

〈系统与amp;设计〉

## 基于FPGA微型红外热电堆探测器空间应用

刘奇, 盖芳钦, 叶有时, 刘波, 施蕾

(北京控制工程研究所, 北京 100190)

**摘要:** 红外地球敏感器是卫星控制分系统的重要姿态测量部件, 提供卫星相对于地球辐射圆盘俯仰和滚动方向姿态信息。为进行新一代微型红外地球敏感器研制, 开展了基于FPGA的微型红外热电堆探测器空间应用研究, 介绍了红外热电堆技术, 采用探测器技术指标, 对探测器的圆环效应、温度补偿、响应补偿、非均匀校正、盲元处理进行了研究, 实现了红外地球敏感器图像处理系统的方案设计与FPGA设计。测试结果表明, 姿态测量偏差小于 $0.2^\circ$ , 基于FPGA微型红外热电堆探测器设计, 能够应用于卫星姿态测量, 具有小型化、低功耗、低成本特点, 具有替代传统机械扫描式红外地球敏感器潜力, 具有广阔的应用前景。

**关键词:** 微型红外; 热电堆; FPGA; 空间应用

中图分类号: TN216

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2020)07-0611-07

## Micro-Infrared Thermopile Detector Space Applications Based on FPGA

LIU Qi, GAI Fangqin, YE Youshi, LIU Bo, SHI Lei

(Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, China)

**Abstract:** Infrared earth sensors are an important attitude measurement component of satellite control subsystems. They provide the information about the satellite's attitude relative to the pitch and roll direction of the earth radiation disk. The infrared detector is the key part of such a sensor. In this paper, we discuss research on micro-infrared thermopile detectors for space applications. Infrared thermopile technology and the technical index of the detector are introduced. The ring effect, temperature compensation, response compensation, nonuniformity correction, and blind element processing of the detector are studied. The scheme design and field programmable gate array (FPGA) design of an infrared earth sensor image processing system are described. Test results show that system's attitude measurement deviation is less than  $0.2^\circ$ . Thus, FPGA-based micro-infrared thermopile detectors based on FPGA can be used for attitude measurement in low earth orbit satellites. Offering miniaturization, low power consumption, and low cost, this technology has the potential to replace traditional mechanical scanning infrared earth sensors and has broad application prospects.

**Key words:** micro IR, thermopile, FPGA, space applications

### 0 引言

红外地球敏感器通过测量卫星相对于地球位置确定姿态, 作为一种测量部件被广泛应用于卫星控制系统。主要由光学系统、探测器、图像处理与姿态解算等部分构成。

随着商业航天与小卫星发展, 对红外地球敏感器的小型化、低成本、低功耗方面提出迫切需求。

传统的机械扫描式产品体积、重量与功耗都较大, 且扫描机构长时间运行后, 会产生偏差, 降低产品工作寿命<sup>[1]</sup>。

开展面阵静态红外地球敏感器研究十分必要, 本文探索使用微型红外热电堆探测器, 对探测器的圆环效应、温度补偿、响应补偿、非均匀校正、盲元处理进行了研究, 实现图像处理系统的方案设计与FPGA设计, 完成新一代微型静态红外地球敏感器设计。

收稿日期: 2020-01-06; 修订日期: 2020-03-11.

作者简介: 刘奇(1985-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事计算机科学与技术、图像处理方面的研究。E-mail: liuqi036200@163.com.

基金项目: 航天系统部装备部课题(30508030101)。

## 1 红外热电堆技术

红外技术目前在军事领域和民用领域，都发挥着重要作用。其中红外探测器是红外技术的核心部件，根据探测器工作原理，可分为热探测器和光子探测器两大类。

本文研究的红外热电堆探测器属于热探测器，其工作原理是基于塞贝克效应。两种具有不同逸出功的导体或半导体材料相互串接构建的闭环回路，两个接触点中温度较高的一端通常被称作“热结”，较低的一端被称作“冷结”，如图1所示。材料中载流子沿着温度梯度降低的方向移动，引起电荷积累在冷结处，此时回路中便有热电势产生，多对热电偶相互串接就结合为一个热电堆<sup>[2]</sup>。

