

机载热红外高光谱成像仪的光谱性能测试与初步应用

李春来, 吕刚, 袁立银, 王跃明, 金健, 徐艳, 刘成玉, 何志平, 王建宇

(中国科学院上海技术物理研究所 中国科学院空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083)

摘要: 介绍了机载热红外高光谱成像仪样机的低温光谱仪设计特点, 为了检测系统的光谱识别能力, 在实验室开展了详细的光谱性能测试。为满足气体探测对超高光谱精度的需求, 提出了采用 CO₂ 激光器结合高精度单色仪的方法应用于色散型高光谱成像系统。在实验室对氨气气体进行了准确的红外吸收光谱测试, 表明系统可用于气体探测及识别。在此基础上, 开展了飞行试验, 应用结果表明热红外高光谱可以有效开展城市典型建筑物分类、工业化学气体排放种类和形态监测等应用, 特别是后者是目前其它光学遥感手段尚不具备的。以上研究和试验结果表明机载热红外高光谱成像仪已经具备了业务应用能力, 后续将在仪器辐射定量化精度的提升方面进一步开展研究工作。

关键词: 热红外高光谱; 光谱分辨率; 光谱绝对定标; 低温光学

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20190117

Laboratory calibration and application of the airborne thermal infrared hyperspectral imager (ATHIS)

Li Chunlai, Lv Gang, Yuan Liyin, Wang Yueming, Jin Jian, Xu Yan, Liu Chengyu, He Zhiping, Wang Jianyu

(Key Laboratory of Space Active Optoelectronic Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: The cryogenic spectrometer for the airborne thermal infrared hyperspectral imager (ATHIS) was designed in this paper. In order to detect the spectral recognition capability of the ATHIS, detailed spectral characteristics tests were carried out in the laboratory. The method of CO₂ laser combined with high precision monochromator was proposed to achieve the absolute spectral calibration accuracy of 0.8 nm. Methane gas was tested in the laboratory, and the results show that methane gas could be accurately identified. Twice flight tests of the ATHIS was carried out based on those experiments. The data processing results show that thermal infrared hyperspectral imager can effectively carry out classification and identification of typical urban buildings and effective monitoring of industrial chemical gas emissions. The above preliminary application shows that the ATHIS has excellent spectrum recognition power, and the primary business application prospect. The follow-up instrument will carry out the researches on the enhancement of radiation quantification.

Key words: thermal infrared hyperspectral; spectral resolution; absolute spectral calibration; low temperature optics

收稿日期:2019-12-18; 修订日期:2020-01-14

基金项目:中国科学院青年创新促进会项目(2016218); "十三五"民用航天预先研究项目"星载高分辨率红外高光谱相机及应用技术"(D040104)

作者简介:李春来(1982-),男,研究员,博士,主要从事星载高光谱成像方面的研究。Email:lichunlai@mail.sitp.ac.cn

0 引言

热红外高光谱遥感^[1]和可见短波谱段原理一致,是利用地物在特定波段内反射或辐射产生的精细光谱信息进行目标探测和识别,其区别在于工作波段为 8 000~12 500 nm 的长波红外大气窗口^[2]。国际上最为典型的热红外高光谱成像载荷是美国夏威夷大学研发完的机载热红外高光谱成像仪 AHI(1998 年),在此基础上后续还发展了 AHI-II 型产品(2008 年)。近十年来美国还陆续发展了以 QWEST、MAKO 仪器为代表机载热红外高光谱成像仪。基于这些仪器开展了大量飞行遥感试验,初步证实了热红外高光谱遥感的优势。从技术的发展历史和趋势来看,热红外高光谱遥感技术^[3]是围绕如何抑制红外强背景辐射而展开的。中国科学院上海技术物理研究所于 2016 年成功研发了中国第一台机载热红外高光谱成像仪载荷^[4](以下简称样机),样机采用了平面闪耀光栅进行红外精细分光,设计有 100 K 低温制冷的光谱仪用于强红外背景辐射的抑制^[5-6],样机于 2016 年、2017 年开展了 2 次飞行试验。文中首先简单介绍了样机 100 K 低温光谱仪^[4]的设计特点,在此基础上详细论述了样机的光谱分辨能力测试情况,包括光谱分辨率和光谱精度,最后还介绍了样机的飞行应用情况。

