

文章编号: 1672-8785(2022)03-0022-09

星载高光谱成像仪的发展及军事应用

高明琪 肖龙龙* 王煜博

(航天工程大学, 北京 101406)

摘 要: 随着航天技术的发展, 星载高光谱成像技术日趋成熟并得到广泛应用。首先对高光谱成像的基础概念及特点进行了阐述, 然后从国内、国外两个角度系统介绍了近二十年星载高光谱成像仪的发展状况, 并分析了其主要性能指标和相关遥感应用, 最后对星载高光谱技术在战场环境侦察、海洋军事行动监测、战场气象环境评估、导弹预警探测等方面的军事应用进行了分析概括, 并通过举例进行了简要说明。

关键词: 高光谱成像技术; 星载光谱成像仪; 遥感应用; 军事应用

中图分类号: TP731; TP79 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2022.03.004

Development and Military Application of Spaceborne Hyperspectral Imager

GAO Ming-qi, XIAO Long-long*, WANG Yu-bo

(Space Engineering University, Beijing 101406, China)

Abstract: With the development of space technology, spaceborne hyperspectral imaging technology is becoming mature and widely used. In this paper, the basic concepts and characteristics of hyperspectral imaging are expounded firstly. Then the development status of spaceborne hyperspectral imaging in the past 20 years is systematically introduced from domestic and foreign perspectives. The main performance index and related remote sensing applications are analyzed as well. Finally, the military applications of spaceborne hyperspectral technology in battlefield environment reconnaissance, marine military action monitoring, battlefield meteorological environment assessment and missile early warning detection are analyzed and summarized, and briefly explained by examples.

Key words: hyperspectral imaging technology; spaceborne spectral imager; remote sensing application; military applications

0 引言

不同于传统的单一波段成像技术, 光谱成像技术是将成像技术与光谱测量技术相结合的多维信息获取技术, 可实现空间信息、光谱信

息和辐射信息的综合观测。它利用目标光谱特性的不同实现对目标的精确识别与定量反演, 极大地提高了目标探测的准确性, 扩展了传统探测技术的功能。

收稿日期: 2021-11-16

作者简介: 高明琪(2000-), 男, 辽宁大石桥人, 本科生, 主要从事星载高光谱遥感及应用方面的研究。

*通讯作者: E-mail: longnudet@126.com

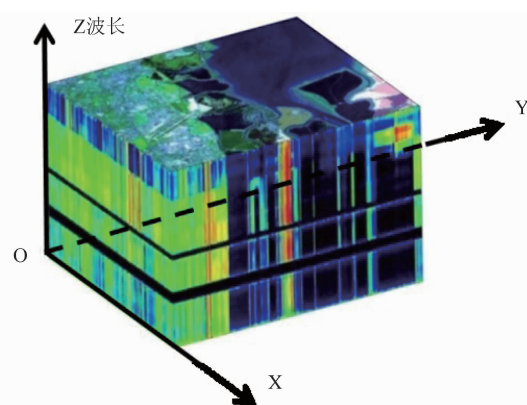
自 20 世纪 80 年代光谱成像技术诞生并得到成功应用以来, 光谱成像仪显示了巨大潜力, 世界各国都对其给予了高度重视。美国喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)研制的机载可见光/红外光谱成像仪(Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer, AVIRIS)对于高光谱遥感技术及其应用的发展起到了促进作用^[1]。随着航天技术的迅速发展, 一代代星载高光谱成像仪不断刷新技术指标并被投入实际应用, 在军民领域取得了良好的突破与进展。本文简要介绍高光谱成像的基础理论, 然后总结分析国内外近二十年星载高光谱成像仪的发展状况, 并对其在军事上的应用进行分析与展望。

1 高光谱遥感基础理论

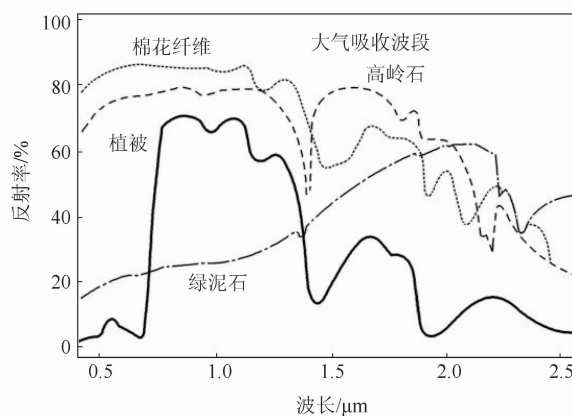
1.1 光谱成像的基本概念

光谱成像技术在电磁波谱的紫外、可见光和红外波段将成像技术和光谱测量技术相结合, 同时获取观测区域的二维几何空间信息和一维光谱信息。获取的光谱数据具有“图像立方体”的形式和结构, 如图 1(a)所示^[1]。OXY 平面的图像与传统的图像相同, 反映某一个波段的空间信息, 用于表达观测区域的空间分布。OXZ 和 OYZ 平面的图像反映的不是观测区域的二维空间分布, 而是一条空间直线上的光谱信息。直线上某点的光谱特征最直观的表达方式就是二维光谱曲线, 如图 1(b)所示^[1]。

