

热红外高光谱成像技术的研究现状与展望

王建宇¹, 李春来¹, 姬弘桢², 袁立银¹, 王跃明¹, 吕刚¹, 刘恩光¹

(1. 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;
2. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 高光谱成像具有精细的光谱分辨能力,在热红外谱段实施高光谱成像对目标探测与识别有显著效果.与国外相比,我国在该领域的研究还相对薄弱,应用部门的研究主要基于国外数据,国内尚未有成熟的仪器.对国内外研究现状进行了详细调研,并结合目前国内已经布局的研究项目对该领域未来的发展进行了展望,对我国发展高性能空间红外光谱成像技术具有一定意义.

关键词: 热红外高光谱成像;背景抑制;低温光学;平面光栅;焦平面组件

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A

Status and prospect of thermal infrared hyperspectral imaging technology

WANG Jian-Yu¹, LI Chun-Lai¹, JI Hong-Zhen², YUAN Li-Yin¹,
WANG Yue-Ming¹, LV Gang¹, LIU En-Guang¹

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Thermal infrared hyperspectral imaging system is powerful at target detection and discrimination for its high spectral resolution. Advanced researches on these instruments have not been conducted in China. The relevant research works in the world including China were summarized and reviewed in this paper. The future development is prospected considering the undergoing research projects in China.

Key words: thermal infrared hyperspectral imaging; background radiation suppression; cryogenic optics; plane grating; FPA

PACS: 95.55.Fw

引言

高光谱成像技术的出现是遥感界的一场革命,它使本来在宽波段不可探测的物质能够被探测,其重大意义已得到世界公认,相对于可见光和短波红外,在热红外谱段进行高光谱遥感研究具有独特优势^[1].一方面高光谱遥感器分辨率远高于多光谱遥感,因此高光谱遥感数据的光谱信息更加详细,更加丰富,有利于地物特征分析.另一方面,热红外影像探测技术能有效地将热辐射

能转变为人眼可识别的光谱影像.热红外高光谱成像技术具有日夜监测能力,能够检测化学气体^[2],识别地物,探测汽车尾气等,可广泛应用到林火监测、旱灾监测、城市热岛效应、探矿、探地热、岩溶区探水等领域.受技术条件限制,热红外高光谱成像技术的发展缓慢,国际上主要是美国在开展系统研究,国内则目前尚无成熟系统,本文在介绍国外典型系统和应用基础上,分析了系统研制的特点和关键技术,并介绍了该技术在我国的发展现状和趋势,另外还介绍了我国在研的首

收稿日期:2013-07-28,修回日期:2014-11-12

Received date: 2013-07-28, revised date: 2014-11-12

基金项目:国家高技术发展计划(863计划)课题(2012AA121102)

Foundation items: The national high technology research and development program (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,目前作为首席科学家负责国家“十二五”863对地观测与导航领域主题项目“星载红外高光谱成像载荷研制”,并作为课题负责人承担项目课题二“星载热红外高光谱成像仪工程样机研制”. E-mail: jywang@mail.sitp.ac.cn

台热红外高光谱成像仪的相关情况。

1 国外典型仪器介绍

由于热红外面阵探测器、低温光学和热红外精

细分光等关键技术的限制,热红外谱段的高光谱成像仪在我国尚无样机,在国外目前也只是以机载系统为主,并无星载系统.表1给出了国外几类典型热红外高光谱成像系统的情况。

表1 国外典型的热红外高光谱成像系统

Table 1 The typical thermal infrared hyperspectral imager in the world

仪器名称	研制时间	光谱范围	通道	空间分辨率	视场	灵敏度	仪器主要用途
美国 TIRIS	1997	7.5 ~ 14 μm	64	3.6 mrad	4°	--	探测毒气泄露和气体污染;
美国 AHI	1998	7.5 ~ 11.5 μm	32	2.02 \times 0.81 mrad	13°	0.1 K @ 300 K	探测地雷,后期在多个领域发挥了重要作用.
美国 SEBASS	1996	2.5 ~ 5.2 μm 7.5 ~ 13.5 μm	110 120	1 mrad	7.3°	--	固体、液体、气体及化学蒸汽物质探测识别;
美国 LWHIS	2003	8 ~ 12.5 μm	128	0.9 mrad	6.5°	--	---
美国 QWEST	2006	8 ~ 12 μm	256	---	40°	0.127 K @ 300 K	用于地球科学探测领域;
美国 MAKO	2010	7.8 ~ 13.4 μm	128	0.55 mrad	4°	---	--

从国外发展来看,该技术从上世纪90年代开始关键技术攻关和仪器研制,美国在该领域处于领先地位,早期以SEBASS、AHI等仪器为代表,近期则以QWEST等仪器为代表。

1.1 AHI(1998年)

AHI^[1]是由夏威夷大学研制的机载热红外高光谱成像仪,它被认为是世界范围内的经典仪器,其开发目的是验证高光谱成像技术在矿物勘测中的应用,特别是红外高光谱成像对深埋在地下的矿物探测.计划开始于1994年,项目研究之初相关部门广泛收集了各类矿物在0.4 ~ 14 μm 间的成像和非成像光谱数据,从中证实在地矿探测领域8 ~ 12 μm 间的光谱数据具有显著的特征峰. AHI的仪器设计并没有采用全低温光学系统,而是与早期的TIRIS仪器一样在探测器焦面上安装制冷渐变滤光片抑制背景辐射.系统性能指标如下:

