

红外高光谱成像仪的系统测试标定与飞行验证

王建宇*, 李春来, 吕刚, 袁立银, 王跃明, 金健, 陈小文, 谢峰
(中国科学院上海技术物理研究所 空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083)

摘要: 红外谱段是高光谱遥感中非常有用的波段, 由于红外波段的能量小、焦平面探测器研制难、红外背景辐射大等原因, 红外谱段的高光谱成像系统并不常见, 目前仍然处于仪器发展阶段. 本文介绍了一台机载热红外高光谱成像仪, 它在 8.0~12.5 μm 的光谱范围内可得到 180 个波段的光谱信息, 光谱分辨率优于 44 nm, 光谱定标精度优于 1 nm. 仪器观测总视场 14°, 空间分辨率优于 1 mrad, 噪声等效温差优于 0.2 K@300 K(平均). 仪器于 2015 年 5 月开展了实验室辐射标定和光谱标定, 并于 2015 年 6 月在中国浙江舟山开展了飞行试验, 获取了指定区域的红外高光谱图像, 处理结果表明红外高光谱数据立方体可以有效地反演地表温度和地表辐射率, 反演的发射率曲线可以用于地物识别.

关键词: 红外高光谱成像; 低温光学; 光谱分辨率; 焦平面组件; 光谱定标
中图分类号: TN215 **文献标识码:** A

The calibration of an infrared hyperspectral imager and its flight test validation in laboratory

WANG Jian-Yu*, LI Chun-Lai, LV Gang, YUAN Li-Yin, WANG Yue-Ming,
JIN Jian, CHEN Xiao-Wen, XIE Feng
(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences,

Key Laboratory of Space Active Optoelectronic Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: Infrared spectrum is very useful in the field of hyperspectral remote sensing. Because of the weak energy of infrared spectrum, the difficulty of the development of infrared focal plane, and the strong background, the development of the Infrared Hyperspectral Imaging System is very difficult. So far, the field is still in the laboratory research stage. This paper presents an airborne infrared hyperspectral imager. It can acquire 180 wavebands in the range of 8.0~12.5 μm . The spectral resolution of this imager is better than 44 nm and the absolute spectral calibration accuracy is better than 1 nm. The field of view of this imager is about 14° and the spatial resolution is better than 1 mrad. Its noise equivalent temperature difference (NETD) is less than 0.2 K@300 K. The imager was carried out in Zhoushan, Zhejiang, China in June 2015. Analysis shows that the infrared hyperspectral image data can play an important role in the field of surface emissivity inversion and geological mineral recognition.

Key words: infrared hyperspectral imager, cryogenic optics, spectral resolution, FPA array, spectral resolution

PACS: 95.55Fw

引言

相对可见光和短波红外, 在红外波段进行高光

谱遥感具有独特的优势, 受深低温光学工程实施、面阵红外焦平面组件与红外精细分光等关键技术发展限制^[1], 相关仪器的发展和应用在国内一直比较缓

收稿日期: 2016-03-04, 修回日期: 2016-08-06
基金项目: 863 计划(2012AA121102)

Received date: 2016-03-04, revised date: 2016-08-06

Foundation items: Supported by the National High-tech R&D Program of China (863 Program)(2012AA121102)

作者简介 (Biography): 王建宇(1959-), 男, 浙江宁波人, 博士, 研究员, 中国科学院空间主动光电技术重点实验室主任, 主要研究方向为空间红外光电系统、空间激光探测系统等.

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: jywang@mail.sitp.ac.cn

慢,“十二五”期间,在国家 863 计划重点项目的支持下,上海技术物研究所研制了成功我国第一代机载红外高光谱成像仪(以下简称样机),经测试其性能指标与 JPL 实验室发展的 QWEST 设备^[2]相当,样机开展了飞行验证,取得了较好的效果.本文介绍了样机的组成原理、部分性能测试结果、实验室的光谱标定以及舟山飞行试验情况,还介绍了样机部分关键组部件的检测和性能评估情况.