光谱成像将电磁波谱划分成若干谱段, 并在同一时间、不同谱段上对同一目标进行照相或扫描。根据谱段划分数量的不同, 可将其分成多光谱(数量为几个到十几个, 光谱分辨率在 $\lambda/10$ 量级范围)、高光谱(数量为几十个到几百个, 光谱分辨率在 $\lambda/100$ 以上)和超光谱(数量达上千个, 光谱分辨率在 $\lambda/1000$ 以上)。因此, 光谱分辨率与空间分辨率一样, 也是光谱成像仪的一个重要技术指标。目前, 大多数研究都集中在高光谱成像方面。



(a) 图像立方体



(b) 二维光谱曲线

图 1 光谱数据示意图

1.2 高光谱遥感原理

高光谱遥感成像包括空间维成像与光谱维成像。其中, 空间维成像是通过飞行平台的运动以及平台上搭载的成像光谱仪以摆扫或者推扫方式来实现的。摆扫型成像光谱仪采用线阵探测器, 在光机左右摆扫的同时飞行平台向前运动完成二维成像, 如图 2(a)所示^[1]。而推扫型成像光谱仪采用面阵探测器, 使其垂直于运动方向进行二维扫描, 如图 2(b)所示^[1]。

光谱维成像主要通过光的干涉与滤光来获得不同波段的光信息, 再通过成像系统将光按波长顺序成像在探测器的不同位置上, 即可获取视场内的光谱维信息。目前常用的光谱维成像方法有滤光片型、棱镜光栅色散型、计算机层析成像、干涉型、二元光学元件成像和三维光谱成像等。其中, 棱镜光栅色散型和干涉型较为常用。

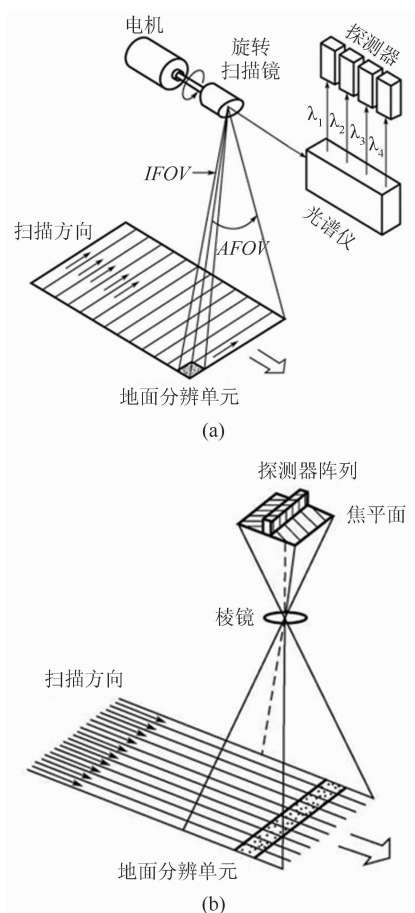


图 2 高光谱遥感空间维成像:(a)摆扫成像方式;
(b)推扫成像方式

2 国外星载高光谱成像仪

随着 1983 年 JPL 成功研制出第一台机载成像光谱仪 AIS-1, 世界上有条件的国家竞相投入到光谱成像仪的研制和应用中来。如今, 美国、欧洲、印度、日本等均在这一领域有所建树。下面主要分析近二十年他们的星载高光谱成像仪发展状况。

2.1 美国星载高光谱成像仪

美国在高光谱成像研究与应用领域一直处于领先地位, 其开发的星载高光谱成像仪迭代更新快、技术指标顶尖, 应用领域涵盖环境监测、资源勘探、军事侦察、星际探测等诸多方面, 军事及经济效益可观。

2.1.1 中分辨率成像光谱仪

中分辨率成像光谱仪 (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS) 是美国分

别于 1999 年 12 月和 2002 年 5 月发射的 EOS Terra-AM1 卫星和 EOS Aqua-PM1 卫星上搭载的主要探测仪器^[2]。MODIS 可以获取的高光谱数据覆盖了 $0.4 \sim 14 \mu\text{m}$ 范围内的 36 个波段, 对应于不同波段的空间分辨率有 250 m、500 m 和 1000 m 三种。它为开展自然灾害预警、生态环境监测、全球环境和气候变化以及全球变化的综合性研究提供了重要的数据源。

2.1.2 Hyperion

Hyperion 是美国国家航空航天局 (NASA) 于 2000 年 11 月发射的 EO-1 卫星所搭载的首台民用高光谱成像光谱仪^[2], 其光谱数据覆盖了 $0.4 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 范围内的 220 个波段。该载荷的光谱分辨率优于 10 nm, 空间分辨率为 30 m, 幅宽为 7.5 km。它既可用于测量目标的波谱特性, 又可对目标进行成像; 主要用于测量地物波谱, 生物量估计及变化分析数据, 海洋水色要素, 大气水汽、气溶胶及云层等的参数^[3-5]。

