

航空红外光电遥感技术最新进展

王崇儒^{1,2,3}, 杨利峰^{1,3,4}, 曹 汛⁵, 王跃明^{1,2,3*}

1. 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;
2. 国科大杭州高等研究院, 浙江 杭州 310024;
3. 中国科学院大学, 北京 100049;
4. 北京市遥感信息研究所, 北京 100011;
5. 南京大学电子科学与工程学院, 江苏 南京 210123)

摘要: 航空红外光电遥感技术具有可全天时工作、机动灵活、空间分辨率高等不可替代的优势, 是遥感科学、国土监测、国防应用等领域的重要手段。发展航空红外光电遥感技术对我国的经济发展和国防建设至关重要。近年来, 航空红外光电遥感技术发展很快, 在高光谱分辨率红外成像和高空间分辨率红外成像方面取得了重大突破。高空间分辨率、高光谱分辨率、高时间分辨率、高辐射分辨率是红外光电仪器发展的重要方向, 本文在介绍国际最新进展的同时, 给出了上海技术物理研究所航空遥感团队在全谱段高光谱、面阵扫描成像两个方面的重要技术突破, 成功应用于土地分类、核电站温排水监测等方面, 展示了最新成果。

关键词: 航空遥感; 高光谱成像; 红外面阵扫描成像; 焦平面; 光谱仪; 航空红外相机
中图分类号: TN215 文献标识码: A

Recent progress of airborne infrared remote sensing technology in SITP

WANG Chong-Ru^{1,2,3}, YANG Li-Feng^{1,3,4}, CAO Xun⁵, WANG Yue-Ming^{1,2,3*}

1. Key Laboratory of Space Active Opto-Electronics Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. Hangzhou Institute for Advanced Study, University of Chinese Academy of Sciences, Hangzhou 310024, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
4. Beijing Remote Sensing Information Research Institute, Beijing, 100011, China;
5. School of Electronics Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210123, China)

Abstract: Airborne infrared remote sensing technology has irreplaceable advantages, such as full-time work, flexibility and high spatial resolution, etc. It plays a key role in remote sensing science, land monitoring, national defense applications, etc. Development of airborne infrared remote sensing is vital to our country's national defense and economic development. In recent years, airborne infrared remote sensing technology has developed rapidly, with crucial breakthroughs in high spectral resolution infrared imaging and high spatial resolution infrared imaging. To get higher spatial resolution, spectral resolution, temporal resolution and radiometric resolution are missions of infrared technology research group. While introducing the latest international developments, the paper presents significant technological breakthroughs made by the Shanghai Institute of Technical Physics airborne remote sensing team in full-spectrum hyperspectral imaging and area-array scanning imaging. New generation instruments have been successfully applied to land classification, thermal drainage monitoring of nuclear power plants and other application fields. The latest results are given.

Key words: airborne remote sensing, hyperspectral imaging, infrared area-array scanning imaging, focal plane array, spectrometer, airborne infrared camera

收稿日期: 2021-11-08, 修回日期: 2021-11-28

Received date: 2021-11-08, Revised date: 2021-11-28

基金项目: 国家自然科学基金(61627804)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (61627804)

作者简介(Biography): 王崇儒(1993—), 男, 山西文水人, 博士研究生, 主要研究领域航空面阵扫描系统、视轴稳定系统. E-mail: wangchongrucas@foxmail.com

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

引言

光学成像技术是空间对地遥感观测的主要技术手段之一。根据搭载平台不同,光学对地遥感成像可以分为航天遥感和航空遥感两类,与航天遥感相比,航空遥感距探测目标更近,低空遥感不易受到大气云层遮挡,接收的地面辐射能量更强,可以方便地获取更高空间分辨率的图像。现今公开的最先进低轨遥感卫星 WorldView-3^[1] 可以获取最高 0.31 m 空间分辨率的地面影像,但中国科学院上海技术物理研究所(简称上海技物所)研制的一款一亿像素的双波段航空相机,可以在 500 m 航高下获取 15 mm 空间分辨率的地面影像,航空遥感成像在空间分辨率上依然占有巨大优势。根据光电探测器及大气窗口的特点,光学遥感还可分为可见光遥感与红外遥感两类,其中红外遥感仪器可以直接探测目标在可见光波段无法探测到的辐射特性,并且能够实现全天时工作,具有广阔的应用场景。

航空红外光电遥感技术至今仍为遥感技术领域的重要发展方向之一,广泛应用于地质测绘、环境监测、植被分析、大气表征、生物化学探测和灾害评估等领域;此外还有许多军事方面的重要应用,如伪装识别、战场空间信息采集、目标和诱饵的识别区分、大规模毁伤性武器探测等。现今,主流的航空红外光电遥感技术包括高光谱分辨率红外成像技术和大视场高空间分辨率红外成像技术。

高光谱分辨率红外成像技术是集光谱探测与成像为一体的光学遥感技术,其代表性仪器是高光谱分辨率的光谱成像仪。光谱成像仪除了能探测目标场景空间特征之外,还能同时对各个空间目标像元分光,并形成纳米量级分辨率的光谱信息,从而获得图谱合一的目标光谱曲线影像。光谱成像仪的光谱采样间隔越小,光谱分辨率越高,获取的光谱信息越精细,可以更精确地反映出地物光谱的细微特征。高光谱分辨率是光谱成像仪的主要发展方向之一^[2]。

大视场高空间分辨率红外成像技术的代表性仪器是红外面阵扫描相机。红外面阵成像解决了以往红外线阵成像空间分辨率低、像元驻留时间短的问题,瞬时视场可以达到微弧度量级,但是受限于红外探测器面阵规模^[3],探测器的成像视场很小,作业效率低下,红外面阵扫描成像应运而生,在不降低空间分辨率的前提下,大大提高了成像视场

角,使大视场高空间分辨率红外成像成为可能。上海技物所研制的一款探测器规模 640×512、瞬时视场角 50 μrad 的高分辨率红外面阵扫描相机,可以通过面阵扫描在保持较大速高比的情况下实现 60° 以上的视场角,相同指标情况下,如果使用线阵探测器则至少需要一行 20 000 个像元进行推扫,兼顾大视场与高空间分辨率是红外面阵扫描相机的主要技术优势。

随着应用领域的不断扩展和深入,许多应用对光谱成像仪器和红外面阵扫描成像仪器提出了更高的要求。如为了节省飞行资源,提出了对作业效率的要求,作业效率与仪器视场角、作业高度、大速高比适应能力等因素相关;为了获取细节特征更为清晰丰富的目标图像、提高目标的识别分辨能力,提出了对成像精度的要求,成像精度主要取决于仪器的空间分辨率和辐射分辨率;以及仪器的通用性和跨平台搭载能力,满足小型运输机、无人机搭载的轻量化要求等。此外还有许多新的应用需求不断涌现,民用领域诸如气体、污染排放的定位定量检测、土壤植被精细分类、能源矿产勘查等;在军事应用方面,随着精确打击技术的发展,对侦察设备目标搜索、定位、跟踪能力提出的需求等。这些应用需求都对仪器的综合性能提出了更高的要求。