1 红外高光谱成像仪的原理

红外高光谱成像仪和传统的成像光谱仪原理一样,主要是获取目标在指定波段的精细光谱信息,从而进行物质探测和识别,特点是其工作在红外波段(主要指大气窗口的 $8.0 \sim 12.5 \mu\text{m}$ 红外波段).仪器装载在航天或者航空平台上,分光后光学视场对应地面的一个条带地物信息,仪器通过平台的运动获取目标红外高光谱图像数据立方体.一般而言,仪器由望远镜、分光系统、红外焦平面探测器和电子学等构成.与可见、短波红外谱段相比,红外高光谱成像系统的研制需要考虑背景辐射的影响,这种辐射是指探测器接收的来自于目标以外的辐射,主要是仪器光学机械等部件自身的热辐射,背景辐射的存在会严重影响系统的探测灵敏度^[4].为减少背景辐射影响,红外高光谱成像仪的光机一般工作较低温度.这样就需要重点研究红外精细分光、仪器机械结构等部件的低温性能,然后在此基础上设计如何对光路结构等部件进行制冷.关于这些分析,可以参考以往文献资料^[3].

2 系统设计与关键技术突破

样机是在国内首次开展类似系统的工程研制,其设计指标结合任务书要求,并充分考虑了国际技术水平,其总体指标设计和实现指标如下表所示:

表 1 热红外高光谱成像仪样机实现的技术指标
Table 1 The technical index of the infrared hyperspectral imager

名称	设计指标	实现指标
光谱分辨率	优于 50 nm	平均 44.20 nm($8.0 \sim 12.5 \mu\text{m}$ 平均)
光谱范围	$8.0 \sim 10.5 \mu\text{m}$	$8.0 \sim 12.5 \mu\text{m}$
波段数	64 ~ 128	180 个波段@ ($8.0 \sim 12.5 \mu\text{m}$)
量化位数	14 bits	14 bits
瞬时视场	1 mrad	1 mrad
总视场	大于 13°	14.5°
NE Δ T	0.2 K@ 300 K ($8.0 \sim 10.5 \mu\text{m}$ 平均)	$8.0 \sim 10.5 \mu\text{m}$, 100 个波段的平均 80 mK; $8.0 \sim 12.5 \mu\text{m}$, 180 个波段的平均 337 mK;

样机采用了“推扫成像 + 延伸波长焦平面组件 + 色散型分光 + 低温光学 + 机上实时定标”的技术路线,设计的关键是低温光学的工程实施、红外精细分光部件和焦平面组件的耦合.样机由航空支架、低温冷箱、制冷系统、电子学箱、POS 平台、定标机构及遮光筒等组成,低温冷箱与支架隔热安装,电子机箱与支架导热安装.图 1 给出了样机的实物照片.

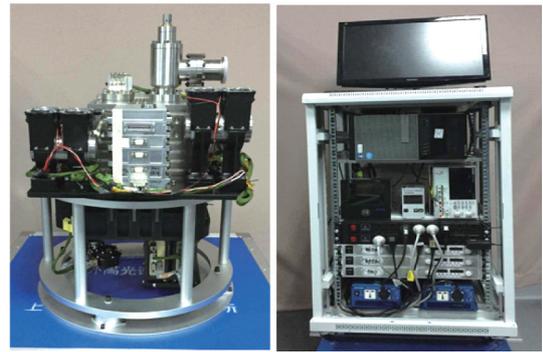


图 1 红外高光谱成像仪样机头部和控制机柜
Fig. 1 Instrument head and control cabinet of infrared hyperspectral imager

样机按照飞行速高比 $0.02 \sim 0.04$ 设计,成像帧频设置为 $20 \sim 160 \text{ Hz}$.低温光学系统用于背景抑制,对狭缝、光谱仪、焦平面部件进行整体制冷,制冷温度为 100 K.样机的主望远镜安装在冷箱外部,工作于室温.作为机载设备,飞行不同高度的环境温度差异较大,为此样机也设计了机上定标装置以保证系统的定量化反演水平.

为保证样机定量化水平与探测灵敏度的实现,设计保证了以下三点:(1)、低温冷箱内的各类部件温度稳定度控制在 $\pm 1 \text{ K}$ 以内;(2)、低温冷箱内的红外焦平面探测器工作 60 K,温度稳定度优于 $\pm 0.5 \text{ K}$;(3)、样机采集图像前、采集图像过程中和采集图像后均需启动定标组件完成一次全路径的机上辐射定标.

