

小行星探测用双谱段相机设计

王峰, 杨波, 胡存明, 吴昊, 费晓星

(上海航天控制技术研究所, 上海 200233)

摘要:基于 DSP+FPGA 架构,采用全透式光学系统及非制冷红外探测器和 CMOS 探测器,设计并实现了一种轻小型双谱段相机。该相机同时具备红外和可见光成像能力,可作为小行星探测用光学敏感器的原型机,也可作为微小卫星的光学载荷。首先,建立了双谱段相机的技术指标体系;其次,论述了相机的组成和基本工作原理;再次,详细阐述了相机的光学系统和电子学设计;最后,介绍了原理样机的研制情况。

关键词: 小行星探测; 多光谱; 相机; 非制冷红外

中图分类号: V44 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-7777(2015)02-0174-06

DOI:10.15982/j.issn.2095-7777.2015.02.012

0 引言

随着深空探测技术的发展,小行星探测已成为 21 世纪深空探测的重要内容之一。小行星探测不仅有助于揭开太阳系和生命的起源、演化之谜,而且可促进地球防护、空间科学和空间技术应用的发展,能为更远的深空探测关键技术提供验证^[1]。

光学相机和光电传感器成像分辨率高、探测距离远、测量精度高,是小行星探测不可或缺的手段。2012 年 12 月 13 日,“嫦娥 2 号”卫星在和图塔蒂斯小行星交会时,利用星载监视相机对小行星进行了光学成像,实现国际上首次对该小行星的近距离成像。美国的“深空 1 号”和“星尘”,欧空局的“罗塞塔”和日本的“隼鸟”均配置有光学成像敏感器,以提高导航精度^[2]。

可见光相机分辨率高、技术成熟,但受光照影响,不能工作于阴影区。红外相机敏感目标为热辐射,不受光照条件影响,但分辨率和探测能力均低于可见光相机。本文设计的双谱段相机集可见光成像和红外成像于一体,可实现全天时工作,相比于其他星载多光谱相机,具有体积小、重量轻和功耗低等优点。在扩展相机使用范围的同时,还可以互为备份,提高产品可靠性。

1 技术指标

1.1 整机

双谱段相机整机的技术指标如下:

- 1) 功耗:不大于 9.0 W
- 2) 重量:不大于 900 g
- 3) 供电:4.8~5.5 V
- 4) 数据输出接口:LVDS
- 5) 数据输出码速率:不小于 1M bps
- 6) 数据压缩格式:JPEG 2000 和 H.264
- 7) 工作温度:-15~+50 °C
- 8) 储存温度:-40~+60 °C

1.2 红外谱段

双谱段相机红外谱段技术指标如下:

- 1) 光谱范围:8~13 μm
- 2) 视场角:50°(对角线全角)
- 3) 成像距离:3 m~∞
- 4) 成像分辨率:640×480(照相和摄像)
- 5) 帧频:不小于 10 fps
- 6) 量化位数:不小于 8 bits
- 7) NETD:不大于 120 mK

1.3 可见光谱段

双谱段相机可见光谱段技术指标如下:

- 1) 光谱范围:400~700 nm
- 2) 颜色:RGB 彩色成像
- 3) 视场角:50°(对角线全角)
- 4) 成像距离:2 m~∞
- 5) 成像分辨率:2 048×2 048(照相),1 280×720(摄像)
- 6) 帧频:不小于 10 fps

- 7) 量化位数: 不小于 8 bits
- 8) 水平清晰度: 不小于 1 200 LW/PH(照相); 不小于 800 LW/PH(摄像)
- 9) 视频信噪比: 不小于 40 dB
- 10) 成像照度范围: 10~100 000 Lux
- 11) 曝光模式: 自动
- 12) 白平衡: 自动

- 1) 光学系统
将监视目标聚焦于光电探测器上, 包括可见光、红外光学系统和内遮光罩等。
- 2) 结构组件
支撑光学系统和电路板的骨架, 分为上盖板和下壳体。
- 3) 电子学模块
完成图像采集、信息处理和对外电接口等功能。
- 4) 软件模块
配合电子学模块完成探测器及外围芯片的驱动、图像采集、信息处理和数据输出等。