1 航空红外光电遥感技术特点分析

反映光谱成像仪器和红外面阵扫描成像仪器综合性能的主要指标有:视场角(Field Of View, FOV)、代表空间分辨率的瞬时视场角(Instantaneous Field Of View, IFOV)、体现辐射分辨率的信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)、光谱分辨率、光谱探测范围以及适应速高比、体积重量等。受红外焦平面技术的限制,红外系统很难同时满足大视场角与高空间分辨率的要求;缩短焦距可以增大视场角,但却会降低空间分辨率;减小探测器的像素尺寸可以提高空间分辨率,但会降低光学系统采集的有效探测能量、影响灵敏度、降低信噪比;增加光学系统的口径会增加进入仪器的有效探测能量,但这必然会导致体积和重量增加^[4];为了提高信噪比还可以增加积分时间,但却又影响了适应速高比。红外面阵扫描仪器使用翼展方向的扫描成像,在保证空间分辨率的情况下增大了视场角,但却又带来了扫描像移以及高精度扫描控制的难题;光谱成像仪器的高精度分光系统可以提高光谱分辨率,但也会降低光谱成像仪每个光谱波段的有效探测能量,影

响信噪比。另外,不同于航天遥感,航空遥感仪器还面临飞机低空高速飞行时带来的像移问题,如美国的B1B轰炸机可以进行50 m高度下1100 km/h的低空突防飞行,速高比达到6,对于一个640×512像元50 μrad 瞬时视场角的中波红外相机来说,3 ms曝光时间内的像移已经横跨半个探测器,除此之外还有飞机姿态变化带来的视轴扰动,如果不进行精确的补偿,根本无法进行连续成像。

因此,光谱成像仪器和红外面阵扫描成像仪器的设计研制需要平衡空间分辨率、光谱分辨率、视场角、时间分辨率、辐射分辨率以及仪器体积和重量等各方面的性能指标,此外还要解决扫描像移、飞行像移以及飞机姿态扰动等各种成像难题。以下针对光谱成像仪器和红外面阵扫描成像仪器当中具有代表性的高光谱分辨率光谱成像仪器和大视场高空间分辨率红外面阵扫描成像仪器,分别阐述其为提高仪器性能指标和克服成像难题,在探测器技术、分光技术、制冷技术、视场拼接技术、像移补偿技术以及视轴稳定技术等相关方面所做出的努力与取得的最新进展。

2 高光谱分辨率红外成像技术

2000年之前,经典的机载光谱成像仪器有: AIS、AHS、AISA、APEX、ARES、AVIRIS、DAIS-7915、HyMap、HYDICE、MIVIS和OMIS等^[5],这些经典的光谱成像仪器已经拥有了很强的综合性能,极大推动了光谱成像技术的应用发展。自2010年以来,光谱成像技术又取得长足进展,涌现了一批新一代高光谱分辨率光谱成像仪器(以下简称高光谱成像仪器),如CASI/SASI/TASI^[6]、AVIRIS-NG^[7]、HyTES^[8,9]、SYS-IPHE^[10]和AMMIS^[11]等,代表了高光谱分辨率红外

成像技术的最新进展。其中,最具技术代表性的三台仪器:AVIRIS-NG、SYSIPHE、AMMIS详细对比参数如表1所示。

2.1 AVIRIS-NG

美国宇航局的“AVIRIS-NG”是为高光谱分辨率成像而设计的具有高信噪比的推扫式光谱成像仪器,是经典机载可见红外光谱成像仪(AVIRIS-C)的继承者^[12]。该仪器使用一个640×480的HgCdTe焦平面阵列覆盖了整个380–2510 nm光谱范围,光谱分辨率为5 nm,空间分辨率为1 mrad,视场角为36°^[13]。迄今为止,它已经在Twin Otter、the King Air B-200、美国宇航局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)的高空ER-2等多种平台上进行过搭载飞行^[14]。

AVIRIS-NG的系统结构如图1(a)所示^[15],包括封装在真空外壳中的传感器组件、高精度INS/GPS、焦平面电子学组件、机载校准器(On-Board Calibrator, OBC)源、加热器盒、隔振支架和一个可选的激光雷达。传感器封装在一个真空容器当中,如图1(b)所示^[15],主要传感器组件包括光学望远镜、分光计、探测器、车载校准器和将组件悬挂在仪器背板上的运动支柱,真空容器中设有两个主动机械制冷器和三个热屏蔽罩,内部温度可降至-120 °C,以抑制光机仪器的热辐射背景噪声、探测器各个波段暗电流噪声。

AVIRIS-NG的光学系统如图2所示,采用了电子束空气狭缝、Offner结构分光计以及双镜全反射望远镜^[15]。

根据探测器的光谱响应范围要求,探测器选择合适的光敏材料,如图3所示^[16]。AVIRIS-NG采用的HgCdTe (MCT)材料由于截止波长可调(通过

表1 新一代代表性高光谱成像仪器

Table 1 A new generation of representative hyperspectral imaging instruments

仪器名称	研制时间	光谱范围(μm)	通道数	光谱分辨率(nm)	IFOV(mrad)	FOV($^{\circ}$)
AVIRIS-NG	2013	0.38–2.51	430	5	1	36
SYSIPHE	2013	VNIR 0.40–1	560	5	0.25	15
		SWIR 0.95–2.5		6.1		
		MWIR 3.0–5.4		11 cm^{-1}		
		LWIR 8.1–11.8		5 cm^{-1}		
AMMIS	2017	UV 0.2–0.32/0.32–0.5	512	0.3–0.5	0.5×5	40
		VNIR 0.4–0.95	256	5	0.25	
		SWIR 0.95–2.5	512	5	0.5	
		LWIR 8–10.5	64	32	1	
		LWIR 10.5–12.5	4	500	1	

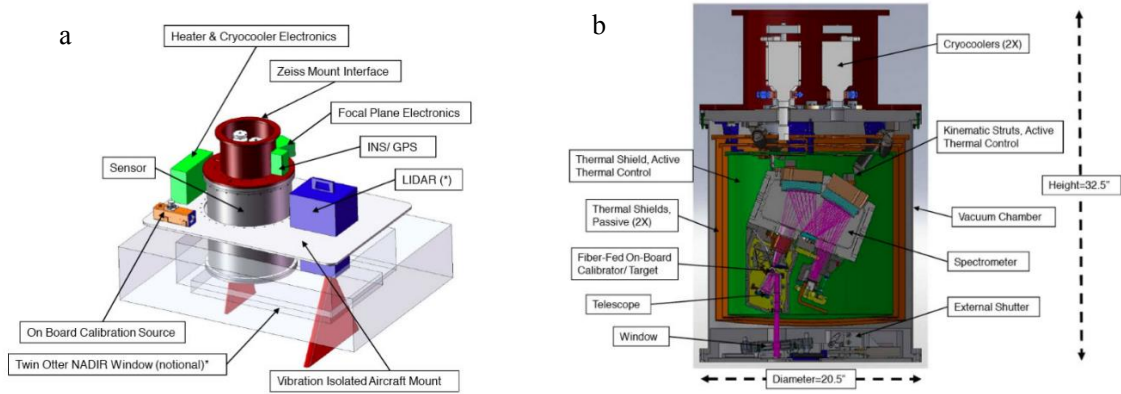


图1 (a) AVIRIS-NG 整体系统结构图和(b)传感器内部构造图
 Fig. 1 (a) Overall system structure diagram and (b) sensor internal structure diagram of AVIRIS-NG

