

文章编号: 1672-8785(2020)08-0001-08

航空航天高光谱成像仪研究 现状及发展趋势

付严宇 杨 桃* 关世豪

(空军航空大学航空作战勤务学院, 吉林 长春 130000)

摘 要: 由于具有光谱分辨率高、图谱合一的巨大优势, 高光谱成像技术近四十年来发展显著。当前机载和星载高光谱搭载平台可覆盖大范围的地球表面, 是遥感技术发展以来最重大的科技突破之一。它们在伪装揭露、武器生产调查、武器使用探测、近海监测和反潜等军事领域得到了成功应用, 并获得了显著的军事效果。回顾了国内外高光谱成像仪的发展历程, 同时总结分析了航空航天高光谱成像仪的主要特点。

关键词: 高光谱; 成像光谱仪; 航空航天

中图分类号: TP732 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2020.08.001

Research Status and Development Trend of Hyperspectral Imagers Onboard Airborne and Spaceborne Platforms

FU Yan-yu, YANG Guang*, GUAN Shi-hao

(School of Aviation Operations and Services, Aviation University of Air Force, Changchun 130000, China)

Abstract: Due to the great advantages of high spectral resolution and integrated maps, hyperspectral imaging technology has developed significantly in the past 40 years. The current airborne and spaceborne hyperspectral payload-carrying platforms can cover a wide range of the earth's surface, which are one of the most significant science and technological breakthroughs since the development of remote sensing technology. They have been successfully applied in military fields such as camouflage recognition, weapon production investigation, weapon use detection, offshore monitoring and anti-submarine, and have achieved significant military effects. The development history of hyperspectral imagers at home and abroad is reviewed, and the main characteristics of hyperspectral imagers onboard airborne and spaceborne platforms are summarized and analyzed.

Key words: hyperspectral; imaging spectrometer; airborne and spaceborne

0 引言

高光谱成像光谱仪也称为高光谱相机。在众多航空航天遥感成像方式中, 利用传统意义

上的可见光相机可以获得目标的二维图像, 进而了解目标的空间影像信息; 而利用成像光谱仪技术则可获得目标的二维空间图像和一维光

收稿日期: 2020-07-03

作者简介: 付严宇(1997-), 男, 江西樟树人, 硕士生, 主要研究方向为高光谱图像解译。

*通讯作者: E-mail: yg2599@126.com

谱信息(即图谱合一的高光谱图像信息), 并由此形成三维数据立方体(见图 1)。该技术可对地球表面上的目标进行信息提取, 使其直接反映出被观测物体的几何影像和理化信息, 实现对目标的探测、感知与识别, 从而获得其他遥感技术无法得到的数据信息^[1-2]。

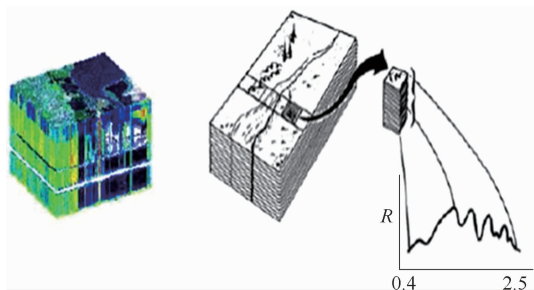


图 1 高光谱成像的原理图

高光谱图像所具有的优势使得世界各个科技强国竞相启动成像光谱仪科研项目, 越来越多在飞机和卫星平台上搭载的成像光谱仪研发成功, 光谱和空间分辨率都有很大程度的提升。在此背景下, 高光谱应用越来越精细, 涉及到的领域也越来越宽泛。

1 航空成像光谱仪

1.1 国外航空成像光谱仪

1983 年, 美国加州理工学院的喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)成功研制出了世界上第一台成像光谱仪——AIS-1。在 $0.4 \sim 1.2 \mu\text{m}$ 光谱范围内, 它可提供 128 个窄波段光谱信息, 进而产生一条近似完整且连续的光谱曲线。AIS-1 在矿物制图、植被、化学等方面的成功应用, 显示出了成像光谱仪的巨大发展前景^[3-4]。

1987 年, 美国又成功研制出了第二代高光谱成像仪——机载可见光/红外成像光谱仪(Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer, AVIRIS)^[5]。图 2 为 AVIRIS 的成像结构图。它工作在 $0.4 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 光谱范围内, 具有 224 个波段, 旨在为遥感从业人员提供高质量的成像光谱数据^[6]。