光谱范围:7.5 ~ 11.5 μm

仪器口径:35 mm($f = 111$ mm)

空间分辨率:0.81 \times 2.02 mrad

视场:13°

波段数目:32(or 256)

光谱分辨率:125 nm

分光方式:平面光栅

背景抑制方案:

灵敏度:<0.1 K

探测器:256 \times 256 rockwell公司(制冷到

56 K)

AHI仪器的背景抑制器包括渐变滤光片、成像镜以及相应的焦平面器件,背景抑制器将入射的光学相对孔径由F#4缩小至焦面处F#1.7.背景抑制

器的所有元件被装在一个长28 cm、直径15.3 cm的真空杜瓦内,由液氮制冷到90 K在AHI仪器后续发展中,夏威夷大学的研究人员将背景抑制器改由斯特林制冷机制冷,以降低温度从而进一步降低背景辐射。

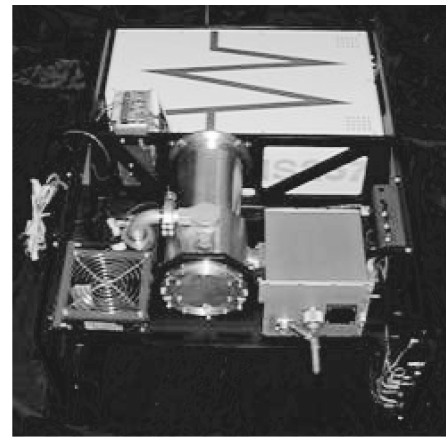


图1 AHI仪器照片图

Fig. 1 The AHI instrument picture

1.2 SEBASS(1996年)与LWHIS(2003年)

机载中/长波高光谱成像仪SEBASS是由美国著名的航空设备制造商Aerospace Corporation公司于1996年研制,该仪器主要用于固体、液体、气体及化学蒸汽物质的探测和识别.该仪器的背景抑制是设计了一套全光路制冷的低温光学系统,整体用液氮制冷到10 K,由于整体光路的底板尺寸仅仅为300 mm \times 200 mm,大大降低了制冷系统的研制难度,该仪器实际只用到了长波通道,其整体技术指标如下:

光谱范围:2.0 ~ 5.2 μm (MWIR)、7.8 ~

13.4 μm (LWIR)

波段数目: 110(MWIR)、120(LWIR)

分光方式: NaCl 曲面棱镜分光

空间分辨率: 1 mrad

视场: 7.3°

背景抑制方案: 全光路液氮制冷到 10 K

探测器类型: 128×128 ($75 \mu\text{m} \times 75 \mu\text{m}$)

采用类似的背景抑制方法,美国的诺格公司也于 2003 年研制了另外一台长波红外高光谱成像仪 LWHIS,它工作在 $8 \sim 12.5 \mu\text{m}$,光谱波段达到 128 个,采用了平面光栅分光,瞬时视场为 0.9 mrad ,成像视场为 6.6° ,整个系统安装在内表面镀金的真空室内,FPA 斯特林机制冷到 63 K ^[3],光机系统制冷到 100 K 以下.考虑到应用效果,LWHIS 设计有机上实时定标装置,采用室温和高温 350 K 高低温黑体,在高光谱成像仪窗口处充满整个视场实现,经实际测试,绝对辐射定标精度优于 6% ,该系统为热红外高光谱成像技术的定量化应用发展起到了推动作用.

1.3 QWEST(2006 年)与 MAKO(2010 年)

量子阱红外高光谱成像仪 QWEST^[4]由美国 JPL 实验室研制,该仪器主要应用于地球科学探测领域.QWEST 采取了超紧凑光学系统,使用透射式物镜,光谱仪采用 Dyson 结构设计,凹面光栅分光,光谱仪整体制冷至 40 K 以下.QWEST 主要性能指标如下:

光谱范围: $8 \sim 12 \mu\text{m}$

波段数: 256

视场: 40°

探测器类型: 量子阱 (640×512 规模)

背景抑制器: 全光路整体制冷至 40 K ;

灵敏度: 优于 124 mK @ 300 K (平均)

采用同样的技术方案,美国的 Aerospace Corporation 公司于 2010 年研制了机载高性能热红外高光谱成像仪 MAKO,相对以往的 SEBASS 系统,其性能得到大幅提高.MAKO 仪器的 Dyson 低温光谱仪可以独立使用(不带望远镜),对应的视场为 14.7° ,分辨率 2 mrad ,带望远镜后分辨率为 $0.547 \mu\text{rad}$,其整机主要技术指标如下:

光谱范围: $7.8 \sim 13.4 \mu\text{m}$

波段数目: 128

空间分辨率: $547 \mu\text{rad}$

视场: 4°

探测器类型: Si: As (128×128)

背景抑制器: 光谱仪整体制冷至 10 K ;

2 热红外高光谱成像的实际应用

任何技术的研究都是为了应用,热红外高光谱成像技术也是如此.热红外波段作为地物光谱特征的重要覆盖区域和遥感大气主要的透过窗口,能够通过搭载机载或卫星平台来获取地物的热红外精细光谱信息,从而有效地识别地物、分辨目标在地址勘察领域发挥重大作用,同时热红外高光谱成像仪也可以广泛地用于地表温度探测、城市热流分析、环境灾害监测及矿蚀岩的识别等领域.另外,该技术在军事伪装识别和水中目标探测等应用上具有非常显著的作用效果,前文介绍的典型系统 AHI 最初的设计就是为了进行地雷探测该技术在军事方面的其它用途还包括用来假目标中的航天器昼夜识别、化学气体流检测、航天器排气口探测、化学云层绘图等.下面从理论研究并结合典型仪器应用效果着手,从地质应用,气体探测及军事等方面介绍热红外高光谱技术的应用.