2.1.3 CRISM

CRISM 是美国于 2005 年 8 月发射的火星轨道探测器 MRO 上搭载的小型火星侦察成像光谱仪。该载荷由雷神公司设计, 其光谱范围为 $0.383 \sim 3.96 \mu\text{m}$, 空间分辨率优于 20 m, 主要用于探测火星上过去存在液态水的相关矿物^[6-8]。

2.1.4 ARTEMIS

ARTEMIS 是美国于 2009 年 5 月发射的 TacSat-3 军用战术侦察卫星上搭载的高级响应战术有效军用成像光谱仪, 其光谱范围为 $0.4 \sim 2.5 \mu\text{m}$, 光谱分辨率为 5 nm, 空间分辨率达到 5 m。它能够在可见光和短波红外波段对地面目标进行高分辨率成像, 从而搜索敌方活动迹象^[6,9]。

2.1.5 海岸带高光谱遥感与近海高光谱成像仪

海岸带高光谱遥感与近海高光谱成像仪 (Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean, HICO) 是美国海军研究实验室 (NRL) 研制的高

光谱成像仪(见图 3)^[7], 目前搭载于国际空间站, 并被用于海洋观测。该载荷覆盖了 $0.35 \sim 1.08 \mu\text{m}$ 光谱范围内的 128 个波段, 其光谱分辨率达到 5.7 nm ^[11]。通过它可以获取海洋表面的高光谱数据。在位于高度为 345 km 的轨道时, 其空间分辨率为 100 m, 幅宽为 500 km。

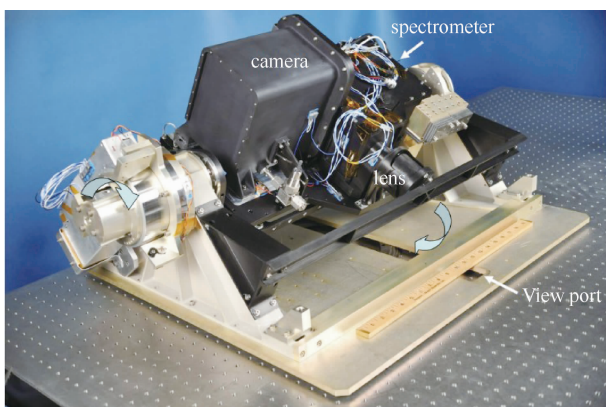


图 3 HICO 部件示意图^[12]

2.1.6 高空间分辨率高光谱 CO_2 探测仪

高空间分辨率高光谱 CO_2 探测仪是 NASA 于 2014 年 7 月重启的极轨碳观测卫星(OCO)任务所发射的 OCO-2 卫星的有效载荷。它能对 $2.04 \sim 2.08 \mu\text{m}$ 、 $1.59 \sim 1.61 \mu\text{m}$ 和 $0.75 \sim 0.77 \mu\text{m}$ 三个大气吸收光谱通道进行探测, 其光谱波段数为 1016 个, 波段分辨率分别为 0.2 cm^{-1} 、 0.3 cm^{-1} 和 0.5 cm^{-1} , 地面幅宽为 10.6 km ^[7]。

2.1.7 高光谱红外成像仪

高光谱红外成像仪(Hyperspectral Infrared Imager, HypsIRI)是 2007 年空间地球科学与应用计划中推荐的高光谱红外成像任务所需要的载荷, 其光谱数据覆盖了 $0.38 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 范围内的 212 个波段, 光谱分辨率为 10 nm , 地面幅宽为 145 km , 地面像元分辨率为 60 m 。它能够对水生和陆地生态系统变化及自然灾害探测进行短期全球测绘^[13]。美国计划在 2023 年发射新一代 HypsIRI 来替代该载荷。

2.2 欧洲星载高光谱成像仪

欧洲高光谱成像技术的发展紧随美国之后, 起步较早, 但在 2010 年前后有明显的设

备发展断档期。欧洲星载高光谱成像仪主要服务于环境监测等商业应用。

2.2.1 紧凑型高分辨率成像光谱仪

紧凑型高分辨率成像光谱仪(Compact High Resolution Imaging Spectrometer, CHRIS)是欧空局(ESA)于 2001 年 10 月发射的天基自主计划卫星 PROBA 的有效载荷, 能够以 5 种不同的观测模式对地物进行观测。它在 $0.4 \sim 1.05 \mu\text{m}$ 光谱范围内能够搜集到 62 个波段, 光谱分辨率为 $5 \sim 12 \text{ nm}$, 空间分辨率为 $17 \sim 20 \text{ m}$ 或 $34 \sim 40 \text{ m}$ ^[14]。