1 100 K 低温光谱仪设计

样机的光学系统包括主望远镜和低温光谱仪两部分,根据光学系统设计,样机在 8 000~12 500 nm 的光谱范围内可得到 140 个波段的成像光谱信息,仪器观测视场 14°,空间分辨率优于 1 mrad。样机的整机结构示意图如图 1 所示,其中主望远镜工作于常温,光

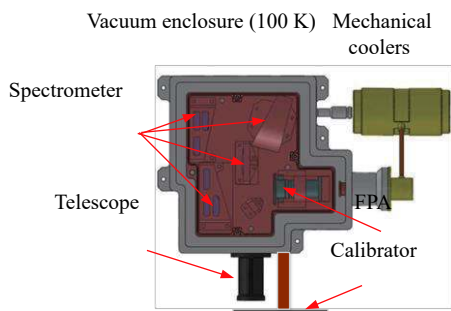


图 1 低温光谱仪结构示意图

Fig.1 Structure diagram of cryogenic spectrometer

谱仪工作于低温 100 K。低温光谱仪的设计特点在于如何将一系列光学部件制冷到 100 K 温度下,为了实现该目的,低温光谱仪在结构上设计为一个真空密封的腔体,墙体内部包括狭缝、红外分光计、红外焦平面芯片等部件,这些部件在腔体内部通过柔性冷链进行连接,采用斯特林制冷机作为制冷源。图 2 给出了腔体内部的分光计实物照片。



图 2 低温腔体内红外分光计结构

Fig.2 Structure of infrared spectrometer in the cryogenic cavity

低温光谱仪内部的红外分光计采用了平面闪耀光栅作为分光部件,采用该结构的方式可以避免采用高成本的凹面光栅方案,并且利用平面闪耀光栅设计的“双反射三反+平面光栅”^[4]结构可以获得优于 70% 的综合光学效率。“双反射三反+平面光栅”在结构尺寸上与“凹面光栅+曲面棱镜”^[4]的结构基本相当,从光谱仪的效率上来看,平面闪耀光栅和凹面光栅在 8.0~12.5 μm 其衍射效率均可以达到 80% 附近,“双反射三反+平面光栅”在光栅之外还有七次反射,而“凹面光栅+曲面棱镜”则存在一个棱镜,有两次透射效率,综合计算分析下来,两者的光学效率均在 70% 左右,基本相当,对系统的灵敏度水平提升有显著优势^[7]。

“双反射三反+平面光栅”技术方案另外的优势还在于整体分光计体系小巧,在低温腔体的密封后可以流出足够的空间安装红外焦平面芯片,并且反射镜均采用全铝结构制造,100 K 低温下可以较好地满足像质及光谱弯曲要求。此节介绍的 100 K 低温光谱仪是样机的核心部件,直接决定了样机的光谱分辨性能,文中的后续章节将详细介绍基于该设计方法下的样机光谱特性测试以及样机飞行应用情况。

2 实验室光谱特性测试

2.1 光谱分辨率测试

对高光谱成像仪器而言,光谱分辨率是最为重要的光谱特性参数,它直接决定了仪器的光谱分辨能力。在采用了 100 K 低温光谱的设计方法后,样机能够在光谱范围 8 000~12 500 nm 间约 0.2 K 灵敏度水平的光谱成像探测,由于采用了光栅分光技术,在探测器焦平面上的光谱维呈现等间隔光谱采样,样机设计光谱采样间隔为 25 nm。样机的实验室的光谱定标采样硅碳棒作为单色仪(型号 iHR550)的入射光源,控制单色仪进行波长扫描,采用直接扫描法测试样机的光谱分辨率,设置单色仪输出波长从 8 000 nm