1989 年, 加拿大研制出了工作波段为 $0.4 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 、光谱分辨率为 1.8 nm 的紧凑型机

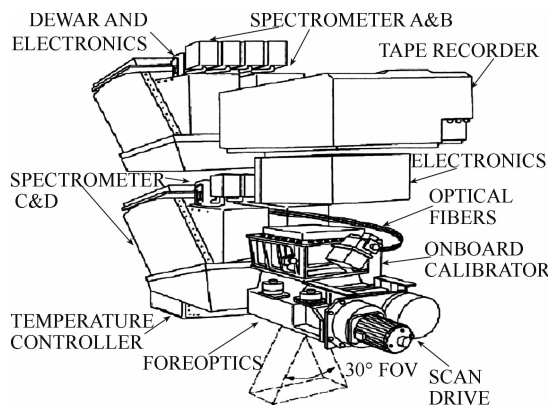


图 2 AVIRIS 的成像结构图

载光谱成像仪(Compact Airborne Spectrographic Imager, CASI)。它所用的推扫式扫描成像属于机载成像光谱仪中的新型成像方式^[7]。

为了确定将高光谱数据用于军事应用的可行性, 美国海军在 1991 年开展了高光谱数字图像采集试验(HYperspectral Digital Imagery Collection Experiment, HYDICE)仪器研究。休斯丹伯利光学系统公司负责对该光谱仪进行设计和制造, 而位于华盛顿州海军实验室的 HYDICE 计划办公室则一直在对其研制和操作工作进行管理^[8]。1996 年, HYDICE 仪器开始投入使用。它在 $0.4 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 光谱范围内具有波段宽度为 $3 \sim 20 \text{ nm}$ 不等的 210 个波段^[9]。

美国 TRW 公司研制的 TRWIS-III 仪器由两台成像光谱仪组成: 一台工作在 $370 \sim 1040 \text{ nm}$ 可见光-近红外(Visible and Near-infrared, VNIR)波段, 其光谱分辨率为 5.25 nm ; 另一台工作在 $890 \sim 2450 \text{ nm}$ 短波红外(Short-wave Infrared, SWIR)波段, 其光谱分辨率为 6.25 nm ^[10]。TRWIS-III 仪器的光谱范围很宽($0.4 \sim 2.5 \mu\text{m}$), 具有 384 个波段; 其可见光-近红外带宽仅为 5 nm , 短波红外也只有 6.25 nm , 信噪比达到 $300:1$ ^[11]。

澳大利亚 Integrated Spectronics 公司研制的 HyMap 仪器在 $0.45 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 光谱范围内有 126 个波段, 在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 和 $8 \sim 10 \mu\text{m}$ 内各有 1 个波段(共计 128 个波段)。其中, $2.0 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 短波红外波段的信噪比高于 $500:1$, 某些波段的信噪比甚至高达 $1000:1$ 。

20 世纪 90 年代, 航空成像光谱仪蓬勃发展。在高光谱遥感领域, 航空高光谱成像系统有 60 多套。这些系统具有稳定性强、探测效率高、综合技术性能好等突出优点。

1.2 国内航空成像光谱仪

我国的航空高光谱成像仪研究一直紧跟国际高光谱成像技术的发展前沿。20 世纪 80 年代, 中国科学院上海技术物理研究所开展了光谱成像技术的相关研究。1997 年, 该所和上海仙通信息技术研究所联合研制出了推帚式高光谱成像仪(Pushbroom Hyperspectral Imager, PHI)。由于采用了先进技术, PHI 成像光谱仪(见图 3)具有信噪比高、光谱分辨率好等特点^[12], 可覆盖 224 个波段, 且多用于绿色植被监测、生态环境检测等方面。



图 3 PHI 成像光谱仪

2001 年, 中国科学院上海技术物理研究所成功研发了实用型模块化成像光谱仪(Operational Modular Imaging Spectrometer, OMIS)^[13]。OMIS 具有两种工作模式: OMIS-I 型共有 128 个波段, 其中 $0.46 \sim 1.1 \mu\text{m}$ 光谱范围内有 64 个波段, 其光谱分辨率为 10 nm ; $1.06 \sim 1.70 \mu\text{m}$ 光谱范围内有 16 个波段, 其光谱分辨率为 60 nm ; $2.0 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 光谱范围内有 32 个波段, 其光谱分辨率为 15 nm ; $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 光谱范围内有 8 个波段, 其光谱分辨率为 250 nm ; $8 \sim 12.5 \mu\text{m}$ 光谱范围内有 8 个波段, 其光谱分辨率为 500 nm 。OMIS-II 型共有 68 个波段, 其中 $0.46 \sim 1.1 \mu\text{m}$ 光谱范围