2.1 红外精细分光设计与实现

样机的光学系统包括主望远镜和红外光谱仪两部分,望远镜采用三片式物镜结构,三片透镜材料均为铍,最后一块为和低温冷箱接口的窗口,材料为硒化锌.

按总体设计方案,样机需要设计工作于 100K 的低温冷箱,从温度适应性和光学效率考虑,将光谱仪设计为全反射式结构,同时,为降低制冷的难度,需要减少光学系统的体积.最终样机权衡采用了如图 2 所示的“TR 双反射三反 + 平面光栅”的光谱仪

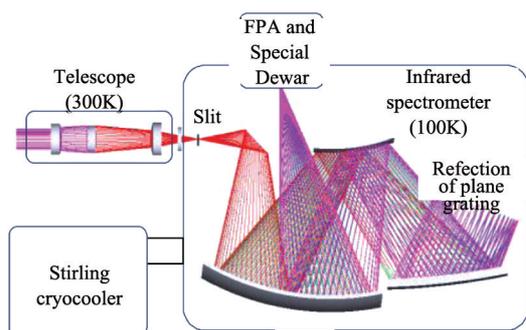


图2 红外高光谱成像系统光学设计
Fig. 2 Optical design of infrared hyperspectral imaging system

结构,光谱仪中的两次用到同一个三反,此三反既充当准直镜又是会聚镜,辐射经过三反准直之后通过光栅分光再返回,经同一三反会聚在像面上.采用该结构有利于在减少系统体积,达到较高的光学效率,经过测试,在 $8.0 \sim 12.5 \mu\text{m}$ 谱段,光谱仪的光学效率达到70%以上.

2.2 低温光学设计仿真与实施

样机的低温光学设计要实现低温100 K制冷技术指标,选择了“机械制冷+真空低温冷箱”的技术方案.采用了大冷量的斯特林制冷机作为冷源,通过PID实现稳定的闭环温控,工作期间不会由于飞机环境温度的变化而使冷箱温度发生变化,同时具有良好的工程可实施性;低温系统通过合适的柔性冷链设计,保证了三反光谱仪、平面光栅、狭缝的制冷温度到100 K以下.冷箱采用低膨胀系数的殷钢作为基体材料,各制冷元件通过镜框直接安装在冷箱底板上,真空壳体材料选用钛合金,腔体部分通过铣床整体加工而成,真空壳体盖板和抽气管之间通过焊接方式连接.真空壳体盖板与腔体之间用卡箍进行连接,并采用橡胶垫进行密封,膨胀机安装法兰与真空腔体之间采用橡胶圈进行密封.

为了验证样机的低温制冷效果,设计了如图4所示的专项试验对其进行验证,采用2台 $2.8 \text{ W}@80 \text{ K}$ 斯特林制冷机作为制冷源,制冷部件为等效样机内部热负载的铝块;.通过冷箱内外部良好的绝热设计,柔性冷链材料的选取等措施,冷箱内部的全铝负载在约8个小时内可以从常温降低到约97 K,光学底板和全铝光谱仪镜片的温度梯度小于1 K,温度一致性较好,待系统稳定后,其温度长期稳定性优于0.5 K.试验结束后,关闭制冷机冷源,经过约24个小时冷箱可以回到常温.试验表明,目前的低温系

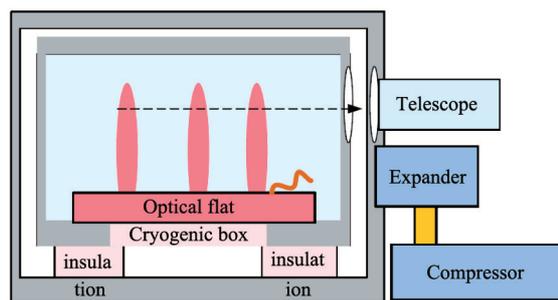


图3 样机实施低温光学的低温冷箱原理示意
Fig. 3 Schematic diagram of cryogenic box for prototype implementation

统设计可以满足样机100 K制冷的低温需求.

