

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2019.02.002

基于 FPGA 的星载 HgCdTe 探测器温控系统设计

路美娜, 陈迪虎, 李志伟, 熊伟

(中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘 要: 大气主要温室气体检测仪采用 HgCdTe 探测器实现 CO₂ 温室气体干涉光谱数据探测, HgCdTe 探测器工作温度对探测器性能具有重要影响。针对 HgCdTe 探测器恒定低温下工作的需求, 设计了温度采集电路与温控功率驱动电路, 并以 Actel 公司反熔丝工艺 FPGA 作为主控单元, 结合 PID 算法, 完成了星载 HgCdTe 探测器温控系统, 实现了探测器在轨温度控制。实验及应用结果表明, 控温精度优于 ± 0.5 °C, 控温稳定性优于 ± 0.1 °C/s, 满足 HgCdTe 探测器在轨工作温度要求。

关键词: HgCdTe 探测器; 温度控制; FPGA; PID 算法

中图分类号: TP79; TN215 文献标识码: A 文章编号: 1673-6141(2019)02-0089-08

Design of Temperature Control System for Spaceborne HgCdTe Detector Based on FPGA

LU Meina, CHEN Dihu, LI Zhiwei, XIONG Wei

(Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: HgCdTe detector was used to detect the interference spectra of CO₂ greenhouse gases on spaceborne greenhouse gas detection equipment. The performance of HgCdTe detector is significantly affected by operating temperature, and the detector needs to work at a constant low temperature. According to the operating temperature requirement, a temperature control system for spaceborne HgCdTe detector was designed. The system is mainly composed of temperature acquisition circuit, power-driven circuit and a main control unit based on FPGA. PID algorithm was adopted to realize precise temperature control. The experiment and application results show that the temperature control precision is better than ± 0.5 °C, and the temperature stability is better than ± 0.1 °C/s, which satisfies the on-orbit working temperature requirement of HgCdTe detector.

Key words: HgCdTe detector; temperature control; FPGA; PID algorithm

1 引 言

大气主要温室气体监测仪 (Greenhouse gases monitor instrument, GMI) 是 GF-5 卫星上的主要载荷之一, 其主要任务与功能是获取 O₂(0.765 μm)、CO₂(1.575, 2.05 μm)、CH₄(1.65 μm) 四个谱段的高光谱遥

作者简介: 路美娜 (1986 -), 女, 河北廊坊人, 硕士, 助研, 主要从事光电遥感技术方面的研究。

E-mail: lumeina@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2018-09-30; **修改日期:** 2018-11-26

感探测数据, 定量反演 CO_2 、 CH_4 等气体的平均柱浓度, 监测大尺度范围内大气主要温室气体的全球变化^[1]。

GMI 采用空间外差光谱技术进行研制, 使用面阵探测器实现在轨探测 $\text{O}_2(0.765 \mu\text{m})$ 、 $\text{CO}_2(1.575, 2.05 \mu\text{m})$ 、 $\text{CH}_4(1.65 \mu\text{m})$ 四个光谱通道的干涉图像数据。其中, $2.05 \mu\text{m}$ CO_2 通道简称 $\text{CO}_2\text{-2}$ 光谱通道。 $\text{CO}_2\text{-2}$ 光谱通道使用 SOFRADIR 公司 320×256 面阵短波红外焦平面 HgCdTe 探测器, 该探测器作为 GMI 载荷 $\text{CO}_2\text{-2}$ 光谱通道的核心部件, 直接决定着该系统的探测性能。

HgCdTe 探测器工作温度是保证探测器性能的关键, 是提高 GMI 载荷探测性能的有效手段。本文针对 HgCdTe 探测器恒定低温条件下工作的需求, 研究了工作温度对 HgCdTe 探测器性能的影响, 基于 FPGA 设计并实现了星载 HgCdTe 探测器温控系统, 最后开展了在轨应用。