内有 64 个波段, 其光谱分辨率为 10 nm ; $1.55 \sim 1.75 \mu\text{m}$ 、 $2.08 \sim 2.35 \mu\text{m}$ 、 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 、 $8 \sim 12.5 \mu\text{m}$ 光谱范围内各有 1 个波段^[14]。

20 世纪 80 年代, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所启动了光谱仪研究工作。2015 年, 该所研制出了主要用于矿物勘察的推扫式机载高光谱成像仪 WHPI。它工作在 $400 \sim 2500 \text{ nm}$ 光谱范围内, 包括可见光-近红外(VNIR)和短波红外(SWIR)两个工作区域。其中, VNIR 光谱范围为 $400 \sim 1000 \text{ nm}$, 光谱分辨率为 5 nm ^[6]。

表 1 列出了国内外各种航空成像光谱仪的性能参数。

1.3 航空高光谱成像仪的特点

航空高光谱成像仪具有以下几个特点:

(1) 由于其成像高度相对较低、空间分辨率较高, 我们能够更好地对目标地物进行识别和目视解译;

(2) 航空成像仪器能够即时升空到目标区域, 并通过对目标进行侦察来获取我们所需的图像, 但执行作战侦察任务时容易被敌方防空雷达和地空导弹等发现或击落;

(3) 航空成像需要考虑领空权边界问题, 因此在边境侦察时只能进行侧视探测;

(4) 航空成像的经济成本要求低, 且在相同的自然条件下, 成像效果受环境的影响比航天成像小。

2 航天成像光谱仪

2.1 国外航天成像光谱仪

21 世纪初, 美国 EO-1 卫星和欧洲 PROBA 卫星上的成像光谱仪相继升空, 标志着航天高光谱时代的来临。2000 年 11 月, Hyperion 仪器(见图 4)搭载美国国家航空航天局(NASA)的 EO-1 地球观测卫星升空。它是世界上首个进入民用领域的航天高光谱成像光谱仪^[15], 其幅宽为 7.5 km , 空间分辨率为 30 m , 光谱分辨率为 10 nm , 且在 $0.4 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 光谱范围内有 242 个连续波段^[16]。

2001 年 10 月 22 日, 欧洲空间局(ESA)发

表 1 国内外各种航空成像光谱仪的性能参数

成像光谱仪	参数指标						
	启用年份	制造方	空间分辨率	光谱分辨率	光谱范围	波段数	成像方式
AVIRIS	1987	美国 NASA 喷气推进实验室	20 m	10 nm	0.4~2.5 μm	224	—
HYDICE	1995	美国海军研究院	0.75 m	7~14 nm	0.4~2.5 μm	206	—
TRWIS-III	1996	美国 TRW 公司	1.8 m	VNIR: 5 nm SWIR: 6.25 nm	0.38~2.45 μm	—	推扫成像
HYMAP	1999	澳大利亚 Integrated Spectronics 公司	—	15~20 nm	0.4~2.5 μm	126	光机扫描式
CASI-3	2002	加拿大	—	—	0.4~1.0 μm	—	光机扫描式
PHI	1997	中国科学院上海技术物理研究所	—	—	0.4~0.85 μm	244	—
OMIS	2001	中国科学院上海技术物理研究所	6 m	VNIR: 5 nm SWIR: 6.25 nm	0.46~12.5 μm	—	光机扫描式

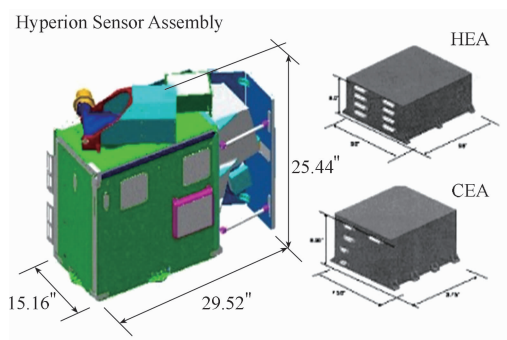


图 4 Hyperion 仪器的构成图

射了 PROBA-1 卫星。星载 CHRIS 成像光谱仪可以同时获得 5 个角度(0° 、 $\pm 36^\circ$ 、 $\pm 55^\circ$)的高光谱图像,其光谱分辨率约为 10 nm,空间分辨率为 17 m^[17]。