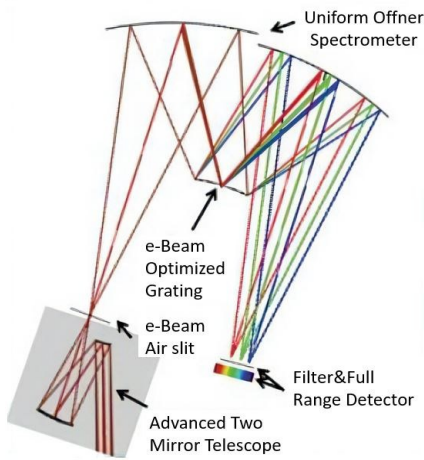


图2 AVIRIS-NG 的光学系统
 Fig. 2 Optical system of AVIRIS-NG

Cd_xHg_{1-x}Te 合金的 Cd/Hg 比值), 可覆盖从 0.4 μm 到近 20 μm 的非常宽的检测带宽, 这使得 MCT 成为该领域的首选材料。AVIRIS-NG 的 HgCdTe 探测器阵列由 Teledyne Imaging Sensors Inc. 研制, 通过移除 HgCdTe 焦平面阵列芯片衬底使可见光谱部分的灵敏度提高, 并提高了器件集成度。

与前代 AVIRIS 采用的扫帚式 (whiskbroom) 成

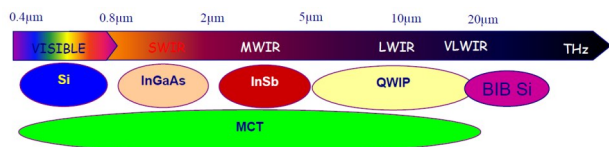


图3 不同材料探测器光谱响应范围
 Fig. 3 Spectral response range of detectors with different materials

像方式不同, AVIRIS-NG 采用推扫式 (pushbroom) 成像方式, 其主要区别在于没有复杂的机械扫描机构, 像素停留时间增加, 仪器的重量和体积减小, 信噪比得到显著提高, 加上宽谱段响应 (兼顾可见光、近红外、短波红外) 的 HgCdTe 焦平面阵列和真空主动制冷设备, AVIRIS-NG 的信噪比由 AVIRIS 的 150 提高到 2 000^[5]。

得益于 AVIRIS-NG 优异的信噪比带来的足够高的辐射分辨率以及较高的空间分辨率, AVIRIS-NG 已成功用于检测大面积甲烷 (CH₄) 排放源并量化单个源的排放量, 图 4 是基于 2.1~2.4 μm 的吸收光谱特征绘制的甲烷排放区域分布图^[5]。

2.2 SYSIPHE

SYSIPHE 是一套由法国航天实验室 (Onera) 和



图4 AVIRIS-NG 机上实时甲烷测绘图
 Fig. 4 On-board real-time methane mapping of AVIRIS-NG

挪威纳斯克电子光学公司(Norsk Elektro Optikk, NEO)联合开发的机载高光谱成像仪器,覆盖0.4~11.8 μm 的所有大气窗口波段,可以生成超过560个光谱波段的光谱辐亮度图像,空间分辨率0.25 mrad,视场角 15° 。为了同时实现宽光谱覆盖和高空间分辨率特性,SYSIPHE使用了4台光谱仪,集成在一架德国航空航天中心的Do228飞机上,如图5所示^[10]。



图5 搭载SYSIPHE的Do228

Fig. 5 SYSIPHE on Do228

NEO开发的HySpex Odin-1024^[17]包含可见近红外(Visible Near Infrared, VNIR)和短波红外(Short Wave Infrared, SWIR)两台基于透射式光栅分光的光谱成像仪。相对于棱镜分光,使用光栅分光最大的优点是光谱色散线性度好,最大衍射能量的波长位置可以通过改变闪耀角度来调整^[18],光栅分光是如今的机载高光谱成像仪最常采用的分光方式。两台光谱仪共享同一套光学系统和狭缝,以确保VNIR和SWIR图像的完美配准。SWIR波段使用MCT传感器,可提供1024像素分辨率的光谱图像,VNIR波段采用低噪声硅基CMOS图像传感器,可以选择提供2048或1024像素分辨率图像。

Onera的SieleTERS由两台不同的仪器组成,一台用于中波红外(Medium Wave Infrared, MWIR)光谱探测,一台用于长波红外(Long Wave Infrared, LWIR)光谱探测,每台仪器都采用专门设计的 1016×440 大面阵红外焦平面阵列。为了抑制背景辐射噪声,两台仪器均采用液氮冷却的低温光学装置。MWIR和LWIR光谱成像仪均使用基于改进型迈克尔逊干涉仪的静态傅里叶变换干涉分光计,与其他分光方式相比,傅里叶变换干涉分光计(Fourier Transform Interference, FTI)的优点是光通量高,同时具有较高的信噪比和光谱分辨率,但其局限性是需要复杂的光学机械结构和较高的平台稳定性。

SieleTERS的光学系统如图6所示^[19]。来自地面场景的光线首先通过一个宽波段透过的红外窗口进入仪器,折转镜将光线折转 90° 后入射到干涉仪内部的分束器上。然后光线穿过干涉仪到达成像光学系统,最后会聚在探测器焦平面上。为达到预期的光谱分辨率,MWIR干涉仪反射镜的最大光程差大约 $467 \mu\text{m}$,LWIR的最大光程差约为 $993 \mu\text{m}$ 。

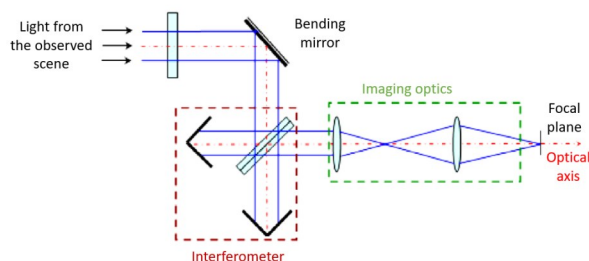


图6 SieleTERS的光学系统

Fig. 6 Optical system of SieleTERS

宽光谱覆盖结合高空间分辨率的特性,使SYSIPHE可以有更加丰富的应用场景,如增强型目标/背景(包括反伪装或目标/诱饵)分离或分类、土壤特性调查和分类、植被研究、气体或化学试剂检测、水深测量、水文研究等。

2.3 AMMIS

机载多模态光谱成像仪(Airborne Multimodular Imaging Spectrometer, AMMIS)是由上海技物所最新研制的一型覆盖紫外(ultraviolet, UV)、可见近红外(Visible Near Infrared, VNIR)、短波红外(Short Wave Infrared, SWIR)、长波红外(Long Wave Infrared, LWIR)等主要对地观测波段的航空高光谱成像仪器,成像波段近1400个,仪器高度一体化集成,可以装载于通用PAV-80平台上,如图7所示,光谱采样率3 nm,单行推扫像元数达3000元(VNIR),是现有航空高光谱成像仪器当中最多的,视场角达 40° ,可适应不高于0.04的速高比,作业能力达1000平方公里/架次@2 km航高,综合能力达到国际领先水平。