2 探测器工作温度与性能

暗电流是衡量 HgCdTe 光伏探测器性能的重要指标, 暗电流水平对工作温度变化非常敏感, 因此, 温度是影响暗电流进而影响 HgCdTe 光伏探测器性能的重要因素。

暗电流是在无光照的情况下, 通过光伏探测器 PN 结的电流^[2]。当 PN 结在反向偏压工作时, 暗电流 I_d 与温度 T 的关系为^[3]:

$$|I_d| \propto \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right), \quad (1)$$

式中 E_g 为 HgCdTe 的能隙宽度, k 为 Boltzmann 常数。由式 (1) 可见, 暗电流与温度的倒数 $1/T$ 呈指数线性关系^[3]。

设计中使用的法国 SOFRADIR 公司的 320×256 短波红外焦平面 HgCdTe 探测器在正常工作温度范围 (170~230 K) 内, 暗电流与温度的关系如图 1 所示^[4]。

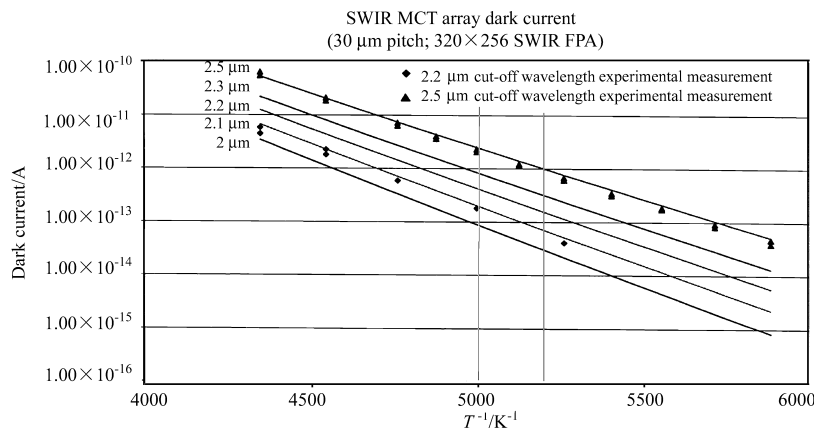


图 1 暗电流与温度关系曲线

Fig.1 Relationship between dark current and temperature

由图 1 可见, 暗电流对温度的变化非常敏感, 200 K 左右工作条件下, 温度变化 1%, 将使暗电流变化约 10%, 因此, 为了保证探测器的灵敏度, 必须为探测器提供高稳定度的低温工作环境。

3 温控系统设计

HgCdTe 探测器温控系统由温度传感器、信号调理及 AD 采集模块、主控模块、PWM 功率驱动及滤

波模块、热电制冷器等模块构成, 系统框图如图 2 所示。其中, 温度传感器采用探测器内部自带的晶体三极管 2N2222, 该温度传感器的输出电压与温度在较大的范围内具有良好的线性关系, 在发射结注入 $25 \mu\text{A}$ 恒定电流条件下, 其电压温度系数约为 $-2 \text{ mV/K}^{[5]}$ 。热电制冷器采用 HgCdTe 探测器内部自带四级 TEC, TEC 冷端与探测器焦平面接触, 热端与热沉接触。TEC 可制冷探测器工作温度降至 200 K 以下, 最大驱动功率可达为 $31 \text{ W}^{[6]}$, 最大工作电流和工作电压分别为 4.2 A 、 7.4 V , 此时热电制冷器的冷端和热端的温差达到最大。