2 组成与工作原理

2.1 组成

图 1 为双谱段相机的组成剖视图。相机由光学系统、结构组件、电子学模块和软件模块等组成。

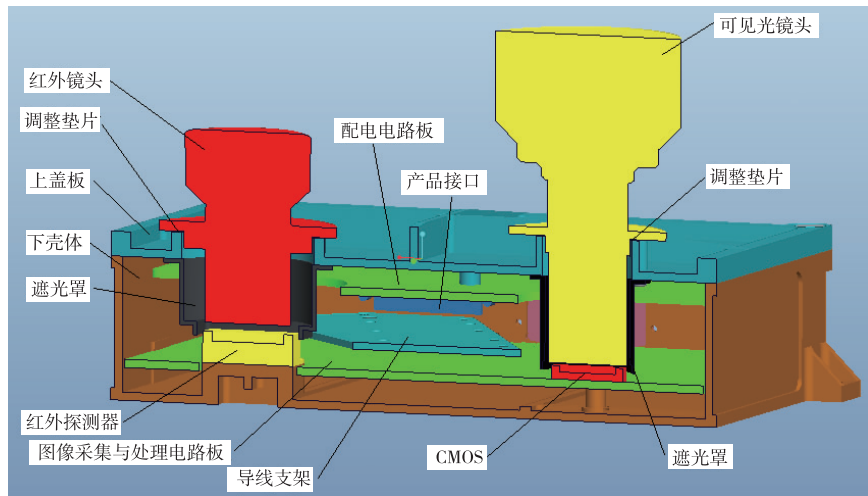


图 1 双谱段监视相机的组成
Fig. 1 Components of double spectrum camera

2.2 工作原理

如图 2 所示, 双谱段相机的工作原理与普通相

机基本一致: 目标经红外和可见光光学系统分别聚焦于红外和 CMOS 型可见光探测器上进行光电转

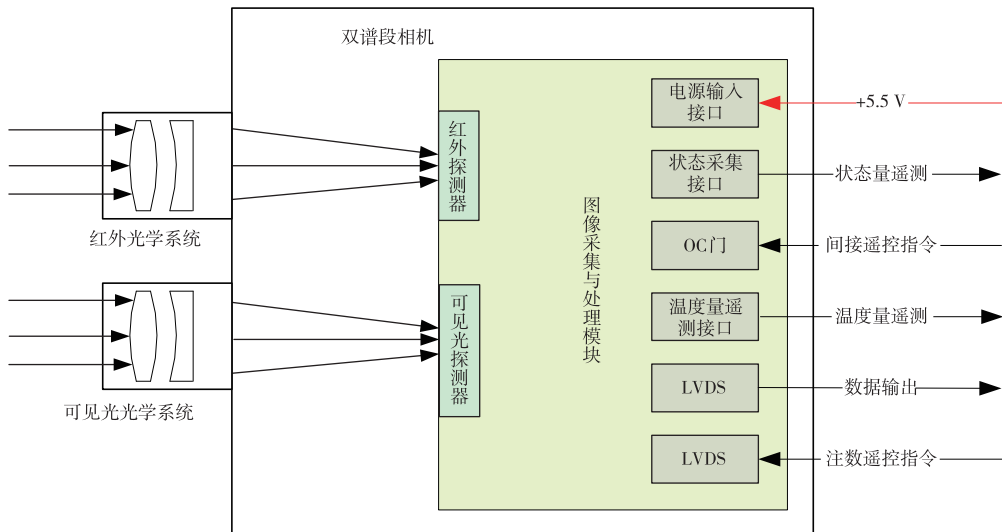


图 2 原理框图
Fig. 2 Principle chart

换;在图像采集电路的配合下,将光信息变换为数字图像;相机内部的信息处理电路对图像进行相应的处理后,将数字图像输出至上级系统。

上级系统可通过注数遥控指令(LVDS)和间接遥控指令(OC 门)控制或切换相机的工作模式。双谱段相机通过模拟量形式输出温度和状态信息。

3 光学系统设计

3.1 红外光学系统设计

红外光学系统的主要设计参数为:

- 1) 波段: $8 \sim 13 \mu\text{m}$ (中心波长: $10.5 \mu\text{m}$)
- 2) 探测器有效像元数: 640×480
- 3) 探测器像元尺寸: $25 \mu\text{m}$
- 4) 视场(2ω): $\Phi 50^\circ$
- 5) 焦距: 21.4 mm
- 6) 入瞳直径: $\Phi 15 \text{ mm}$
- 7) F 数: 1.427
- 8) 光学系统总重: 90 g

由于入瞳直径不大,而且视场较大,系统适宜采用透射式方案。对光学系统进行了无热设计,镜筒采用钛合金,保证光学系统在 $-15 \sim +50^\circ\text{C}$ 温度区

间成像质量基本保持不变。

如图 3 所示,整个光学系统共 5 片透镜,第一片透镜的通光口径最大,为 $\Phi 27.9 \text{ mm}$ 。从光学系统第一面到最后一面的总长为 49.2 mm ,后工作距离为 1.3 mm ,总长为 50.5 mm 。

由图 4 所示的传函曲线可以看出:常温情况下红外光学系统在乃奎斯特频率处 (20 lp/mm) 的全视场传函均大于 0.4。

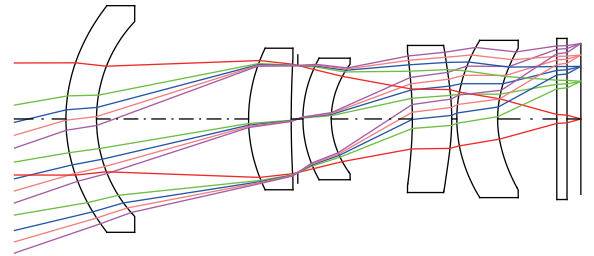


图 3 红外光学系统结构图

Fig. 3 Layout of infrared optical system

3.2 可见光光学系统设计

红外光学系统的主要设计参数为

- 1) 波段: $400 \sim 700 \text{ nm}$
- 2) 探测器有效像元数: 2048×2048

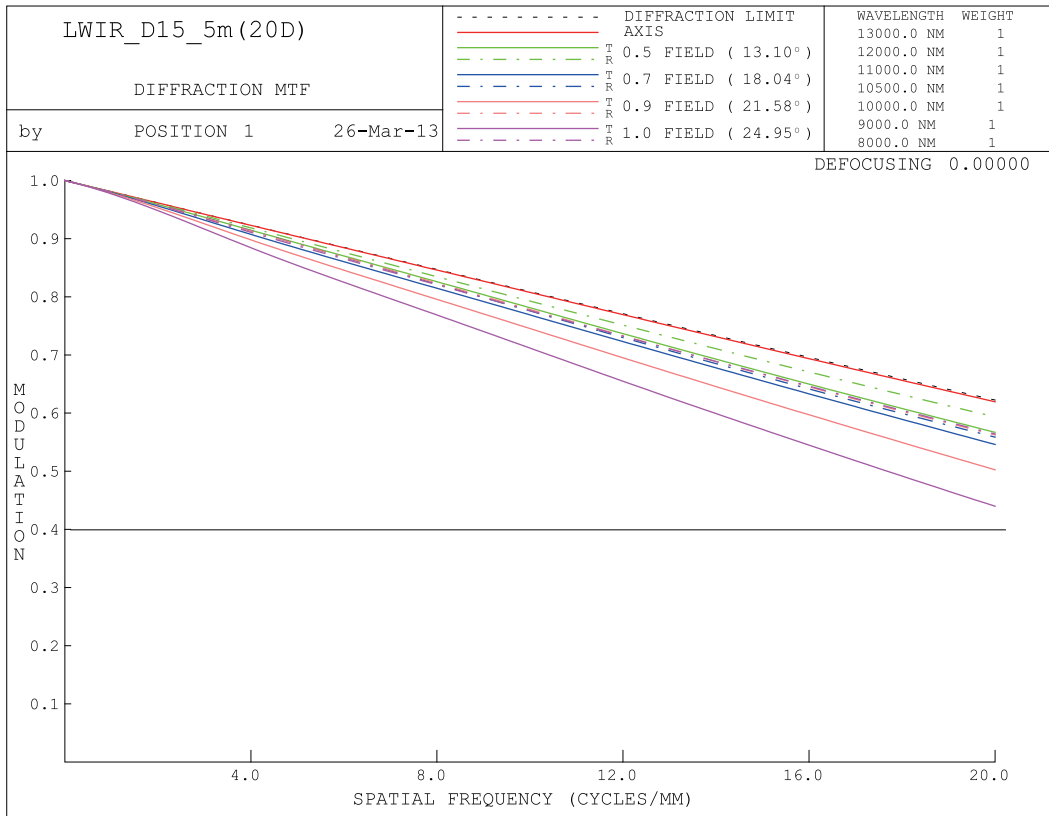


图 4 红外光学系统传递函数曲线

Fig. 4 MTF curves of infrared optical system

- 3) 探测器像元尺寸: $5.5 \mu\text{m}$
- 4) 视场(2ω): $\Phi 50^\circ$
- 5) 焦距: 17 mm
- 6) 入瞳直径: 3.4 mm
- 7) F 数: 5.0
- 8) 光学系统总重: 80 g

采用透射式方案。由于光学系统工作在空间环境中,所有透镜均选用耐辐射玻璃材料。对光学系统进行了无热设计,镜筒采用钛合金,保证光学系统在 $-15 \sim +50^\circ\text{C}$ 温度区间成像质量基本保持不变。

