

文章编号: 1672-8785(2013)04-0007-07

一种微小型红外地平仪的系统设计

汤振华 郑伟波 崔文楠 张 涛

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘 要: 介绍了一种基于 FPGA 的红外地平仪系统的设计方案。该系统以非致冷型红外焦平面作为探测器, 以 FPGA 为主处理器, 采用双探头的方式探测地平圆。与传统的红外地平仪相比, 这种系统具有小型化和功耗低等特点, 适合于在微纳卫星平台上使用。

关键词: 非致冷红外焦平面; 地平仪; FPGA

中图分类号: TN219 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2013.04.002

A Design of Micro Infrared Horizon Sensor System

TANG Zhen-hua, ZHENG Wei-bo, CUI Wen-nan, ZHANG Tao

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: A FPGA-based infrared horizon sensor system is presented. In the system, an uncooled infrared focal plane array is used as the detector and a FPGA is used as the main processor. The infrared horizon circle image is acquired in a dual-probe mode. Compared with the traditional infrared horizon sensors, this system has the features of miniaturization and low power consumption. It is suitable for micronano satellite platforms.

Key words: uncooled infrared focal plane array; horizon sensor; FPGA

0 引言

作为红外探测系统的一种典型应用, 从 1960 年最早的空间飞行算起, 红外地平仪就是每一个地球轨道空间轨道飞行任务的基本仪器^[1], 同时也是各种卫星姿态控制系统的重要组成部分。红外地平仪是基于对地球(姿态参考源)的红外辐射敏感原理, 通过检测地球与太空之间的辐射过渡部分, 得到卫星相对于地球当地垂线的姿态偏移(即俯仰轴和滚动轴的姿态角)的。

红外地平仪可以分为扫描式(动态)和静态两种。其中, 扫描式地平仪主要用单元红外探测器扫过地平圆, 从而将按空间分布的地球辐射图像变换为按时间分布的近似方波, 然后用电

子学手段检测地球方波的宽度或相位, 计算出地平圆的位置, 从而确定两轴姿态^[2]。扫描式地平仪对探测器的要求较低, 但其必须配置转动部件, 重量和功耗都比较大, 并且容易引入噪声。

静态地平仪的工作方式类似于人眼, 它是一种基于焦平面技术的地球姿态敏感器。其思想是, 将探测元放在光学系统的焦平面上, 然后通过对投影在探测器焦平面上的地球红外图像进行处理, 提取地球的位置信息, 从而获得地平仪所在平台相对于地球的姿态信息^[3]。静态地平仪使用焦平面探测器, 通过电子扫描方式得到地平边界附近的辐射分布信号, 具有体积小、

收稿日期: 2013-03-28

作者简介: 汤振华(1988-), 男, 江苏丹阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为红外技术在地球敏感和姿态控制方面的应用。E-mail: sh500505@163.com

重量轻、功耗低、寿命长以及抗震动等优点,因而更适合作新一代小型卫星姿态敏感器,现已成为当前地平仪技术的主要发展方向。

为了满足卫星的发展需求,红外地平仪正在朝着小型化、智能化、高精度、高稳定性、低功耗和长寿命等方向发展。本文在微小型静态红外地平仪的应用背景下,设计了一种具有双探头的红外地平仪系统。该系统在保证精度的前提下,体积更小,功耗更低,因此适合在微纳卫星平台上使用。

1 系统设计

1.1 总体技术方案

随着非制冷型红外焦平面阵列图像传感器的日益成熟,在红外地平仪系统中采用低功耗的单芯片设计方案,同时结合非制冷红外焦平面技术,在单片 FPGA 器件上实现系统构成已经成为主流趋势^[4]。

如图 1 所示,本系统采用“小型红外光电组件+信息处理电路”的模式,包含两组独立的小

型红外光学系统和非制冷型红外探测器。其中,小型红外光电组件包括光学系统、探测器和前置电路。通过对这部分模块进行一体化设计,可以提高系统集成度,减小系统体积,降低整机功耗。后端处理电路以高精度 A/D 转换器和一片 FPGA 为核心构成。