AMMIS各波段光学系统如图8所示,可见/短波波段分光计采用平面反射光栅-棱镜组合(Prism-Grating, P-G)分光技术,P-G分光技术结合平面闪耀光栅分光和棱镜分光的优势,既可获得线性色散光谱,又有利于光谱弯曲校正,得以实现了3 nm左右的光谱采样间隔,光学系统如图8(a)所示,来自地物目标的光线经离轴三反主光学系统、狭缝、准

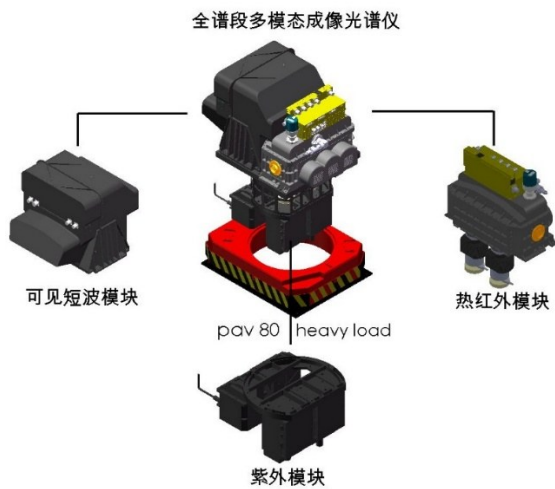


图7 全谱段多模态光谱成像仪
Fig. 7 AMMIS

直镜和折转镜后,由分色镜分成短波波段和可见光波段两个通道,两通道分光计均采用P-G分光组件分光,利用棱镜分光光谱向短波方向弯曲而光栅分光光谱向长波方向弯曲,相互补偿光谱仪的光谱弯曲,使光谱弯曲控制在 $2\ \mu\text{m}$ 以内,实现高光谱分辨率分光的同时保证最小光谱弯曲和成像质量^[20]。

长波红外使用平面闪耀光栅分光技术,采用利于系统轻小化的二次三反结构,如图8(b)所示^[21]。紫外谱段使用了一种 offner 结构的凸面光栅分光技术,具有无谱线弯曲、色畸变小、结构紧凑等特点,如图8(c)所示。

推扫式高光谱成像仪的一个缺点是很难同时获得大视场与高空间分辨率,AMMIS采用光学视场拼接技术实现了 40° 的系统视场,同时攻克了机械一体化安装、多传感器同步处理、多模块光学校正配准和标定等难题,保证了系统的空间分辨率不受影响。此外,为了抑制红外谱段的背景辐射噪声,AMMIS采用100 K低温光学技术。

2018年AMMIS在河北雄安新区进行了挂载飞行,得益于其大视场和高分辨率特性,该仪器在2100 m高度,仅用2个架次、使用20条航线就覆盖了约 $28\ \text{km}\times 48\ \text{km}$ 的作业区域,地面成图分辨率达到 $0.5\ \text{m}$ 。图9显示了利用高光谱图像的光谱曲线^[22],对不同地面元素进行了分类识别,显示了高光谱成像仪在作物信息提取、作物生长和品质监测、农业资源以及环境质量保护等方面的应用。

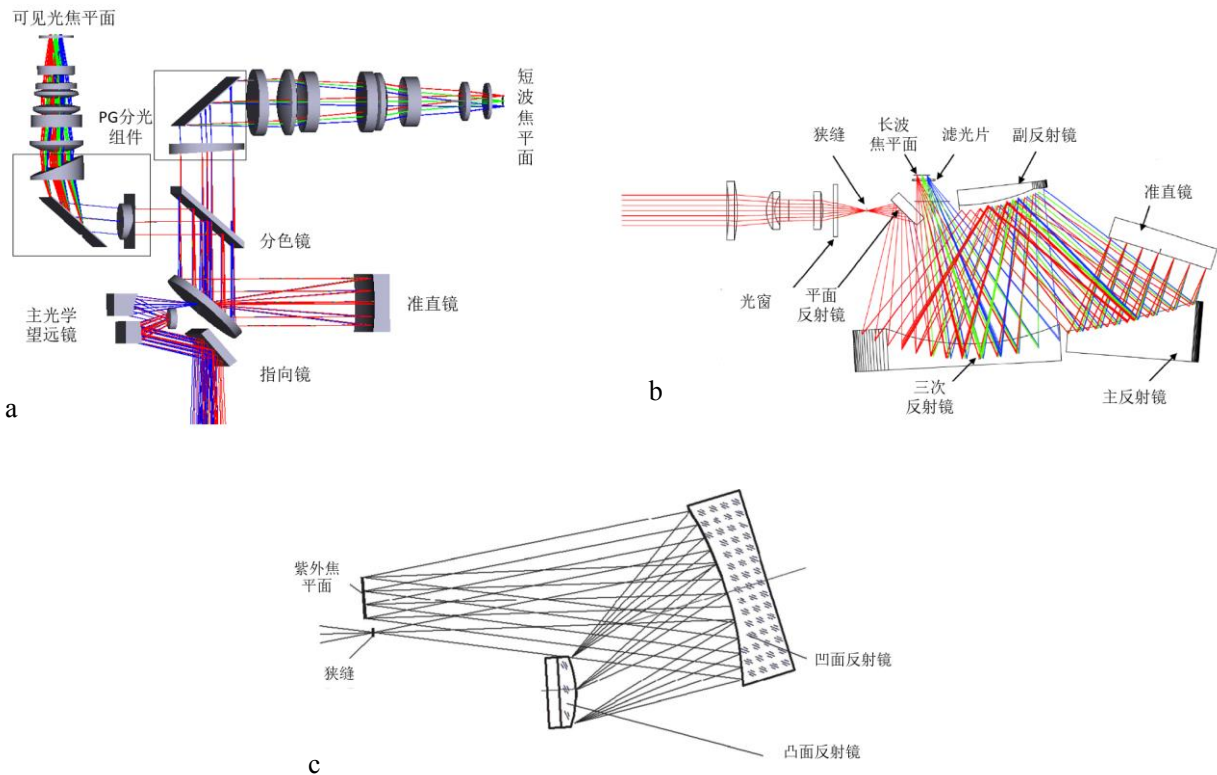


图8 各波段光学系统:(a)可见/短波波段,(b)长波波段,(c)紫外波段
Fig. 8 Optical system of each band:(a)VNIR/SWIR,(b)LWIR,(c)UV