匀速扫描到 12 500 nm,单色仪扫描步进设定为 0.5 nm,该步进值为仪器设计光谱采样间隔的 1/50,不会对仪器光谱分辨率的测试精度产生影响。对全扫描过程样机获取的科学数据进行记录,其后对获取数据进行归一化处理,得到样机在每个光谱通道的光谱分辨率响应曲线。图 3 给出了部分波段光谱区域的光谱响应曲线,图中横坐标显示波长对应于样机焦平面光谱维像元采样点,纵坐标表示样机获取的数字 DN 值。从数据拟合的效果看,样机的光谱分辨率约为 40 nm,该值近似于光谱采样间隔 25 nm 的 1.5 倍,这也基本符合色散型高光谱成像仪光谱分辨率与光谱采样间隔的数值关系。

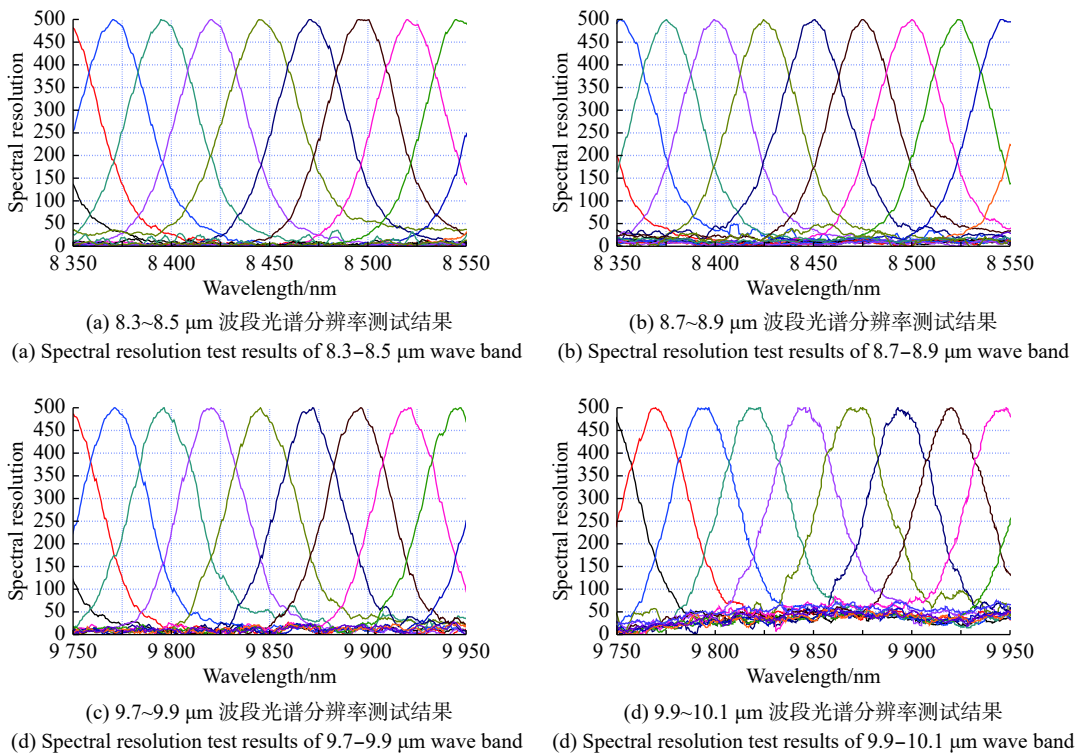


图 3 机载热红外高光谱成像仪波部分波段光谱分辨率测试结果

Fig.3 Spectral resolution test results of airborne thermal infrared hyperspectral imager (ATHIS)

2.2 绝对光谱位置标定

对高光谱成像载荷而言,光谱探测能力的另一项指标就是光谱绝对定标精度,它决定了仪器探测波长位置精准性^[8]。通常而言,对于高光谱成像仪来说光谱定标精度一般要达到光谱分辨率的十分之一以上,也就是说样机的光谱定标精度需要控制在在 4 nm 以内。样机的设计应用模式相对于可见短波红外谱