产生的温差电动势  $V_{out}$ ，其数学表达式为：

$$V_{out} = T_{diff}(\alpha_A - \alpha_B) = T_{diff}\alpha_{AB} \quad (1)$$

式中： $\alpha_A$ 和 $\alpha_B$ 分别为材料A和B的塞贝克系数； $\alpha_{AB}$ 是两种材料的塞贝克系数差值。

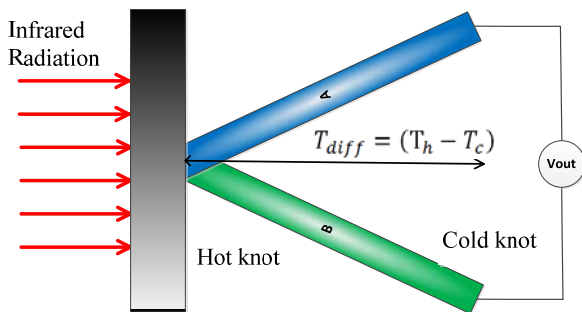


图1 塞贝克效应示意图

Fig.1 Schematic diagram of Seebeck effect

红外热电堆探测器，具有如下的优点：

- ①工作环境无需制冷，室温工作，具有小型化、低成本特点；
- ②检测的光谱范围宽，能够响应全波段的红外辐射；
- ③与标准 IC 工艺兼容，稳定性好，易于生产，信号处理电路较容易实现；
- ④使用时外围配置电路简单，无需斩波，无需偏置电压，有利于系统设计简化。

可以应用于红外成像、非接触测量、空间气候探测、卫星姿态测量等方面。

## 2 热电堆探测器指标

本文研究使用的红外热电堆探测器为 HEIMANN Sensor 公司的 HTPA80x64d 型探测器。器件结构如图2所示。

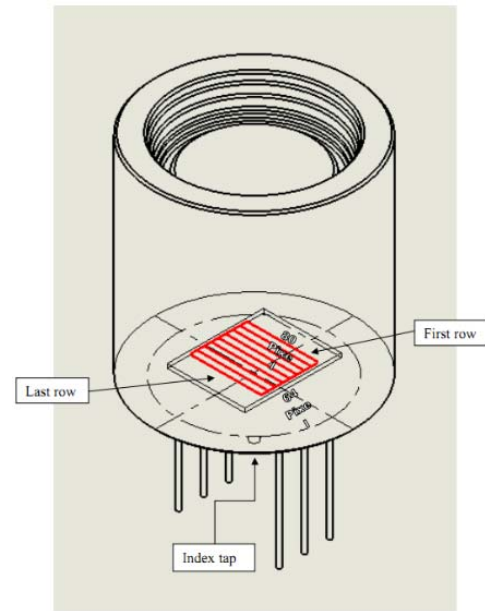


图2 探测器结构图

Fig.2 Detector structure chart

HEIMANN Sensor 公司主要从事红外热电堆传感器、成像阵列等方面的研制与生产。本文研究使用探测器为其新型快响应面阵产品，基本参数信息如表1所示<sup>[3]</sup>。

表1 HTPA80x64d 型红外探测器基本参数

Table 1 Basic parameters of HTPA80x64d infrared detector

| Order Number | Parameter Name              | Value            |
|--------------|-----------------------------|------------------|
| 1            | Focal plane array           | 80×64            |
| 2            | Focal length                | 10.0 mm          |
| 3            | Lens coating                | 7.7 μm±0.3 μm    |
| 4            | Field of view               | 41°×33°          |
| 5            | Absorber size               | 44 μm            |
| 6            | Technology                  | n-poly/p-poly Si |
| 7            | Sensitivity                 | approx. 450 V/W  |
| 8            | Thermal pixel time constant | <4 ms            |
| 9            | Max. Frame rate             | 200 Hz           |
| 10           | AD sampling accuracy        | 16 bit           |
| 11           | Communication interface     | SPI              |
| 12           | Operating temperature       | -20°C-65°C       |

## 3 红外图像数据处理

### 3.1 探测器圆环效应

光电探测器主要由光学部分和电学部分组成，光

学部分将目标的光信息通过光学元件, 照射到光电敏感单元, 敏感单元将光信号转换为电信号, 电学部分进行信号调理、检测、采样、数据处理、数据存储、输出图像信息。

红外光线在经过光学系统传输后, 由于不同能量组分的干涉效应, 在光电敏感元件表面形成能量分布, 以光轴为中心, 按规律分布<sup>[4]</sup>。而产生了在不同温度下的探测器输出的圆环效应, 会导致图像的低频非均匀性, 这种非均匀性噪声一般比较固定。

使用探头在不同黑体温度下进行测量, 发现在 25℃ 时几乎不存在圆环效应, 而偏离 25℃ 越远, 则圆环效应越大。测试过程中黑体充满整个视场, 结果如图 3 所示。