2.1 地质填图和矿产勘探应用

地质填图和矿产勘探是高光谱技术的主要应用之一,同时这也是高光谱技术应用中较为成功的一个领域.根据研究^[5],目前探测波段在 $400 \sim 2500 \text{ nm}$ 范围内的可见短波高光谱成像仪只能覆盖一些含水矿物基频振动的合频与倍频,对于热红外区间振动强度更大的基频振动无法检测,大大限制了其岩矿信息提取的能力,热红外波段遥感正好弥补了这一缺陷,能够探测到 Si_nO_k 、 SO_4 、 CO_3 、 PO_4 等原子基频振动及其微小变化,从而很容易地区分识别硅酸盐、硫酸盐、碳酸盐、磷酸盐、氧化物、氢氧化物等矿物.另外热红外波段的发射率光谱混合具有线性混合的特点,可以避免困扰科学家的光谱非线性混合难题,使同时精确提取矿物种属及丰度信息成为可能.中国地质大学和国土资源航空物探遥感中心的研究人员曾对部分典型矿物的热红外发射光谱特性进行过,研究表明,在 $8.0 \sim 12.0 \mu\text{m}$ 的波段范围内典型矿物都包含一些特征吸收峰,表 2 给出了几类典型矿物在热红外波段特征光谱特性,从统计结果看光谱分辨率优于 70 nm 就可对硅酸盐、硫酸盐、碳酸盐和磷酸盐等典型矿物进行识别探测.

2.2 化学气体探测和识别应用

理论研究表明,截止波长达到 $12.0 \mu\text{m}$ 的光谱仪器可检测到约 90% 的化学气体物质,其中包括二氧化硫,氨气和氯甲烷等,关于气体成份在热红外波

表 2 部分典型矿物特征在热红外波段特征光谱归纳
Table 2 The characteristic thermal infrared spectral for typical mineral

矿物大类	吸收峰位置(波数)	吸收峰位置(对应波长)	特点	识别对光谱分辨率的需求
硅酸盐	850 ~ 200 cm^{-1}	8.33 ~ 11.76 μm	一个宽缓而复杂的复合吸收峰	优于 150 nm
硫酸盐	1 150 cm^{-1}	8.69 μm	特征吸收	优于 220 nm
碳酸盐	900 cm^{-1}	11.11 μm	一个窄吸收峰	优于 80 nm
磷酸盐	1 000 ~ 150 cm^{-1}	8.69 ~ 10.0 μm	弱的双吸收峰强的双吸收	优于 70 nm
氧化物	400 ~ 800 cm^{-1}	12.5 ~ 25 μm	宽缓的双吸收峰	---
卤化物	1 150 ~ 1 500 cm^{-1}	6.67 ~ 8.69 μm	宽缓的双吸收峰	---

段的发射光谱产生机理. 美国夏威夷大学利用他们研制的经典系统 AHI 仪器对部分有毒化学气体进行过热红外发射光谱测量, 图 2 给出了测试结果, AHI 的光谱分辨率为 125 nm, 从测量结果看已经可以较好地发挥气体物质识别任务了. 基于该特性, 热红外高光谱成像技术也成为了诸多安全领域的技术手段之一, 如各类工厂的烟雾排放物监测、化学实验室的安保设备等.

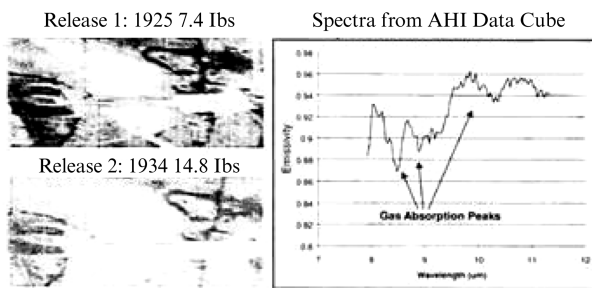


图 2 热红外高光谱应用于化学气体探测(AHI)
Fig. 2 The detection of chemical gas with thermal hyper-spectral imager (AHI)

2.3 军事上的地雷精准探测应用

地雷探测对于军事或民用, 都有着重要意义. 但有两个问题一直困扰着传统地雷探测装置, 一是探测操作时安全距离过小, 为了检测一个掩埋的危险, 探测器必须置于危险之上; 二是速度慢, 大多数以向下寻找为系统的探测器都是车载系统, 而车辆运动本身的效率并不高. 虽然在一个雷区密集的地区这不是一个问题, 但在一些需要快速推进的任务中这却成了阻碍. 热红外高光谱仪的应用却为地雷探测带来了新的技术途径, 该技术得到了经典系统 AHI 的实际验证. 美国密苏里大学利用热红外高光谱探测做出的白天黑夜地面掩埋地雷的合成探测图像, 从中可以方便地识别出地雷掩埋位置, 通过后续的数据处理甚至可以推断出掩埋的时间等信息.