与传统的红外地平仪相比,该地平仪具有以下特点:

(1) 体积小、重量轻。该地平仪采用 2 个红外探测窗口,其中每个探测窗口中配置 2 个红外探测阵列。单机只需 2 个红外光学系统,大大减小了单机重量,提高了系统集成度。同时,由于探测器采用了新材料,其探测灵敏度得到了提高,地球红外图像的信噪比也得到了改善,使红外光学系统的设计变得更加小型化,从而减小了系统的体积和重量。

(2) 可靠性高、寿命长。由于没有采用光学扫描机构,该系统的可靠性和寿命主要取决于设计所用的探测器和半导体集成电路等核心器

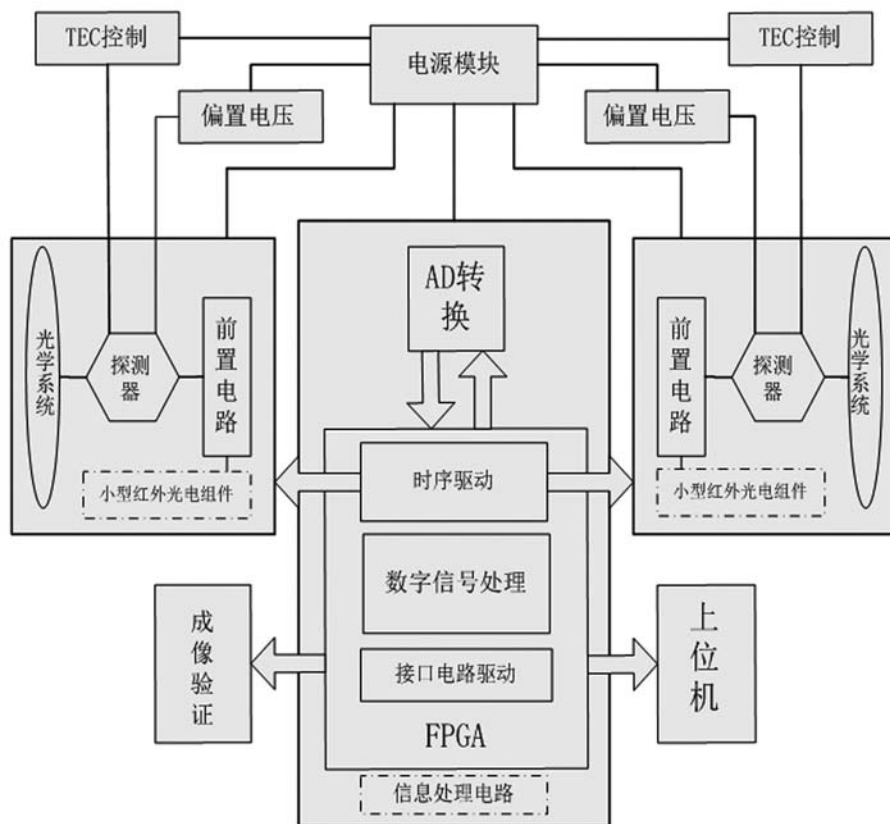


图 1 系统框图

件, 而此类器件恰恰具有较高的可靠性和较长的使用寿命。

1.2 工作原理

地球红外辐射通过光学系统在焦平面探测器上生成红外图像, 然后经红外探测器被转换为电信号, 并经前端信号放大电路放大后由 AD 转换为红外数字信号。用后端信息处理电路对该数字信号进行处理, 提取地平圆边界, 计算地平圆圆心位置, 最后得出卫星滚动与俯仰姿态偏差角。