2005 年 8 月,美国发射的火星勘测轨道器(Mars Reconnaissance Orbiter, MRO)上搭载了一台紧凑型火星勘测成像光谱仪(Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars, CRISM)。它在 0.36~3.94 μm 光谱范围内有 544 个波段,其光谱分辨率为 6.55 nm,空间

分辨率为 18 m^[16-18]。

2006 年 10 月,红外大气探测干涉仪(Infrared Atmospheric Sounding Interferometer, IASI)由欧洲 MetOp-A 极轨卫星搭载升空并且成功在轨运行。它是继 2002 年 NASA 的 Aqua 卫星载大气红外探测仪(Atmospheric Infrared Sounder, AIRS)在轨运行之后的又一个高光谱大气探测器,其在轨高度为 817 km,空间分辨率为 12 km,光谱分辨率为 0.25 cm^{-1} ,且在 3.62~15.5 μm 光谱范围内有 8461 个波段^[19]。

2007 年, NASA 又规划了高光谱红外成像仪(Hyperspectral InfraRed Imager, HypsIRI)任务。HypsIRI 由一台可见光-短波红外(Visible and Shortwave Infrared, VSWIR)成像光谱仪、一台热红外(Thermal Infrared, TIR)多光谱成像仪以及一个用于机载处理和快速下行选定数据的智能有效载荷模块构成。其中, VSWIR 仪器将有 10 nm 的连续波段,

可覆盖 380~2500 nm 的光谱范围, 空间分辨率为 30 m, 重访时间为 16 天; TIR 仪器将在 4~13 μm 光谱范围内有 8 个离散波段, 空间分辨率为 60 m, 重访时间为 5 天^[20]。

2013 年, 德国地球科学研究中心规划了一颗名为环境测绘与分析计划 (Environmental Mapping and Analysis Program, EnMAP) 的高光谱卫星。该卫星的在轨高度为 643.7 km, 它将利用两台工作在可见光-近红外和短波红外波段的光谱仪对地面进行采样^[21]。其中, 可见光-近红外波段的平均光谱采样距离和分辨率为 6.5 nm, 短波红外波段的光谱分辨率为 10 nm; 可见光-近红外波段的信噪比约为 500:1, 短波红外波段的信噪比约为 150:1。

2019 年 3 月 21 日, PRISMA 高光谱卫星由意大利航天局发射升空。它运行在高度为 620 km 的太阳同步轨道上, 并对地球进行全覆盖观测。PRISMA 卫星上搭载了覆盖可见光-近红外和短波红外波段的高光谱成像仪。PRISMA 光学有效载荷由一台工作在 400~

2505 nm 波段的成像光谱仪和一台中等分辨率全色相机构成。其中, PRISMA 光谱仪的工作波段包括 400~1010 nm 可见光-近红外波段和 920~2505 nm 短波红外波段, 其光谱分辨率为 12 nm^[22]。

2.2 国内航天成像光谱仪

在国外航天高光谱成像仪迅速发展的同时, 我国的航天成像光谱仪研究也紧跟国际前沿, 并取得了重大的研究进展。

2008 年 9 月, 我国发射了环境减灾-1A (HJ-1A) 卫星, 其搭载的高光谱成像仪是国内首台航天高光谱成像仪^[23]。图 5 所示为 HJ-1A 高光谱成像仪的总体方案设计。它仍然在轨运行, 且在 0.45~0.95 μm 光谱范围内有 110~128 个波段, 光谱分辨率为 5 nm^[16], 空间分辨率为 100 m, 幅宽为 50 km。其数据主要被科研人员用于环境监测方面。例如, 余哲修等人利用 HJ-1A 高光谱数据进行了滇池悬浮物浓度估计研究^[24]; Li X Q 等人利用 HJ-1A HSI 和 Radarsat-2 SAR 遥感数据进行了基