3 系统的组成和关键技术

高光谱成像是成像技术和光谱技术的有机结

合, 通常由成像光学系统和分光系统组成. 本文介绍的热红外高光谱成像技术一般是指在 8.0 ~ 12.5 μm 波段间进行成像和光谱探测的系统. 相比紫外、可见近红外或短波红外波段的高光谱成像, 热红外有其自身的特殊性. 由于常温下仪器自身的热辐射波段也集中于 8.0 ~ 12.5 μm 之间, 为防止目标信号被仪器自身的热辐射淹没, 系统必须设计背景抑制器, 将仪器自身的热辐射相对目标辐射降低到一定量级. 图 3 给出了推扫式热红外高光谱成像系统的组成示意, 系统运行于卫星或者机载平台, 其中平台完成一维空间扫描, 面阵探测器完成另外一维空间扫描, 在平台的运动下获取地面目标的数据立方体信息. 系统由望远镜、光谱仪部件、热红外探测器、信息处理系统以及背景抑制器等几个部分构成.

与可见短波红外波段的高光谱成像仪相比, 热红外高光谱成像系统的设计的关键技术在于背景抑制器、热红外光谱仪以及焦平面探测器三个方面下面针对以上三个部分对热红外高光谱成像仪的特点进行叙述.

3.1 背景抑制器的设计和实现

为防止仪器自身温度引起的热背景辐射淹没目标微弱的光谱信号, 红外高光谱成像系统必须设计背景抑制器. 根据调研及分析论证, 目前常见的几种背景抑制设计方式包括: (1) 制冷型渐变滤光片, (2) 全光路低温制冷, (3) 光谱仪部件低温制冷. 下面分别介绍:

制冷型的渐变滤光片在 AHI 仪器中得到应用, 其原理是在焦平面光敏面前镶嵌对应波长的滤光片, 这样可以将仪器内部全波段背景辐射抑制到系统对应波长的窄波长背景, 根据计算^[5], 可以将背景辐射降低 2 个量级, 该方案在美国的 TIRIS 系统中也得到了应用. 这种方式能够实现的系统空间分辨率较低 (2 ~ 3 mrad), 灵敏度也很难做高, 在 AHI 仪器后期的开发中, 研究人员也开始采用了下面要介绍的全光路深低温制冷方法. 国内的上海技

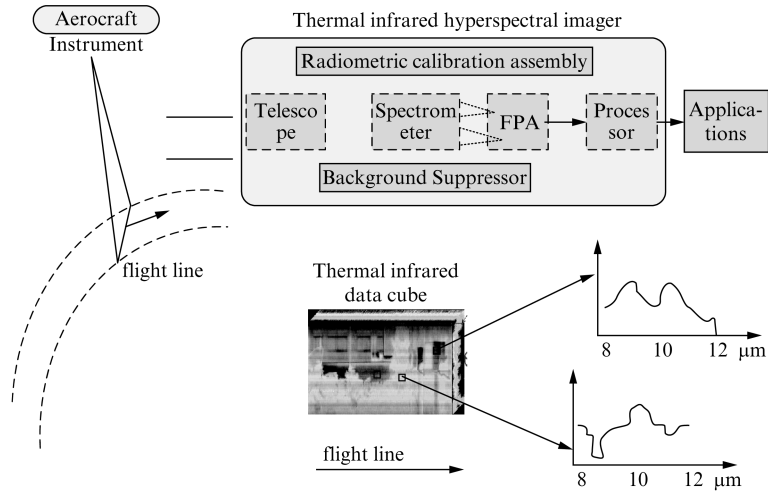


图3 热红外高光谱成像仪系统组成原理示意
 Fig.3 The schematic diagram of thermal infrared hyperspectral imager

物所在“十一五”期间研制的星载热红外高光谱成像系统试验装置(以下简称试验装置)采用了类似的制冷型带通滤光片的方案进行背景抑制器的研制,经验证取得了较好的效果。

全光路深低温制冷就是将系统所有的部件进行低温制冷,物体的热辐射和自身的温度大约成4次方的关系,经过简单计算可以证明,当制冷到100 K时,仪器自身的热背景辐射能够降低4个量级以上,相比前者,背景辐射抑制能力进一步加强.这种方法得到了广泛应用,如前文提到的SEBASS和LWHIS系统.国内的中科院成都光电所在90年代后期由沈忙作研究员领衔开展了这种全光路深低温制冷的工程研究,成功研制了制冷温度110 K以下的低温光学系统^[6],该研究的应用方面是空间点目标光谱探测,与本文介绍的热红外高光谱成像技术有一定差异。

光谱仪部件低温制冷是指仅仅对系统的分光部

件制冷,而望远镜系统可以不必制冷到深低温.该方法的提出是在深入分析背景辐射的各种信号成份量化关系的基础上提出的^[2].它的基本原则就是热红外高光谱成像仪背景辐射的来源占主要成份的是含狭缝在内的光谱仪部件,其制冷无需对系统的望远镜部件进行制冷,该方法对研制星载系统有较大意义,因为对于高空间分辨率的系统,可以避免将大尺寸的望远镜进行制冷,从而节省资源。

考虑到工程可行性,同时为我国将发射的载有星载热红外高光谱成像载荷的某专项卫星做技术储备.已经开展工程研制的热红外高光谱成像仪,参考了上面介绍的方法3设计了背景抑制器,对含狭缝、焦平面在内的光谱仪部件采用深低温制冷进行制冷,低温冷箱工作于100 K以下.低温冷箱采用了大冷量斯特林制冷机作为冷源,该方式相对液氮等制冷方式可操作性强,制冷温度稳定,不会由于飞机环境温度的变化而使系统输出