2.2.2 中分辨率成像光谱仪

中分辨率成像光谱仪(Medium Resolution Imaging Spectrometer, MERIS)是欧空局于 2002 年 3 月发射的 ENVI-SAT-1 卫星搭载的有效载荷(见图 4)^[2], 其光谱范围为 $0.39 \sim 1.04 \mu\text{m}$, 波段数可达 576 个, 空间分辨率为 300 m , 光谱分辨率可通过编程设置。该载荷采用推扫方式进行扫描成像, 主要通过观察海洋颜色来研究全球碳循环的海洋组成并帮助研究陆地环境演变。

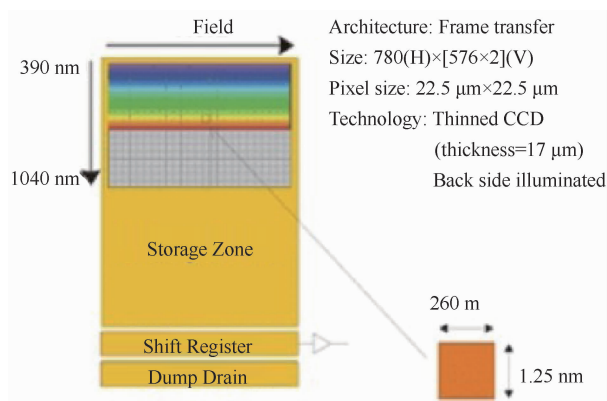


图 4 MERIS 焦平面规格^[15]

2.2.3 红外大气探测干涉仪

红外大气探测干涉仪(Infrared Atmospheric Sounding Interferometer, IASI)于 2006 年 10 月由欧洲 METOP-A 极轨卫星搭载升空, 其在轨高度为 817 km , 在 $3.62 \sim 15.5 \mu\text{m}$ 光谱范围内有 8491 个波段, 光谱分辨率为 0.25 cm^{-1} 。获取的数据可用于反演大气和云成分, 为地球大气遥感提供丰富的研究资料^[16]。

2.2.4 HIS

HIS 是德国环境、测绘与分析计划(Environmental Mapping and Analysis Program, EnMAP)卫星的重要载荷,其光谱范围为 $0.42 \sim 2.45 \mu\text{m}$,光谱谱段数为 262 个,平均光谱分辨率为 8 nm 左右,空间分辨率为 30 m,地面幅宽为 30 km。该载荷主要用于环境测绘与分析^[2]。

2.2.5 PRISMA

PRISMA 高光谱卫星由意大利航天局于 2019 年 3 月发射升空,运行在高度为 620 km 的太阳同步轨道上^[15]。该卫星搭载的成像光谱仪的光谱范围为 $0.4 \sim 2.5 \mu\text{m}$,光谱分辨率为 12 nm,空间分辨率为 30 m,地面幅宽为 30 km。它主要用于自然资源监测和环境过程研究。

2.2.6 星载高光谱陆地与海洋观测任务

星载高光谱陆地与海洋观测任务(Space borne Hyperspectral Applicative Land and Ocean Mission, SHALOM)是以色列航天局与意大利航天局合作开展的商业高光谱卫星计划。该系统计划在 2021 年全面投入运营,共有 241 个光谱通道,空间分辨率优于 10 m,幅宽大于 10 km,光谱范围为 $0.4 \sim 2.5 \mu\text{m}$,光谱分辨率为 10 nm,主要用于陆地和海洋观测^[7]。

2.3 印度星载高光谱成像仪

印度拥有世界顶尖的遥感卫星星座。在以 Cartosat 系列为代表的遥感卫星上搭载有高光谱相机,它们使印度的侦察能力有了较大的提升。

2.3.1 HySI

HySI 是“印度迷你卫星”上携带的星载高光谱相机^[2],其光谱数据覆盖了 $0.4 \sim 0.95 \mu\text{m}$ 范围内的 64 个波段,光谱分辨率约为 10 nm,空间分辨率为 506 m,地面幅宽为 129.5 km。它获得了大量的月球表面矿物分布图像数据。

2.3.2 高分辨率多光谱辐射计

高分辨率多光谱辐射计(High-Resolution Multispectral Radiometer, HRMR)是印度于 2017 年 6 月发射的 Cartosat2E 卫星有效载荷。其光谱范围为 $0.4 \sim 1.30 \mu\text{m}$,空间分辨率为 2 m,地面幅宽为 10 km。它有自然资源普查、灾害管理、植被探测等多种用途^[7]。

2.3.3 Cartosat-3 高光谱仪

Cartosat-3 高光谱仪于 2019 年 11 月升空,其光谱范围为 $0.75 \sim 1.3 \mu\text{m}$,高光谱模式下的空间分辨率为 12 m,幅宽为 5 km。它主要用于陆地表面的多用途探测^[2]。