段的高光谱成像仪而言,有一个典型的应用模型就是有机气体探测,通过气体分子谱的红外吸收特性来探测和识别气体成分,考虑到这类气体的吸收光谱特性相对于矿物等目标往往更加剧烈,为此样机希望能够实现优于 1 nm 的光谱绝对位置标定。

在该测试中采用了 CO₂ 红外激光器,这是一类出射波长在中长波红外波段的激光器,具有所发出的光

单色性强, 光谱分辨率高, 波长位置稳定等特点, 其绝对光谱位置准确度一般可以在 0.2 nm 以内, 测试现场如图 4 所示。图 5 给出了基于 CO₂ 激光器的绝对光谱位置传递方法。将 CO₂ 红外激光器作为单色仪入射光源, 利用单色仪标配的液氮制冷的 MCT 探测器在单色仪出口处进行信号探测, 利用 CO₂ 红外激光器的设定波长绝对位置和单色仪扫描获取波长显示位置, 进行两者的光谱绝对精度传递。简单而言, 就是利用 CO₂ 激光器的高精度光谱位置修正单色自身存在的波长显示位置的偏移, 通过该修正值传递到样机上进行绝对光谱位置的修正, 从而提高样机的绝对光谱定标精度。



图 4 基于 CO₂ 激光器的绝对光谱位置校正测试现场

Fig.4 Testing scene of absolute spectral location correction method based on CO₂ laser

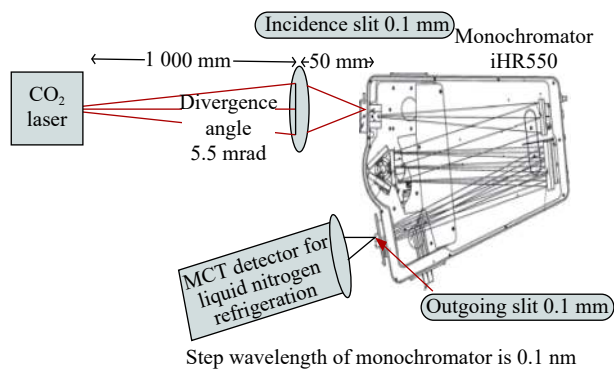


图 5 基于 CO₂ 激光器的绝对光谱位置传递方法示意

Fig.5 Absolute spectral location transfer method based on CO₂ laser

表 1 给出了测试用 CO₂ 红外激光器主要特征光谱位置列表, 图 6 给出了将 CO₂ 激光器输出波长设定为 R16 谱线时, 单色仪 8 次波长扫描获取到的 MCT 探测器响应信号。测试时单色仪的入射狭缝和出射狭缝均设置为 0.1 mm, 单色仪扫描步进设置为 0.1 nm。对于 R16 谱线的 8 次扫描, 其中前 4 次从 8 000 nm 扫描至 12 500 nm, 后 4 次扫描从 12 500 nm

表 1 测试用 CO₂ 红外激光器主要特征光谱位置列表

Tab.1 List of main characteristic spectral locations of CO₂ lasers for testing

Transition	Wavelength / μm	Down piezoelectric voltage/V	Up piezoelectric voltage/V
P18	10.571	0.099 8	0.502 5
P24	10.632	0.502 5	0.523 4
P16	10.551	0.523 4	1.118 7
P12	10.513	1.118 7	1.350 1
P20	10.591	1.350 1	1.737 8
P22	10.611	1.737 8	1.848 1
R14	10.289	1.848 1	1.952 5
R18	10.26	1.952 5	2.19
R16	10.274	2.19	2.689 6
P14	10.532	2.689 6	3.080 6
P18	10.571	3.080 6	3.35