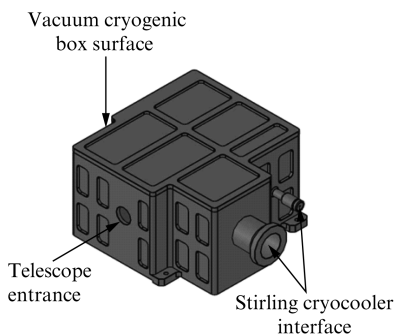


图4 背景抑制器的设计结构
 Fig.4 The structure of background Suppressoris

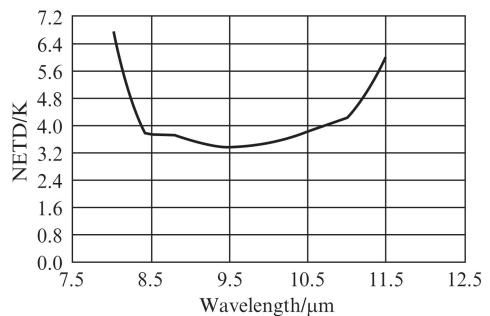


图5 系统 NETD(背景抑制器 270 K)
 Fig.5 The system NETD@ background Suppressoris 270 K

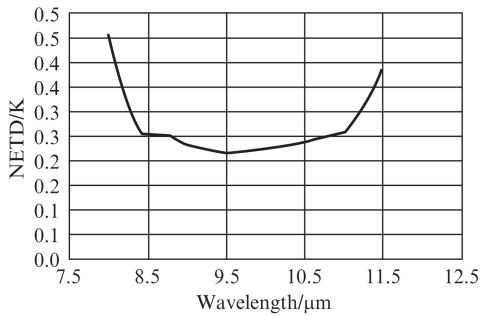


图6 系统 NETD(背景抑制器 170 K)
Fig. 6 The system NETD@ background Suppressor 170 K

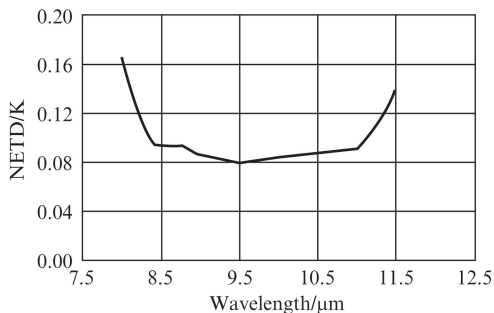


图7 系统 NETD(背景抑制器 100 K)
Fig. 7 The system NETD@ background Suppressor 100 K

发生剧烈变化. 图 4 给出了样机背景抑制器的设计结构,它采用了“机械制冷 + 低温冷箱”的整體制冷方案,由低温冷箱(上图所示的内胆)、内部光谱仪部件组件(内胆内制冷的光机部件)、真空壳体(低温仓外壳)、斯特林机械制冷机接口等组成.在背景抑制器的基础上,同时对背景抑制器在不同制冷温度下的仪器灵敏度进行了估算(目标为 300 K 黑体),结果表明背景抑制器制冷温度在 100 K 及以下时在 8.0 ~ 11.5 μm 谱段仪器的平均灵敏度优于 200 mK@300 K,这也同时验证了设计背景抑制器的必要性.

3.2 热红外光谱仪设计

光谱仪是系统组成的关键部分,与可见、短波波段的光谱仪类似,热红外高光谱成像仪主要有三种分光方式:色散型、干涉型和滤光片型.色散型分光是利用色散元件(光栅或棱镜等)将复色光色散分成序列谱线,然后再用探测器测量每一谱线元的辐射强度.与棱镜分光相比,光栅分光具有适用的光谱范围宽、角色散率大、色散线性、光谱分辨率高等特点,是比较适合热红外分光的手段之一.干涉型高光谱成像仪利用像元辐射的干涉图与其光谱图之间的

傅里叶变换关系,通过探测像元辐射的干涉图和利用计算机技术对干涉图进行傅里叶变换获得每个像元的光谱分布,与色散型相比,由于同时测量的是所有像元均有贡献的干涉强度,因此在满足空间分辨率的前提下,狭缝可以较宽,从而使狭缝面积和视场角较大.但其结构复杂,成本较高、定标过程繁琐,另外,是对平台姿态稳定度要求极高也限制了其进一步推广应用.滤光片型则是直接在仪器的探测器上镶嵌对应波长的窄滤光片实现精细分光,原理较为简单.表 3 给出了适合热红外高光谱成像仪分光的几种方式比较.

表 3 热红外高光谱成像系统典型分光方式比较
Table 3 Comparison of the thermal infrared hyperspectral imager

分光方式	优缺点概述	热红外谱段工程实施
棱镜	光学效率高,但光谱分辨率低,色散非线性大,难以实现比较大的通光口径,需要准直会聚镜	实施较难,材料有限
平面反射光栅	光谱分辨率高,色散线性度较好,效率较高,工艺相对成熟,可设计性强.光学元件和探测器不易排布,结构设计困难	工程可行,小型化需特别设计
凹面反射光栅	不需加准直和会聚镜,结构紧凑.但是视场增加,会产生光谱弯曲现象	获取渠道难,国外均为定制,成本极高
凸面反射光栅	轴外像质较好,像场畸变小,视场大,高通光效率,平场度特性好.但是为离轴结构,装校困难	获取渠道难,成本高
渐变滤光片	工艺成熟,但光谱分辨率低,效率低,对平台的姿态要求很高	难实现高光谱分辨率
声光可调谐晶体	面阵凝视成像,图像畸变小,通道可选择.效率低,光谱分辨率低,主要用于近红外波段	难,还处于研究中
傅立叶变换	高光通量,高输出,多通道,光谱分辨率高.内部扫描镜的运动需要较高的精度,机械加工和调装困难,对外界的震动敏感,对平台的姿态稳定性要求高	工程可行,实施困难,技术复杂