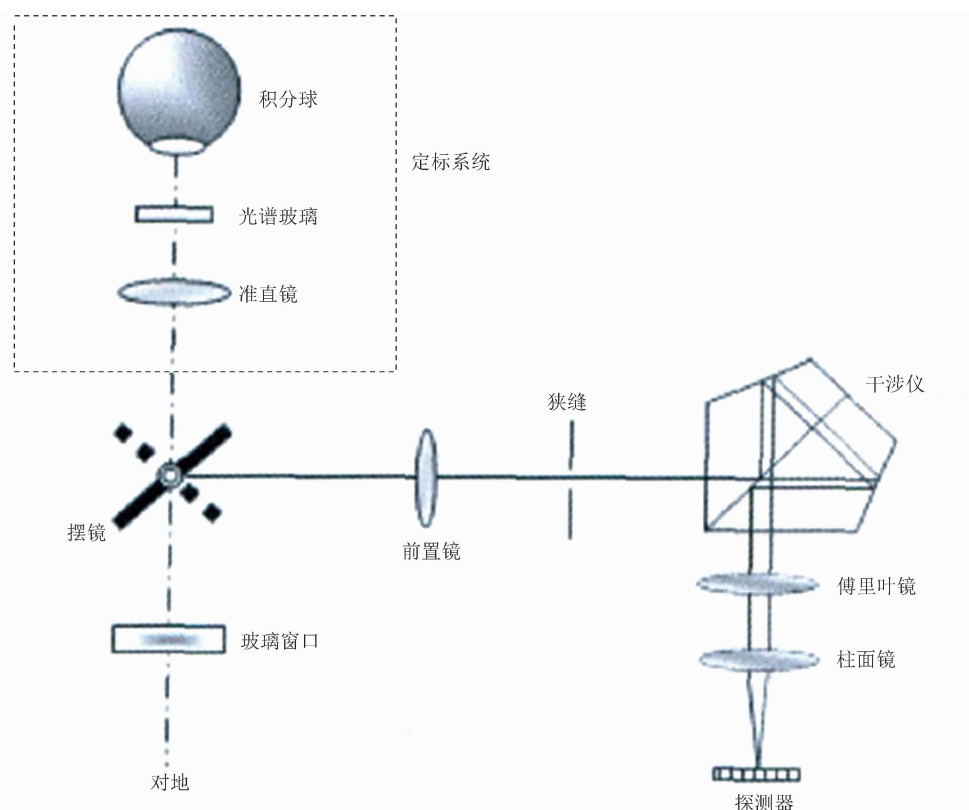


图 5 HJ-1A 高光谱成像仪的总体方案设计

于二维光谱特征空间的水稻重金属污染协调反演^[25]；Bian J 等人利用 HJ-1A 等数据以及随机森林算法对巴基斯坦瓜达尔港 2009~2017 年的不透水地表变化进行了估算^[26]。

2011 年 9 月，我国发射了载有高光谱成像仪的天宫一号目标飞行器（见图 6）。它于 2016 年 3 月结束在轨运行。天宫一号高光谱成像仪在 $0.4\sim 1.0\ \mu\text{m}$ 可见光-近红外光谱范围内有 64 个波段，空间分辨率为 10 m，光谱分辨率为 10 nm；在 $1.0\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 短波红外光谱范围内同样有 64 个波段，空间分辨率为 20 m，光谱分辨率为 20 nm。它在矿物分布调查、油气探测研究、土地利用变化监测、土壤重金属污染调查、荒漠化监测、城市热环境研究、火/水灾应急监测、森林精细分类、森林覆盖变化监测、植被量估计、地震应急监测^[27]等方面取得了重大研究成果，实现了前所未有的重要突破，为我国的遥感探测事业打开了新局面。



图 6 天宫一号目标飞行器

2018 年 4 月 26 日，4 颗珠海一号高光谱卫星发射升空。我国首次实现了高光谱卫星组网（见图 7），其中每颗珠海一号高光谱卫星的空间分辨率为 10 m，幅宽为 150 km，信噪比优于 300，光谱范围为 $400\sim 1000\ \text{nm}$ （有 32 个波段），光谱分辨率为 2.5 nm，重访周期为 2 天^[28]。

2018 年 5 月 9 日，高分五号（见图 8）星载光谱仪入轨工作。它具有光谱分辨率高且波段全、卫星遥感数据的辐射分辨率高、长波红外空间分辨率高、卫星观测和定标模式多、数传码速率高、结构布局复杂、高可靠性姿轨控保