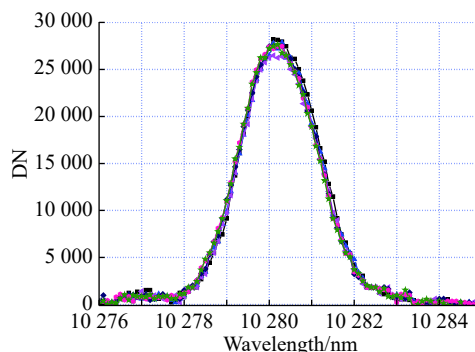


图 6 单色仪波长扫描 MCT 探测器获取的 CO₂ 激光器 R16 谱线 (10 274 nm) 响应信号

Fig.6 Signal curve obtained from monochromator by scanning the R16 line (10 274 nm) of CO₂ laser

扫描至 8 000 nm, 这样做的目的也是为了消除单色仪波长扫描方向引起的波长偏差。

从测试的结果来看, MCT 得到的信号对应 CO₂ 激光器 R16 谱线的单色仪自身的中心波长显示为 10 280.2 nm, 对应的半高宽为 2.1 nm。8 次扫描的结果一致性极好, 这说明了单色仪的扫描波长方向和自身波长偏差无关, 同时也证实了 CO₂ 激光器的波长绝对位置的稳定性和准确性。从结果看说明单色仪自身在 10 280.2 nm 波长位置的显示存在 6.2 nm 的偏差。采用同样的方法, 图 7~9 还给出了设定 CO₂ 激光器输出另外三条及激光谱线 P14、R14、P18 时得到的结果。

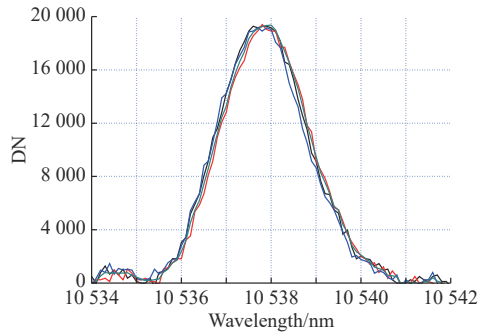


图 7 单色仪波长扫描 MCT 探测器获取的 CO₂ 激光器 P14 谱线 (10 532 nm) 响应信号

Fig.7 Signal curve obtained from monochromator by scanning the P14 line (10 532 nm) of CO₂ laser

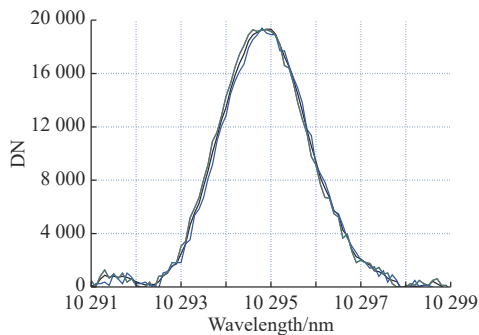


图 8 单色仪波长扫描 MCT 探测器获取的 CO₂ 激光器 R14 谱线 (10 289 nm) 响应信号

Fig.8 Signal curve obtained from monochromator by scanning the R14 line (10 289 nm) of CO₂ laser

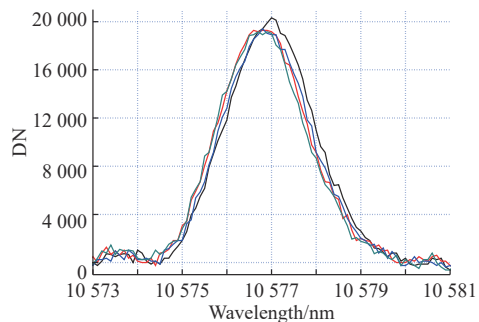


图 9 单色仪波长扫描 MCT 探测器获取的 CO₂ 激光器 P18 谱线 (10 571 nm) 响应信号

Fig.9 Signal curve obtained from monochromator by scanning the P18 line (10 571 nm) of CO₂ laser

经过以上 4 条谱线的光谱绝对位置校准,可以拟合出图 9 所示的 CO₂ 激光器与测试用单色仪显示波长数值的传递关系,拟合后的曲线的线形度优于 99.9%。利用该关系实现对测试用单色仪输出波长