3.3 热红外焦平面探测器

大面阵、高性能的焦平面探测器一直是制约着成像光谱仪发展的因素之一.为了使成像光谱仪系统有足够的探测灵敏度,通常要求器件的峰值探测率达到 10^{12} 以上,为了使仪器具有更宽的成像幅宽,要求焦平面器件具有更高的集成度.对于热红外高光谱成像仪,由于需要对夹杂在较强背景辐射信号中的目标弱信号进行探测,加上探测器材料的特殊性,该类焦平面探测器更难获取,目前国际上只有法国 Sofradir 公司和美国 Rockwell 公司能够提供工程应用的热红外焦平面探测器^[7].

Sofradir 公司从 1986 年开始从事第二代红外探测器组件研究,十多年来为 ESA 的大部分航天任务提供红外焦平面器件. Sofradir 公司的红外焦平面技

术从早期的机载红外前视系统应用起步,典型的产品包括 288×4 和 480×6 的热红外探测器,它们采用 TDI 技术,是当时最为先进的红外探测器之一。经过多年发展,目前 Sofradir 公司已经能够生产符合空间应用要求的 1500×2 规模和 320×256 ^[4] 规模的热红外焦平面器件。与 Sofradir 公司相似,代表美国空间应用红外焦平面器件最高水平的是 Rockwell Scientific 公司,该公司主要为美国工业、商业、科学、政府部门提供红外成像器件,目前代表其最高水平的是光谱覆盖范围 $0.3 \sim 5.3 \mu\text{m}$ 的 $2 \text{ k} \times 2 \text{ k}$ 面阵探测器,但该公司的器件目前对中国禁运。

国内也有一些从事焦平面探测器的单位,如上海技物所、昆明物理所、中电集团 11 所等,在突破了碲镉汞单层外延材料和衬底、基于离子注入平面工艺的焦平面阵列芯片加工、读出电路设计以及检测、混成倒装焊技术、拼接、杜瓦/冷箱、焦平面测试等关键技术的基础上,先后研制成功碲镉汞 256×1 、 1024×1 和 2048×1 的长线列以及其他多种规格的焦平面器件,波段覆盖短波、中波和热红外谱段。目前,国内研制的热红外焦平面探测器与国际先进水平仍然有一定差距,我国已经在“十二五”重大专项中安排了相关研究,但目前仍不能提供热红外高光谱成像系统工程使用的产品。

根据调研和实际沟通,目前能够满足热红外高光谱成像仪研制需求的并可获取的只有 Sofradir 公司两款产品,分别是 MARS LW K508 和 Mars VLW

RM4,两者的主要区别在于响应的截止波长,后者是 2011 年底才开始对中国解禁的最新产品,在提供最终用户说明的情况下能够从法国引进。介绍的样机系统就是采用了 Mars VLW RM4 产品,其响应波长大于 $11.5 \mu\text{m}$ 。表 4 给出了这两款产品的详细性能参数。

表 4 Sofradir 公司热红外焦平面组件性能指标详细参数
Table 4 The performance of the thermal infrared FPA of Sofradir Corp

参数名称	参数值	
组件	Mars LW K508	Mars VLW RM4
像素大小	$30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$	
面阵规模	320×256	
制冷机类型	K508 集成斯特林制冷机	RM4 集成斯特林制冷机
波长响应范围	$7.7 \mu\text{m} \sim 9.3 \mu\text{m}$	$8.0 \mu\text{m} \sim 11.5 \mu\text{m}$
焦平面工作温度	$65 \sim 77 \text{ K}$	$65 \sim 77 \text{ K}$
组件功耗	19 W@ 制冷中(约 5 分钟到达),9 W@ 正常工作	19 W@ 制冷中(约 5 分钟到达),9 W@ 正常工作
最高帧频	320 Hz	
像素填充率	90% 以上	

4 我国的技术现状和发展趋势

热红外高光谱成像技术及应用在我国尚未开展全面研究,上海技物所、西安光机所均成功研制过空间高光谱成像仪,但光学谱段仅限于可见和短波红外。上海技物所于上世纪 90 年代开始由薛永淇院士领衔研制了成像光谱领域的经典仪器-实用化模块型成像光谱仪 OMIS^[8],它采用光机扫描的技术体