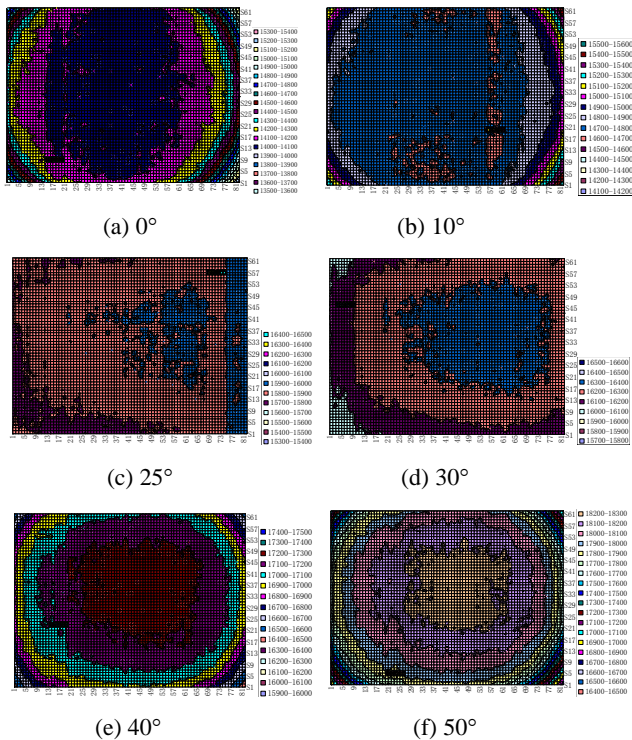


图 3 探测器不同黑体辐射温度圆环效应

Fig.3 Ring effect at different blackbody radiation temperature of detector

### 3.2 图像补偿算法

红外热成像系统接收目标发出的红外辐射, 通过光电信号处理, 以图像形式输出。成像结果会受到以下 3 方面影响:

- ① 与被测目标的发射率、环境温度、背景辐射、测温距离、大气温度、大气衰减等因素相关。
- ② 与探测器的制备工艺相关, 如各敏感单元的结构尺寸、转换效率、掩膜误差、材料缺陷等不一致性。
- ③ 与探测器内部电气元件的温度响应相关, 存在温度漂移与响应非线性特点。

探测器不同敏感单元, 在相同的辐照度下存在不

同的响应特性; 同一敏感单元, 在不同温度环境下存在不同响应特性。

为了提高红外图像准确度, 针对以上关键影响因素, 建立补偿模型, 进行图像补偿处理<sup>[5]</sup>。包含温度补偿、响应补偿。

完成图像补偿处理的具体步骤如下。

#### 1) 环境温度计算

探测器的环境温度由公式(2)计算得到:

$$T_{\alpha} = PTAT_{\alpha v} \cdot PTAT_{\text{gradient}} + PTAT_{\text{offset}} \quad (2)$$

式中:  $PTAT_{\alpha v} = \frac{\sum_{i=0}^7 PTAT_i}{8}$ , 为温度测量平均值;

$PTAT_{\text{gradient}}$  为温度计算梯度;  $PTAT_{\text{offset}}$  为温度计算偏移量。

#### 2) 图像温度偏移补偿计算

图像数据温度偏移补偿, 由公式(3)计算得到:

$$V_{ij\_Comp} = V_{ij} - \frac{ThGrad_{ij} \cdot PTAT_{\alpha v} - ThOffset_{ij}}{2 \text{gradscale}} \quad (3)$$

式中:  $V_{ij\_Comp}$  为温度偏移补偿后图像值;  $V_{ij}$  为探头读出原始图像值;  $ThGrad_{ij}$  为温度补偿梯度。  $ThOffset_{ij}$  为温度补偿偏移量。  $gradscale$  为温度补偿梯度的缩放系数。

#### 3) 像元响应偏移补偿计算

像元响应偏移补偿, 由公式(4)计算得到:

$$V_{ij\_Comp}^* = V_{ij\_Comp} - eIOffset_{ij} \quad (4)$$

式中:  $V_{ij\_Comp}^*$  为环境温度偏移补偿和像元响应偏移补偿后电压;  $eIOffset_{ij}$  为像元响应偏移量。

### 3.3 图像非均匀校正

非制冷红外焦平面的非均匀性校正方法基本可分为两类: 基于标定技术的算法和基于场景技术的算法。基于场景技术的校正算法, 理论性较强, 硬件实现难度较大。基于标定技术的校正算法, 结构简单, 易于硬件实现, 具有较好的适应性与有效性。标定校正方法, 是通过使用均匀的高温、低温黑体, 对红外焦平面标定, 计算出增益和偏移系数, 是一种有效实用的算法。常见有两点法和扩展两点法, 本文使用两点法对红外图像进行非均匀校正<sup>[6]</sup>。