2.4 日本星载高光谱成像仪

日本目前的高光谱成像仪聚焦于解决两个主要问题:一是对本国火山爆发、海啸等自然灾害的预警和探测;二是对地成像及监测应用。

2.4.1 第二代温室气体观测传感器傅里叶变换光谱仪和第二代云气溶胶成像仪

第二代温室气体观测传感器傅里叶变换光谱仪(Fourier Transform Spectrometer-2, FTS-2)和第二代云气溶胶成像仪(Cloud Aerosol Imager-2, CAI-2)是日本于 2018 年 10 月发射的 GOSAT-2 温室气体观测卫星上搭载的有效载荷^[2]。其中,FTS-2 可利用近红外及热红外的 5 个波段对地球表面反射和发射的辐射能量以及大气化学和温室气体进行测量。而 CAI-2 利用紫外、可见光、近红外的推扫式辐射计及短波红外的 10 个波段对气溶胶和云的光学特性及空气污染进行监测。

2.4.2 HISUI

HISUI 高光谱成像仪由日本经济产业省(METI)开发,于 2019 年 12 月 5 日由美国 SpaceX“龙”货运飞船运送至国际空间站。它在 $0.4 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 光谱范围内拥有 185 个光谱波段,空间分辨率为 30 m,地面幅宽为 30 km^[2]。HISUI 可对数据进行在轨处理,其星上计算机可完成辐射定标、像元合并、光谱校正以及无损数据压缩等任务。

表 1 国外典型星载高光谱成像仪的具体参数

光谱仪	国家	启用时间	光谱范围/ μm	波段数	光谱分辨率/nm	空间分辨率/nm	幅宽/km
MODIS	美国	1999.12	0.4~14	36	—	250/500/1000	—
HYPERION	美国	2000.11	0.4~2.5	220	10	30	7.5
CRISM	美国	2005.08	0.383~3.96	—	6.55/6.63	<20	—
ARTEMIS	美国	2009.05	0.4~2.5	—	5	5	—
HICO	美国	2009.09	0.35~1.08	128	5.7	100	500
HyspIRI	美国	2023	0.38~2.5	212	10	60	145
CHIRS	欧洲	2001.10	0.4~1.05	62	5~12	17~20/34~40	—
MERIS	欧洲	2002.03	0.39~1.04	576	—	300	—
PRISMA	欧洲	2019.03	0.4~2.5	—	12	30	30
HIS	欧洲	—	0.42~2.45	262	8	30	30
SHALOM	欧洲	2021	0.4~2.5	—	10	10	10
HySI	印度	2008	0.4~0.95	64	10	506	129.5
HRMX	印度	2017.06	0.4~1.30	—	—	2	10
Cartosat-3 高光谱仪	印度	2019.11	0.75~1.3	—	—	12	5
HISUI	日本	—	0.4~2.5	185	—	30	30

表 1 列出了国外典型星载高光谱成像仪的具体参数。从时间上来看, 美国及欧洲的一些发达国家在高光谱成像技术研发方面占得先机。同时印度、日本等后起之秀最近几年上升态势明显, 研制力度明显加大。从应用领域来看, 美国充分利用高光谱成像的特点, 相较于其他各国更大限度地开发了其应用领域。当然, 这与国家的综合实力和国际形势变化有密不可分的关系。从技术指标上来看, 目前世界各国星载高光谱仪技术指标相差不大, 未来定有一番龙争虎斗来推动技术革新, 从而抢得领先身位。

3 国内星载高光谱成像仪

20 世纪 80 年代, 我国几乎与美国同时开始进行多光谱成像技术研究。21 世纪初, 随着搭载有中分辨率成像光谱仪的“神舟三号”成功升空, 我国开启了拥有星载高光谱成像仪的新时代。近二十年来, 随着我国星载高光谱成像技术的飞速发展, 成像仪在光谱分辨率与空间分辨率上都有了长足的进步。

3.1 中分辨率成像光谱仪

我国自主研发的“神舟三号”中分辨率成像光谱仪 (Chinese Moderate-resolution Imaging

Spectroradiometer, CMODIS) 于 2002 年 3 月 25 日随火箭发射升空, 使得中国成为继美国之后第二个将高光谱载荷送上太空的国家^[18]。该光谱仪拥有 34 个波段, 光谱范围为 0.4~12.5 μm , 覆盖了可见光-近红外、短波红外和热红外波段。在可见光、近红外波段的光谱分辨率为 20 nm、空间分辨率为 500 m。它主要用于大气探测、气溶胶光学厚度反演和水汽探测等。

3.2 Sagnac 干涉成像光谱仪

Sagnac 干涉成像光谱仪于 2007 年 10 月 24 日伴随“嫦娥一号”探月卫星进入月球轨道。作为我国第一台基于傅里叶变换的星载干涉成像光谱仪, 它的光谱区间为 0.48~0.96 μm , 波段数为 32 个, 光谱分辨率为 15 nm, 空间分辨率为 200 m。它主要用于获取月球表面二维多光谱序列图像及可分辨地元光谱图^[7]。

3.3 可见光-近红外成像光谱仪

一台可见光-近红外成像光谱仪于 2008 年 9 月 6 日随环境和减灾小卫星星座 HJ-1A 卫星成功入轨^[19], 其光谱范围为 0.45~0.95 μm , 平均光谱分辨率为 5 nm, 波段数为 115 个, 空间分辨率为 100 m, 地面幅宽为 50 km。它