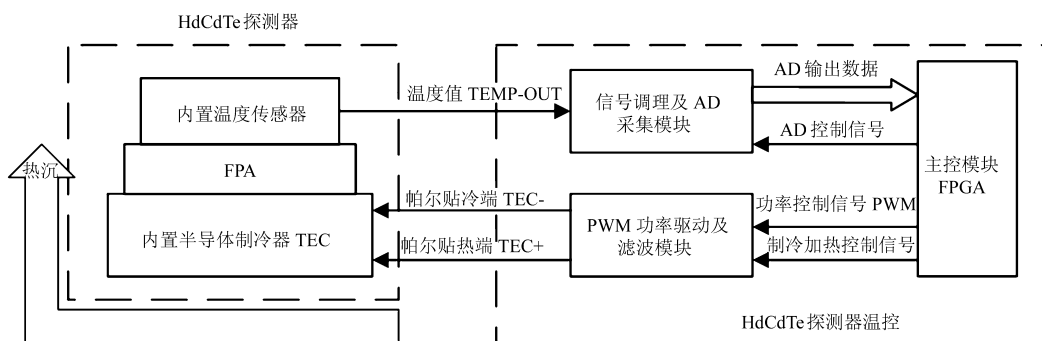


图 2 温控系统原理框图

Fig.2 Schematic diagram of temperature control system

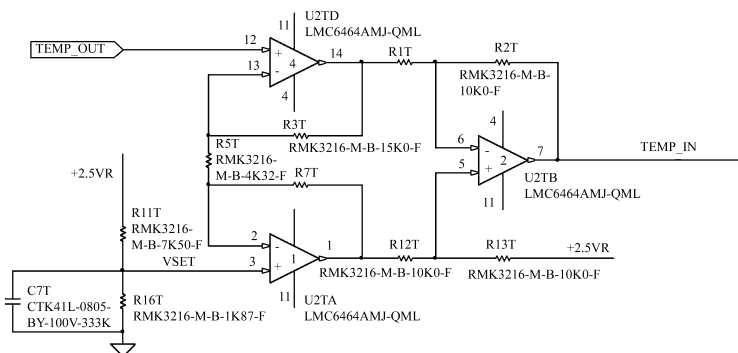


图 3 信号处理电路图

Fig.3 Signal processing circuit

3.1 硬件设计

3.1.1 主控模块

主控模块为探测器温控系统的核心, 主要用于完成探测器温度信号采集控制、温控算法实现、TEC 驱动信号输出、RS422 异步串行通讯。使用芯片为 Actel 公司生产的反熔丝型 FPGA, 型号为 A54SX72A-CQ208B, 系统门数为 72 万门, 可用的 I/O 有 171 个, 最高系统工作频率可达 215 MHz , 该器件资源及速度满足设计需求。

3.1.2 信号调理及 AD 采集模块

温度传感器测温三极管 2N2222 输出的温度反馈电压范围较小, 在 $195 \sim 295 \text{ K}$ 温度变化范围内, PN 结正向偏压变化范围只有 200 mV 左右; 对于 $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 的控温精度, PN 结正向偏压仅有 1 mV 左右的输出。因此, 为提高系统控温精度, 需要对温度反馈电压信号进行放大处理。

信号调理及 AD 采集模块包括温度信号放大电路和 AD 采集电路。温度信号放大电路完成探测器温

度信号的放大调理功能,以匹配温度采集电路 AD 输入电压范围;AD 采集电路完成温度信号的采集及数字化功能。

温度信号调理电路设计为二级放大电路,选用缓冲放大器 LMC6464,将温度电压信号放大至满足 ADC 的输入电压动态范围,以精确分辨温度信号的微弱变化,减小温度测量误差影响,提高温度系统的控制精度。电路原理图如图 3 所示。

ADC 采用 AD 公司生产的 AD976ASD,该芯片为 16 位串行逐次逼近型 AD 转换器,最高转换速率达到 200 kSPS。电压输入范围为 $-10\sim+10$ V,转换精度可达到 $20/2^{16}$ V=0.305 mV,满足设计需求。

3.1.3 PWM 功率驱动及滤波模块

PWM 功率驱动及滤波模块用于输出 TEC 制冷驱动功率,实现探测器制冷。使用的热电制冷器在环境温度 295 K 条件下,制冷探测器工作温度至 195 K,需输入功耗约为 20 W,因此,选用大功率 MOSFET 器件 JANSR2N7422 来驱动热电制冷器。使用 MOSFET 进行 H 桥设计,使用 FPGA 输出 PWM 波形驱动 MOSFET 开关。采用两组 PWM 驱动信号完成 H 桥电路驱动,一组用于控制驱动功率大小;一组用于控制通过 TEC 的电流方向,即 TEC 制冷/加热控制。为防止 H 桥路的直通,需对 PWM_P 和 PWM_N 信号进行时序设计,防止出现 P 管和 N 管同时导通的情况。