的绝对位置校正。图 9 中单色仪的读数为横坐标,对应的实际的绝对波长位置为纵坐标。图 10 给出了拟合传递后单色仪光谱绝对位置对应曲线图。

根据单色仪资料,其自身的波长相对位置精度在 0.5 nm 以内,样机完成光谱分辨率测试时的统计误差在 0.2 nm 以内,根据推算,采用 CO₂ 激光器对其进行绝对位置标定后,最终波长绝对位置精度在可以控制在 0.8 nm 以内,这个值是满足预期指标的。

完成光谱分辨率和光谱绝对波长位置标定后,样机开展了进一步的光谱探测能力测试,在实验室条件下对有机气体-氨气进行了红外吸收光谱测试,测试条件如图 11 所示。在样机的入光孔径前增加一级特定浓度的氨气气体池,利用高温黑体目标经过平行光管准直后的平行光线经过气体池,然后入射进样机开展探测,样机获取的数据经过简单处理可以得到如图 12 所示的氨气气体红外光谱吸收曲线,通过数据拟合得到样机对气体池的探测在 10 478.3 nm 有一个典型的强红外吸收,这个与氨气气体的标准红外吸收谱位置 10 478.1 nm 误差在 1 nm 以内,这也从真实性检测方

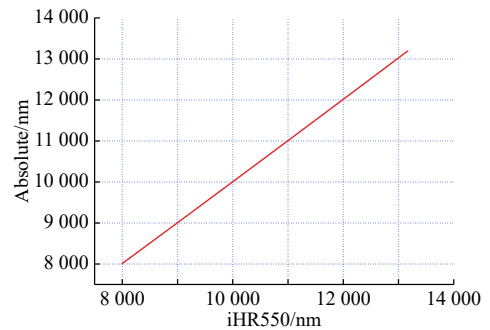


图 10 拟合传递后单色仪光谱绝对位置对应曲线

Fig.10 Absolute position correspond curve of the monochromator after fitting

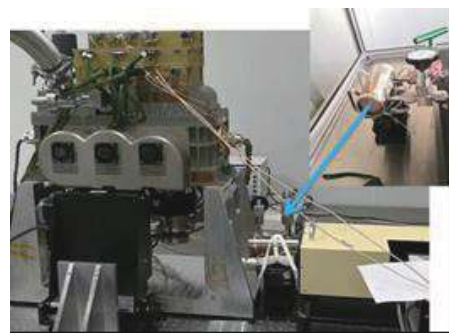


图 11 氨气气体池红外吸收光谱测量

Fig.11 Measurement site for infrared absorption spectra of ammonia

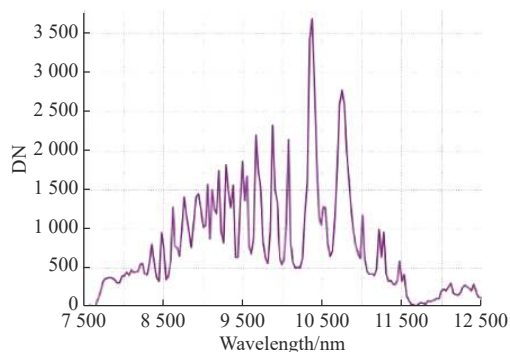


图 12 样机测试得到的氨气气体池红外吸收光谱

Fig.12 Ammonia infrared absorption spectrum measured by the ATHIS

面验证了样机的光谱探测能力和准确性。

3 飞行试验和初步应用

2015 年 4 月, 机载热红外高光谱成像仪的研制和测试工作基本完成, 为了验证样机的实用能力, 于 2015 年 6 月组织开展了浙江舟山的飞行试验和地面同步测量。飞行高度设计为 2 000 m, 航线东西向飞行, 飞行平台搭载的设备包括样机和 POS AV510。样机工作在 2 000 m 的高空条件下, 由于高空环境的影响, 低温光谱仪的有 1~2 K 的温度漂移, 其余工况经过测试与实验室一致。根据机载热红外高光谱成像仪机上定标器和 POS 数据对所获取的原始数据进行相对辐射定标、绝对辐射定标、光谱漂移校正和几何校正, 得到了中心波长准确、具有地理位置的辐射亮温光谱方体^[9]。从所得到的预处理结果来看 (图 13), 样机已经具备了在 8 000~12 500 nm 波段获取红外高光谱数据的能力。处理结果表明: 所获取的热红外高光谱数据可以用于有效地识别地物材料的类型。