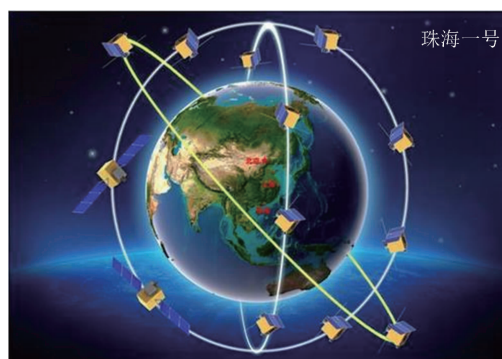


图 7 珠海一号组网示意图



图 8 高分五号卫星

证、寿命长等突出优点。其中，高光谱相机在 $0.4\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 光谱范围内有 330 个波段： $0.4\sim 1.0\ \mu\text{m}$ 范围内的光谱分辨率为 5 nm； $1.0\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 范围内的光谱分辨率为 10 nm，空间分辨率为 30 m，幅宽为 60 km^[16,29]。

2019 年 9 月 12 日，由自然资源部规划发射的资源一号 02D 卫星成功进入太阳同步轨道。它属于中等分辨率遥感卫星，回归周期为 55 天，设计寿命为 5 年。该卫星上搭载了可见光-近红外相机和高光谱相机（发射重量为 1840 kg）。其中，高光谱相机在 $0.4\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 光谱范围内有 166 个波段；空间分辨率为 30 m，可见光-近红外和短波红外波段的光谱分辨率分别为 10 nm 和 20 nm^[30]。

表 2 列出了国内外各种航天成像光谱仪的性能参数。

2.3 航天高光谱成像仪的特点

航天高光谱成像仪具有以下几个特点：

（1）航天高光谱成像仪能够对轨道内辐射地域的任意目标进行探测，且不涉及领空权问题。

表 2 国内外各种航天成像光谱仪的性能参数

成像光谱仪	星载平台	发射时间	制造方	高度/km	空间分辨率/m	光谱分辨率/nm	光谱范围/ μm	波段数
Hyperion	EO-1	2000	美国	705	30	10	0.4~2.5	242
CHRIS	PROBA-1	2001	欧空局	556	17	VNIR: 1.3 SWIR: 12	0.4~2.5	63
CRISM	MRO	2005	美国	—	18	6.55	0.36~3.94	544
IASI	METOP-A	2006	欧空局	817	12	0.25(cm^{-1})	3.62~15.5	8461
HJ-1A	HJ-1A	2008	中国	649	100	5	0.45~0.95	110~128
天宫一号	天宫一号	2011	中国	133	VNIR: 10 SWIR: 20	VNIR: 10 SWIR: 20	0.4~2.5	64
珠海一号	珠海一号	2018	中国	500	10	2.5	0.4~1.0	32
高分五号	高分五号	2018	中国	705	VNIR: 5 SWIR: 10	30	0.4~2.5	330
资源一号 02D	资源一号 02D	2019	中国	778	VNIR: 10 SWIR: 20	30	0.4~2.5	166
PRISMA	PRISMA	2019	意大利	620	5~30	12	0.4~2.5	238
EnMAP HSI	EnMAP	2021	德国	644	30	VNIR: 6.5 SWIR: 10	0.4~2.5	228
HypIRI	HypIRI	2023	美国	217	30(60)	10	0.38~2.5	217

(2) 由于扫描范围大, 航天成像光谱仪可直接在目标上空对其进行垂直成像和侧视成像, 从而实现全方位、多角度探测, 使我们更全面地掌握目标状态。

(3) 星载高光谱成像仪在空间进行成像侦察时, 无法立刻到达目标上空, 所得图像与即时图像存在时间差。特别是在军事侦察方面, 由于战场环境瞬息万变, 航天高光谱成像仪不能很好地确保图像的准确性和实时性。

(4) 卫星造价高、技术难度大, 航天成像的经济成本高、运行难度大; 成像时容易受到自然环境的影响, 且云层干扰严重。

3 发展趋势分析

目前, 高光谱成像仪的光谱分辨率、空间分辨率和时间分辨率都越来越高, 波段数也越来越多。在军事领域, 我们利用高光谱数据来揭露伪装和调查武器生产, 并可使武器使用探测、近海监测和反潜等应用变得更加准确无误, 进而提供更加精准的战场信息。在高光谱