如图 2 所示, 两个探测窗口分别指向地平圆

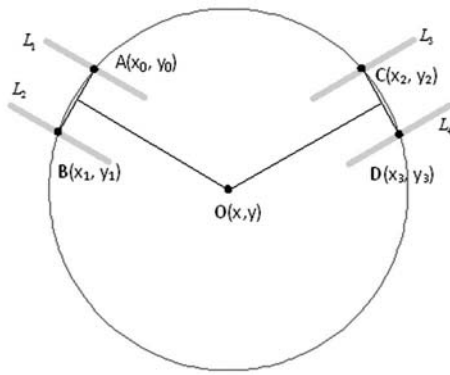


图 2 地平仪姿态测量原理的示意图

$$X = \frac{(y_1 - y_0)(x_3 - x_2)(x_3 + x_2) - (y_3 - y_2)(x_1 - x_0)(x_1 + x_0) + (y_3 + y_2 - y_1 - y_0)(y_3 - y_2)(y_1 - y_0)}{2[(y_1 - y_0)(x_3 - x_2) - (y_3 - y_2)(x_1 - x_0)]} \quad (3)$$

$$Y = \frac{(x_1 - x_0)(y_3 - y_2)(y_3 + y_2) - (x_3 - x_2)(y_1 - y_0)(y_1 + y_0) + (x_3 + x_2 - x_1 - x_0)(x_3 - x_2)(x_1 - x_0)}{2[(x_1 - x_0)(y_3 - y_2) - (x_3 - x_2)(y_1 - y_0)]} \quad (4)$$

通过以上推导可知, 只要能够准确测得地平圆在 4 个红外探测器上的边界点, 就可求得地平圆的圆心位置。在实际应用中, 只要知道 3 个地平圆边界点, 即可求得卫星的对地姿态, 而 4 个点则可提高测量精度, 并可作为可靠性冗余。在本系统方案中, 160 元红外探测器对应于 16° 视场角, 则瞬时视场为 0.1° 。在此分辨率的基础上, 通过数据算法处理可以保证 0.1° 的姿态测量精度。同时, 单个红外探测器对应 16° 视场角的设计, 能够保证 $\pm 8^\circ$ 的测角动态范围。

1.3 电子学设计

参照图 1, 电子学设计以探测器为核心展开, 主要包括供电电源与探测器偏置、探测器温度控制、模拟信号预放、模数转换和逻辑时序电

路的两个方向, 每个窗口含有两个探测阵列。通过检测 4 个方位上的地球红外辐射, 可以确定地平圆上所对应的 4 个点的位置, 计算地平圆圆心坐标, 得到卫星相对于地球当地垂线的姿态偏转, 即俯仰轴和滚动轴的姿态角。

假设 4 条非致冷型探测器分别为 $L_1 \sim L_4$, 地平圆在 4 个红外探测器上的边界点分别为 $A(x_0, y_0)$ 、 $B(x_1, y_1)$ 、 $C(x_2, y_2)$ 和 $D(x_3, y_3)$, 地平圆的圆心为 $O(X, Y)$ 。

图 2 中, 线段 AB 的斜率为 $k_1 = \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0}$, 线段 AB 的中点坐标为 $(\frac{x_1 + x_0}{2}, \frac{y_1 + y_0}{2})$, 则线段 AB 的垂直平分线方程为

$$y - \frac{y_1 + y_0}{2} = -\frac{x_1 - x_0}{y_1 - y_0} \left(x - \frac{x_1 + x_0}{2} \right) \quad (1)$$

同理可得线段 CD 的垂直平分线方程:

$$y - \frac{y_3 + y_2}{2} = -\frac{x_3 - x_2}{y_3 - y_2} \left(x - \frac{x_3 + x_2}{2} \right) \quad (2)$$

由式 (1) 和式 (2) 可以得出 AB 和 CD 的垂直平分线交点 $O(X, Y)$ 的坐标:

路等几部分。其中, 逻辑时序电路可以通过可编程逻辑器件 FPGA 设计实现, 其主要功能包括为探测器提供各种驱动信号、探测器增益控制、A/D 转换过程控制以及数字信号输出等。