两点校正法应用的前提条件: 探测器敏感单元的响应特性①在使用的温度范围内, 为线性变化; ②在使用时间范围内, 受随机噪声影响小, 具有稳定性。

根据地球大气 14~16 μm 红外辐射谱段,地球平均等效黑体温度约为 247 K,空间背景温度约为 4 K。利用普朗克公式计算光谱辐射能量差,当环境温度为 25℃,地球模拟辐射圆盘温度为 66.8℃。

红外地球敏感器在空间工作环境中,会进行温度控制,选取典型的工作温度 25℃,对探测器的输出响应进行测量,如图 4 所示,计算得到非线性误差为 2.26%。

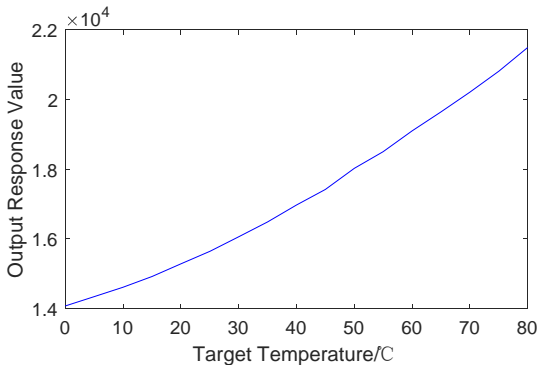


图4 探测器输出响应曲线

Fig.4 Detector output response curve

在探测器工作温度范围 0℃~45℃,探测目标温度范围 0℃~80℃,探测器输出响应的非线性误差在 1.3%~4.6%之间。

在探测器工作温度范围 0℃~45℃,对同一均匀温度黑体进行标定测量,输出响应在时域上较为稳定,存在一些随机噪声,通过平滑滤波后,可以消除噪声影响。在探测器工作温度 25℃,探测目标温度 20℃和 40℃,连续进行 1000 次图像数据采集,结果如图 5 所示。

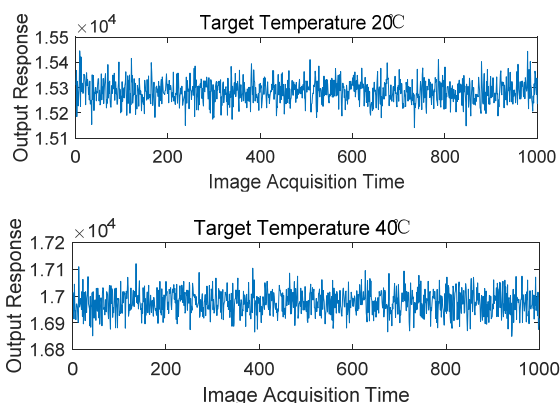


图5 探测器连续输出响应

Fig.5 Detector continuous output response

因此,本文使用的探测器,能够基本满足两点校正法应用的两个前提条件。

根据线性模型数据公式,两点校正的具体方法为:用一个高温黑体  $T_1$  和一个低温黑体  $T_2$  作为标定源,测量探测器敏感单元响应。

根据式(5)、(6),计算得到每个敏感单元的增益校正系数  $G_{ij}$  与偏移校正系数  $O_{ij}$ :

$$G_{ij} = \frac{X_{ij}^{T_1} + X_{ij}^{T_2}}{X_{ij}^{T_1} - X_{ij}^{T_2}} \quad (5)$$

$$O_{ij} = X_{ij}^{T_1} + G_{ij} X_{ij}^{T_2} \quad (6)$$

式中:  $X_{ij}^{T_1}$  和  $X_{ij}^{T_2}$  为敏感单元  $ij$  在高温  $T_1$  和低温  $T_2$  的响应值。  $X^{T_1}$  和  $X^{T_2}$  为探测器在高温  $T_1$  和低温  $T_2$  的响应均值。