滤波功能用于减小 TEC 制冷器两端驱动电压的纹波,提高控温的精度。采用 LC 低通滤波器对 H 桥电路输出信号进行滤波,得到低纹波的直流信号,从而在 TEC 两端得到低纹波的温控驱动电压。PWM 功率驱动及滤波电路原理图如图 4 所示。

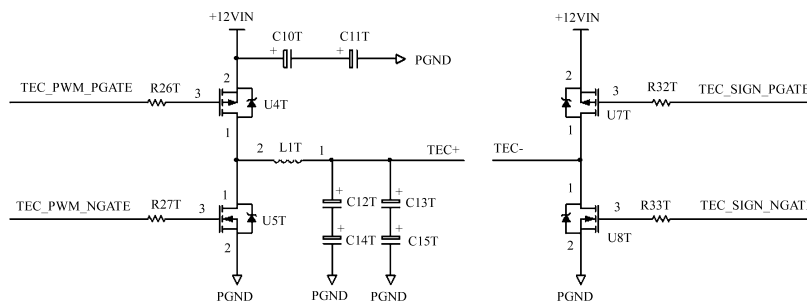


图 4 PWM 功率驱动及滤波电路

Fig.4 PWM power control and filter circuit

3.2 软件设计

探测器温控 FPGA 软件采用编程语言 Verilog HDL,采用自顶向下的方式实现逻辑设计。根据系统功能需求对探测器温控 FPGA 软件进行功能模块划分,如图 5 所示。该 FPGA 软件包括 HgCdTe 探测器温度控制模块和 RS422 异步串行通讯功能模块。其中,RS422 异步串行通讯模块分为时钟分频、异步串行接收、异步串行发送和通讯协议解析四个子模块;HgCdTe 探测器温度控制模块分为温度采集控制、PID 算法实现和 PWM 波形输出三个子模块。

RS422 异步串行通讯模块用于接收信息处理箱发送的温控开关指令、制冷目标温度和 PID 参数,并将指令应答内容反馈至信息处理箱;HgCdTe 探测器温度控制模块作为 FPGA 软件的核心部分用于实现探测器温度采集、PID 算法实现及 PWM 制冷功率驱动信号输出。各功能模块之间的信号流程图如图 6 所示。