根据系统方案, 在进行电路设计时, 每个探测器都有独立的温度控制电路、偏置电压电路和前置调理电路。在探测器的配置上, 使用单独的电源模块对探测器的偏置电压进行配置, 以保证探测器的精度。同时, 传统的温控控制电路所使用的 ADN8830 芯片内部只集成了用于误差比较和 PID 控制的精密运放, 需要外接用于产生高电流输出的功率 MOS 管 (见图 3(a)), 而本系统选用的集成温度控制 TEC 模块, 不仅体积更小 (见图 3(b)), 而且仅需 3 个电阻和 2 个电容

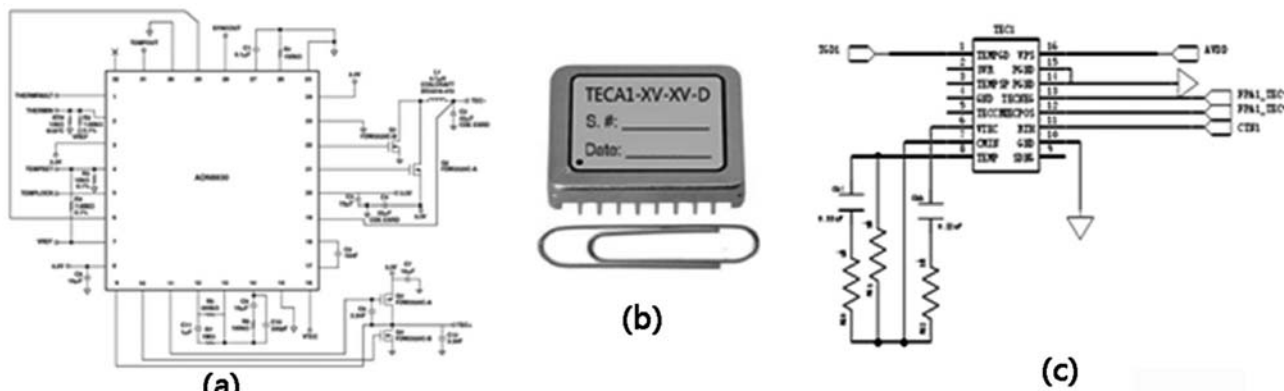


图 3 TEC 模块

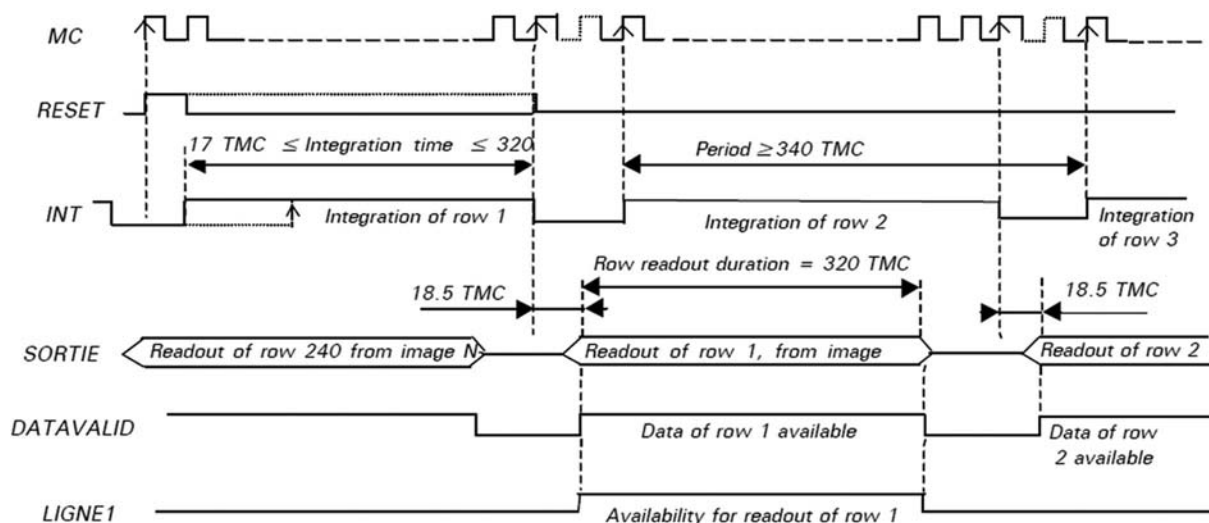


图 4 探测器的时序图

便可构建反馈电路(见图 3(c)), 因此大大减小了电路板的尺寸。

由于采用双探头模式, 我们用双路高精度 AD 同时独立地对两路信号进行数据采样和输出, 并通过 FPGA 对 AD 进行时序控制 and 数据处理。在探测器的模拟信号进入 AD 之前, 还应对应信号进行预处理。

探测器和 AD 的时序控制均由 FPGA 完成。为了减小功耗和体积, 我们仅选用一片 FPGA 作为处理器, 这就对 FPGA 的使用提出了更高的要求。在 FPGA 中, 我们除了完成对探测器与 AD 的时序控制 and 数据接收之外, 还要对数据进行预处理, 实现地平仪系统的基本功能, 完成与上位机的通信, 进行有效数据的输出。图 4 为探测器

的时序图。

1.4 光学系统设计

红外光学系统的透射率及成像质量在很大程度上会影响系统的信噪比。由于卫星平台对单机重量及体积的约束, 本系统采用的红外光学系统必须满足小型化、高透射率的要求。因为地平仪是一个能量系统, 而并非成像系统, 所以在实现小型化和高透射率的基础上, 对像质的要求可适当降低。

基于以上应用特点, 小型红外光学系统采用两片高次非球面透镜^[5]。与通常采用的 3 片球面镜的技术方案相比, 本方案减少了透镜数量, 减轻了系统重量, 减少了能量损耗, 提高了光学透过率。初步设计结果如下: 光学系统的外径为 D38 mm, 长度为 47.45 mm, 尺寸为 Φ50

