 内部模块进行描述，采用自顶向下的方法完成，在仿真平台下进行仿真，通过与硬件模拟器联试对系统进行了验证。以下说明各模块验证结果。

同步控制模块的验证：从内部 ROM 中读出的配置码字发送给时钟管理芯片，如图 5 中的 1 所示，包括配置时钟、使能、码字，3 为放大后的配置码字时序关系；由主时钟生成三个视频处理系统的同步和

时钟如图 5 中的 2 所示,4 为放大后的同步和时钟的时序关系。

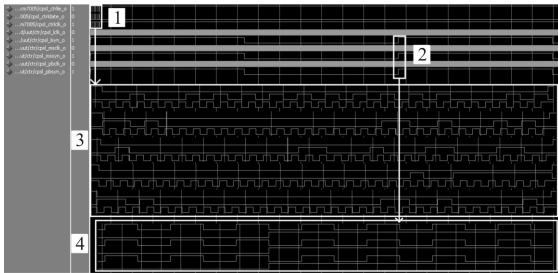


图 5 同步控制模块时序仿真

Fig.5 Timing simulation of synchronization control module

图像数据处理模块验证:采用硬件模拟器模拟三个视频处理系统的数据发送给 MDCPS,经过处理后按照卫星数据格式要求进行编排,输出数据由采集卡采集显示结果如图 6 所示,第 1~4 包为可见光奇行数据、第 7~10 包为可见光偶行数据,第 5、6 包为短波奇行数据,第 11、12 包为短波偶行数据,第 13 包为中波数据,第 14、15 包为长波数据;图中 A 所指数据为第 1~4 包固定数值 HexCCC,B 所指数据为第 5、6 包固定数值 Hex3333,C 所指数据为第 7~15 包渐变数据 Hex30~C00。

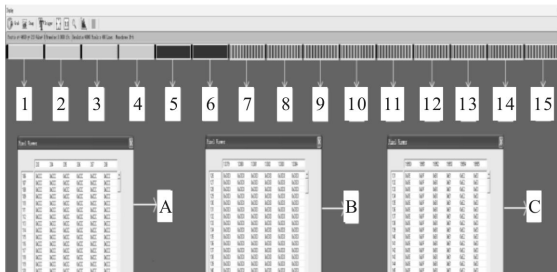


图 6 图像数据处理结果

Fig.6 Result of image data processing

遥控遥测模块的验证:管理控制系统发送来遥控遥测信号和三个视频处理系统接收遥控遥测信号时序关系相同如图 7 所示,包括时钟、数据、门控三

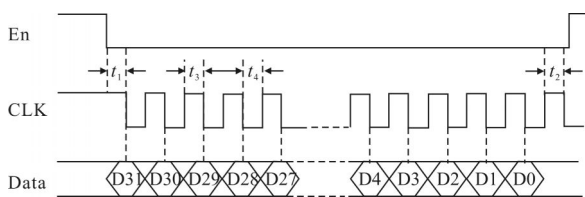


图 7 遥控遥测模块时序关系

Fig.7 Timing relation of remote control module

个信号,其中 $t_1 \geq 1/4(t_3+t_4)$, $t_2 \geq 1/4(t_3+t_4)$, $t_3=t_4$,二者时钟频率不同,前者时钟频率为 1kHz,后者为 15MHz。

通过测试用例输入遥控遥测模块指令码 a: 2200BADC (增益)、b:33000336 (级数)、c:2800042C (增益)、d:46000C52(积分时间)、e:2C000430(增益)、f:4C000854(积分时间),经过处理后分别转发给三个视频处理系统,图 8 为遥控遥测模块时序仿真图。

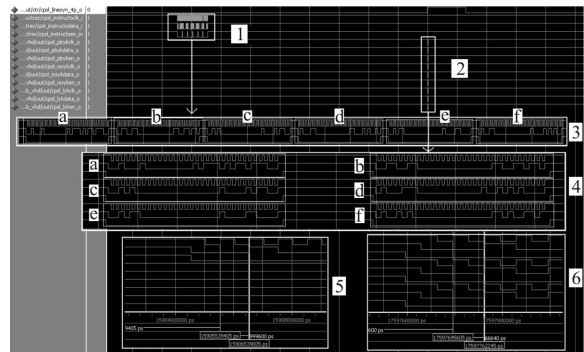


图 8 遥控遥测模块时序仿真

Fig.8 Timing simulation of remote control module

可以看出:1 所标记为模拟管理控制系统发来的 6 条指令码 a、b、c、d、e、f;3 为放大后的码字时序关系图;a、b 发送给可见光视频处理系统,c、d 发送给短/中波红外视频处理系统,e、f 发送给长波红外视频处理系统;5 为放大后的时钟测量图,测量值为 999.6 ns,近似频率 1 kHz;2 所标记为输出给三个视频处理系统的指令码,4 为放大后的细节时序关系图,经过各自状态机,先输出增益码字,再输出其他如级数或积分时间码字等;6 为放大后的时钟测量图,测量值为 66.64 ns,近似频率 15 MHz。