主要用于大气监测、城市和海洋变化监测等。

3.4 “天宫一号”高光谱成像仪

我国自行研制的“天宫一号”高光谱成像仪于 2011 年 9 月 29 日伴随“天宫一号”目标飞行器飞入太空^[7]。该高光谱成像仪的空间分辨率与光谱综合指标在当时是我国的最高水平,其可见光-近红外光谱范围为 0.4~1.0 μm ,谱段数为 64 个,光谱分辨率为 10 nm,空间分辨率为 10 m;短波红外光谱范围为 1.0~2.5 μm ,波段数为 64 个,光谱分辨率为 20 nm,空间分辨率为 20 m。它实现了纳米级光谱分辨率成像探测,主要用于国土资源普查、城市环境和水文生态监测等^[20-21]。

3.5 SPARK 双星高光谱成像仪

SPARK 双星高光谱成像仪于 2016 年 12 月 22 日升空,在世界上首次实现了 50 kg 以下微纳卫星高光谱遥感观测^[22]。其光谱范围为 0.42~1.0 μm ,谱段数为 148 个,光谱分辨率为 4 nm,空间分辨率为 50 m,幅宽为 100 km。通过双星配合观测,每天最大能够覆盖约 500 万平方千米的地表范围,在一个月内可实现全国覆盖。该高光谱成像仪服务于农业估产、林业病虫害监测、环境保护、灾害监测和资源开发等领域。

3.6 “高分五号”卫星载荷

“高分五号”卫星于 2018 年 5 月成功发射,是我国第一颗高光谱综合观测卫星^[6-7]。

该卫星运行于太阳同步轨道,其光谱数据覆盖紫外到长波红外波段。“高分五号”卫星共搭载 6 台载荷,具有高光谱分辨率、高精度、高灵敏度的观测能力,多项指标达到国际先进水平^[23-26]。最高观测光谱分辨率为 0.03 cm^{-1} ,光谱定标精度为 0.008 cm^{-1} 。其中,可见光-短波红外高光谱相机的光谱范围为 0.4~2.5 μm ,谱段数为 330 个,可见光光谱分辨率为 5 nm,近红外光谱分辨率为 10 nm,空间分辨率为 30 m,地面幅宽为 60 m。该载荷具有突出的地物探测和识别能力。

3.7 “珠海一号”高光谱卫星载荷

“珠海一号”已分别于 2017 年 6 月 15 日、2018 年 4 月 26 日、2019 年 9 月 19 日成功发射 3 组卫星,按计划后续将继续发射 6 颗高光谱卫星。届时 10 颗高光谱卫星组网成星座,可缩短重访周期和提高动态观测效率^[27]。“珠海一号”高光谱卫星载荷的光谱范围为 0.4~1.0 μm ,谱段数为 256 个,光谱分辨率为 2.5~8 nm,空间分辨率为 10 m,地面幅宽为 150 km。它们是国内幅宽最大的高光谱卫星载荷。

3.8 “资源一号 02D”高光谱卫星载荷

由自然资源部规划发射的“资源一号 02D”卫星于 2019 年 9 月 12 日发射,其搭载的高光谱相机的光谱范围为 0.4~2.5 μm ,谱段数为 166 个,空间分辨率为 30 m。该载荷可获取宽幅高光谱及多光谱数据。

表 2 国内典型星载高光谱成像仪的具体参数

光谱仪	启用时间	光谱范围/ μm	波段数	光谱分辨率/nm	空间分辨率/m	幅宽/km
CMODIS	2002.03	0.4~12.5	34	20	500	—
Sagnac	2007.10	0.48~0.96	32	15	200	—
HJ-1A 有效载荷	2008.09	0.45~0.95	115	5	100	50
“天宫一号” 高光谱成像仪	2011.09	0.4~2.5	64	10/20	10/20	—
SPARK	2016.12	0.4~1.0	148	4	50	100
“珠海一号” 高光谱卫星载荷	2017/2018/ 2019	0.4~1.0	256	2.5~8	10	150
“资源一号 2D” 高光谱卫星载荷	2019.09	0.4~2.5	166	—	30	—

表 2 列出了国内典型星载高光谱成像仪的具体参数。中国星载高光谱成像仪在近十年间发展迅速, 光谱分辨率、空间分辨率以及光谱范围也有了显著提高, 多项技术指标达到国际先进水平。随着观测能力的增强, 高光谱卫星在中国的应用领域也得到了扩充。随着“资源一号”、“高分五号”系列卫星的成功组网, 高光谱卫星的观测能力与应用范围将会得到进一步提升。

4 星载高光谱成像的军事应用

高光谱成像具有较高的光谱分辨率, 通过分析不同波段的信息可以区分景物每个像元光谱的细微差别。星载高光谱成像技术又融合了卫星平台受时间、气候制约较小以及探测范围广等优势, 因此在卫星遥感领域得到了广泛应用, 并在资源普查、地理测绘、环境监测等方面有力推动了国民经济建设发展。此外, 高光谱成像在军事方面也具有极为可观的应用前景。