遥感应用中, 人们能够更好地进行数据融合、解混、分类, 目标检测和物理参数估计等研究。

在航空高光谱成像方面, 高光谱成像仪的工作高度越低, 空间分辨率越高; 可以增加光谱波段数, 提供更多的波段选择。利用其即时升空的优势, 发展无人机载高光谱成像仪, 同时提高飞机各方面的综合性能。通过调整飞行高度和优化隐身性能来躲避防空系统, 并提升时间分辨率和光谱分辨率。

在航天高光谱成像方面, 由于卫星成像的重访周期过长, 通过卫星组网技术可使卫星探测区域面积更大、重访周期更短。在成像光谱仪的应用上, 可以利用航天高光谱成像仪的探测优势, 通过获取目标的光谱特性来开展科学研究, 以更好地实现伪装揭露和战场环境探测等军事应用。

参考文献

- [1] 王美钦. 高分辨率光谱成像仪的光学系统设计

- 与杂散光分析 [D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2010.
- [2] 谭炳香. 高光谱遥感森林应用研究探讨 [J]. *世界林业研究*, 2003, **16**(2): 33–37.
- [3] Labaw C. Airborne Imaging Spectrometer: An Advanced Concept Instrument [C]. *SPIE*, 1983, **430**: 68.
- [4] Three Decades of Hyperspectral Remote Sensing of the Earth: A Personal View [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, **113**(1): 5–16.
- [5] Green R O, Eastwood M L, Sarture C M, et al. Imaging Spectroscopy and the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, **65**(98): 227–248.
- [6] 贤光. 机载高光谱成像仪成像质量研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2015.
- [7] 何之棣. 最新的遥感仪器——CASI [J]. *国土资源遥感*, 1990, **3**(2): 61–62.
- [8] 高国龙. 超光谱数字图象收集实验仪器 HYDICE (上) [J]. *红外*, 1998, **19**(11): 1–8.
- [9] Resmini G, Kappus M E, Aldrich W S, et al. Mineral Mapping with HYperspectral Digital Imagery Collection Experiment (HYDICE) Sensor Data at Cuprite, Nevada, U.S.A. [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, **18**(7): 1553–1570.
- [10] Mark A F, Darrell A G, Charles T W, et al. Performance Characterization and Calibration of the TRWIS III Hyperspectral Imager [C]. *SPIE*, 1996, **2819**: 130–140.
- [11] 李颐. 机载摆扫高光谱成像仪高频摆扫方法与光机结构优化研究 [D]. 长春: 中国科学院大学长春光学精密机械与物理研究所, 2020.
- [12] 邵晖, 王建宇, 薛永祺. 推帚式超光谱成像仪 (PHI) 关键技术 [J]. *遥感学报*, 1998, **13**(4): 251–254.
- [13] 技物. 中国科学院上海技术物理研究所研制成实用型模块化成像光谱仪系统 (OMIS) [J]. *红外*, 2001, **22**(5): 52.
- [14] 刘银年, 薛永祺, 王建宇, 等. 实用型模块化成像光谱仪 [J]. *红外与毫米波学报*, 2002, **22**(1): 9–13.
- [15] Folkman M, Pearlman J, Liao L, et al. EO-1/Hyperion Hyperspectral Imager Design, Development, Characterization, and Calibration [C]. *SPIE*, 2001, **4151**: 40–51.
- [16] 李盛阳, 刘志文, 刘康, 等. 航天高光谱遥感应用研究进展 [J]. *红外与激光工程*, 2019, **48**(3): 9–23.
- [17] 申茜, 张兵, 李俊生, 等. 航天高光谱遥感器 CHRIS 的水体图像大气校正 [J]. *测绘学报*, 2008, **37**(4): 476–481.
- [18] Murchie S, Arvidson R, Bedini P, et al. Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars (CRISM) on Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2007, **112**(5): 431–433.
- [19] 张磊, 董超华, 张文建, 等. METOP 星载干涉式超光谱分辨率红外大气探测仪 (IASI) 及其产品 [J]. *气象科技*, 2008, **36**(5): 127–130.
- [20] Christine M L, Morgan L C, Simon J H, et al. An Introduction to the NASA Hyperspectral InfraRed Imager (HyspIRI) Mission and Preparatory Activities [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, **167**: 6–19.
- [21] 高国龙. 德国计划于 2013 年发射用于对地观测的先进光学有效载荷——EnMAP [J]. *红外*, 2011, **32**(3): 47–48.
- [22] 岳桢干. 意大利 PRISMA 高光谱卫星发射升空 [J]. *红外*, 2019, **40**(3): 37–38.
- [23] 袁艳, 李立英, 熊望娥, 等. 环境减灾-1A 卫星超光谱成像仪结构设计 [J]. *航天器工程*, 2009, **18**(6): 97–105.
- [24] 余哲修, 徐沛, 罗唯学, 等. 基于 HJ-1A 高光谱数据的滇池悬浮物浓度估测研究 [J]. *西南林业大学学报(自然科学)*, 2020, **40**(4): 94–104.
- [25] Li X Q, Li L, Liu X N. Collaborative Inversion Heavy Metal Stress in Rice by Using Two-dimensional Spectral Feature Space Based on HJ-1 A HSI and Radarsat-2 SAR Remote Sensing Data [J]. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 2019, **78**: 39–52.