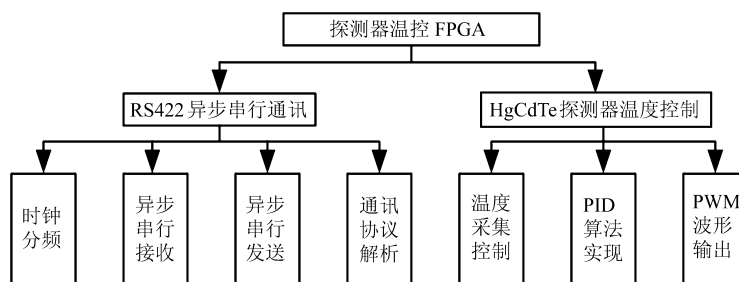


图 5 探测器温控 FPGA 软件结构图

Fig.5 Structure diagram of FPGA software

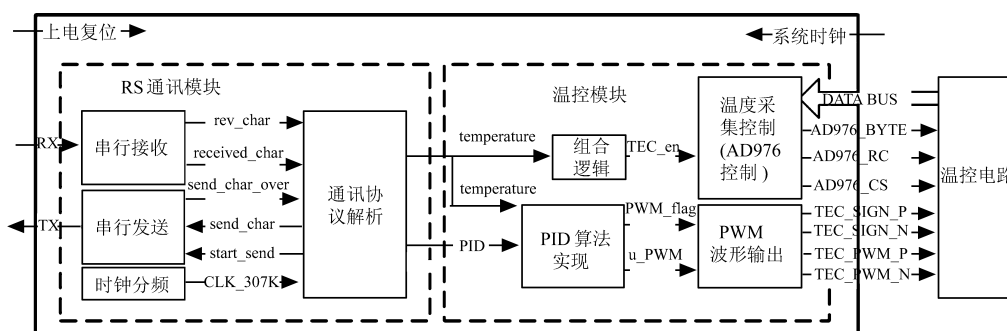


图 6 探测器温控 FPGA 内部信号流图

Fig.6 FPGA internal signal flow diagram

温度采集控制模块: 根据 RS422 通讯模块传输的温控开关指令启动 AD976A 控制, 实现温度信号采集, 设计采用计数器和状态机完成时序信号生成, AD976A 控制时序如图 7 所示。使用片选信号 CS 控制 AD976A 模数转换, 使用片选信号 CS 和 BYTE 信号控制数据总线数据读出, 读出数据高低字节分时输出, 低字节在前。

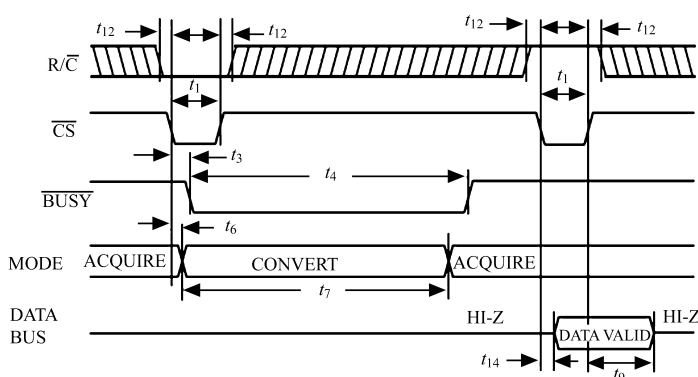


图 7 AD976A 控制时序图

Fig.7 Control sequence of AD976A

PID 算法实现模块: 选用基于数字增量式 PID 温度控制算法实现 HgCdTe 探测器的温度控制, 满足快速启动并保持恒定工作温度的要求。

为简化工程实现, 采用 Robert 提出的归一参数整定法^[7]对数字增量式 PID 参数进行整定。在 Ziegler-Nichols 条件下^[8], 令 $T_0 = 0.1 T_k$, $T_1 = 0.5 T_k$, $T_D = 0.125 T_k$, PID 控制方程整定为

$$\Delta u(k) = K[2.45e(k) - 3.5e(k - 1) + 1.25e(k - 2)] . \tag{2}$$

由于航天型号 FPGA 软件可靠性安全性要求严苛，需满足资源和速度 80% 降额要求，为便于运算、节省资源、提高速度，且不影响温控效果，在满足工程设计要求的前提下对式 (2) 进行优化，优化后的表达式为

$$\Delta u(k) = K/4[10e(k) - 14e(k - 1) + 5e(k - 2)] , \tag{3}$$

式中 $K/4$ 为可调参数，由 RS422 通讯完成该 PID 参数配置。在调试过程中，通过不断调整 PID 参数进行比较，直到取得最佳的控制效果，确定最终 PID 参数值。

PWM 输出控制：根据 PID 算法输出的温度反馈数据，产生 PWM 控制信号，输出至 PWM 功率驱动电路实现对探测器温度的精密温控。PWM 控制信号时序如图 8 所示。 T_d 为 MOSFET 器件 JANSR2N7422 的死区时间 (即 MOSFET 器件导通 / 关闭的稳定时间)，设计为 $10 \mu s$ 。通过调整 PWM 占空比，实现驱动功率大小的调节。