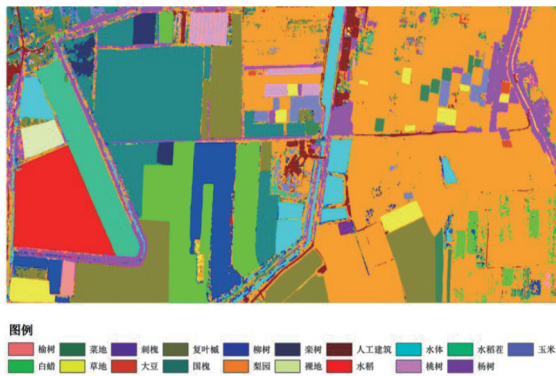


图9 地面元素分类识别图

Fig. 9 Classification and identification map of ground elements

3 大视场高空间分辨率红外成像技术

随着大视场高空间分辨率红外成像技术的不断进展,面阵扫描成像逐渐成为了航空红外相机的主流成像方式,具有代表性的仪器有美国 Godrich 公司的 DB-110 航空双波段相机^[23],另外还有美国侦查/光学公司(ROI)的 CA-260、CA-261、CA-265、CA-270、CA-290、CA-295 系列相机,其中 CA-295 是美军现役航空相机中较高档的类型,代表了当前航空相机领域的较高水准^[24],此外比较先进的还有 ELOP 公司的 Condor TAC 战术航空摄影相机^[25]、雷神(Raytheon)公司的全球鹰相机(TIER II Plus)等。国内从事相关研究的部门有上海技物所和长春光机所,其中上海技物所研制的一款第四代扫描型红外成像仪(SIRI-4)颇具特色,使用最小体积重量实现了大视场角和较高空间分辨率,其与 CA-295^[26]、TIER II Plus^[27]的参数对比如表 2 所示。

3.1 CA-295

ROI 公司的 CA-295 相机是一款 50 英寸焦距的中高空航空可见/红外双波段侦察相机,如图 10 所示,其具有两片独立的大面阵焦平面:2500 万像素

可见光焦平面和 400 万像素中波红外 InSb 焦平面,可实现可见、红外波段同时成像,无论白天还是夜间,都能捕捉到高分辨率的数字图像。其紧凑的尺寸允许集成在多种机载平台上,特别适合要求苛刻的美国海军(United States Navy, USN) F/A-18 E/F 共享侦察吊舱(SHARP)^[26]。

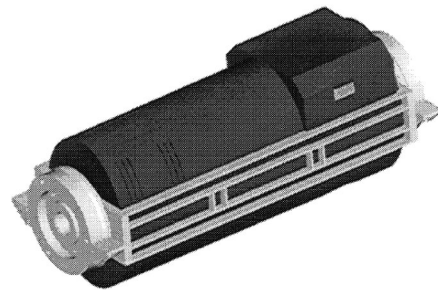


图10 CA-295 外形结构

Fig. 10 The exterior structure of CA-295

该相机的技术特色在于使用了具有分区梯度电子像移补偿功能的两片大面阵可见/红外焦平面,可见光焦平面为 5 K×5 K 像素,中波红外焦平面为 2 K×2 K 像素。焦平面阵列上的像素分为固定列区,每个列区以与该区域像移速度相对应的预定传输速率传输像素信息,传输速率可以根据载机运动速率的变化进行调整,以保证图像分辨率不受长曝光时间内像移的影响,大大减少了由于载机前向运动造成的图像模糊,保持了焦平面的高调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF),确保获取图像的质量。

图 11 是相机斜视模式下的成像示意图。在整个像平面中,每个位置的像移速度并不全都相同,它由镜头和地面点之间的距离 R 决定,距离越大,像移速度就越慢,所以平行于 x 轴的每列像素的像移速度基本等于该列像素 y 轴上像点的像移速度^[28]:

表 2 代表性的红外面阵成像仪器

Table 2 Typical infrared area-array imaging instrument

仪器名称	成像波段	面阵大小	像元尺寸 (μm)	IFOV(mrad)	FOV($^{\circ}$)	重量(kg)	外形尺寸(mm)
CA-295	可见	5 K×5 K	10	0.008(1270 mm 焦距)	180	181.6	1244(L)×508(W)×508(H)
	红外	2 K×2 K	25				
TIER II Plus	可见	1 024×1 024	9	0.005	-	-	-
	红外	640×480	20	0.01	-	-	-
SIRI-4	红外	320×256	30	1	70	5	195(L) ×138(W)×124(H)

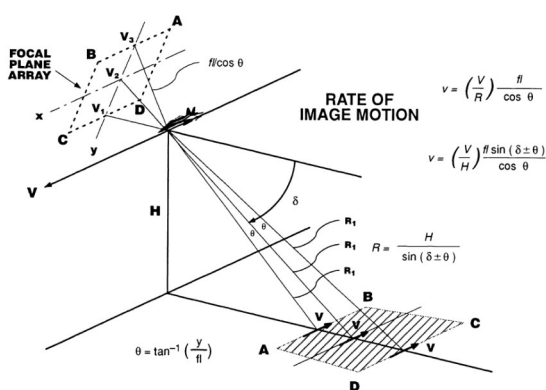


图 11 斜视模式下的成像示意图
Fig. 11 An imaging diagram in the oblique mode

$$v_y = fl \frac{V}{H} \frac{\sin(\delta + \theta(y - Y/2))}{\cos(\theta(y - Y/2))} \Phi(y - Y/2) + fl \frac{V}{H} \frac{\sin(\delta - \theta(y - Y/2))}{\cos(\theta(y - Y/2))} \Phi(Y/2 - y), \quad (1)$$

式(1)中, θ 为半视场角, fl 为焦距, V/H 是速高比, δ 为地平线到视场中心的俯角, Φ 函数定义为 $\Phi(x \geq 0) = 1, \Phi(x < 0) = 0$ 。

为了补偿整个焦平面图像运动的变化, ROI 使用了分区梯度前向运动补偿技术。整个焦平面被分成若干列区, 在曝光时间段内, 电荷沿像移的方向从一个像素转移到相邻像素。电荷转移速率在垂直像移方向上可变, 即分区梯度补偿。因此, 通过同步电荷转移和图像移动的速度, 可以在没有移动部件的情况下, 实现前向移动补偿。图 12 显示了这个技术在大像素焦平面中的实现^[28]。像素被按列分区, 每个列区有自己独立的电荷转移速率, 转移速率取决于列区中心的图像像移速率。电荷转移速率用箭头表示, 较长的箭头表示较快的速率, 离机下点越近的分区电荷转移速率越快。

具有分区梯度电子像移补偿功能的可见/红外焦平面不仅可以在斜视成像模式下进行前向像移补偿, 还可以在连续扫描成像模式下进行扫描像移补偿, 以产生极宽视场拼接图像。在该模式下, 通过转动折反射主透镜的主、次镜与子反射镜的方式进行前向像移补偿; 而在横滚方向, 则通过焦平面的电子像移补偿功能进行扫描像移补偿。横滚方向补偿速率可达 $\pm 30^\circ/s$, 俯仰方向为 $\pm 10^\circ/s$, 相机瞄准精度在横滚 $\pm 0.20^\circ$ 和俯仰 $\pm 0.20^\circ$ 以内^[26]。