如图 5 所示,整个光学系统共 9 片透镜,从光学系统第一面到最后一面的筒长为 47.2 mm,后工作距离为 3 mm,总长(第一面中心到像面)为

50.2 mm。

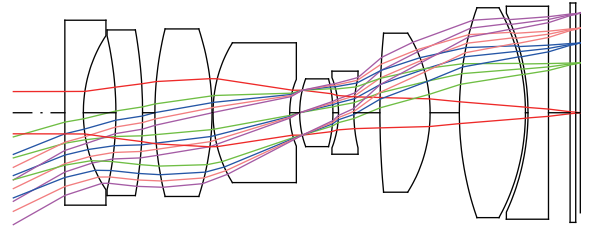


图 5 可见光光学系统结构图
Fig. 5 Layout of visible optical system

由图 6 所示的传递函数曲线可以看出:常温情况下可见光光学系统在乃奎斯特频率处(90 lp/mm)的全视场传函均大于 0.4,中心视场传函值大于 0.5。

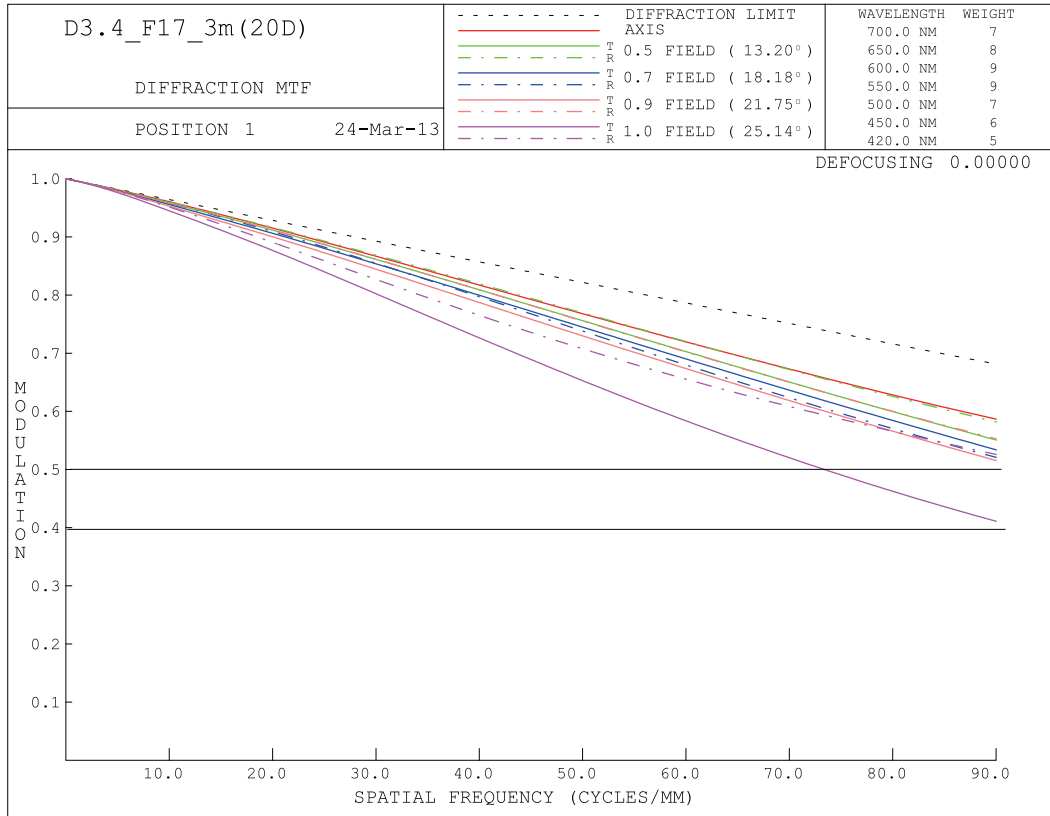


图 6 可见光光学系统传递函数曲线
Fig. 6 MTF curves of visible optical system

4 电子学设计

如图 7 所示,双谱段相机采用 DSP+FPGA 架构。其中,DSP 作为主处理器完成相机的信息处理算法;FPGA 作为协处理器完成探测器驱动、接口控制和并行处理算法。

选用了 TMS320C6678A CYPA25 型 DSP。该

芯片是 TI 公司推出的多核器件,能够满足双谱段相机的高分辨率、高帧频实时处理要求。

FPGA 方面,选用了 Actel 公司的 300 万门 A3PE3000-1FG 896I 系列 FPGA。该器件基于 Flash 架构,可靠性高,广泛应用于各类空间产品。