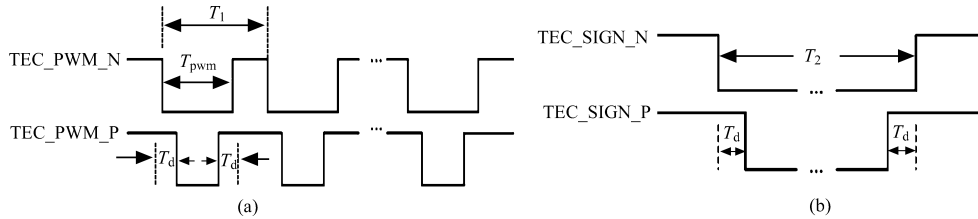


图 8 (a) 功率控制信号; (b)TEC 电流方向控制信号

Fig.8 (a) Power control signal; (b) current direction control signal

4 实验与分析

在实验室环境下搭建 HgCdTe 探测器测试装置，使用制冷机提供低温循环制冷液，探测器热沉与导热铜块接触散热，并至于遮光箱中密封。使用上位机发送制冷开指令，设置不同制冷目标温度，进行探测器暗电流测试，测试结果如图 9 所示。

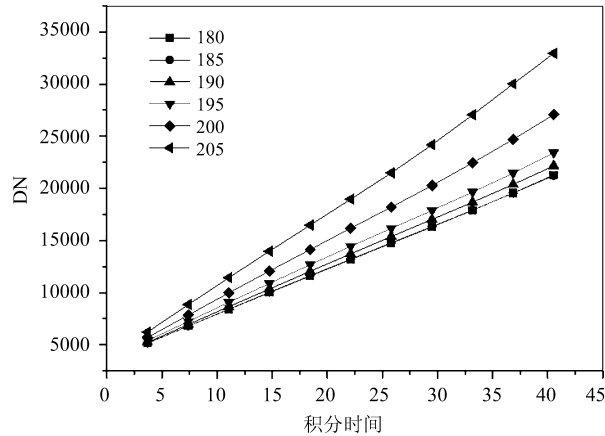


图 9 不同制冷温度下的暗电流

Fig.9 Dark current at different refrigeration temperatures

由图 9 可见, 相同积分时间条件下, HgCdTe 探测器暗电流对温度变化较大, 积分时间为 $T44(165.84 \text{ ms})$ 时, 205 K 和 180 K 温度下暗电流相差近 12000DN 值; 180 K 和 185 K 温度下暗电流基本相同。正样研制阶段, 使用 HgCdTe 探测器测试装置, 在 180 K 和 185 K 两种工作温度条件下, 对 HgCdTe 探测器进行信噪比测试, 经多次实验验证 185 K 工作温度条件下, HgCdTe 探测器信噪比最高和制冷功耗最小, 且满足系统设计要求。

在轨运行中, 设置探测器制冷目标温度为 185 K, PID 参数设置为 $8' \text{ h}0\text{a}$ 。获取探测器制冷温度遥测数据, 如图 10 所示。由图 10 可见, 温控响应速度快, 从开始制冷 280 K 到制冷稳定状态 185 K 用时大约为 240 s; 同时, 探测器工作温度稳定值为 185.266 K, 与目标温度偏差为 0.266 K, 优于 $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 温控精度要求; 温度稳定后波动范围控制在 $\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$, 优于 $\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C} / \text{s}$ 温度稳定性要求。