3.2 TIER II Plus

美国 Raytheon 公司的全球鹰相机 (TIER II

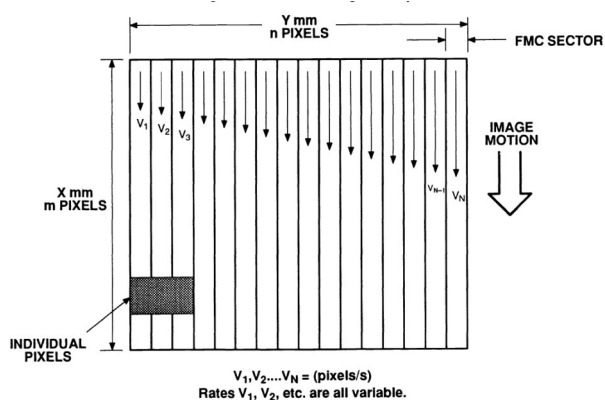


图 12 焦平面上的分区梯度前向运动补偿示意图
Fig. 12 Zonal gradient forward motion compensation diagram on focal plane

Plus) 是一种高空无人侦察机相机, 携带合成孔径雷达和可见/中波红外传感器, 具有广域侦察与目标定位能力, 为用户提供全天候、昼夜、高分辨率的地面目标图像^[27]。该相机安装在一个横滚/方位两轴稳定环架内, 瞬时视场仅为 $0.306^\circ \times 0.414^\circ$, 但是通过两轴旋转扫描配合快速扫描反射镜补偿的视轴扫描稳定技术, 极大提高了扫描效率, 同时稳定视轴, 相机可以 30 帧/s 的高帧频步进扫描成像, 也可以定点凝视成像, 从而实现大视场广域搜索和定点凝视功能^[26]。

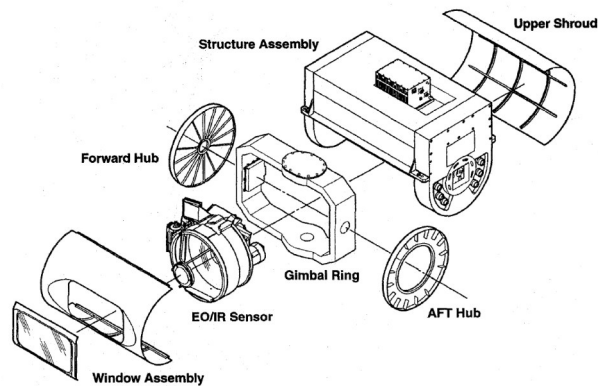


图 13 TIER II Plus 结构示意图
Fig. 13 Structure diagram of TIER II Plus

相机系统由一个安装在两轴环架上的可见/红外传感器系统组成, 可提供精确的视轴指向和稳定。传感器光学平台结构如图 13 所示^[27], 由反射式望远镜、中波红外/可见光探测器焦平面阵列、低温冷却器、光纤陀螺和两个像移补偿镜组成。每个环架都由直流力矩电机直接驱动, 并利用多速感应同步器读出其角位置信息。相机基座上安装一个惯

性导航系统(Inertial Navigation System, INS),提供飞机位置和姿态的惯性参考。中波红外传感器使用面阵焦平面,为了确保图像的信噪比,允许最大16 ms的积分时间。

TIER II Plus的关键技术在于两轴环架结合快速扫描反射镜的宽频视轴稳定技术。相机运动控制系统在这里承担着关键任务,其必须引导相机在广域搜索模式下无缝隙地成像覆盖以及凝视模式下的视轴锁定。控制系统获取的导航数据包括飞机的位置、速度、姿态等,通过算法生成所需的环架旋转角度和视轴惯性速率命令,确保传感器的图像以最小的重叠覆盖指定的区域。扫描反射镜提供了高频率的视轴稳定和扫描像移补偿。主运动控制回路如图14所示^[27],包括三个控制回路:

(1)低带宽(2~3 Hz)横滚/方位环架惯性位置控制

(2)中带宽(30 Hz)横滚/方位视轴速率稳定控制

(3)高带宽(200~300 Hz)横滚/方位扫描反射镜补偿稳定控制

宽频视轴稳定主要是通过中带宽速率稳定控制回路和高带宽扫描反射镜补偿稳定控制回路实现的。光纤陀螺安装在与传感器相邻的内环架上,陀螺敏感轴与相机转轴对齐。陀螺仪提供横滚轴/方位轴的惯性速率反馈,中带宽回路将其与所需的速率命令进行比较,在带宽限制内通过转动环架来消除载机扰动,超过中带宽回路带宽的扰动(但落在大约500 Hz的陀螺带宽内)将被高带宽扫描反射

镜回路的开环控制校正。最终相机的视轴稳定精度可达 $3 \mu\text{rad}$,稳定带宽达到300 Hz。

3.3 SIRI-4

第四代扫描型红外成像仪(Scanning Infrared Imager-4, SIRI-4)是上海技物所最新研制的一款轻量化、小体积、大视场、高灵敏度的航空热红外面阵扫描成像仪器,仪器在尺寸规格上极具优势,体积只有鞋盒大小,重量5 kg,只有该所上一代MAMS光机扫描式红外成像仪的三十分之一(SIRI-4和MAMS外形结构如图15所示),但却可实现与MAMS相同的最大 70° 穿轨视场角以及远高于MAMS的1 mrad空间分辨率(MASM为5 mrad)的对地热红外成像,仪器内部还集成高低温黑体,黑体温控采用TEC加热/制冷复合控制,可以实现高精度内定标。

SIRI-4系统结构如图16所示,相机包括扫描镜组件、红外镜头、探测器组件、黑体组件、电子学组件、机械制冷机和框架结构。光学系统采用折转式光学设计,系统布局为U型,扫描镜组件位于光学系统最前端。

SIRI-4的技术特色在于采用了双面扫描镜步进扫描、复合黑体定标的多功能紧凑型红外面阵扫描结构,通过双面镜的高频单帧步进扫描实现大视场成像,同时使用双面镜还可以实现机上绝对辐射定标。黑体组件位于摆镜正上方,采用高发射率面源黑体,半导体制冷器加热/制冷复合控温,可在较短时间周期内达到高低控温点,通过转动双面镜使视轴对准黑体,即可实现绝对辐射定标。这种扫描方式为相机带来大于 70° 的总视场角,扫描平均速