根据式(7),进行实时非均匀校正:

$$Y_{ij} = G_{ij} \cdot X_{ij} + O_{ij} \quad (7)$$

式中:  $X_{ij}$  为探测器输出图像数据;  $Y_{ij}$  为非均匀校正后图像数据。

### 3.4 图像盲元处理

红外焦平面探测器在生产制备过程中,受半导体材料与制作工艺影响,有的敏感单元会存在响应率过高或过低的现象,称为盲元,使红外图像存在黑白噪点。在探测器使用过程中,受使用环境应力与器件自身寿命影响,盲元数量可能会增加。温度补偿和非均匀校正能够起到一定补偿效果,但无法完全消除盲元影响<sup>[7]</sup>。

盲元在红外图像中形成亮点或暗点,可能会对红外图像目标检测识别造成较大影响。

盲元或死像元可以通过线性插值法进行补偿替换。一般采用盲像元相邻的同一行或同一列的 2 个像素点,或者周围 9 个像素点数据,进行线性插值计算,用计算后的值对盲元替换。

本文采用的补偿方法是用盲元临近的九宫格,选择部分点进行线性插值计算,来替换盲像元的值。如图 6 所示,临近点像元相应位为 1 则表示使用该像素点,为 0 则表示不采用。如果盲元为边缘点,则在图像边界外的位置的值不会为 1。

|     |         |   |             |             |             |
|-----|---------|---|-------------|-------------|-------------|
| 128 | 1       | 2 | 0b1000 0000 | 0b0000 0001 | 0b0000 0010 |
| 64  | DeadPix | 4 | 0b0100 0000 | DeadPix     | 0b0000 0100 |
| 32  | 16      | 8 | 0b0010 0000 | 0b0001 0000 | 0b0000 1000 |

图6 盲元线性插值补偿

Fig.6 Blind element linear interpolation compensation

经过对盲元替换处理,有效避免盲元点对红外图像进行姿态解算带来的影响,提高了红外图像的质量,使探测器在长工作时间,红外图像能够保持较好的均匀性。



## 4 系统方案设计

### 4.1 系统设计

微型红外热电堆图像处理系统平台主要包含3路探测器, CPU 及其周边电路, FPGA 电路, 乒乓 SRAM 电路, EEPROM 电路, 接口通讯电路等组成。图 7 所示为原理框图, 图中箭头表示信号与数据流向。主要分为两大部分, 以 FPGA 为核心的图像数据接收与处理部分, 以 CPU 为核心的主流程控制与姿态结算部分, 在器件选型方面选择具有抗辐照指标的高可靠元器件。

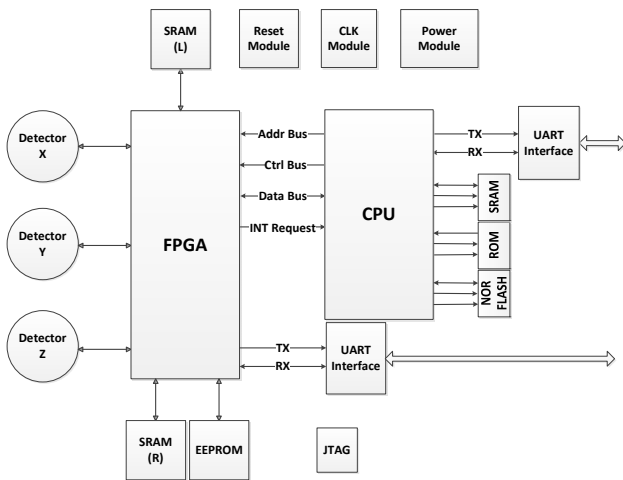


图 7 图像处理系统原理框图

Fig.7 Principle block diagram of image processing system

FPGA 主要完成三路探头数据接收, 原始红外数

据排序, 图像数据补偿, 非均匀校正, 盲元数据处理, 乒乓 SRAM 数据处理, 通讯控制等功能。

乒乓 SRAM 用来缓存图像接收、图像处理过程数据, 使图像数据处理与姿态结算流水同步操作。

EEPROM 用来存储补偿参数, 非均匀校正参数, 盲元处理参数, 操作指令等信息。关键参数与指令内部通过三取二冗余存储与校验, 实现容错处理功能。

CPU 主要完成图像梯度计算、地球边界分析、姿态计算、工作流程控制、通讯控制等功能。外围存储器包括数据存储器 SRAM、BOOT 程序存储器 ROM、扩展程序存储器 NOR Flash。

红外图像处理系统上电后, 进行硬件自检及资源初始化。按照控制周期, 实现对三路探头数据接收、图像数据预处理、图像信息解算等流水操作, 得到姿态信息<sup>[8]</sup>。