在舟山飞行的基础上, 进一步分析了低温光谱仪

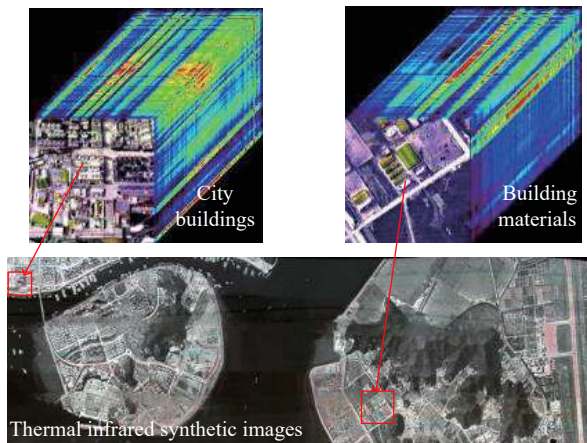


图 13 样机对城市建筑顶部物质特性的识别 (中国浙江舟山市)

Fig.13 Identification of material properties on top of urban buildings by the ATHIS (Zhoushan, Zhejiang, China)

优于环境变化引起温度漂移的特点, 并开展了针对性改进。于 2016 年 4 月开展了海南东方市飞行, 利用获取的数据开展了初步应用, 从应用的效果看, 热红外高光谱载荷对气体的精细形态探测及识别有重要应用价值^[10-11]。由于气体在空气中是扩散流动的, 没有固定的形状和体积, 尤其是会随着风的传播迅速扩散开来。对于这种气体排放掌握其形态信息十分必要, 同时很多有害气体只需达到很微量的浓度就能对人体造成伤害, 且大部分气体在空气中是无色的或者是很难用肉眼辨识的, 这就给气体灾害的发现和实时监测带来了极大的困难。传统的采用傅里叶红外光谱的探测手段, 虽然光谱分辨率高, 识别准确, 但是受空间分辨率和探测效率的影响, 很难在这类遥感大尺度区域应用中发挥实际作用。该系统样机几乎可以实时给出对排放/泄漏化学气体形成精细几何形态、排放趋势、气体种类的有效信息, 从而进行有效识别

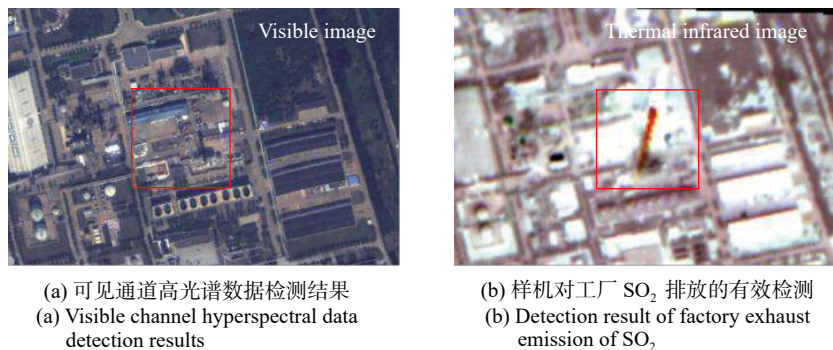


图 14 不同谱段高光谱数据对工厂废气排放的检测结果 (中国海南东方市)

Fig.14 Detection results of factory emission from different spectral hyperspectral data (Dongfang, Hainan, China)

和监测。图 14 为工厂烟囱排放气体在可见谱段和热红外谱段高光谱图像中所表现出的特征, 由于 SO_2 气体在 8 700 nm 处的具有较强红外吸收, 而可见近红外谱段则没有这种特性, 另外, 由于排放空间尺度相对探测区域过小, 也无法采用傅里叶红外光谱技术进行探测识别。通过此次飞行试验, 也印证了热红外高光谱数据在大气污染气体排放精细监测中具有很大的应用潜力。