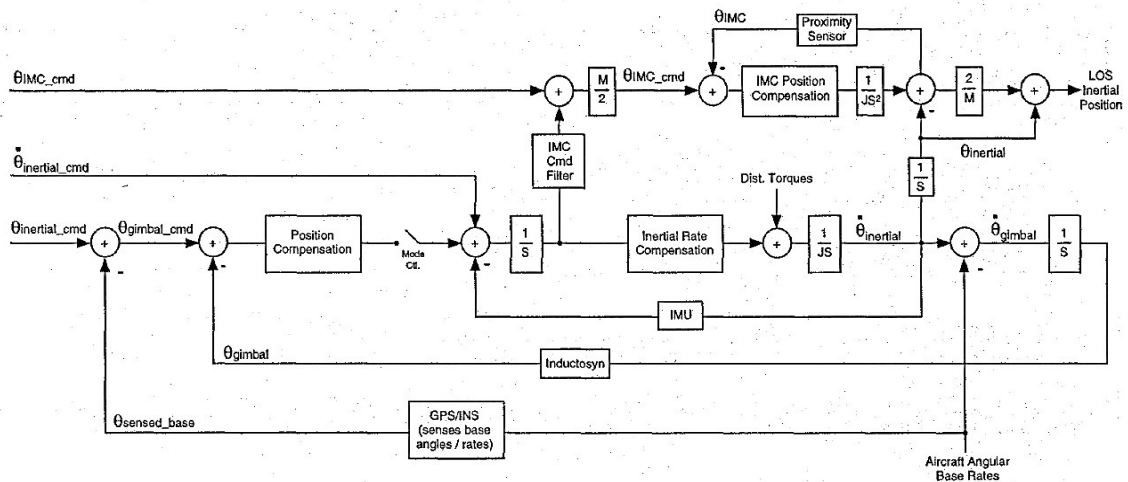


图14 TIER II Plus主运动控制回路

Fig. 14 Main motion control loop of TIER II Plus

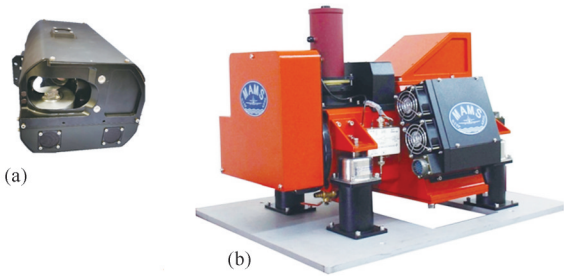


图 15 SIRI-4(a)和MAMS(b)外形结构
Fig. 15 The exterior structure of (a) SIRI-4 and (b) MAMS

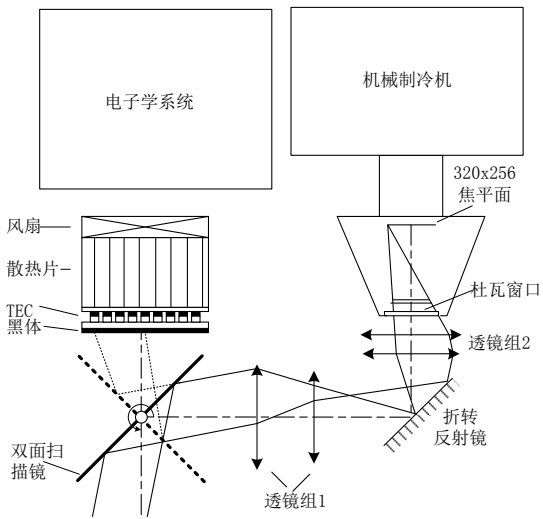


图 16 SIRI-4 系统结构示意图
Fig. 16 System structure diagram of SIRI-4

度 $30^\circ/s$, 成像最大速度 $573^\circ/s$, 双面扫描镜技术大大简化红外扫描成像系统光机结构, 为仪器的轻小化设计做出了很大贡献, 使仪器可以轻松搭载在各种平台, 图 17 是仪器集成在通用 PAV-80 平台上的示意图。

图 18 为 SIRI-4 在国内某核电站温排水检测工

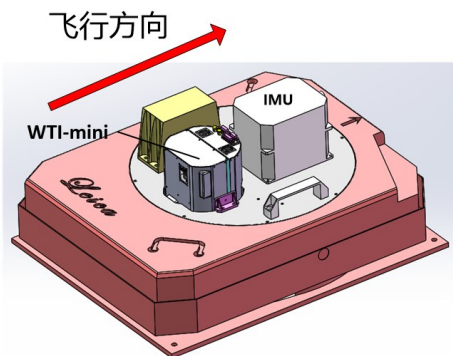


图 17 SIRI-4 集成在 PAV-80 平台
Fig. 17 SIRI-4 is integrated on the PAV-80 platform

作中获得的增强处理后不同潮态的热红外影像, 可以看出 SIRI-4 可以很好地完成海水中不同温度水体检测区分的工作。图 19(a)、(b) 分别是 SIRI-4 和 MAMS 在进行类似场景温排水检测工作时获得的影像细节, 通过对比可以看出, SIRI-4 在仪器体积重量占绝对优势的情况下, 可以实现与 MAMS 相同的温排水检测功能, 且在地物细节区分能力上显著提升。

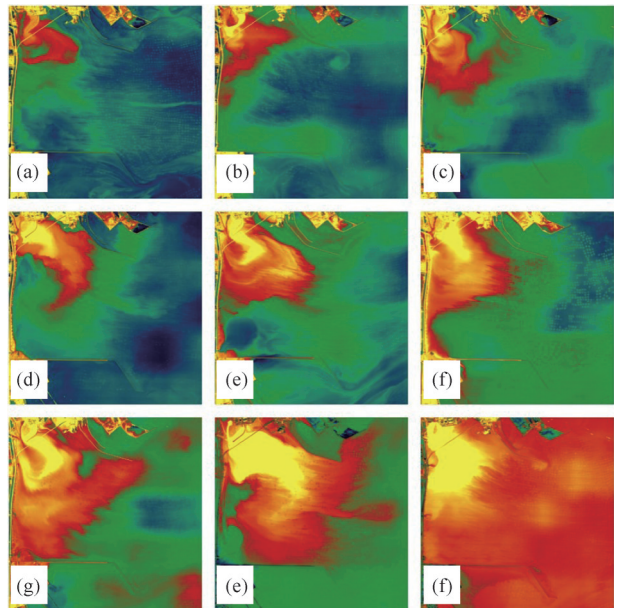


图 18 (a)-(i)SIRI-4 在不同潮态下的增强红外影像
Fig. 18 (a)-(i) Enhanced infrared images of SIRI-4 under different tidal conditions

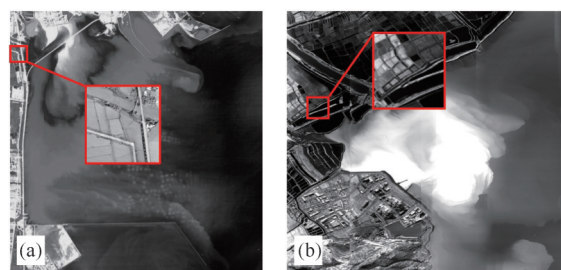


图 19 温排水检测影像分辨率对比: (a)SIRI-4 红外影像细节, (b)MAMS 红外影像细节
Fig. 19 Image resolution comparison of thermal drainage detection: (a) infrared image details of SIRI-4, (b) infrared image details of MAMS

4 结论与展望

随着探测器技术、分光技术、制冷技术、视场拼接技术、像移补偿技术以及视轴稳定技术等航空红外光电遥感相关技术的不断发展, 航空红外光电遥

感系统正向着更大视场角、更高空间分辨率、更高辐射分辨率、更高光谱分辨率、更高时间分辨率、更宽波段覆盖以及轻量化、模块化、高度集成化、通用化的方向发展,以进一步提高系统作业效率、地面成像精度和目标识别分辨能力,扩展可搭载平台类型,从而进一步扩展其应用领域。