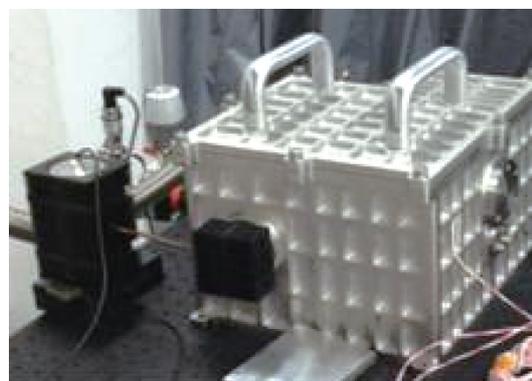


图4 低温光学系统验证现场照片
Fig. 4 The photos of internal thermal load and system verification for Cryogenic Optics

2.3 特种红外焦平面组件与处理技术

样机采用进口红外焦平面芯片,阵列大小为 320×256 ,采用集成探测器杜瓦制冷机(IDDCA)使探测器工作在 $55 \sim 70 \text{ K}$.芯片内部集成的CMOS读出电路可灵活控制探测器的积分时间及数据读出方式,焦平面的256维度做为光谱维,320做为空间维.

为了适应三反光谱仪的特非对称光路,且最大程度地降低背景辐射的影响,研制了配合芯片和系统的特种杜瓦及冷屏组件,设计和制造前后组件杜瓦和冷屏的示意如图5所示:

样机的焦平面探测器使用条件与普通的红外成像系统不一致,这是一种弱信号强背景辐射的状态,特别是在改造焦平面的冷屏和杜瓦后,为此开展了红外成像光谱探测信息获取技术的研究:

(1)设计了焦平面组件暗电流测试方案并针对样机使用的组件测试了不同工种温度下的暗电流数值,为系统设计提供了关键参数.暗电流测试方案是



图5 热红外焦平面组件杜瓦设计及制造前后示意及照片(左:VLW RM4 标准组件杜瓦冷屏;右:针对高光谱设计特种杜瓦组件)

Fig. 5 Photos before and after design of dewar for thermal infrared focal plane(Left: standard assembly dewar; Right: The special dewar assembly for hyperspectral design)

利用冷屏完全遮挡探测器视场,此时探测器接收到的目标辐射和背景辐射就由冷屏的辐射量决定,由于冷屏靠近探测器,内壁的温度可能只比探测器的工作温度略高,由它产生的并能够到达探测元的辐射功率可以忽略,通过对焦平面设置一个较长的积分时间以获得一个输出电平就可以反推出等效暗电流的数值.在此基础上测试了焦平面工作在 68 K 情况下的暗电流数值.

(2)对杜瓦窗口的辐射特性进行了仿真分析,并设计了实验系统进行测试,确保低温冷箱的锗窗口的辐射量不会影响样机的极限光谱探测,在焦平面对低温辐射源,锗窗口常温的情况下,焦平面的积分时间可以达到 5 ms,有效验证了在样机设计中存在的焦平面探测器和低温冷箱之间存在的常温的锗窗口热辐射不会影响到样机的性能.

3 仪器的性能测试与光谱标定

3.1 探测灵敏度测试

探测灵敏度是样机探测能力的直接反应,在 8.0 ~ 12.5 μm 共进行 180 个波段,需要对每个波段均进行探测灵敏度测试,以评估仪器的实际探测能力.进行探测灵敏度测试时,低温冷箱温度闭环稳定为 100 K,焦平面设置积分时间 5.0 ms.

设计一个相对样机视场的转折光路,样机可以在两个黑体间快速切换观测视场,设置黑体_1 温度为 T_1 ,黑体_2 温度为 T_2 ,转动转折镜,仪器可以快速测试 2 个温度点 T_1 、 T_2 ,.用 T_1 和 T_2 两温度点样机在各个波段的响应数据评价系统的响应量,根据 T_1 的数据来评估噪声,然后根据下述计算方法计算系统各个波段的探测灵敏度;

$$\text{NETD}_i = \frac{(T_2 - T_1) \times \text{RMS}(T1_λ_i)}{DV(T2_λ_i) - DV(T1_λ_i)}, \quad (1)$$