可见光探测器选用 Cmosis 公司生产的 CMOS 探测器 CMV4000-2E5C1PP,图 8 为其实物图,主要

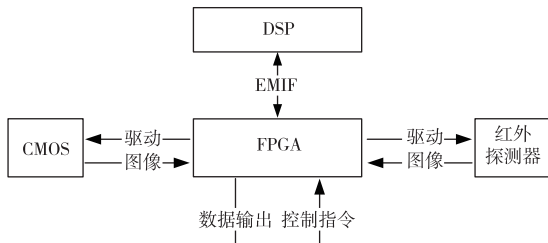


图 7 双谱段相机电子学框图

Fig. 7 Electronics chart of double spectrum camera

技术指标和特点如表 1 所示^[3]。

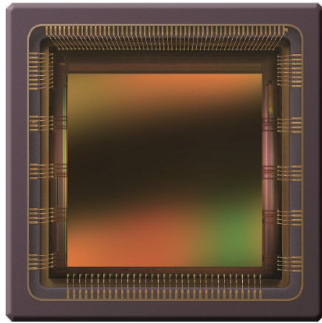


图 8 探测器实物图

Fig. 8 CMV4000 sensor

表 1 CMV4000 探测器性能指标

Table 1 The technique index of CMV4000

序号	指标	参数
01	面阵	2 048×2 048
02	像元尺寸	5.5×5.5 μm ²
03	势阱深度	13.5 Ke ⁻
04	转换增益	0.075 LSB/e ⁻ (10 bit mode)
05	灵敏度	4.64 V/lux. s
06	随机噪声	13e ⁻ (RMS)
07	动态范围	60 dB
08	暗电流	125 LSB/s
09	帧频	180 Frames/s (10bit mode)
10	温度范围	-30~+70 ℃
11	功耗	600 mW