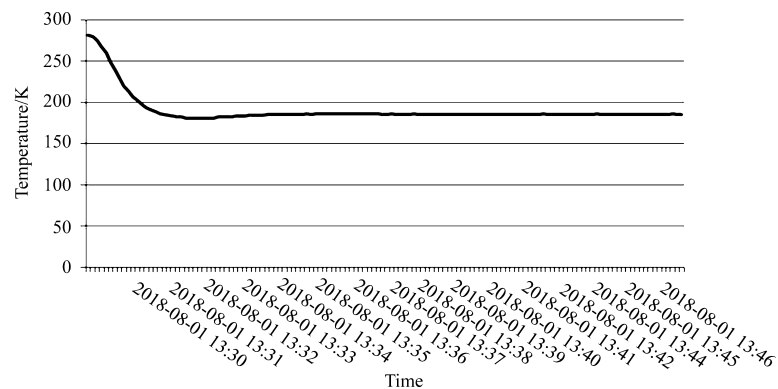


图 10 HgCdTe 探测器在轨遥测数据

Fig.10 On-orbit temperature data of HgCdTe detector

$\text{CO}_2\text{-2}$ 光谱通道接收到成像指令后, 启动 HgCdTe 探测器进行干涉图像采集。设置积分时间为 84.77 ms, 在 185 K 工作温度条件下, HgCdTe 探测器采集的暗电流平均 DN 值为 5280, 平均信噪比为 312, 采集图像中干涉条纹清晰可见, 干涉图像如图 11 所示。

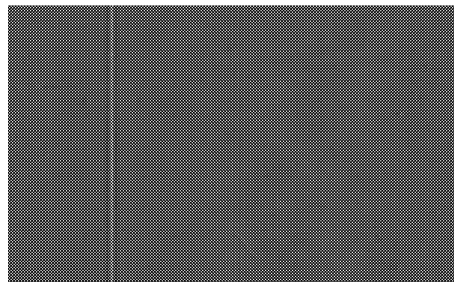


图 11 HgCdTe 探测器在轨成像图

Fig.11 On-orbit image of HgCdTe detector

5 结 论

HgCdTe 探测器的工作温度和温度稳定性是保证 GMI 载荷在轨运行过程中 $\text{CO}_2\text{-2}$ 通道光谱仪探测性能的关键。设计了基于 FPGA 的星载 HgCdTe 探测器温控电路, 采用 PID 算法实现探测器在轨高精度高稳定性的温度控制, 控温精度优于 $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$, 温度稳定性优于 $\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C} / \text{s}$, 获取干涉图像清晰, 信噪比优于

250, 满足系统设计要求。

参考文献：

- [1] Xiong Wei. Hyperspectral greenhouse gases monitor instrument(GMI) for spaceborne payload [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2018, **39**(3): 14-24(in Chinese).
熊 伟. 星载超光谱大气主要温室气体监测仪载荷 [J]. *航天返回与遥感*, 2018, **39**(3): 14-24.
- [2] Qiao Hui. *Study on the Fabrication and Dark Current Characteristic of Spaceborne Mercury Cadmium Telluride Infrared Photodetectors* [D]. Shanghai: Doctorial Dissertation of Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016(in Chinese).
乔 辉. 航天碲镉汞红外探测器工艺及暗电流研究 [D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所博士论文, 2016.
- [3] Chen Xiaoshuang. Research progresses on dark current mechanisms of long-wavelength HgCdTe infrared detectors [J]. *Infrared Technology*, 2015, **37**(5): 353-360(in Chinese).
陈效双. 长波 HgCdTe 红外探测器的暗电流机理研究进展 [J]. *红外技术*, 2015, **37**(5): 353-360.
- [4] Chorier P, Tribolet P M. High performance HgCdTe SWIR detector development at Sofradir [C]. *FRADIR*, 43-47 rue Camille Pelletan.
- [5] Zhang Mingtao. Design and application on temperature controlling system of 320×256 element short wave infrared focal plane array [J]. *Infrared Millim Waves*, 2009, **28**(3): 173-180(in Chinese).
张明涛. 320×256 短波红外焦平面温控系统设计与应用 [J]. *红外与毫米波学报*, 2009, **28**(3): 173-180.
- [6] Mars sw2 tec 320×256 2.0 μm cut-off sw aicwos thermoelectrically cooled detector [Z]. Dewar Assembly Technical Specification.
- [7] Feng Gensheng, Guo Jiaozhi. *Microcomputer Control Technology* [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2002(in Chinese).
冯根生, 郭教之. 微机控制技术 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2002.
- [8] Wu Hongxin, Shen Shaoping. The application of PID control and the theory basis [J]. *Control Engineering*, 2003, **10**(1): 37-42(in Chinese).
吴宏鑫, 沈少萍. PID 控制的应用与理论依据 [J]. *控制工程*, 2003, **10**(1): 37-42.