辅助数据处理模块的验证:通过 RS-232 口输入三包卫星参数(一组模拟渐变数),如图 9 所示黑色区域为输入码字,第一包为 D0012AFB、D1010203、...、DD250000、DE000000、DFFFFFFF;第二包为 D0022AFC、D1262728、...、DE4D4E4F、DFFFFFFF;第三包为 D0032AFD、D1505152、...、DE777879、DFFFFFFF。经过辅助数据处理模块接收处理排序为 010203...25000000002627...79,由图像采集后输出结果为箭头 1 和箭头 2 所指向的数据,与输入码字对应参数值一致。同样,通过 RS-232 口输入控制指令或焦面参数,处理后在固定位置输出指令值和参数值,这里不再详述。



图 9 辅助数据处理结果

Fig.9 Result of auxiliary data processing

4 结束语

MDCPS 以全谱段光谱成像仪研制为依托, 解决了多探测器控制与数据处理问题, 该系统硬件设计以 FPGA 为核心控制处理单元, 采用光耦合差分器件进行隔离和传输, 软件设计采用模块化思想, 按照系统功能设计了同步控制模块、图像数据处理模块、遥控遥测模块和辅助数据处理模块, 通过仿真工具进行验证, 并与硬件模拟器连接进行测试, 目前已完成与其他系统的联试, 且通过了力学试验、热循环试验等各种环境试验验证, 结果表明该系统已具有完备的功能和良好的性能, 易于扩展, 它解决了多时钟域、多数据格式的数据控制与集成处理等问题, 为研制多类型探测器集成的成像仪提供了有力的技术支持。

参考文献:

[1] Wang Yueming, Wei Liqing, Lang Junwei, et al. Status of advanced focal plane arrays and spectral imaging technology [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2014, 12(1): 7-12. (in Chinese)
王跃明, 韦丽清, 郎均慰, 等. 先进焦平面与光谱成像技术现状[J]. *光学与光电技术*, 2014, 12(1): 7-12.

[2] Shen Honghai, Huang Meng, Li Jiaquan, et al. Recent progress in aerial electro-optic payloads and their key technologies[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(1): 20-29. (in Chinese)
沈宏海, 黄猛, 李嘉全, 等. 国外先进航空光电载荷的进展与关键技术分析[J]. *中国光学*, 2012, 5(1): 20-29.

[3] Gong Haimei, Shao Xiumei, Li Xiangyang, et al. Advanced technology and application of spaceborne infrared detectors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41 (12): 3129-

3140. (in Chinese)
龚海梅, 邵秀梅, 李向阳, 等. 航天先进红外探测器组件技术及应用[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(12): 3129-3140.

[4] Zhou Feng, Zheng Guoxian, Su Yun. Development of optical remote sensors of deep space exploration abroad and its enlightenment [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Semote Sensing*, 2012, 33(1): 16-22. (in Chinese)
周峰, 郑国宪, 苏云. 国外深空探测光学遥感载荷发展现状与启示[J]. *航天返回与遥感*, 2012, 33(1): 16-22.

[5] Dennis Reuter, James Irons, Allen Lunsford, et al. The operational land imager(OLI) and the thermal infrared sensor (TIRS) on the landsat data continuity mission (LDCM)[C]// SPIE, 2011, 8048: 804812.

[6] Li Guangze, Kong Dezhu, Liu Jinguo. Computation of scroll image motion velocity of wide coverage optical remote camera [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(5): 750-758. (in Chinese)
李广泽, 孔德柱, 刘金国. 宽覆盖型光学遥感相机侧摆像移速度计算[J]. *中国光学*, 2013, 6(5): 750-758.

[7] Li Yan, Tang Xinyi, Ge Jun, et al. Real-time multi-channels infrared image acquisition system based on FPGA [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(5): 1363-1368. (in Chinese)
李燕, 汤心溢, 葛军, 等. 基于 FPGA 的多通道红外图像实时采集系统[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(5): 1363-1368.

[8] Liu Yin, Wang Xuejin, Pan Yulong, et al. Design of hyper-spectral imaging system with harmonic diffraction element in medium and long infrare [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(3): 579-585. (in Chinese)
刘英, 王学进, 潘玉龙, 等. 谐衍射中、长波红外超光谱成像系统设计[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(3): 579-585.

[9] Huang Zongfu, Wang Weihua, Xiong Yunsheng, et al. Design and implementation of a real-time signal processor for astronomical opto-electronic observation system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(3): 671-676. (in Chinese)
黄宗福, 王卫华, 熊运生, 等. 天文光电观测系统实时信息处理机的设计与实现 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(3): 671-676.

[10] Gao Kun, Liu Yinghui, Ni Guoqiang, et al. Study on on-board real-time image processing technology of optical remote sensing [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2008, 29(1): 50-54. (in Chinese)
高昆, 刘迎辉, 倪国强, 等. 光学遥感图像星上实时处理技术的研究[J]. *航天返回与遥感*, 2008, 29(1): 50-54.