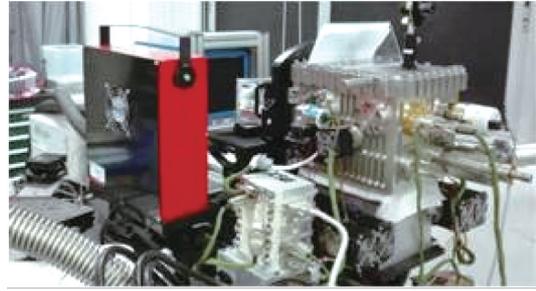


图6 样机探测灵敏度测试现场

Fig. 6 The sensitivity of laboratory testing site

上式中 $\text{RMS}(T1_λ_i)$ 表示温度点对应 $λ_i$ 波段黑体温度 T_1 时采集数据的均方根噪声 $\text{DN}(T2_λ_i)$ 和 $\text{DN}(T1_λ_i)$ 分别表示对应 $λ_i$ 波段黑体温度 T_2 和 T_1 时的信号 DN 值.

转动转折镜,使得样机快速测试 2 个温度点 23 $^{\circ}\text{C}$ 、33 $^{\circ}\text{C}$,各采集约 1000 帧图像数据.计算得到样机的探测灵敏度结果如图 7 所示,其中样机在 8.0 ~ 10.5 μm 之间 100 个波段的平均 NETD 为 180 mK,8.0 ~ 12.5 μm 之间 180 个波段的平均 NETD 为 337 mK.

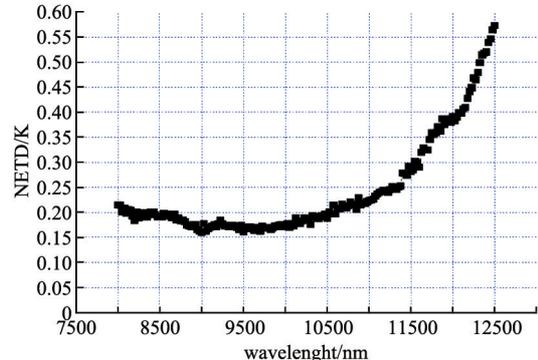


图7 实测样机在 8.0 ~ 12.5 μm 内各谱段 NETD 曲线

Fig. 7 The NETD curve of the 8.0 ~ 12.5 μm

3.2 光谱响应范围与光谱分辨率测试

样机实现的光谱响应范围为 8.0 ~ 12.5 μm ,采用等间隔光谱采样,共 180 个波段.测试时标准单色仪进行性能测试,利用硅碳棒作为测试光源,控制单色仪进行波长扫描,从 8.0 μm 匀速扫描到 12.5 μm ,单色仪扫描步进设置为 0.5 nm,查看样机是否在对应的波段内有响应信号,判断样机的光谱响应范围.测试原理如图 8 所示.

经过测试,样机对单色仪分光后的波长 8.0 ~ 12.5 μm 均有响应,(下图给出了经过单色仪之后的单波长 9.0 μm 、10.0 μm 、11.0 μm 、12.5 μm 四个波长的响应信号,分析后得到样机各个波长对探测器

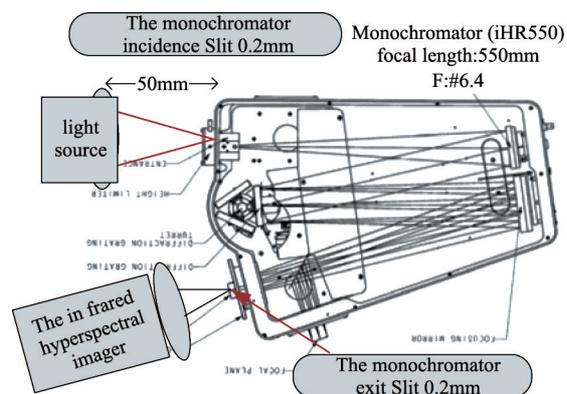


图 8 样机光谱响应范围/光谱分辨率测试
Fig. 8 The test principle of spectral response range/ spectral resolution

面对应的的光谱位置归纳如下图所示,其中光谱维第 36 列对应中心波长 8.0 μm , 196 列对应中心波长 12.5 μm .