mm×60 mm。图5所示为红外光学系统的系统构成。

对该光学系统进行仿真计算, 点图的仿真结果见图6。可以看出, 80%的能量全部集中在1个像元内。

图7所示为该光学系统的MTF仿真结果。可以看出, 在极限频率处, MTF大于80%。

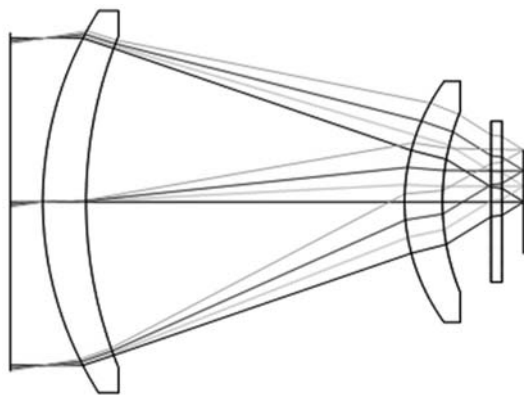


图5 红外光学系统的系统构成

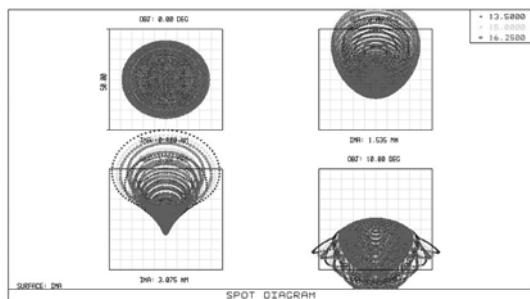


图6 点图仿真结果

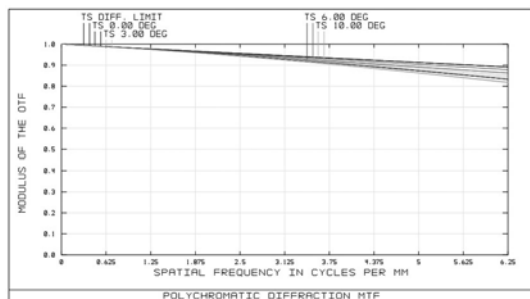


图7 MTF 仿真结果

下面根据文献[5]计算探测器输出的信噪比。

在简化的光学系统模型下, 有效辐射功率为

$$P_{det} = LA\Omega T \quad (5)$$

式中, L 为地球辐射率; A 为通光面积; Ω 为视场角; T 为光学透过率。

探测器输出的信噪比为

$$SNR = \frac{V_{si}}{V_{ni}} = \frac{P \cdot D_i^*}{\sqrt{A_d \Delta f}} \quad (6)$$

式中, A_d 为探测元的面积; Δf 为电子系统的带宽; $\Delta f=1$ kHz; D_i^* 为比探测率。

地球的平均辐射率为

$$L = 4.3 \times 10^{-4} \text{ (W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{Sr}^{-1})$$

假设滤光片通带范围内的透过率为100%, 经光学系统后实际接收的辐射率为

$$L' = L \cdot T(\lambda) = 2.85 \times 10^{-4} \text{ (W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{Sr}^{-1})$$

通光面积为

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 = 11.34 \text{ (cm}^2)$$

每线元有效面积所对应的视场角为

$$\Omega = \frac{0.08 \times 0.08}{f^2} = 2.84 \times 10^{-6} \text{ (Sr)}$$

故有效辐射功率为

$$P_{det} = L' A \Omega = 9.18 \times 10^{-9} \text{ (W)}$$

若探测器的比探测率为 $5.7 \times 10^8 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$, 则信噪比计算结果为 $SNR=20$ 。

2 测试结果

将系统输出经PCI采集卡与PC机相连, 然后进行功能测试。

通过分析成像结果, 我们认为图像上存在比较严重的固定噪声, 此时需要对原始数据进行去除固定噪声的操作。采用的方法是先得到不含目标的原始图像(环境背景), 其中白色像素点是探测器的盲元^[6]。将对目标成像所得图像减去背景图像, 即将各像素点数据减去相应的固定噪声数据, 从而实现去除固定噪声的作用, 其过程见图8。