### 4.2 FPGA 设计

在图像处理系统中, FPGA 作为核心功能单元, 功能框图如图 8 所示, 图中箭头表示信号与数据流向。红外图像处理系统上电后, FPGA 对 3 路红外探测器完成初始化配置。按照控制指令, 接收探测器原始图像的灰度数据, 对图像数据按图幅进行数据排序, 并且乒乓缓存入 SRAM 中。

然后对图像数据进行流水处理, 完成图像数据温度补偿, 响应补偿, 非均匀校正, 盲元处理, 将处理好的图像数据再次缓存入乒乓 SRAM 中<sup>[9]</sup>。

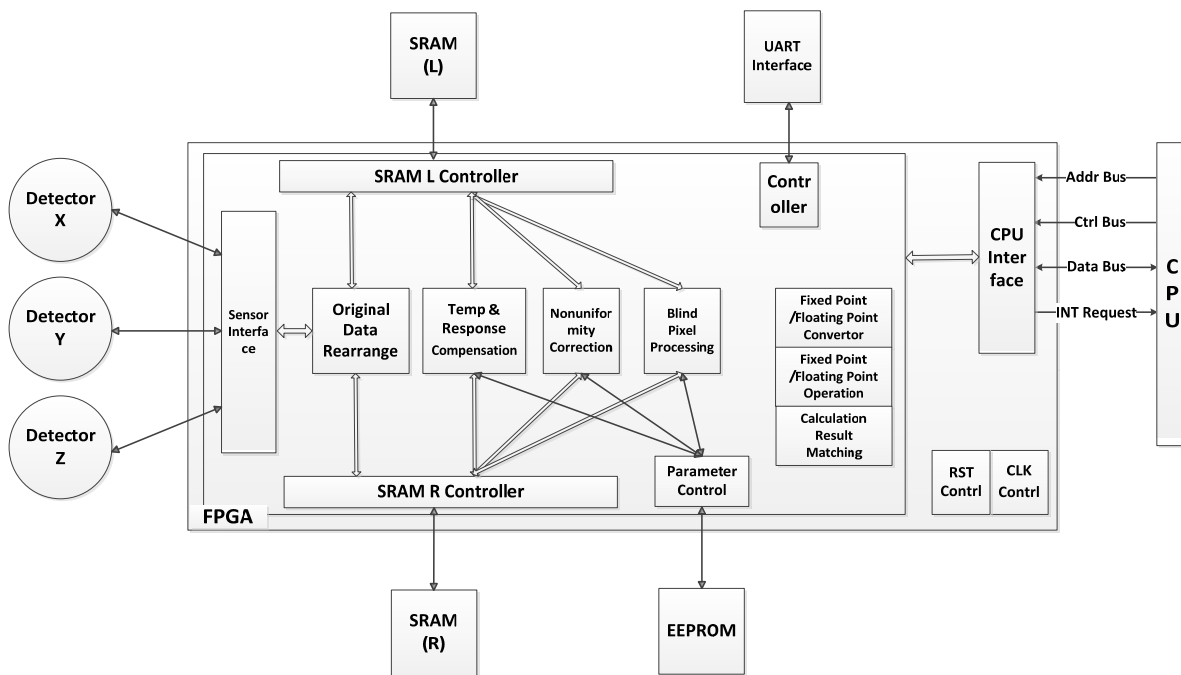


图 8 图像处理 FPGA 设计功能框图

Fig.8 Image processing FPGA design function block diagram

FPGA 内部集成定点转浮点处理单元、浮点数据四则运算单元、浮点转定点处理单元。从探测器输出图像数据为定点数据,先转换为浮点数据,进行数据处理后,再转换为定点数据。

数据处理过程与 MATLAB 计算结果按步骤依次比对,定点处理部分结果一致,浮点处理部分精度为小数点后两位(十进制下),基于 FPGA 图像数据处理符合设计要求。

在 FPGA 集成编译工具下,使用工具内嵌逻辑分析仪,对图像数据处理过程波形抓取。三路探头数据接收如图 9 所示,图像数据处理如图 10 所示。

### 5 实验结果与分析

为验证所设计的图像补偿算法、非均匀校正、盲

元处理能够满足空间应用需求,开展了红外成像实验。图 11 为实验室内成像,(a)为探测器输出原始数据图像,(b)为完成图像补偿和非均匀校正后图像,(c)为完成盲元处理后图像。从图中可以看出,(a)中图像非均匀性及噪声非常明显,基本无法辨认图像信息,(b)中图像在处理非均匀性大大降低,图像质量得到非常明显提升,(c)中图像的盲元黑点完成插值替换,消除对后期进行图像信息解算的影响。