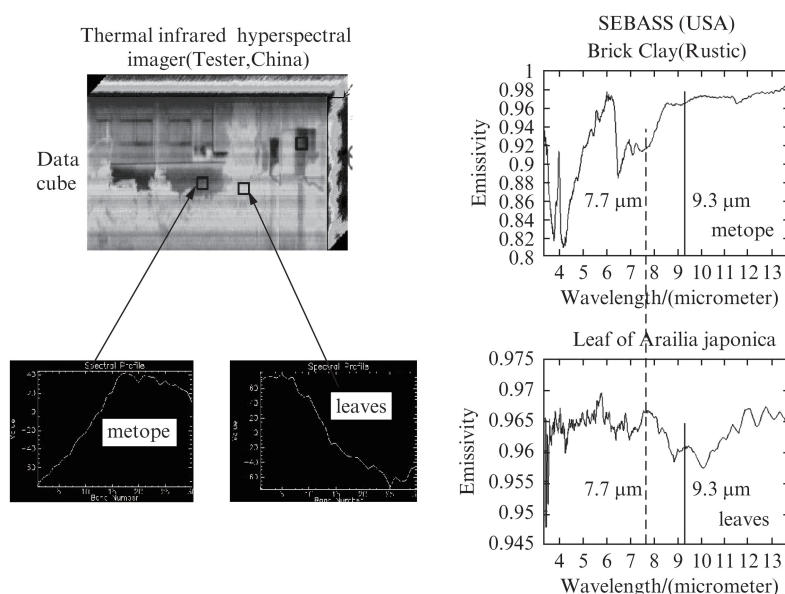


图 8 热红外高光谱成像试验装置获取的同谱段数据与美国 SEBASS 的比较
Fig. 8 Comparison of the spectrum data acquired by The thermal infrared hyperspectral imager (Tester, China, 2009) and SEBASS (USA, 1996)

制,在热红外实现有 8 个波段的成像,国内部分业务部门利用它的热红外多光谱信息开展了广泛应用,为目前开展热红外高光谱技术的研究奠定了良好的基础。

从“十一五”期间,依托国家高科技发展 863 计划支持和 OMIS 仪器的技术基础积累,上海技物所在国内首次开展了星载热红外高光谱成像系统研究,完成试验装置研制,使用闪耀平面光栅作为分光部件,采用 MARS LW K508 热红外焦平面组件为探测器,项目突破了热红外精细分光和背景辐射抑制两项关键技术^[5],实现了地面成像,经测试获取的目标热红外高光谱曲线在同波段与美国的 SEBASS 系统类似,试验装置的主要性能指标如下:

工作波段: 7.7 ~ 9.3 μm

光谱分辨率: 53 nm

波段数: 32

分光方式: 平面光栅

空间分辨率: 0.75 mrad

背景抑制器: 带通滤光片结合 173 K 的全光路液氮制冷

温度灵敏度: 0.26 K@300 K^[9]

背景抑制器: 带通滤光片结合 173 K 的全光路液氮制冷

以上研究工作得到了国家 863 领域专家组的好评。“十二五”期间,上海技物所联合中科院地理所等单位得到 863 计划的重点支持,开始研制能够满足工程应用的热红外高光谱成像仪样机及应用系统,样机采用了“推扫成像 + 延伸波长热红外探测器^[10] + 色散型分光组件 + 背景抑制模块 + 机上实时定标”的总体技术路线,利用 2.8 W@77 K 的斯特林制冷机作为冷源,对含狭缝、焦平面在内的分光部件进行整体制冷到 100 K 以下,该系统主要技术参数如下:

工作波段: 8.0 ~ 10.5 μm

波段数: 大于 128 个

分光方式: 平面闪耀光栅

空间分辨率: 1 mrad

灵敏度: <200 mK@300 K(平均)

探测器: 320 × 256 (VLW RM4)

背景抑制方式: 全光学低温制冷(小于 100 K)

辐射定标精度: 优于 5% (采用高低温黑体机上实时辐射定标)

图 9 给出了样机模装图,目前已经完成详细设

计,部件已投产,预计 2015 年初完成研制,该项目的研究成果将为我国科技中长期规划“高分辨率对地观测重大专项”(以下简称“高分专项”)二期的相关卫星载荷奠定基础,特别是能应用于空间环境的大冷量低温光学系统的技术突破。

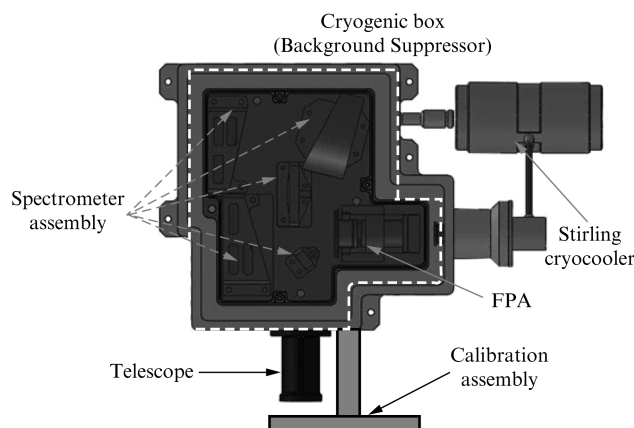


图 9 热红外高光谱成像仪工程样机模装图(上海技物所)
Fig. 9 The model of engineering thermal infrared hyperspectral imager (SITP)

目前,我国在这一领域仍处空白,相关业务部门(如国土资源部)对热红外高光谱成像仪器需求非常迫切。综合国外典型仪器和国内目前的研究水平来看,目前热红外高光谱成像仪多以机载平台应用为主,受平台资源限制星载仪器并不多见,但也是技术发展的必然趋势,按目前的技术水平,其设计指标通常如下:

光谱范围: 8.0 ~ 12.0 μm 之间

光谱分辨率: 30 ~ 100 nm 之间

波段数: 32 ~ 256 之间

空间分辨率: 一般在 mrad 量级(机载系统)

空间分辨率: 一般在 100 μrad 量级(星载系统)