红外探测器选用 ULIS 公司的非制冷长红外焦平面探测器 UL04171,图 9 为其实物图,主要技术

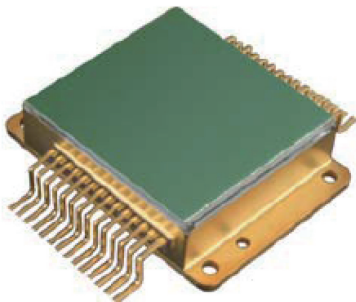


图 9 UL04171 探测器实物图

Fig. 9 UL04171 Sensor

指标和特点如表 2 所示^[4]。该红外探测器不带制冷装置,具有体积小、功耗低、可靠性高等优点,非常适合空间应用。

表 2 UL04171 非制冷红外探测器性能指标

Table 2 The technique index of UL04171

序号	指标	参数
01	面阵	640×480
02	像元尺寸	25×25 μm ²
03	材料	多晶硅
04	波段	8~14 μm
05	响应率	>4 mV/K@30℃
06	NETD	<120 mK

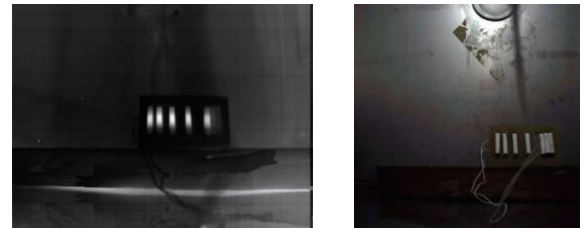
5 样机研制情况

如图 10 所示,完成了双谱段相机原理样机的研制。经过初步测试分析,各项技术指标均可达到要求。图 11 为相机的红外谱段和可见光谱段对窗外同一目标拍摄的图像。



图 10 双谱段相机实物图

Fig. 10 Double spectrum camera



(a) 红外图像

(b) 可见光图像

图 11 双谱段相机拍摄的图像

Fig. 11 Images shot by double spectrum camera

6 结论

本文设计并实现了一种同时具备可见光和红外成像能力的轻小型双谱段相机,为小行星探测光学

敏传感器或小型光学载荷的研制奠定了工程基础。

下阶段将开展真空热试验、力学环境试验和抗总剂量辐射等试验,以考核相机的空间适应性。

参 考 文 献

- [1] 朱恩涌,孙国江,果琳丽,等.我国小行星探测发展思路及关键技术探讨[J].航天器工程,2012,21(3):96-100. [Zhu E Y, Sun G J, Guo L L, et al. Study on developmeng idea of Chinese asteroid exploration and key technologies [J]. Spacecraft Engineering, 2012,21(3):96-100.]
- [2] 王大轶,黄翔宇.深空探测自主导航与控制技术综述[J].空间控制技术与应用,2009,35(3):6-12. [Wang D Y, Huang X

Y. Survey of autonomous navigation and control for deep space exploration[J]. Aerospace Control and Application, 2009,35(3):6-12.]

[3] Datasheet of CMV4000, CMOSIS[Z]. [S.l.]: [s.n.], 2011.

[4] Datasheet of UL04171, ULIS[Z]. [S.l.]: [s.n.], 2012.

作者简介:

王峰(1985—),男,工程师,主要研究方向:空间光电传感器设计。

通信地址:上海市徐汇区宜山路710号(200233)

电话:(021)64362711-2235

E-mail:royalwind@sina.com

Double Spectrum Camera Designed for Asteroid Detecting

WANG Feng, YANG Bo, HU Cunming, WU Hao, FEI Xiaoxing

(Shanghai Institute of Spaceflight Control Technology, Shanghai 200233, China)

Abstract: Based on DSP+FPGA configuration, a small and light-weight double spectrum camera is designed by adopting absolute perspective optics system, uncooled infrared sensor and CMOS sensor. It images both by infrared and visible light, can be used as prototype of optics sensor for asteroid detecting. It also can be used as optics payload of small satellites. This paper sets up the technique index system of double spectrum camera, discusses its components and working principle, expatiates its optics system and electronic design, and introduces the research overview of the prototype.

Key words: asteroid detecting; multi-spectrum; camera; uncooled infrared

[责任编辑:宋宏]