(下转第 14 页)



图 8 中波波段的成像图



图 9 短波波段的成像图

$\times 256$ 短/中波双色红外探测器及其进展。该探测器的性能较好: 77 K 测试条件下短波和中波两个波段的盲元率分别为 0.88% 和 1.47%, 平均峰值探测率分别为 $2.21 \times 10^{12} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 和 $2.13 \times 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$, 后截止波长分别为 $3.129 \mu\text{m}$ 和 $5.285 \mu\text{m}$, 且短波向中波波段的谱串音为 1.38%, 中波向短波波段的谱串音为 2.82%。但是在双色发展方面, 国内的技术水平与国外仍有较大差距。本文的实验数据可为后续降低谱串音、

减小盲元率、提高信噪比的相关研究提供参考。

参考文献

- [1] 周杰, 丁瑞军, 翟永成, 等. 320×256 中/长波双色 IRFPAs 读出电路设计 [J]. 红外与激光工程, 2015, **44**(10): 2880–2885.
- [2] 叶振华, 丁瑞军, 何力, 等. 128×128 短波/中波双色红外焦平面探测器 [J]. 红外与毫米波学报, 2010, **29**(6): 415–418.
- [3] 王成刚, 孙浩, 李敬国, 等. 双色碲镉汞红外焦平面探测器发展现状 [J]. 激光与红外, 2009, **39**(4): 367–371.
- [4] 王经纬, 晋舜国, 陈慧卿, 等. 短/中波双色碲镉汞红外焦平面探测器研究 [J]. 激光与红外, 2018, **48**(11): 77–80.
- [5] Destefanis C, Ballet P, Baylet J, et al. Bi-color and Dual-band HgCdTe Infrared Focal Plane Arrays at DEFIR [C]. SPIE, 2006, **6206**: 620–60R.
- [6] Radford W A, Patten E A, King D F, et al. 3rd Generation 1280×720 FPA Development Status at Raytheon Vision Systems [C]. SPIE, 2006, **6206**: 62060W.
- [7] Antoni Rogalski. Third-generation Infrared Photon Detectors [J]. Optical Engineering, 2003, **42**(12): 3498–3516.
- [8] 叶振华, 周文洪, 胡伟达, 等. 碲镉汞红外双色探测器响应光谱研究 [J]. 红外与毫米波学报, 2009, **28**(1): 6–9.
- [9] 赵俊, 毛京湘, 李艳辉, 等. 双色焦平面红外探测器相对光谱串音研究 [J]. 红外技术, 2014, **36**(4): 34–37.
- [10] 陆地应用 [J]. 载人航天, 2018, **24**(4): 546–552.
- [11] 洪韬. 珠海一号高光谱卫星在内陆湖泊监测中的应用 [J]. 卫星应用, 2019, **10**(8): 19–22.
- [12] 孙允珠, 蒋光伟, 李云端, 等. “高分五号”卫星概况及应用前景展望 [J]. 航天返回与遥感, 2018, **39**(3): 1–13.
- [13] “资源一号”02D 卫星可见近红外相机亮点多 [J]. 航天返回与遥感, 2019, **40**(5): 2.
- [14] (上接第 8 页)
- [15] [26] Bian J H, Li A, Zuo J Q, et al. Estimating 2009–2017 Impervious Surface Change in Gwadar, Pakistan Using the HJ-1A/B Constellation, GF-1/2 Data, and the Random Forest Algorithm [J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2019, **8**(10): 443.
- [16] [27] 覃帮勇, 刘志文, 李盛阳. 天宫一号高光谱数据的