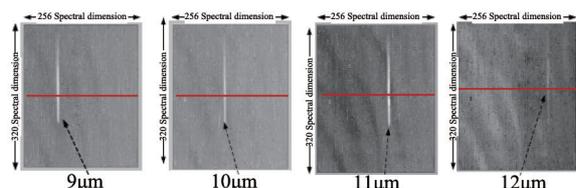


图 9 样机对单色仪 9.0 μm 、10.0 μm 、11.0 μm 、12.5 μm 四个波长的响应信号
Fig. 9 The prototype of the monochromator response signal (9.0 μm /10.0 μm /11.0 μm /12.5 μm)

光谱分辨率的测试采用直接扫描法,利用单色仪从 8.0 μm 匀速扫描到 12.5 μm ,以 0.5 nm 为步长,其中单色仪的入射和出射狭缝开口设置为 0.2 mm. 测试过程中,设置探测器成像帧频为 120 Hz,对全扫描过程进行数据记录,其后对获取数据进行归一化处理,得到样机在每个波段的光谱分辨率响应曲线,图 10 给出了样机各波段的光谱响应率曲线,经过计算后可得样机的光谱分辨率平均在 44 nm.

3.3 样机对外成像试验

为验证样机的红外高光谱的成像获取能力,开展了对外成像,利用小转折镜模拟飞行状态,对外景按照设计速高比进行均匀扫描成像,图 12 ~ 图 15 给出了对外扫描成像的部分热红外高光谱图像.

4 飞行验证与初步应用

样机完成研制和试验室测试后,2015 年 6 月在

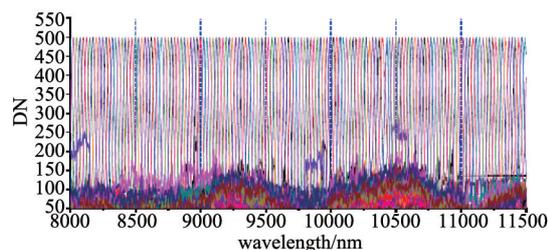


图 10 样机 8.0 ~ 11.5 μm 的光谱分辨率测试结果
Fig. 10 The spectral resolution test results for 8.0 ~ 11.5 μm (140 bands)

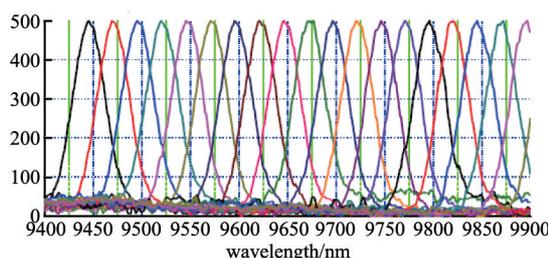


图 11 样机 9.4 ~ 9.9 μm 光谱通道光谱分辨率处理结果
Fig. 11 The spectral resolution test results for 9.4 ~ 9.9 μm



图 12 样机获取的热红外高光谱单波段图像(中心波长 8.5 μm ,带宽 44 nm)
Fig. 12 The thermal infrared single band image acquired by the prototype (Center wavelength 8.5 μm , bandwidth 44 nm)



图 13 样机获取的热红外高光谱单波段图像(中心波长 9.5 μm ,带宽 44 nm)
Fig. 13 The thermal infrared single band image acquired by the prototype (Center wavelength 9.5 μm , bandwidth 44 nm)

浙江舟山开展遥感飞行验证试验,获取了指定区域的红外高光谱图像数据;从飞行的结果来看,样机已经具备在 8.0 ~ 12.5 μm 波段获取高质量热红外高光谱成像数据的能力. 图 17 为样机飞行获取的热红外高光谱数据,图 18 为根据飞行数据反演的地表温度和发射率结果,反演的地表温度分布与指定区域当时地表温度分布特征基本相符,该试验的成功进行也初步表明了系统具备开展稳定飞行工作的



图 14 样机获取的热红外高光谱单波段图像(中心波长 $10.5\ \mu\text{m}$, 带宽 $44\ \text{nm}$)

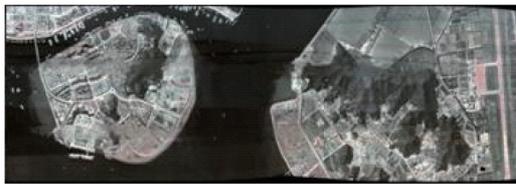
Fig. 14 The thermal infrared single band image acquired by the prototype (Center wavelength $10.5\ \mu\text{m}$, bandwidth $44\ \text{nm}$)



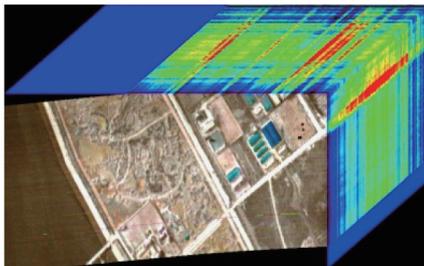
图 15 样机获取的热红外高光谱单波段图像(中心波长 $11.5\ \mu\text{m}$, 带宽 $44\ \text{nm}$)

Fig. 15 The thermal infrared single band image acquired by the prototype (Center wavelength $11.5\ \mu\text{m}$, bandwidth $44\ \text{nm}$)

能力.