图 12 为模拟探测器在空间中对地球辐射圆盘边界成像,(a)为探测器输出原始数据图像,(b)为完成图像补偿和非均匀校正后图像,(c)为完成盲元处理后图像。实验结果显示,红外探测器原始图像,经过图像处理,地球辐射圆盘边界能够清晰成像。

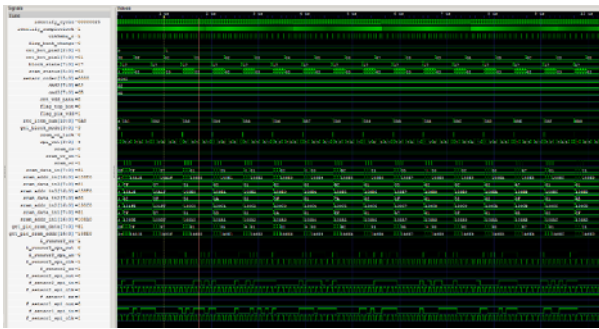


图 9 三路探测器数据接收

Fig.9 Three way detector data receiving

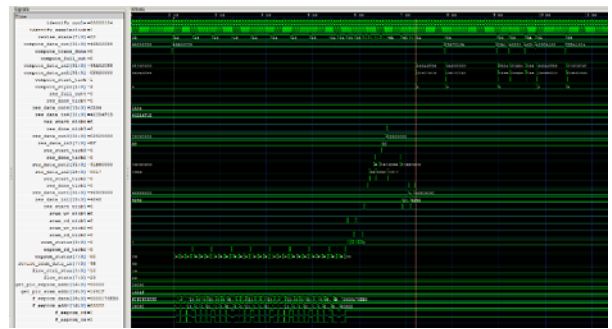
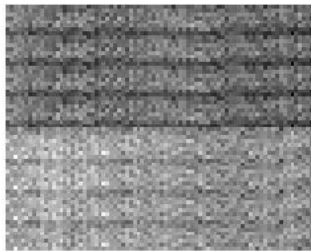
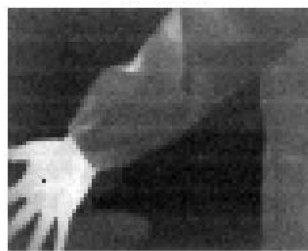


图 10 图像数据处理

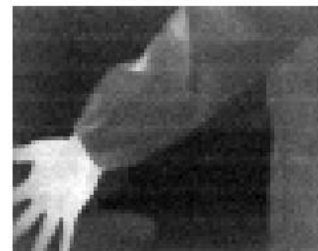
Fig.10 Image data processing



(a) 探测器输出原始图像



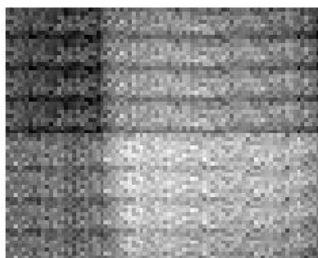
(b) 补偿与非均匀校正后图像



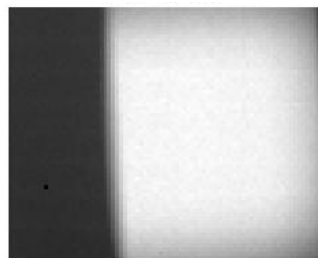
(c) 盲元处理后图像

(a)Detector output original image (b)Image after compensation and nonuniformity correction (c) Image after blind element processing

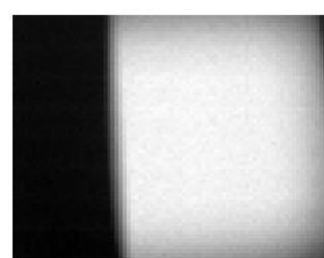
图 11 实验室内图像采集 Fig.11 Image acquisition in laboratory



(a) 探测器输出原始图像



(b) 补偿与非均匀校正后图像



(c) 盲元处理后图像

(a) Detector output original image (b)Image after compensation and nonuniformity correction (c) Image after blind element processing

图 12 模拟地球辐射圆盘边界图像

Fig.12 Simulating the boundary image of the earth's radiation disk

对完成补偿运算、非均匀校正、盲元处理的图像数据,进行非均匀性评估,非均匀性由公式(8)计算得到:

$$LUN = \frac{Y_{STD}}{\bar{Y}} \quad (8)$$

式中:  $Y_{STD}$  为像元输出响应标准差;  $\bar{Y}$  为像元输出响应均值。

在红外地球敏感器工作温度范围  $0^{\circ}\text{C} \sim 45^{\circ}\text{C}$ , 红外图像数据非均匀性在  $0.72\% \sim 1.43\%$  之间, 地球辐射圆盘成像边界清晰平滑, 能够进行姿态解算。