4.1 战场环境侦察

光学成像卫星的全光谱空间分辨率早已突破 0.1 m, 能够非常详细地描述地物目标形状等信息, 但对真假目标识别的能力有限。星载高光谱成像可充分利用空间维信息之外的光谱维信息, 通过将高光谱融合信息与特征库进行比对来引导其他高空间分辨率成像载荷对目标进行详细分类与确认。它主要应用于以下几个方面: 一是根据真实目标与伪装材料光谱特性的不同进行伪装识别; 二是通过对化学气体进行光谱探测来实现对有毒气体的监测与甄别; 三是根据目标受损后的自身和环境的细微光谱特征变化进行毁伤效果评估来获取战场信息, 从而掌握敌方真实情况。例如, 美国的快速响应战术军用高光谱成像光谱仪 ARTEMIS 可用于发现伪装目标或威胁以及隐藏的爆炸装置、洞口和坑道等。该成像仪还可通过将获得信息与数据库进行比对来发现潜在的目标。除了将数据传输到地面进行详细分析之外, 还可以在轨实时处理并提取目标信息, 从而满足一线指挥官对战场环境信息的实时性要求^[26]。

4.2 海洋军事行动监测

为获取海洋资源、掌握海上话语权, 美国、日本、澳大利亚等国家都在积极地研发专门用于海岸海洋探测的高光谱探测技术^[28]。星载高光谱技术不仅能够对近海区域的各种设施进行高光谱成像识别, 还能够对远海区域进行探测, 如舰船行动轨迹监测、洋流运动情况与海底设施探测等。美国海军研究实验室发射的星载 HICO 海岸带高光谱遥感与近海高光谱成像仪具有采集海下重要水文资料、识别沿海与浅海军事目标及伪装目标、评估浅海水质与海底构造、评估海上大气能见度以及探测水下障碍物等功能。

4.3 战场气象环境预报

气象环境状况对军事行动的计划实施至关重要。良好地掌握气象状况能够给作战行动带来极大便利并减少意外发生, 进而提高行动成功率。利用星载高光谱成像技术可以较为准确地掌握作战地区气流中的水汽、二氧化碳等温度及含量变化情况; 与其他气象观测数据配合, 可以提前数小时有效监测到大气参数的变化, 直接服务于短期天气预报预警和长期天气分析与预报, 从而可靠地预报作战时间内的气象情况。

4.4 导弹预警探测

导弹预警卫星主要利用红外探测器感知导弹主动段飞行过程中发出的强烈红外辐射来提供目标信息。该方式主要依靠获取的单个点的灰度和位置信息, 发现目标较为容易, 但要在主动段实现导弹目标的尽早准确识别往往比较困难。光谱信息是具有类似于指纹特征的物质自身属性, 不同型号导弹的尾焰光谱由于发动机类别、燃料类型、飞行参数以及环境的不同而有较大差别, 因此代表尾焰成分固有属性差异的红外光谱特征信息可以作为弹道导弹主动段飞行时目标识别的一种重要手段。有研究表明, 如果在导弹尾焰 2.7 μm 或 4.3 μm 波长附近的强辐射光谱区间获得高光谱图像, 再利用该图像推算出导弹尾焰的光谱信息并结合其红

外辐射信息,即可推算出导弹类型。

5 总结

星载高光谱成像技术在近二十年得到了飞速发展,在 21 世纪接下来的时间以及更远的未来都将占据着十分重要的位置。凭借能够对成像区域的光谱特性进行详细记录的优势,高光谱卫星遥感在资源普查、地理测绘、环境监测等民用领域得到了广泛的应用,同时在战场环境侦察、海洋军事行动监视、战场气象环境预报、导弹预警探测等军事应用领域也发挥着越来越重要的作用。随着核心部件性能的进一步提高和应用研究的深入发展,光谱和空间分辨率更高、幅宽更大的星载高光谱成像系统不久就会出现,这必将给军民领域应用带来突破性变革。