(a)



(b)

图 17 样机飞行获取的热红外高光谱数据, (a) 飞行部分区域假彩色合成图像, (b) 处理的热红外高光谱数据立方体

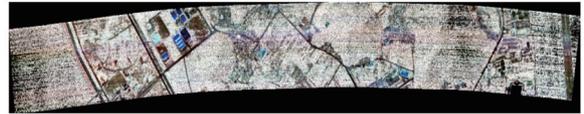
Fig. 17 The infrared hyperspectral data for the flight of the prototype (a) The false color composite image of flight region, (b) The thermal infrared hyperspectral data cube after treatment

5 结语

历时三年的集中攻关,上海技术物理研究所研制成功了国内第一台红外高光谱成像仪工程样机. 样机覆盖 $8.0 \sim 12.5\ \mu\text{m}$ 谱段, 具有 180 个光谱通道, 经测试其光谱分辨率达到 $44\ \text{nm}$ 、探测灵敏度平



(a)



(b)

图 18 飞行获取数据反演的地表温度和发射率(a)反演的地表温度(b)反演的发射率假彩色合成图像

Fig. 18 The inversion of surface temperature and emissivity (a) Surface temperature inversion (b). Inversion of emissivity false color composite images

均优于 $0.2\ \text{K}$, 并实现了优于 $1\ \text{nm}$ 的光谱定标精度, 与美国 JPL 实验室正在发展的 MAKO 热红外高光谱成像仪处于同一技术水平. 样机于 2015 年 6 月在浙江舟山成功开展了功能飞行验证, 表明样机已经初步具备开展业务运行的能力. 该样机的成功研制, 标志着我国已经突破了红外精细分光成像、 $100\ \text{K}$ 深低温光谱仪的工程研制和红外面阵焦平面组件等核心技术, 将有力推进我国高光谱遥感在红外谱段的研究和发展.

References

- [1] WANG Jian-Yu, XU Wei-Ming, YUAN Li-Yin, *et al.* Background radiation suppression of a thermal infrared hyperspectral imaging system[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (王建宇, 徐卫明, 袁立银, 等. 热红外高光谱成像系统的背景抑制和性能优化. *红外与毫米波学报*), 2010, **29** (6): 419 - 423.
- [2] Johnson W R, Hook S J, Mouroulis P Z, *et al.* QWEST: Quantum well infrared earth science testbed[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, **7086**: 06 - 1 - 10.
- [3] Boltar K O, Bovina L A, Saginov L D, *et al.* IR imager based on a 128×128 HgCdTe staring focal arrays [C]. *SPIE*, 1999, **3819**: 92 - 95.
- [4] Shen Mang-Zuo, Ma Wen-Li, Liao Sheng, *et al.* Development of a Cryogenic Optical System, [J] *ACTA OPTICA SINICA* (沈忙作, 马文礼, 廖胜, 等. 低温光学系统的研制, *光学学报*), 2001, **21** (2): 202 - 205.
- [5] Liu Yin-Nian, Xue Yong-Qi, Wang Jian-Yu, *et al.* Operational Modular Imaging Spectrometer [J] *J. Infrared Millim. Waves* (刘银年, 薛永祺, 王建宇, 等. 实用型模块化成像光谱仪. *红外与毫米波学报*), 2002, **21** (1): 9 - 14.
- [6] Wang Jian-Yu, Wang Yue-Ming, Li Chun-Lai. Journal of Remote Sensing [J] *J. Infrared Millim. Waves* (王建宇, 王跃明, 李春来. 高光谱成像系统的噪声模型和对辐射灵敏度的影响, *红外与毫米波学报*). 2010, **29** (6): 419 - 423.