使用三路探测器图像数据,进行数据融合与姿态解算。通过图像数据点梯度计算,完成地球辐射圆盘边缘提取;求取边缘点的空间坐标映射,完成地球圆心位置提取。测试结果表明,姿态测量偏差小于  $0.2^{\circ}$ , 基于 FPGA 的微型红外热电堆探测器图像处理系统,能够应用于卫星姿态测量。

## 6 结论

提出了一种基于 FPGA 的微型红外热电堆探测器图像处理系统,对探测器的圆环效应、图像温度补偿、响应补偿、非均匀校正、盲元处理进行了研究。介绍了红外图像处理系统的方案设计、FPGA 设计,对最终的图像处理结果进行了分析,姿态测量偏差小于  $0.2^{\circ}$ 。表明基于 FPGA 的微型红外的热电堆探测器设计能够应用于卫星姿态测量,基于该系统设计的红外地球敏感器为全数字处理方案,体积、重量约为传统机械扫描式产品的  $1/3$ ,成本极大降低,满足小型化、低功耗、低成本需求,可以替代传统机械扫描式红外地球敏感器,具有广阔的应用前景。

## 参考文献:

[1] 刘科,梅志武,涂智军. 基于  $\text{VO}_x$  非致冷探测器的红外地球敏感器探讨[J]. 空间控制技术与应用, 2011, 37(3): 58-62.  
LIU Ke, MEI Zhiwu, TU Zhijun. Discussion on Uncooled  $\text{VO}_x$  Microbolometer-based infrared earth sensor[J]. *Aerospace Control and Application*, 2011, 37(3): 58-62.  
[2] 雷程. 双端梁 MEMS 热电堆红外探测器关键技术研究[D]. 太原: 中

北大学, 2016.  
CHENG Lei. Research on the Key Technologies of Double-end-beam based MEMS Thermopile IR Detector[D]. Taiyuan: North University of China, 2016.  
[3] Heimann Corp. HTPA80x64d Thermopile Array Infrared Detector Spec. Sheet [EB/OL]. [2019-03-12]. <http://www.heimansensor.com/index.php>.  
[4] 王彦斌, 陈前荣, 朱荣臻, 等. 光电探测器上多组圆环条纹的现象与机理[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(10): 1003004-1003004(6).  
WANG Yanbin, CHEN Qianrong, ZHU Rongzhen, et al. Phenomenon and mechanism of multi-group circular fringes on the optoelectric detector[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(10): 1003004-1003004(6).  
[5] 张秋旋, 王玮冰, 李佳. 基于补偿算法的红外探测器非均匀性校正[J]. 红外技术, 2017, 39(7): 621-625.  
ZHANG Qiuxuan, WANG Weibing, LI Jia. Non-uniformity correction of infrared detector based on compensation algorithm[J]. *Infrared Technology*, 2017, 39(7): 621-625.  
[6] 于海涛, 马金鹏, 范芸, 等. 红外成像系统响应光谱非均匀性的理论分析[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(2): 204002.  
YU Haitao, MA Jinpeng, FAN Yun, et al. Theory of nonuniformity related to spectrum response in IR imaging system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(2): 204002.  
[7] 詹维, 马新星, 徐子剑. 基于超像素分割的红外盲元检测及校正[J]. 红外技术, 2018, 40(11): 1085-1090.  
ZHAN Wei, MA Xinxing, XU Zijian. IR blind pixels detection and correction based on superpixel segmentation[J]. *Infrared Technology*, 2018, 40(11): 1085-1090.  
[8] 范斌, 于起峰. 一种基于 FPGA 的图像自动增强算法与实现[J]. 空间科学学报, 2018, 38(2): 261-270.  
FAN Bin, YU Qifeng. Design and implementation of an automatic image enhancement algorithm based on FPGA[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2018, 38(2): 261-270.  
[9] 刘源, 李庆, 梁艳菊. 基于 FPGA 的红外目标自动检测系统[J]. 红外技术, 2019, 41(6): 521-526.  
LIU Yuan, LI Qing, LIANG Yanju. Implementation of infrared target detection system based on FPGA[J]. *Infrared Technology*, 2019, 41(6): 521-526.