5 结论

热红外高光谱成像仪技术目前在我国仍然处于探索阶段,由于其对背景辐射的敏感以及低温光学技术的需求,研制难度非常大,但因其在地矿勘探、林火监测、旱灾监测、城市热岛效应、探矿、探地热、岩溶区探水等领域的重要作用,引起越来越多的关注,另外,从上文提到的我国国家层面的科技规划来看,热红外高光谱成像技术及应用未来将得到大力支持和发展的。

References

- [1] Lucey P G, Williams T H, Mignard M, *et al.* AHI: an airborne long wave infrared hyperspectral imager[J]. *Proceedings of SPIE*, 1998, 3431: 36-43.
- [2] Tong Qing-Xi, Zhang Bing, Zhen Lan-Fen. *Hyperspectral Remote Sensing Principle, Technology and Application*, [M] Beijing: Higher Education Press (童庆禧, 张兵, 郑兰芬. *高光谱遥感原理、技术与应用*, 北京: 高等教育出版社), 2006.
- [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] 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.
- [5] Wang Jian-Yu, Xu Wei-Ming, Yuan Li-Yin, *et al.* Operational Modular Imaging Spectrometer [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.
- [6] 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
- [7] Mars LW K508 $320 \times 256/256 \times 256$ LW IR comos multi-mode integrated detector dewar cooler assembly (iddca) with microcooler type k508 technical specification [Z]. Sofradir Corp. 2004.
- [8] 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.
- [9] Wang Jian-Yu, Wang Yue-Ming, Li Chun-Lai. Noise model of hyperspectral imaging system and influence on radiation sensitivity. [J] *Journal of Remote Sensing* (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, *遥感学报*), 2010, **14**(4): 614-620.
- [10] Li Chunlai, Lin Chun, ChenXiao wen, *et al.* Space-borne LWIR FPA imaging system, *J. Infrared and laser Engineering* [J]. (李春来, 林春, 陈小文, 等. 星载长波红外焦平面成像系统. *红外与激光工程*), 2012, **41**(9): 2253-2260.

(上接 43 页)

3 结论

通过化学溶液法在钽铝石榴石单晶衬底上成功制备了具有单一尖晶石相的 MCN 薄膜. 薄膜表面均匀致密, 均方根粗糙度约 6.2 nm, 平均晶粒尺寸约 100 nm. 在 2.5 ~ 5 μm 波段, 薄膜具有明显的红外吸收. 通过研究其电阻率-温度关系, 利用最近邻跃迁模型拟合得出薄膜的特征温度约为 2 530 K, 室温下的负温度系数约为 $-3.66\% \text{K}^{-1}$, 与已经报道的结果相当.

References

- [1] Hou Y, Huang Z M, Gao Y Q, *et al.* Characterization of $\text{Mn}_{1.56}\text{Co}_{0.96}\text{Ni}_{0.48}\text{O}_4$ films for infrared detection [J], *Appl. Phys. Lett.* 2008, **92**: 202115.
- [2] Yokoyama T, Abe Y, Meguro T, *et al.* Preparation and Electrical Properties of Sintered Bodies Composed of Monophase Spinel $\text{Mn}_{(2-x)}\text{Co}_{2x}\text{Ni}_{(1-x)}\text{O}_4$ ($0 \leq x \leq 1$) Derived from Rock-Salt-Type Oxides [J], *Jpn. J. Appl. Phys.*, Part 1 1996, **35**: 5775.
- [3] Shan P C, Celik-Butler Z, Buter D P, *et al.* Investigation of semiconducting YBaCuO thin films: a new room temperature bolometer [J]. *J. Appl. Phys.* 1996, **80**: 7118-7123.
- [4] Lavenuta G. Negative temperature coefficient thermistors sensors [J], *Sensors*, 1997, **14**: 46-55.
- [5] Suzuki M. A. c. hopping conduction in Mn-Co-Ni-Cu complex oxide semiconductors with spinel structure [J], *Phys. Chem. Solids*. 1980, **41**: 1253-1260.
- [6] Parlak M, Hashemi T, Hogen M J, *et al.* Electron beam evaporation of nickel manganite thin-film negative temperature thermistors [J] *Journal of Materials Science Letters*, 1998, **17**: 1995-1997.
- [7] Lai P T, Li B, Li G Q. Thin-film NTC resistor based on $\text{SrNb}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$ [C]. Hong Kong: 1999 IEEE Hong Kong Electron Devices Meeting, 1999.
- [8] Lee M H, Yoo M N. Detectivity of thin film NTC thermal sensors [J]. *Sens Actuat A*, 2002, **96**(1): 97-104.
- [9] Lee M H, Yoo M N. Detectivity of thin film NTC infrared sensors [J]. *Proc SPIE*, 2001, 4288: 422-429.
- [10] He L, Lin Z Y. Studies of temperature dependent ac impedance of a negative temperature coefficient Mn-Co-Ni-O thin film thermistor [J], *Appl. Phys. Lett.* 2011, **98**: 242112.
- [11] Wu J, Huang Z M, Hou Y, *et al.* Structural, electrical, and magnetic properties of $\text{Mn}_{2.52-x}\text{Co}_x\text{Ni}_{0.48}\text{O}_4$ films [J], *J. Appl. Phys.* 2010, **107**: 053716.
- [12] Schmidt R, Basu A, Brinkman A W, *et al.* Electron-hopping modes in NiMn_2O_4 materials [J], *Appl. Phys. Lett.* 2005, **86**: 073501.