4 结 论

机载热红外高光谱成像是于 2016 年研制完成的新一代热红外高光谱遥感仪器, 从实验室光谱特性的测试来看, 其光谱分辨率和光谱波长位置精度已经达到了较高的水平, 仪器开展了实验室氨气气体红外吸收光谱探测和飞行试验。初步证实了样机的现有光谱探测和识别能力能够在气体排放几何形态监测、气体类似识等方面形成有效探测。后续仪器的发展将继续关注提升系统的光谱及辐射定量化程度。总体而言, 热红外高光谱成像载荷在我国的发展仍然处于起步阶段, 未来其仪器的研制和应用发展仍然有大量工作需要开展, 是高光谱遥感的重要发展方向之一。

参考文献:

- [1] Tong Qingxi, Zhang Bing, Zhen Lanfen. Hyperspectral Remote Sensing Principle, Technology and Application[M]. Beijing: Higher Education Press.2006. (in Chinese)
童庆禧, 张兵, 郑兰芬. 高光谱遥感原理、技术与应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [2] Terrence Slonecker, Fisher Gary B, Aiello Danielle P, et al. Visible and infrared remote imaging of hazardous waste: a review [J]. *Remote Sensing*, 2010, 2: 2474–2508.
- [3] Hans Erling Torkildsen, Torbjørn Skauli. Full characterization of spatial coregistration errors and spatial resolution in spectral imagers [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(16): 3814–3817.
- [4] Yuan Liyin, He Zhiping, Lv Gang, et al. Optical design, laboratory test, and calibration of airborne long wave infrared imaging spectrometer [J]. *Optics Express*, 2017, 25(19): 22440–22454.
- [5] Wang Yueming, Zhu Qian, Wang Jianyu, et al. Characterization of background radiation in SWIR hyperspectral imager [J]. *Journal of Infrared Millimeter Wave*, 2011, 30(3): 279–283.
- [6] Wang Jianyu, Xu Weiming, Yuan Liyin, et al. Operational modular imaging spectrometer [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2010, 29(6): 419–423. (in Chinese)
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[J]. *红外与毫米波学报*, 2010, 29(6): 419–423.
- [7] Wang Jianyu, Wang Yueming, Li Chunlai. Noise model of hyperspectral imaging system and influence on radiation sensitivity [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2010, 14(4): 614–620. (in Chinese)
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[J]. *遥感学报*, 2010, 14(4): 614–620.
- [8] Wang Jianyu, Li Chunlai, Yuan Liyin, et al. Status and prospect of thermal infrared hyperspectral imaging technology [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2015, 34(1): 51–59. (in Chinese)
王建宇, 李春来, 袁立银, 等. 热红外高光谱成像技术的研究现状与展望[J]. *红外与毫米波学报*, 2015, 34(1): 51–59.
- [9] Wang Jianyu, Li Chunlai, Lv Gang, et al. The calibration of an infrared hyperspectral imager and its flight test validation in laboratory [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2017, 36(1): 69–74. (in Chinese)
王建宇, 李春来, 吕刚, 等. 红外高光谱成像仪的系统测试标定与飞行验证[J]. *红外与毫米波学报*, 2017, 36(1): 69–74.
- [10] Wang Jianyu, Li Chunlai, Lv Gang, et al. The sensitivity model and system design for thermal infrared hyperspectral imager [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(1): 0102001. (in Chinese)
王建宇, 李春来, 吕刚, 等. 热红外高光谱成像仪的灵敏度模型与系统研制[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(1): 0102001.
- [11] Li Chunlai, Lin Chun, Chen Xiaowen. Space-borne LWIR FPA imaging system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2253–2260. (in Chinese)
李春来, 林春, 陈小文. 星载长波红外焦平面成像系统[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(9): 2253–2260.