参考文献

- [1] 李西灿,朱西存. 高光谱遥感原理与方法 [M]. 北京:化学工业出版社,2019.
- [2] 陈培永,王燕. 国外高光谱遥感载荷发展分析 [J]. 飞控与探测,2019,2(2): 10-17.
- [3] Kattenborn T, Maack J, Fassnacht F, et al. Mapping forest biomass from space—Fusion of hyperspectral EO1-hyperion data and Tandem-X and WorldView-2 canopy height models [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, **35**: 359-367.
- [4] Marshall M, Thenkabail P. Advantage of hyperspectral EO-1 Hyperion over multispectral IKONOS, GeoEye-1, WorldView-2, Landsat ETM plus, and MODIS vegetation indices in crop biomass estimation [J]. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, **108**: 205-218.
- [5] Folkman M, Pearlman J, Liao L, et al. EO-1 Hyperion hyperspectral imager design, development, characterization, and calibration [C]. *SPIE*, 2001, **4151**: 40-51.
- [6] 周阳,杨宏海,刘勇,等. 高光谱成像技术的应用与发展 [J]. 宇航计测技术,2017,37(4): 26-29.
- [7] 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.
- [8] Murchie S, Arvidson R, Bedin P, et al. Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars (CRISM) on Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2007, **112** (E5): 431-433.
- [9] Straight S D, Doolittle C, Cooley T, et al. Tactical Satellite-3 Mission Overview and Initial Lessons Learned [R]. Kirtland: Air Force Research Laboratory Space Vehicles Directorate, 2013.
- [10] Lucke R L, Corson M, McGlothlin N R, et al. The Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean (HICO): fast build for the ISS [J]. *SPIE*, 2010, **7813**: 78130D.
- [11] Lucke R L, Corson M, McGlothlin N R, et al. Hyperspectral imager for the coastal ocean: instrument description and first images [J]. *Applied Optics*, 2011, **50**(11): 1501-1516.
- [12] Curtiss O. Davis. The Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean (HICO): Sensor and Data Processing Overview [DB/OL]. https://www.ioccg.org/sensors/Davis_HICO_IOC-CG-15.pdf, 2011.
- [13] Lee C M, Cable M L, Hook S J, et al. An introduction to the NASA Hyperspectral Infra-Red Imager (HyspIRI) mission and preparatory activities [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, **167**: 6-19.
- [14] 张霞,张兵,胡方超,等. 航天成像光谱仪 CHIRS 辐射与光谱性能评价 [J]. 中科科学 E 辑科学技术,2006,36(Z): 85-93.
- [15] The European Space Agency. MERIS Overview [DB/OL]. <https://earth.esa.int/eogateway/instruments/meris/description>, 2021.
- [16] 张磊,董超华,张文建,等. METOP 星载干涉式超高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): 639-642.
- [17] 岳桢干. 意大利 PRISMA 高光谱卫星发射升空 [J]. 红外,2019,40(3): 37-38.

(下转第 52 页)

器探测链能够满足仪器设计要求,其光谱、辐射和几何特性具有独特的挑战性。

参考文献

- [1] 陆燕. 欧空局选定 FORUM 为“地球探索”的第 9 项任务 [J]. *红外*, 2020, **41**(11): 47–48.
- [2] ESA. Earth Explorer 9 Candidate Mission FORUM—Report for Mission Selection [EB/OL]. <https://esamultimedia.esa.int/docs/EarthObservation/EE9-FORUM-RfMS-ESA-v1.0-FINAL.pdf>, 2019.
- [3] Pachot C, Dominguez B C, Oetjen H, et al. The infrared Fourier transform spectrometer and the infrared imager instrument concepts for the FORUM mission, ESA's 9th Earth Explorer [C]. *SPIE*, 2020, **11530**: 115300D.
- [4] Fray S, Lippa M, Semmler E, et al. FORUM payload study for phase A/B1 by a consortium led by OHB System AG and TAS-UK [C]. *SPIE*, 2021, **11852**: 1185225.
- [5] Pachot C, Domínguez B C, Sierk B, et al. Far infrared Fourier transform spectrometer bread-board activities for the FORUM mission, ESA's 9th Earth Explorer [C]. *SPIE*, 2021, **11852**: 1185224.
-
- (上接第 30 页)
- [18] Pan D L, Wang D F, He X Q. Study on Marine Application Potentiality of CMODIS/SZ-3 [J]. *Engineering Sciences*, 2004, **2**(2): 1–5.
- [19] 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.
- [20] 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 [J]. *遥感学报*, 2016, **20**(5): 850–857.
- [21] 覃帮勇, 刘志文, 李盛阳. 天宫一号高光谱数据的陆地应用 [J]. *载人航天*, 2018, **24**(4): 546–552.
- [22] 郭崇滨, 刘善伍, 陈宏宇. 面向快速响应的 SPARK 高光谱卫星系统设计 [J]. *科学技术与工程*, 2019, **19**(33): 403–409.
- [23] 刘银年, 孙德新, 胡晓宁, 等. 高分五号可见短波红外高光谱相机设计与研制 [J]. *遥感学报*, 2020, **24**(4): 333–344.
- [24] Dong S Y, Sun G Y, Du Y M, et al. Image Quality Assessment for Visual and Infrared Multi-spectral Imager of Gaofen-5 [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2020, **35**(2): 381–388.
- [25] 范斌, 陈旭, 李碧岑, 等. “高分五号”卫星光学遥感载荷的技术创新 [J]. *红外与激光工程*, 2017, **46**(1): 1–7.
- [26] 孙允珠, 蒋光伟. “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.
- [27] 李先怡, 范海生, 潘申林, 等. 珠海一号高光谱数据卫星数据及应用概况 [J]. *卫星应用*, 2019, **8**(8): 12–18.
- [28] 王建成, 朱猛. 高光谱侦察技术的发展 [J]. *航天电子对抗*, 2019, **35**(3): 37–45.