对于高光谱分辨率红外成像技术,其重要发展方向还有量化与多传感器融合,将高质量的光谱图像数据量化,与诸如高分辨率的全色相机、多光谱成像仪相结合,可以更好地发挥光谱成像仪的优势。而对于大视场高空间分辨率红外成像技术,其关键的发展方向还有更高性能的扫描、稳定、补偿复合运动控制系统,结合高精度的载机位姿测量技术以及相机几何定标技术的发展,面阵图像数据拼接将可能彻底摆脱对图像重叠度的依赖,实现零重叠率快速实时无缝拼接。

把握航空红外光电遥感技术发展趋势,在技术变革的关键时期,抓住机遇,大力发展高光谱成像技术与面阵红外成像技术,全面提高航空对地观测能力,不仅有利于国民经济的发展,还将大幅提高我国国防安全力量。

References

- [1] Kruse F A, Baugh W M, Perry S L. Validation of Digital-Globe WorldView-3 Earth imaging satellite shortwave infrared bands for mineral mapping[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2015, **9**(1): 096044.
- [2] Wang Y M, Jia J X, He Z P, *et al.* Key technologies of advanced hyperspectral imaging system [J]. *Journal of Remote Sensing*. (王跃明, 贾建鑫, 何志平, 等. 若干高光谱成像新技术及其应用研究. *遥感学报*), 2016, **20**(5): 850 - 857.
- [3] WANG Yi-kun, QI Hong-xing, HANG Gui-cheng, *et al.* Study on light-small whiskbroom scanning thermal imaging system with area-array detector [J]. *Laser & Infrared*. (王义坤, 亓洪兴, 韩贵丞, 等. 轻小型面阵扫描热红外成像系统研究. *激光与红外*), 2015, **45**(10):5.
- [4] Jia J, Wang Y, Zhuang X, *et al.* High spatial resolution shortwave infrared imaging technology based on time delay and digital accumulation method [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, **81**: 305-312.
- [5] Jia J, Wang Y, Chen J, *et al.* Status and application of advanced airborne hyperspectral imaging technology: A review [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2020, **104**: 103115.
- [6] Zhang Jie-lin, Wang Jun-hu, Z Mi, *et al.* Aerial visible-thermal infrared hyperspectral feature extraction technology and its application to object identification[C]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2014, **17**(1): 012184.
- [7] Edberg S J, Evans D L, Graf J E, *et al.* Studying Earth in the New Millennium: NASA Jet Propulsion Laboratory's Contributions to Earth Science and Applications Space Agencies [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2016, **4**(1): 26-39.
- [8] Meerdink S, Roberts D, Hulley G, *et al.* Plant species' spectral emissivity and temperature using the hyperspectral thermal emission spectrometer (HyTES) sensor[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, **224**: 421-435.
- [9] Hook S J, Johnson W R, Abrams M J. NASA's hyperspectral thermal emission spectrometer (HyTES) [M]. *Thermal Infrared Remote Sensing*. Springer, Dordrecht, 2013: 93-115.
- [10] Rouvière L R, Sisakoun I, Skauli T, *et al.* Sysiphe, an airborne hyperspectral system from visible to thermal infrared[C]. 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). IEEE, 2016: 1947-1949.
- [11] Jia J, Wang Y, Cheng X, *et al.* Destriping algorithms based on statistics and spatial filtering for visible-to-thermal infrared pushbroom hyperspectral imagery [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, **57**(6): 4077-4091.
- [12] Hamlin L, Green R O, Mouroulis P, *et al.* Imaging spectrometer science measurements for terrestrial ecology: AVIRIS and new developments[C]. 2011 Aerospace conference. IEEE, 2011: 1-7.
- [13] Chapman J W, Thompson D R, Helmlinger M C, *et al.* Spectral and radiometric calibration of the next generation airborne visible infrared spectrometer (AVIRIS-NG) [J]. *Remote Sensing*, 2019, **11**(18): 2129.
- [14] Green R O, Team C. New measurements of the earth's spectroscopic diversity acquired during the aviris-ng campaign to India [C]. 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). IEEE, 2017: 3066-3069.
- [15] Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology. (2021). AVIRIS next generation. [OL]. Available: <http://avirisng.jpl.nasa.gov/>
- [16] Fièque B, Chorier P, Terrier B. Sofradir detectors for hyperspectral applications from visible up to VLWIR [C]. Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XIV. International Society for Optics and Photonics, 2010, **7826**: 78261I.
- [17] Blaaberg S, Løke T, Baarstad I, *et al.* A next generation VNIR-SWIR hyperspectral camera system: HySpex ODIN-1024 [C]. Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications XI. International Society for Optics and Photonics, 2014, **9249**: 92490W.
- [18] Wang Yueming, Lang Junwei, Wang Jianyu. Status and Prospect of Space-Borne Hyperspectral Imaging Technology [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*. (王跃明, 郎均慰, 王建宇. 航天高光谱成像技术研究现状及展望. *激光与光电子学进展*), 2013, **50**(1):8.
- [19] Coudrain C, Bernhardt S, Caes M, *et al.* SIELETTERS, an airborne infrared dual-band spectro-imaging system for measurement of scene spectral signatures[J]. *Optics express*, 2015, **23**(12): 16164-16176.
- [20] Yuan L, He Z, Wang Y, *et al.* Optical design and evaluation of airborne prism-grating imaging spectrometer [J]. *Optics express*, 2019, **27**(13): 17686-17700.

- [21] Yuan L, He Z, Lv G, *et al.* Optical design, laboratory test, and calibration of airborne long wave infrared imaging spectrometer [J]. *Optics express*, 2017, **25** (19): 22440–22454.
- [22] Zhang D, Yuan L, Wang S, *et al.* Wide swath and high resolution airborne hyperspectral imaging system and flight validation[J]. *Sensors*, 2019, **19**(7): 1667.
- [23] Lange D, Iyengar M, Maver L, *et al.* The Goodrich 3rd generation DB-110 system: successful flight test on the F-16 aircraft[C]. Airborne Intelligence, Surveillance, Reconnaissance (ISR) Systems and Applications IV. International Society for Optics and Photonics, 2007, **6546**: 654607.
- [24] Wyatt S H. Dual spectral band reconnaissance systems for multiple platforms [C]. Airborne Reconnaissance XXVI. International Society for Optics and Photonics, 2002, **4824**: 36–46.
- [25] Petrushevsky V, Tsur D. Condor TAC: EO/IR tactical aerial reconnaissance photography system[C]. Airborne Intelligence, Surveillance, Reconnaissance (ISR) Systems and Applications IX. International Society for Optics and Photonics, 2012, **8360**: 836003.
- [26] Lareau A G, Partynski A J. Dual-band framing cameras: technology and status [C]. Airborne Reconnaissance XX-IV. International Society for Optics and Photonics, 2000, **4127**: 148–156.
- [27] Held K J, Robinson B H. TIER II plus airborne EO sensor LOS control and image geolocation [C]. 1997 IEEE Aerospace Conference. IEEE, 1997, **2**: 377–405.
- [28] Lareau A G, Beran S R, Lund J A, *et al.* Electro-optical imaging array with motion compensation: U.S. Patent 5, 155,597[P]. 1992–10–13.