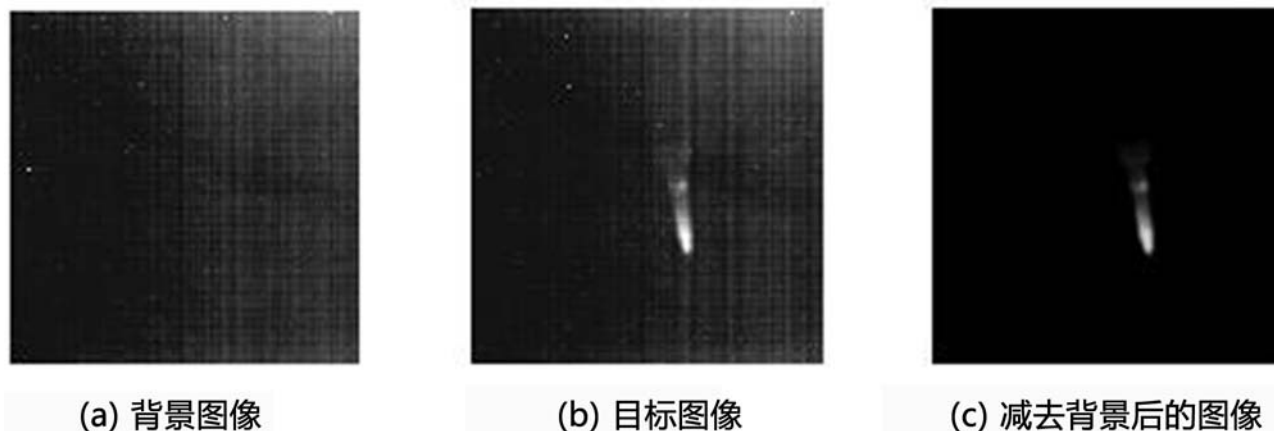


图 8 系统的成像功能验证

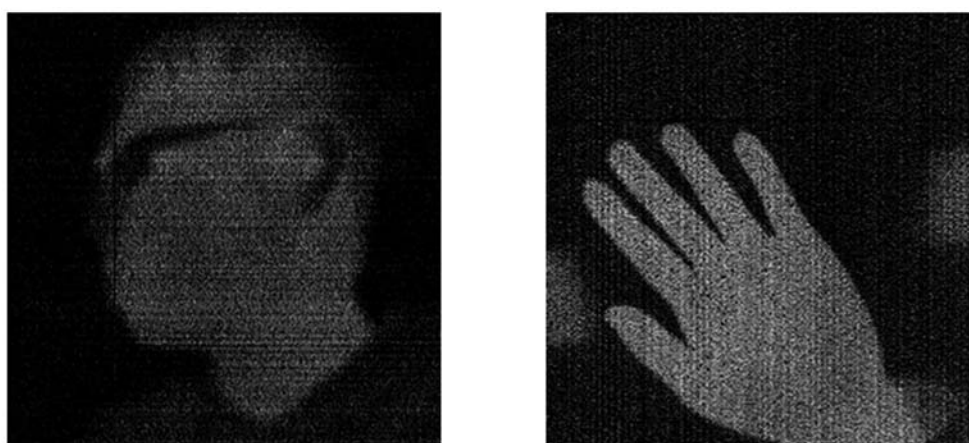


图 9 伪彩色成像

通过成像分析,可以得到以下结论:

(1) 系统的硬件平台工作正常,能够完成基本的成像功能。但是由于红外热图像表征的是目标温度分布,并且是灰度图像,其灰度值动态范围不大,人眼很难从这些灰度级中获得丰富的信息,所以图像立体感差,分辨率低。同时,红外图像的空间相关性不强,对比度低,视觉效果模糊^[6]。可以考虑在 PC 上通过伪彩色技术对红外图像进行增强处理,以改善视觉效果(见图 9)。

(2) 外界环境的随机干扰(如散粒噪声、 $1/f$ 噪声、热噪声和光子电子涨落噪声等^[7])会给红外图像带来多种多样的噪声。另外,电路设计导致的系统接地、隔离和屏蔽效果不佳,也会造成很大的影响。为了达到系统设计的精度要求,需要对硬件进行优化,特别是 PCB 板的设计和布

局。此外,软件算法的处理精度也是一个重要方面。

(3) 图像的固定空间噪声、串扰和畸变等是由于红外图像的非均匀性造成的,而探测器自身的非均匀性是造成红外图像非均匀性的主要原因。可以采用两点法进行非均匀性校正^[8]:结合探测器的工作温度范围,考虑将冰水的温度作为低温温度,将 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 热水的温度作为高温温度,采集高低两个温度的原始数据图像;假定探测器的响应是线性的,计算出增益校正系数和偏置校正系数,从而实现非均匀性校正。

在初步成像的基础上,对探测器输出进行放大增益,然后在上位机上对算法进行测试。图 10 为不同姿态下两个探头分别“看到”的地平圆图像。测试结果表明,模拟地球红外辐射在面阵探测器上所成的图像中有清晰的地球-太空

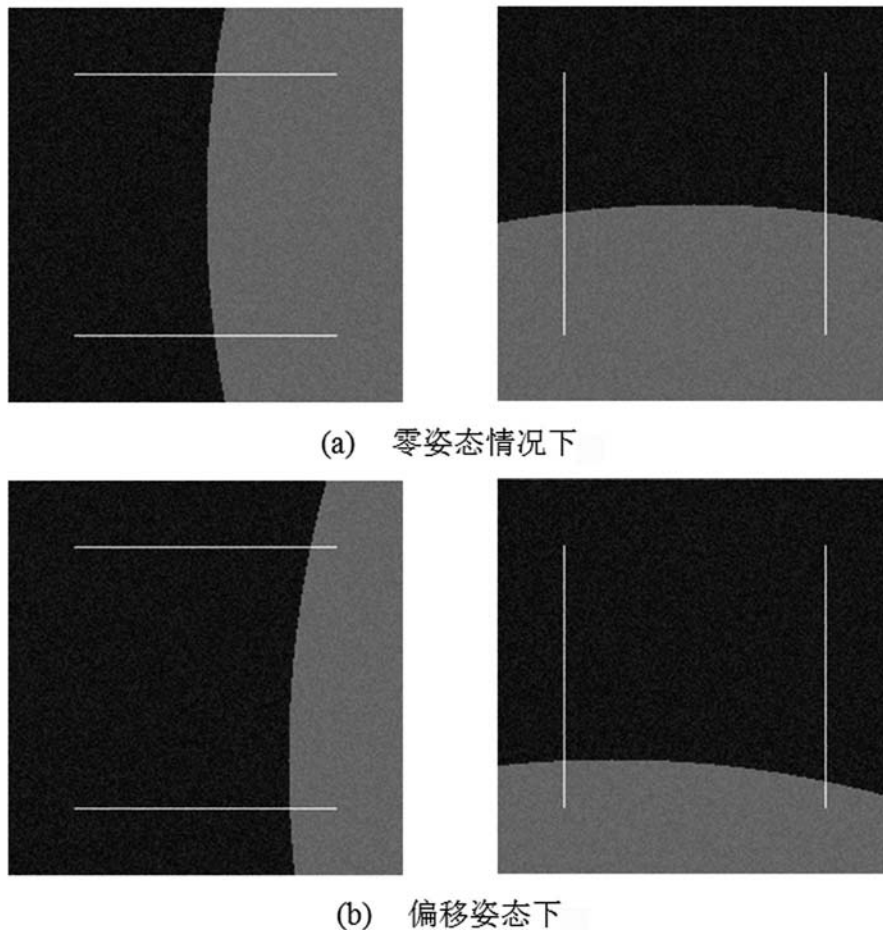


图 10 姿态解算验证

边界；取面阵图像中的两行数据模拟线列探测器，通过对边界进行判别，提取穿越点，获得圆心的位置。当姿态产生偏差时，地球-太空边界在探测器上的边界点的位置会发生改变，如图 10(b) 所示。通过检测边界点的位置变化，可以

求出对应地平圆圆心的坐标，从而得到偏移的姿态信息。图 11 所示为测试结果，该结果验证了算法的基本功能。偏移 5° 以内的最大误差为 0.3° ，精度仍然不够，还需要进一步完善和改进。

3 结束语

针对地平仪系统的特殊需要，对探测器布局、电子学部分以及光学系统进行了专门设计，使其具有体积小、速度快、工作稳定和功耗低等特点。在面阵探测器正常工作时，其功耗小于 1.5 W，具有良好的性能，基本达到设计期望，因而具有良好的应用前景。然而目前仍然存在硬件设计布局对模拟信号影响较大和姿态输出结果精度不够等问题，还需要我们在硬件优化和软件改进上展开进一步的工作。

(下转第 42 页)

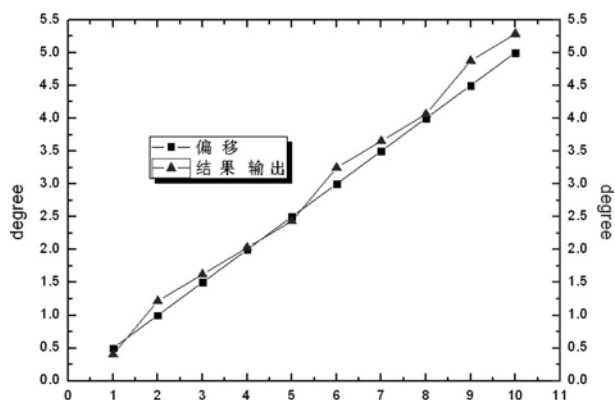


图 11 软件测试结果